



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Der Einfluss von Winterniederschlag auf Muren in den
Österreichischen Alpen“

verfasst von / submitted by

Laurin Bremhorst

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2023 / Vienna 2023

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

UA 066 855

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

Masterstudium Geographie

Betreut von / Supervisor:

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1. Einleitung.....	1
2. Forschungsfragen und Hypothesen.....	2
3. Theoretische Grundlagen	3
3.1 Niederschlag	3
3.1.1 Niederschlag Theorie.....	4
3.1.2 Niederschlagstypen	5
3.1.3 Niederschlagsverteilung Alpen.....	7
3.1.4 Schneefall und Schneeschmelze.....	9
3.1.5 Winterniederschlag	11
3.2 Der Prozess Mure	12
3.2.1 Bodenfeuchte und Oberflächenabfluss.....	12
3.2.2 Erosion.....	12
3.2.3 Gravitative Massebewegungen	13
3.2.4 Muren	15
3.2.4.1 Definition	15
3.2.4.2 Prozess.....	15
3.2.4.3 Auslösung von Muren.....	16
4. Methodische Konzeption	19
4.1 Literaturrecherche.....	19
4.2 Daten	20
4.2.1 Muren	20
4.2.2 Klimadaten.....	20
4.3 Datenauswahl	21
4.3.1 Auswahl Wintermonate	21
4.3.2 Murendaten.....	21
4.3.3 Relevante Klimavariablen und unvollständige Klimadaten.....	22
4.4 Auswahl und Abgrenzung des Untersuchungsgebiet.....	23

4.4.1	Auswahlkriterien Untersuchungsgebiet	23
4.4.2	Grenzen des Untersuchungsgebiet	24
4.5	Analyse der Daten	25
4.5.1	Vorbereitung der Analyse.....	25
4.5.2	Durchführung der Analyse und Visualisierung der Ergebnisse	26
5.	Muren in den Österreichischen Alpen	27
5.1	Murenereignis Bad Gastein November 2019	27
5.1.1	Statistik Ereignisse November 2019	27
5.1.2	Niederschlag November 2019	29
5.1.3	Analyse der Ereignisse November 2019.....	33
5.2	Analyse Mechanismen von Muren in Alpinen Regionen	36
5.2.1	Zeitliche und Räumliche Verteilung	36
5.2.2	Einflussfaktoren auf Muren in den Alpen.....	37
5.2.2.1	Verteilung Niederschlag	37
5.2.2.2	Temperatur.....	38
5.2.2.3	Schneedecke.....	38
5.2.2.4	Schneesmelze im Hochgebirge.....	40
5.2.2.5	Hydrometrologische Konditionen und Muren im Hochgebirge der Alpen	43
5.2.3	Muren in niederen alpinen Zonen.....	47
5.2.4	Vorheriger Niederschlag und Schwellenwerte.....	49
5.2.4.1	Bestimmung Niederschlagsschwellen	49
5.2.4.2	Vorfeuchte des Bodens	51
5.2.4.3	Durchschnittlicher Niederschlag und Niederschlagsschwellen.....	53
6.	Analysenergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten	54
6.1	Statistiken zu Muren in Österreich.....	54
6.2	Untersuchungsgebiet	55
6.2.1	Beschreibung	55
6.2.2	Statistiken zu Klimadaten	57
6.2.2.1	Temperaturwerte	57
6.2.2.2	Niederschlag.....	58
6.2.3	Einschränkungen bei Klimadaten und dem Untersuchungsgebiet	59
6.3	Vergleich und Korrelation Klimastationen	60
6.3.1	Station Kolbnitz und Spittal an der Drau	60
6.3.2	Station Reisseckhütte und Station Kolbnitz	61
6.4	Zusammenhang von Niederschlägen und dem Auftreten von Muren	63
6.4.1	Übersicht Muren im Untersuchungszeitraum.....	63

6.4.2 Niederschlagsperioden und Murenereignisse	64
6.4.3 Niederschlagsmenge tägliche Maximalwerte	67
6.5 Analyse einzelner Murenereignisse	68
6.5.1 November 2019	68
6.5.2 April 1975	69
6.5.3 Dezember 2020	69
6.5.4 November 2012	70
6.5.5 März 2014	71
7. Diskussion	73
7.1 Prozesse Muren in Wintermonaten	73
7.2 Niederschlagsmengen und Muren im Untersuchungsgebiet	76
7.3 Verteilung von Muren	79
7.4 Forschungsfragen und Hypothesen	81
8. Ausblick	83
9. Literaturverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Mittlerer Jahresniederschlag von 1979 bis 2008 (30-Jährige Periode). Braune Linie ist die 800 m Höhenlinie, (Ritter, 2017).	4
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung zur Entstehung von orographischem Niederschlag (Gabler et al., 2007).	6
Abbildung 3-3: Dargestellt sind Hochdruck- und Tiefdruckgebiete, Satellitenbild, Kaltfronten (blau), Warmfronten (rot) und Okklusionsfronten (pink). Deutlich ist das Tief vor Island mit seinem Frontsystem zu erkennen (ZAMG, 2017).	6
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Wolkenbildung bei Fronten (Gabler et al., 2007).	7
Abbildung 3-5: Durchschnittlicher Niederschlag unterschiedlicher Monate von 1971–1990 (Wehren et. al., 2010).	8
Abbildung 3-6: Mittlerer Tagesniederschlag 2006 – 2008: (links) Winter, Dezember-Februar; (rechts) Sommer, Juni- August (Ritter, 2017).	9
Abbildung 3-7: Langjährige Niederschlagszeitreihen Kitzbühel (790m). (dünne Linien) markieren Einzeljahre, (dicke Linien) 20-jähriger Filter, (Böhm, 2008) und (ZAMG, Klima).	9
Abbildung 3-8: Rückgang der Schneebedeckung in verschiedenen Höhenlagen der Alpen (Baumgartner, 2021).	10
Abbildung 3-9: Mittlere Schneebedeckungsdauer Mitteleuropa, Alpen (links unten) (DLR Earth Observation Center, 2016).	11
Abbildung 3-10: Klassifikation von (Varnes, 1978) und (Cruden and Varnes, 1996), reproduziert vom British Geological Survey.	14
Abbildung 3-11: Luftbild von Muren in Siano, Italien Mai 1996 (Hungar et. al., 2014).	17
Abbildung 3-12: Mure mit viel Geschiebe; nach starker Schneeschmelze, im Stammbach Gemeinde Gad Goisern, (links) Murkanal (rechts) Verkläusung (Luzian, 2002).	18
Abbildung 5-1: Verteilung aller Wildbachereignisse im Zeitraum 15. bis 17. November (Hübl und Beck, 2020).	27
Abbildung 5-2: Auslöser mit zusätzlichen Phänomenen der Ereignisse in der Kategorie Wasser, zwischen dem 15. und 17. November 2019 (Hübl und Beck, 2020).	28
Abbildung 5-3: Niederschlag Österreichweit November 2019, visualisiert, Relativiert (links) und Absolut (rechts), (ZAMG, Klima).	29
Abbildung 5-4: Verlauf der Schneehöhe am Zettlersfeld im Winter 2019/2020 (Lawinenwarndienst Land Tirol, 2020).	30
Abbildung 5-5: Temperatur und Niederschlagsverlauf November 2019, Bad Gastein (Hübl und Beck, 2020).	30
Abbildung 5-6: Gemessene Schneehöhen Bad Gastein, November 2019 (Hübl und Beck, 2020).	31

Abbildung 5-7: Verteilung der Ereignisse vom 12. bis 17. November 2019, Unterteilung in 5 Untersuchungsgebiete (Hübl und Beck, 2020).	32
Abbildung 5-8: Verteilung der Ereignisse vom 12. bis 17. November 2019, im Hintergrund liegt eine Karte mit Hangneigungsklassen, (rechts oben) Verteilung der Anrissbereiche der Hangmuren und Murgängen (Talmuren) nach der Hangneigung (Hübl und Beck, 2020).	33
Abbildung 5-9: Skizzierung von bestimmten Jahreszeiten in denen die höchsten täglichen Niederschlagsmengen auftreten in den Südalpen Österreichs (Steinhäuser, 1955).	34
Abbildung 5-10: Muren in Dorfgastein, Nov. 2019 (Foto von AP Kresten Joensson, orf.at, 2019).	35
Abbildung 5-11: Muren im Pinzgau, 16. November 2019 (Foto von Land Salzburg, MeinBezirk, 2019).	36
Abbildung 5-12: Räumliche Verteilung (oben) und monatliche Frequenz (unten) von aufgezeichneten Muren (n=1907), in verschiedenen Regionen Tirols, Zeitraum 1559 – 2008, (Kaitna et. al., 2014).	36
Abbildung 5-13: Verteilung der durchschnittlichen monatlichen Niederschläge, in verschiedenen Zonen (schwarz eingerahmt) der Alpen, (Frei und Schär, 1998).	37
Abbildung 5-14: Wassergesättigte Schichten zwischen den Schneeschichten, aufgrund von Schmelze an der Oberfläche oder Regen (Foto von Lukas Ruetz, Ruetz, 2020).	39
Abbildung 5-15: Muren eingeteilt nach Monat des Auftretens, zusammen mit dem dominanten Auslöser, welcher sich aus der Relevanz gegenüber anderen Faktoren und mithilfe der modellierten Daten mit unterschiedlichen Sicherheiten (dunkel – hell, hohe – niedrige Sicherheit abgeschätzt wurde (Mostbauer et. al., 2018).	40
Abbildung 5-16: Verlauf von modellierten Parametern aufgrund aufgezeichneter Daten im Pitztal, mit verschiedenen Murenereignissen (rot) in den Jahren 1965, 1989 und 2011 (Mostbauer et. al., 2018).	42
Abbildung 5-17: Hydrometrologische Konditionen zu drei verschiedenen Ereignissen im Untersuchungsgebiet Pitztal. (b) Das Ereignis am 6. August, 1987 wurde durch langanhaltende Niederschläge ausgelöst, welche die Bodenfeuchte graduell erhöhten. Am Ereignistag kam es zu zu einem starken Temperatursturz. (c) Am 11. Juli, 2010 kam es zu Starkniederschlägen, verbunden mit starken Temperaturschwankungen, nachdem es in den Tagen davor zu viel Evapotranspiration kam, welche die Bodenfeuchte verringerte. (d) Das Ereignis wurde ausgelöst durch starke Schneeschmelze über mehrere Tage, was zu erhöhter Bodenfeuchte führte (Prenner et. al., 2019).	44
Abbildung 5-18: Zeitliche Verteilung von Muren und fluvialen Transporten in verschiedenen Untersuchungsgebieten (Prenner et. al., 2019).	45
Abbildung 5-19: Überschreitungswahrscheinlichkeit der verschiedenen 7- Tage Konditionen vor Ereignissen, verglichen mit allen 7- Tage Konditionen über das ganze	

Jahr. Niederschlagssummen, durchschnittliche Bodenfeuchte, Abflusssumme und durchschnittliche potenzielle Evapotranspiration (Prenner et. al., 2019).....	46
Abbildung 5-20: Mure im Illgraben, Wallis, Schweiz (links) (WSL, 2022), Chalk Cliffs, Colorado USA (rechts) (Coe et. al., 2008).	48
Abbildung 5-21: Weltweite Niederschlagsschwellenwerte für Muren aus Wieczorek und Galde, (2005); Crosta und Frattini (2000). Caine (1980), Innes (1983), Cancelli und Nova (1985), Caraini et. al. (1992) beziehen sich auf globale oder großflächige Gebiete, Larsen and Simon (1993), Cannon and Ellen(1985), Wieczorek (1987), Wilson and Wieczorek (1995), Montgomery et. al. (2000) auf lokalere Gebiete.	50
Abbildung 5-22: Daily Rainfall Model (Glade, 1998), Niederschlagsschwellen für Rutschungen und Hangmuren, von 1862-1995, Wellington Neuseeland, [Number of counts] Anzahl der Regentage, Markiert minimale und maximale Wahrscheinlichkeitsschwelle für das Auftreten von Rutschungen und Hangmuren.	51
Abbildung 6-1: Ereignisse der Kategorie "Murgang und muratiger Feststofftransport", des Datensatz der WLV nach Bundesland, insgesamt.	54
Abbildung 6-2: Ereignisse der Kategorie "Murgang und muratiger Feststofftransport" des Datensatz der WLV nach Bundesland, in den Wintermonaten November bis April.....	55
Abbildung 6-3: Gemittelte tägliche Durchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet, dargestellt mit gleitendem Mittelwert (180 Tage Periode) und linearem Trend über den Untersuchungszeitraum 1954-2023.	57
Abbildung 6-4: Häufigkeit tägliche Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet, in den Kategorien: Kein Niederschlag, mehr als 1 mm, 5, 10, 30, 50 und 70 mm Tagesniederschlag.	58
Abbildung 6-5: Gemittelte tägliche Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet, dargestellt mit gleitendem Mittelwert (180 Tage Periode) und linearem Trend über den Untersuchungszeitraum 1954-2023.	59
Abbildung 6-6: Vergleich tägliche Niederschlagsmengen zwischen Kolbnitz (blau) und Spittal an der Drau (orange), 1977- 1999.	61
Abbildung 6-7: Vergleich tägliche Niederschlagsmengen zwischen Kolbnitz (blau) und Reisseckhütte (orange), 1954- 1976.....	62
Abbildung 6-8: Übersichtsdiagramm; Muren und tägliche Murenanzahl (rot), tägliche Niederschlagsmengen (blau), tägliche maximale Temperatur (orange), gleitender Mittelwerter (180 Tage Periode) (hellbraun).....	63
Abbildung 6-9: Gemittelte täglichen Niederschlagsmenge in der <u>3-Tages Periode</u> (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).....	64
Abbildung 6-10: Gemittelte täglichen Niederschlagsmenge in der <u>7-Tages Periode</u> (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).....	65

Abbildung 6-11: Gemittelte täglichen Niederschlagsmenge in der <u>30-Tages Periode</u> (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).....	66
Abbildung 6-12: Gemittelte täglichen Niederschlagsmenge in der <u>60-Tages Periode</u> (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).....	66
Abbildung 6-13: Witterung zum Murenereignis November 2019; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).	68
Abbildung 6-14: Witterung zum Murenereignis April 1975; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), tägliche Schneehöhe (schwarze Linie), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).....	69
Abbildung 6-15: Witterung zum Murenereignis Dezember 2020; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).	70
Abbildung 6-16: Witterung zum Murenereignis November 2012, Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).	71
Abbildung 6-17: Witterung zum Murenereignis März 2014; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Gemeinde und jeweilige Bezirke, welche das Untersuchungsgebiet in Kärnten umfassen.....	24
Tabelle 6-1: Korrelation und Statistik der Klimastationen Kolbnitz und Spittal an der Drau, 1977- 1999	61
Tabelle 6-2: Korrelation und Statistik der Klimastationen Kolbnitz und Reisseckhütte, 1954- 1976	62

Kurzfassung

Der Zusammenhang zwischen Niederschlag in den Wintermonaten und dem Auftreten von Muren in den Österreichischen Alpen wird in dieser Masterarbeit bearbeitet. Im Untersuchungsgebiet in Spittal an der Drau, in Kärnten, wurden bestehende Aufzeichnungen von Murenereignissen mit täglichen Niederschlagsmengen und anderen Klimadaten verglichen. Zusätzlich wurden die Mechanismen von Muren in den Alpen im Winter mithilfe von Literatur analysiert.

Die Daten zu den Muren, genau zu Ereignissen der Prozessart Murgang und murartiger Feststofftransport, kommen von der WLV (Wildbach und Lawinenverbauung) in Österreich. Die Klimastation Spittal an der Drau und Kolbnitz der ZAMG lieferte den größten Teil der Klimadaten für den Vergleich. Der Untersuchungszeitraum von 1954 bis 2023 umfasst nur die Wintermonate, definiert mit Anfang November bis Ende April.

Um die Korrelation von Niederschlägen und Muren zu analysieren, wurden die täglichen Niederschlagsmengen in verschiedenen langen Perioden gemittelt. Der Tag mit den meisten aufgezeichneten Muren im Untersuchungsgebiet, der 17. November 2019, korreliert mit der 3-, 7-, 30- und 60-tägigen, gemittelten Periode mit dem meisten Niederschlag, jedoch nicht mit dem täglichen Höchstwert. Das Untersuchungsgebiet im Süden der Österreichischen Alpen verzeichnete vergleichsweise niederschlagsreiche und milde Phasen. Im Rahmen der Untersuchung korrelieren hohe tägliche Niederschlagsmengen weniger deutlich mit Muren.

Die Ergebnisse bestätigen zum Teil, dass aufgrund der geänderten Umstände in den Wintermonaten, andere Mechanismen bei Muren wirken. Neben hohem Niederschlag kann Tauwetter, rapide Schneeschmelze und geringe Verdunstung, das Auftreten von Muren bevorzugen. Frost und fester Niederschlag ist jedoch der Grund für das seltenere Auftreten von Muren in den Wintermonaten. Diese Faktoren sollten neben der Niederschlagsmenge miteinbezogen werden.

Abstract

This thesis contains an analysis on the relation of precipitation in the winter months and the triggering of debris flows in the Austrian Alps. The study area in Spittal an der Drau, in Carinthia is used to correlate debris flow events in the months from November to April, with daily precipitation numbers. The mechanism and influencing factors of debris flows in the Alps during winter is furthermore analysed, with additional literature.

Data of the Lawinen und Wildbachverbauung of recorded debris flows events in Austria, was used in the analysis. Two climate stations of the ZAMG in the area, Kolbnitz and Spittal an der Drau, provided the daily precipitation and temperature data consecutively for the period from 1954 to spring 2023. The daily precipitation was averaged in 3, 7, 30, and 60 day periods and correlated with the number of recorded debris flow events in the study area. In addition, the debris- flow events were individually analysed in diagrams, with climate data from the study area.

The event in November 2019 with the most debris flows, correlates with the highest precipitation values of all precipitation periods, except the highest daily value. The results indicate that the daily precipitation alone, in comparison to longer precipitation periods, might not be suitable in predicting debris flows in the winter months of the southern Austrian Alps. Mild temperatures can contribute or enable the triggering of debris flows by dictating snowmelt and therefore need to be considered together with precipitation.

1. Einleitung

Die Alpen sind ein spezielles Gebirge. Die Landschaft und die Prozesse sind beeindruckend, jedoch auch oft unberechenbar. Doch einmalig ist die Geschichte und Beziehung der Bevölkerung mit der Natur. In wahrscheinlich keinem anderen Gebirge, speziell den Österreichischen Alpen gibt es so detaillierte Aufzeichnungen, welche so lange zurückreichen (Luzian, 2002). Früh war man gezwungen sich mit der Natur zu befassen um zu überleben. Kaum Vorhersehbares und extremes Wetter, in Kombination mit instabilen und dynamischen Landschaften, führte oft zu Naturkatastrophen. Landwirtschaft, fortgeschrittene Zivilisationen und Städte, sowie Handel und Kriege trugen zu Veränderung und Verbesserung der Möglichkeiten der Beobachtung und Bewältigung der Natur bei. Mit der Zeit setzten sich mehr wissenschaftliche Methoden durch und aufgezeichnete Daten wurden genauer und vergleichbarer mit rezenten Aufzeichnungen (Glade et. al., 2020). Heutzutage ist der Alpenraum wissenschaftlich sehr relevant, die Vielzahl an Artikeln und dichte an verschiedensten Messstationen reflektieren dieses Phänomen. Die Notwendigkeit dazu besteht weiterhin und wird wahrscheinlich noch relevanter werden. Die Abhängigkeit von der Umwelt hat sich nicht geändert; hoher Siedlungsdruck, Tourismus und Transitverkehr, bedeuten intensivere Nutzung der Alpenregionen und höhere Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren. Besonders die höhere Dichte an Infrastruktur kann die Wahrscheinlichkeit von Schäden aufgrund von Naturereignissen erhöhen. Hinzu kommen Veränderungen durch den Klimawandel, welche eventuell manche Prozesse und deren Auswirkungen stark beeinflussen werden (Kotlarski et. al., 2023). Bei den Naturgefahren sind Muren nur ein Teil der Gravitativen Massebewegungen (Dikau und Glade, 2002), angetrieben durch hohe potentielle Energie und instabile Systeme in Gebirgen wie den Alpen. Die Auslöser dieser Prozesse oder die Umstände, welche diese ermöglichen, variieren je nach Prozesstyp (Cruden und Varnes, 1996). Oft spielt die Witterung eine sehr wichtige Rolle, jedoch ist diese nur kurzfristig oder kaum vorhersehbar. Diese Umstände machen eine Abschätzung von Risiken durch Naturgefahren, sowie die Umsetzung von effektiven Schutzmaßnahmen in den Alpenregionen, selbst heutzutage sehr schwierig (Glade et. al., 2020).

Zumindest in den Sommermonaten sind Muren sehr relevant (Kaitna et. al., 2014). Weniger jedoch im Winter, hier existieren andere Naturgefahren mit großen Auswirkungen, wie zum Beispiel Lawinen. Niederschlag ist notwendig für beide genannten Naturgefahren, jedoch besonders wichtig ist dieser für das Auftreten von Muren. Für das Auslösen von Muren benötigt es vor allem viel Wasser (Iverson, 1997). Bestimmte feuchte Umstände am Boden, könnten eventuell auch in den Wintermonaten entstehen und zu Muren führen. Wie zum Beispiel im November 2019, beschrieben von Hübl und Beck (2020). Jene Ereignisse könnten wichtig sein um Muren in den Wintermonaten genauer zu analysieren.

2. Forschungsfragen und Hypothesen

Das allgemeine Ziel der Arbeit ist, den Einfluss von Winterniederschlag auf Muren in den Österreichischen Alpen zu analysieren. Um das zu realisieren wurden drei Forschungsfragen mit jeweils einer Hypothese formuliert. Gegen Ende der Arbeit werden die Ergebnisse der Analyse in Verbindung mit den Forschungsfragen gesetzt.

Forschungsfrage 1

Welche Faktoren beeinflussen Muren in den Wintermonaten und wie unterscheiden sich diese zu den Sommermonaten?

Hypothese 1

Frost und Tauwetter, sowie Schneeschmelze und geringe Verdunstung, beeinflussen Muren deutlich in den Wintermonaten, jedoch gibt es weniger Niederschlag, besonders Extremniederschläge sind häufiger in den Sommermonaten.

Forschungsfrage 2

Wie beeinflussen höhere Niederschlagsmengen das Auftreten von Muren in den Wintermonaten, November bis April, in den österreichischen Alpen?

Hypothese 2

Höhere Niederschlagsmengen in den Wintermonaten führen zu mehr Muren Ereignissen

Forschungsfrage 3

Welche regionalen Unterschiede bestehen in Österreich beim Winterniederschlag, im Bezug auf Muren?

Hypothese 3

In Mittelgebirgen in den nördlichen und südlichen alpinen Randlagen, fördert die höhere Niederschlagsmenge das häufigere Auftreten von Muren

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Niederschlag

Niederschlag - der essentielle Teil des Wasserkreislaufs - ohne diesen wäre nicht nur das Thema dieser Arbeit überflüssig, sondern auch das Leben auf diesem Planeten wie wir es kennen. Das ist natürlich bekanntes Wissen, ohne Niederschlag und verfügbares Süßwasser könnten Menschen nicht überleben. Sehr trockene Gebiete sind meist dünn oder gar nicht besiedelt, Wasser wird unter hohem Aufwand beschafft und Bewässerung ist oft sehr kostspielig (Viviroli und Weingartner, 2007). Langjährige Dürren können zu Wassermangel und Ernteauffällen führen, sowie lokale Ökosysteme gefährden.

Das andere nicht weniger problematische Extrem - Starkregen und Überflutungen - tritt in sehr vielen Gebieten verstärkt auf. Oft auch in denen, die auch von Trockenheit betroffen sind oder generell dicht besiedelt sind. Die dichte Besiedelung selbst macht Gebiete noch weniger resilient gegenüber Überflutungen (Müller und Bistry, 2008).

Zu viel Niederschlag oder zu wenig, kann in beiden Fällen problematisch werden, für die lokale Bevölkerung. Wichtig ist auch in welchen Zeitskalen sich die Prozesse abspielen. Problematisch sind die generell viel kleinere Zeiträume bei Starkniederschlägen (Rudolf und Malitz, 2008).

Verglichen mit vielen Gebieten der Erde, herrscht in den Alpen eher ein milderes Klima. Extreme Trockenheit oder monsunartige Regenfälle sind nicht die Regel. Aufgrund der Höhe und Topographie besteht ein alpines Klima. Obwohl sich ein Großteil des Alpenbogens in der gemäßigten Klimazone befindet, kann das lokale Klima sehr stark variieren, abhängig von Meereshöhe, Topographie und Exposition zu feuchten Luftströmungen. In den höheren Zonen besteht ein kaltes Klima, oft mit Permafrost, jedoch kein arides Klima. Niederschläge sind hier meist hoch, gegenüber dem Rest Mitteleuropas.

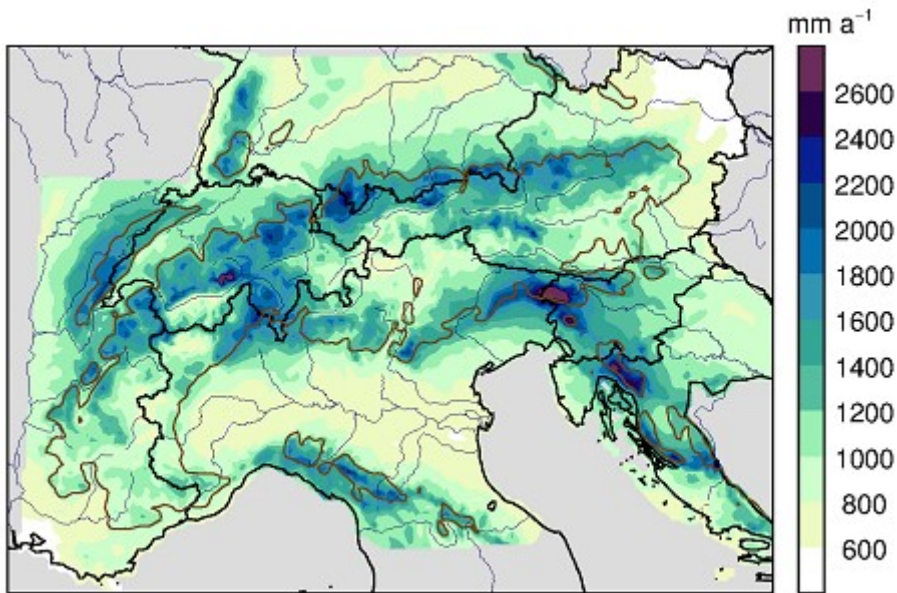


Abbildung 3-1: Mittlerer Jahresniederschlag von 1979 bis 2008 (30-Jährige Periode). Braune Linie ist die 800 m Höhenlinie, (Ritter, 2017).

Die Alpen werden auch als „Wasserturm“ oder „Wasserschloss Europas“ bezeichnet (Frei und Schmidli, 2006), im Vergleich zu den umgebenden Regionen fällt dort mehr Niederschlag, teilweise mehr als doppelt so viel (siehe Abb. 3.1). Im Winter fällt der Niederschlag meist in fester Form und trägt erst im Frühjahr durch Schneeschmelze zu erhöhtem Abfluss bei. Die Gletscher tragen hingegen im Sommer mehr zum Abfluss bei, besonders in heißeren Perioden. Der Abfluss der Alpen trägt auch überproportional zu Flüssen im Einzugsgebiet bei, welche große Teile Mitteleuropas mit Wasser versorgen. Zum Beispiel bei der Mündung des Rheins stammt 44% des Wassers aus den Alpen, obwohl die Fläche nur 15% des Einzugsgebietes ausmacht (Frei und Schmidli, 2006). Der Rhein ist durch einen Kanal mit der Donau verbunden, welche auch in den Alpen entspringt und einen großen Teil des Wassers von dort bezieht. Eine direkte Transportverbindung von Rotterdam nach Constanta am Schwarzen Meer braucht das Wasser aus den Alpen. Der Transport über navigierbare Flüsse in Mitteleuropa, sowie die Stromproduktion durch Staudämme ist eindeutig abhängig von Niederschlägen, sowie Schnee und Gletscherschmelze in den Alpen.

3.1.1 Niederschlag Theorie

Unter Niederschlag wird verstanden, wenn sich Wasser- oder Eisteilchen, welche durch Kondensation in der Atmosphäre entstanden sind, zu den die Atmosphäre begrenzten Oberflächen gelangen und dort niederschlagen (Kraus, 2004). Niederschlag tritt sowohl in flüssiger, als auch fester Form auf. Zusätzlich wird noch im Tropfendurchmesser oder Partikeldurchmesser unterschieden, bei festem Niederschlag auch in der Dichte und Form. Schneekristalle kommen in verschieden Formen und Größen vor und lassen sich leicht abgrenzen zu Graupel oder Hagel. Dieser kann bis zu 15cm im Durchmesser anwachsen und dadurch kostenintensive Schäden verursachen. Graupel hat meist eine

deutlich kleinere Korngröße und Dichte, kann sehr wohl auch eine Vorstufe zum Hagel werden. (Ritter, 2017)

Wieso es überhaupt Niederschlag gibt, liegt an der Verdunstung, an der Zusammensetzung der Atmosphäre, sowie dem Vorkommen von Wasser in flüssiger Form. Die durchschnittliche Verdunstungs- und Niederschlagsrate liegt global gesehen klarerweise im Gleichgewicht, bei ungefähr 1.000 mm/a. In der Atmosphäre befindet sich ungefähr $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ Wasser. Würde es auf der gesamten Oberfläche der Erde verteilt werden, wäre diese mit 25-26 mm Wasser bedeckt (Ritter, 2017). Das heißt es wird ungefähr 40-mal im Jahr umgesetzt und hätte demnach eine Verweildauer von ungefähr 10 Tagen in der Atmosphäre.

Bei Anhebung oder Abkühlung von Luftmassen, können diese übersättigen, da die absolute Luftfeuchtigkeit von der Lufttemperatur abhängig ist. Die Wassermoleküle kondensieren an Kondensationskernen, größtenteils sind das Aerosole. So bilden sich Wassertropfen, welche in untere atmosphärische Schichten fallen. Teilweise erreicht der Niederschlag nicht die Erdoberfläche, sondern verdunstet vorher. Ist viel Feuchtigkeit vorhanden, stoßen Wassertropfen aufeinander und größere Tropfen entstehen. Bei tieferen Temperaturen gefriert unterkühlter Wasserdampf hingegen an Kondensationskernen und bildet Schneeflocken. Selbst bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt an der Erdoberfläche kann es zu Schneefall kommen, mitunter weil das Kondensationsniveau höher und der Wasserdampf unter dem Gefrierpunkt ist (Kraus, 2004).

3.1.2 Niederschlagstypen

Generell gibt es drei Niederschlagstypen. Konvektiver Niederschlag, ist oft verbunden mit Gewittern und Starkniederschlägen; in den Tropen ist er verantwortlich für die ganzjährig hohen Niederschläge, in den gemäßigten Klimazonen, sowie im Alpenraum ist er vor allem im Sommer sehr häufig. Der Grund ist, dass dafür meist intensive Sonneneinstrahlung notwendig ist. Die Erdoberfläche wird durch Sonneneinstrahlung erwärmt und der latente und fühlbare Wärmestrom erwärmt wiederum die angrenzenden Luftschichten. Die Dichte des Luftpaketes verringert sich durch die Erwärmung und es steigt auf. Kommt es beim Aufsteigen zur Kondensation, kühlt das Luftpaket geringer ab als die Umgebungstemperatur, weil Kondensationswärme hinzugefügt wird. Das Luftpaket kann so sehr weit aufsteigen, so lange genug Feuchtigkeit und Konvektion durch Erwärmung, gegeben ist. So entstehen Wolkentürme und Sommergewitter welche zu Starkniederschlägen, Hagel, Blitzschlägen und Sturmböen führen können. In den Alpen tritt Konvektiver Niederschlag teilweise regelmäßig auf. Gewitterzellen entstehen bevorzugt im Alpenraum, wo Topographie und Höhe vertikale Konvektion zusätzlich verstärken. (Ritter, 2017) Meistens wandern diese gegen Ende eines Sommertages in das Alpenvorland weiter.

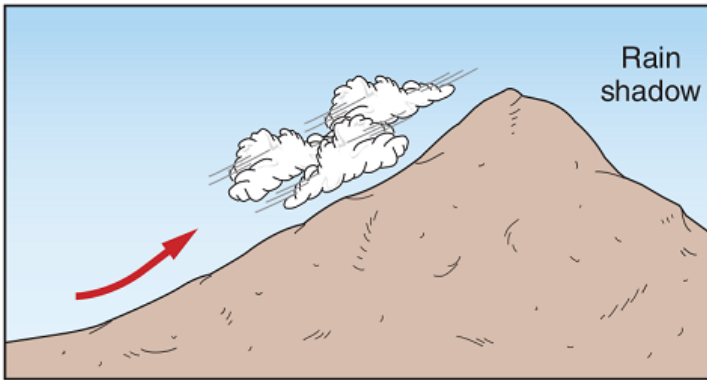


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung zur Entstehung von orographischem Niederschlag (Gabler et al., 2007).

Orographischer Niederschlag, hat auch mit der Hebung von Luftmassen zu tun. Der Grund der Hebung ist hier die Anströmung eines Hindernisses, ein Gebirge wie die Alpen zum Beispiel. Die Luftmassen werden angehoben, wenn diese über das Gebirge strömen und es kommt zu Kondensation, Wolkenbildung und Niederschlag an der angeströmten Seite und Erwärmung an der abgewandten Seite. Die Luftschichtung spielt hier auch eine wichtige Rolle; labile Luftschichtungen begünstigen deutlich orographischen Niederschlag, während bei stabilen Luftschichtungen dafür stärkere Anströmung notwendig ist (Ritter, 2017).

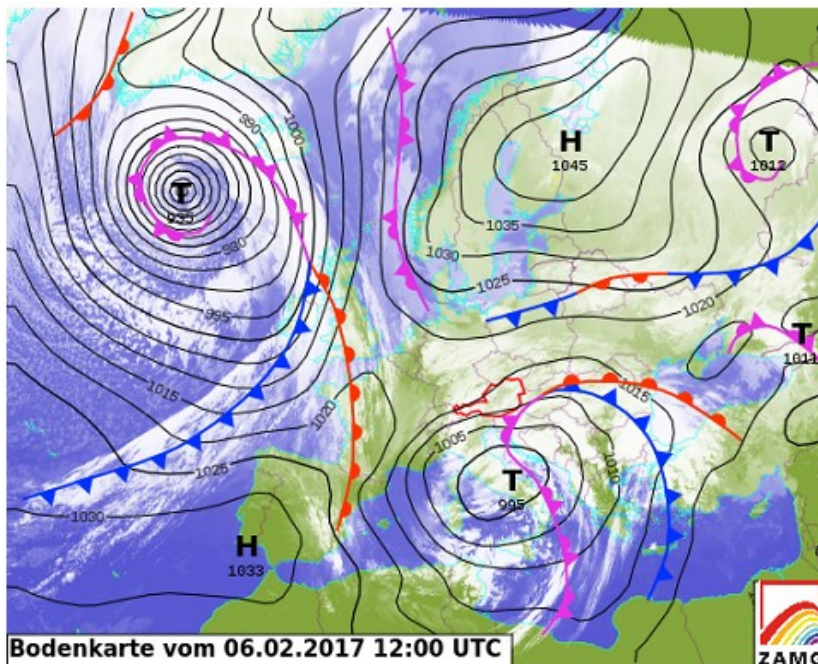


Abbildung 3-3: Dargestellt sind Hochdruck- und Tiefdruckgebiete, Satellitenbild, Kaltfronten (blau), Warmfronten (rot) und Okklusionsfronten (pink). Deutlich ist das Tief vor Island mit seinem Frontensystem zu erkennen (ZAMG, 2017).

In den gemäßigten Breiten wechseln sich Fronten mit verschiedenen Druck- und Temperatur Verhältnissen, auch unterschieden in Hoch- und Tiefdruckgebiete, regelmäßig ab. Frontaler Niederschlag entsteht gewöhnlich an den Grenzen dieser Fronten, wenn sich kältere und dichtere Luft unter warme Luft schiebt und eine Hebung dadurch erzeugt wird. Auch konvektive Niederschläge

können dabei, aufgrund von Änderung der Luftschichtungen entstehen. Langsame bewegende Fronten können außergewöhnliche Wetterphasen, wie langanhaltende Niederschläge oder Trockenphasen verursachen. Treffen Tiefdruckgebiete mit kalten Luftmassen auf die Alpenränder, kann sich die Luft stauen und es kommt dort zu längeren Niederschlagphasen (Ritter, 2017).

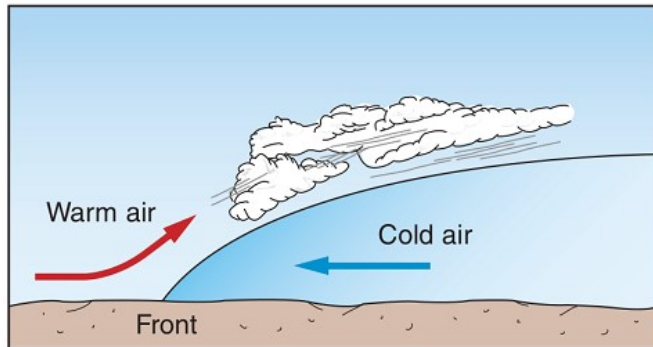


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Wolkenbildung bei Fronten (Gabler et al., 2007).

3.1.3 Niederschlagsverteilung Alpen

Der Niederschlag in den Alpen ist, wie schon erwähnt, vergleichsweise hoch in Mitteleuropa. Jedoch gibt es starke Variationen in der räumlichen Verteilung des Niederschlages im Alpenraum. Generell nimmt der Niederschlag mit der Höhe zu, großflächig betrachtet ist der Höchstwert jedoch schon bei 1.000 m an den Alpenrändern erreicht (Frei und Schmidli, 2006). Punktuell in hohen Lagen, zum Beispiel am Jungfraumassiv, werden bis zu 4.000 mm Jahresniederschlag gemessen. Zentrale alpine Gebiete sind meist selbst in sehr hohen Lagen trockener als Randlagen der Alpen. Manche inneralpinen Täler, werden auch als Trockentäler bezeichnet. Eine relative Bezeichnung, da diese Täler oft knapp oder über 700mm Jahresniederschlag vorweisen, in Wien zum Beispiel sind es 670 mm (ZAMG, 2021).

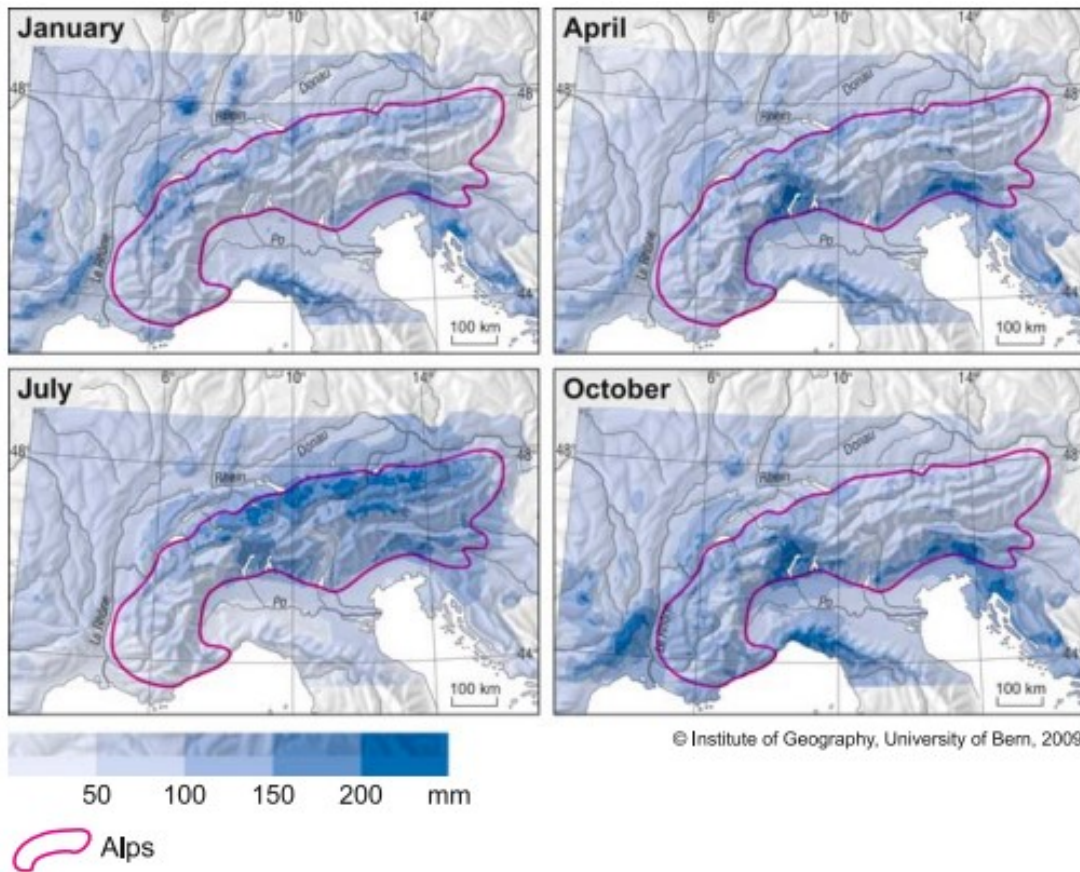


Abbildung 3-5: Durchschnittlicher Niederschlag unterschiedlicher Monate von 1971–1990 (Wehren et. al., 2010).

Im Gegensatz zu anderen Gebirgsketten, sind die Niederschläge in den Alpen am nordwestlichen, sowie südlichen Rand, hoch. Die Lage der Alpen ist der Grund dafür, feuchte Luftmassen vom Atlantik, sowie vom Mittelmeer gelangen an den Alpenbogen und sorgen für Niederschläge.

Die nordwestliche Strömung vom Atlantik ist häufiger, deshalb sind Niederschläge auch häufiger und Trockenperioden seltener. Die längste Niederschlagsdauer ist auch höher im Einflussbereich dieser Strömung. Im Gegensatz dazu erfahren Regionen im Einflussbereich der südlichen Mittelmeer-Strömungen eher höhere Niederschlagsintensitäten, kürzere Niederschlagsphasen und längere Trockenphasen.

An der Alpennordseite ist das Niederschlagsmaximum im Sommer stark ausgeprägt (siehe Abb. 3-5) Obwohl die Gewitterhäufigkeit an der Alpensüdseite besonders hoch ist, ist trotzdem der meiste Niederschlag oft eher im Herbst oder Frühjahr zu erwarten. Im Winter hingegen sind Unterschiede zwischen Nord und Süd in der Niederschlagsmenge nicht eindeutig.

Betrachtet man Niederschlagskarten sieht man eine relativ homogene Verteilung der Niederschläge am Nordrand der Alpen, während sich die hohen Niederschläge am Südrand, beding durch das Relief, besonders auf zwei Regionen beschränken; in der Lombardei um den Comer- und Langen See, sowie in den Karnischen- und Julischen Alpen (Frei und Schmidli, 2006).

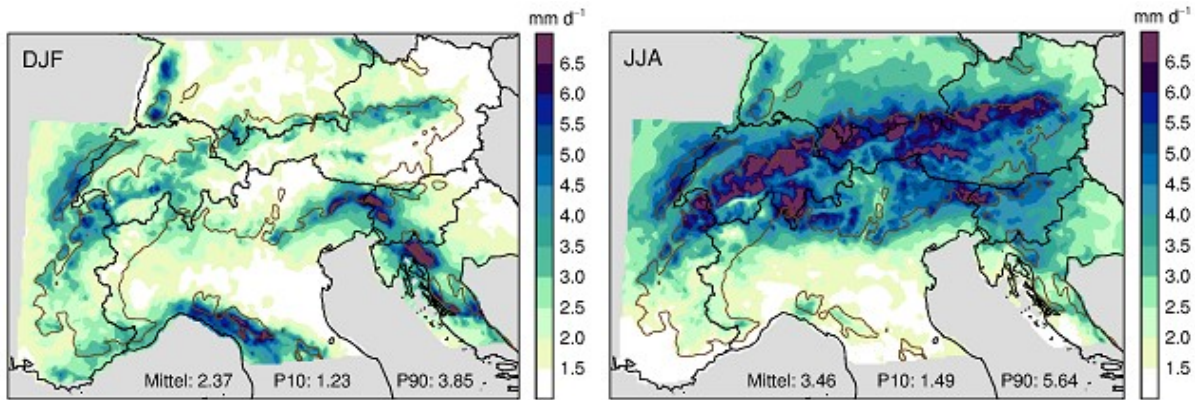


Abbildung 3-6: Mittlerer Tagesniederschlag 2006 – 2008: (links) Winter, Dezember- Februar; (rechts) Sommer, Juni- August (Ritter, 2017).

3.1.4 Schneefall und Schneeschmelze

Der Niederschlag im Winter stellt sich fast ausschließlich durch großflächige Niederschläge ein, ausgelöst durch Frontenbewegungen (Frei und Schmidli, 2006). In den Wintermonaten fällt in den Alpen, in den höheren Lagen der Niederschlag größtenteils als Schnee. Der Winter ist zwar vergleichsweise die trockenste Jahreszeit, doch lang bestehende und hohe Schneedecken sind in höheren Zonen die Norm (siehe Abb. 3-6) und auch in den Tälern der Alpen keine Seltenheit. Besonders an den nördlichen und südlichen Rand der Alpen, kann es zu viel Schneefall und Regen auch über längere Zeiträume kommen, wenn feuchte Luftmassen aus dem Atlantik und dem Mittelmeer strömen (Frei und Schär, 1998).

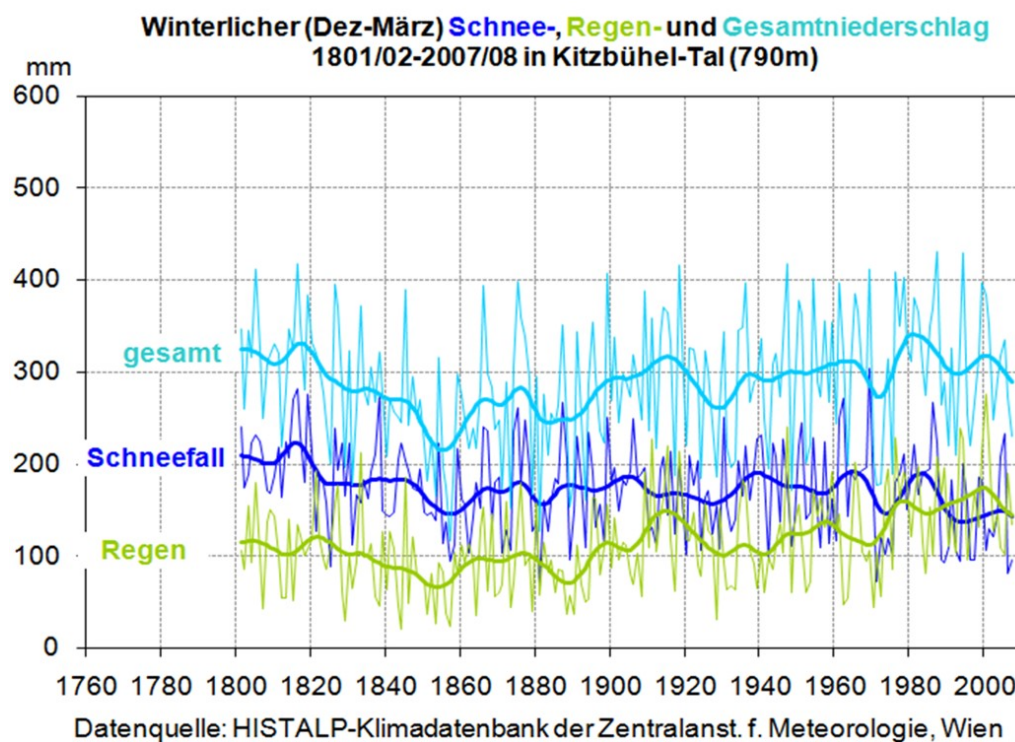


Abbildung 3-7: Langjährige Niederschlagszeitreihen Kitzbühel (790m). (dünne Linien) markieren Einzeljahre, (dicke Linien) 20-jähriger Filter, (Böhm, 2008) und (ZAMG, Klima).

Über die tiefen Täler hinaus kann in den Alpen mit überwiegend festem Niederschlag in den Wintermonaten gerechnet werden. Jedoch–besonders unter ungefähr 1.000 m Seehöhe kann es durchaus zu viel Regen kommen. Anfang der 2000er fiel im Kitzbühler Talboden (790 m Seehöhe) ungefähr die gleiche Menge an Regen, wie Schneefall zwischen März und April (ZAMG, Klima). Betrachtet man das Diagramm (Abb. 3-7) sieht man, dass früher durchaus mehr Schneefall und weniger Regen im Winter gefallen ist. Die gemessene Niederschlagsmenge schwankte deutlich über den Zeitraum, es ist jedoch kein eindeutiger Trend erkennbar. Das Diagramm ist noch dazu etwas veraltet, heutzutage könnte sich die Situation noch mehr vom Schneefall zum Regen verschoben haben.

Schneebedeckungsdauer in Tagen 1971-2019

gemittelt in Höhenlagen bis 1000 Meter und 1000 bis 2000 Meter

Nördlich und südlich des Alpenhauptkamms

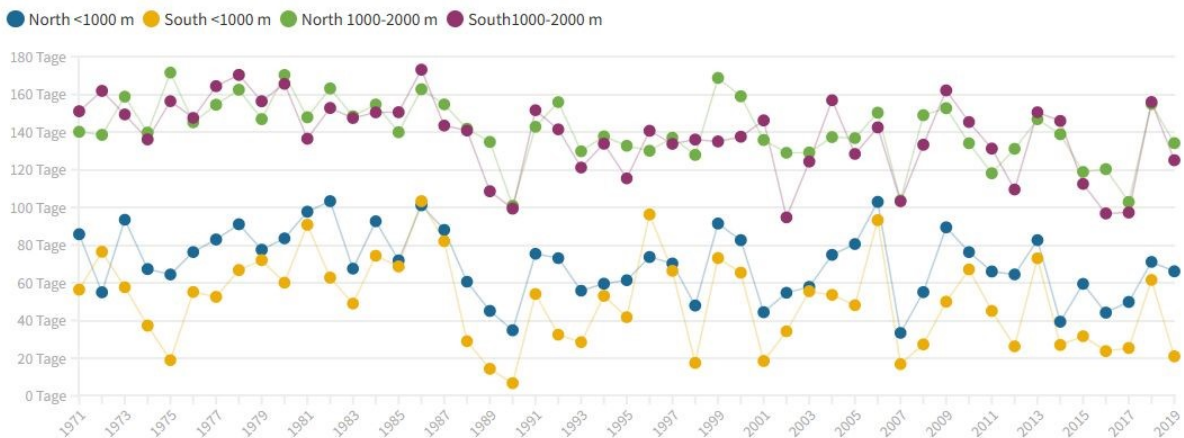


Abbildung 3-8: Rückgang der Schneebedeckung in verschiedenen Höhenlagen der Alpen (Baumgartner, 2021).

Die Dauer der Schneebedeckung steigt deutlich mit der Höhe. Abhängig von Exposition des Hanges und der Einstrahlung kommt es während den Wintermonaten selten zu starker Schneeschmelze im höheren Gebirge. Diese beginnt oft erst Ende April oder später bis in den Juni, abhängig von der Höhe. Die maximale Schneehöhe wird im Gebirge meist erst Ende März oder im April erreicht (Böhm, 2008). Der kälteste Monat ist im Gebirge dort generell der Februar und nicht der Jänner.

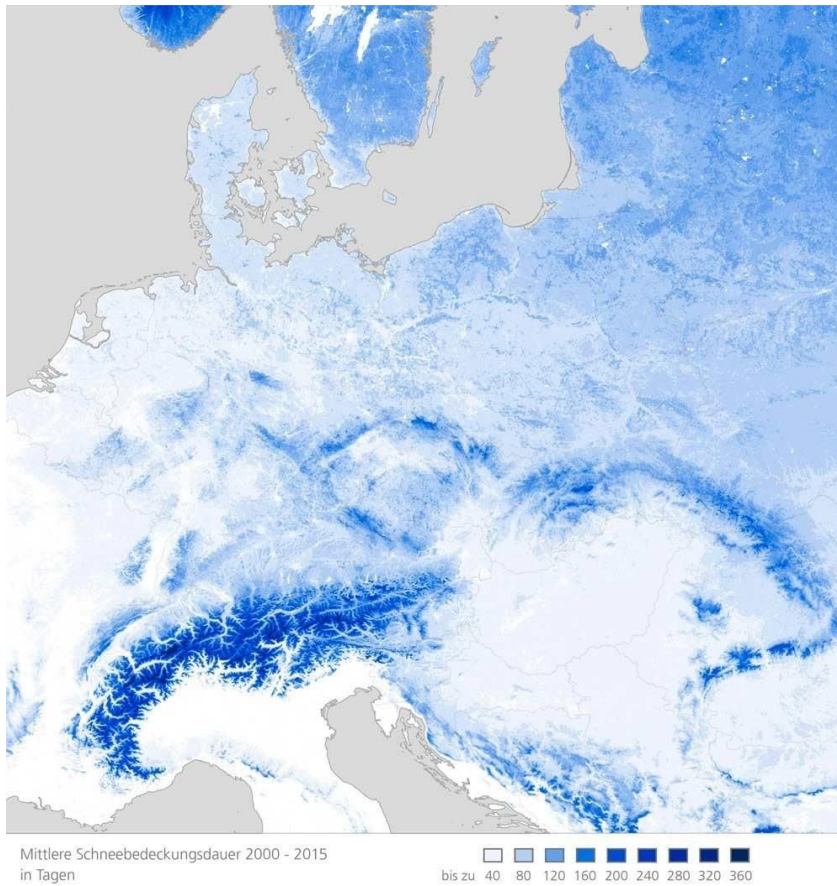


Abbildung 3-9: Mittlere Schneebedeckungsdauer Mitteleuropa, Alpen (links unten) (DLR Earth Observation Center, 2016).

Oberhalb von 3.000m Seehöhe, kann der Schnee an manchen Stellen großflächig über den Sommer nicht mehr vollständig schmelzen. In den Zentralalpen oder den südlichen Alpen ist diese Grenze etwas höher, hingegen an den nördlichen Randlagen der Alpen sogar etwas tiefer. Der Altschnee wird anschließend zu Firn und später zu Gletschereis, und fließt unter Druck als Gletscher langsam talwärts, bis er weiter unten schmilzt. Eine große Rolle spielt auch wie viel Schnee sich über den Winter angesammelt hat. Eine Schneedecke von mehreren Metern späten Winter ist meistens normal. Übersteht ein großer Teil der Schneedecke den Sommer, heißt das, der Gletscher kann seine Masse erhalten (Machguth, 2003). In sehr heißen und trockenen Phasen liefern Gletscher besonders viel Abfluss und dienen so als Puffer gegen Dürren.

3.1.5 Winterniederschlag

Eine genaue Definition für den Begriff „Winterniederschlag“ gibt es nicht. Das ist dem Umstand geschuldet, dass es kein korrekter meteorologischer Begriff an sich ist, wenn dann würde von festem Niederschlag die Rede sein. Die Zuteilung des Niederschlages zu einer bestimmte Jahresperiode macht im Hinblick auf das Thema der Arbeit mehr Sinn, da es immerhin um Muren und nicht um Lawinen geht. Würde man nur den „Meteorologischen Winter“ betrachten, also Anfang Dezember bis Ende Februar (DJF), wäre das eventuell zu wenig weitreichend. In den Alpen, abhängig von der Höhe, dauert

die kalte Jahreszeit generell länger, die Schneeschmelze beginnt meist erst im April oder später. Trotzdem können selbst in alpinen Regionen im meteorologischen Winter, Regenfälle und Warmwetterperioden länger andauern. Die Betrachtung bezieht sich deshalb auf das Winterhalbjahr bzw. die Wintermonate, Anfang November bis Ende April. Der Begriff „Winterniederschlag“ bezeichnet somit in dieser Arbeit den Niederschlag welcher im Winter bzw. in den Wintermonaten auftritt und wird deshalb im Titel und den Forschungsfragen verwendet.

3.2 Der Prozess Mure

3.2.1 Bodenfeuchte und Oberflächenabfluss

Dadurch dass ein Wasserkreislauf besteht, müssen Verdunstung und Niederschlag global gesehen im Gleichgewicht sein. Zur Verdunstung kommt es im erhöhtem Ausmaß in äquatornahen Gebieten, sowie während des Sommers auf den Kontinenten der Nord- und Südhalbkugel. Verdunstung spielt eine wichtige Rolle im Alpenraum, während der Vegetationsperiode im Sommerhalbjahr, jedoch weniger im Winter. Ganzjährig und vor allem im Winter und während der Schneeschmelze, fließt der Niederschlag größtenteils ab oder speist Grundwasserreservoirs (Viviroli und Weingartner, 2007).

Böden und poröses Gestein, verhalten sich wie ein Puffer und speichern teilweise den Niederschlag. Wie gut der Boden Wasser speichert, ist abhängig von der Infiltrationskapazität. Die Permeabilität der obersten oder mittleren Schichten, sowie die Vegetationsdecke und die Hangneigung spielen auch eine sehr wichtige Rolle (Braun, 2002). In Gebirgen sind die geologischen Gegebenheiten oft sehr ausschlaggebend. Im Karst befinden sich zum Beispiel große Kluftsysteme, welche die Infiltration erhöhen und Oberflächenabfluss stark verringern. In anderen Regionen kommt es zu mehr Oberflächenabfluss und Wassersättigung des Bodens.

Die Infiltrationsrate von Niederschlag in den Boden ist meistens vergleichsweise gering, und kurze intensivere Niederschläge können nur teilweise in den Boden eindringen. Langanhaltende oder folgende Niederschläge können hingegen die Infiltrationskapazität überschreiten (Zimmermann, 1997), die Wassersättigung des Bodens führt anschließend zu Oberflächenabfluss und Destabilisierung des Materials (Ahnert 2015).

3.2.2 Erosion

Der Begriff Erosion wird in verschiedenen Kontexten verwendet und beschreibt generell eine Abtragung. Was das genau bedeutet, hängt auch von dem jeweiligen Themengebiet ab, bei dem der Begriff verwendet wird. Erosion kann den Vorgang beschreiben, welcher zur Abtragung der Erdoberfläche führt, Gesteinsmaterial lockert, löst und verlagert. Es kann auch als Oberbegriff für alle abtragenden Prozesse gesehen werden. Dazu zählt zum Beispiel: fluviale- oder glaziale Erosion,

Winderosion und Küstenerosion (Bahlburg und Breitenkreuz, 2017). Es handelt sich um Kräfte oder natürliche Medien, welche Partikel aufnehmen und transportieren, aus diesem Grund werden Massebewegungen hier manchmal nicht dazugezählt. Bei der Definition von Erosion werden diese, zusammen mit Verwitterung, eindeutiger hinzugezählt.

Eine geläufigere Definition in Ahnert (2015), beschränkt Erosion auf linienhafte Abtragung, wie fluviale- oder glaziale Erosion, hingegen beschreibt „Denudation“ die flächenhafte Abtragung. Dazu zählen auch Massebewegungen als „Denudationsprozesse“.

Das jetzige Erscheinungsbild der Erde ist maßgeblich durch Erosion geprägt. Besonders deutlich wird das in Gebirgen, wie den Alpen. Ohne jegliche Erosion, aber mit tektonischer Hebung wären Gebirge einfache Hochplateaus. Verschiedene Prozesse bei der glazialen Erosion schafft eine komplett andere Morphologie und Topographie als reine fluviale Erosion (Ahnert, 2015). Deshalb sind die Spuren von rezenten Eiszeiten und Vergletscherungen noch deutlich sichtbar im Alpenraum. Das hat natürlich immer noch Auswirkungen auf die fluviale Morphologie, Hangneigung und Stabilität, sowie die Böden und Vegetation.

3.2.3 Gravitative Massebewegungen

Gravitative Massenbewegungen werden in Dikau und Glade (2002) als hangabwärts gerichtete Bewegung von Fels- und/oder Lockermaterial unter der Einwirkung von Schwerkraft beschrieben. Dieser Begriff wäre gleichzusetzen mit dem englischsprachigen „mass movements“. Jedoch wird der Begriff „Landslides“ gleichermaßen dafür verwendet, ist aber nicht exakt gleichwertig mit dem deutschsprachigen „Hangrutschungen“ oder „Rutschungen“ anzusehen. Unter Landslides würden sowohl flachgründige Translationsrutschungen, als auch Bergstürze fallen. Unter der weit verbreiteten Klassifikation von Varnes (1978), beschreibt Rutschen (slide) oder Gleiten einen Prozess der gravitativen Massebewegungen, sowie auch Fließen (flow), Driften (drift), Fallen (fall), Kippen (topple) sowie Komplexe Prozesse.

3 Theoretische Grundlagen

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type	FALLS	Rock fall	Debris fall Scree Debris cone	Earth fall Debris cone Colluvium
	TOPPLES	Rock topple	Debris topple Debris cone	Earth topple Debris cone
SLIDES	Rotational	Single rotational slide (slump) Failure surface	Multiple rotational slide Crown Scarp Head Scarp Minor Scarp Failure surface	Successive rotational slides
	Translational (Planar)	Rock slide	Debris slide	Earth slide
SPREADS	<p>e.g. cambering and valley bulging</p>			Earth spread
FLOWS	Solifluction flows (Periglacial debris flows)		Debris flow	Earth flow (mud flow)
COMPLEX	e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe	

Abbildung 3-10: Klassifikation von (Varnes, 1978) und (Cruden and Varnes, 1996), reproduziert vom British Geological Survey.

Diese Prozesse sind teilweise nicht selbsterklärend. Gleiten beschreibt eine hangabwärts gerichtete Bewegung auf einer Gleitfläche. Diese kann horizontal zur Oberfläche verlaufen, dann entsteht eine Translationsrutschung oder rotationsartig und tiefgründig, dadurch entsteht eine Rotationsrutschung. Driften hingegen entsteht meist in flacheren Zonen; auf einer weichen und wassergesättigten Schicht, bewegen und zerfallen Blöcke der oberen, kompakteren Schicht. Fallen beschreibt frei fallendes, springendes und rollendes Lockergestein und Kippen eine Vorwärtsrotation, ein „Umkippen“ eines Felsen oder eines ganzen Hanges (siehe Abb. 3-10).

In der Realität handelt es sich oft um komplexe Ereignisse, wo mehrere dieser Prozesse aufeinander folgen. Bei größeren Bergstürzen ist das meist der Fall, diese setzen sich kaskadenartig abwärts fort und gewinnen an Magnitude, solange genug Potentielle und Kinetische Energie vorhanden ist. Solche

Ereignisse sind aufgrund der Komplexität und des Ausmaßes schwer zu modellieren und stellen ein großes Risiko für Mensch und Siedlungsraum dar (Offenthaler et. al. 2020).

3.2.4 Muren

3.2.4.1 Definition

Dikau und Glade (2002) beschreibt Fließen als eine kontinuierliche und irreversible Deformation von Fels- und Lockergesteinen, die einer fließenden viskosen Flüssigkeit ähnelt. Dieser Prozesse ist wichtig für das Thema dieser Arbeit, denn der Fließprozess liegt der Mure zugrunde.

Im Englischen wird statt dem Wort „Mure“, „debris flow“ oder „mudflow“ verwendet. Trotzdem sollte ähnlich wie bei Rutschungen und Landslides, hier jedoch bei Übersetzungen und Klassifikationen aufgepasst werden. Der Murgang wird laut dem österreichischen Normungsinstitut (ONR, 2009) zwischen rutschenden und fluvialen Verlagerungsprozessen eingeordnet. Unterschieden wird hier aufgrund der volumetrischen Feststoffkonzentration der Flüssigkeit. Hochwasser und fluvialer Transport (0-20%), ein Murgang ab 40% Feststofftransport, dazwischen (20-40%) murartige Feststofftransporte.

Costa (1984) beschreibt Muren als Gemisch aus Wasser, Luft und Feststoffen, mit einem Gewichtsanteil der Feststoffe von rund 35-90%. Die Untergrenze der Feststoffkonzentration für Muren wird hier erst mit 70% definiert. Die Kategorie murartige Transporte wird als „hyperconcentrated flows“ beschrieben.

Eine Mure kann sowohl am Hang, als „Hangmure“ oder in einem (Fluss)-Tal als „Talmure“ bzw. „Murgang“ auftreten. Deshalb ist sie oft nicht eindeutig von Rutschungen oder Sturzfluten mit Geschiebe zu unterscheiden. Der Übergang auf beiden Seiten ist fließend, das macht die Identifizierung von Murenereignissen manchmal schwer und deshalb gibt es auch Unklarheiten bei den Klassifikationen, sowie den Grenzwerten. Allgemein gilt jedoch eine Mure als fließender Prozess, mit hoher Geschwindigkeit, laut Costa (1984) 0-20m/s, teilweise wahrscheinlich höher. Aufgrund des hohen Feststoffanteils verhält sich diese generell zäher als newtonsche Fluide, wie z.B. Wasser, jedoch nicht wie konventionelle Rutschungen.

3.2.4.2 Prozess

Wieso treten Muren auf? Was macht sie wahrscheinlich? Es gibt viele Faktoren welche das Auftreten von Muren beeinflussen. Ein Konzept aus Zimmermann et. al. (1997) beschreibt eine Disposition als die „Anfälligkeit eines Gebietes zur Auslösung von Prozessen abhängig von geologischen und hydrologischen Eigenschaften“. Es wird zwischen „Grunddisposition“ und „Variabler Disposition“ unterschieden.

Die Grunddisposition beschreibt Parameter welche über längere Zeiträume konstant bleiben, unter anderem die Geologie, einschließlich Topographie und auch teilweise die Vegetation. Die variable Disposition hingegen, ändert sich im Zeitraum der Betrachtung und unterliegt oft jahreszeitlichen Schwankungen. Die Materialverfügbarkeit und die hydrologische Vorgeschichte zählen dazu, sowie auch Veränderungen der Abflussbedingungen, zum Beispiel durch Landnutzungsänderungen.

3.2.4.3 Auslösung von Muren

Muren können auf verschiedenen Wegen ausgelöst werden. Grundlegend ist immer die Zugabe von Wasser in ein System. Dies geschieht größtenteils durch Niederschlag und Schneeschmelze (Wieczorek und Glade, 2005). Das Wasser dringt in das Material ein und die Poren werden gefüllt. Ein positiver Porenwasserdruck besteht, wenn das gesamte Porenvolumen mit Wasser gefüllt ist, dadurch geht die Kohäsion zwischen den Partikeln größtenteils verloren. Es entstehen auch Auftriebskräfte durch den hohen Porenwassergehalt, dadurch wird der Zusammenhalt des Materials weiter herabgesetzt (Ahnert, 2015). Die abnehmende Kohäsion und Festigkeit des Materials, sowie die Zunahme an Gewicht durch den hohen Porenwassergehalt erhöhen die Instabilität und ermöglichen die Auslösung von Muren.

Die Vorfeuchte des Materials, unter anderem auch ein Resultat von der hydrologischen Vorgeschichte und die Niederschlagsdauer spielen eine wichtige Rolle (Stummer, 2009). Es ist jedoch abhängig vom jeweiligen Material, genauer von der Porengröße und Infiltrationskapazität, wie sich der Eintrag von Wasser auswirkt.

Die Grenzscherspannung (Iverson, 1997) muss überschritten werden um eine Mure auszulösen, beschrieben wird das durch die Colomb Gleichung, welche die hangabwärts gerichtete Treibende Kraft (Scherspannung) den haltenden Elementen gegenüberstellt; die effektive Normalspannung, dem Reibungswinkel und der Kohäsion. Die effektive Normalspannung wirkt rechtwinklig auf den Hang und verringert sich bei positiven Porenwasserdruck.



Abbildung 3-11: Luftbild von Muren in Siano, Italien Mai 1996 (Hungri et. al., 2014).

Relativ steiles Gelände (20-45°) (Hungri, 2005) mit unbewachsenen, lockeren Schuttmassen, davon größtenteils feinporiges Material, beschreibt ein ideales Entstehungsgebiet für Muren. Bei grobem Schutt kann Wasser zu schnell eindringen und abfließen. Feinmaterial hingegen kann mehr Wasser speichern, bis ein positiver Porenwasserdruck erreicht wird.

Muren treten manchmal häufiger oder periodisch an derselben Stelle auf. Bedingt durch die Witterung und die Geologie, besteht ein andauernder Materialtransport an dieselbe Stelle. Durch Rutschungen oder Muren, welche Material transportieren und ablagern, können wiederum leichter nachfolgende Rutschungen und Muren mobilisiert werden (Costa, 1984). Dadurch kann es zu keiner Verfestigung durch Vegetation kommen, bevor es zur nächsten Mure kommt.

Durchbrüche von Verklüftungen oder Rutschungen können Muren in den Ablagerungsbereichen auslösen. Durch weitere Aufstauungen und Hindernisse in der Transportzone der Mure (siehe Abb. 3-12), kommt es zu einzelnen Schüben, welche sehr kurz oder Stunden auseinander liegen können. Murenschübe transportieren dabei viel Sediment und Schutt ab, die Murenfront beinhaltet besonders viel größeres Material (Costa, 1984). Während des Murganges kommt es zu Tiefenerosion, dadurch zur Erhöhung des Geschiebebeitrages, andererseits entsteht auch Deposition an den Rändern. Insgesamt stehen Deposition und Erosion in der Transportzone des Murganges jedoch im Gleichgewicht (Hungri, 2005).



Abbildung 3-12: Mure mit viel Geschiebe; nach starker Schneeschmelze, im Stammbach Gemeinde Gad Goisern, (links) Murkanal (rechts) Verklausung (Luzian, 2002).

Im Ablagerungsbereich wird anders als bei fluvialen Ereignissen das Material nicht sortiert, sondern bleibt unsortiert liegen und nur das Wasser fließt in Kanälen ab. Damit es zur Ablagerung kommen kann, ist ein Gelände notwendig welches eine laterale Ausbreitung ermöglicht sowie eine relative geringe Hangneigung unter 10° (Hungr, 2005).

4. Methodische Konzeption

Das Ziel der Arbeit ist, den Zusammenhang von Winterniederschlag und das Auftreten von Muren zu analysieren. Um dem nachzugehen, wurde passende Literatur zu diesem Thema ausgewählt, anhand derer die Faktoren, welche Muren im Zeitraum der Wintermonate beeinflussen, genauer betrachtet zu können. Um den Zusammenhang quantitativ erfassen zu können, sind Daten von tatsächlichen Murenereignissen, sowie Klimadaten, wie Niederschlagssummen notwendig. Wetterbeobachtungen und Beschreibungen von Naturkatastrophen reichen in den Alpenregionen weit zurück. Die Analyse beschränkt sich jedoch auf quantitative und vergleichbare Daten mit einem genauen Datumsbezug. Dazu wurden registrierte Muren in zwei Gebieten in den Österreichischen Alpen mit täglichen Niederschlagssummen und Temperaturen von lokalen Klimastationen verglichen.

4.1 Literaturrecherche

Der erste Teil der Analyse der Forschungsfragen wurde unter Verwendung geeigneter Literatur bearbeitet. Hierfür wurde aktuelle oder noch relevante Literatur ausgewählt. Weil es nur wenige literaturwissenschaftliche Arbeiten gibt, welche das Auftreten von Muren in den Wintermonaten beschreiben, mussten Murenereignisse unter möglichst ähnlichen klimatischen Bedingungen in den Alpen herangezogen werden, z.B. im Hochgebirge der Alpen. Besonders wenn es um die Analyse von Muren in den höheren Zonen der Alpen geht, bei denen es sich um sehr instabile und dynamische Gebiete handelt, sind aktuelle Publikationen wichtig. Nicht nur die Niederschlagsmengen, sondern auch Temperatur und Schneeschmelze mussten für die Analyse einbezogen werden. Hierfür wurden mehrere relativ aktuelle Publikationen aus den Alpen ausgewählt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Der Einfluss des Niederschlages auf Muren, seine Intensität und Menge, ist ein Thema, welches weltweit vielfach untersucht wird. Vor allem für die Vorhersage von Muren anhand von Niederschlagsmengen, wurden immer genauere Methoden entwickelt. Deshalb wurde für diese Arbeit allgemein relevante Literatur aus der ganzen Welt für die Analyse verwendet.

Maßgeblich für diese Arbeit sind die Murenereignisse im November 2019. Um die Auswirkungen des Ereignisses auf den Ort Bad Gastein außerhalb des Untersuchungsgebietes zu analysieren, wurden die Grafiken und detaillierten Beschreibungen aus der Ereignisdokumentation 2019 (Hübl und Beck, 2020) verwendet. Als Unterstützung der Analyse, sind Grafiken der ZAMG zu den klimatischen Bedingungen während dieses Zeitraumes hinzugefügt worden, sowie auch eine Grafik des Lawinenwarndienstes Tirol, zu dem Verlauf der Schneehöhen.

4.2 Daten

4.2.1 Muren

Die Daten zu allen aufgezeichneten Murenereignissen in Österreich, speziell den Ereignissen der Kategorie „Murgang und murartiger Feststofftransport“ und „Hangmuren“, wurden mir zur Verfügung gestellt von der „Wildbach und Lawinenverbauung“, Sektion Wien.

Die Wildbach und Lawinenverbauung, auch WLV oder die.wildbach, ist eine Organisation auf der Bundesebene Österreichs, welche in sieben verschiedenen Sektionen, in den jeweiligen Bundesländern unterteilt ist. Sie wurde 1884 als Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung gegründet. Unter anderem, ist sie für die Aufzeichnung von größtenteils schadbringenden Naturkatastrophen, wie auch Muren, verantwortlich (Luzian, 2002).

Beschreibungen zu Murenereignissen gibt es in der Alpenregion schon lange. Der Datensatz der WLV ist ein Archiv für verschiedene schadbringende Naturereignisse in Österreich. Diese gehen zurück bis ins Mittelalter bzw. später. Das älteste Murenereignis wurde 544 v. Chr. verzeichnet. Bei vielen Ereignissen ab Ende des 19. Jahrhunderts fehlt eine genaue Datumsangabe, bei manchen Ereignissen auch eine Jahresangabe. Für diese Analyse konnten nur Ereignisse mit genauer Datumsangabe verwendet werden.

Neben der Datumsangabe sind auch andere Informationen zu den Ereignissen vermerkt. Als Ortsangabe ist der Bezirk, die Gemeinde und eventuell das Einzugsgebiet und die Ortschaft vermerkt. Jedes Ereignis hat auch genaue Koordinaten vermerkt, sowie auch die dazugehörige Sektion des Bezugssystems, das Bundesmeldenetz für Österreich. Der Großteil der Ereignisse beinhalten eine kurze Beschreibung zu dem Ablauf des Ereignisses, den verursachten Schäden und des Austragungsortes. Bei manchen Ereignissen ist auch der Auslöser vermerkt: lange anhaltender Regen oder Starkniederschlag, sowie eventuell ein Auslösephänomen wie die Schneeschmelze. Eine Intensitätsklasse für jedes Ereignis wurde bestimmt und in der Prozessart, zwischen Murgang und murartigem Feststofftransport unterschieden. Ereignisse der Kategorie Hangmuren befinden sich im gleichen Datensatz, in einer separaten Datentabelle.

4.2.2 Klimadaten

Als Klimadaten wurden Aufzeichnungen von Klimastationen der ZAMG verwendet. Aufgrund der Vergleichbarkeit mit Murenereignissen beschränkte sich die Analyse auf Tageswerte (24 Stunden). Abgeleitete oder flächenhafte Klimadaten wurden hierzu nicht verwendet. Wie bei den Muren, wurden nur Klimadaten zwischen bzw. einschließlich 1. November und 30. April in die Analyse einbezogen.

Die Klimastation Spittal an der Drau der ZAMG in Kärnten liegt relativ zentral im Untersuchungsgebiet. Die Klimadaten dieser Station reichten jedoch nicht weit genug zurück um alle Murenereignisse mit Datum, des Untersuchungsgebietes zu umfassen. Andere Stationen welche den gesamten Zeitraum umfassten, lieferten hingegen keine aktuellen Daten. Sie befanden sich außerhalb des Gebietes oder entsprachen nicht den Anforderungen. Ungefähr zwei Jahrzehnte wurden von der ungefähr 15 Kilometer talaufwärts und 50 Meter höher liegenden Station Kolbnitz hinzugefügt, vom 1. Jänner 1954 bis zum 30. April 1977. Ab dem 1. November 1977 bis zum 30. April 2023 wurden die Stationsdaten von Spittal an der Drau verwendet.

Zum Vergleich mit der nahegelegenen Klimastation Kolbnitz wurde eine Station nahe dem Reisseck, bei der Reisseckhütte herangezogen. Diese liegt auf 2.200 m im Gemeindegebiet von Mühldorf. Die täglichen Niederschlagssummen wurden in dem Vergleichszeitraum vom 1. Jänner 1954 bis zum 31. Dezember 1976, zwischen der Station Kolbnitz und jener auf der Reisseckhütte, korreliert.

4.3 Datenauswahl

4.3.1 Auswahl Wintermonate

Als Wintermonate oder Winterhalbjahr wurden für die Analyse die Monate November bis April definiert. Alle Murenereignisse zwischen bzw. einschließlich 1. November und 30. April sind in die Analyse einbezogen worden. Jene Ereignisse bei denen die Monate unbekannt waren, konnten hier nicht berücksichtigt werden. Zur Analyse sind nur Klimadaten in dem gleichen Zeitraum verwendet worden, das Klima während den Sommermonaten wurde nicht zum Vergleich oder als Ergänzung hinzugefügt. Prozesse und Mechanismen von Muren, welche in den Sommermonaten auftreten sind, wurden jedoch bei der Analyse mitberücksichtigt, da eine klare Trennung hier nur schwer möglich ist.

Um die Mechanismen von Muren im Hochgebirge zu verstehen, wurden vor allem das späte Frühjahr und der Sommer betrachtet. Die Wintermonate sind nicht die zeitliche Hochsaison für Muren in den Österreichischen Alpen, weshalb die Anzahl der Ereignisse vergleichsweise überschaubar ist. Es ist allerdings wissenschaftlich sinnvoll Muren auch während der Wintermonate zu betrachten. Weshalb Murenereignisse in diesem Zeitraum seltener vorgekommen sind, wird im Laufe der Arbeit bearbeitet.

4.3.2 Murendaten

Auf persönliche Anfrage beim WLV wurde mitgeteilt, dass der WLV-Datensatz, zwei Kategorien von Muren beinhaltet: „Murgänge und murartiger Feststofftransport“ sowie „Hangmuren“. Die Kategorien beschreiben die Prozessart zwischen Murgang und murartigem Feststofftransport, wobei der Unterschied alleine im Feststofftransport liegt. Hangmuren oder Rutschungen wurden weitaus weniger verzeichnet als die zweite Kategorie „Murgänge und murartiger Feststofftransport“. Die

beiden Ereignisse werden unter entsprechenden Umständen oft nebeneinander in einem Gebiet ausgelöst. Das lässt sich auch in einigen Fällen mit den vorhandenen Daten bestätigen. Im Untersuchungsgebiet wurde jedoch nur eine einzige Hangmure registriert. Hinzu kommt, dass die Prozesse von Hangmuren, im Vergleich zu Murgängen doch teilweise unterschiedlich, weshalb die Kategorie nicht in die Analyse miteinbezogen wurde.

Aufgrund der Tatsache, dass Murenereignisse mit einer genauen Tagesangabe im Datensatz der WLV größtenteils erst Anfang des 20. Jahrhunderts beginnen, konnte die vorliegende Arbeit nicht weiter zurückreichend analysiert werden. Im Untersuchungsgebiet könnten eventuell Muren in den Wintermonaten vor dem Untersuchungszeitraum aufgezeichnet worden sein, jedoch ist dazu kein Datum vermerkt. In der Beschreibung von älteren Ereignissen, wird der Zeitraum manchmal mit der Saison beschrieben oder ob das Ereignis früher oder später im Jahr aufgetreten ist. Bei zwei Ereignissen im Untersuchungszeitraum November 1966, ist nur das Monat vermerkt, ohne genaueres Datum. Jedoch sind andere Faktoren hier noch limitierender. Lokale Klimastationsdaten reichen mit Ausnahme von wenigen, nicht weiter als bis zum Ende des 20. Jahrhunderts zurück, meistens nur bis in die 1950er Jahre bzw. später.

4.3.3 Relevante Klimavariablen und unvollständige Klimadaten

Als relevante Klimavariablen für Murenereignisse in den Wintermonaten gelten Niederschlagsmengen, aber auch die Temperatur, speziell die tägliche maximale Temperatur, und eventuell auch Schneehöhe und Neuschneemengen. Für die Analyse sind die tägliche Niederschlagssumme sowie die tägliche maximale und minimale Temperatur herangezogen worden, da diese aussagekräftiger als die tägliche Durchschnittstemperatur sind. Die tägliche Durchschnittstemperatur wurde nur für die Statistik und Trendanalyse der Temperaturwerte über den gesamten Untersuchungszeitraum verwendet. Variablen wie die Schneehöhe, sofern Daten vorhanden waren, sind nur bei Unklarheiten und speziellen Ereignissen als unterstützende Daten, in die Analyse einbezogen worden. Die Daten zu der täglichen Schneehöhe, gemessen in Millimetern, konnten nur für die genauere Analyse eines Ereignisses im April 1975 herangezogen werden, weil diese für einen Großteil des Untersuchungszeitraumes an der Klimastation Spittal an der Drau, fehlten.

Die Temperaturdaten fehlen für die Jahre 1961, 1962 und 1963 im Untersuchungszeitraum fast vollständig. Bei den letzten zwei Aprilwochen von 1997, fehlten die Temperaturwerte, sowie auch die Niederschlagswerte. Diese wurden als Tage ohne Niederschlag in der Analyse der täglichen Niederschlagsmengen gewertet. Bei den Temperaturwerten sind die Fehlwerte eindeutig erkennbar, wirken sich jedoch nur teilweise negativ auf die Genauigkeit der Trendanalyse aus. Die Fehlwerte werden in dieser Analyse als 0°C gewertet. Wird der Zeitraum dieser Analyse verkürzt, damit die

Fehlwerte nicht beinhaltet sind, zeigt sich jedoch, dass die Aussagekraft der Trendanalyse trotzdem besteht, da sich das Ausmaß des Trends wenig ändert.

4.4 Auswahl und Abgrenzung des Untersuchungsgebiet

Die Analyse beschränkt sich auf ein vergleichsweise kleines Gebiet, in welchem mehrere Muren in den Wintermonaten der vergangenen Jahrzehnte registriert worden sind. Das Untersuchungsgebiet beinhaltet alle Murenereignisse, außer Hangmuren, welche ein genaues Datum vorweisen und in die Wintermonate fallen. Zu jedem Untersuchungsgebiet gibt es einen Stationswert mit lokalen Klimadaten, welche die täglichen Niederschlagssummen und die tägliche maximalen und minimalen Temperatur umfassen.

4.4.1 Auswahlkriterien Untersuchungsgebiet

Die Auswahl der Untersuchungsgebiete richtete sich nach dem Vorkommen von Muren in den Wintermonaten, sowie zum Teil auch, nach der Verfügbarkeit von Klimadaten. Wenn möglich ebenso an vergleichsweise zuverlässige Daten von Klimastationen der ZAMG. Eine Klimastation, welche relativ zentral im Tal liegt, ist vorteilhaft für die Messung von der maximalen Temperatur, welche am niedrigsten Punkt, üblicherweise die höchsten Werte aufweisen wird. Beim Niederschlag ist die Verteilung meist anders und regional sehr unterschiedlich. Größere Gebiete an der Randzone der Alpen könnten eventuell auch im Winter, noch größere regionale Unterschiede im Niederschlag aufweisen. Ein potenzielles Gebiet in diesen Zonen würde vielleicht weniger in Frage kommen.

Ein weiteres Kriterium für die Auswahl zur Analyse war, dass zumindest vier bis fünf Murenereignisse, in unterschiedlichen Jahren in der Region aufgezeichnet worden sind. Gebiete, die zahlreichere Muren, oder rezentere Ereignisse aufweisen konnten, waren für die Analyse interessanter. Die Kriterien betreffend der lokal vorhandenen Muren- und Klimadaten, trafen auf zumindest 3 potenzielle Untersuchungsgebiete zu. Jenes in Spittal an der Drau, sowie noch zwei andere, eines bei Rauris in Salzburg und ein anderes bei Innsbruck in Tirol.

Das potenzielle Untersuchungsgebiet bei Rauris und Bad Gastein in Salzburg, beinhaltet mehr Einträge zu einzelnen Murenereignisse an verschiedenen Tagen, welche weiter zurück bis Anfang des 20. Jahrhunderts gehen. Die Klimastation der ZAMG in Rauris verfügt über eine relativ vollständige Zeitreihe bis Anfang der 1930er Jahre, der potenzielle Untersuchungszeitraum wäre somit um 20 Jahre länger. Das potenzielle Untersuchungsgebiet wäre jedoch größer, als jenes in Spittal an der Drau und würde mehr einzelne Täler umfassen. Regionale klimatische Unterschiede könnten hier mehr Einfluss am Ergebnis haben. Insgesamt war die Anzahl an Muren in dem Gebiet um Rauris, verglichen mit jenem in Spittal an der Drau geringer. Beide Faktoren würden die Aussagekraft und Validität der Analyse

eventuell negativ beeinflussen, weshalb das Untersuchungsgebiet bei Spittal an der Drau ausgewählt wurde.

4.4.2 Grenzen des Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet setzt sich aus den Flächen verschiedener Gemeinden zusammen, die Grenzen sind die Gemeindegrenzen. Die Außengrenze und damit die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, ist durch die jeweilige Grenze der Randgemeinde definiert. Die Daten zu den Muren beinhalten neben dem genauen Standort, angegeben mit Koordinaten, auch das jeweilige Gemeindegebiet, in dem die Mure erfasst worden ist. Somit ist jedes einzelne Ereignis einem einzigen Gemeindegebiet zugeordnet. Viele kleine Gemeinden im Untersuchungsgebiet beschränken sich nur auf ein kleineres Einzugsgebiet oder Tal, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die Einteilung bei der Erhebung der Muren relativ genau gewesen ist.

Tabelle 4-1: Gemeinde und jeweilige Bezirke, welche das Untersuchungsgebiet in Kärnten umfassen.

Untersuchungsgebiet Kärnten	
Bezirk	Gemeinde
Spittal an der Drau	Spittal an der Drau
	Baldramsdorf
	Klieblach-Lind
	Lehndorf
	Lurnfeld
	Mühldorf
	Sachsenburg
Villach-Land	Stockenboi

Das Untersuchungsgebiet im Bezirk Spittal an der Drau umfasst die Gemeinden Spittal an der Drau, Baldramsdorf, Klieblach-Lind, Lehndorf, Lurnfeld, Mühldorf, Sachsenburg und die Gemeinde Stockenboi im Bezirk Villach-Land. Insgesamt umfasst das Untersuchungsgebiet 8 Gemeinden; im Vergleich zu den Flächen anderen Gemeinden in den österreichischen Alpen, sind es größtenteils kleineren Gemeinden. Um die Größe des Untersuchungsgebietes einzuschränken, wurden nur kleinere Gemeinden rund um die Drau, und die Mündung von Drau und Möll ausgewählt. Alle Gemeinden im Untersuchungsgebiet weisen zumindest eine oder mehrere Murenereignisse auf. Gemeinden welche im Untersuchungszeitraum keine Muren verzeichneten und etwas außerhalb der Kernzone des Gebietes liegen, wurden nicht in das Untersuchungsgebiet miteinbezogen. Wenn mehrere Ereignisse an einem Datum auftraten, beschränkten sich diese meist nicht nur auf eine Gemeinde, sondern wurden in manchen Fällen in mehreren Gemeinden aufgezeichnet.

4.5 Analyse der Daten

4.5.1 Vorbereitung der Analyse

Die Analyse startete mit der Sortierung der Ereignisse und der Klimadaten. Beides wurde mittels Excel durchgeführt. Der Datensatz der WLW, welcher sämtliche Murenergebnisse beinhaltet, wurde in einem herkömmlichen Excelformat zur Verfügung gestellt. Die Klimadaten der ZAMG der einzelnen Stationen, befanden sich ursprünglich im, für Klimadaten üblichen CSV- Format und wurden für die Bearbeitung, in ein Excel Format umgeändert. Die täglichen Klimadaten wurden auf die jeweilig relevanten und verfügbaren Zeiträume beschränkt, welche sich je nach Klimastation unterscheiden. Anschließend wurden sie nach den Tagen in den Wintermonaten von November bis April sortiert. Die Zeitreihen der Klimastationen Kolbnitz und Spittal an der Drau, wurden direkt aneinandergesetzt. Für die Analyse der einzelnen Ereignisse ist jeweils ein Zeitraum von 30 Tagen festgesetzt, welcher das Ereignis beinhaltet, das für die Vergleichbarkeit ausgewählt worden ist.

Bei den Daten der WLW zu den Muren, gestaltete sich das Sortieren komplizierter. Ereignisse wurden sowohl mit genauem Datum erhoben als auch nur mit Jahr und Monat. Für die allgemeine Statistik zu den Muren in den Wintermonaten, war es notwendig alle Ereignisse mit Bezug auf ein genaues Datum bzw. einen Monat, angegeben mit den Zahlen 1 bis 12, zu erfassen. Hierzu musste separat in zwei verschiedenen Spalten sortiert werden. Ereignisse mit genauer Datumsangabe vor 1900 konnten in Excel schwer dargestellt und sortiert werden; diese Ereignisse wurden mit LibreOffice Calc sortiert und zu der Statistik hinzugefügt. Für die Erstellung der Statistik, ist nach dem Bundesland sowie nach der „Prozessart Murgang“ oder „murartiger Feststofftransport“ sortiert worden. Im Fall von Osttirol, wurde nach dem Bezirk Lienz sortiert. Als Vergleich ist bei der Statistik zwischen der vollständigen Datentabelle und jener der Wintermonate verglichen worden. Die Anzahl der Ereignisse der Wintermonate wurde mit der Gesamtanzahl der Ereignisse verglichen.

Für die Analyse im Untersuchungsgebiet sind die Ereignisse der Prozessart Murgang und murartiger Feststofftransport in den Wintermonaten, nach den 8 Gemeinden, welche das Untersuchungsgebiet bilden, sortiert worden. Außer zwei Ereignissen ohne genaues Datum, wurden die Ereignisse nach dem Datum aufgelistet. Wichtig für die Analyse war die Anzahl der Muren an den einzelnen Tagen. Die Anzahl der Ereignisse an einem Datum, wurde aufgrund der geringen Anzahl manuell zu der Zeitreihe der täglichen Klimadaten hinzugefügt. Aus diesen Daten wurde die Analyse der täglichen Niederschlagsmengen und -perioden, sowie die genauere Analyse der einzelnen Murenergebnisse erstellt. Die Klimadaten bestanden aus der Niederschlagsmenge, der maximalen-, minimalen und durchschnittlichen täglichen Temperatur, sowie der nicht vollständigen Daten zu der Schneehöhe.

Klimadaten der Station Kornat in Hermagor, außerhalb des Untersuchungsgebietes, sind zusätzlich für eine exaktere Beschreibung der Ereignisse im November 1966 verwendet worden.

4.5.2 Durchführung der Analyse und Visualisierung der Ergebnisse

Für die Übersicht der Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet, sowie für die einzelnen Ereignisse, wurden horizontale Zeitreihen mit vertikalen Balken gewählt, welche die täglichen Niederschlagsmengen abbilden. Für die Darstellung der maximalen oder minimalen täglichen Temperatur wurde in den Grafiken eine horizontale Linie, mit Datenpunkten gewählt. In das Diagramm der Niederschlagsperioden und der Übersicht des Untersuchungszeitraums sind alle Murenereignisse eingefügt. Auf der Sekundärachse des Diagramms wird die Anzahl der Muren an einem einzigen Tag angezeigt. Bei den vier verschiedenen Grafiken der Niederschlagsperioden verzeichnet diese Achse nur die Anzahl der Muren. In allen anderen Diagrammen beschreibt jene Achse sowohl die Anzahl der Muren, als auch die Niederschlagsmenge, sowie in einer Grafik auch die Schneehöhe in Zentimetern.

Aufgrund der niedrigeren und negativen Werte wurden die Temperaturwerte mit einer anderen Achse dargestellt. Bei den Grafiken der einzelnen Ereignisse, ist dafür die Primärachse und bei dem Übersichtsdiagramm die Sekundärachse verwendet worden. In den Diagrammen der einzelnen Murenereignissen, mussten in manchen Fällen, die maximalen Grenzen von 15, auf 25°C erhöht werden um die höheren Temperaturwerte dieser Zeiträume darzustellen. Im Übersichtsdiagramm ist sowohl die Achse der Temperatur, als auch die der Niederschlagsmenge und Muren angepasst worden, damit Temperatur und Niederschlagswerte nicht überlappen. Der Maximalwert der Achse welche die Niederschlagsmenge beschreibt, wurde je nach dem höchsten Wert festgelegt; bei den Diagrammen der gesamten Zeitreihe auf 100 und bei jenen der einzelnen Ereignisse auf 90 Millimeter. Für die Erstellung der verschiedenen Niederschlagsperioden, ist zu dem Diagramm der täglichen Niederschlagsmengen, eine Zeitreihe mit einem gleitenden Mittelwert von den täglichen Werten, in verschiedenen Perioden hinzugefügt worden. Die Perioden von 3, 7, 30 und 60 Tagen wurden für die Analyse ausgewählt und vier Diagramme erstellt. Die täglichen Niederschlagswerte blieben für den Vergleich im Hintergrund der Diagramme. Um die halbjährlichen Schwankungen annähernd zu analysieren, wurde der gleitende Mittelwert in der Periode 180 bei den täglichen Werten des Niederschlages und der durchschnittlichen Temperaturen verwendet. Zu der Zeitreihe der maximalen Temperaturen im Übersichtsdiagramm, wurde auch die 180 Tage Periode hinzugefügt. Bei den Grafiken der Temperatur und des Niederschlages über den Untersuchungszeitraum ist eine lineare Trendlinie zusätzlich eingefügt worden, zusammen mit der dazugehörigen linearen Funktion. Die Korrelation der Muren mit den Niederschlagsperioden wurde mit den Diagrammen visualisiert und analysiert.

5. Muren in den Österreichischen Alpen

Diese Kapitel ist der erste Teil der Ergebnisse. Es beschreibt die Mechanismen von Muren sowie die Faktoren welche sie beeinflussen, wie die Wintermonate, der Frühling und Sommer in den hochalpinen Gebieten des Alpenraums. Hierzu wird ein bestimmtes dokumentiertes Ereignis genauer analysiert, und die Resultate mit aktueller Literatur zu diesem Thema untermauert.

5.1 Murenereignis Bad Gastein November 2019

Mitte November 2019 kam es in Teilen von Kärnten, Salzburg und Osttirol zu ungewöhnlich starken Niederschlägen, wodurch eine Vielzahl von Murenereignissen aufgetreten ist. Besonders in dem Gebiet südlich und nördlich der Hohen Tauern konzentrierten sich die Niederschläge und auch die Murenereignisse. Die Gemeinden Spittal an der Drau, Zell am See und Lienz waren besonders stark betroffen, sowie auch das Gasteiner Tal. In höheren Gebieten fielen die Niederschläge zum Teil als Schnee. Es kam dadurch zu mehreren Lawinen in Osttirol und Kärnten. Steigende Temperaturen und Regen, verbunden mit der einsetzenden Schneeschmelze, verschlimmerte zusätzlich die Situation in vielen Gebieten.

5.1.1 Statistik Ereignisse November 2019

In der Ereignisdokumentation 2019 (Hübl und Beck, 2020) rückt der Zeitraum zwischen dem 15. und 17. November in den Fokus. Rund 80% der Ereignisse des Jahres verbunden mit Wasser, traten in diesem Zeitraum auf, sowie ungefähr 9% der Rutschungen und fast 11% der Lawinen.

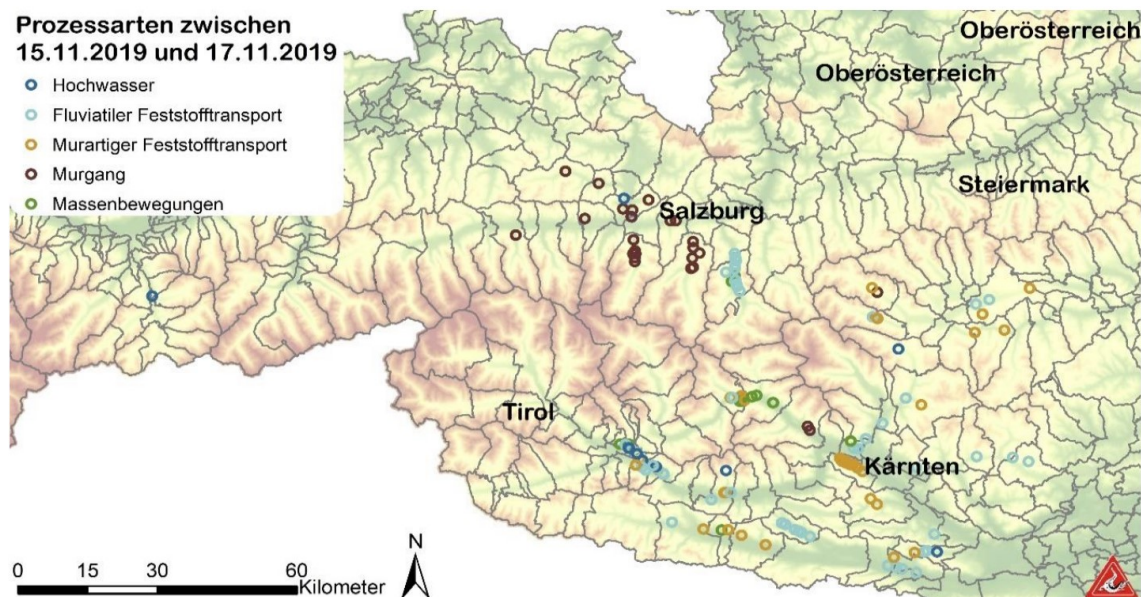


Abbildung 5-1: Verteilung aller Wildbachereignisse im Zeitraum 15. bis 17. November (Hübl und Beck, 2020).

Rund 46 % der 172 Ereignisse in dem Zeitraum, fielen in die Kategorie der murartigen Verlagerungen, murartiger Feststofftransport und Murgang. Ähnlich viele Ereignisse, nämlich 44 %, wurden der Kategorie fluviatilen Verlagerungsprozesse, Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport zugeteilt. Der häufigste Verlagerungsprozess betraf fluviatilen Feststofftransport mit 35 %, gefolgt von murartigem Feststofftransport mit ungefähr 29%. Danach folgten Murgang mit rund 17 % und Hochwasser mit 8%.

Fast einem Drittel der Ereignisse, ohne Einbeziehung der Lawinen, wurden in Spittal an der Drau aufgezeichnet. Mehr als die Hälfte davon waren dem Verlagerungsprozess fluviatiler Feststofftransport zuzuordnen. Mit Abstand die meisten Murgänge, mit 22 Ereignissen, gab es in diesem Zeitraum im Bezirk Zell am See. Die meisten aufgezeichneten Ereignisse in dem Zeitraum, ungefähr 70 %, passierten am 17. November. Nur 6 % sind auf den 15. November zurückzuführen. Bei den Ereignissen mit bekannter Uhrzeit, sind ungefähr die Hälfte am späteren Nachmittag bzw. Abend des 17. November aufgetreten.

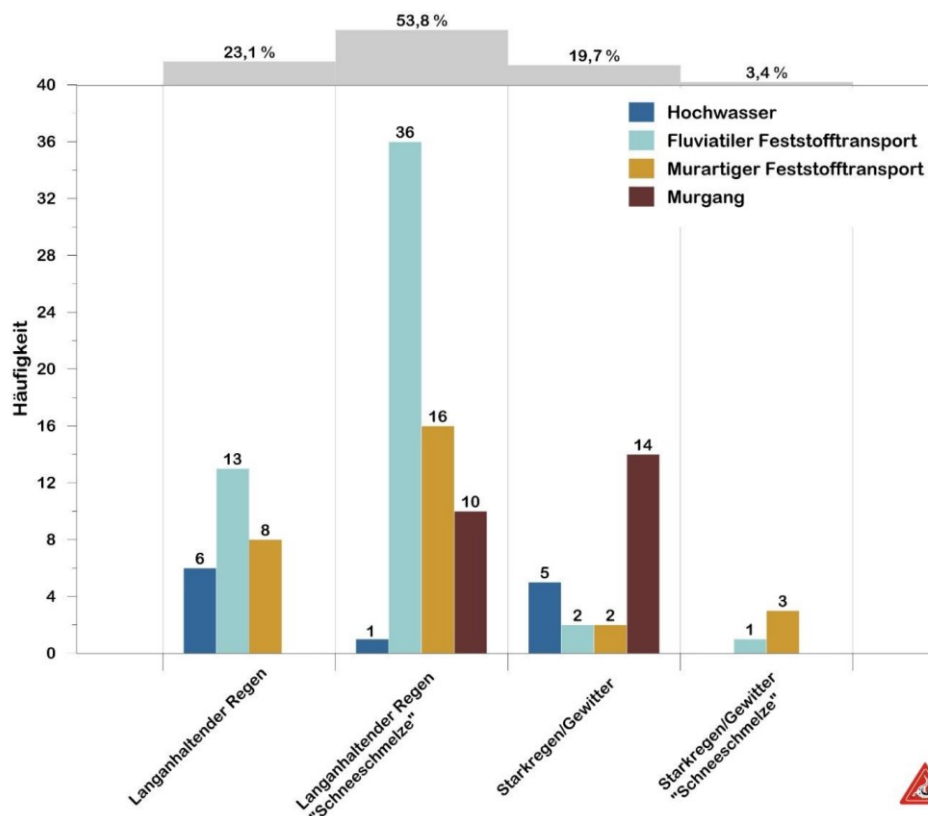


Abbildung 5-2: Auslöser mit zusätzlichen Phänomenen der Ereignisse in der Kategorie Wasser, zwischen dem 15. und 17. November 2019 (Hübl und Beck, 2020).

Die Auslösekriterien von ungefähr 85 % der Ereignisse konnten zugeordnet werden (siehe Abb. 5-2). Langanhaltender Regen in Kombination mit Schneeschmelze wurde als Auslöser für rund 54 % dieser Ereignisse ermittelt. Fluviatile und murartige Feststofftransporte machten in diesem Fall den größten Anteil aus. Starkregen/Gewitter konnten hingegen als Auslöser, von ungefähr 20 % der Ereignisse,

bestimmt werden; den größten Anteil machten dabei mit Abstand die Murgänge aus. Langanhaltender Regen ohne zusätzliches Phänomen, wurde als Auslöser für rund 23 % der Ereignisse erfasst (Hübl und Beck, 2020). Murgänge sind hier nicht vertreten, jedoch vermehrt Hochwasserereignisse.

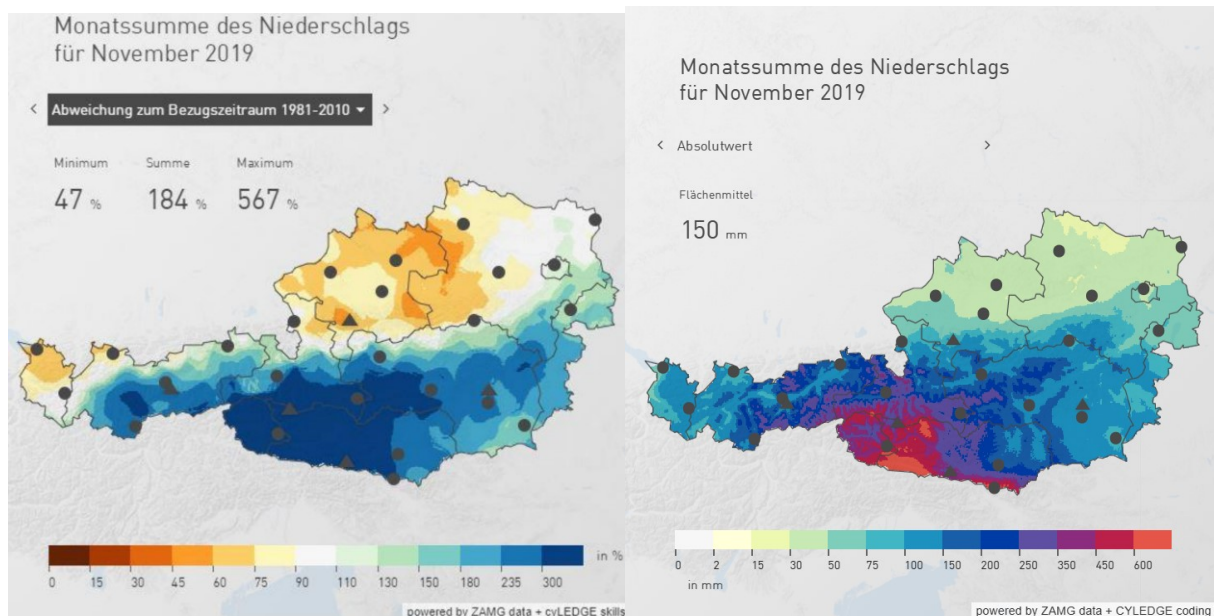


Abbildung 5-3: Niederschlag Österreichweit November 2019, visualisiert, Relativiert (links) und Absolut (rechts), (ZAMG, Klima).

5.1.2 Niederschlag November 2019

Der November 2019 war ungewöhnlich mild und im Süden sehr niederschlagsreich. In vielen Regionen Österreichs südlich der Alpen, war dies der niederschlagsreichste November seit 160 Jahren, mit teilweise bis zu 440 % über dem Mittel (siehe Abb. 5-3). Mit 2,1°C über dem vieljährigen Mittel (1961-1990) auch einer der fünfzehn wärmsten seit dem Messbeginn 1768. Nördlich der Alpen war dieser November hingegen relativ trocken (ZAMG, 2019). Die Süd- und Südwestströmung war in diesem November sehr dominant, milde und oft feuchte Luft strömte aus dem Mittelmeerraum, fast durchgehend gegen die südlichen Ostalpen. Die Wetterstation Zettersfeld auf 1.903 m ü. A. nahe Lienz in Osttirol, verzeichnete um den 18. November die höchste Schneehöhe des Winters 2019/2020 mit über 150 cm (siehe Abb. 5-4). Und das obwohl eine Schneedecke erst Ende der ersten Novemberwoche registriert wurde.

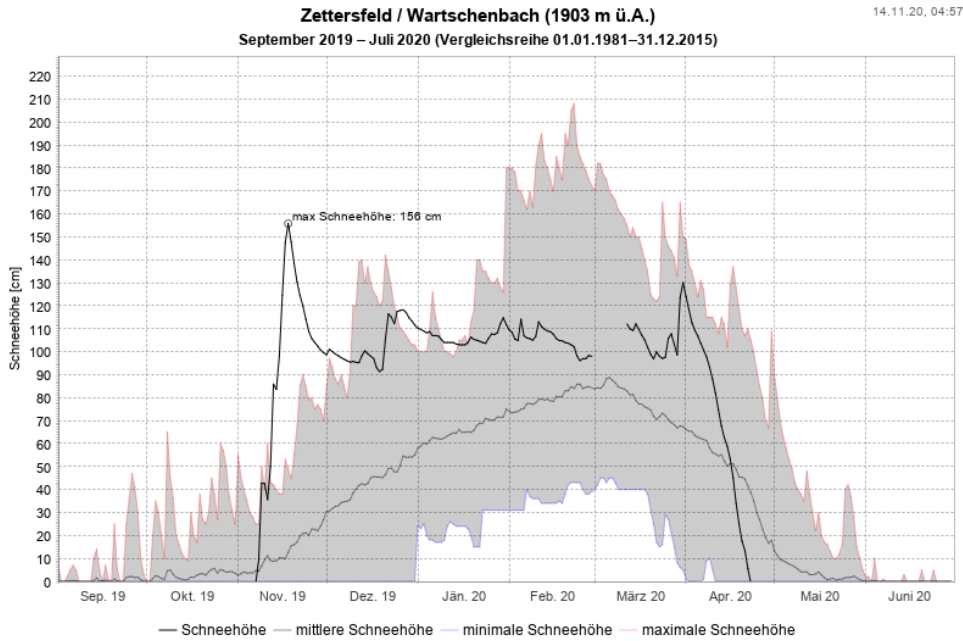


Abbildung 5-4: Verlauf der Schneehöhe am Zettersfeld im Winter 2019/2020 (Lawinenwarndienst Land Tirol, 2020).

Im Gasteinertal kam es während diesem Zeitraum zu einigen Hangmuren und Murgängen. 126 Ereignisse wurden dort zwischen dem 12. und 17. November registriert. Welche Faktoren hier im Spiel waren, könnte Aufschluss auf die Vielzahl der Ereignisse in diesem Zeitraum geben.

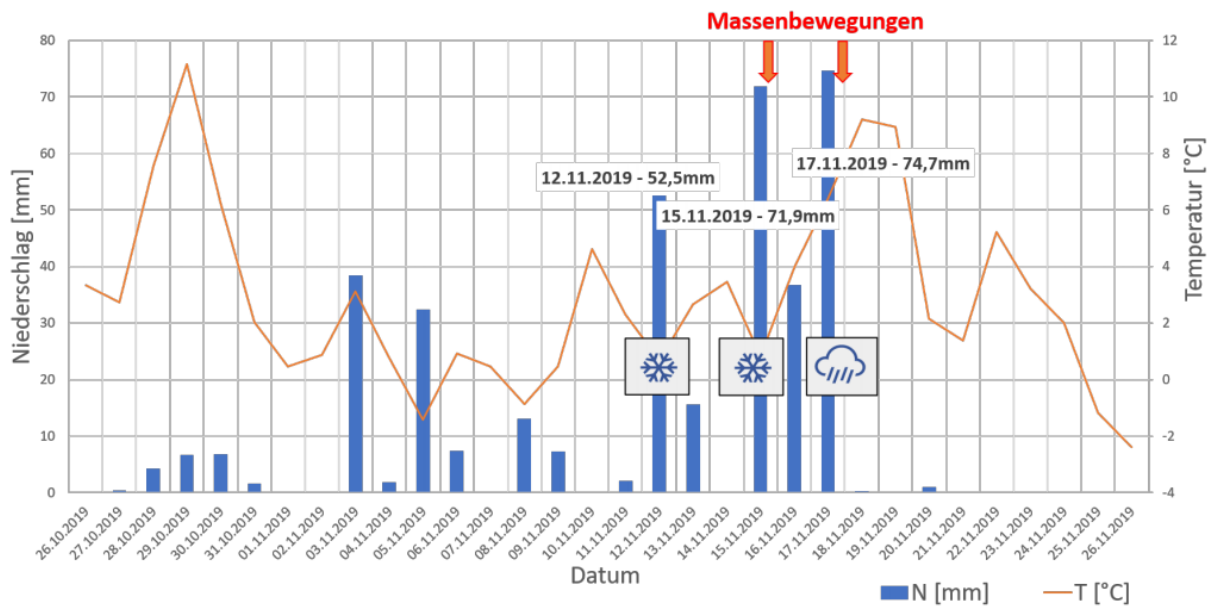


Abbildung 5-5: Temperatur und Niederschlagsverlauf November 2019, Bad Gastein (Hübl und Beck, 2020).

Insgesamt führten drei größere Niederschlagsereignisse, während einer längeren Niederschlagsphase zu den vielen Ereignissen gegen Ende des 17. November (siehe Abb. 5-5). Fünf Tage zuvor, am 12. November kam es zum ersten relevanten großen Niederschlagsereignis. Es war das Schwächste der drei, mit 52,5 mm Niederschlagsmenge in 24 Stunden. Das Folgende am 16.11. umfasste ungefähr 72 mm. Bei beiden fielen Teile des Niederschlages als Schnee. Die Schneefallgrenze schwankte zwischen

750 und 1.100 m. ü. A. (Meter über Adria oder Seehöhe), die Messstation in Bad Gastein der ZAMG befindet sich auf 1.092 m. ü. A. (Hübl und Beck, 2020). Die Schneedecke in Bad Gastein war im Laufe des Novembers auf knapp 70 cm angewachsen. (siehe Abb. 5-6) Nach dem 16. November erhöhte sich die Temperatur stetig, bis das letzte Niederschlagsereigniss am 17.11., mit ungefähr 75 mm folgte. Dieser Niederschlag bestand größtenteils aus Regen; es herrschte Tauwetter, denn die Temperatur war mittlerweile auf 9°C in 1.000 m Höhe gestiegen.

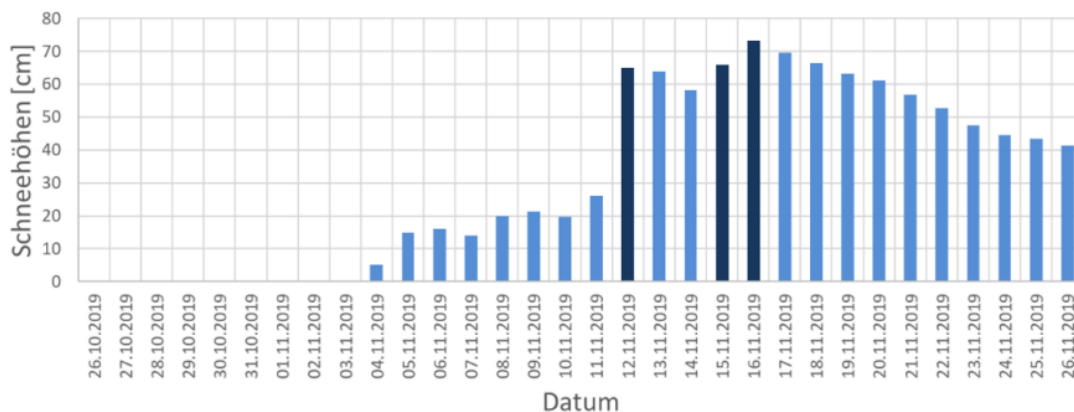


Abbildung 5-6: Gemessene Schneehöhen Bad Gastein, November 2019 (Hübl und Beck, 2020).

Das Gasteiner Tal ist ungefähr 40 km lang und teilt sich am Ende in zwei kleinere Täler in den Hohen Tauern auf. Der Talboden des Gasteiner Tals reicht von ungefähr 800-1500 m. ü. A. (Hübl und Beck, 2020). Es liegen mehrere Ortschaften im Gasteinertal, welche auch unterschiedlich stark, von den Ereignissen betroffen worden sind. Die wichtigsten Ortschaften von unten angefangen: Dorfgastein, Bad Hofgastein, Bad Gastein und Sportgastein, am Ende des Tales. Zwischen den unteren drei Ortschaften kam es zu fast allen Ereignissen siehe (Abb. 5-7), Großteils Hangmuren, Rutschungen und Murgängen. In höheren Gebieten bzw. unterhalb von Dorfgastein, wurden hingegen kaum Ereignisse registriert. Generell wurden Ereignisse mithilfe von Orthofotos, Feldaufnahmen, Aufzeichnung der Wildbach- und Lawinenverbauung und der Bundesforste identifiziert. Die Grafiken und Fotos wurden in der Ereignisdokumentation 2019 publiziert.

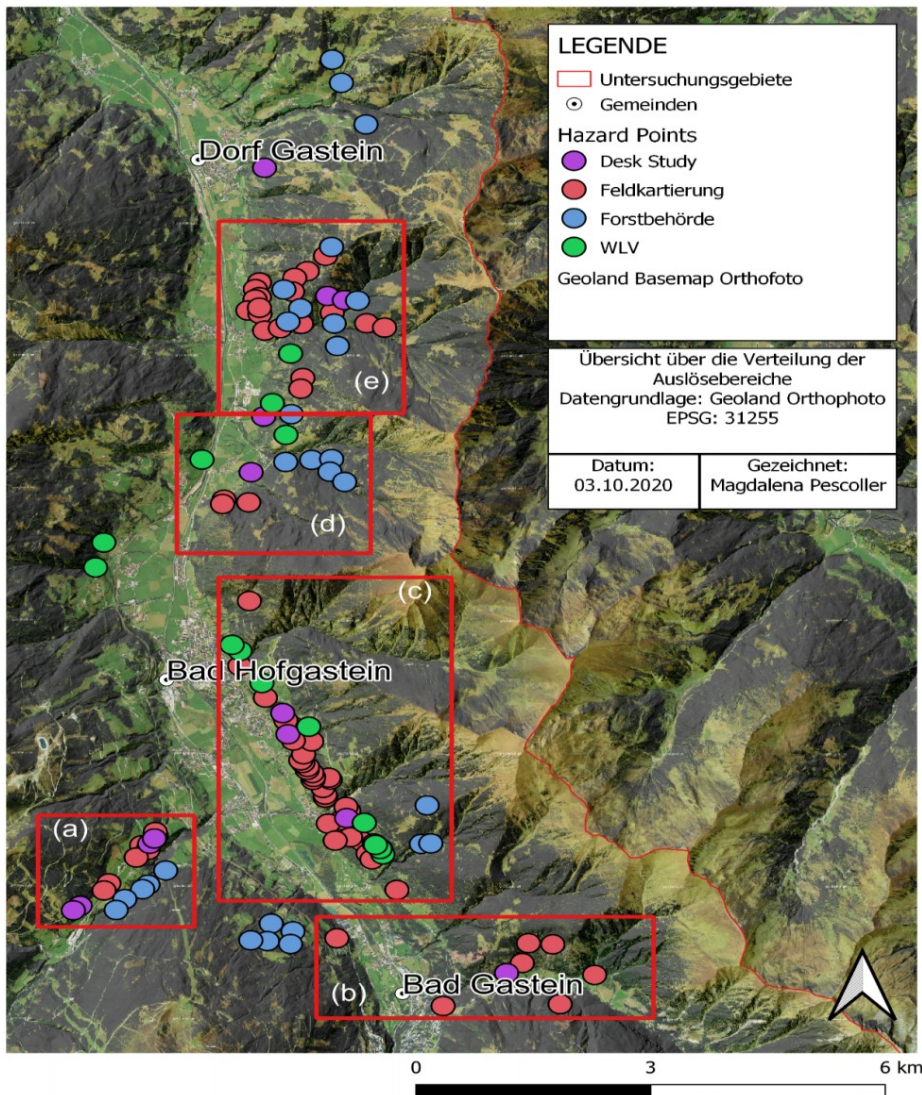


Abbildung 5-7: Verteilung der Ereignisse vom 12. bis 17. November 2019, Unterteilung in 5 Untersuchungsgebiete (Hübl und Beck, 2020).

Geologisch gesehen ist das Gasteinertal geteilt. Der nördliche Teil liegt im Penninikum, Schiefer und Phyllit Gesteine liegen hier zugrunde. Das südliche Gasteinertal ist Teil der Venediger-Decke, wo Granitgneis zu Grunde liegt (Del-Negro, 1977). Die Gasteiner Ache fließt im Gasteinertal und entwässert in die Salzach. Das Gasteinertal ist wie viele Täler der Alpen, stark glazial geprägt, fluviale Sedimente reichen ungefähr 100 Meter tief in den Talboden. Weiter talaufwärts, bei Bad Gastein, sind Moränen der letzten Eiszeit (Würm) zu finden.

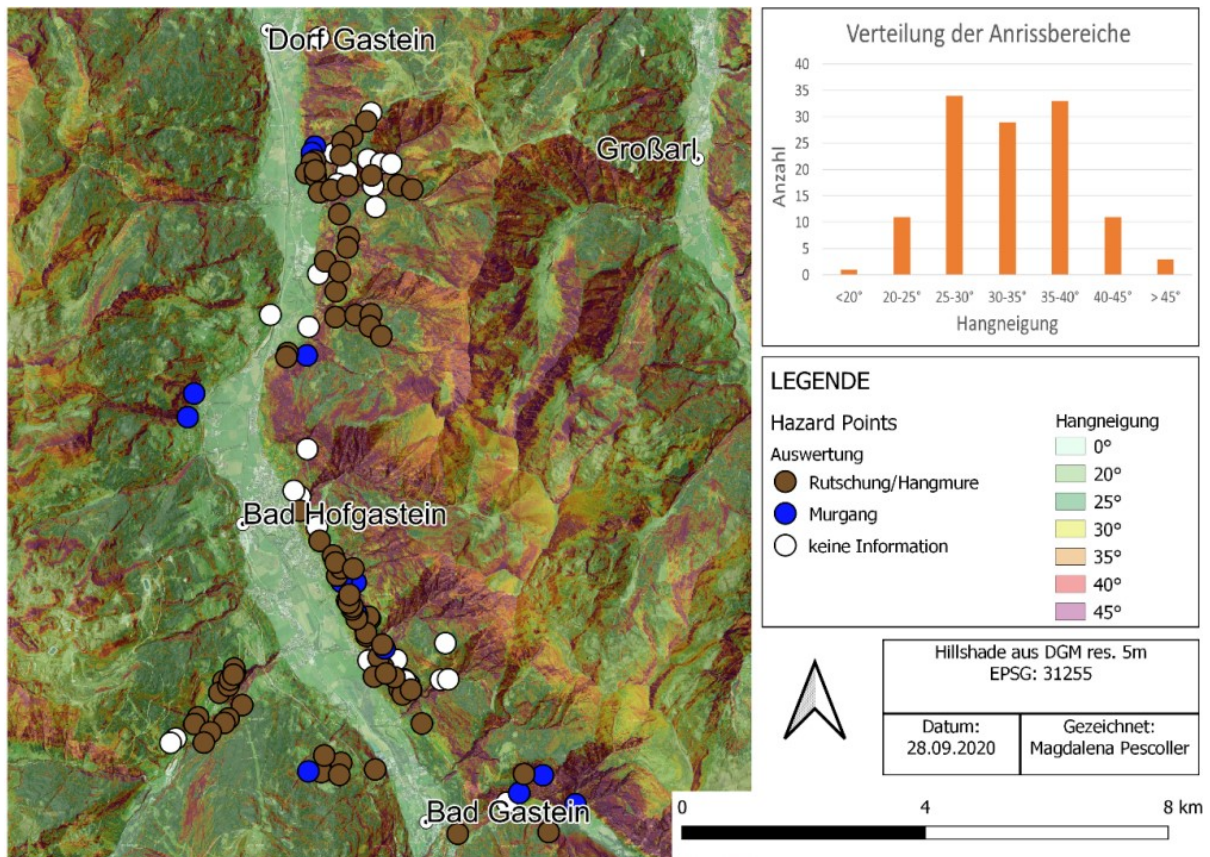


Abbildung 5-8: Verteilung der Ereignisse vom 12. bis 17. November 2019, im Hintergrund liegt eine Karte mit Hangneigungsklassen, (rechts oben) Verteilung der Anrissbereiche der Hangmuren und Murgängen (Talmuren) nach der Hangneigung (Hübl und Beck, 2020).

Mehr als dreiviertel der Ereignisse fanden bei einer Hangneigung von 25 bis 40° statt (siehe Abb. 5-8). Auf der orographisch rechten Seite des Tals, kam es zu eindeutig mehr Ereignissen. Diese ist auch steiler, häufig mit Hangneigungen von 35- 45°. Die linke Talseite ist flacher mit Neigungen um die 25°.

84 % der Ereignisse wurden als Hangprozesse, wie Hangmuren und Rutschungen klassifiziert. 16 % passierten in Wildbächen und wurden als Murgänge identifiziert. Bei knapp dreiviertel der Hangprozesse, war die Gleitfläche auf lockerem Gestein und nur bei 22 % auf festem Grundgestein (Hübl und Beck, 2020).

5.1.3 Analyse der Ereignisse November 2019

Die ungewöhnlich hohen Niederschlagsmengen Mitte November 2019 in den Südlichen Ostalpen und rund um die Hohen Tauern, waren der Hauptgrund für die vielen Ereignisse in diesem kurzen Zeitraum. Drei große Niederschlagsereignisse sind identifizierbar, jedoch kam es schon mit Beginn dieses Novembers zu einer Periode mit andauerndem Niederschlag, welche erst mit dem letzten großen Niederschlagsereignis am 17. November endete. Der Untergrund hatte schon Vorfeuchte bevor die großen Niederschlagsereignisse begannen.

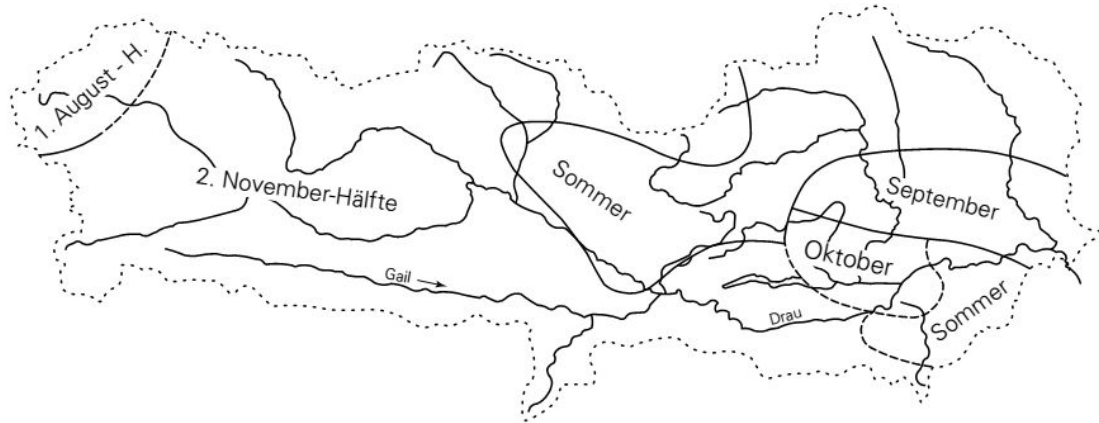


Abbildung 5-9: Skizzierung von bestimmten Jahreszeiten in denen die höchsten täglichen Niederschlagsmengen auftreten in den Südalpen Österreichs (Steinhäuser, 1955).

An der oberen Grafik der Südalpen, Kärnten und Osttirol (Abb. 5-9) und auch in saisonale Niederschlagskarten der Alpen, ist erkennbar, dass hohe tägliche Niederschläge im Herbst und besonders Mitte November am Südlichen Rand der Ostalpen häufig vorkommen (Steinhäuser, 1955), obwohl diese Zeit in vielen Teilen der Alpen in Österreich generell eher trocken verläuft. Feuchte und milde Luftmassen vom Mittelmeer und der Adria, können großen Einfluss haben und zu starkem Niederschlag führen (Frei und Schär, 1998). Letztere können auch über die Südalpen und Hohen Tauern hinaus reichen, wie es der Fall im November 2019 war. Überhaupt sind intensive Niederschläge auch im Winter in den Südalpen, verglichen mit anderen Regionen Österreichs, relativ häufig. Am 10. Februar 1915 wurden 239 mm Niederschlag in Kornat auf 1.035 m, im Lesachtal in Kärnten gemessen, am 12. März 1934 wurden 234,8 mm Niederschlag auf der Nassfeldhütte auf 1.513 m Seehöhe gemessen (Luzian, 2002), (Daten vom Hydrographischen Dienst 1960, 1964). Das waren die zwei höchsten aufgezeichneten täglichen Niederschlagsmengen im Winter in Österreich. Es wurden höhere Mengen, über 600 mm täglicher Niederschlag in anderen Teilen Österreichs gemessen, jedoch nur in den Sommermonaten.

Obwohl die Niederschläge teils heftig waren, ist der Großteil der Ereignisse nicht auf ein einziges Niederschlagsereignis oder Gewitter zurückzuführen. Es kam auch zu viel Schneefall, besonders in höheren Gebieten. Zunehmend wurde es dazu wärmer bis zum 17. November und Schneefall wurde zu Regen. Starker anhaltender Regen kombiniert mit Schneeschmelze, verstärkte das Auslösen von Muren, murartiger Feststofftransporte, Hangmuren und übertretender Bäche. In etwas höheren Bereichen, wo geringere Temperaturen die Wasserverfügbarkeit reduzierten, und es zu weniger Regen und mehr Schneefall kam, waren jene Ereignisse selten. Das wird bestätigt durch (Mostbauer et. al., 2018) und andere Literatur, in der beschrieben wird, wie Schneeschmelze Muren signifikant beeinflussen kann. So kann stärkere Schneeschmelze alleine im Frühjahr an einem warmen und sonnigen Tag, Muren auslösen. Die Kombination von hohen Regenmengen und milden Temperaturen,

könnte die Wasserverfügbarkeit und somit das Auslösen von Muren noch deutlicher verstärken. Die Sonneneinstrahlung und somit die Jahreszeit, die Tageszeit und die Exposition des Hanges sollten in dem Fall kaum eine wichtige Rolle spielen. Das Auftreten der Ausgangssituation, welche zu jenen Ereignissen führte, ist somit nicht beschränkt auf eine bestimmte Jahreszeit, aber auf bestimmte Wetterlagen. Milde Temperaturen und viel Niederschlag in den Alpen können trotzdem besonders in den Wintermonaten zu ähnlichen Situationen führen.

Wie im Gasteinertal ersichtlich, traten ähnliche Ereignisse, wie Hangmuren, Rutschungen und Murgänge oft sehr konzentriert auf. Eventuell liegt es an Faktoren wie Hangneigung, den Eigenschaften des Sediments und der Geologie. Auch die Eigenschaften des Einzugsgebietes könnten bei Murgängen und andere Wildbachereignissen relevant sein. In diesem Fall dürfte die Vegetationszusammensetzung eine eher geringere Rolle gespielt haben, da unterhalb der Baumgrenze an relativ steiles Hängen meistens Fichten und Lärchen dominieren. Die Landnutzung ist jedoch wichtig, denn auf steilen Hängen im Gasteinertal gibt es unter der Baumgrenze einige gepflegte Wiesen. Diese sind generell weniger stabil als bewaldete Hänge, jedoch existieren die Flächen meist schon länger in diesem Zustand und werden regelmäßig gepflegt. Ist stabilisierende Vegetation kaum vorhanden oder in jüngster Zeit stark reduziert worden, sind diese Flächen anfälliger für Hangmuren und Rutschungen (Braun, 2002).



Abbildung 5-10: Muren in Dorfgastein, Nov. 2019 (Foto von AP Kresten Joensson, orf.at, 2019).

Anthropogene Landmodifikationen und Infrastruktur, hingegen könnten wie Schwachstellen oder Störungen wirken und instabile Bereiche darstellen, wo Hangmuren und Rutschungen leichter entstehen können. Vielleicht kann es aber auch an einer selektiven Aufnahme der Ereignisse, in stärker genutzten Bereichen und rund um dichte besiedelte Gebiete, liegen.



Abbildung 5-11: Muren im Pinzgau, 16. November 2019 (Foto von Land Salzburg, MeinBezirk, 2019).

5.2 Analyse Mechanismen von Muren in Alpenen Regionen

5.2.1 Zeitliche und Räumliche Verteilung

Muren sind keine seltenen Ereignisse in den Alpen in Österreich. Jedes Jahr kommt es zu Schäden aufgrund von Murenereignissen. Der Großteil der Muren in Österreich wird jedoch gewöhnlich in den Sommermonaten und im Frühjahr aufgezeichnet.

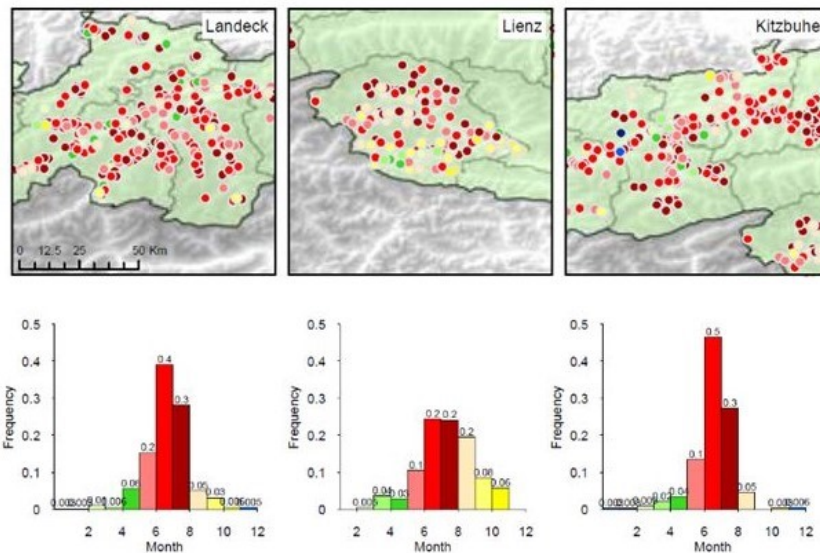


Abbildung 5-12: Räumliche Verteilung (oben) und monatliche Frequenz (unten) von aufgezeichneten Muren ($n=1907$), in verschiedenen Regionen Tirols, Zeitraum 1559 – 2008, (Kaitna et. al., 2014).

Diese Tatsache wird auf der oberen Abbildung (Abb.5-12) verdeutlicht: die meisten Muren wurden im Juli registriert, gefolgt vom August. Wenige bis gar keine Muren traten in den Wintermonaten, von November bis März auf. Muren in diesem Zeitraum traten wahrscheinlich eher in tieferen Lagen auf.

Deutlich sind jedoch die Unterschiede zwischen den Gebieten nördlich oder südlich des Alpenhauptkammes, zwischen Tirol und Osttirol. Während in Norden mit Abstand die meisten Muren auf den Sommer, Juni bis August und besonders den Juli fallen, ist die Verteilung im Süden weniger eindeutig. In den Sommermonaten traten auch hier die meisten Muren auf, jedoch wurden auch sehr viele im Herbst, von September bis November aufgezeichnet, sowie auch im Mai. Im Vergleich dazu wurden in dieser Zeit im Norden weniger Muren aufgezeichnet (Kaitna et. al., 2014).

5.2.2 Einflussfaktoren auf Muren in den Alpen

5.2.2.1 Verteilung Niederschlag

Die Verteilung der Muren spiegelt größtenteils die Verteilung der Niederschläge wieder (siehe untere Abb. 5-13) Am südlichen Rand der Alpen, in Österreich sind das Kärnten und Osttirol, kommt es generell vergleichsweise zu viel Niederschlag im Herbst, während im Norden sich das Niederschlagsmaximum im Sommer, meist im Juli befindet (Frei und Schär, 1998). Die Muren im Mai in Osttirol könnten vielleicht durch starke Schneeschmelze und hohe Schneemengen von schneereichen Wintern verstärkt worden sein.

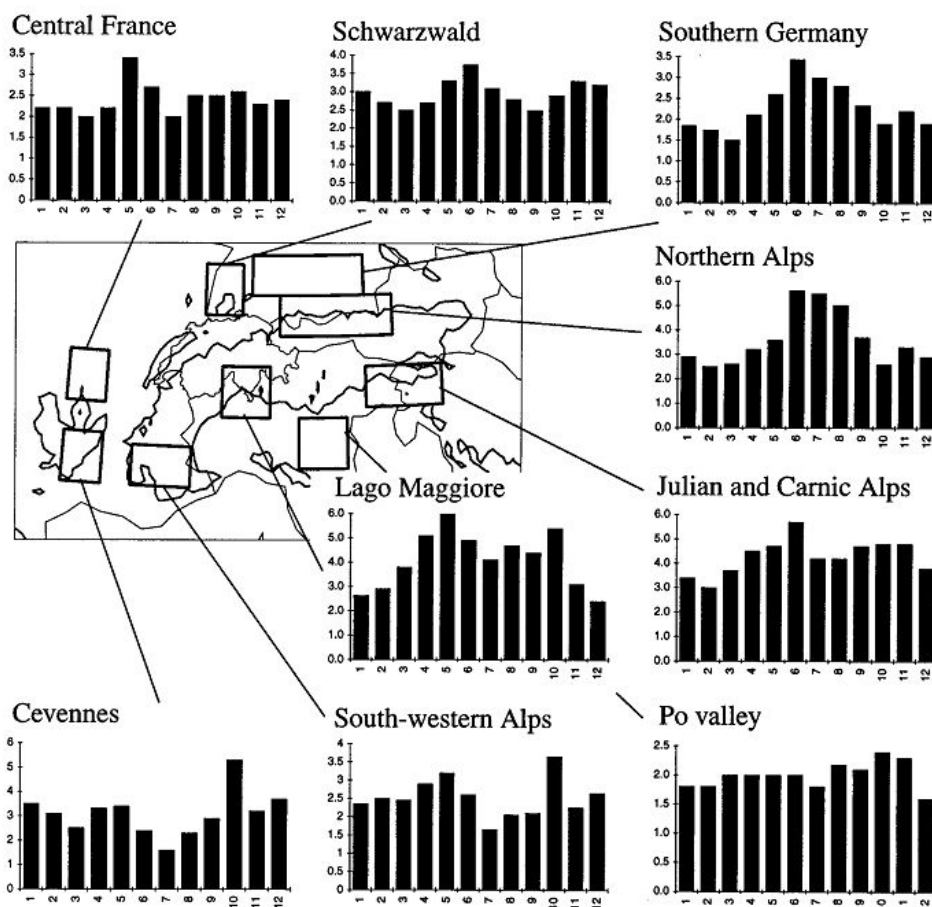


Abbildung 5-13: Verteilung der durchschnittlichen monatlichen Niederschläge, in verschiedenen Zonen (schwarz eingrahmt) der Alpen, (Frei und Schär, 1998).

Größtenteils liegt es daran, dass tägliche lokale Niederschlagsintensitäten und Mengen durch Gewitter in den Sommermonaten viel höher ausfallen können, als durch großflächige frontale Niederschläge. Im nördlichen Teil der Alpen befindet sich das Niederschlagsmaximum im Sommer, weil es hier auch zu viel frontalem Niederschlag kommt (Frei und Schär, 1998). Für die Entstehung von Muren benötigt es viel Wasser, welches durch Niederschläge oder Schneeschmelze an die Oberfläche gelangt. Der Boden kann nur eine begrenzte Menge von diesem Wasser aufnehmen, abhängig von seiner Infiltrationskapazität, sowie der Vorfeuchte, bis die Stabilität stark reduziert wird (Iversion, 1997).

5.2.2.2 Temperatur

In den Wintermonaten vor allem wird ein anderer Faktor besonders wichtig, die Temperatur. Ist der Boden oberflächlich gefroren oder kommt es nur zu festem Niederschlag und keiner Schneeschmelze, kann kaum eine Mure entstehen, da nicht genug Wasser verfügbar ist. Die geringe Bodenfeuchte und Wasserverfügbarkeit im Winter würde die saisonale Verteilung der Murenereignisse, besonders in alpinen Gebieten Österreichs am einfachsten erklären (Mostbauer et. al. ,2018).

Oberflächlich gefrorener Boden, oder besonders tiefgründig gefrorener Boden, wie das in Permafrostgebieten der Alpen der Fall ist, ist deutlich stabiler als stark oder moderat wassergesättigter Boden. Jedoch nur solange dieser gefroren ist; taut der Boden auf und wird dadurch stark wassergesättigt, verringert sich die Stabilität stark. Weshalb Permafrostgebiete in den Sommermonaten oft sehr instabil werden können (Thalparpan, 2000). Jedoch beschränkt sich dieses Problem größtenteils auf hochalpine Gebiete der Alpen (Krautblatter et. al., 2018.) Die Abfolge von Frost und Tauwetter, welche im Winter in den Alpentälern üblich ist, macht aber die Abschätzung von Risiken ausgehend von Muren, Rutschungen und Steinschlag zusätzlich komplizierter.

5.2.2.3 Schneedecke

Eine vorhandene Schneedecke sowie deren Zustand und Höhe, kann einen deutlichen Einfluss auf das Auftreten von Muren haben. Bei hohen Temperaturen, starkem Regen oder direkter Sonneneinstrahlung wird diese schmelzen, und viel Wasser kontinuierlich an den Untergrund freisetzen (Mostbauer et. al., 2018). Die Schneedecke kann aber auch den Boden von Temperaturschwankungen isolieren, wie starkem Frost oder Tauwetter. Mächtiger und dichtere Schneedecken verhalten sich auch anders als dünnere Neuschneedecken. Sie können Regen- und Schmelzwasser eher speichern, ohne dieses sofort an den Untergrund abzugeben. Längere Tauwetterphasen werden dadurch eher überstanden, ohne dass die Schneedecke verloren geht, während dünnere Neuschneedecken schnell schmelzen und die Bodenfeuchtigkeit erhöhen (Bründl, 1997).

In höheren Zonen der Alpen, wo die Schneebedeckung aufgrund geringerer Temperaturen generell länger anhaltend und mächtiger ist, verringert diese, so lange sie in einem gewissen Zustand vorhanden ist, deutlich das Auftreten von Muren. Erst wenn es im Frühling zu der Schneeschmelze kommt, führt das freigesetzte Schmelzwasser zu einem häufigeren Auslösen von Muren (Mostbauer et. al., 2018). Erreicht die Temperatur der Schneedecke durchgehend, von der Oberfläche bis zu der Unterlage, genau 0°C, spricht man von einer „Isothermen Schneedecke“. Keine Schicht der Schneedecke ist dann gefroren. Das tritt meist bei der Schneeschmelze im Frühjahr ein, wenn es nicht mehr zu regelmäßigem Frost kommt und bedeutet, dass das Schmelzwasser ungehindert an den Boden abgegeben wird (Bründl, 1997). Somit wirkt die noch vorhandene Schneedecke als Treiber der Bodenfeuchtigkeit und erhöht die Wahrscheinlichkeit das Muren ausgelöst werden.

Auch Regen kann in dem Zustand der Schneedecke nicht gespeichert werden, sondern wird an den Boden weitergegeben und kann dabei die Schneeschmelze noch verstärken. Bei durchgehender oder teilweise gefrorener und höherer Schneedecke, wird Schmelzwasser der oberen Schichten oder eindringendes Regenwasser gespeichert, und friert oft schon in den mittleren Schichten bevor es zum Boden vordringen kann (siehe untere Abb. 5-14). Im Frühjahr, wenn eine höhere Isotherme Schneedecke vorherrscht und der Untergrund schon stark durchfeuchtet ist, kann nur eine längere Abkühlung, die Wahrscheinlichkeit von Muren verringern.



Abbildung 5-14: Wassergesättigte Schichten zwischen den Schneeschichten, aufgrund von Schmelze an der Oberfläche oder Regen (Foto von Lukas Ruetz, Ruetz, 2020).

5.2.2.4 Schneeschmelze im Hochgebirge

Im Hochgebirge beginnt die Schneeschmelze erst spät, im Mai oder Juni, erst dann kommt es in diesen Zonen zu Muren. Zu dieser Zeit kann das Auslösen von Muren, oft auf Schneeschmelze alleine oder in Kombination mit Niederschlag, zurückgeführt werden. Die allgemeine Ansicht, dass Muren größtenteils auf Starkniederschläge zurückzuführen sind, stimmt zu dieser Zeit in dieser Region zumindest nicht (Mostbauer et. al., 2018).

In Mostbauer et. al. (2018) wird das genauer illustriert (siehe untere Abb.5-15). Anhand von einer Studie im Inneren Pitztal, wurden mehrere aufgezeichnete Muren untersucht und mit Niederschlagsdaten, Abflussdaten des Einzugsgebietes und Daten zur Bodenfeuchte verglichen und modelliert. Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Hochgebirge, das Tal befindet sich deutlich über 1.000 m Seehöhe, auf ungefähr 1.740 m befindet sich der Talboden am Ende des Untersuchungsgebietes, die meisten Muren wurden in etwas höheren Lagen registriert. In den Wintermonaten kommt es aufgrund der Höhe und des damit verbundenen Klimas, kaum zu Murenereignissen. Beginnt die Schneeschmelze im Mai und Juni, können die ersten Muren auftreten. In den Monaten Mai und Juni wurden, laut den Autoren des Papers, in dieser Region, die Muren größtenteils auf Schneeschmelze zurückgeführt und das mit relativ hoher Sicherheit.

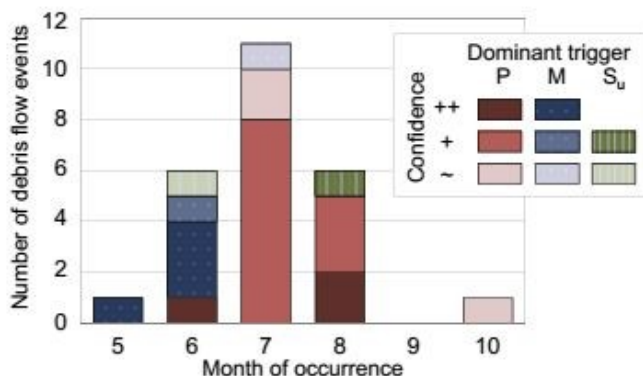


Abbildung 5-15: Muren eingeteilt nach Monat des Auftretens, zusammen mit dem dominanten Auslöser, welcher sich aus der Relevanz gegenüber anderen Faktoren und mithilfe der modellierten Daten mit unterschiedlichen Sicherheiten (dunkel – hell, hohe – niedrige Sicherheit abgeschätzt wurde (Mostbauer et. al., 2018).

Muren im Juli oder August hingegen, sind mit eher geringerer Sicherheit auf oft sehr lokale und schwer erfassbare Starkniederschläge zurückzuführen. Bei der Schneeschmelze besteht deshalb eine hohe Sicherheit für eine repräsentative Analyse, weil diese über den Abfluss, Wetterdaten und Daten zur Schneehöhe abgeschätzt werden kann. Sie ist zwar relativ variabel über die Tageszeit, variiert jedoch räumlich größtenteils nur mit der Höhe. Zumindest wenn man von der Exposition des Hanges und eventuellen Abschattungen absieht, welche aufgrund des Sonnenstandes, im Juni im Hochgebirge viel weniger ein Thema sind, als im Dezember in engen Alpentälern.

Es geht jedoch um den dominanten und damit wahrscheinlichsten Auslöser von einzelnen Murenereignissen. Manche Ereignisse waren jedoch nicht eindeutig oder nur mit geringer Sicherheit auf einen Auslöser zurückzuführen. Selbst wenn es sich nur um die Wasserzufuhr zum Boden handelt, können meist mehrere potentielle Gründe identifiziert werden, welche für das Auslösen verantwortlich gewesen sein könnten.

Ähnlich wie bei anderen Parametern, wurden bei der Schneeschmelze, Schwellenwerte und Zeiträume bestimmt, welche wahrscheinlich zu Muren, in diesem Fall zu Hangmuren oder Rutschungen, führen können. Die Schwellenwerte betreffen die maximale tägliche Temperatur, gemittelt über 6 Tage. Chleborad et. al. (1997) bestimmte 14,4°C als Schwelle für das Auslösen von Rutschungen in Aspen, Colorado USA, durch Schneeschmelze im Frühling. Das ist durchaus vergleichbar mit dem Auslösen von Murenereignissen im Untersuchungsgebiet der Alpen.

Eindeutig erkennbar ist (siehe Abb. 5-16) der Jahresgang der Bodenfeuchte, welche im Sommer das Maximum erreicht und Anfang des Winters deutlich abnimmt. Das ist ein Resultat der Temperatur und des Niederschlages. Schneeschmelze im späten Frühjahr bedingt eine hohe Wasserzufuhr an den Untergrund, das wird verstärkt durch Regenfälle, welche zu dieser Zeit schon mit starker Intensität in großer Höhe vermehrt auftreten. Jedoch kommt es auch noch zu Schneefall und Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes, welche der Wasserverfügbarkeit am Boden entgegenwirken. Hohe Niederschläge im Sommer, oft verbunden mit Starkniederschlägen, können nach der Schneeschmelze eine noch höhere Wasserzufuhr an den Boden bedingen. Weshalb dies in dieser Region die Hochsaison für Muren darstellt. Durchgehender Frost und größtenteils fester Niederschlag führt im späteren Herbst zu einer geringen Bodenfeuchte oder einem ohnehin gefrorenen Boden.

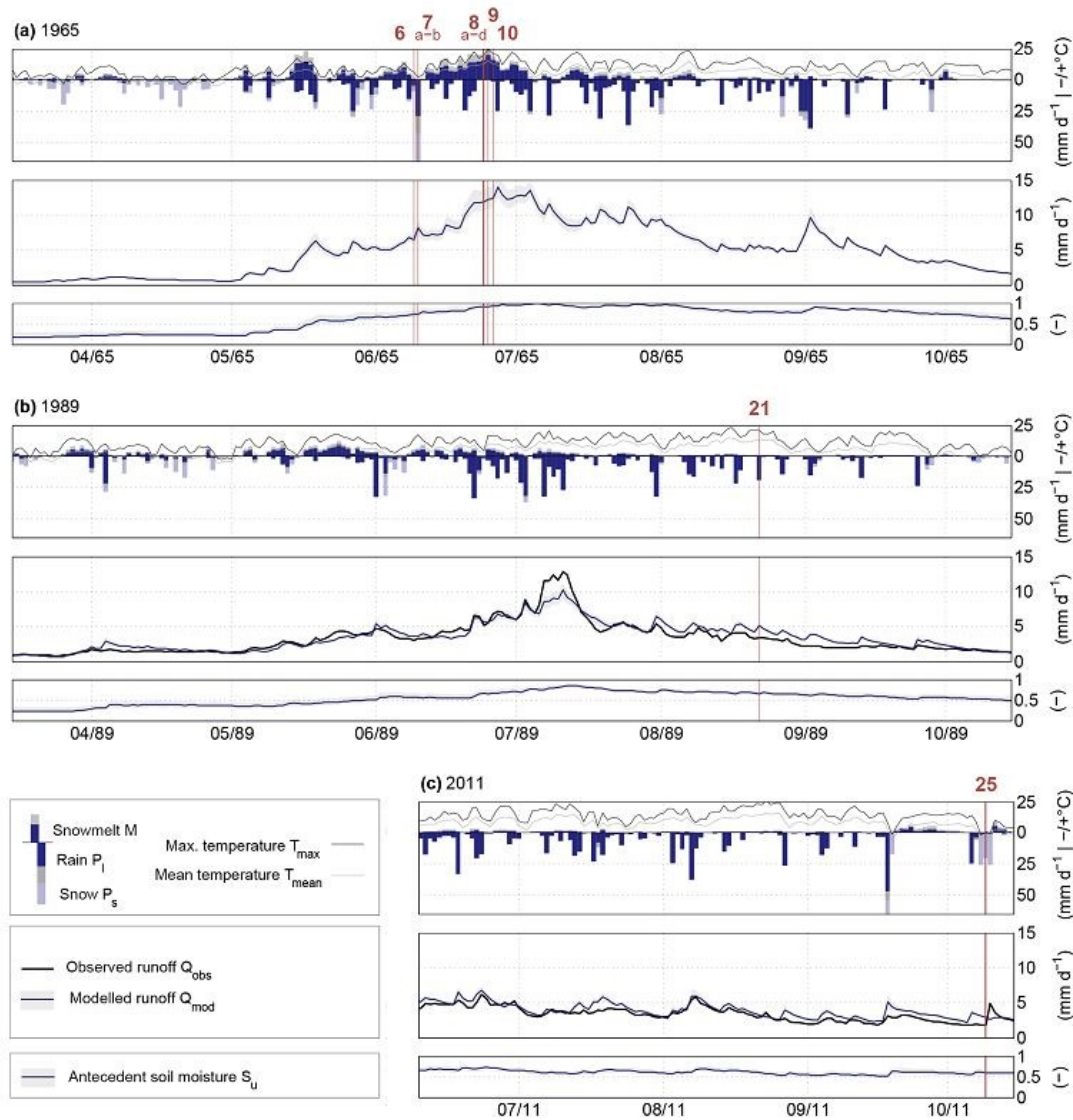


Abbildung 5-16: Verlauf von modellierten Parametern aufgrund aufgezeichneter Daten im Pitztal, mit verschiedenen Murenereignissen (rot) in den Jahren 1965, 1989 und 2011 (Mostbauer et. al., 2018).

In der oberen Grafik (Abb. 5- 16) aus Mostbauer et. al., (2018) werden Murenereignisse in drei verschiedenen Jahren, zusammen mit Parametern welche diese potentiell stark beeinflussen, im Verlauf der Saison dargestellt. Die Ereignisse im Jahr 1965 zeigen am deutlichsten, wie Muren in dem schneedominierten Untersuchungsgebiet entstehen. Schneeschmelze, Regenfälle und langsam steigende Temperaturen haben schon Monate davor die Schneedecke aufgetaut und die Bodenfeuchte graduell erhöht. Die ersten zwei Muren korrelieren deutlich mit starken Niederschlägen, welche zum Teil als Schnee fielen, sowie mit vorheriger Schneeschmelze. Bei den drei anderen Ereignissen geben die Autoren Schneeschmelze als Hauptfaktor für die Auslöse an. Warme Temperaturen bedingten eine starke Schneeschmelze, welche auch an den Abflussdaten deutlich erkennbar ist.

Bei den zwei weiteren Ereignissen ist dies nicht gleichermaßen eindeutig erkennbar, vielleicht weil die Grafik und die Methoden des Papers hier an Grenzen stoßen. Das Ereignis Nummer 21 ist am

wahrscheinlichsten auf starken Niederschlag zurückzuführen. Laut den Autoren des Papers war es aufgrund der hohen Temperaturen wahrscheinlich ein konvektiver sehr lokaler Niederschlag, welchen das Messnetz nicht richtig erfassen konnte. Ein ähnliches Problem trifft auf das Murenereignis im Oktober 2011 zu. Hier konnten zwar die Niederschlagsereignisse größtenteils richtig erfasst werden, jedoch war es laut dem Modell, zu kalt, nämlich durchschnittlich $-3,8^{\circ}\text{C}$. Deshalb wäre der Niederschlag ausschließlich als Schnee gefallen, was das Auslösen von Muren eher unwahrscheinlich macht. Es wurden jedoch nur durchschnittliche Tagestemperaturen zur Modellierung verwendet und laut den Autoren könnte hier der Fehler liegen. Starke Regenfälle, welche auch in den Tagen davor registriert worden sind, haben wahrscheinlich zwischen oder vor den Schneefällen und Temperaturänderungen, auch eventuell zusammen mit leichter Schneeschmelze, zu dem Ereignis geführt.

Alle diese Ereignisse ereigneten sich außerhalb der Wintermonate, in der „Murensaison“ von 15. Mai bis 15. Oktober, welche zumindest für das Pitztal und ähnliche Hochgebirgstäler und Regionen in Österreich gilt. Bedingt durch die Seehöhe herrscht hier ein alpines, schneedominiertes Klima, weshalb hier andere Faktoren und andere Zeiträume relevant für Muren sind. Das rapide Abschmelzen von größeren Schneemengen, im späten Frühjahr, angesammelt über den Winter, bei schon starker Sonneneinstrahlung, bedingt eine sehr hohe Wasserzufuhr an den Untergrund. Das ist in der Region Pitztal die Hauptursache für Muren im Frühling (Mostbauer et. al., 2018).

5.2.2.5 Hydrometrologische Konditionen und Muren im Hochgebirge der Alpen

Ein anderer Artikel (Prenner et. al., 2019) beschreibt hydrometrologische Konditionen in verschiedenen Regionen Österreichs, welche zum Auslösen von Muren und Ereignissen mit fluvialem Transport geführt haben. Darunter befand sich auch das Pitztal, in welchem die Ereignisse in der oberen Grafik (Abb. 5-16) registriert wurden; andere Untersuchungsgebiete umfassten das Montafon, das Defreggental, Gailtal, Paltental und Feistritzal. Die hydrometrologischen Konditionen wurden in langanhaltendem Niederschlag (LLR), kurze Starkniederschläge (SDS) und Schneeschmelze (SM) eingeteilt. Die untere Grafik (Abb. 5-17) aus dieser Arbeit stellt aus Messdaten modellierte Parameter zu drei Ereignissen dar. Jedes einzelne Ereignis ist ein Beispiel für eine spezielle hydrometrologische Kondition welche zur Auslösung führte.

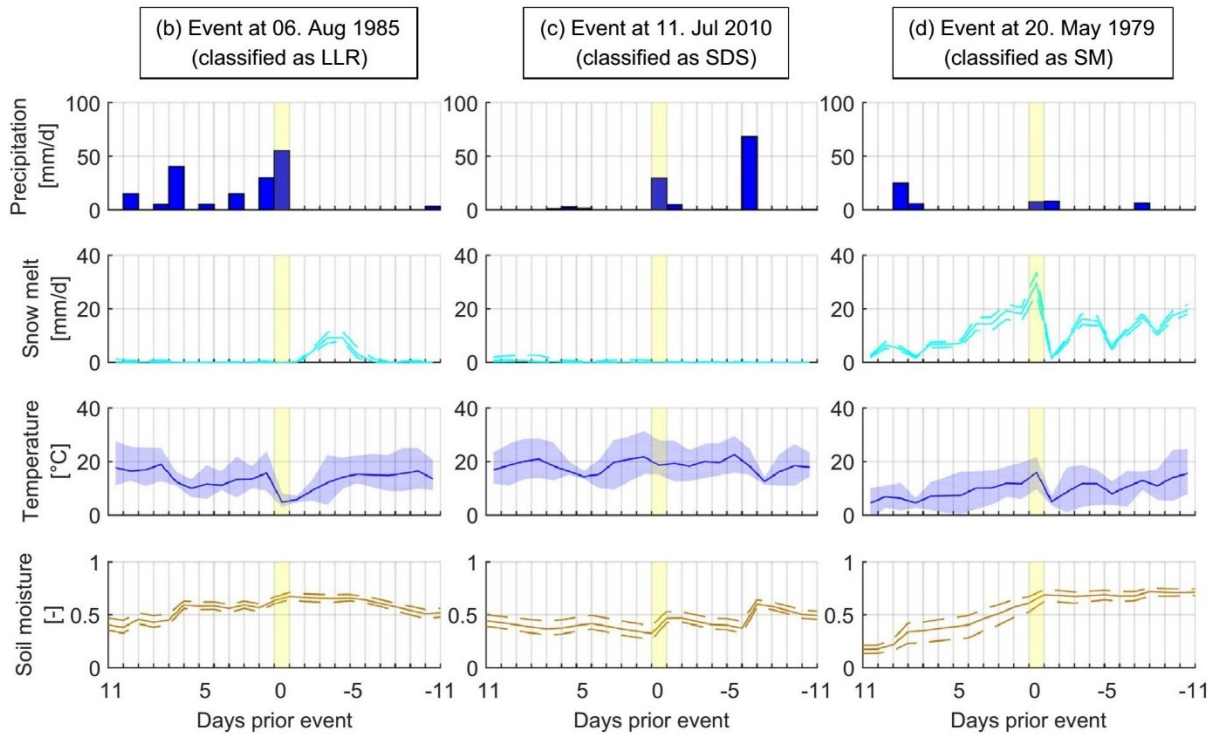


Abbildung 5-17: Hydrometeorologische Konditionen zu drei verschiedenen Ereignissen im Untersuchungsgebiet Pitztal. (b) Das Ereignis am 6. August, 1987 wurde durch langanhaltende Niederschläge ausgelöst, welche die Bodenfeuchte graduell erhöhten. Am Ereignistag kam es zu einem starken Temperatursturz. (c) Am 11. Juli, 2010 kam es zu Starkniederschlägen, verbunden mit starken Temperaturschwankungen, nachdem es in den Tagen davor zu viel Evapotranspiration kam, welche die Bodenfeuchte verringerte. (d) Das Ereignis wurde ausgelöst durch starke Schneeschmelze über mehrere Tage, was zu erhöhter Bodenfeuchte führte (Prenner et. al., 2019).

Die meisten Ereignisse in den Untersuchungsgebieten sind von Starkniederschlägen ausgelöst worden, gefolgt von langanhaltendem Niederschlag, am wenigsten Ereignisse konnten auf Schneeschmelze zurückgeführt werden. Im tiefst gelegenen Untersuchungsgebiet Feistritztal wurde kein einziges Ereignis auf Schneeschmelze als wahrscheinlichstem Auslösegrund zurückgeführt. In den höheren Regionen konnte der Großteil der Ereignisse im Mai und April auf Schneeschmelze zurückgeführt werden, im Pitztal war dies noch im Juni der Fall. Die Verteilung der Ereignisse aufgrund von Schneeschmelze beschränkte sich größtenteils auf April bis Juni. Als Ausnahme dazu kam es im Dezember im Paltental zu Muren aufgrund von Schneeschmelze. Keine Ereignisse sind in den Wintermonaten Jänner und Februar in den untersuchten Regionen registriert worden.

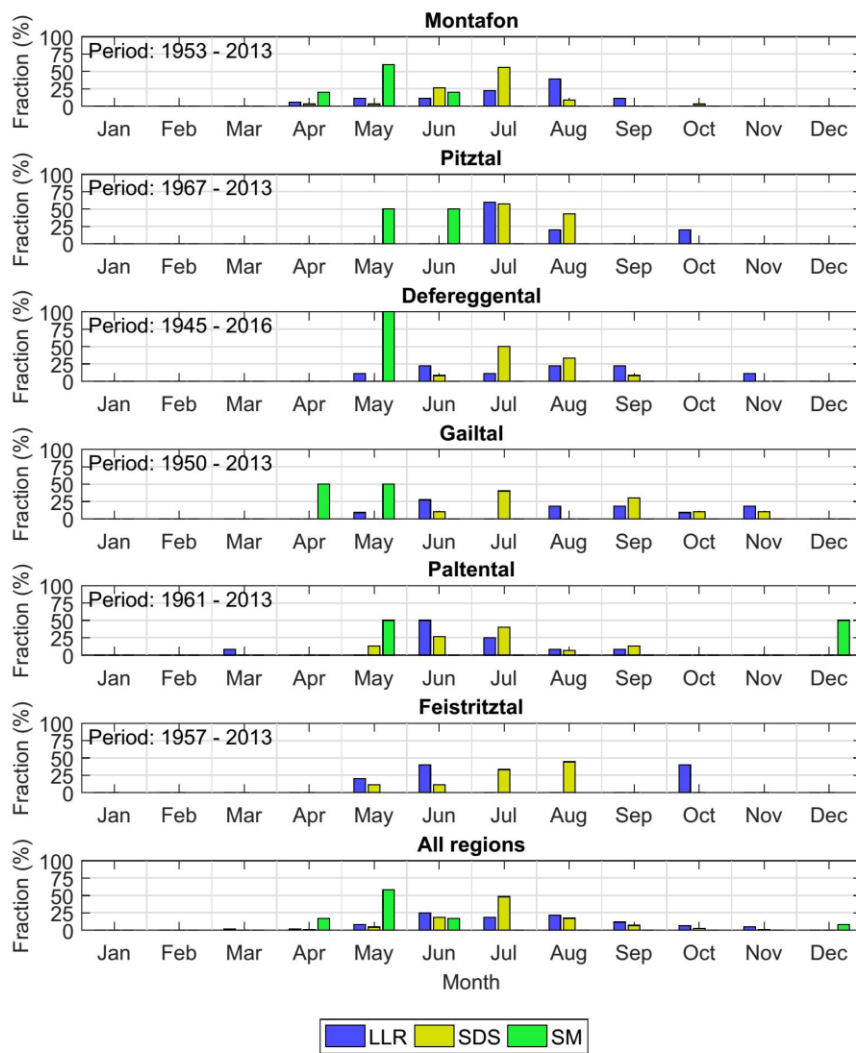


Abbildung 5-18: Zeitliche Verteilung von Muren und fluvialen Transporten in verschiedenen Untersuchungsgebieten (Prenner et. al., 2019).

Die Bodenfeuchte wurde in dieser Arbeit auch zum Vergleich hinzugezogen. Besonders die Ereignisse aufgrund von Schneeschmelze sind stark davon abhängig, 77 % fallen hier auf Wochen mit sehr hoher Bodenfeuchte. Die Vorfeuchte des Bodens, welche nur wöchentlich zum Vergleich vorlag, dürfte in den untersuchten Regionen bei langanhaltenden und besonders bei kurzen Starkniederschlägen deutlich weniger relevant gewesen sein. Kurze Starkniederschläge, könnten laut den Autoren von Prenner et. al. (2019), Muren sowohl auf trockenem als auch feuchtem Untergrund auslösen.

Langanhaltender Niederschlag als Auslösegrund fiel überdurchschnittlich häufig auf die regenreichste Periode der einzelnen Jahre und korreliert auch oft mit dem durchschnittlich niederschlagsreichsten Monat der Region. Bei kurzen Starkniederschlägen ist die Korrelation zu der regenreichsten Periode und zu dem üblichen niederschlagsreichsten Monat viel schwächer. Bei Muren in Zusammenhang mit Schneeschmelze ergibt sich laut Prenner et. al. (2019), eine Spaltung zwischen jenen, welche in sehr niederschlagsreichen Perioden des Jahres aufgezeichnet wurden (Rain on Snow) und wiederum

anderen, welche auf trockene Perioden fielen (intensive Schneeschmelze). Keine hingegen fielen auf moderat niederschlagsreiche Perioden (siehe Abb. 5-19).

Die Ausrichtung der jeweiligen Einzugsgebiete, hatte in den einzelnen Untersuchungsgebieten Auswirkungen auf die Anzahl der Ereignisse und auch in welche Auslösekonditionen diese eingeteilt wurden. Jedoch unterschieden sich die Ergebnisse für jedes Untersuchungsgebiet und es gab keine allgemeinen Erkenntnisse dazu. Wozu es jedoch Erkenntnisse gab, war die Rauigkeit (MRN) des Reliefs der Einzugsgebiete. Die Rauigkeit (MRN) der Topographie beschreibt die Unterschiede zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt in einem Gebiet. Ereignisse aufgrund von Schneeschmelze passierten eher in topographisch raueren Einzugsgebieten im Vergleich zu jenen, welche von langanhaltendem Niederschlag oder Starkniederschlägen ausgelöst wurden.

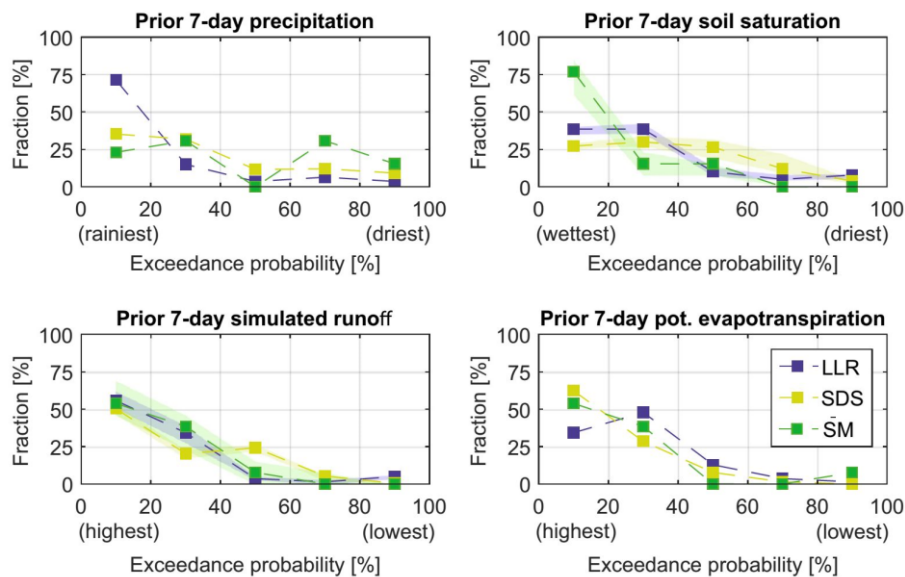


Abbildung 5-19: Überschreitungswahrscheinlichkeit der verschiedenen 7- Tage Konditionen vor Ereignissen, verglichen mit allen 7- Tage Konditionen über das ganze Jahr. Niederschlagssummen, durchschnittliche Bodenfeuchte, Abflusssumme und durchschnittliche potenzielle Evapotranspiration (Prenner et. al., 2019).

Prenner et. al., (2019) konkludiert das die Konditionen für das Auslösen von Muren und fluvialen Transporten sich in den Alpen in Österreich regional stark unterscheiden können. Auch in einer Region kann es Unterschiede geben, abhängig von den Eigenschaften des Einzugsgebietes. Die hydrometrologischen Konditionen welche zum Auslösen von Muren und ähnlichen Ereignissen führen, sind oft komplex und schwer rekonstruierbar. Die Einteilung einzelner Ereignisse in eine Auslösekondition, wie zum Beispiel Schneeschmelze, kann zu Problemen führen. Tägliche auftretende Starkniederschläge, haben einen ähnlichen Effekt wie langanhaltender Regen auf die Bodenfeuchtigkeit und sind manchmal mit den Methoden der Arbeit schwer unterscheidbar.

Ein großes Problem für das angewendete Modell stellen auch spezifische Starkniederschläge, teilweise mit Schneefall, unter kühleren Konditionen dar. Diese treten meist Ende Herbst auf und sind verbunden mit stärkeren Temperaturschwankungen und Schneeschmelze. Eines dieser komplexen Wetteranomalien begann am 3. November 1966 im Gailtal. Anfänglicher kontinuierlicher Regen wurde zu Schneefall. Am nächsten Tag dem 4. November führte ein warmer Föhn zu starker Schneeschmelze, in Kombination mit intensiven Regenfällen bis in höhere Zonen. Das trug zum Auslösen von mehreren Muren und fluvialen Ereignissen an diesem Tag bei (Prenner et. al., 2019). Diese Ereignisse waren laut Modell die Ursache von Schneeschmelze, jedoch mit eher geringer Sicherheit.

In Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel, (2012) wurden Muren in alpinen periglazialen Gebieten der Schweizer Alpen und Niederschläge verglichen. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Murenereignissen kommt, stieg im Untersuchungsgebiet deutlich, wenn die Niederschlagsmenge 20mm pro Tag, 30mm in 2 Tagen oder 40mm in 3 Tagen überschritt. Am Anfang der Murensaison benötigt es weniger Niederschlag um Muren auszulösen, oft unter 20mm pro Tag, als später in der Saison. Von September bis Oktober braucht es generell mehr als 25mm Niederschlag pro Tag bevor es zu Murenereignissen kommt. Laut den Autoren liegt es an der Schneeschmelze im Frühjahr, durch welche die Bodenfeuchte erhöht ist und mehr Wasser zu Verfügung steht. Eine noch dünne aktive Schicht im Permafrostboden, kann noch dazu wenig Wasser aufnehmen. Gegen Ende des Sommers ist der Permafrostboden stärker aufgetaut und kann mehr Wasser aufnehmen. Die Verfügbarkeit von Sedimenten spielt in alpinen Regionen eine große Rolle, da Muren oft regelmäßig an bestimmten Orten auftreten, welche sich kaum verfestigen können. Über den Winter wird Sediment stabilisiert und kann sich akkumulieren, während der Schneeschmelze ist dann mehr Sediment verfügbar, als Ende des Sommers, nachdem Teile des Sediments schon abtransportiert wurden.

5.2.3 Muren in niederen alpinen Zonen

Kann das Verhalten von Muren in den höheren alpinen Zonen der Alpen in Österreich verglichen werden mit jenen in niederen Gebieten in den Wintermonaten? Die Ansammlung von hohen Schneemengen ist viel seltener in niederen Bereichen und beschränkt sich meist auf die Wintermonate, wenn die Sonneneinstrahlung geringer und Tageslängen kürzer sind. Mostbauer et. al., (2018) und Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel (2012) erläutern, dass die Vorfeuchte des Untergrundes und vorherige Niederschläge in alpinen Gebieten, für das Auslösen von Muren, vergleichsweise weniger relevant sind. Was an der geringeren Mächtigkeit der Böden und den Sedimenten liegt, welche Wasser speichern können.

In bewaldeten Gebieten oder in Einzugsgebieten mit tiefgründigen Böden werden vorige Niederschläge und die Bodenfeuchte deutlich wichtiger für das Auftreten von Muren und Hangmuren. In tieferliegenden Gebieten der Alpen, wo die Fähigkeit von Böden, Wasser zu speichern generell höher

ist, ist die Vorfeuchte des Bodens als Resultat von vorherigen Niederschlägen wahrscheinlich wichtiger in der Vorhersage von Murenerignissen. Die zusätzliche Vegetation in diesen Gebieten verleiht dem Untergrund mehr Stabilität. Das regelmäßige Auftreten von Muren an demselben Ort, ist in diesen Regionen beschränkt auf wenige Orte (Costa, 1984). Durch die schon lange Besiedelung und Modifizierung dieser Gebiete, wurden viele ursprüngliche Gefahren durch Muren, verringert.

Auf der anderen Seite haben veränderte Landnutzungen, Bautätigkeiten und Bachverbauungen auch Risiken durch Muren verändert und manche Faktoren hinzugefügt, die vorher nicht existiert haben. Das Klima unterscheidet sich in den hochalpinen Regionen deutlich von niederen Gebieten, die Akkumulation von Schneemassen ist hier meist viel geringer und die Schneeschmelze startet viel früher und ist weniger intensiv.

Neben den Niederschlagsmengen oder der Schneeschmelze welche zu Muren führen, wird oft die Intensität der Niederschläge weniger betrachtet. Konvektive Starkniederschläge in den Sommermonaten können zu lokal sehr hohe Niederschlagsintensitäten führen, welche schwer von einem dünnen Messnetz erfasst werden. Diese sind oft verbunden mit Hagel und großen Tropfen, welche Erosion verstärken. In den kurzen Zeiträumen und mit den Niederschlagsmengen wäre das Erreichen eines positiven Porenwasserdrucks im Boden nicht immer möglich, wie in Prenner et. al. (2019) beschrieben. Stattdessen sammelt und transportiert starker, größtenteils oberflächlicher Abfluss, Sediment talabwärts (siehe Abb. 5-20).



Abbildung 5-20: Mure im Illgraben, Wallis, Schweiz (links) (WSL, 2022), Chalk Cliffs, Colorado USA (rechts) (Coe et. al., 2008).

Mostbauer et. al. (2018) berichtet von höheren, bodenfeuchten Werten und höheren Niederschlagssummen an Ereignistagen von Muren, ausgelöst durch langanhaltenden Niederschlag, im Vergleich zu Starkniederschlägen. Es besteht ein Unterschied im Prozess zwischen Muren, welche durch Starkniederschläge und welchen durch langanhaltenden Niederschlag und Schneeschmelze ausgelöst werden. Diese sind wahrscheinlich trotzdem schwer zu unterscheiden, weil sich das Resultat im Grunde sehr ähnlich ist.

Bei den Ereignissen ausgelöst durch konvektive Starkniederschläge, kommen große Wassermassen zustande, welche viel Sediment erodieren und abtransportieren können. Es kommt weniger zu Kohäsionsverlust aufgrund von positivem Porenwasserdruck. Sind die Sedimente nicht vorhanden, wird es sich wahrscheinlich um ein fluviales Ereignis handeln, mit geringerem Feststoffanteil. Mostbauer et. al. (2018) beschreibt zusätzlich, dass es wenige Anzeichen gibt, das der Prozesstyp durch die hydrometrologischen Umstände kontrolliert wird. Stattdessen könnte das Vorhandensein von bestimmten Sedimenten oder organischem Material im Einzugsgebiet wichtiger sein.

Der Vergleich von verschiedenen Höhenzonen der Alpen in verschiedenen Jahreszeiten, ist vielleicht nur sehr begrenzt möglich. Größtenteils werden Muren in den Wintermonaten nicht auf die hochalpinen Gebiete der Alpen fallen. Konvektive Starkniederschläge beschränken sich auf die Sommermonate oder auf das späte Frühjahr. Außerhalb dieses Zeitraumes kann es zwar zu viel Niederschlag kommen, jedoch sind diese für gewöhnlich weniger intensiv und einfacher messbar, weil es sich meist um großflächige Fronten und Ereignisse handelt. Niederschlagssummen und die Frequenz dieser über Wochen und Monate, wird in den Wintermonaten und den mittleren bis niederen Gebieten der Alpen wahrscheinlich wichtig sein. Ausgeprägte Böden und Vegetationsbedeckung in diesen Zonen der Alpen erhöhen für gewöhnlich Speicherkapazitäten und Stabilität, weshalb viel Niederschlag notwendig ist, bis es zu Muren und Hangmuren kommen kann.

5.2.4 Vorheriger Niederschlag und Schwellenwerte

5.2.4.1 Bestimmung Niederschlagsschwellen

Wenn die Wasserzufuhr durch andere Faktoren, wie Schneeschmelze oder tauenden Permafrost weniger relevant wird, bestimmt die Niederschlagsmenge und die Intensität das Auftreten von Muren. Lange schon wird die Beziehung zwischen Niederschlag und dem Auftreten von Muren versucht zu modellieren. Am einfachsten wird dies mit einer Funktion dargestellt, auf der die Achsen die Niederschlagsdauer und die Intensität abbilden, welche ein Murenereignis ausgelöst haben. Es handelt sich um eine starke Vereinfachung von komplexen Prozessen, doch damit wird es einfach möglich die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen auf verschiedenen Orten der Welt zu vergleichen. Als erstes verwendet wurde diese Methode von Caine (1980) und wurde später von

anderen Autoren für das Vorhersagen von Muren in mehreren Gebieten der Welt angewandt. Wenn diese Methode auf ein bestimmtes Gebiet fokussiert ist, können Risikoanalysen und Frühwarnsysteme damit unterstützt werden. Viele Frühwarnsysteme für Muren und Rutschungen, basieren auf dieser Methode. Solche Frühwarnsysteme werden in mehreren Ländern schon länger verwendet und es wurden schon Warnungen für die Bevölkerung vor Murenereignissen ausgesendet (Wieczorek und Glade, 2005). Es kann jedoch nur eine Wahrscheinlichkeit genannt werden, dass Muren in einem Gebiet auftreten, nicht die genauen Standorte, wo diese wahrscheinlich auftreten oder die Risiken, welche davon ausgehen.

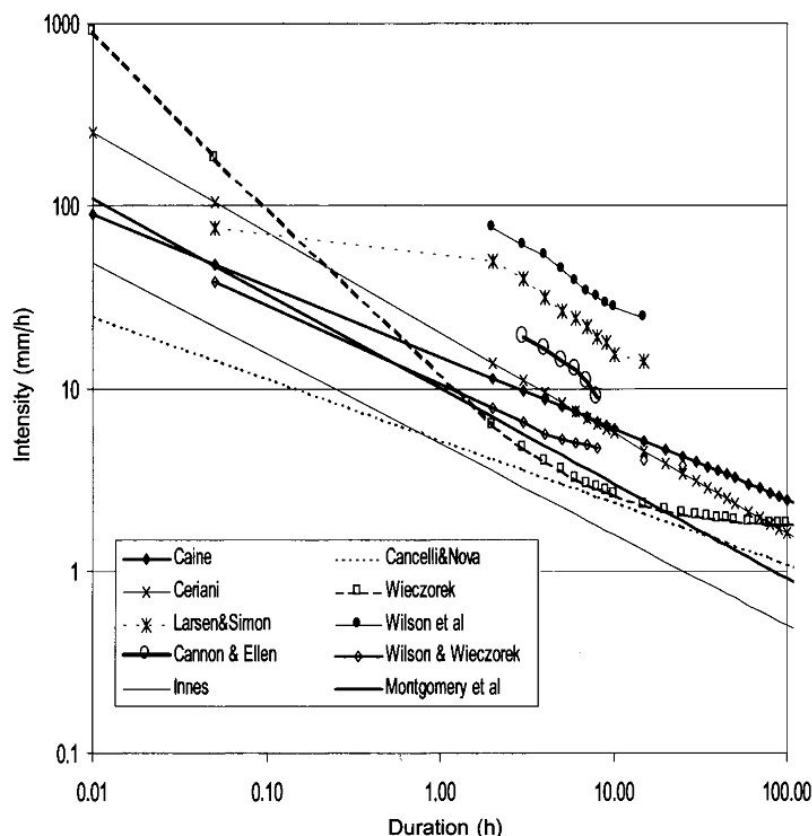


Abbildung 5-21: Weltweite Niederschlagsschwellenwerte für Muren aus Wieczorek und Galde, (2005); Crosta und Frattini (2000). Caine (1980), Innes (1983), Cancelli und Nova (1985), Caraini et. al. (1992) beziehen sich auf globale oder großflächige Gebiete, Larsen and Simon (1993), Cannon and Ellen (1985), Wieczorek (1987), Wilson and Wieczorek (1995), Montgomery et. al. (2000) auf lokalere Gebiete.

Eine andere Methode hierzu, betrachtet nur die Niederschlagsschwelle für die minimale und maximale Auftretswahrscheinlichkeit für Muren. Diese Methode wurde öfters verändert und verfeinert. Glade, (1998) bestimmte für Muren in Wellington Neuseeland, 20 mm minimaler Niederschlag zum Auslösen von Muren; keine aufgezeichnete Mure im Zeitraum 1862-1995 lag unterhalb von diesem Wert. Die maximale Auftretswahrscheinlichkeit (100%) für Muren ergab sich bei 140 mm Tagesniederschlag.

Die Ergebnisse passen nicht mit den Werten von Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel, (2012) aus dem periglazialen Schweizer Hochgebirge im Wallis zusammen. Das Auslösen von Muren durch

Tagesniederschläge von 12-14 mm ist dort beobachtet worden, eventuell weil Schneeschmelze eine wichtige Rolle spielt. Es handelt sich auch um Hochgebirge mit dünnen Bodenauflagen, mit geringen Speicherkapazitäten. Die Vorfeuchte von Böden vor dem Ereignistag ist in dieser Region wahrscheinlich weniger ausschlaggebend.

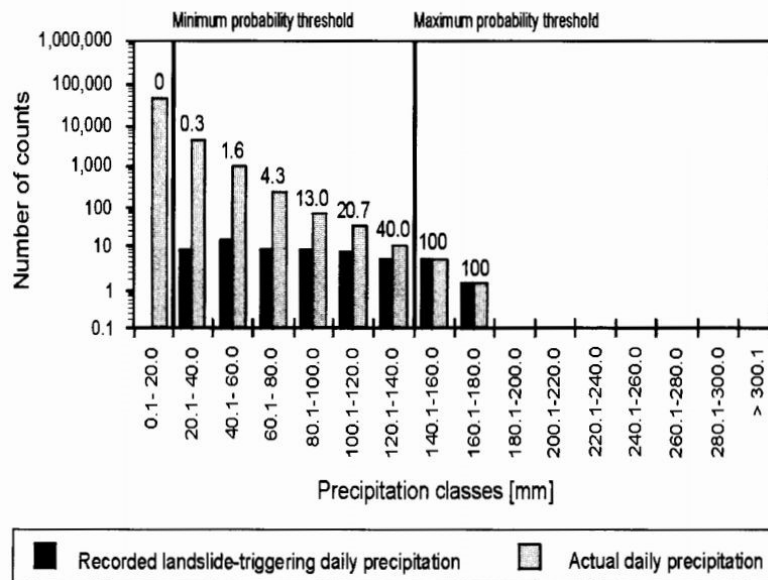


Abbildung 5-22: Daily Rainfall Model (Glade, 1998), Niederschlagsschwellen für Rutschungen und Hangmuren, von 1862-1995, Wellington Neuseeland, [Number of counts] Anzahl der Regentage, Markiert minimale und maximale Wahrscheinlichkeitsschwelle für das Auftreten von Rutschungen und Hangmuren.

5.2.4.2 Vorfeuchte des Bodens

Die Intensität und Dauer der Niederschläge ist jedoch meist aussagekräftiger als die Niederschlagsmenge, wenn es sich um längere Zeiträume wie Wochen oder Monate handelt. Denn durch Abfluss und Evapotranspiration verringert sich die Wassersättigung des Bodens. Um einen positive Porenwasserdruck in einer Stauschicht im Boden zu erreichen oder zu erhalten, braucht es meistens starke und kontinuierliche Wasserzufuhr. Das betrifft vor allem jenen Lagen mit Gefälle, in welchen es üblicherweise zu Muren kommt. Konditionen in den Bodenschichten, welche zu Muren führen können, herrschen eventuell nur sehr kurz vor. Löst keine Mure aus und es kommt kein nachfolgender Niederschlag, sinkt die Wassersättigung des Bodens und die Stabilität des Materials nimmt wieder zu. Manche Untersuchungen zeigen schwachen oder keinen Zusammenhang von Niederschlag in den Tagen oder Monaten vor dem Ereignistag.

Um den Einfluss von vorigen klimatischen Situationen einzubeziehen wurden schon früh spezielle Methoden verwendet. Das „Soil Water Status Model“ ist ursprünglich entwickelt von Crozier und Eyles (1980) und später von Glade (2000) verfeinert worden. Zentral ist die Gewichtung von vorigen klimatischen Zuständen und der Bodenfeuchte nach einem Niederschlagsereignis, mithilfe von

Eigenschaften des Bodens und der Geologie, sowie des Klimas und der Vegetation. Um Niederschläge zu relativieren und Verluste des Niederschlagswassers durch Abfluss oder Evapotranspiration, sowie die Speicherkapazität des Materials abzuschätzen. Das Ergebnis ist der effektive Niederschlag für das Auslösen von Muren und Rutschungen in einer Region. Dieser setzt sich zusammen aus dem Niederschlag an den relevanten Tagen, multipliziert mit dem Verlustkoeffizienten des Niederschlages.

Gao et. al. (2013) beschreibt für ein Untersuchungsgebiet im Jiangjia Graben, in Yunnan, China die Wichtigkeit, von vorigen und langanhaltenden Niederschlägen mit geringer Intensität, für das Auftreten von Muren. Diese können schon bei Niederschlägen mit geringer Intensität ausgelöst werden. Der Niederschlag in dieser Region Chinas fällt größtenteils in der Monsunzeit der Sommermonate, ansonsten ist das Gebiet sehr trocken und auch durch relativ rezente bewirtschaftete Flächen geprägt. Sowohl kurze Starkniederschläge als auch langanhaltender Regen, kann Muren in der Regenzeit auslösen. Die Niederschlagsschwellen für Muren und Hangmuren sind relativ gering. Sie sind nahe der 95. Perzentil- Regressionsline der Niederschlagsereignisse der Region.

Der Zeitraum in dem die Niederschläge vor dem Ereignis passieren, ist von großer Bedeutung. Speziell der Abstand des letzten großen Niederschlagsereignisses zum Ereignistag dürfte wichtig sein. Wiczorek und Sariato (1988) betrachtete Perioden, bis zu einem Monat vor Murenereignissen in Kalifornien. Hohe Niederschläge zwei bis eine Woche vor dem Ereignis hatten einen großen Einfluss auf das Auftreten von Muren. Größere Niederschläge vor dieser Periode oder eine feuchte vorige Saison hatten weniger Einfluss.

Glade (2000) konkludierte für ein Untersuchungsgebiet, größtenteils bestehend aus Weideland in Neuseeland, dass beim Auftreten von Rutschungen, Niederschläge ab zwei 2 Tagen davor, kaum relevant waren für die Auslöse. Der Boden bestand größtenteils aus dünnen Bodenaufgaben, unterhalb aus pyroklastischen Sedimenten und wenig Vegetation mit flachem Wurzelwerk, was eher auf eine geringere Speicherkapazität und Stabilität schließen lässt. Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel (2012) beschreibt für das Zermatt Tal in der Schweiz, dass Niederschläge 5, 10, 15 und 30 Tage vor einem Murenereignis, keine statische Relevanz auf das Auslösen von Muren hatten. Die periglaziale Region wies keine ausgebildeten Böden auf, größtenteils grobkörnige Sedimente wurden von Muren transportiert.

Andere Autoren definieren die Länge der relevanten Periode für Niederschläge vor Murenereignissen jedoch anders. Es gibt gewisse Uneinigkeiten hierzu, welche sich bis heute kaum geändert haben. Die Relevanz der vorigen Niederschläge scheint auch stark je nach Region zu variieren. Das regionale Klima, sowie die relevante Saison scheint größtenteils ausschlaggebend für diese Unterschiede zu sein. Zum Beispiel, ob die übliche Murensaison im Winter stattfindet, wo Evapotranspiration weniger signifikant

ist, oder im Sommer, wo konvektive Starkniederschläge, meist mit hoher Evapotranspiration verbunden sind (Wieczorek und Glade 2005).

Für manche Regionen wurde hingegen ein jährlicher oder saisonaler Mindestniederschlag, für das Auftreten von Muren bestimmt. Das macht vor allem Sinn im Gebieten mit ausgeprägten Regen- und Trockenzeiten, wie in mediterranen oder subtropischen Klimazonen. In anderen Klimaten, wie in den Alpen, ist das komplizierter, weil die Niederschläge gleichmäßiger verteilt über das Jahr stattfinden. Campbell (1975) bestimmte für das südliche Kalifornien eine saisonale Mindestniederschlagsmenge von 267mm damit es zu Muren kommen kann. Das ist ausgehend von einem sehr trockenen Zustand des Untergrundes, vor der üblichen Regenzeit in den Wintermonaten, an der südlichen Westküste der USA. Wenn Niederschläge häufiger vorkommen wie in nördlicheren Teilen der Westküste oder auch im Großteil der Alpen, ist die Schwelle, wenn vergleichbar, eher niedriger.

5.2.4.3 Durchschnittlicher Niederschlag und Niederschlagsschwellen

In sehr dynamischen und instabilen Regionen, wie zum Beispiel in hochalpinen Gebieten, entwaldeten Flächen bzw. rezenten Flächen vulkanischem Ursprungs, treten Muren besonders häufig auf. Ausreichende Niederschlagsmengen oder Akkumulation von größeren Schneemengen, ist zudem notwendig um Muren auszulösen. Muren sind im Grunde sehr rapide und intensive Erosion. Treten Muren regelmäßig an derselbe Stelle auf, bedeutet das sehr starke Erosion. An diesen Stellen kann ein Boden oder eine schützende Vegetation meist nicht entstehen.

Das notwendige erodierbare und transportierbare Material muss jedoch vorhanden sein. Das ist eventuell nur in Gebieten der Fall, welche durch stärkere Hebung beeinflusst werden. Oder Akkumulation von Material findet durch andere Prozesse statt, wie vulkanische Aktivität oder die Ansammlung von organischem Material. Das zeigen auch Untersuchungen aus den Alpen und Kalifornien. Vorige Murenereignisse welche Sedimente abtransportierten, schwächten oder verhinderten Muren. An anderen Zeitpunkten und bei ähnlichen Konditionen und Niederschlag, traten stärkere Murenereignisse auf. Das lässt sich auf vorhandenes Material und die Akkumulation von Sedimenten zurückzuführen.

Ansonsten können noch Änderungen oder Schwankungen im Klima zu häufigeren Murenereignissen führen. Jedoch braucht es selbst in solchen Gebieten meist, für die Region überdurchschnittliche Niederschläge um Muren aufzulösen.

Ältere Studien aus Italien von Govi und Sorzana (1980) zeigten, dass die Geologie und der Boden weniger relevant für die Verteilung und Häufigkeit für Muren waren. Die Niederschlagsschwellen der einzelnen Gebiete korrelierten mit den durchschnittlichen Niederschlägen. Höhere durchschnittliche Niederschläge bedeuteten, höhere Niederschlagsschwellen für das Auslösen von Muren.

6. Analysenergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten

6.1 Statistiken zu Muren in Österreich

Insgesamt werden 7310 Ereignisse der Kategorie „Muren und muratiger Feststofftransport“ im Datensatz der WLV aufgelistet im Zeitraum zwischen 544 n.Ch. und April 2023. 3796 Ereignisse fallen auf die Sommermonate Anfang Mai bis Ende Oktober, 389 auf die Wintermonate, 3225 Ereignisse beinhalten keinen Bezug zu einem Monat oder Tag. Abzüglich jener Ereignisse ohne Monatsbezug der Kategorie „Muren und muratiger Feststofftransport“, fallen 9,3% auf die Wintermonate und 90,7% auf Sommermonate. Der Monat mit den meisten Muren ist mit knapp 1300 Ereignissen der Juli, gefolgt vom August mit ungefähr 1100. Der Februar mit 6 Ereignissen und der Jänner mit 12, verzeichneten die wenigsten Murenereignisse. Das Bundesland mit den meisten Muren ist Tirol, mit 3300 aufgezeichneten Ereignissen. In den Wintermonaten jedoch wurden, mit 171 Ereignissen, die meisten Muren in Kärnten aufgezeichnet. In Tirol, welches Osttirol inkludiert, wurden im selben Zeitraum nur 91 Ereignisse aufgezeichnet.

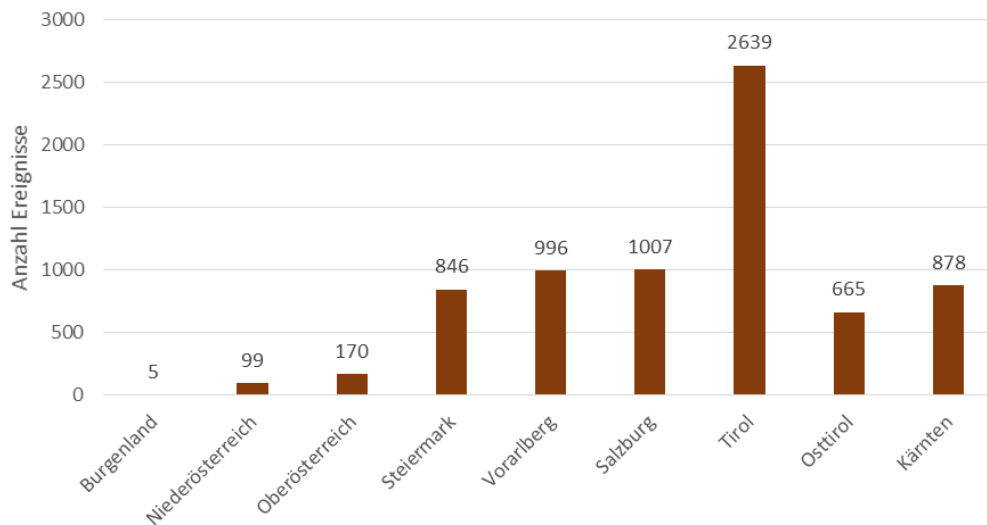


Abbildung 6-1: Ereignisse der Kategorie "Murgang und muratiger Feststofftransport", des Datensatz der WLV nach Bundesland, insgesamt.

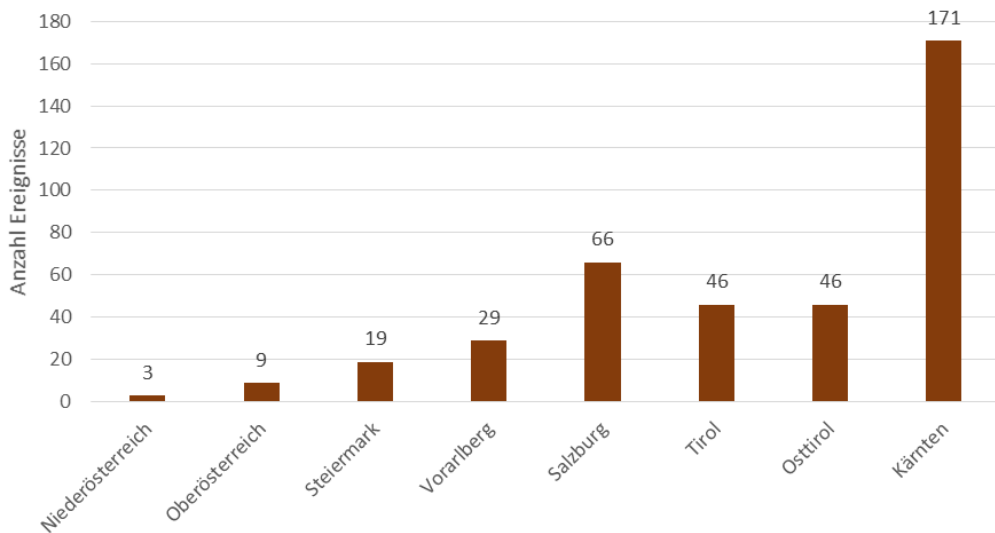


Abbildung 6-2: Ereignisse der Kategorie "Murgang und muratiger Feststofftransport" des Datensatz der WLW nach Bundesland, in den Wintermonaten November bis April.

Von den insgesamt 7310 Ereignissen, ist bei rund 77 % die dominante Prozessart als „Murgang“ registriert und bei den restlichen 23 % als „murartiger Feststofftransport“. In den Wintermonaten sind 238 Ereignisse oder 61 % der Kategorie Murgang und 152 Ereignisse, rund 39 % als muratiger Feststofftransport aufgezeichnet worden.

Von der anderen Kategorie „Hangmuren“, unter anderem auch als Rutschungen bezeichnet, wurden deutlich weniger Ereignisse aufgezeichnet. Insgesamt sind 365 Hangmuren im Datensatz aufgelistet. Von 256 Hangmuren mit einem genauen Tages- oder Monatsbezug, sind 65 Ereignisse, rund 25 % in den Wintermonaten aufgetreten, und 109 Ereignisse, oder 75 % in den Sommermonaten. Die Verteilung fällt hier, verglichen zur anderen Kategorie, weniger stark auf die Sommermonate. Das Bundesland mit den meisten Hangmuren ist Tirol, ähnlich viele sind auch in Vorarlberg aufgezeichnet worden, der Großteil fällt jedoch auf ein Ereignis im Mai. In den Wintermonaten sind in Tirol mit Abstand die meisten Hangmuren aufgezeichnet worden, in Kärnten waren es etwas weniger Ereignisse. Jedoch fast alle der Hangmuren in Kärnten in den Wintermonaten wurden im Bezirk Spittal an der Drau registriert, aber die meisten außerhalb des Untersuchungsgebietes. Dadurch, dass die Anzahl der Ereignisse vergleichsweise gering ausfällt, wurden die Hangmuren nicht in die Analyse inkludiert.

6.2 Untersuchungsgebiet

6.2.1 Beschreibung

Das Untersuchungsgebiet umfasst mehrere Gemeinden in Kärnten, in den Bezirken Spittal an der Drau und Villach-Land. Gemeinden: Spittal an der Drau, Baldramsdorf, Klieblach-Lind, Lehndorf, Lurnfeld, Mühldorf, Sachsenburg, Stockenboi.

Im Vergleich zu anderen alpinen Gebieten Österreichs ist dieses eher dichter besiedelt, die größte Ortschaft im Untersuchungsgebiet ist Spittal an der Drau. Spittal an Drau ist die viert größte Ortschaft Kärntens. Das gesamte Untersuchungsgebiet entwässert in die Drau. Von Westen nach Osten fließt die Drau durch Osttirol und Kärnten, und ist der größte Fluss der Region. Sie entspringt in Innichen in Südtirol und mündet bei Kroatien in die Donau. Im Untersuchungsgebiet bei Möllbrücke, mündet die Möll aus dem Mölltal in die Drau. Diese kommt aus dem Nordwesten und entspringt beim Großglockner.

Die Mündung der Drau führt vom oberen Drautal, in das Lurnfeld, welches weiter flussabwärts zum untere Drautal wird. Am Ende des Mölltales und nach der Mündung, wird das Tal sehr breit. Später gibt es eine Spaltung des Tales, zwischen unterem Drautal und dem Millstätter See, welche durch eine kleinere Erhebung getrennt werden. Im Untersuchungsgebiet gibt es keine größeren Regulierungen oder Schutzbauwerke an der Drau. Die Möll ist jedoch vor der Mündung aufgestaut und stark reguliert. Ein Teil wird vor der Mollbrücke unter dem Berg umgeleitet, und vor der Mündung in die Drau geführt. Schutzbauten gegen Muren und Sturzfluten sind an den Zuflüssen und in den Nebentälern größtenteils nicht erkennbar.

In den flachen und größtenteils breiten Tälern des Untersuchungsgebietes wird außerhalb des Siedlungsraumes größtenteils Ackerbau betrieben. Die meist steilen Bergflanken werden unterhalb der Baumgrenze, wie Österreich häufig üblich, größtenteils forstwirtschaftlich genutzt. Besiedelung an den Hängen ist abhängig von der Neigung des Hanges und auch der Ausrichtung. Süd- oder Südwesthänge in mittleren Höhen, sind aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung im Winter, häufiger besiedelt. Steilere und gepflegte Wiesen sind auch eher in der Nähe dieser Ansiedlungen auffindbar.

Durch die eher Inneralpine Lage, sind die Niederschläge etwas weniger ergiebig als im südlicheren Gailtal. Die Niederschläge kommen in der Region größtenteils aus Tiefdruckgebieten im Adria- und Mittelmeerraum. Der Einfluss von feuchten Luftmassen aus dem Nordwesten, ist aufgrund der Hohen Tauern gering. Trotzdem wird in Spittal an der Drau durchschnittlich 970 mm Jahresniederschlag gemessen. Das Klima ist am Talboden vergleichsweise kühl im Winter und schneereich. Rund 88 cm Neuschnee und eine Schneebedeckung von 86 Tagen wurden in Spittal an der Drau im Zeitraum von 1971 bis 2000 gemessen. Die durchschnittliche jährliche maximale Schneehöhe lag bei 106 cm. (ZAMG, 2002)

Die Höhenunterschiede im Untersuchungsgebiet sind groß, der Talboden nach der Mündung liegt bei ungefähr 550 m, während die umliegenden Berge oft deutlich über 2.000 m Seehöhe liegen. Der höchste Gipfel im Untersuchungsgebiet, ist mit 2.775 m, der Hohe Leier in der Reisseckgruppe, im Gemeindegebiet Mühldorf. Drei größere Gebirgsgruppen mit Gipfeln, über 2.000 m liegen zum Teil im Untersuchungsgebiet, die Reisseckgruppe und Kreuzeckgruppe, welche noch Teile der Hohen Tauern

sind, sowie die Latschurgruppe in den Gailtaler Alpen. Die Reisseckgruppe ist Teil des Penninikum; Zentralgneis und Gesteine der Bünderschiefer-Gruppe sind hier vorherrschend. Die Kreuzeckgruppe und die Latschurgruppe hingegen sind Teil des Ostalpin. Die vorherrschenden Gesteine des ersteren sind hier Paragneis und Glimmerschiefer, während in der letzteren Gebirgsgruppe eher teilweise metamorphen Sediment- und Vulkanitgesteine auffindbar sind (Del-Negro, 1977).

6.2.2 Statistiken zu Klimadaten

6.2.2.1 Temperaturwerte

Über den Untersuchungszeitraum von 68 Jahren in den Monaten November bis April, beträgt die Durchschnittstemperatur 1,9°C, errechnet aus den durchschnittlichen Tageswerten. Die Temperaturextremwerte reichen von 28°C bis zu -24,4°C. Der durchschnittliche tägliche Höchstwert liegt bei 6,5°C und der tägliche Tiefstwert bei -2,7°C. Die Klimadaten beschränken sich auf den Talboden. Die täglichen Temperaturschwankungen in den Wintermonaten fallen hier oft sehr stark aus. In den alpinen Zonen des Untersuchungsgebietes dürften die Temperaturen deutlich kühler ausfallen. Die Durchschnittstemperatur auf der Station der Reisseckhütte (2.252 m Seehöhe), lag zwischen 1954 und 1976, bei ungefähr -4,2°C. Bei bestimmten Wetterlagen oder bei unbewölkten Nächten kann es zu täglichen Temperaturschwankungen von bis zu 20°C kommen. Der kälteste Monat ist der Jänner gefolgt vom Dezember, der wärmste der Wintermonate, ist der April gefolgt vom März.

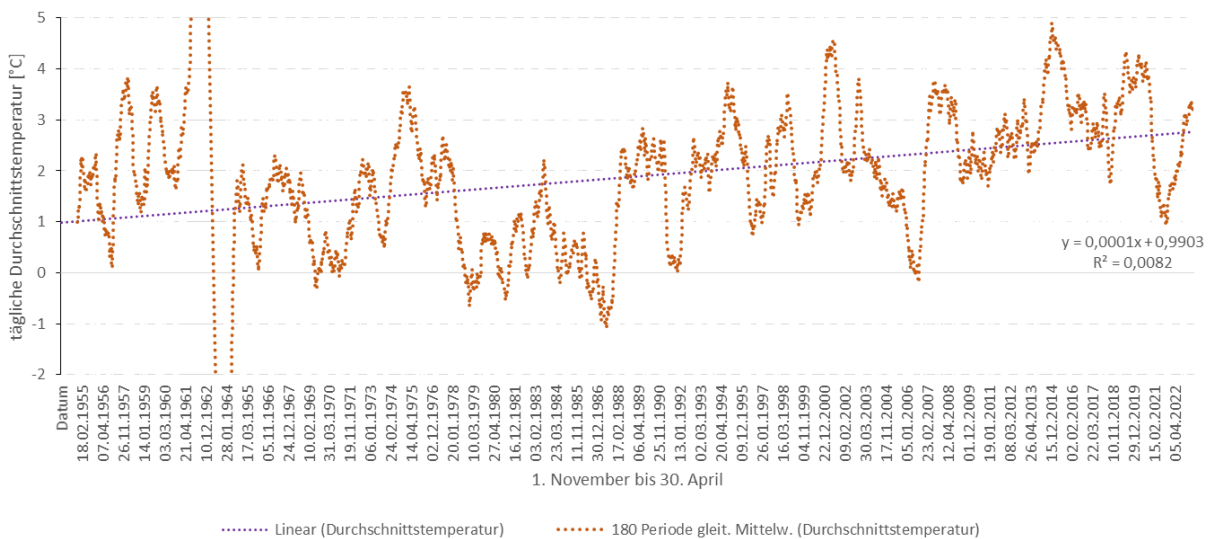


Abbildung 6-3: Gemittelte tägliche Durchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet, dargestellt mit gleitendem Mittelwert (180 Tage Periode) und linearem Trend über den Untersuchungszeitraum 1954-2023.

Bei den Temperaturen der Wintermonate über den gesamten Untersuchungszeitraum ist ein positiver linearen Trend erkennbar. Von 1954 bis 2023 sind die Temperaturen der Wintermonate der Klimazeitreihe am Talboden, um durchschnittlich 1,7°C gestiegen. Nach einer eher kühleren Phase, wird die Erwärmung ab Ende der 1980er Jahre deutlich. Jedoch schwanken die Temperaturen deutlich

über den gesamten Zeitraum, um 2006 und 2021 sind zwei kürzere kühlere Phasen zwischen milden Phasen erkennbar.

6.2.2.2 Niederschlag

Über die 68 Halbjahre und 4 Monate, im Untersuchungszeitraum sind insgesamt 24.479 mm Niederschlag gemessen worden. Das ergibt durchschnittlich rund 60 mm pro Monat und 357 mm pro Winterhalbjahr. Der Niederschlagsreichste Monat ist üblicherweise der November, gefolgt vom Dezember. Der Trockenste meist der Februar. An ungefähr 70 % der Tage wurde kein Niederschlag registriert. Der durchschnittliche Niederschlag, an den Tagen wo Niederschlag registriert wurde, liegt bei 6,6 mm. Rund 4,2 % der Niederschlagstage verzeichnen über 30 mm Tagesniederschlag und nur 1,1 % über 50 mm Niederschlag pro Tag. Von allen 12.626 Tagen im Untersuchungszeitrum, wurde nur an 40 Tagen, entspricht rund 0,3%, über 50 mm Tagesniederschlag gemessen.

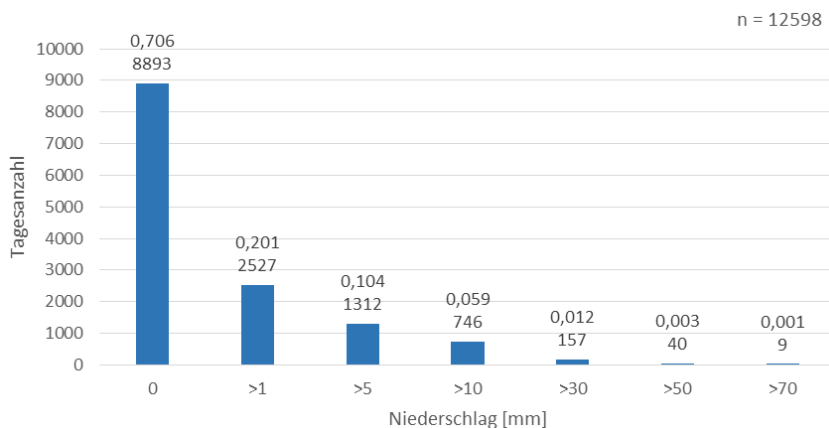


Abbildung 6-4: Häufigkeit tägliche Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet, in den Kategorien: Kein Niederschlag, mehr als 1 mm, 5, 10, 30, 50 und 70 mm Tagesniederschlag.

Im Vergleich zu der Temperatur konnte bei Niederschlag kein eindeutiger Trend über den Untersuchungszeitraum in den Wintermonaten festgestellt werden, obwohl es besonders in den letzten 10 Jahren zu sehr niederschlagsreichen Perioden, wie im November 2019 bzw. im Jänner und Februar 2014, gekommen war. Die Schwankungsbreiten waren jedoch zwischen 2012 und 2021 relativ hoch. Zwischen den sehr niederschlagsreichen Perioden, ist es auch zu vergleichsweise trockeneren Perioden gekommen. Die niederschlagsreichen Perioden korrelieren auch teilweise mit eher warmen Perioden. Wahrscheinlich führten die ungewöhnlichen Wetterphänomene und feuchten Phasen auch zu mildereren Temperaturen am Talboden.

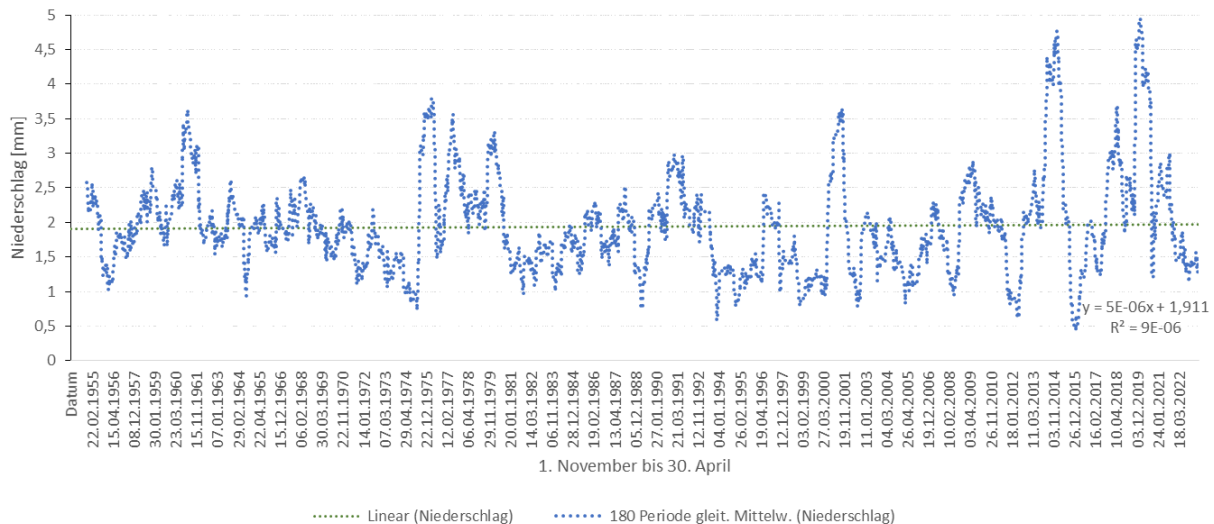


Abbildung 6-5: Gemittelte tägliche Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet, dargestellt mit gleitendem Mittelwert (180 Tage Periode) und linearem Trend über den Untersuchungszeitraum 1954-2023.

6.2.3 Einschränkungen bei Klimadaten und dem Untersuchungsgebiet

Aufgrund der Tatsache, dass bei der Analyse nur Klimadaten von Stationen verwendet wurden, wurde die Größe des Untersuchungsgebietes zum Teil eingeschränkt. Doch ein größerer limitierender Faktor, war die eingeschränkte Anzahl von Murenereignissen in den Wintermonaten. Viele Ereignisse konzentrierten sich stark auf einzelne Wetteranomalien in bestimmten Gebieten. Diese einzelnen größeren Ereignisse sind oft schon detailliert analysiert worden. Sie treten auch in geringer Frequenz, an dem gleichen Orten auf, im Vergleich zu der Länge der Datenreihen. Dies macht es schwierig, jene Ereignisse zu vergleichen, und die Auslösekriterien von Muren abzuschätzen.

Das Untersuchungsgebiet ist aufgrund administrativen Gemeindegrenzen abgegrenzt. Jedoch haben die einzelnen Gemeinden sehr unterschiedlich große Flächen, besonders in dünn besiedelten Alpenregionen. Die administrativen Grenzen sind manchmal etwas willkürlich gesetzt, meistens beachten diese jedoch die lokale Topographie, und beschränken sich oft auf ein kleines Einzugsgebiet oder eine Bergflanke mit einer Ortschaft im Tal. In Gemeinden im Untersuchungsgebiet, wie z.B. Baldramsdorf, Lehdorf und Mühdorf, ist das der Fall. Topographische Grenzen sind besonders wichtig in den Alpen, weil dadurch lokale Niederschlagsmengen stark beeinflusst werden können. Die Entfernung zwischen zwei Orten ist weniger wichtig als die Topographie; zum Beispiel wenn ein größeres Gebirge zwischen den Orten liegt. An den Rändern der Alpen sind die Niederschlagsmengen meist höher als in zentralen Gebieten. Die Lage eines Ortes und die Entfernung zum Alpenrand ist wichtig, wenn es um Unterschiede von Niederschlagssummen geht.

Große lokale Unterschiede gibt es auch bei konvektiven Starkniederschlägen. Diese genau zu erfassen, benötigt ein sehr dichtes Messnetz, welches in den Alpen nicht vorhanden ist. Konvektive Niederschläge kommen jedoch üblicherweise selten in den Wintermonaten vor, sondern meist

großflächigere, frontale Niederschläge. Deshalb sollten Unterschiede in den üblichen Niederschlagsmengen in den Gebieten homogener ausfallen, und die Analyse kann dadurch an Aussagekraft dazugewinnen. Weil sich die Klimastationen für die Analyse im Tal befinden, kann man davon ausgehen, dass die Temperaturen dort üblicherweise höher sind als in den umliegenden Bergen. Die tägliche maximale Temperatur sollten die Stationen somit vergleichsweise genau erfassen können.

6.3 Vergleich und Korrelation Klimastationen

6.3.1 Station Kolbnitz und Spittal an der Drau

Aufgrund der Datenverfügbarkeit der Station Spittal an der Drau, war es notwendig die Klimadaten vor dem Jahr 1977 von der nahegelegenen Station Kolbnitz hinzuzufügen. Diese liegt im selben Tal, nordwestlich von Spittal an der Drau, ungefähr 15 km entfernt und 60 m höher. Um festzustellen, ob die Klimadaten der beiden Stationen vergleichbar sind, wurden diese miteinander korreliert und visualisiert (siehe Abb. 6-6). Für die Periode Anfang 1977 bis Ende 1999, von 1. November bis 30. April, ergab sich für die tägliche Niederschlagsmenge eine Korrelation von 0,89. Die Korrelation zwischen Kolbnitz und Spittal an der Drau könnte eventuell minimal höher sein, weil 15 Tageswerte einer Station fehlen. Die durchschnittliche tägliche Niederschlagsmenge ist bei der Klimastation Kolbnitz etwas niedriger mit 1,63 mm, als bei der Station Spittal an der Drau, mit 1,76 mm. Die Niederschlagssumme über die Wintermonate über den Zeitraum von 22 Jahren, beträgt in Kolbnitz 6.654 mm und in Spittal an der Drau 7.164 mm. Durchschnittlich sind das rund 302 mm pro Winterhalbjahr in Kolbnitz und 326 mm in Spittal. Der maximale tägliche Niederschlag ist etwas höher bei der Station Kolbnitz mit 125,7 mm im Vergleich zu 88,3 mm bei Spittal an der Drau. Auch die Streuung ist bei den Niederschlagsdaten von Kolbnitz leicht höher.

6 Analysenergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten

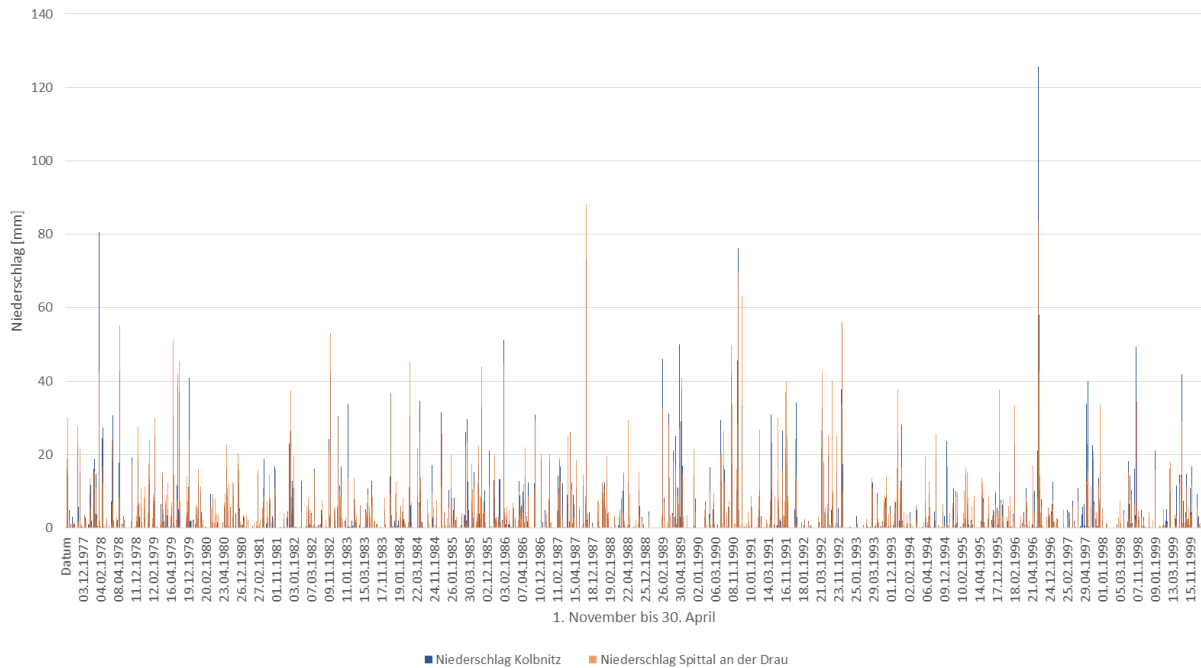


Abbildung 6-6: Vergleich tägliche Niederschlagsmengen zwischen Kolbnitz (blau) und Spittal an der Drau (orange), 1977- 1999.

Tabelle 6-1: Korrelation und Statistik der Klimastationen Kolbnitz und Spittal an der Drau, 1977- 1999.

	Kolbnitz	Spittal an der Drau
Maximum	125,7 mm	88,3 mm
Summe	6654,3 mm	7163,9 mm
Mittelwert	1,63	1,76
Varianz	34,24	33,11
Korrelation	0,886	

6.3.2 Station Reisseckhütte und Station Kolbnitz

Zusätzliche wurden die Stationsdaten von Kolbnitz mit einer anderen Klimastation im Untersuchungsgebiet korreliert. Diese befindet sich am Reisseck auf 2.252 m Seehöhe. Ziel dieses Vergleiches ist es teilweise abzuschätzen, ob sich die Niederschlagsmengen eventuell stark in den umliegenden Bergen im Untersuchungsgebiet unterscheiden. Die Korrelation zwischen der Station Kolbnitz im Tal und der Station Reisseckhütte am Berg, im Zeitraum Anfang 1954 bis Ende 1977, betrug 0,84. Dieser Wert ist etwas geringer als jener zwischen den Stationen im Tal, Kolbnitz und Spittal an der Drau, welche aber weiter entfernt von einander liegen. Die durchschnittliche tägliche Niederschlagsmenge ist höher auf der Bergstation, mit 2,92 mm im Vergleich zu 1,97 mm im Tal. Die Niederschlagssumme über die Wintermonate im Zeitraum von 32 Jahren betrug 11.997 mm am Reisseck und 8.015 mm in Kolbnitz. Die täglichen Maximalwerte unterschieden sich hingegen kaum, mit 100 mm am Reisseck und 97 mm in Kolbnitz. Die Streuung und somit die Tage mit höherem Niederschlag sind jedoch häufiger auf der Bergstation vorhanden als im Tal. Insgesamt sind die Klimadaten von den Stationen von Kolbnitz und Spittal an der Drau, welche für die Analyse relevant

sind, vergleichbar. Der Unterschied der Niederschlagssummen ist geringer als zehn Prozent. Ähnliches gilt auch zwischen den näher beieinanderliegenden Stationen am Reisseck und in Kolbnitz. Die Korrelation ist jedoch etwas geringer und die Niederschläge sind um ungefähr 50% mehr auf der Bergstation, jedoch unterscheiden sich die täglichen Maximalwerte wenig.

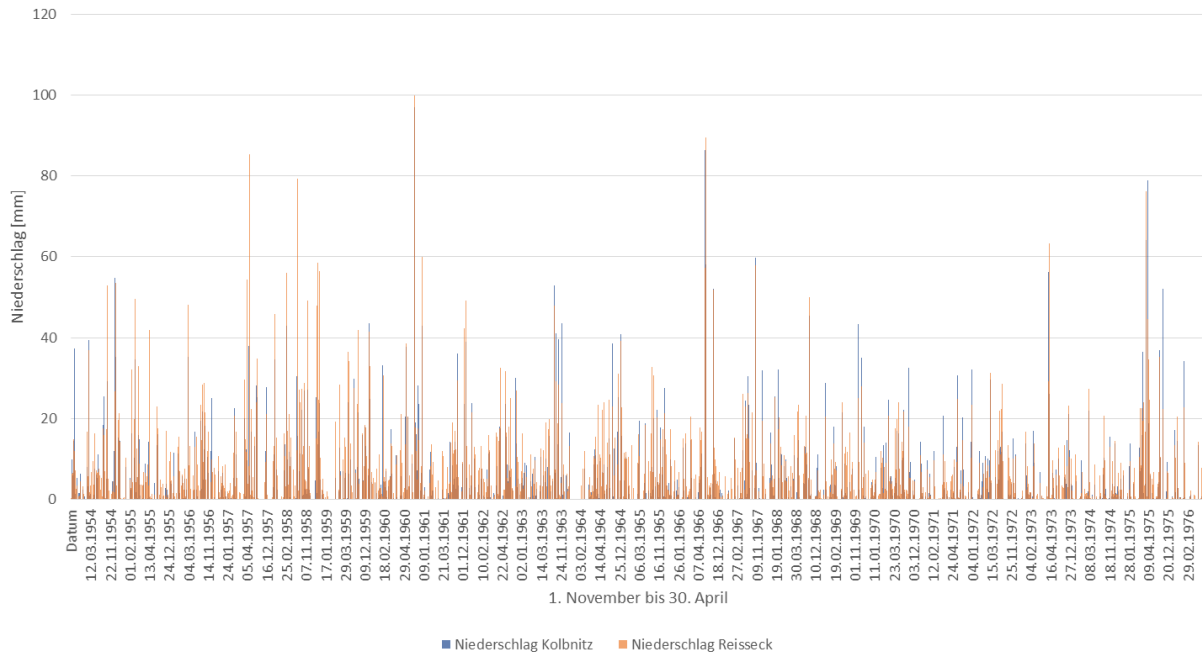


Abbildung 6-7: Vergleich tägliche Niederschlagsmengen zwischen Kolbnitz (blau) und Reisseckhütte (orange), 1954- 1976.

Tabelle 6-2: Korrelation und Statistik der Klimastationen Kolbnitz und Reisseckhütte, 1954- 1976.

	Reisseck	Kolbnitz
Maximum	100 mm	97 mm
Summe	11996,7 mm	8014,9 mm
Mittelwert	2,92	1,96
Varianz	52,83	39,37
Korrelation	0,837	

6.4 Zusammenhang von Niederschlägen und dem Auftreten von Muren

6.4.1 Übersicht Muren im Untersuchungszeitraum

Insgesamt wurden 34 Ereignisse der Klasse Murgang und murartiger Feststofftransport im Untersuchungszeitraum aufgezeichnet. Im Diagramm (Abb. 6-8) sind alle Muren im Untersuchungsgebiet dargestellt. Der Großteil davon, 27 Ereignisse, fallen auf einen einzelnen Tag. Im Untersuchungszeitraum zwischen 1954 und 2023 ist es im Untersuchungsgebiet an sechs verschiedenen Tagen zu Muren gekommen. Zwei Tage, der 17. und 18. November liegen hintereinander. Der Großteil der Muren, 29 Ereignisse, wurde im November aufgezeichnet. Keine Ereignisse wurden im Untersuchungsgebiet hingegen im Jänner und Februar aufgezeichnet. Die dominante Prozessart wurde bei nur 6 Ereignissen als Murgang definiert, während bei den 28 anderen Ereignissen murartiger Feststofftransport als dominante Prozessart festgelegt worden ist. 25 der Ereignisse der Kategorie murartiger Feststofftransport fallen alleine auf den 17. November.

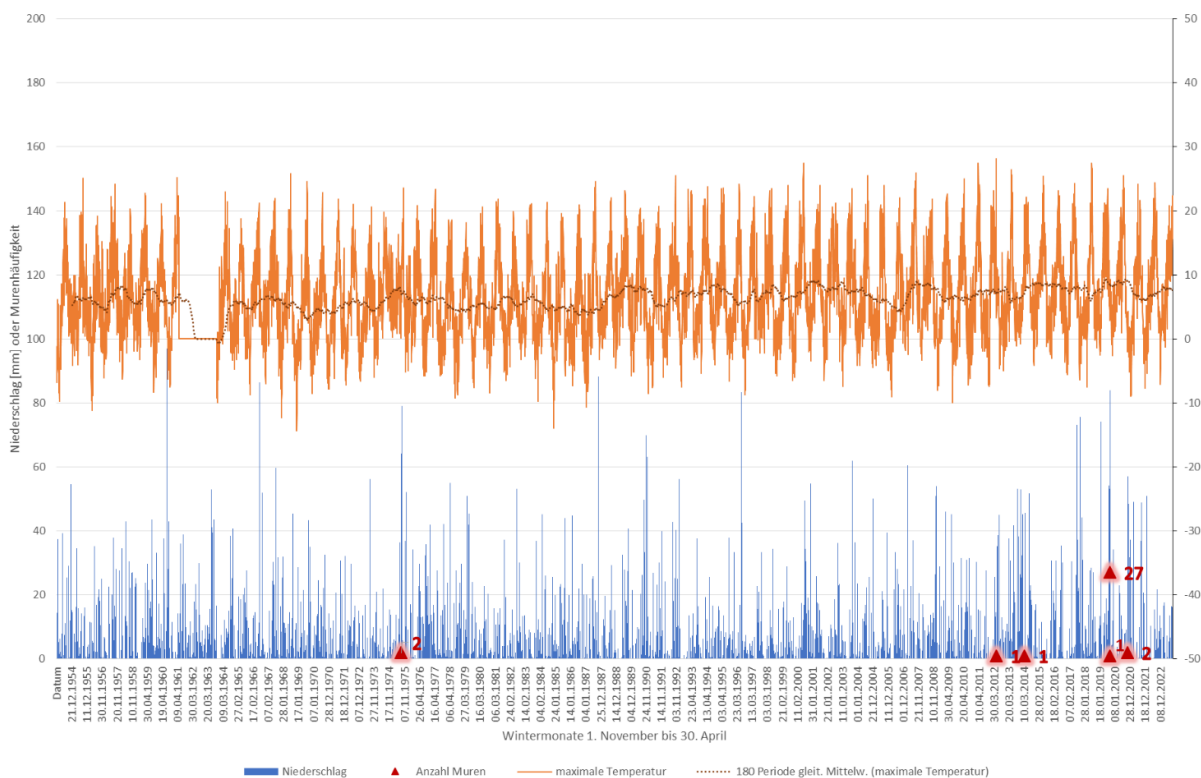


Abbildung 6-8: Übersichtsdigramm; Muren und tägliche Murenanzahl (rot), tägliche Niederschlagsmengen (blau), tägliche maximale Temperatur (orange), gleitender Mittelwert (180 Tage Periode) (hellbraun).

Im Gemeindegebiet Baldramsdorf im Bezirk Spittal an der Drau, wurden mit 11 Muren die meisten Ereignisse registriert, gefolgt von der Gemeinde Kleblach-Lind im gleichen Bezirk, mit 9 Einträgen. Alle diese Ereignisse fallen auf den 17. November, 2019. Im November 1966 sind im Untersuchungsgebiet in der Gemeinde Baldramsdorf zwei Muren aufgezeichnet worden. Es sind die ältesten aufgezeichneten Ereignisse in den Wintermonaten im Untersuchungsgebiet. Zu den zwei Ereignissen,

der Prozessart Murgang gibt es jedoch kein genaues Datum, weshalb sie nicht in die Diagramme der Analyse hinzugefügt worden sind.

6.4.2 Niederschlagsperioden und Murenereignisse

Eher selten wurden Muren im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet, verglichen mit der Anzahl an Tagen mit höheren Niederschlägen. Betrachtet man nur die einzelnen Tage, ist die Korrelation zwischen hohen täglichen Niederschlagwerten und vielen aufgezeichneten Muren nicht eindeutig.

Nachdem ein dreitägiger gleitender Mittelwert der täglichen Werte hinzugefügt wurde, ist die Korrelation deutlicher geworden (siehe Abb. 6-9). In der Grafik ist erkennbar, dass der Tag mit den meisten Muren deutlich mit der durchschnittlichen 3-tägigen Periode mit dem meisten Niederschlag korreliert. Die Periode hatte durchschnittlich ungefähr 56mm Niederschlag pro Tag. Der zweithöchste Wert betrug 52mm; an diesem Tag wurden keine Muren im Untersuchungsgebiet ausgelöst. Beim dritthöchsten Wert, knapp 50 mm um den April 1975, kam es zu zwei Muren im Untersuchungsgebiet. Insgesamt gab es über den Untersuchungszeitraum sieben 3tägige Perioden mit durchschnittlich 40 mm oder mehr Niederschlag. Vier dieser Perioden befinden sich entweder vor, oder direkt auf Zeitpunkten von Murenereignissen.

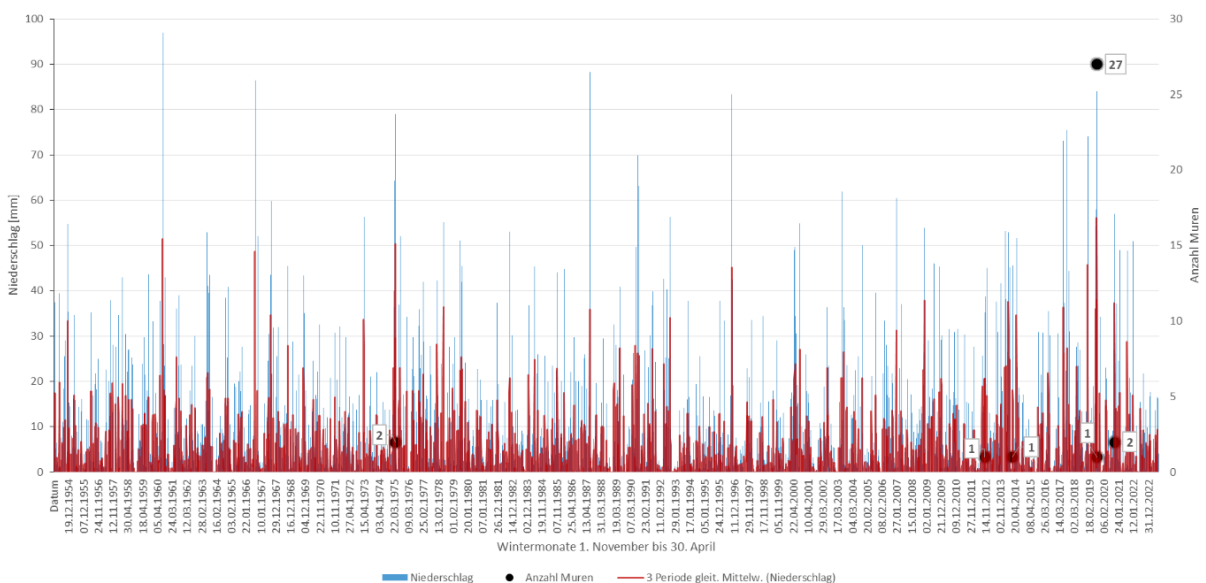


Abbildung 6-9: Gemittelte tägliche Niederschlagsmenge in der 3-Tages Periode (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).

Wird die Periode von drei auf sieben Tage erhöht, liegt kein Wert über 40 mm. Der höchste Wert, mit ungefähr 39 mm, liegt wieder um den 17. November. Der zweithöchste beträgt knapp 30 mm und liegt im November 1966. Die nächsten drei hohen Werte liegen um den April 1975, den Dezember 1960 und den Dezember 2020. Interessant wird es, wenn die Periode auf 30 Tage erhöht wird (siehe Abb 6-11). Der höchste Wert befindet sich auch hier im November 2019 mit ungefähr 27 mm, der

zweithöchste, mit 24 mm, ist jedoch im April 1975, beides Zeiträume in denen mehreren Muren aufgezeichnet wurden. Sonst befindet sich noch im Dezember 1960 ein hoher Wert, sowie auch im November 2000. Dazu wird hier ein anderer hoher Wert deutlich, welcher in den kürzeren Perioden nicht auffiel. Der Zeitraum von Jänner bis Ende April 2014, vor allem der Februar 2014. Der darauffolgende März war eher trocken, trotzdem wurde dort eine Mure im Untersuchungsgebiet aufgenommen.

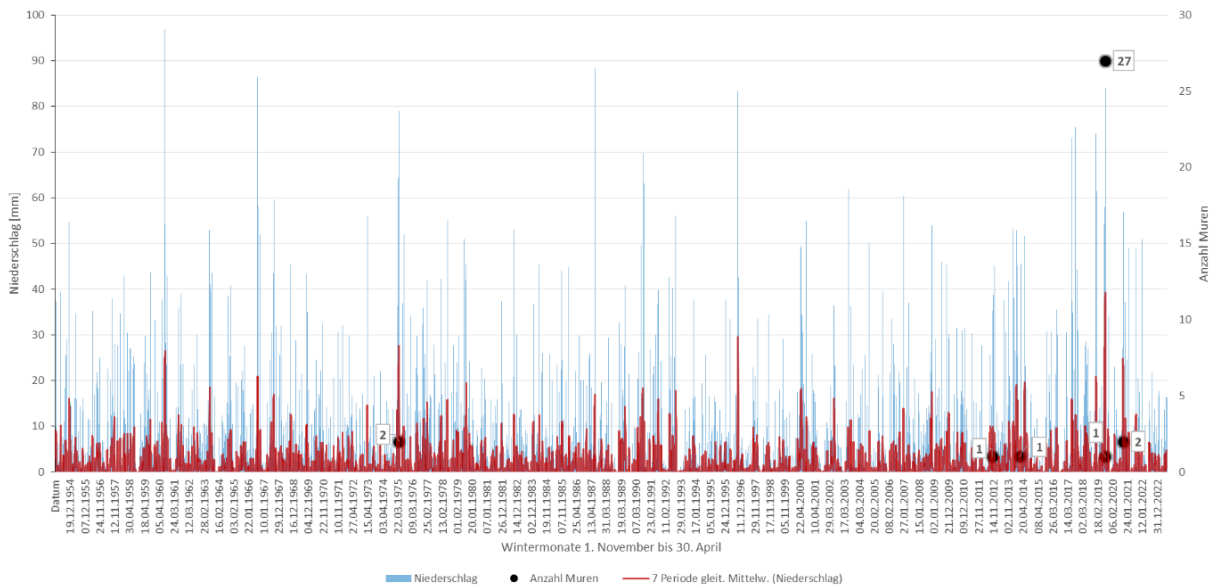


Abbildung 6-10: Gemittelte tägliche Niederschlagsmenge in der 7-Tages Periode (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).

Erhöht man die Periode schlussendlich auf 60 Tage, ist der höchste Wert immer noch deutlich im November 2019. Der zweithöchste Wert befindet sich jetzt jedoch im Februar 2014, darauffolgend ist der Wert im April 1975. Auffallend ist, je länger die Perioden mit gleitendem Mittelwert sind, desto deutlicher korrelieren hohe Niederschlagswerte mit Murenereignissen. Das trifft jedoch nicht auf alle Murenereignisse zu. Die Periode über 60 Tage hinaus zu erhöhen verringert jedoch zunehmend die Korrelation und die Aussagekraft.

6 Analyseergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten

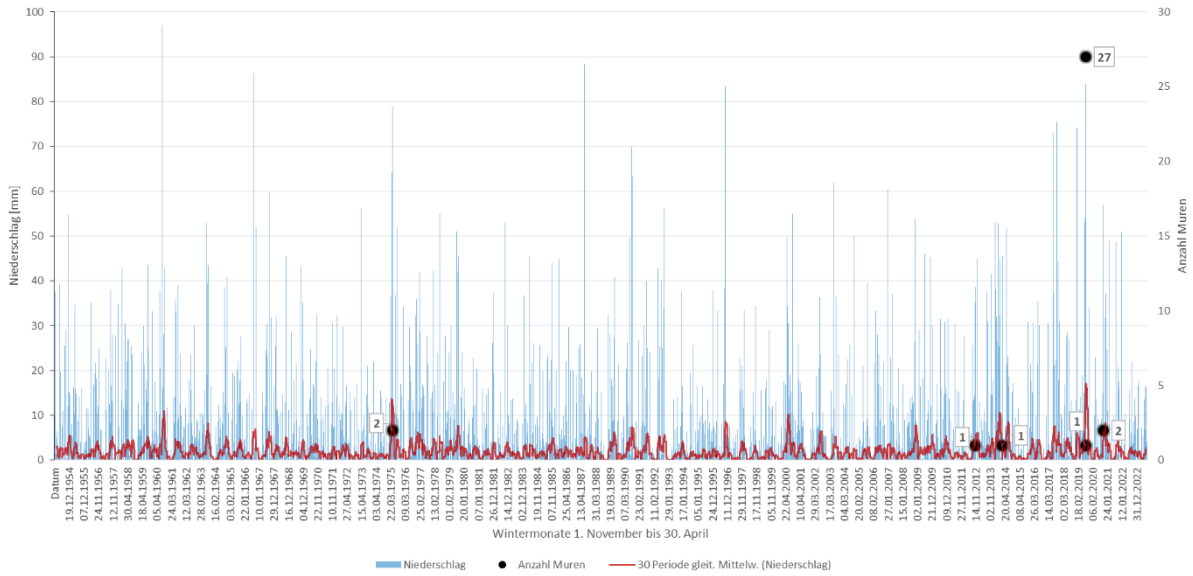


Abbildung 6-11: Gemittelte tägliche Niederschlagsmenge in der 30-Tages-Periode (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).

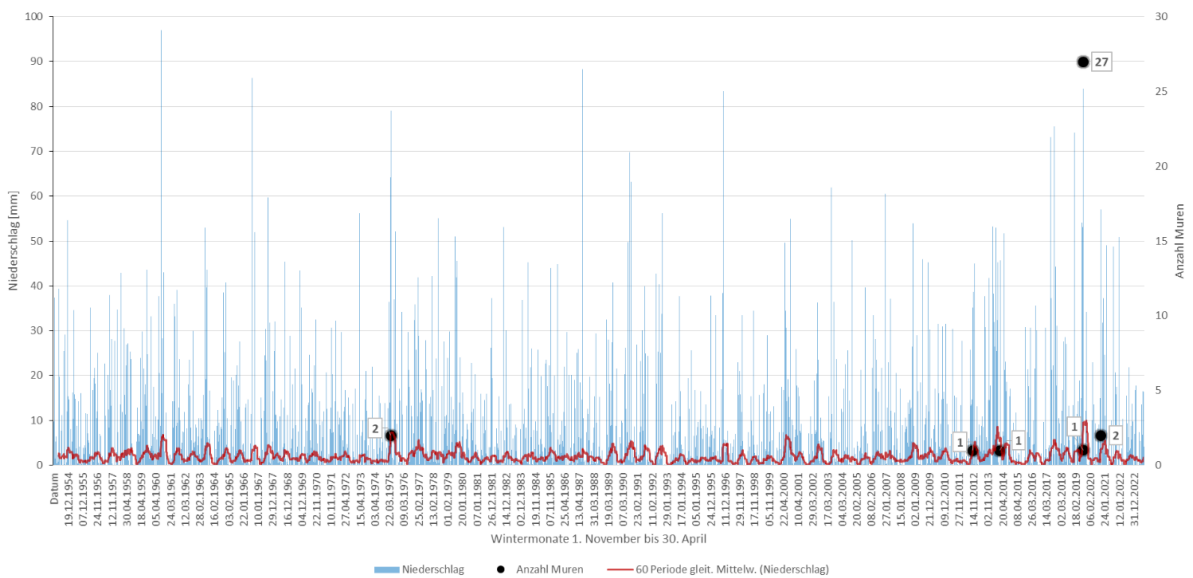


Abbildung 6-12: Gemittelte tägliche Niederschlagsmenge in der 60-Tages-Periode (rot), Muren und tägliche Murenanzahl (schwarz), tägliche Niederschlagsmengen (blau).

6.4.3 Niederschlagsmenge tägliche Maximalwerte

Die höchste tägliche Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet betrug 97 mm und wurde am 6. Dezember 1960 von der Klimastation Kolbnitz gemessen. An diesem Tag und auch in diesem Winter wurde keine Mure ausgelöst. Auch in den weiteren 4 Tagen mit 88 bis 80 mm Tagesniederschlag kam es zu keinen Muren. In den Tagen nach diesen hohen täglichen Niederschlagssummen, wurden jedoch in zwei Fällen Muren im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet.

Das war der Fall im November 2019 und unter anderem auch im November 1966. 86,4 mm wurden am 3. November 1966 gemessen, am Tag danach, dem 4.11., noch einmal knapp 58 mm. Die maximale Temperatur stieg von 2° auf 10°C. Die minimalen Temperaturen bewegten sich leicht unter dem Gefrierpunkt und Schneedecke wurde keine registriert. Hier kam es zu keinen Muren im entsprechenden Untersuchungsgebiet 1, jedoch wurden an diesem Tag und dem folgenden 4. November, mehrere Muren im Untersuchungsgebiet 2 ausgelöst. Auch in anderen Teilen Kärntens und in Osttirol kam es zu etlichen Muren und auch machen Hangmuren. An der Klimastation Kornat, im Lesachtal in Kärnten, wurden am 3. November 1966, 70 mm und am folgen Tag den 4. November 157,6 mm Tagesniederschlag gemessen. Ein Teil des Niederschlages dürfte als Schnee gefallen sein, eine 50cm Schneedecke wurde am 4. November gemessen, die Temperatur ist im Laufe des Tages auf 9°C gestiegen.

Wird die Betrachtung nur auf die einzelnen maximalen täglichen Niederschlagsmengen fokussiert, liegt der niedrigste Wert eines Murenereignistages, an dem Niederschlag gemessen wurde, bei 26,6 mm und der höchste bei 79 mm. Wird ein Schwellenwert von, zum Beispiel 50 mm, für alle Tage im Untersuchungszeitraum festgelegt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass an diesem Tag eine Mure im Untersuchungsgebiet ausgelöst wird, bei 7,5 %. Bei einer Schwelle von 60 mm liegt die Wahrscheinlichkeit bei 12,5 %. Wenn davon ausgegangen wird, dass jener Tag im November 1966, mit 86,4 mm Niederschlag, der Auslösetag für die zwei Muren in diesem Monat war, sind diese Zahlen etwas höher.

6.5 Analyse einzelner Murenereignisse

6.5.1 November 2019

Am 15. November 2019, wurden 84 mm Niederschlag gemessen, 2 Tage später kam es zu besonders vielen Muren im Untersuchungsgebiet. Die gesamte erste Novemberhälfte war bis dahin außergewöhnlich niederschlagsreich. Insgesamt wurde 475 mm Niederschlag im November in Spittal an der Drau gemessen. Das dürfte ungefähr fünf Mal dem durchschnittlichen Niederschlag von diesen Monat entsprechen. 450 mm Niederschlag war es vom ersten, bis einschließlich dem 17. November. Die Temperaturen sind von Anfang November, von maximal 12°C, bis zum 15. November, den niederschlagsreichsten Tag des Monats, auf 3°C gefallen. Die Minimaltemperatur lag nur an einem Tag unter den Gefrierpunkt, danach und vor den Ereignistagen war sie leicht darüber. Im Tal auf der Höhe der Station (542 m), hat Schneefall aufgrund der Temperaturen wahrscheinlich keine größere Rolle gespielt. In den höheren Regionen dürfte es jedoch zu stärkerem Schneefall gekommen sein, in benachbarten Regionen sind hohe Schneemengen und mehrere Lawinen aufgezeichnet worden. Die steigende Temperatur zwischen dem 15. und 18. November und starker Niederschlag, könnte in mittleren Höhen, zur Schneeschmelze geführt haben.

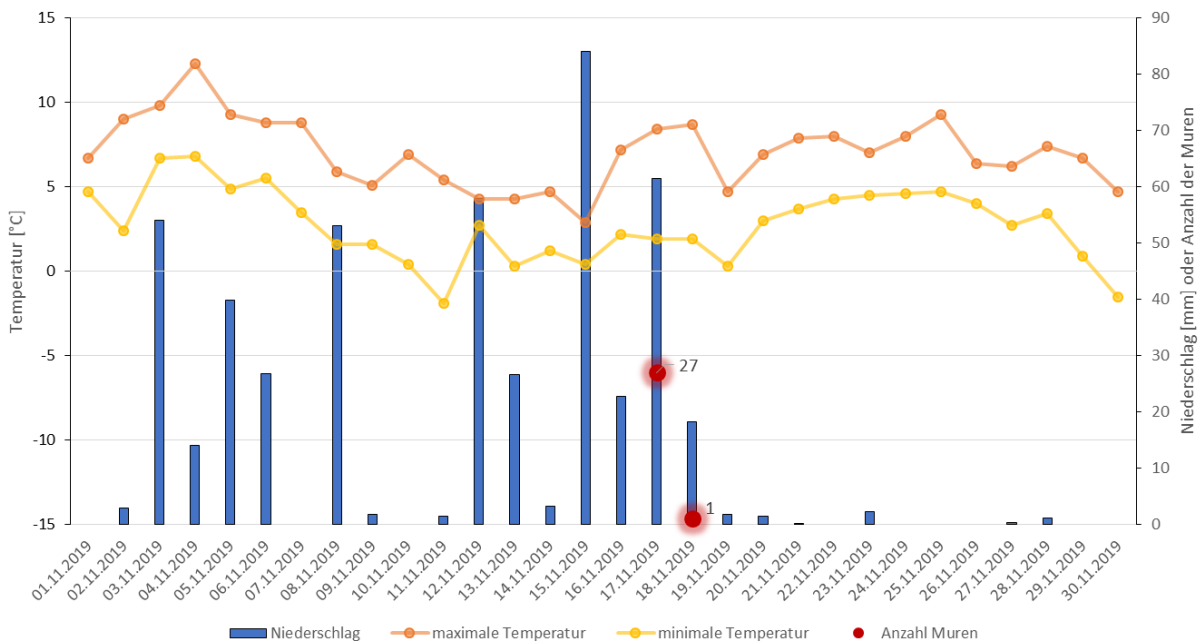


Abbildung 6-13: Witterung zum Murenereignis November 2019; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).

6.5.2 April 1975

Am 6. April 1975, wurde an der Klimastation Kolbnitz 79mm m Niederschlag gemessen, am selben Tag wurden zwei Muren im Untersuchungsgebiet ausgelöst. In den zwei Tagen davor wurden jeweils über 30 mm Niederschlag aufgezeichnet, insgesamt ungefähr 72 mm in 48h. Die maximale Temperatur am 6. April betrug 7,6°C, Temperaturen unter dem Gefrierpunkt wurden auch in den zwei Tagen davor nicht registriert. Zu dieser Zeit dürfte es auch zu starker Schneeschmelze gekommen sein. Am 31. März wurde eine Schneehöhe von 105 cm im Tal gemessen, am 6. April noch 18 cm und Tag danach nur noch 5cm. Zwischen dem 28. und 31. März wurden ungefähr 124 mm Niederschlag gemessen, welcher zu einem großen Teil als Schneefall fiel. Die maximale Temperatur erreichte das Minimum am 30. März, danach stiegen die Temperaturen leicht an, was die Schneeschmelze ermöglichte. Zwischen dem 28. März und 6. April wurden insgesamt 275 mm Niederschlag gemessen.

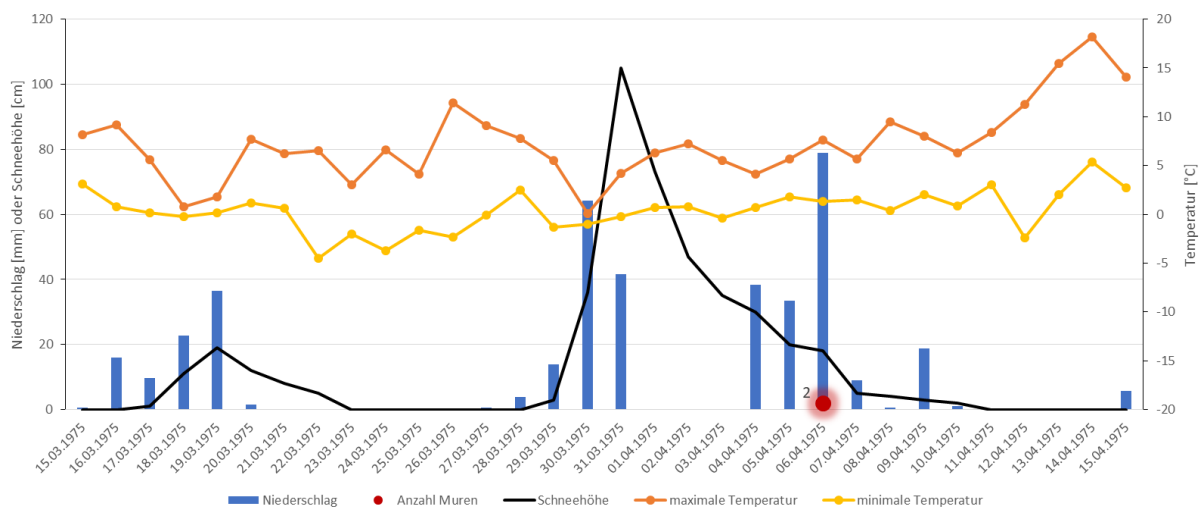


Abbildung 6-14: Witterung zum Murenereignis April 1975; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), tägliche Schneehöhe (schwarze Linie), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).

6.5.3 Dezember 2020

Ein Jahr nach den ungewöhnlich vielen Muren im November 2019, kam es Anfang Dezember 2020 erneut zu zwei Murenereignissen im Untersuchungsgebiet. Am 6. Dezember sind zwei Muren und 57 mm Tagesniederschlag in Spittal an der Drau gemessen worden. Insgesamt wurden 119 mm Niederschlag zwischen dem 2. und 6. November aufgezeichnet. Vom 1. bis zum 4. Dezember bewegten sich die Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Der Niederschlag bis zum Murenereignisstag am 6. Dezember dürfte größtenteils als Schneefall gefallen sein. Ab dem 5. Dezember stiegen die Temperaturen ganztags über den Gefrierpunkt, eine maximale Temperatur von 4,3°C wurde am

Ereignistag gemessen. Ähnlich wie im April 1975, begünstigte eine Kombination aus starkem Niederschlag und Schneeschmelze das Auslösen von Muren.

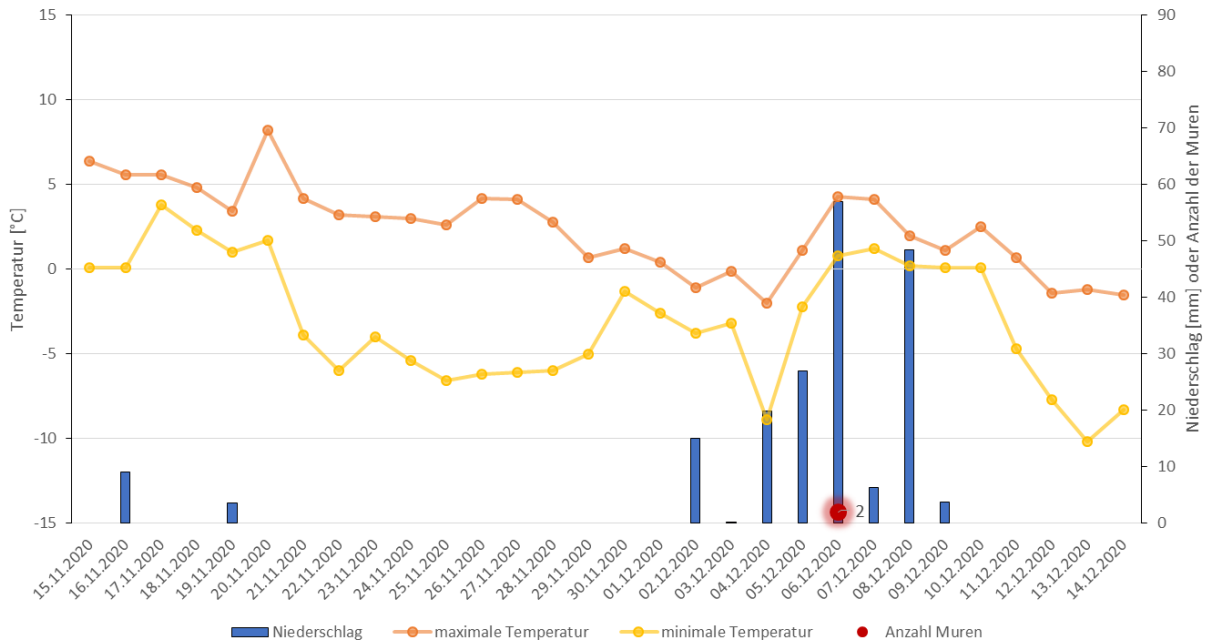


Abbildung 6-15: Witterung zum Mureneignis Dezember 2020; Ereignistag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).

6.5.4 November 2012

Am 5. November 2012, wurde eine Mure im Untersuchungsgebiet registriert. An diesem Tag sind 26 mm Niederschlag, am Vortag 35 mm gemessen worden. Insgesamt waren es 67 mm Niederschlag vom 1. bis zum 5. November. Die Temperatur stieg am 1. November von ungefähr 3°C auf maximal 11°C am 5. November. Der Niederschlag vor dem Ereignis fällt geringer aus als bei den vorherigen Beispielen, aber es wurde auch nur eine Mure im Gebiet erfasst. Was aus den Daten nicht hervorgeht, ist eine wahrscheinlich feuchte und kühle zweite Oktoberhälfte. Zudem könnte, aufgrund steigender Temperaturen, Schneeschmelze eine wichtige Rolle gespielt haben.

6 Analyseergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten

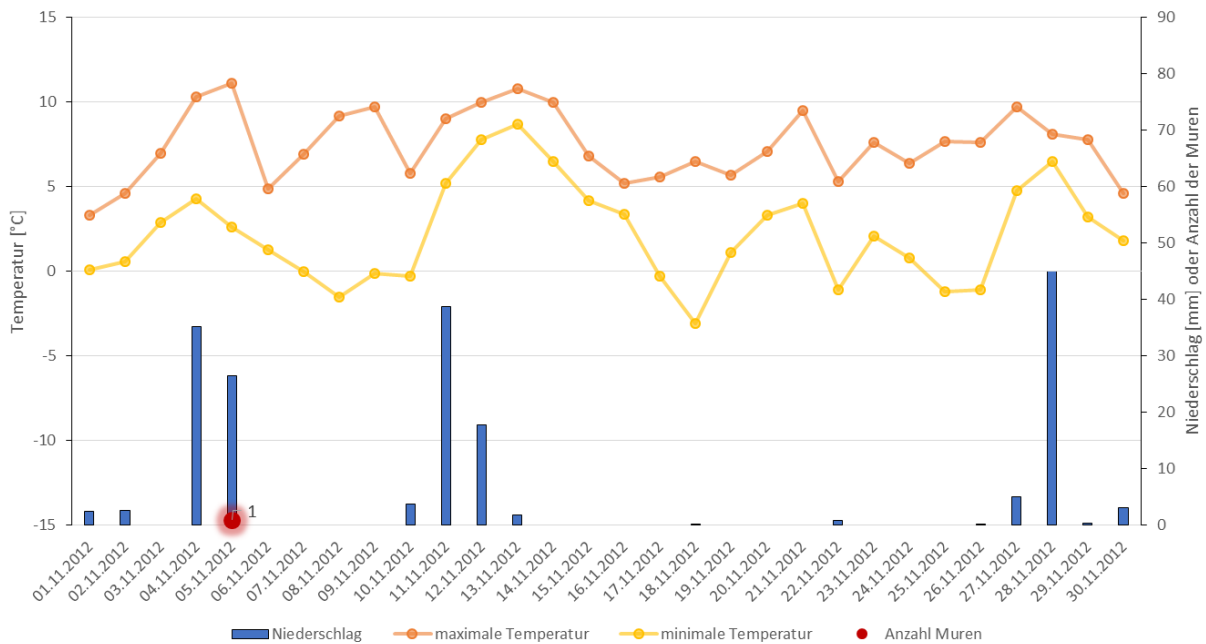


Abbildung 6-16: Witterung zum Murenereignis November 2012, Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).

5.5.5 März 2014

Im Gegensatz zu allen anderen Murenereignissen ist am Ereignisstag dem 18. März, kein Niederschlag gemessen worden, auch nicht am Vortag oder in der Woche davor. Der gesamte März verzeichnete nur ein Niederschlagsereignis, welches erst vier Tage nach der Mure auftrat. Der letzte wirkliche Niederschlag dürfte ungefähr ein Monat vor dem Murenabgang aufgezeichnet worden sein. Von Anfang März an stiegen die Temperaturen deutlich, von maximal 4,6°C am 1. März, zu 21°C am 17. März. Die maximale Temperatur des Monats wurde am Tag vor dem Murenereignis erreicht. Vom 16. März bis zum 17. März lagen auch die Minimaltemperaturen über dem Gefrierpunkt. Aufgrund des fehlenden Niederschlags und der stetig steigenden Temperaturen, ist die Mure wahrscheinlich aufgrund von starker Schneeschmelze ausgelöst worden. Diese Theorie wird dadurch unterstützt, dass der März zwar größtenteils sehr trocken verlief, jedoch in der Region der gesamte Winter davor sehr niederschlagsreich und schneereich gewesen ist. Im Tal und auch in den Bergen dürften hohe Schneemengen und vergleichsweise milde Temperatur mit Sonneneinstrahlung, zu Schneeschmelze geführt haben und ohne Niederschlag, die Wasserverfügbarkeit am Boden stark erhöht haben.

6 Analyseergebnisse - Niederschlagsmengen und Muren in den Wintermonaten

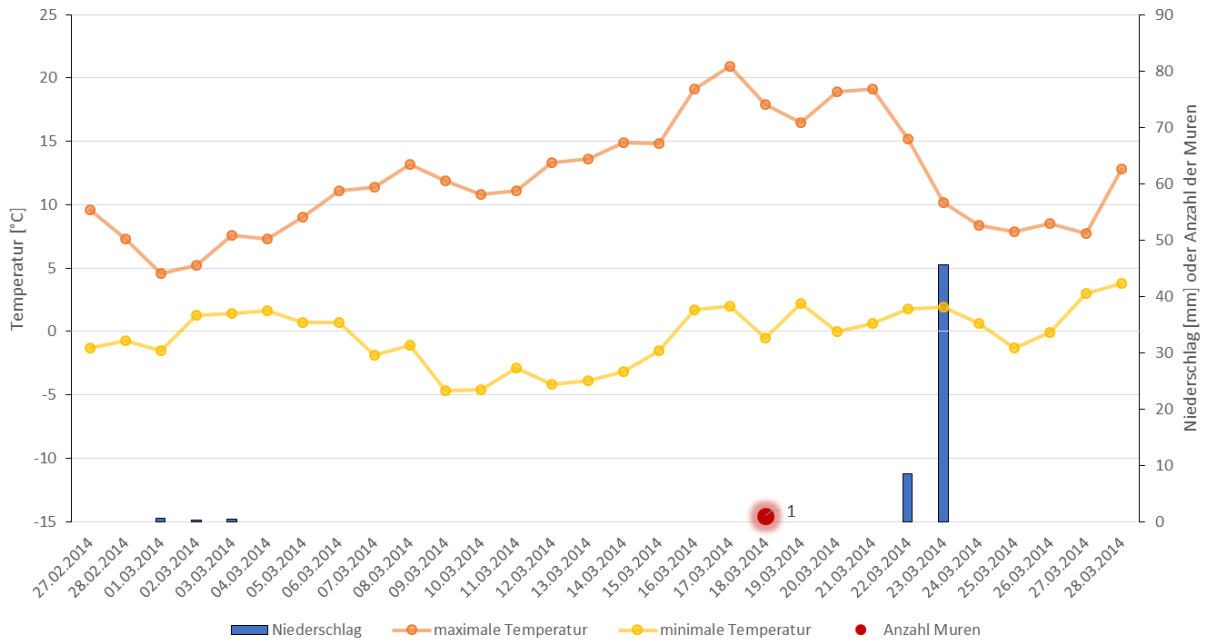


Abbildung 6-17: Witterung zum Murenereignis März 2014; Ereignisstag und Anzahl der Muren (roter Punkt). tägliche Niederschlagsmenge (blau), täglicher maximaler Temperaturwert (orange) und minimaler Temperaturwert (gelb).

7. Diskussion

7.1 Prozesse Muren in Wintermonaten

In den Wintermonaten herrschen aufgrund der geringeren Sonneneinstrahlung, dem deutlich kühleren Klima und verschiedenen Zirkulationen in Europa, andere Umstände, welche sich auf Muren auswirken können. Insgesamt ist die Frequenz von Muren in den Wintermonaten in den Alpen Österreichs deutlich geringer als in den Sommermonaten von Mai bis Oktober. Das ist größtenteils auf die geringeren Niederschläge im Winterhalbjahr zurückzuführen. Abhängig vom Standort, ist in den Wintermonaten nur mit einem Drittel bis einem Viertel der Niederschläge der Sommermonate zu rechnen, das ergeben Frei und Schär (1998) und Daten aus dem Untersuchungsgebiet.

Zusammen mit den Niederschlagsmengen sind auch die Intensitäten der Niederschläge meist geringer. Gewitter oder konvektiver Niederschlag ist in Sommermonaten verantwortlich für lokale und sehr intensive Niederschläge. Aufgrund der deutlich schwächeren Sonneneinstrahlung, und dadurch fehlender Energie an der Erdoberfläche, können solche Niederschläge kaum in den Wintermonaten entstehen. Hinzu kommt, Muren welche durch intensive Starkniederschläge ausgelöst werden, benötigen oft geringere Niederschlagsmengen, als jene welche durch langanhaltende Niederschläge ausgelöst werden. Minimale Niederschlagsschwellenwerte von 12-14 mm Tagesniederschlag wurden in Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel (2012) und 20 mm in Glade (2000) für das Auslösen von Muren bestimmt. Hingegen sind vorheriger Niederschlag und die Bodenfeuchte generell weniger relevant. Muren konnten laut Prenner et. al. (2019) durch konvektiven Starkniederschlag, auch bei vorher trockenem Boden auslöst werden. Im Untersuchungsgebiet Spittal an der Drau brauchte es in den meisten Fällen deutlich mehr Niederschlagsmengen um Muren auszulösen.

Wie in Prenner et. al. (2019) beschrieben, dürften sich das Auslösen von Muren von intensiven zu länger anhaltenden Niederschlägen unterscheiden. Bei langanhaltendem Niederschlag und langsamer Infiltration, kann ein positiver Porenwasserdruck erreicht werden. Dadurch wird die Stabilität des Materials deutlich verringert. Der positive Porenwasserdruck im Boden wird durch die intensiven, aber kürzeren Niederschläge oft nicht erreicht. Stattdessen wird viel Material aufgrund von starkem Abfluss abtransportiert. Aufgrund der fehlenden konvektiven Starkniederschläge in den Wintermonaten, ist insgesamt mehr Niederschlag notwendig um Muren auszulösen.

Ein anderer Faktor der mit der Sonneneinstrahlung zu tun hat, ist die Evapotranspiration. Diese ist abhängig von der Sonneneinstrahlung und Temperatur und ist deshalb in den Sommermonaten deutlich höher als im Winter. Der Abtransport von Wasser aus dem Boden durch Evapotranspiration ist

somit in den Sommermonaten deutlich höher. Abhängig von der Exposition und Vegetation wird nach einem größeren Niederschlagsereignis ein wassergesättigter Boden länger anhalten.

Es ist unklar in welchen Zeitraum voriger Niederschlag relevant für Muren ist. Glade (2000) beschränkt den relevanten Zeitraum auf zwei Tage, für ein kaum bewaldetes Gebiet in Neuseeland. Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel (2012) beschreibt für das periglaziale Zermatt Tal, dass Niederschläge 5 Tage bis einen Monat vor dem Ereignis nicht statistisch relevant für Muren waren. Die Ergebnisse der vorigen Autoren passen kaum zu den Ergebnissen der Analyse von dieser Arbeit. Jedoch ist dieser Zeitraum stark abhängig von lokalem Klima und Eigenschaften des Untergrundes. Ein Vergleich mit dem teilweise bewaldeten und bewirtschafteten Untersuchungsgebiet in den Wintermonaten ist somit nur schwer möglich.

In den Wintermonaten mit wenig Sonneneinstrahlung und mächtigeren Bodenauflagen in den niederen alpinen Zonen, könnte dieser Zeitraum durchaus länger sein. In einem anderen Gebiet mit ausgeprägten Regen- und Trockenzeiten, in Südkalifornien, hat Campbell (1975) einen saisonalen Mindestniederschlag für Muren festgelegt. Ähnlich wie bei dem vorigen Konzept, ist dieses nicht einfach auf das Untersuchungsgebiet oder die Österreichischen Alpen allgemein übertragbar, da das vorherrschende Klima sich stark unterscheidet. Beide Konzepte liefern jedoch Erkenntnisse darüber wie Niederschlagsmengen das Auftreten von Muren beeinflussen.

Vielleicht ähnlich wichtig wie die Niederschlagsmenge für das Auftreten von Muren, ist die Temperatur im Winter. Bei durchgehenden Temperaturen unter 0°C, kommt es eher nicht zu Muren. Zumindest die oberste Schicht des Bodens friert bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt und wenn der Boden noch tiefer friert, nimmt die Stabilität deutlich zu. Die Permafrostböden der hochalpinen oder subpolaren Zonen sind generell stabil, solange diese nicht auftauen. Das ist mitunter ein Grund für die seltenen Muren in den Wintermonaten in den hochalpinen Gebieten der Alpen. Bei der Schneeschmelze tauen diese Böden oberflächlich auf, deshalb können in hochalpinen Gebieten Muren im Sommer leichter entstehen. In den generell kältesten Monaten in den Alpen, dem Jänner und Februar, ist es in Österreich zu sehr wenige Muren gekommen. Insgesamt wurden nur 18 Muren in Österreich im Jänner und Februar aufgezeichnet, im Untersuchungsgebiet wurde in diesem Zeitraum kein einziges Murenereignis aufgezeichnet.

In den niederen alpinen Zonen dürften sich Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auch negativ auf das Auftreten von Muren auswirken. Bei allen, außer einem Murenereignis im Untersuchungsgebiet, lagen die Temperaturen am Ereignistag bei der Klimastation im Tal unter dem Gefrierpunkt. Unmittelbar vor den Ereignissen gab es auch keine Phasen, über eine Woche oder länger mit Durchschnittstemperaturen unter dem Gefrierpunkt. Bei einem Ereignis in März 2014 war die Minimaltemperatur leicht unter 0°C, jedoch war die Maximaltemperatur bei rund 18°C und am Vortag

noch höher. In der Woche vor dem Ereignis lagen die Minimaltemperaturen weiter unter 0°C. Andauernde Temperaturen unter dem Gefrierpunkt wirken sich negativ auf Muren aus, jedoch kurze und tägliche Temperaturschwankungen machen die Situation komplexer. Wenn die Temperaturen am Tag stark ansteigen, z. B. auf 18°C oder mehr und nur in der Nacht unter dem Gefrierpunkt fallen oder eine kühlere Phase nur kurz anhält, könnte das Auftreten von Muren dadurch nicht negativ beeinflusst werden.

Erklären lässt sich das aufgrund rapider Schneeschmelze. Diese kann die Wassersättigung des Bodens kontinuierlich erhöhen, ähnlich wie ein langanhaltender Niederschlag. Die Temperatur und Sonneneinstrahlung, die Schneedecke und der Zustand dieser, beeinflussen wie viel Wasser an der Bodenoberfläche verfügbar ist. Chleboroad et. al. (1997) bestimmte eine durchschnittliche Maximaltemperatur von 14,4°C über 6 Tage, für das Auslösen von Muren in den Rocky Mountains in Colorado. In den Ötztaler Alpen ist in Mostbauer et. al. (2018) und Prenner et. al. (2019) bei dem Großteil der Muren im Mai und Juni, Schneeschmelze der wahrscheinliche dominante Auslöser. Schneeschmelze alleine kann Muren auch in niederschlagsarmen Perioden auslösen, wenn Temperatur und Sonnenstrahlung hoch genug sind. Wie das Ereignis im Untersuchungsgebiet im März gut darstellt. Im Hochgebirge sind Muren, ausgelöst durch Schneeschmelze häufiger. Aufgrund der geringen Temperaturen kann sich mehr Schnee ansammeln; er schmilzt später im Frühjahr und Sommer, wo die Sonneneinstrahlung und somit auch die potenzielle Schmelze stärker ist.

Jedoch wahrscheinlich häufiger als Schneeschmelze alleine, ist die Kombination mit Niederschlag. Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel (2012) bestimmte in einer periglazialen Zone der Schweizer Alpen, eine Niederschlagswelle von 20mm während der Schneeschmelze und 25mm später in den Sommermonaten. Bei einem Großteil der Ereignisse im Untersuchungsgebiet könnte Schneeschmelze zusammen mit Niederschlag eine Rolle gespielt haben. Bei den Ereignissen von November 2020 und 2019, sowie im April 1975 sind die Temperaturen an den Tagen vor dem Ereignis unter dem Gefrierpunkt gelegen, besonders in den höheren Zonen dürfte es zu Schneefall gekommen sein. Nur anhand der Ereignisse vom April 1975 ist es im Untersuchungsgebiet annähernd nachweisbar, dass Schneeschmelze zusammen mit Niederschlag zu Muren geführt haben kann. Eine Woche vor dem Ereignis wurde ungefähr ein Meter Schneehöhe gemessen, am Ereignistag waren es weniger als 20 cm, zusätzlich wurde an diesem Tag fast 80 mm Niederschlag gemessen.

Eine Schneedecke kann sich aber auch negativ auf das Auslösen von Muren auswirken. Solange die Schneedecke zumindest teilweise unter 0 °C hat, können diese Schmelzwasser und Niederschlag von den obersten Schichten aufnehmen. Erst wenn die Temperaturen der Schneedeck durchgehend über dem Gefrierpunkt liegen, was meist bei länger anhaltenden milden Temperaturen passieren kann, fördert die Schneedecke den Wassertransport an die Bodenoberfläche und somit das Auslösen von

Muren. Das ist ein Grund weshalb Muren im Hochgebirge in den Wintermonaten sehr selten auftreten, selbst wenn es in höheren Lagen regnet.

Im November 2019 ist es in Bad Gastein zu vielen Muren gekommen, zu dieser Zeit wurde vor Ort eine Schneedecke von ungefähr 70 cm gemessen. In den höheren Zonen um Bad Gastein, ist es kaum zu Muren gekommen, mehr Niederschlag ist hier als Schneefall gefallen, und die Schneedecke dürfte höher gewesen sein. Vor allem in den Wintermonaten wirkt sich die Schneedecke eher negativ auf das Auslösen von Muren in den höheren Zonen aus, vor allem dort, wo sie älter sind, und die Temperaturen generell niedriger sind. In den niederen Zonen der Alpen, wie in Spittal an der Drau oder auch in Bad Gastein, dürfte in manchen Fällen die Schneedecke Muren fördern, ähnlich wie bei der Schneeschmelze im Hochgebirge. Niederschlagsmengen und milde Temperaturen sind wahrscheinlich aussagekräftiger als eine vorhandene Schneedecke, was das Auslösen von Muren betrifft.

7.2 Niederschlagsmengen und Muren im Untersuchungsgebiet

Niederschlag, speziell die Niederschlagsmenge und Intensität ist der wichtigste Faktor für das Auftreten von Muren. Auch in den Wintermonaten in den Österreichischen Alpen trifft diese Aussage zu. Im Untersuchungsgebiet wurden deshalb die täglichen Niederschlagsmengen in den Wintermonaten am Talboden, über einen Zeitraum von fast 70 Jahren analysiert. Dazu wurde ein gleitender Mittelwert in verschieden langen Perioden verwendet. In den Wintermonaten dürfte der meiste Niederschlag von größeren Fronten kommen. Etliche sehr hohe tägliche Niederschlagsmengen sind Teil von sehr feuchten Perioden gewesen, welche sich meist über eine Woche, bis ein Monat oder länger erstreckten. Besonders der November 2019, April 1975 sowie Jänner bis Februar 2014, waren besonders außergewöhnlich feuchte Perioden. Die Winterhalbjahre dieser drei verschiedenen Jahre, korrelierten größtenteils mit den niederschlagsreichsten Zeiträumen und Einzeljahren im Untersuchungszeitraum. Alle drei Perioden resultierten in zumindest einem Murenereignis.

Im Fall vom November 2019 wurden 28 Murenereignisse aufgezeichnet, gleichzeitig war es die niederschlagsreichste Periode im Untersuchungszeitraum. Sowohl was die 3-tägige Periode betrifft, als auch die 60-tägige Periode, verzeichnete die erste Hälfte vom November 2019 die höchsten Niederschläge. Nur der tägliche Höchstwert wurde nicht in diesem Zeitraum gemessen, sondern im November 1960. Der ungewöhnlich hohe Anteil von Ereignissen der Kategorie „murartiger Feststofftransport“, in diesem Monat, kann vielleicht auf eine hohe Verfügbarkeit von Wasser und weniger Material hindeuten. Die Niederschlagsmenge im November 2019 war mit 475 mm, um ein Viertel höher, als der durchschnittliche jährliche Niederschlag der Wintermonate im Untersuchungszeitraum. Die für das südliche Kalifornien von Campbell (1975) bestimmte saisonale Mindestniederschlagsmenge von 267 mm, für das Auftreten von Muren, ist damit schon deutlich

überschritten. Die Bedingungen im Oktober 2019 dürften relativ trocken gewesen sein, trotzdem ist der Vergleich mit einer klimatisch mediterran geprägten Region, aufgrund des stark unterschiedlichen Klimas, nur sehr eingeschränkt möglich.

Sehr niederschlagsreich ist auch der Jänner und Februar 2014 im Untersuchungsgebiet ausgefallen. Insgesamt wurde in den Wintermonaten dieser Saison ungefähr 740 mm Niederschlag gemessen, rund 60 mm weniger als in der Saison 2019/2020. Der Niederschlag war stärker verteilt über den Zeitraum von zwei Monaten, anstatt von zwei Wochen im November 2019. Ein größerer Teil des Niederschlages ist besonders im Gebirge als Schnee gefallen, obwohl eher milde Temperaturen vorherrschten. Aufgrund von Schneeschmelze alleine dürfte eine Mure im Untersuchungsgebiet, ausgelöst worden sein, nach drei Wochen ohne wirklichen Niederschlag. Anfang April 1975 war es auch sehr niederschlagsreich im Untersuchungsgebiet, in den zwei Wochen vor dem Ereignis wurden 275 mm Niederschlag gemessen, der gesamte März bis Anfang April ist relativ niederschlagsreich verlaufen. Dieser Zeitraum ist jener mit dem zweithöchsten durchschnittlichen Niederschlag in der 30-tägigen Periode. In der 60-tägigen Periode verzeichnet die Periode im Jänner und Februar 2014 etwas mehr Niederschlag, der Zeitraum im März und April 1975 liegt hier direkt dahinter, auf dritter Stelle.

Die Niederschlagsmenge war am Ereignistag dem 6. April 1975, mit 79 mm höher, als am 17. November 2019, wo nur 61 mm Niederschlag gemessen wurde. In drei Tagen, zusammen mit dem Ereignistag am 6. April 1975 wurden 150 mm Niederschlag vor dem Auslösen von zwei Muren gemessen. Von 15. bis 17. November 2019 wurden 168 mm im Untersuchungsgebiet verzeichnet, in dem Zeitraum von zwei Wochen vor dem Ereignis, waren es 447 mm Niederschlag. Bei den Ereignissen am 6. Dezember 2020 wurde nur 104 mm Niederschlag im 3-tägigen Zeitraum gemessen. Bei dem Ereignis am 5. November 2012 waren es nur 62 mm, im gleich langen Zeitraum. Im Fall der Mure am 5. Dezember liegt der noch relevante Zeitraum des Niederschlages im Oktober, welcher nicht in der Analyse beinhaltet ist. Deshalb könnten eventuelle ergiebige vorige Niederschläge nicht erfasst sein, und die Niederschlagsmenge unterbewertet sein. Auf die Ereignisse am 6. Dezember 2020 trifft nicht das Gleiche zu, die Niederschlagsmenge am Ereignistag ist mit 57 mm nur leicht geringer als am 17. November 2019. Die kühlen Temperaturen kurz vor dem Ereignis könnten jedoch auf eine frische und schmelzende Schneedecke am Ereignistag schließen. Die Kombination aus Schneeschmelze und stärkerem Niederschlag, könnte in diesem Fall den notwendigen Niederschlag für das Auslösen von Muren am Ereignistag verringert haben.

Die Limitationen der Klimadaten, welche sich auf nur zwei Stationen im Tal beschränken, können eventuelle lokale Unterschiede im Klima schlecht erfassen. Die genauen Niederschlagsmengen bei Mureneignissen, könnten in manchen Fällen unterbewertet sein. Es wird dadurch fraglich wie aussagekräftig der genaue Vergleich täglicher Niederschlagswerte im Untersuchungsgebiet ist. Bei der

Erfassung der Murenereignisse könnten eventuell abhängig von der Tageszeit oder dem Ort der Mure eine Verzögerung in der Aufnahme des Ereignisses bestehen. Nur bei wenigen Einträgen ist eine genaue Uhrzeit angegeben, manche Muren im Untersuchungsgebiet sind ohne genaues Datum aufgenommen worden. Viele kleinere Muren oder welche in unzugänglichen und unbesiedelten Gebieten wurden vielleicht gar nicht aufgenommen.

Wenn alleine die Niederschlagsmengen der einzelnen Tage betrachtet werden, um die Wahrscheinlichkeit und Intensität von Murenereignissen abzuschätzen, könnte im Fall des Untersuchungsgebietes auf wahrscheinlich irreführende Erkenntnisse geschlossen werden. Die Anzahl der Murenereignisse im Untersuchungszeitraum und Gebiet, sind größtenteils zu gering um auf statistisch relevante Ergebnisse zu kommen. Der Tag mit den meisten Murenereignissen, verzeichnet nicht eine sehr hohe Niederschlagsmenge am Ereignistag. Am Tag danach, wo noch eine Mure auftrat, wurden sogar nur 18mm Niederschlag gemessen. An anderen Tagen jedoch kam es zu mehr als 80mm Tagesniederschlag und keine Mure ist im Untersuchungsgebiet ausgelöst worden. Jedoch machen hohe tägliche Niederschlagsmengen das Auftreten von Muren wahrscheinlich, vielleicht aber erst am nächsten Tag oder in den Tagen danach. Niederschläge vor dem Ereignistag sind zumindest in den Wintermonaten im Untersuchungszeitraum von größerer Bedeutung. Erkennbar ist das, durch die gemittelten Perioden bei den täglichen Niederschlagsmengen. Die Korrelation zwischen Niederschlagsmenge und Muren, wird ab der 3-tägigen Periode deutlicher. Ein einzelner Tag mit einer hohen Niederschlagsmenge von 80mm ist wahrscheinlich oft nicht ausreichend um Muren im Untersuchungsgebiet in den Wintermonaten auszulösen. Die Intensität des Niederschlages im Winter bzw. Ende Herbst, würde wahrscheinlich nicht, der gleichen Menge eines stärkeren konvektiven Starkniederschlag entsprechen. Jedoch über einen Zeitraum von 3 Tagen und mehr, kann genug Niederschlag fallen und der Boden hat genug Zeit diesen aufzunehmen, damit ein positiver Porenwasserdruck entsteht.

Die längeren Perioden von 7, 30 und 60 Tagen korrelieren teilweise noch besser mit Murenereignissen, besonders die 60-tägige Periode. Eventuell dadurch, dass es in den Wintermonaten, besonders im November und Dezember, aufgrund der flachen Sonneneinstrahlung zu sehr wenig Verdunstung kommt. Wassergesättigte Böden, könnten bei milden Temperaturen länger erhalten bleiben. Niederschläge, eine oder zwei Wochen vor einem Ereignis, könnten relevant für das Auftreten von Muren sein. Weshalb vor allem die 60-Tages Periode gut mit vielen Murenereignissen korreliert, liegt eher an den außergewöhnlich feuchten Perioden, welche sowohl in kurzen als auch längeren Perioden ungewöhnlich hohe Niederschlagsmengen aufweisen. Es ist fraglich, wie die Niederschlagsmenge über den Zeitraum von ein bis zwei Monaten, Muren deutlich beeinflusst. Länger als Bodenfeuchte lässt sich jedoch Niederschlag mit einer Schneedecke speichern. Wenn diese aufgrund von milden

Temperaturen und Regen schmilzt, wie das zum Beispiel im April 1975 der Fall war, wird der Zeitraum in dem Niederschlag relevant für Muren ist, erhöht.

7.3 Verteilung von Muren

Muren wurden in fast dem gesamten Gebiet der Alpen in Österreich aufgezeichnet. Die wichtigste Voraussetzung ist ein relativ steiles Gelände, mit ungefähr 20°-45° Neigung. Das trifft auf den größten Teil des alpinen Gebietes Österreichs zu, ebenso wie auf vereinzelte kleinere nicht alpine Gebiete. Das vergleichsweise stärker bevölkerte Gebiet außerhalb der Österreichischen Alpen, ist deshalb kaum von Muren betroffen. Hohe Niederschlagsmengen oder intensive Starkniederschläge sind notwendig um Muren auszulösen. Diese Niederschläge sind nicht exklusiv auf ein Gebiet in Österreich beschränkt, sondern können überall auftreten. Ein anderer beeinflussender Faktor, ist der Boden bzw. das Material, welches bei einer Mure transportiert werden kann. Die Geologie, die Eigenschaften der Bodenaufgabe bzw. das Sediments bestimmen, wie wahrscheinlich eine Mure entstehen kann. Die Geologie hat einen Einfluss auf das Auftreten von Muren, zumindest wenn die Böden geringer ausgebildet sind. Ob das Wasser oberflächlich abfließt und ob Material mit feinerer Korngröße vorhanden ist, wird die Wahrscheinlichkeit von Muren erhöhen.

Die Vegetation spielt außerdem eine sehr wichtige Rolle in der Stabilisierung des Bodens und des Materials. Generell wird das Auftreten von Muren durch diese erschwert. Die Stabilisierung von Böden und Material durch Vegetation und andere Prozesse, braucht Zeit und die richtigen klimatischen Umstände. Im Hochgebirge oberhalb der Baumgrenze und vor allem in den Permafrost Zonen und periglazialen Gebieten, dauert diese Verfestigung länger und wird kaum ein stärkeres Ausmaß erreichen. Die höheren alpinen Zonen sind aufgrund der stärkeren Erosion, generell geomorphologisch aktiver. Lockeres Material und unbefestigtes Sediment, kann immer wieder abgelagert und abtransportiert werden. Das Bundesland Tirol mit einer vergleichsweise hohen Fläche im Hochgebirge, verzeichnet auch deshalb die meisten Murenereignisse. Obwohl viele kleinere, nicht schadbringende Murenereignisse im Hochgebirge wahrscheinlich nicht aufgezeichnet werden. Der Zeitraum in dem Muren auftreten, beschränkt sich im Hochgebirge fast nur auf die Sommermonate, in dieser Zeit kommt es dafür umso häufiger zu Murenereignissen.

Niedrige Temperaturen und höhere Schneedecken vermindern Muren im Winter im Hochgebirge. In mittleren und niederen Zonen der Alpen, mit dichter Besiedelung, kommt es in den Wintermonaten durchaus zu Muren. Eine etwas eindeutigerere Verteilung ist hier erkennbar. Diese Verteilung hat wenig mit Unterschieden in der Geologie oder auch der Vegetation zu tun, sondern mit Unterschieden im Klima, speziell dem Niederschlag. Der Unterschied liegt zwischen den Gebieten südlich der Hohen Tauern, und jenen nördlich des Hauptkammes der Ostalpen.

In den Wintermonaten verzeichnen Kärnten und Osttirol verhältnismäßig viele Muren. Im Zeitraum von Jänner bis April, sind die Unterschiede jedoch nicht auffällig. Die großen Unterschiede bestehen im November und Dezember, deutlich mehr Muren wurden in den Regionen Kärnten und Osttirol aufgezeichnet, als in anderen Regionen Österreichs in diesem Zeitraum. Da die Regionen südlich des Hauptkammes der Ostalpen oft von Luftmassen aus der Mittelmeerregion geprägt sind, unterscheidet sich die Niederschlagsverteilung von jener der nördlichen Gebiete merkbar. Die durchschnittlichen Niederschläge von Herbst bis Anfang des Winters im Dezember sind höher, verglichen mit anderen Gebieten der Alpen in Österreich.

Höhere durchschnittliche Niederschläge erklären größtenteils die sehr hohe Murenhäufigkeit im November und Dezember. Muren werden jedoch üblicherweise nicht von durchschnittlichen Niederschlagsmengen ausgelöst. Die Höhe der Niederschlagsschwellenwerte, ab welchen Muren auftreten können, ist abhängig von den durchschnittlichen Niederschlägen. Govi und Sorzana (1980) beschreiben für eine Region im Piemont in den Italienischen Alpen, dass der durchschnittliche Niederschlag der Region, die Niederschlagsschwelle für das Auslösen von Muren stärker beeinflusst, als Eigenschaften der Geologie und des Bodens. Demnach sollten Randzonen oder andere niederschlagsreiche Gebiete der Alpen nicht zwingend mehr Muren aufweisen, als niederschlagsärmere Gebiete, weil die Niederschlagsschwellen dem höheren durchschnittlichen Niederschlag angepasst sind. Hohe Variabilität in den Niederschlägen und besonders seltene extreme Niederschlagsereignisse, spiegeln sich jedoch nicht im durchschnittlichen Niederschlag wider.

Verglichen mit anderen Regionen nördlich des Alpenhauptkammes, haben andere Luftmassen im Süden der Alpen einen größeren Einfluss. Aufgrund der Luftmassen ergibt sich im Herbst und Winter wahrscheinlich ein größeres Potenzial an extremen Niederschlägen, und somit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Muren, wie es im November 2019 der Fall gewesen ist. Jedoch beschränkt sich der Einfluss dieser Ereignisse nicht nur auf die südlichen Regionen der Alpen. Im Land Salzburg, nördlich der Hohen Tauern, in Bad Gastein und Zell am See, ist es während des Ereignisses von 2019 auch zu vielen Muren und anderen Ereignissen gekommen. Ähnliche Wetterbedingungen und Niederschläge, wie Mitte November 2019, sind in Kärnten und Osttirol schon vorher aufgetreten, zum Beispiel im November 1966, und werden auch in Zukunft auftreten können.

7.4 Forschungsfragen und Hypothesen

Im Letzen Kapitel der Diskussion werden die Hypothesen der Forschungsfragen mit den Ergebnissen der Arbeit im Vergleich gestellt. Mit den dazugewonnenen Erkenntnissen der Analyse und dem vorigen Teil der Diskussion, ist es möglich die Forschungsfragen genauer zu beantworten. Dadurch sollten die Hypothesen zumindest teilweise in ihrer Validität überprüft werden können und es wird auf eventuelle Fehler eingegangen.

Forschungsfrage 1

Welche Faktoren beeinflussen Muren in den Wintermonaten und wie unterscheiden sich diese zu den Sommermonaten?

Hypothese 1

Frost und Tauwetter, sowie Schneeschmelze und geringe Verdunstung, beeinflussen Muren deutlich in den Wintermonaten, jedoch gibt es weniger Niederschlag, besonders Extremniederschläge sind häufiger in den Sommermonaten.

Die Hypothese ist größtenteils korrekt. In den Wintermonaten, herrscht in der Alpenregion ein anderes Klima, als im Sommer. Geringere Temperaturen führen zu Frost und Schneefall, und höheren Schneedecken, auch in den Alpentälern. Zusammen mit weniger intensiven Niederschlägen und insgesamt geringeren Niederschlagsmengen, treten Muren in den Wintermonaten verglichen mit den Sommermonaten seltener auf. Bei mildereren Temperaturen, können jedoch andere Faktoren, wie das Auftauen von Böden, Schneeschmelze, geringere Verdunstung und langanhaltenden Regenfällen, Umstände schaffen, welche das Auftreten von Muren begünstigen. Diese Umstände würden in den Sommermonaten nicht in dem Maß auftreten können.

Forschungsfrage 2

Wie beeinflussen höhere Niederschlagsmengen, das Auftreten von Muren in den Wintermonaten, November bis April in den österreichischen Alpen?

Hypothese 2

Höhere Niederschlagsmengen in den Wintermonaten führen zu mehr Muren Ereignissen

Die Hypothese ist richtig, jedoch in Bezug auf die Frage etwas vereinfacht. Mit höheren Niederschlagsmengen sind Mengen gemeint, welche deutlich über den normalen durchschnittlichen Werten liegen. Der durchschnittliche Niederschlag liegt im Untersuchungsgebiet bei 6,6 mm, sofern nur die Niederschlagstage einbezogen werden. Sehr intensive Niederschläge treten in den

Wintermonaten seltener auf. Ein einziger niederschlagreicher Tag ist meist nicht genug um Muren auszulösen. Wichtig ist auch der Zeitraum in dem die Niederschläge stattfinden, die Dauer des Niederschlages und die Intensität. Ein Niederschlag über 30 mm gemittelt über 3 Tage tritt seltener auf, als ein einziger Tag mit mehr als 30 mm Niederschlag. Ersterer kann eher zu Muren führen. Mithilfe der Analyse im Untersuchungsgebiet ist erkennbar, wenn der Zeitraum auf 7 Tage verlängert wird, oder die Niederschlagsmenge im 3-tägigen Zeitraum auf 50 mm erhöht wird, ist es relativ wahrscheinlich, dass es zu Muren kommen kann.

Forschungsfrage 3

Welche regionalen Unterschiede bestehen in Österreich beim Winterniederschlag, in Bezug auf Muren?

Hypothese 3

In den Mittelgebirgen in den nördlichen und südlichen alpinen Randlagen, fördert die höhere Niederschlagsmenge das häufigere Auftreten von Muren

Die Hypothese zur 3. Forschungsfrage ist wahrscheinlich nicht korrekt, jedoch lässt sie sich mit den Ergebnissen der Arbeit nicht eindeutig widerlegen. Eine klare Verteilung in den Wintermonaten besteht aufgrund der Temperatur in den verschiedenen Höhenzonen der Alpen. In höheren Gebieten kommt es zu weniger Muren, als in niederen Zonen. Niedrigere Temperaturen und mächtigere Schneedecken sind größtenteils der Grund dafür. Unterschiede in der Häufigkeit von Muren bestehen auch zwischen Gebieten südlich der Hohen Tauern und jenen nördlich des Alpenhauptkammes. Mehr Niederschlag und vor allem häufigere extremere Niederschlagsereignisse in Kärnten und Osttirol in den Wintermonaten sind der Grund dafür. Allein höhere durchschnittliche Niederschlagsmengen in Gebieten der Alpen, führen eher nicht zu einem häufigeren Auftreten von Muren, andere Faktoren im Zusammenhang mit dem Klima in den Wintermonaten, spielen eine wichtige Rolle.

8. Ausblick

Um zukünftige Ereignisse besser abschätzen zu können, ist es notwendig vergangene Ereignisse genauer zu analysieren. Das Ziel der Arbeit war jedoch nicht, das zukünftige Auftreten von Muren in den Wintermonaten vorherzusagen. Trotzdem können manche Rückschlüsse aus den Ergebnissen, Erkenntnisse für eine zukünftige Entwicklung von Muren in den Wintermonaten liefern. Wenn sich der Trend des Temperaturanstieges in den Wintermonaten, welcher im Untersuchungsgebiet eindeutig erkennbar ist, im gleichen Maß fortsetzt oder beschleunigt, werden Muren wahrscheinlich häufiger auftreten. Obwohl die Niederschlagsmengen in den Wintermonaten im Untersuchungsgebiet keinen klaren Trend aufweisen. Auch wenn sich dieser Umstand fortsetzt, wird es daran wenig ändern. Im letzten Jahrzehnt sind jedoch starke Schwankungen in den Niederschlägen der Wintermonate im Untersuchungsgebiet erkennbar, wenn es sich hierbei nicht nur um eine temporäre Erscheinung handelt, könnte die Murenaktivität mit hoher Wahrscheinlichkeit erhöht werden.

Um eindeutigere Schlüsse aus der Analyse der Murenereignissen der Vergangenheit ziehen zu können, ist vor allem die Einbeziehung von Klimadaten aus einem dichteren und genaueren Messnetz notwendig, oder auch die Verwendung von flächenhaft interpolierten Niederschlags- und Klimadaten. Besonders wenn es um stärkere Niederschlagsereignisse in alpinen Gebieten geht, könnten lokale Unterschiede und Messfehler sich auch in den Wintermonaten deutlich auf die Validität der Klimadaten auswirken. Eine verbesserte Einbeziehung von Klimastationen in größerer Höhe ist auch wichtig, um besser zu verstehen, wie sich das Wetter zu den Zeitpunkten größere Niederschlagsereignisse verhält, und wie das die aufgezeichneten Muren in tieferen Zonen beeinflussen kann. Die Daten zu aufgezeichneten Muren gehen teilweise viel weiter zurück, als vollständige lokale Klimadaten. Die Einbeziehung solcher Klimadaten, auch wenn diese rekonstruiert sind, könnten neue Erkenntnisse liefern. Die Frequenz größerer Muren- und Niederschlagsereignisse könnte zu gering sein, um diese mit den eher kurzen Zeitreihen mancher Klimastationen zu erfassen.

Was die Murendaten betrifft, gibt es auch Einschränkungen. Nicht alle Ereignisse sind exakt datiert, sondern nur mit dem Ereignismonat und Jahr aufgenommen worden. Bei manchen relevanten Ereignissen ist das Datum eventuell rekonstruierbar, sowie auch weitere zusätzliche Informationen. Die Aufnahme von Muren und von anderen Naturereignissen, hat sich im Laufe der Jahre verbessert, gleichzeitig sind auch viele Schutzmaßnahmen umgesetzt worden. Aus diesem Grund ist die Veränderung in der Anzahl der Ereignisse über einen längeren Zeitraum vielleicht wenig aussagekräftig. Viele Aufnahmen von Ereignissen sind unvollständig, das genaue Datum fehlt manchmal, in nur wenigen Fällen ist eine genauere Uhrzeit angegeben. Hier wäre eine Verbesserung und Anpassung der Datenerhebung sinnvoll, zum Beispiel mit verstärktem Gebrauch verschiedenen

Fernerkundungsmethoden, eventuell auch mit automatisierten Verfahren. Ein Problem bei der Analyse sind auch die, vergleichsweise geringe Anzahl von Muren. Um statistisch relevantere Erkenntnisse zu treffen, wäre eine größere Anzahl an Ereignisse bzw. die stärkere Erfassung von kleineren oder nicht schadbringenden Ereignissen sinnvoll. Die Ausweitung der Analyse auf andere Gebiete in Salzburg, Tirol und Vorarlberg, und deren Vergleich, könnten ebenfalls zu besseren Erkenntnissen bezüglich der Verteilung von Muren in Österreich führen.

9. Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2015). *Einführung in die Geomorphologie* (Vol. 8103). Utb.
- Bacchini, M., & Zannoni, A. (2003). Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(1/2), 71-79.
- Bahlburg, H., & Breitreuz, C. (2018). *Grundlagen der Geologie*. Springer-Verlag.
- Baumgartner, B., (2020). Eurac Research Magazine, Rückgang der Schneebedeckung; eurac.edu/de/magazine/studie-zeigt-rueckgang-der-schneebedeckung-in-den-alpen; letzter Zugriff 23.08.2023
- Böhm, R. (2008). Schnee im Klimawandel–Snow and Climate Change. *Katalog zur Ausstellung „Vom Schnee“ im Winter*, 9, 60-87.
- Braun, F. J. (2002). *Mesoskalige Modellierung der Bodenhydrologie*. FZKA.
- Bründl, M. (1997). *Snow interception and meltwater transport in subalpine forests* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska annaler: series A, physical geography*, 62(1-2), 23-27.
- Calhoun, N. C., & Clague, J. J. (2018). Distinguishing between debris flows and hyperconcentrated flows: an example from the eastern Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(6), 1280-1294.
- Campbell, R. H. (1975). *Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California* (Vol. 851). US Government Printing Office.
- Cancelli, A. Nova R (1985) Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (central Alps-Italy). In *Proceedings 4th International Conference and Field Workshop on Landslides*. Tokyo: The Japan Geological Society (pp. 267-272).
- Cannon, S. H., & Ellen, S. D. (1988). Rainfall that resulted in abundant debris-flow activity during the storm. *Landslides, Floods, and Marine Effects of the Storm of January 3–5, 1982, in San Francisco Bay Region, California, US Geol. Surv. Prof. Pap*, 1434, 27-33.
- Ceriani, M. (1992). Rainfall and landslides in the Alpine area of Lombardia Region, central Alps, Italy. In *Proceedings, Interpraevent Int. Symp, Bern* (Vol. 2, pp. 9-20).
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., & Quattrini, S. (2000, June). Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans. In *Proc. Int. Symp INTERPRAEVENT 2000, Villach, Austria* (Vol. 2, pp. 213-225).
- Chleborad, A. F. (1997). *Temperature, snowmelt, and the onset of spring season landslides in the central Rocky Mountains*. Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Clague, J. J., & Stead, D. (Eds.). (2012). *Landslides: types, mechanisms and modeling*. Cambridge University Press.
- Coe, J. A., Kinner, D. A., & Godt, J. W. (2008). Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado. *Geomorphology*, 96(3-4), 270-297.

- Costa, J. E. (1984). Physical geomorphology of debris flows. In *Developments and applications of geomorphology* (pp. 268-317). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227.
- Del-Negro, W. (1977). *Abriss der Geologie von Österreich*. Geologische Bundesanstalt.
- DLR Earth Observation Center, (2016). Winter ohne Schnee. ; (dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-11128/19488_read-45603/)
- Formetta, G., Kam, J., Sadeghi, S., Tootle, G., & Piechota, T. (2021). Atlantic Ocean Variability and European Alps Winter Precipitation. *Water* 2021, 13, 3377.
- Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV), bzw. die.wilbach (2023). Einzugsgebiet Wildbäche und Gefahrenzonenpläne; geometadatensuche.inspire.gv.at/metadatensuche/srv/api/records/bc9e4fc5-79ee-495a-afc2-15b819f4bffb; letzter Zugriff 14.08.2023
- Frei, C., Schär C., (1998). A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations; *International Journal of Climatology* 18, 873 -900.
- Fritz, H. (2010). Berechnung von Schneeschmelze und Wintererosion im Kleineinzugsgebiet „Schäferfirtal“ mit dem Modell Erosion 3D/Winter Version.
- Früh, B., Paulat, M., & Wirth, V., (2015). Die Korrelation von Cape mit dem nachfolgenden Niederschlag.
- Gabler, R. E. (1987). *Essentials of physical geography*. Saunders College Pub.
- Gabler, R., J. Petersen und L. Trapasso (2007). *Essentials of Physical Geography. Eighth Edition*. Thomson Brooks/Cole.
- Glade, T. (1998). Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. *Environmental Geology*, 35, 160-174.
- Glade, T. (2000). Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand-the soil water status model. *Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband*, (122), 63-84.
- Glade, T., Mergili, M., Karin, S., (2020). *ExtremA 2019*. V&R Unipress.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of the total environment*, 493, 1138-1151.
- Govi, M., & PF, S. (1980). Landslide susceptibility as a function of critical rainfall amount in Piedmont Basin (North-Western Italy).
- Guo, X. J., Cui, P., & Li, Y. (2013). Debris flow warning threshold based on antecedent rainfall: a case study in Jiangjia Ravine, Yunnan, China. *Journal of Mountain Science*, 10, 305-314.
- Hübl, J., Beck, M., (2020). Ereignisdokumentation 2019. IAN Report 209; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung.
- Hübl, J., Beck, M., (2021). Ereignisdokumentation 2020. IAN Report 217; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung.

- Hübl, J., Sitter, F., Totschnig, R., Schneider, A., & Krawtschuk, A. (2009). Historische Ereignisse–Band 4: Zusammenstellung und Analyse dokumentierter Ereignisse in Österreich bis 2009. *IAN Report*, 111.
- Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In *Landslide risk management* (pp. 109-138). CRC Press.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167-194.
- Imaizumi, F., Ikeda, A., Yamamoto, K., & Ohsaka, O. (2021). Temporal changes in the debris flow threshold under the effects of ground freezing and sediment storage on Mt. Fuji. *Earth Surface Dynamics*, 9(6), 1381-1398.
- Innes, J. L. (1983). Debris flows. *Progress in physical geography*, 7(4), 469-501.
- Isotta, F. A., Frei, C., Weigluni, V., Perčec Tadić, M., Lassegues, P., Rudolf, B., ... & Vertačnik, G. (2014). The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *International Journal of Climatology*, 34(5), 1657-1675.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.
- Jakob, M., Hungr, O., & Jakob, D. M. (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena* (Vol. 739). Berlin: Springer.
- Jakob, M., Hungr, O., Wiecek, G. F., & Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. *Debris-flow hazards and related phenomena*, 325-362.
- Kaitna, R., Gobiet, A., Sinabell F., Stoffel, M., (2014). Deucalion, Determining and Visualising Impacts of Greenhouse Climate Rainfall in Alpine Watersheds on Torrential Disasters. WIFO.
- Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown III, W. M., Ellen, S. D., ... & Zatzkin, R. S. (1987). Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238(4829), 921-925.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., & Samacoïts, R. (2023). 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 60(1-2), 65-86.
- Kraus, H. (2004). Beispiele zur Thermodynamik. Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie, 173-180.
- Krautblatter, M., Kellerer-Pirklbauer, A., & Gärtner-Roer, I. (2018). Permafrost in den Alpen: Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. *Geographische Rundschau*, (11), 22-29.
- Larsen, M. C., & Simon, A. (1993). A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 75(1-2), 13-23.
- Lawinenwarndienst Land Tirol (2020). Krisen- und Gefahrenmanagement der Tiroler Landesregierung; lawine.tirol.gv.at; letzter Zugriff 14.08.2023
- Lieb, G. K. (2022). Klimastatusbericht Österreich 2022.
- Luzian, R., (2002). Wildbäche und Muren Eine Wildbachkunde mit einer Übersicht von Schutzmassnahmen der Ära Aulitzky; FBVA.
- Machguth, H. (2003). *Messung und Modellierung der Massenbilanzverteilung auf Gletschern der Schweizer Alpen* (Doctoral dissertation, University of Zurich).

- MeinBezirk Salzburg, (2019). Einsatzkräfte bereiten sich auf Muren und Überflutungen vor. Land Salzburg. ; meinbezirk.at/salzburg/c-lokales/einsatzkraefte-bereiten-sich-auf-muren-und-ueberflutungen-vor_a3759447; letzter Zugriff 14.08.2023
- Ménégoz, M., Valla, E., Jourdain, N. C., Blanchet, J., Beaumet, J., Wilhelm, B., ... & Anquetin, S. (2020). Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11), 5355-5377.
- Meusburger, K., & Alewell, C. (2014). Soil Erosion in the Alps. Experience gained from case studies (2006-2013).
- Meusburger, K., Steel, A., Panagos, P., Montanarella, L., & Alewell, C. (2011). Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 8(5).
- Mitterlehner, S., Skolaut NaturRaum, (2022). Ereignisdokumentation 2021. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung.
- Montgomery, D. R., Schmidt, K. M., Greenberg, H. M., & Dietrich, W. E. (2000). Forest clearing and regional landsliding. *Geology*, 28(4), 311-314.
- Mostbauer, K., Kaitna, R., Prenner, D., & Hrachowitz, M. (2018). The temporally varying roles of rainfall, snowmelt and soil moisture for debris flow initiation in a snow-dominated system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3493-3513.
- Müller, M., & Bistry, T. (2008). Überschwemmungen in Mitteleuropa: Ursachen, Auswirkungen und Perspektiven. *Meteorologie und Versicherungswirtschaft*, 21.
- Nikolopoulos, E. I., Borga, M., Marra, F., Crema, S., & Marchi, L. (2015). Debris flows in the eastern Italian Alps: seasonality and atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 647-656.
- Offenthaler, I., Felderer, A., Formayer, H., Glas, N., Leidinger, D., Leopold, P., ... & Lexer, M. J. (2020). Threshold or limit? Precipitation dependency of Austrian landslides, an ongoing challenge for hazard mapping under climate change. *Sustainability*, 12(15), 6182.
- ONR (2009). Österreichisches Normungsinstitut, ONR 24 800. *Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffserklärungen und Klassifizierungen*.
- Orf (2019). Bilder der Verwüstung nach Unwettern. Orf Salzburg; orf.at/stories/3144763/; letzter Zugriff 14.08.2023
- Possegger, S., Sihler, D., Skudnigg, E., Troschl, S., & Zojer P. (1969). *Hochwasser in Kärnten. Eine Dokumentation*. Amt der Kärntner Landesregierung. Klagenfurt.
- Prenner, D., Hrachowitz, M., & Kaitna, R. (2019). Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of the Total Environment*, 658, 958-972.
- Prenner, D., Kaitna, R., Mostbauer, K., & Hrachowitz, M. (2018). The value of using multiple hydrometeorological variables to predict temporal debris flow susceptibility in an alpine environment. *Water Resources Research*, 54(9), 6822-6843.
- Quadrelli, R., Lazzeri, M., Cacciamani, C., & Tibaldi, S. (2001). Observed winter Alpine precipitation variability and links with large-scale circulation patterns. *Climate Research*, 17(3), 275-284.

- Rebetez, M., Lugon, R., & Baeriswyl, P. A. (1997). *Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps)* (pp. 139-157). Springer Netherlands.
- Ritter, R., (2017). Orographischer Niederschlag im Alpenraum. Diplomarbeit. Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Rudolf, B., & Malitz, G. (2008). Meteorologischer Hintergrund I: Extreme Niederschläge als Schadensursache. *Promet*, 34, 53-57.
- Ruetz, L. (2020). Wenn Schnee durch Regen zu mehr Schnee wird; lukasruetz.at/2020/03/wenn-schnee-durch-regen-zu-mehr-schnee-wird/; letzter Zugriff 11.08.2023
- Schneuwly-Bollschweiler, M., & Stoffel, M. (2012). Hydrometeorological triggers of periglacial debris flows in the Zermatt valley (Switzerland) since 1864. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F2).
- Steinhauser, F. (1955). Die neue Niederschlagskarte von Österreich. *Wetter und Leben*, 7, 95-100.
- Stummer, R. (2009). *Räumliche und zeitliche Variabilität von Murereignissen*. na.
- Terre, C. (2021). *Spatial prediction of landslide susceptibility/intensity through advanced statistical approaches implementation: applications to the* (Doctoral dissertation, University of Twente).
- Thalparpan, P. (2000). Lawinerverbauungen im Permafrost. *Eidg. Institut für Schnee und Lawinenforschung, Davos*.
- Troschl, H. (1967). Die neuerliche Niederschlags- und Hochwasserkatastrophe im österreichischen Sudalengebiet vom 3.-5. November 1966, «Wetter u. *Leben*, 19, 1-12.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water resources research*, 43(7).
- von Fischer, F., Keiler, M., & Zimmermann, M. (2016). Modelling of individual debris flows using Flow-R: A case study in four Swiss torrents.
- Wehren, B., Weingartner, R., Schädler, B., & Viviroli, D. (2010). General characteristics of alpine waters. *Alpine waters*, 17-58.
- Wieczorek, G. F., & Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In *Debris-flow hazards and related phenomena* (pp. 325-362). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wieczorek, G. F., & Sarmiento, J. (1988). 5. Rainfall, Piezometric levels, and debris flows. *US Geological Survey Professional paper*, 43.
- Wieczorek, G. F., Ellen, S., Lips, E. W., Cannon, S. H., & Short, D. N. (1985). Identification and Runout of Debris Flows. *Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazards in Utah*, 113.
- WILSON, R. C., & WIECZOREK, G. F. (1995). Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental & Engineering Geoscience*, 1(1), 11-27.
- WSL. (2022). Debris-flow observation station. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research; wsl.ch/en/about-wsl/instrumented-field-sites-and-laboratories/experimented-field-sites-for-natural-hazards/feldbeobachtungen-und-datenerhebung/debris-flow-observation-station.html; letzter Zugriff 23.08.2023

Würzer, S., & Jonas, T. Der Einfluss von Schneedeckeneigenschaften auf die Abflussgenerierung während Regen-auf-Schnee-Ereignissen.

ZAMG (2002), *Klimadaten von Österreich 1971- 2000*; zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.html; letzter Zugriff 11.08.2023

ZAMG, Klima, (2016). GeoSpähre Austria Klimamonitoring; zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell; letzter Zugriff 11.08.2023

ZAMG, Wetter GeoSpähre Austria, Wetterkarte; zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterkarte; letzter Zugriff 11.08.2023

Zebisch, M., Vaccaro, R., Niedrist, G., Schneiderbauer, S., Streifeneder, T. P., Weiß, M. L., ... & Bergonzi, V. (2018). Klimareport Südtirol 2018.

Zimmermann, M., Mani, P., & Romang, H., (1997). *Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows*. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90: 415-420.