



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Niederschlagsschwellenwerte bei der Auslösung von
Muren - Eine Fallstudie im Vinschgau, Südtirol - Italien“

Verfasser

Mark-Philip Strenger

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, Februar 2009	
Studienkennzahl lt. Studienblatt:	A 453
Studienrichtung lt. Studienblatt:	Theoretische und Angewandte Geographie
Betreuerin / Betreuer:	Univ. Prof. Dipl. Geogr. Dr. Thomas Glade

Danksagung

Ich möchte mich bei Professor Thomas Glade bedanken, der mich bei meiner Diplomarbeit betreut hat und mir bei der Wahl des Themas sehr geholfen hat.

Bei Claudio Mutinelli vom hydrographischen Amt der Provinz Bozen möchte ich mich für die Bereitstellung der Daten bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Vater, der mich während meines Studiums finanziell unterstützt hat. Ohne ihn wäre mein Studium nicht möglich gewesen.

Bei Benni, Anna, Tassilo, Yakup und Martha möchte ich mich für das Korrekturlesen der Arbeit bedanken.

Ohne Theresa würde ich wahrscheinlich noch immer nicht fertig sein. Ich danke ihr dafür, dass sie immer versucht hat mich zu motivieren und dass sie für meine Sorgen und Probleme bezüglich der Diplomarbeit immer ein offenes Ohr gehabt hat.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe und dass ich keine anderen Quellen oder Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Arbeiten entnommen wurden, habe ich in jedem Fall als Entlehnung kenntlich gemacht.

Wien, am 18.Februar 2009

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	1
1.1 EINLEITUNG	1
1.2 FRAGESTELLUNG	2
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	4
2.1 GRAVITATIVE MASSENBEWEGUNGEN	4
2.1.1 Terminologie	4
2.1.2 Definition und Klassifikation.....	4
2.1.3 Fließende gravitative Massenbewegungen	7
2.2 MUREN	10
2.2.1 Terminologie	10
2.2.2 Definition	11
2.2.3 Murentypen.....	12
2.2.4 Geomorphologie und Material	14
2.2.4.1 Das Anbruchgebiet.....	15
2.2.4.2 Die Transportstrecke	18
2.2.4.3 Das Ablagerungsgebiet	19
2.2.5 Physikalische Eigenschaften von Muren	21
2.2.6 Auslöser von Muren	25
2.3 NIEDERSCHLAGSSCHWELLENWERTE	27
2.3.1 Physikalisch-prozessbasierte Modelle.....	28
2.3.2 Empirisch basierte Modelle.....	30
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET	33
3.1 GEOGRAPHISCHE LAGE	33
3.2 KLIMA.....	35
3.3 GEOLOGIE	37
3.4 GEOMORPHOLOGIE	39
4 DATEN	41
4.1 NIEDERSCHLAGSDATEN.....	41
4.2 ABFLUSSDATEN	43
4.3 EREIGNISDATEN	43
5 METHODIK	46
5.1 ERKLÄRUNG DES MODELLS	46
5.2 BERECHNUNGEN UND MODIFIKATIONEN DES MODELLS	49
5.2.1 Berechnung des decay Faktors	50
5.2.2 Berechnung des „Antecedent Daily Rainfall Index“	54
5.2.3 Kategorisierung der Murereignisse.....	54
5.2.4 Analyse der zeitlichen Verteilung der Murereignisse.....	55
5.2.5 Erstellung des Modells.....	55
6 ERGEBNISSE	57
6.1 ZEITLICHE VERTEILUNG DER MUREREIGNISSE	57
6.2 ERGEBNISSE DES ANTECEDENT DAILY RAINFALL MODELLS.....	59
7 DISKUSSION	62
7.1 DISKUSSION DER ERGEBNISSE DER ANALYSE DER ZEITLICHEN VERTEILUNG.....	62
7.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE DES ANTECEDENT DAILY RAINFALL MODELLS	63
8 SENSIBILITÄT DES MODELLS	67
8.1 SENSIBILITÄT BEZÜGLICH DES DECAY FAKTORS	67

8.2	SENSIBILITÄT BEZÜGLICH DER LÄNGE DES VORANGEGANGENEN NIEDERSCHLAGS.....	69
9	AUSBLICK.....	72
10	ZUSAMMENFASSUNG	74
11	LITERATURVERZEICHNIS	76
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	81
13	TABELLENVERZEICHNIS	83
14	ANHANG.....	84

1 Einleitung und Fragestellung

1.1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten rückten Naturgefahren immer mehr ins Zentrum der Berichterstattung der Medien. Durch das Aufkommen der Informationsgesellschaft entgeht unserer Aufmerksamkeit kein Naturereignis das Schäden an Infrastruktur anrichtet oder Menschenleben fordert.

In den Alpen stellen Muren, neben Hochwasser, Lawinen und anderen gravitativen Massenbewegungen, eine der größten Bedrohungen dar und sind ein weit verbreitetes Phänomen. Die Tatsache, dass im alpinen Raum Gebiete, die erheblich durch Muren bedroht sind, sehr oft auch stark besiedelt sind, kommt erschwerend hinzu. Deshalb wird der Bedarf innerhalb der Gesellschaft nach besseren Schutzmaßnahmen immer größer.

Als Beispiel für die Bedrohung durch Muren sei hier die Mure vom November 2000 genannt, die sich in den Gemeindegebieten von Tisens und Nals ereignet hat. Nach überdurchschnittlich hohen und lang anhaltenden Niederschlägen, ereigneten sich einige Rutschungen, die in Form von Murgängen zu Tal strömten. Dabei wurden große Teile der Ortschaft Nals verwüstet. Seitdem ist das Gebiet aktiv und wurde deshalb mit einem Frühwarnsystem ausgestattet. (SCHNEIDER-MUNTAU & FELLIN, 2005, S.2)

Die Verbesserung als auch die Installation von Frühwarnsystemen stehen im Mittelpunkt des Projekts „*Integrative Landslide Early Warning System*“ (ILEWS), in das diese Arbeit thematisch eingebettet ist. Das Projekt wird unter anderen von Geomorphologen, Sozialwissenschaftlern und Historikern der Universitäten in Wien, Bonn und Bamberg durchgeführt. Darüber hinaus sind auch einige Firmen aus den Bereichen der Geophysik, Raumplanung und Sensorentwicklung daran beteiligt. Ziel unter anderen ist es, ein integratives Frühwarnsystem für gravitative Massenbewegungen zu schaffen, welches unabhängig von der Art des Prozesses als auch des Ortes, an dem es installiert werden soll, eingesetzt werden kann. Zudem soll ein funktionierendes Risikomanagement etabliert werden, um die Prozesse zu verbessern, die bei einer eventuellen Frühwarnung ausgelöst werden.

Die Untersuchungsgebiete des Projekts befinden sich an drei verschiedenen Orten. In der Schwäbischen Alb, im Mittelgebirge in Deutschland soll ein neues Frühwarnsystem installiert werden. In Nals in Südtirol (Italien) wird ein Murgang untersucht, der bereits mit einem Frühwarnsystem ausgestattet ist und das Pflerschtal mit seiner regen Mur- und Rutschungsaktivität spielt auch eine Rolle bei dem Projekt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht für den Vinschgau Niederschlagsschwellenwerte bei der Auslösung von Muren mithilfe des Antecedent Daily Rainfall Modells nach GLADE et al. (2000) zu berechnen. Derartige Schwellenwerte sind ein entscheidender Bestandteil von Frühwarnsystemen. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen in das ILEWS Projekt einfließen und zur Verbesserung von Frühwarnsystemen beitragen.

1.2 Fragestellung

Muren stehen in engem Zusammenhang mit Niederschlag, da er das Wasser liefert, welches für eine Mure notwendig ist. Das Wasser einer Mure kann natürlich auch durch andere Prozesse als durch den Niederschlag, wie zum Beispiel Schneeschmelze, bereitgestellt werden. Theoretisch gibt es neben dem Niederschlag und der Schneeschmelze auch andere Auslöser einer Mure, die aber innerhalb des Untersuchungsgebietes zu vernachlässigen sind. Erdbeben können Muren auslösen, weisen sie jedoch im Vinschgau eine so geringe Frequenz auf, dass sie außer Acht gelassen werden können.

Es wird im Rahmen dieser Arbeit aber davon ausgegangen, dass Muren im Untersuchungsgebiet lediglich durch Niederschlag ausgelöst werden können. Durch diese Annahme kann es zu Fehlern kommen. Diese Annahme ist aber notwendig, um mit dem Modell Niederschlagsschwellenwerte berechnen zu können.

Durch den bereits angesprochenen engen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Muren, ist es möglich Schwellenwerte auszuweisen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit von Murgängen einhergehen. In der Praxis kann man bei Erreichen oder Überschreiten von bestimmten Niederschlagsmengen bestimmte Aussagen treffen: Wird der Niederschlagswert x überschritten oder erreicht, kann man mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass es zu einer Mure kommen wird. Diese Wahrscheinlichkeiten beruhen dann auf den bisher im Untersuchungsgebiet beobachteten Schwellenwerten.

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit lautet demnach:

Die Auslösung von Muren ist im Vinschgau an Niederschlagsschwellenwerte gekoppelt, die mithilfe von statistischen Modellen berechnet werden können.

Zur Untersuchung der Hypothese wurden folgende Fragestellungen formuliert:

1. Ist das Antecedent Daily Rainfall Modell nach GLADE et al. (2000) in der Lage für die Auslösung von Muren realistische Niederschlagsschwellenwerte zu berechnen?
2. Wie sensibel reagiert das Modell auf eine Änderung der berücksichtigten Länge des vorangegangenen Niederschlags und auf eine Änderung des decay Faktors?
3. Sind die zur Verfügung gestandenen Daten ausreichend? Wenn nein, wie müssen diese verbessert werden, um das Modell verbessern zu können?
4. Beschränkt sich im Vinschgau das Auftreten von Muren auf eine bestimmte Jahreszeit?
5. Ist der aktuelle oder der vorangegangene Niederschlag für die Auslösung von Muren im Vinschgau bedeutender?

Ziel dieser Arbeit ist es also, Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von Muren im Vinschgau mithilfe des Antecedent Daily Rainfall Modells nach GLADE et al. (2000) zu berechnen. Außerdem soll die Sensibilität des Modells bezüglich der Eingangsparameter überprüft werden. Darüber wird versucht festzustellen, ob das Auftreten von Muren im Vinschgau auf eine bestimmte Zeit des Jahres beschränkt ist.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen zu Geomorphologie, Auslöser und Rheologie von gravitativen Massenbewegungen, und insbesondere von Muren näher erläutert werden. Anschließend werden die Grundlagen zum Thema Niederschlagsschwellenwerte dargestellt und es wird ein Überblick über die bisher in der Wissenschaft verwendeten Modelle gegeben.

2.1 Gravitative Massenbewegungen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die verschiedenen Definitionen von gravitativen Massenbewegungen geboten. Da Muren in dieser Arbeit einen besonderen Stellenwert innehaben, wird näher auf die fließenden gravitativen Massenbewegungen eingegangen.

2.1.1 Terminologie

Für gravitative Massenbewegungen existieren in der Literatur unterschiedliche Bezeichnungen. Im deutschen Sprachraum bezeichnet man sie auch als „Massenschwerebewegung“ (ZEPP 2002, S.99) oder als Teil der „*Denudation*“ (AHNERT 2003, S.123).

Im englischen Sprachraum verwendet man „*landslide*“, was aber von CORNFORTH (2005, S.4) als unpassend angesehen wird, da das Wort „slide“ bereits einen Typ der Bewegung vorgibt, der nicht für alle Massenbewegungen zutrifft. Um dem zu entgehen, wird der geomorphologische Begriff „*mass wasting*“ (CORNFORTH 2005, S.4) oder „*mass movement*“ (BRUNSDEN 1984 in DIKAU et al. 1996, S.2) verwendet. In dieser Arbeit wird ausschließlich der Begriff gravitative Massenbewegung verwendet.

2.1.2 Definition und Klassifikation

Gravitative Massenbewegungen werden in der Fachliteratur auf unterschiedlichste Art und Weise definiert. ZEPP (2002, S.99) definiert sie folgendermaßen: „*Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man Abtragungs-, Transport- und Ablagerungsvorgänge, die auf schwach geneigten bis steilen Hängen überwiegend unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgen.*“ Bei dieser Definition steht der Einfluss der Gravitation auf das Hangsystem im

Mittelpunkt, wobei die Massenbewegungen nur „überwiegend“ unter dem Einfluss der Gravitation stehen. Bei GOUDIE (2002, S.323) ist eine Massenbewegung „ein Begriff, der alle Bewegungen von Gesteins- oder Bodenmaterial an geneigten Hängen umfasst. Diese Bewegungen sind ausschließlich auf die Wirkung der Schwerkraft zurückzuführen, laufen also ohne Wasser, Wind oder Eis als Transportmedium ab.“ Hier werden die Massenbewegungen „ausschließlich“ auf die Schwerkraft zurückgeführt. GOUDIE (2002, S.323) weist aber darauf hin, dass eine Klassifizierung schwierig sei, da die Übergänge zwischen den einzelnen Massenbewegungsarten in der Realität fließend sind.

Eine einfachere und kürzere Definition verfasste CRUDEN (1991 in CORNFORTH 2005, S.4): „*the movement of a mass rock, debris, or earth down a slope.*“. Er sieht demnach gravitative Massenbewegungen als eine hangabwärtsgerichtete Bewegung an, die aus Schutt, Gestein oder Erde besteht.

VARNES (1978 in DIKAU et al. 1996, S.2) verwendete anstelle von „movement“ „slope movement“ und definiert gravitative Massenbewegungen folgendermaßen: „*a downward and outward movement of slope forming materials under the influence of gravity.*“

Beim Versuch die in der Natur ablaufenden Prozesse zu klassifizieren, stößt man auf die Schwierigkeit, dass die theoretischen gravitativen Massenbewegungsarten in der Realität oft schwer zu unterscheiden sind, da die Grenzen nicht klar definiert sind. Außerdem kommen in der Natur viele verschiedene Mischformen vor.

Nichts desto trotz gibt es eine Vielzahl an Versuchen, die gravitativen Massenbewegungen zu klassifizieren. Sie werden dabei unter anderem nach ihrer Bewegungsart, ihrem Material, ihrer Geschwindigkeit, ihrer Morphologie und nach ihrem Mechanismus klassifiziert.

Eine der am häufigsten zitierten Klassifikationen von gravitativen Massenbewegungen ist jene nach CRUDEN & VARNES (1996), die auf einer Klassifikation nach VARNES (1978) beruht und nur etwas vereinfacht worden ist. Die Klassifikation ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach CRUDEN & VARNES (1996, S. 38), verändert.

Process	Material		
		Bedrock	Predominantly Coarse
Fall	Rock Fall	Debris Fall	Earth Fall
Topple	Rock Topple	Debris Topple	Earth Topple
Slide	Rock Slide	Debris Slide	Earth Slide
Spread	Rock Spread	Debris Spread	Earth Spread
Flow	Rock Flow	Debris Flow	Earth Flow

CRUDEN & VARNES (1996) unterteilen die gravitativen Massenbewegung nach ihrer Bewegungsart und nach dem Material. Das Material wird nach seiner Korngröße unterschieden und in drei Gruppen eingeteilt (rock, debris und earth). Mit Stürzen (fall), Kippen (topple), Rutschen (slide), Driften (spread) und Fließen (flow) existieren fünf unterschiedliche Bewegungstypen. Durch die Kombination beider Merkmale werden fünfzehn unterschiedliche gravitative Massenbewegungen unterschieden. Der Name enthält immer zuerst das Material und dann den Bewegungstyp. Die ursprüngliche Klassifikation nach VARNES (1978) unterschied zusätzlich noch zwischen Translations- und Rotationsrutschungen und es existierte mit „complex“ ein zusätzlicher Bewegungstyp. Diesem Bewegungstyp wird dafür aber in der Namensgebung durch zusätzliche Adjektive, die in mehreren Tabellen bei Cruden und Varnes enthalten sind, Rechnung getragen.

Die Klassifikation nach HUTCHINSON (1988) unterscheidet auch zwischen verschiedenen Bewegungsarten, jedoch gibt es acht verschiedene und nicht fünf wie bei CRUDEN & VARNES (1996). Die vereinfachte Form der Klassifikation sieht folgendermaßen aus:

- A. Rebound
- B. Creep
- C. Sagging of mountain Slopes
- D. Landslides
 - 1. Confined failures
 - 2. Rotational failures
 - 3. Compound failures
 - 4. Translational failures
- E. Debris Movements of flow-like form
 - 1. Mudslides
 - 2. Flow slides
 - 3. Debris Flows
 - 4. Rock avalanches / sturzstroms
- F. Topples
- G. Falls
- H. Complex slope movements

(nach HUTCHINSON 1988 in DIKAU et al. 1996, S.215)

Der größte Unterschied zwischen den beiden Klassifikationen besteht darin, dass bei Hutchinson die auslösenden Prozesse von gravitativen Massenbewegungen im Mittelpunkt der Betrachtung stehen, während Cruden und Varnes ihr Augenmerk auf die daraus

resultierenden Bewegungen als Ganzes gelegt haben. Darüber hinaus gibt es bei Hutchinsons Klassifizierung bezüglich des Materials von gravitativen Massenbewegung keine Differenzierung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Klassifizierung nach CRUDEN & VARNES (1996) verwendet, da sie übersichtlicher ist und das Material von gravitativen Massenbewegungen berücksichtigt.

2.1.3 Fließende gravitative Massenbewegungen

Da Muren der Definition nach Cruden und Varnes zu den fließenden gravitativen Massenbewegungen gehören, wird dieser Bewegungstyp näher beschrieben.

Die Unterscheidung gegenüber anderen gravitativen Massenbewegungsarten ist schwierig, insbesondere ist der Unterschied zwischen Fließen und Gleiten nicht immer klar erkennbar. Der Wassergehalt des bewegten Materials ist bei allen Autoren ein wichtiges Kriterium um zu entscheiden, ob es sich um Fließen oder Gleiten handelt. Je höher der Wassergehalt umso wahrscheinlicher ist es, dass es sich um eine fließende gravitative Massenbewegung handelt. ZEPP (2002, S.107) spricht von „*Durchtränkungs- oder Übersättigungsfließen*“, wobei es sich um eher feineres Material handelt, welches nicht nur oberhalb einer Gleitfläche wassergesättigt ist. Die Masse bewegt sich also im Ganzen und nicht nur auf einer Gleitfläche. Für CRUDEN & VARNES (1996, S.65) sind die drei entscheidenden Merkmale einer Fließbewegung der Wassergehalt, die Mobilität und die Entwicklung der Bewegung. Sie nennen letzteres „*evolution of movement*“ und meinen damit die Entwicklung oder Veränderung der Geschwindigkeit oder des Wassergehaltes einer fließenden gravitativen Massenbewegung über ihren gesamten Verlauf hinweg. Solche Veränderungen treten beispielsweise bei Änderung der Hangneigung auf. Außerdem ähnelt bei einer fließenden gravitativen Massenbewegung nach CRUDEN & VARNES (1996, S.64) die Verteilung der Geschwindigkeit einer viskosen Flüssigkeit.

Für DIKAU et al. (1996, S.149) ist die zentrale Eigenschaft einer Fließbewegung, die separate Bewegung jedes einzelnen Teilchens. Das steht ganz im Gegensatz zum Gleiten, wo sich die Masse als Ganzes auf einer Gleitfläche bewegt.

Fließende gravitative Massenbewegungen kommen in den unterschiedlichsten Geschwindigkeiten vor. Vom langsamen Kriechen bis hin zu Geschwindigkeiten von einigen hundert Metern pro Sekunde. Sehr oft ist es der Fall, dass solche Massenbewegungen in bereits vorhandenen Rinnen, die das Gelände vorgibt, ablaufen. Zum Wassergehalt ist zu sagen, dass fließende gravitative Massenbewegungen sowohl mit geringem als auch mit sehr hohem Wassergehalt ablaufen können.

Eine wichtige Rolle spielt die Fließgrenze, die überschritten werden muss, damit es überhaupt zu einer Bewegung kommen kann. Hierbei wird durch ständige Wasseraufnahme des Materials die Kohäsion solange herabgesetzt bis es zu einer Fließbewegung kommt (ZEPP 2002, S.107). Die Konsistenzgrenzen nach ATTERBERG sind in Abbildung 1 dargestellt. Sie bestimmen die Fließfähigkeit eines Materials. Durch stetige Wasserzugabe werden Schrumpf-, Ausroll- und Fließgrenze eines bestimmten Materials bestimmt und in Form von Wassergehalt in Prozent angegeben.

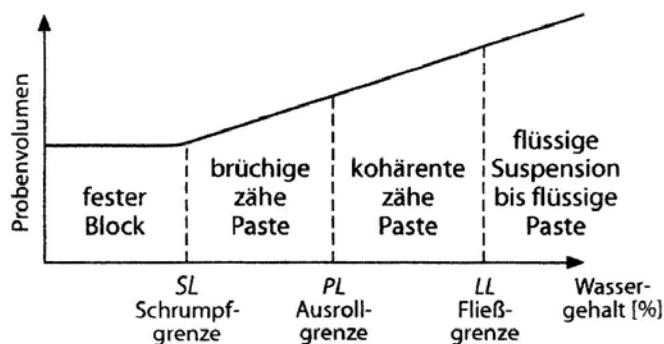


Abbildung 1: Konsistenzgrenzen nach ATTERBERG (in ZEPP 2002, S. 108 nach GOUDIE 1998).

Eine besondere physikalische Eigenschaft, die bei tonreichem Material auftreten kann, ist die Thixotropie, die ZEPP (2002, S. 108) als ein plötzliches Fließen, welches durch Erschütterung ausgelöst wird, beschreibt.

Auch innerhalb der fließenden gravitativen Massenbewegungen gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Arten. Es wird über diese im Folgenden ein kurzer Überblick geboten, wobei darauf hingewiesen wird, dass auf Muren in einem eigenen Kapitel näher eingegangen wird. Die einzelnen Unterarten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihres Wassergehaltes und ihrer Korngröße. Die Namensgebung innerhalb der Literatur ist verschieden, da die einzelnen Autoren verschiedene Namen für denselben Prozess verwenden.

Goudie zählt die *Solifluktion* zu den Fließbewegungen. Er bezeichnet diese Massenbewegung als „Bodenfließen“ in Periglazialgebieten, welche man in zwei Prozesse unterteilen kann. Während das Kriechen von Oberflächenmaterial durch Auftau- und Gefrierprozesse einen Versatz durch Änderung des Volumens darstellt, ist das Fließen von wassergesättigtem Material, das durch die Dauerfrostschicht im Boden begünstigt wird eine klassische Fließbewegung. (GOUDIE 2002, S.324)

Bei LESER (2005, S.849) entspricht die von Goudie beschriebene Solifluktion der Gelifluktion. ZEPP (2002, S.108) beschreibt das Durchtränkungsfließen des

wassergesättigten Auftaubodens als Gelifluktion, die gemeinsam mit dem Versatz durch Volumensänderung aufgrund von Gefrier- und Auftaprozessen die Solifluktion bilden.

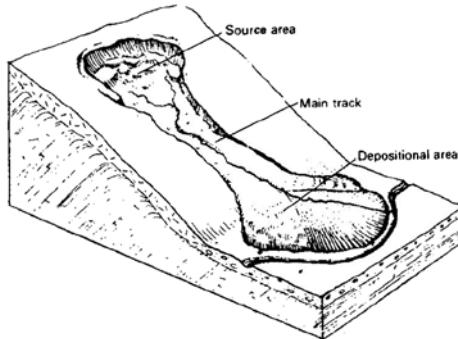


Abbildung 2: Schema eines Earth Flows (aus CRUDEN & VARNES 1996, S.65).

VARNES (1978 in CRUDEN & VARNES 1996, S.65) beschreibt mit „*earth flow*“ oder „*slow earth flow*“ (Abbildung 2) einen weiteren Typ. Diese fließende gravitative Massenbewegungsart ist schwer gegenüber Rutschungen abzugrenzen. Es handelt sich dabei um sehr tonhaltiges und trockeneres Material, das sich eher langsam bewegt. Ist die bewegte Masse stark verformt, spricht man anstelle von Rutschung von einem „*earth flow*“. „*Soil flows*“ sind laut DIKAU et al. (1996, S.149) kohäsionslose Fließbewegungen der einzelnen Körner, vor allem bei trockenem Sand. Die Autoren bezeichnen dieses Phänomen der Verflüssigung als „*fluidisation phenomena*“. Bei CRUDEN & VARNES (1996) spricht man von „*dry sand flows*“ (Abbildung 3).

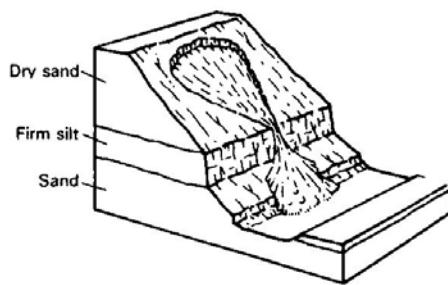


Abbildung 3: Schema eines Dry Sand Flows (aus CRUDEN & VARNES 1996, S.65).

Bei DIKAU et al. (1996) wird außerdem der „*rock flow*“ erwähnt, der im Deutschen als Sackung, Talzuschub oder Bergzereibung bezeichnet wird. Es handelt sich hierbei um kriechende, fließartige gravitative Deformation, die tief im Untergrund stattfindet. Solche Sackungen ereignen sich zumeist an steilen Hängen, wo das Gestein resistent genug ist um nicht in einzelne Bestandteile zu verfallen. Das trockene Gestein beginnt unter dem Einfluss von Gravitation zu fließen.

2.2 Muren

In diesem Abschnitt wird näher auf den Prozess der Mure eingegangen. Es werden Definitionen, die verschiedenen Untertypen und die Geomorphologie von Muren näher erläutert.

2.2.1 Terminologie

Will man sich wissenschaftlich mit Muren beschäftigen, stößt man auf das Problem, dass in der Fachliteratur nicht immer derselbe Ausdruck verwendet wird. Das mag zum Teil an Übersetzungsschwierigkeiten vom Englischen ins Deutsche oder umgekehrt liegen, der Hauptgrund dafür ist aber sicherlich, dass es sich bei einer Mure um einen komplexen Prozess handelt, sodass es schwierig ist einen allgemein anerkannten Ausdruck beziehungsweise eine klare Definition zu finden.

Neben dem am häufigsten verwendeten Wort „Mure“ existiert im Deutschen der Begriff „Murgang“, der aber den Ablauf des Prozesses beschreibt (LESER 2005, S.582). Eine Mure kann aus mehreren Murgängen bestehen, die nacheinander abgehen. Gelegentlich wird auch „Schlammstrom“ oder „Schlammlawine“ verwendet, wobei hier aber die Verwechslungsgefahr mit „Laharen“ besteht. Hierbei handelt es sich um Schlammströme aus vulkanischem Lockermaterial (AHNERT 2003, S.136). Da in der Fachliteratur am häufigsten der Begriff „Mure“ verwendet wird, wird auch ich im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich dieses Wort verwendet.

Im englischen Sprachraum gibt es einige Synonyme für „Mure“, außerdem existieren viele Differenzierungen unterschiedlicher Murentypen. Der gebräuchlichste Begriff ist „debris flow“, er wird in allen Publikationen verwendet, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Der Begriff „Mudflow“ wird für Muren verwendet, deren Feststoffanteil kleinere Korngrößen aufweisen und sich in semiariden Regionen ereignen (HUNGR 2005, S.9). DIKAU et al. (1996, S.161) zu Folge handelt es sich bei „mudflow“ um den älteren englischen Begriff für Muren. SHARPE (1938 in HUNGR 2005, S.9) unterschied erstmals zwischen „debris flow“ und „debris avalanche“. Letztere gehen Sharpe zu Folge im Unterschied zu „debris flows“ nicht innerhalb eines kanalisierten Gerinnes ab, sondern entstehen im Zuge von großen Rutschungen an steilen Hängen, die in ihrer Morphologie Lawinen sehr ähnlich sind. Auch im Englischen gibt es das Wort „lahar“ für die murenähnlichen Schlammströme aus vulkanischem Lockermaterial.

Zusammenfassend kann man sagen, dass „debris flow“ als „Mure“ übersetzt werden kann und alle anderen englischen Bezeichnungen verschiedenen Untertypen von Muren entsprechen.

2.2.2 Definition

Für den Prozess der Mure gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen. Schlägt man im Allgemeinen Wörterbuch für Geographie (LESER 2005, S.582) nach, so findet man folgenden Eintrag: „*Strom aus Wasser, Boden, Gesteinsschutt und Blöcken (wobei der feste Materialanteil an der M. überwiegt), der sich im Hochgebirge nach plötzlichen Starkregengüssen oder Schneeschmelzen an Hängen [...] meist sehr rasch zu Tal bewegt.*“ Bei Muren handelt es sich um einen Prozess, der wesentlich zur Abtragung und Landschaftsformung innerhalb eines Gebirges beiträgt. Dabei wird Material, das zuvor zum Beispiel durch Verwitterung und kleinere Massenbewegungen akkumuliert wurde, zumeist nach starkem Niederschlag oder starker Schneeschmelze den Hang hinab transportiert.

Innerhalb der Wissenschaft ist man sich nicht darüber einig, ob man die Mure zu den gravitativen Massenbewegungen oder zu den fluviyalen Prozessen zählen kann. Nach LUZIAN (2002, S.16) ist eine Mure „[...] ein Wildbach-Sonderfall: Während im Normalfall das Wasser als Transportmittel das Geschiebe entlang der Gerinnesohle weiterbefördert, wird es bei einer Mure zum Gemengebestandteil.“ und ein Wildbach wird dem österreichischen Forstgesetz aus dem Jahre 1975 nach wie folgt definiert: „*Ein Wildbach [...] ist ein dauernd oder zeitweise fließendes Gewässer, das durch rasch eintretende und nur für kurze Zeit dauernde Anschwellungen Feststoffe aus seinem Einzugsgebiet [...] entnimmt, diese mit sich führt und [...] ablagert oder einem anderen Gewässer zuführt.*“ (LUZIAN 2002, S.16).

KERSCHNER (1998, S.78) definiert Muren als „*Sonderfälle im Rahmen von Wildbachereignissen*“ ähnlich der Definition nach LUZIAN (2002) und betrachtet sie „*als eine Übergangsform zwischen fluviyalen und gravitativen Prozessen [...], wobei der erstere Aspekt jedenfalls deutlich überwiegt.*“ Bei diesen beiden Definitionen wird der Prozess der Mure nicht zu den gravitativen Massenbewegungen gezählt, sondern als fluvialer Prozess beschrieben. Das steht ganz im Gegensatz zum Großteil der Literatur, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurde. Dort ist die Mure eine von vielen gravitativen Massenbewegungen, die auf unterschiedliche Art und Weise klassifiziert werden können. Die Definitionen nach LUZIAN (2002) und KERSCHNER (1998) wurden nur der Vollständigkeit wegen angeführt, um zu zeigen, dass innerhalb der Wissenschaft Auffassungsunterschiede bestehen, ob man Muren zu den gravitativen Massenbewegungen zählt oder nicht.

Tatsächlich ist die Mure eine Kombination aus sowohl fluvialen als auch gravitativen Prozessen, was aus der Definition nach ZEPP (2002, S.108) hervorgeht. Er spricht von einer Mure „*wenn wasserdurchtränkter Schutt breiartig hangabwärts fließ.*“ und erläutert, dass für eine Mure kleinere Massenbewegungen notwendig sind, wie etwa Steinschlag, die den Schutt akkumulieren, der dann durch Muren abtransportiert werden kann (ZEPP 2002, S.108). Das heißt, zuerst sind gravitative Massenbewegungen notwendig, um das Material zu akkumulieren, das dann nach ergiebigen Niederschlägen oder starken Schneeschmelzen durch eine Mure, die einen fluvialen Prozess darstellt, abtransportiert wird.

Bei DIKAU et al. (1996, S.161) wird die Mure als „*mixture of fine material (sand, silt and clay), coarse material (gravel and boulders), with a variable quantity of water, that forms a muddy slurry which moves downslope, usually in surges induced by gravity [...]*“ beschrieben. Hier wird also der transportierende Prozess nicht als fluvialer, sondern als gravitativer Prozess angesehen.

Für AHNERT (1996) sind Muren „*ein typischer Abtragungsprozess an den Hängen von Hochgebirgen*“, für dessen Auftreten er drei Voraussetzungen nennt: Die Akkumulation von Schutt mit einem ausreichenden Anteil von Feinmaterial, stoßweise Zufuhr von Wasser durch Niederschlag oder Schneeschmelze und ein ausreichend großes Gefälle (AHNERT 1996, S.136).

TAKAHASHI (2007, S.6) definiert eine Mure folgendermaßen: „*Debris flow is a flow of sediment and water mixture in a manner as if it was a flow of continuous fluid driven by gravity [...]*“.

HUNGR (2005, S.14) definiert eine Mure als „*very rapid to extremely rapid flow of saturated non-plastic debris in a steep channel. Plasticity index is less than 5% in sand and finer fractions.*“. Bei dieser Definition spielt mit der Plastizität auch eine physikalische Eigenschaft einer Mure eine wichtige Rolle.

Die unterschiedlichen Definitionen weisen Gemeinsamkeiten auf. Es wird immer darauf hingewiesen, dass es sich bei einer Mure aus einer Mixtur aus Feststoffen und Wasser handelt. Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Mure einen gravitativen Prozess darstellt, bei dem der fluviale Abtransport eine entscheidende Rolle spielt.

2.2.3 Murentypen

Auch bei den Muren gibt es unterschiedliche Typen, die aufgrund des transportierten Materials, der Morphologie der Mure selbst oder bezüglich des Fließverhaltens unterschieden werden.

LUZIAN (2002, S.21) unterscheidet *Schlammwildbäche* mit sehr flachen Schwemmfächern, die vor allem in den Voralpen und Lössgebieten auftreten, von den in den Alpen vorkommenden *Geschiebewildbächen* mit sehr steilen Schwemmkegeln.

Bei TAKAHASHI (2007) werden die einzelnen Typen aufgrund von physikalischen Eigenschaften differenziert. „*Stony-type debris flow*“ beschreibt Muren mit einer Flutwelle an der Front, wobei der vorab geringe Abfluss plötzlich enorm ansteigt. An der Front werden die größten Gesteinsblöcke vorangeschoben und der Wassergehalt ist geringer als beim Rest der Mure (nach OKUDA et al. 1978 in TAKAHASHI 2007, S.10).

Ein „*Turbulent-muddy-type debris flow*“ weist einen hohen Anteil an feinem Material auf, wie zum Beispiel Asche oder Ton, und hat ein anderes Fließverhalten. Unter diese Bezeichnung fallen auch die Lahare. Lahare sind Schlammströme aus vulkanischem Lockermaterial, die oftmals an steilen Vulkanflanken nach starken Niederschlägen abgehen.

Der dritte Typ bei Takahashi ist der „*viscous debris flow*“. Hierbei handelt es sich um Muren, die in mehreren Schüben (Surges) abgehen. Diese Schübe können von einigen Sekunden bis zu mehreren Minuten lang dauern. An der Front kann man turbulentes und dahinter laminares Fließen beobachten. Durch die einzelnen Murschübe wird das Flussbett oder das Gelände in dem die Mure abgeht abgeflacht und ausgeräumt, was dazu führt, dass der nächste Vorstoß eine größere Distanz zurücklegen kann. Dadurch vergrößert sich natürlich auch die Menge an abgelagertem Material erheblich, da jeder Schub das Material von den vorhergehenden mittransportiert. (TAKAHASHI 2007, S.10)

HUNGR (2005, S.15) unterscheidet *debris flow*, *mud flow*, *debris flood* und *debris avalanche*. Während *debris flows* eine geringe Plastizität aufweisen und innerhalb eines steilen Gerinnes ablaufen, sind *mud flows* sehr plastisch und haben einen hohen Wassergehalt. Außerdem bestehen *mud flows* aus feinerem Material. *Debris floods* beschreiben denselben Typen den Takahashi als „*viscous debris flow*“ bezeichnet, also ein Murgang mit mehreren Vorstößen mit hohem Feststoffanteil und großen Blöcken. *Debris avalanches* sind Muren, die nicht innerhalb von durch das Gelände vorgegebenen Kanälen ablaufen. Sie sind flächig und nicht durch das Gelände begrenzt, transportieren dadurch bedeutend größere Mengen an Material. (HUNGR 2005, S.15ff)

2.2.4 Geomorphologie und Material

Das von Muren transportierte Material wird durch die verschiedensten Prozesse zu unterschiedlichen geologischen Zeitpunkten bereitgestellt. Die Unterteilung des Materials in Altschutt und Jungschutt, die auf STINY (1910) zurückgeht, wird in der Literatur noch oft verwendet.

Der *Jungschutt* entsteht in der geologischen Jetztzeit durch Verwitterung. Im vegetationslosen Bereich der Gebirge kommt es zur Produktion von Schutt hauptsächlich durch Frostverwitterung, aber auch andere physikalische und chemische Verwitterungsformen produzieren „Witterschutt“ (LUZIAN 2002, S.26). Vorwiegend läuft dieser Prozess in Lockersedimenten ab. Jungschutt kann aber auch in Festgestein, sofern es veränderbar ist, durch Verwitterung produziert werden. Das geschieht zum Beispiel bei Flysch und Schiefer. Eine in den letzten Jahrzehnten wichtiger gewordene Quelle für Jungschutt stellt die Permafrostdegradation, vor allem in den steilen und hoch gelegenen Gebieten innerhalb der Westalpen, dar (VAW 1992 in KERSCHNER 1999, S.85). Bei Jungschuttbächen beruhen die Eigenschaften demnach auf der Tatsache, dass unterschiedliches Ausgangsgestein durch verschiedene Verwitterungsarten erodiert wird.

Altschutt stellt vor geologischer Jetztzeit entstandene Geschiebeherde dar, deren Masse sich nicht mehr vermehrt. Nach KERSCHNER (1999, S.83) sind das hauptsächlich „eiszeitlich, randglaziale Sedimente, insbesondere Talverbauungen und höhere Teile von Ufermoränen“. Diese Moränen der verschiedenen Eiszeiten weisen sehr oft geringe Kohäsion aufgrund von größeren Korngrößen auf. Bei Altschutt kann es sich laut LUZIAN (2002, S.26) aber auch um fluvioglaziale Lockermassen, fossilen Gehängeschutt und aeolisch abgelagerten Löss handeln. LUZIAN (2002, S.26) weist auch darauf hin, dass Moränen mit hohem Feinanteil den gefährlichsten Geschiebeherd in den Alpen darstellen. Vor allem kann es sein, dass diese Moränen durch randliche Zementierung, die durch Kalkausscheidungen entstanden ist, scheinbar längere Zeit stabil sind und dadurch sehr mächtige Böschungen ausbilden (KERSCHNER 1999, S.83). Die Eigenschaften von Altschuttbächen werden von der Ablagerungsart, der Kornzusammensetzung und der Dichte des Altschutts bestimmt.

HUNGR (2005) bezeichnet „debris“ als loses unsortiertes Material mit geringer Plastizität, das durch Verwitterung, glaziale Abtragung, gravitative Massenbewegungen, Vulkanismus und anthropogene Eingriffe produziert wird. Er stellt außerdem fest, dass das von Muren transportierte und abgelagerte Material aus Sand, Schotter und größeren Blöcken mit einem veränderlichen Anteil von Schluff und Ton besteht. Neben dem anorganischen Material kann eine Mure auch organisches Material, wie zum Beispiel Holzstämme, -stämpfe oder -teile mit sich führen. (HUNGR 2005, S.12)

Betrachtet man die geomorphologische Gliederung einer Mure, so kann man drei Teilbereiche unterscheiden: das Anbruchgebiet, die Transit- oder Transportstrecke und das Ablagerungsgebiet. DIKAU et al. (1996) bezeichnen diese drei Zonen als „*source area*“, „*main track*“ und „*depositional toe*“, während HUNGR (2005, S.16) sie als „*initiation-, transport- und deposition zone*“ benennt. Im Anbruchgebiet beginnt der Prozess. Es wird Material durch andere Prozesse zur Verfügung gestellt und von dort über die Transportstrecke in das Ablagerungsgebiet befördert.

2.2.4.1 Das Anbruchgebiet

Innerhalb des Anbruchgebietes kommt es im Hang oder an den Seitenhängen zu Anbrüchen. Sehr oft steht am Anfang einer Mure nur eine kleinere gravitative Massenbewegung. Die Magnitude der auslösenden gravitativen Massenbewegung variiert jedoch stark, denn Muren können beispielsweise auch nur die Endphase einer Gerölllawine oder eines großen Steinschlags darstellen. Es kann aber auch sein, dass das Flussbett selbst das Material bereitstellt, wenn es einem hohen Abfluss und den damit verbundenen Kräften nicht mehr standhalten kann und instabil wird. Das Gefälle im Anbruchgebiet beträgt zumeist zwischen 20° und 45°. (HUNGR 2005, S.16ff)

In Aulitzkys Wildbachklassifikation von 1980, die auf Abbildung 4 dargestellt ist, werden die Art des Wasserangriffes und die geomorphologischen Merkmale berücksichtigt. Daraus leitet Aulitzky einen Entwicklungsfähigkeitsindex ab, der von eins bis fünf angibt, wie stabil oder instabil der Wildbach ist. Demnach ist dieser Index auch geeignet um ungefähr abschätzen zu können, wie wahrscheinlich das Auftreten von Muren ist.

Durch den angesprochenen Wasserangriff kommt es im Anbruchgebiet zu verschiedenen Anbruchformen, die LUZIAN (2002, S.31ff) näher beschrieben hat. Bevor man mit der Differenzierung der Anbruchformen beginnt, kann man die prinzipielle Unterscheidung treffen, ob der Wasserangriff unterirdisch durch Untertagewasser oder an der Oberfläche durch Oberflächenwässer stattfindet.

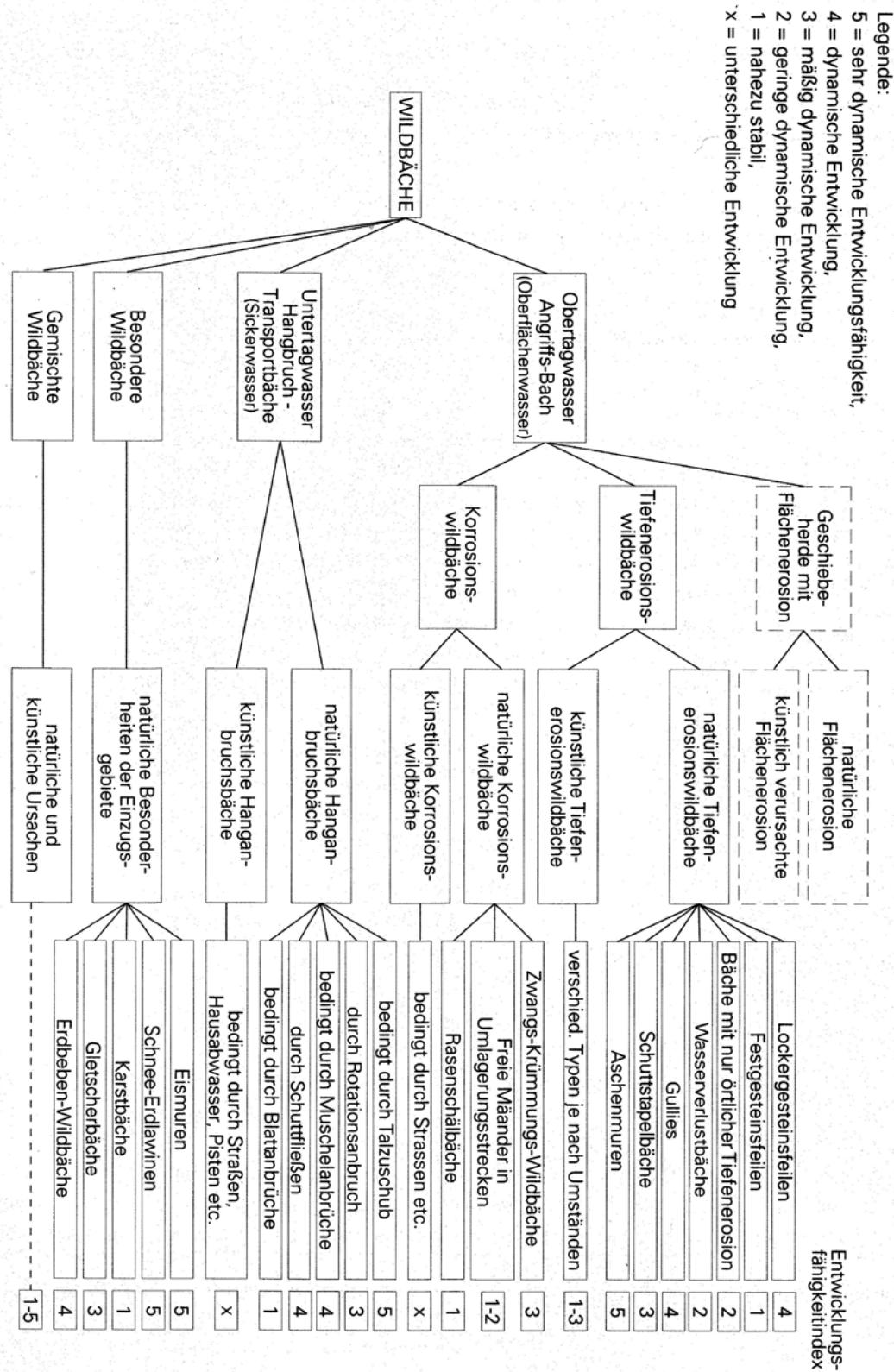


Abbildung 4: Wildbachklassifikation nach AULITZKY 1980 (aus LUZIAN 2002, S. 30).

Zuerst werden kurz die Anbruchsformen, die durch den Angriff von Oberflächenwasser entstehen, beschrieben werden. Wenn Oberflächenwasser das gesamte Bachbett angreift und dort nur auf geringen Widerstand trifft, kommt es zu feilenartigen Eintiefungen. WEBER

(1964 in LUZIAN 2002, S.31) nennt diese Anbruchform „*Feilenanbruch*“ oder „*Feilenblaike*“ (Abbildung 5). Das Bachbett kann der Erosionskraft aufgrund von Abflasterung und zu hohem Gefälle nicht widerstehen. Dadurch kommt es zur Unterschneidung der Seitenhänge des Wildbaches. Luzian sieht die Feilenanbrüche als typische Talbildung im Gebirge bei zu steiniger und steiler Talsohle. (LUZIAN 2002, S.31)

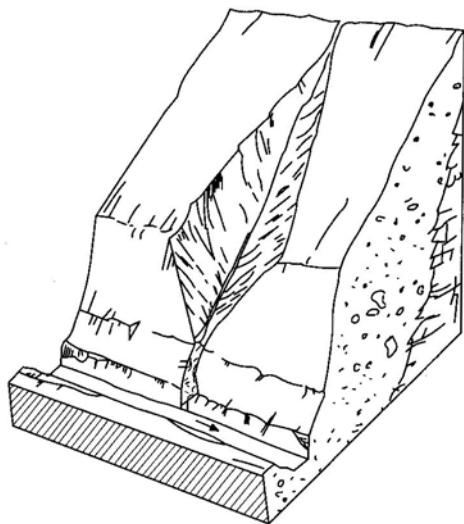


Abbildung 5: Feilenanbruch (nach WEBER 1964 aus LUZIAN 2002, S.31).

Keilanbrüche entstehen in der Nähe von Abstürzen und Wasserfällen und sind nach Luzian nur von lokaler Bedeutung und somit weniger gefährlich. Bei feinem schluffigem Lockermaterial bildet der Wasserangriff steile und unregelmäßig geformte Ränder aus, die bei Löss als Runsen, sonst als Racheln oder Gullies bezeichnet werden. Typisch für diese Anbruchsform ist der eher flachere, im Gegensatz zu dem sonst hyperbelartigen, Längsschnitt des Baches. Am oberen Ende des Längsschnittes bildet sich mit dem „*Gully*“ ein markanter steil abfallender Erosionskopf aus. Im Zuge von Richtungsänderungen eines Wildbaches kann es auch zu seitlicher Materialentnahme an den Prallhängen kommen. Diesen Anbruch bezeichnet Luzian als *Uferanbruch*. (LUZIAN 2002, S.31ff)

Bei Anbrüchen, die durch Untertagswasser ausgelöst werden, erfolgt die Erosion unterirdisch und nicht durch den Bach selbst, der hier nur das Transportmedium darstellt. *Blattanbrüche* beschreibt Luzian als kleine, flache Rutschungen, die noch am Hang selbst zum Liegen kommen und sich zumeist nach starken Niederschlägen oder Schneeschmelzen ereignen (LUZIAN 2002, S.35). *Translationsrutschungen* sind Luzian zu Folge bedeutend größer als die Blattanbrüche und rutschen mehr oder weniger hangparallel auf Gleitflächen den Hang hinab. Kommt es unterirdisch im Hang zu einem Wasseraustritt, können *Muschelanbrüche* entstehen, die aufgrund ihrer Muschelform sehr leicht im Gelände zu erkennen sind (Abbildung 6). Bei dieser Anbruchsform kann viel für Muren verfügbares Material

bereitgestellt werden, da es sehr leicht nachbrechen kann. Auch *Rotationsrutschungen* können den Prozess darstellen, der das Material für eine Mure produziert oder sie auslöst. Diese komplex ablaufenden Rutschungen ereignen sich auf einer konkav gekrümmten Gleitfläche. Es kommt dabei zur Ausbildung von einzelnen Rutschschollen. (LUZIAN 2002, S.35ff)

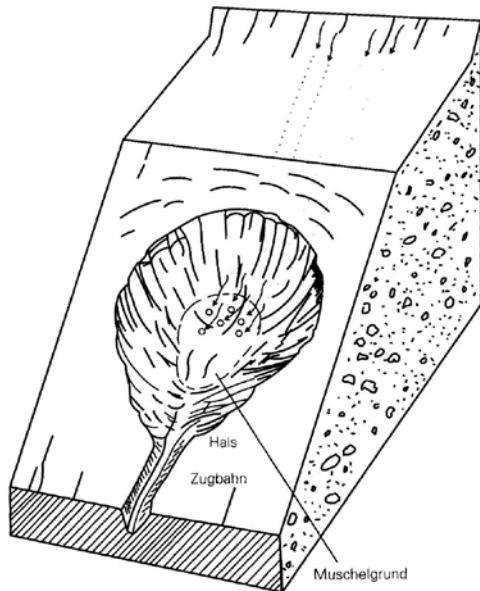


Abbildung 6: Muschelanbruch (nach WEBER 1964 aus LUZIAN 2002, S.37).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Material für Muren durch unterschiedliche Prozesse bereitgestellt werden kann. Diese Prozesse sind nicht immer klar voneinander trennbar und es können auch mehrere unterschiedliche Prozesse beteiligt sein.

2.2.4.2 Die Transportstrecke

Nach der Auslösung einer Mure im Anbruchgebiet erfolgt der Transport hangabwärts über die Transportstrecke. Enge Täler und Wildbäche bilden dabei sehr oft einen durch das Gelände vorgezeichneten Kanal in dem sich die Mure bewegt. Bei Schuttlawinen läuft die Bewegung nicht innerhalb von Rinnen, sondern flächig über den ganzen Hang ab. Durch den feinen Materialanteil kommt es zu fließähnlichen Bewegungen, die mit einem gleichmäßig verteilten Geschwindigkeitsprofil einhergehen. Während des Transports kann zusätzliches, stark wassergesättigtes Material durch die Mure vom Gerinnebett mitgerissen werden. HUNGR (2005, S.17) bezeichnet diesen Prozess als „*rapid loading*“. Normalerweise kommt die Mure erst im Ablagerungsgebiet aufgrund einer geringeren Hangneigung zum Stillstand. Das Transportgebiet weist laut Hungr ein Mindestgefälle von 10° auf. Er erwähnt, dass die

Mure jedoch auch innerhalb der Transportstrecke zum Liegen kommen und einen Damm bilden kann. Dies führt zur Ausbildung von Murschüben (Surges), wenn dieser Damm durchbrochen wird. Solche Dämme können auch durch Verklausung, die Verstopfung durch Wildholz, entstehen. Wenn die Transportstrecke einen erodierbaren Untergrund aufweist, wird zusätzlich zum vorab erwähnten „rapid loading“ weiteres Material von der Mure mitgerissen. Hungr zu Folge wird dieser Prozess als „entrainment“ bezeichnet und kann mithilfe der „debris yield rate“ quantifiziert werden. Diese Rate gibt die Menge des von der Mure mitgerissenen Materials in m^3 per Längeneinheit an. Die zuvor erwähnten Murschübe sind Phasen, in denen der Materialtransport und der Abfluss kurz sprunghaft ansteigen. Sie können während einer Mure ein oder mehrere Male auftreten. Diese Schübe bilden Felsfronten, auch Murköpfe genannt, aus. Hinter der Front fließt feineres Material (Hungr nennt dieses Material „liquefied debris“) den Hang hinab. Zwischen den einzelnen Surges kommt es zum „intersurge flow“, der einen hohen Wasseranteil aufweist. Sollten keine Felsbrocken oder grobkörniges Material vorhanden sein, kommt es an der Front nur zu turbulentem gefolgt von laminarem Fließen. (HUNGR 2005, S.17ff)

2.2.4.3 Das Ablagerungsgebiet

Zur Ablagerung einer Mure kommt es wenn sich das Gefälle vermindert und die Einengung durch das Gelände wegfällt. Daher verlangsamt sich die Front und dahinter breitet sich die Mure aus. Das flüssigere Material hinter der Front überholt diese und bricht durch. Durch die Ablagerung von einzelnen Murgängen kommt es zur Ausbildung gelappter Strukturen. Die dabei entstandene Form ist der Murkegel. (HUNGR 2005, S.18)

Murkegel haben nach AHNERT (1996, S.136) ein Gefälle von 8° - 12° . Bei DIKAU et al. (1996, S.169) findet man eine Auflistung der von verschiedenen Autoren beobachteten Hangneigungen von Murkegeln. Es wurden Werte von 4° bis 25° Neigung beobachtet. Die Mehrheit der Autoren gibt jedoch mit 5° bis 15° ungefähr denselben Wertebereich wie AHNERT (1996, S.136) an.

Betrachtet man das Material eines Murkegels genauer, erkennt man eine Matrix von eher feinerem Material, in der große Blöcke abgelagert sind. Das Material ist unsortiert, wobei sich die großen Blöcke am Ende der gelappten Strukturen, die durch die einzelnen Murgänge entstanden sind, befinden. (DIKAU et al. 1996, S.165)

Murkegel werden meistens nach dem Ereignis durch das bestehende Gerinne noch fluvial verändert, da die Murbahn sehr oft dem Bachbett eines Wildbaches entspricht. HUNGR (2005, S.19) nennt das „*fluvial redirection*“.

Im Unterschied zu fluvial entstandenen Schwemmfächern sind Murkegel deutlich steiler und weisen ein kleineres Einzugsgebiet (1. bis 2. Ordnung) auf. Außerdem ist die Rauigkeit der

Einzugsgebiete bei Murkegeln höher als bei Schwemmfächern. Die Rauigkeit errechnet sich aus der Einzugsgebietsgröße und der Höhe des Einzugsgebiets. (DIKAU et al. 1996, S.166)

Tabelle 2 liefert einen Überblick über die Unterschiede von Murkegeln und Schwemmfächern bezüglich ihres Gefälles und der Rauigkeit.

Tabelle 2: Gefälle und Rauigkeit von Murkegeln und Schwemmfächern nach JACKSON et al. 1987 in DIKAU et al. 2002, S.166.

	Gefälle	Rauigkeit R
Murkegel	> 4°	> 0,25-0,3
Schwemmfächer	< 2,5°	< 0,3

Eine weitere Ablagerungsform, die durch Muren entsteht sind Levees (Abbildung 7). Es handelt sich dabei um grobes Material, das an den Seiten der Murbahn abgelagert wird.



Abbildung 7 : Querschnitt einer Murbahn mit abgelagerten Levees (aus KERSCHNER 1999, S.79).

Levees können auf verschiedene Art und Weise entstehen. Einerseits kann es sein, dass der Abflussquerschnitt einer Mure größer ist als der Gerinnequerschnitt der Murbahn. Somit kann es sein, dass Material am Rande der Murbahn aufgrund der Unterschreitung der kritischen Abflusstiefe zum Stillstand kommt und dort abgelagert wird (KERSCHNER 1999, S.91). Andererseits besteht Kerschner zu Folge die Möglichkeit, dass durch sekundäre Fließkomponenten, die zur Seite gerichtet sind, Material an der Seite abgelagert wird. Darüber hinaus kann man die Bildung von Levees auch beobachten, wenn Murbahnen eine Biegung vollziehen. Durch die Erhöhung der Fließoberfläche während dieser Biegung, kommt es zur Ablagerung an der Seite. Aufgrund der Hangneigung und der Höhe der Levees kann die Geschwindigkeit der Mure errechnet werden. Levees werden bei DIKAU et al. (1996, S.161) auch als „lateral ridges“ bezeichnet.

2.2.5 Physikalische Eigenschaften von Muren

Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften einer Mure sind Feststoffanteil beziehungsweise Wassergehalt, Geschwindigkeit, Dichte und Viskosität. Einige dieser Eigenschaften hängen von der Korngrößenverteilung der Feststoffe und der Dichte, mit der die einzelnen Körner innerhalb des Wasser-Feststoff Gemisches transportiert werden, ab. Bezuglich der Geschwindigkeit von Muren ist zu sagen, dass sich die beobachteten Werte im Durchschnitt zwischen 0,5 und 10 m/s bewegen (COUSSOT & MEUNIER 1996, S.213). Was die obere Grenze der Geschwindigkeit betrifft gibt es in der Literatur unterschiedliche Beobachtungen und Meinungen. HUTCHINSON (1988 in DIKAU et al. 1996, S.169) setzt diese Grenze bei 30 m/s an, während KHEGAI et al. (1992 in COUSSOT & MEUNIER 1996, S.213) Geschwindigkeiten von bis zu 20m/s beschreiben. Für KERSCHNER (1999, S.79) beträgt der Geschwindigkeitsbereich einer Mure zwischen 2 und 45 m/s.

Der Feststoffanteil, die Dichte und die Viskosität einer Mure sind am besten zu erläutern, wenn die drei unterschiedlichen Abflussformen, die im Zuge einer Mure auftreten, angeführt werden. Diese Abflussformen weisen stark variierende Feststoffanteile und Korngrößenverteilungen auf. Vor Beginn, beziehungsweise zwischen einzelnen Murgängen oder Murschüben, findet in den Wildbächen ganz normaler Abfluss statt. Bei normalem Abfluss wird mit einem Anteil von vier Prozent am Gesamtvolumen (10% Anteil am Gesamtgewicht) nur sehr wenig feines Sediment transportiert (WAANANEN et al. 1970 in PIERSON 2005, S.159). Muren transportieren im Gegensatz dazu mehr Feststoffe als Wasser. Der Feststoffanteil kann weit höher als 60 Prozent sein (COSTA 1984 in SELBY 1993, S.302). Zwischen diesen beiden Extremen findet ein Übergangsprozess, der in der Literatur als „hyperconcentrated flow“ (hyperkonzentriertes Fließen) bezeichnet wird, statt. Diese Bezeichnung wurde erstmals durch BEVERAGE & CULBERTSON (1964 in PIERSON 2005, S.161) geprägt. Sie verwendeten sie, um zwischen normalen und sedimenthaltigen Abflüssen, die zur Verlandung und Verstopfung führten, zu unterscheiden (PIERSON 2005, S.161). Nach BEVERAGE & CULBERTSON (1964 in PIERSON 2005, S.161) hat hyperkonzentriertes Fließen einen Schwebstoffanteil von mindestens 20 Prozent des Gesamtvolumens (40 Prozent des Gesamtgewichts) und höchstens 60 Prozent des Gesamtvolumens (80 Prozent des Gesamtgewichts). Pierson kritisiert, dass diese Grenzwerte von sehr vielen Autoren einfach übernommen worden sind, ohne sie vorher einer Prüfung nach objektiven Kriterien unterzogen zu haben. Er stellt darüber hinaus fest, dass nicht nur die Sedimentkonzentration zur Feststellung von hyperkonzentriertem Fließen entscheidend ist, sondern auch zwei weitere Faktoren: die rheologischen Eigenschaften des Fließkörpers und wie beziehungsweise wieviel Sand im Wasser in Schwebefestigkeit gerät.

PIERSON (2005, S.193) definiert demnach hyperkonzentriertes Fließen wie folgt: „*a type of two-phase, non-Newtonian flow of sediment and water that operates between normal streamflow and debris flow.*“

Bezüglich der rheologischen Eigenschaften von hyperkonzentriertem Fließen ist zu erwähnen, dass sich Wasser normalerweise wie ein Newtonsches Fluid verhält. Das heißt, es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Verformungsrate und der Schubspannung (KERSCHNER 1999, S.80). Außerdem weisen Newtonsche Flüssigkeiten laminares Fließen und eine konstante Viskosität auf. Deshalb verformen sie sich genau um einen proportionalen Betrag der auf sie einwirkenden Kräfte. Bei TAKAHASHI (2007, S.38) sind Newtonsche Flüssigkeiten anhand der Formel 1 beschrieben, wobei τ die gesamte Schubspannung in N/m², μ die Viskosität in m²s⁻¹ und (du/dz) die Scherung in N/m² darstellt.

$$\tau = \mu(du / dz)$$

Formel 1: Newtonsche Flüssigkeit (nach TAKAHASHI, 2007, S.38).

Im Gegensatz dazu bleibt bei Nichtnewtonschen Flüssigkeiten bei Änderung der Scherspannung die Viskosität nicht konstant. Kommt es während eines Abflusses zu einer Erhöhung des Feinanteils, erhöht sich dadurch die Schubspannung und der Abfluss geht in eine Nichtnewtonsche Flüssigkeit und somit in das hyperkonzentrierte Fließen über. Bei Feinanteil handelt es sich nach PIERSON (2005, S.162) in den USA per Definition um Korngrößen <0.62mm während in China lediglich der feine Schluff und Ton (<0,01mm) als Feinanteil angesehen wird. Genau dieser Übergang von einer Newtonschen in eine Nichtnewtonsche Flüssigkeit wird von vielen Autoren als untere Grenze für hyperkonzentriertes Fließen angesehen (PIERSON, 2005, S.162). Die obere Grenze von diesem Prozess ist Pierson zu Folge erreicht, wenn die Schubspannung und der Auftrieb groß genug sind, um einzelne Körner mit einer Korngröße größer als 4mm in dem Wasser-Feststoffgemisch in Schweben zu halten, unabhängig davon ob sich die Masse bewegt oder nicht (PIERSON & COSTA 1987 in PIERSON 2005, S.162).

In Abbildung 8 sind sowohl die obere als auch die untere Grenze von hyperkonzentriertem Fließen in einem Diagramm dargestellt. Der Scherwiderstand eines Feststoffwassergemisches wird als Funktion des Sedimentgehaltes wiedergegeben. Man sieht, dass der Scherwiderstand erst ab einer gewissen Sedimentkonzentration einsetzt, ab der man auch von hyperkonzentriertem Fließen sprechen kann.

Wie bereits erwähnt, ist es für das Zustandekommen von hyperkonzentriertem Fließen auch wesentlich, wie und wieviel Sand während des Abflusses in Schweben gerät. Bei hyperkonzentriertem Fließen ist der Sandanteil größer als der Feinstoffanteil. PIERSON (2005, S.193) spricht von einem Minimum an Sand von 3 bis 10 Volumenprozent. Pierson

beschreibt die Bildung einer Trägerflüssigkeit (carrier fluid) aus feinem Material, die größeres Material, vor allem Sand und Kies, durch Turbulenzen und erhöhte Viskosität in Schwebeflüssigkeit halten kann. Darüber hinaus definiert Pierson die fundamentale Eigenschaft von hyperkonzentriertem Fließen als „*transport of large quantities of coarse sediment (sand and possibly some gravel) at high concentrations in intermittent dynamic suspension*“ (PIERSON 2005, S.195).

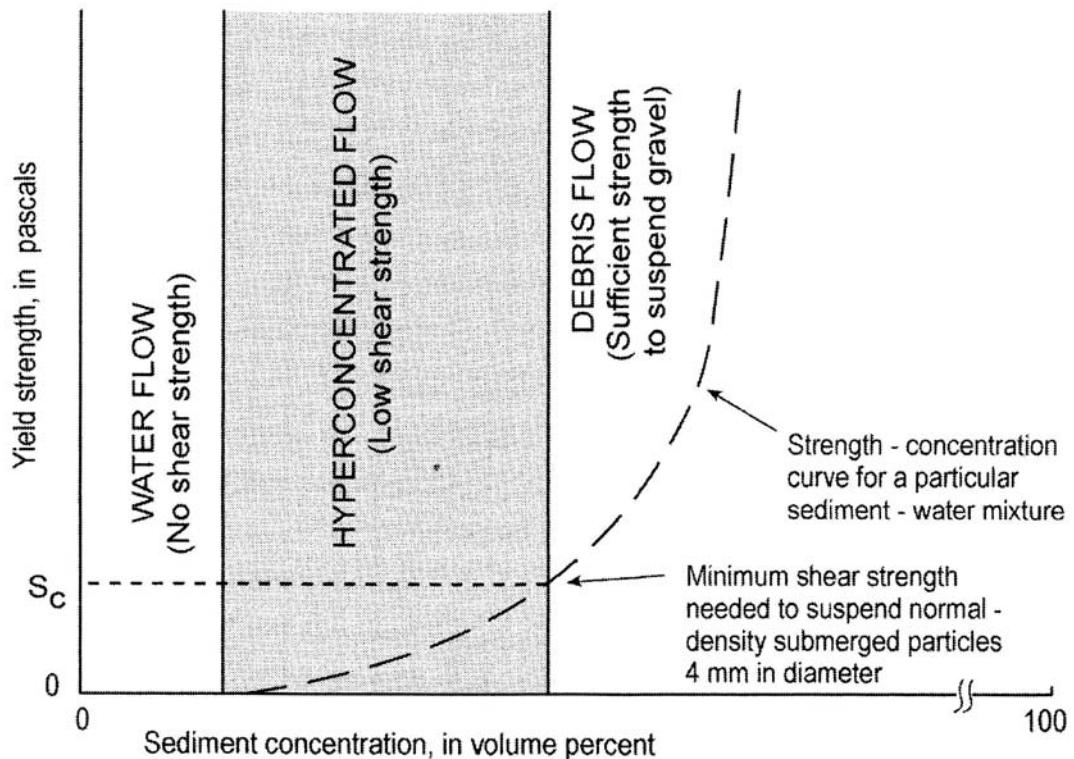


Abbildung 8: Grenze zwischen Abfluss, hyperkonzentriertem Fließen und Muren bezüglich des Scherwiderstandes in Abhängigkeit von der Sedimentkonzentration (aus PIERSON 2005, S.163).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass zur Feststellung, ob hyperkonzentriertes Fließen vorliegt, mehr als nur der Feststoffanteil notwendig ist. Vielmehr ist es wichtig, die Korngrößenverteilung als auch die Dichte, mit der die einzelnen Körner innerhalb des Wasser-Feststoff Gemisches vorhanden sind, dabei zu berücksichtigen.

Muren weisen, wie bereits erwähnt, einen deutlich höheren Feststoffanteil und eine größere Geschwindigkeit als hyperkonzentriertes Fließen auf. Im Gegensatz zu dem zweiphasigen Gemisch von Wasser und Feststoff bei hyperkonzentriertem Fließen, spricht PIERSON (2005, S.195) bei Muren von „*pseudo one phase flows*“. Er beschreibt damit eine Mure als ein eher homogenes Gemisch von Wasser und Sediment, welches auch die Eigenschaften einer Nichtnewtonschen Flüssigkeit aufweist. In Tabelle 3 sind einige physikalische Eigenschaften von normalem Abfluss, hyperkonzentriertem Fließen und Muren aufgelistet.

Die Werte bei den Feststoffanteilen weichen zum Teil von den Werten anderer Autoren ab. Diese Tatsache zeigt, dass es schwierig ist, einen so komplexen Prozess wie eine Mure anhand von Zahlen zu definieren, da es in der Natur immer wieder Abweichungen oder Ausnahmen geben wird, und man nicht anhand eines einzelnen Wertes festmachen kann, ob es sich um eine Mure handelt.

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Abfluss, hyperkonzentriertem Fließen und Muren (nach COSTA 1984 in SELBY 1993, S. 302, verändert).

	Feststoffanteil in Gewichtsprozent	Dichte in g/cm ³	Rheologie
normaler Abfluss	1-40	1.01-1.3	Newtonscche Flüssigkeit
hyperkonzentriertes Fließen	40-70	1.3-1.8	Übergang von Newtonscche in Nichtnewtonscche Flüssigkeit
Mure	70-90	1.8-2.6	Viskos-Plastisch (Nichtnewtonscche Flüssigkeit)

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, verhält sich eine Mure wie ein viskos-plastischer Körper. Ein Modell, das vielfach in der Literatur zur Beschreibung der Rheologie einer Mure verwendet wird, ist das viskos-plastische Bingham Fließmodell. Bei diesem Modell muss eine bestimmte Scherfestigkeit überschritten werden, damit die Bewegung einsetzt. Die Scherung ist abhängig von der gesamten Schubspannung, der kritischen Scherfestigkeit, die überschritten werden muss, damit sich die Mure in Bewegung setzt und der Bingham'schen

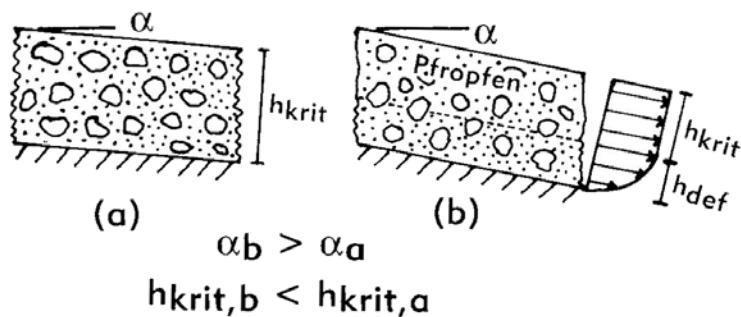


Abbildung 9: Bingham'sches Fließmodell (nach JOHNSON & RODINE 1984 aus KERSCHNER 1999, S. 81).

Zähigkeit. Bei dem in Abbildung 9 dargestellten Modell trägt eine sich deformierende Schicht eine Platte (auch Propfen genannt), die sich nicht verformt. Dabei ist h_{krit} die kritische Dicke,

das heißt die Dicke des starren Propfens, die notwendig ist, um auf die deformierende Schicht genügend Spannung auszuüben. h_{def} stellt die Dicke der sich deformierenden Schicht dar. Sobald h_{def} gleich Null (Fall a in Abbildung 9) ist oder h_{krit} unterschritten wird, kommt es zum Stillstand. Darüber hinaus ist h_{krit} abhängig vom Neigungswinkel α . Je flacher der Hang umso größer ist h_{krit} . Sobald der Neigungswinkel soweit abgesunken ist, dass h_{krit} unterschritten wird, kommt es zum Stillstand und zur Ablagerung der Mure. Durch weitere Materialzufuhr kann h_{krit} wieder überschritten werden und die Bewegung der Mure setzt sich fort. Mithilfe dieser Tatsache hat man laut KERSCHNER (1999) die Möglichkeit, Murschübe (Surges) zu erklären. (KERSCHNER 1999, S.81ff)

2.2.6 Auslöser von Muren

Nach VARNES (1978, in SCHUSTER & WIECZOREK 2002 S.59) gibt es für eine Massenbewegung verschiedene Gründe, Auslöser jedoch kann es immer nur einen geben. SCHUSTER & WIECZOREK (2002, S.59) sprechen von einem Auslöser als „*external stimulus*“, der in Form von intensiven Niederschlägen, rapider Schneeschmelze, seismischen Aktivitäten, Vulkanausbrüchen, Küsten- oder Flusserosion, Zusammenbruch eines natürlichen Damms und menschlichen Eingriffen vorkommen kann. Da im Zuge dieser Arbeit von vornherein angenommen wird, dass im Vinschgau Muren nur durch Niederschlag ausgelöst wird, beschränkt sich die Erläuterung der Auslöser von Muren im Folgenden auf diese Möglichkeit.

SCHUSTER & WIECZOREK (2002, S.59) zu folge werden die meisten gravitativen Massenbewegungen durch Niederschläge ausgelöst. GOUDIE (2002, S.327) spricht von Wasser als „*entscheidenden Faktor für Stabilität oder Instabilität eines Hangs*“.

ZEPP (2002, S.100) zu Folge müssen die treibenden Kräfte die haltenden Kräfte übertreffen, damit es zu einer gravitativen Massenbewegung kommen kann. Haltende Kräfte sind nach Zepp unter anderen die Kohäsion und die innere Reibung zwischen den einzelnen Bodenteilchen, während die Schwerkraft und positive Porenwasserdrücke treibende Kräfte darstellen. Zepp fasst die hangparallel abwärts wirkenden Kräfte unter dem Begriff der Scherspannung zusammen. Die Scherspannung ist umso größer, je steiler der Hang ist, je geringer die innere Reibung ist und je geringer die Kohäsion des vorhandenen Materials ist. Das infiltrierte Niederschlagswasser führt im Boden zu einem positiven Porenwasserdruck und damit zu einer Herabsetzung der Kohäsion. Das Coulomb'sche Gesetz (Formel 2) drückt diese Zusammenhänge aus. Es gibt die Grenzscherspannung an, die erreicht werden muss, damit eine gravitative Massenbewegung ausgelöst werden kann. (ZEPP 2002, S.100ff)

$$r_f = c + (\sigma - u) \tan \varphi$$

Formel 2: Coulomb'sche Gesetz nach ZEPP (2002, S.102).

r_f = Grenzscherspannung	φ = innerer Reibungswinkel	u = Porenwasserdruck in N/cm ²
c = Kohäsion in N/cm ²	σ = Normalspannung in N/cm ²	

In den Alpen sind kurze und intensive Niederschläge in Form von sommerlichen Gewittern typisch (KERSCHNER 1999, S.87). Diese Gewitter sind sehr oft lokal begrenzt. In Kombination mit dem vorhandenen Sediment, welches nur von einer dünnen oder keiner Vegetationsdecke bedeckt wird, können diese Niederschläge sehr leicht Muren auslösen.

WIECZOREK & GLADE (2005) differenzieren bei klimatischen Auslösern von Muren zwischen primären und sekundären klimatischen Faktoren.

Primäre klimatische Faktoren sind Niederschläge und Schneeschmelze. Bei den Niederschlägen sind nicht nur die gefallene Mengen, sondern auch die Dauer und die Intensität entscheidend. STARKE (1979 in WIECZOREK & GLADE 2005, S.326) entwickelte einen Schwellenwert, der auf Intensität und Dauer zurückging. CAINE (1980) sammelte weltweit Daten um das Konzept der Schwellenwerte aus Dauer und Intensität der Niederschläge zu verbessern. Er führte eine Vielzahl an Untersuchungen durch und erobt unterschiedliche Intensitäten und Dauer von Niederschlägen, die Muren ausgelöst haben. Die Werte waren je nach Region sehr unterschiedlich. Darüber hinaus bestimmte er für weltweit 73 Murereignisse die minimalen Intensitäts-Dauer Schwellenwerte.

Als *sekundäre klimatische Faktoren* sehen WIECZOREK & GLADE (2005) den vorangegangenen Niederschlag. Vorangegangener Niederschlag („antecedent precipitation“ oder „pre-storm rainfall“) bezeichnet jenen Niederschlag, der vor dem Tag der ausgelösten Mure bereits gefallen ist. Er repräsentiert demnach, das im Boden bereits befindliche Niederschlagswasser, das an den vorangegangenen Tagen gefallen ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Niederschlag als „vorangegangener Niederschlag“ bezeichnet. Der vorangegangene Niederschlag trägt je nach örtlichen Gegebenheiten, wie dem Klima, der Geologie, der Vegetation und der Geomorphologie, unterschiedlich stark zur Auslösung von Muren bei. Diese Eigenschaften beeinflussen die Menge des Wassers, welches zur Infiltration in den Boden gelangt und die Dauer, mit der es im Boden gespeichert bleibt. Dieses Bodenwasser kann den Porenwasserdruck erheblich steigern und somit zur Auslösung einer Mure führen. So hat WIECZOREK (1987 in WIECZOREK & GLADE 2005, S.332) für eine Region in Kalifornien gezeigt, dass kein Niederschlag eine Mure ausgelöst hat, wenn der vorangegangene saisonale Niederschlag nicht mindestens 280 Millimeter betragen hat. Unter vorangegangenem saisonalem Niederschlag versteht er jenen Regen,

der seit Ende der Trockenzeit in Kalifornien gefallen ist. Im Gegensatz dazu konnten DEGANUTTI et al. (2000 in WIECZOREK & GLADE 2005, S.333) bei 73 untersuchten Niederschlagsereignissen in den italienischen Alpen, wovon 15 eine Mure ausgelöst haben, keinen statistischen Zusammenhang mit dem vorangegangenem Niederschlag nachweisen. Sie erklären sich diese Tatsache dadurch, dass die starke Schneeschmelze und die natürlichen Quellen anstelle der vorangegangenen Niederschläge das notwendige Wasser im Boden bereitstellen. Darüber hinaus existieren viele Studien, die sich mit der unterschiedlichen Bedeutung von vorangegangenem Niederschlag beschäftigen, die alle zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen, da die Bedeutung von lokalen naturräumlichen Gegebenheiten abhängt. (WIECZOREK & GLADE 2005, S. 332ff)

Neben der unterschiedlichen Bedeutung von vorangegangenem Niederschlag spielt die Länge des Zeitraums, der dabei berücksichtigt wird, eine Rolle. In der Wissenschaft herrscht über die Länge des zu berücksichtigenden Zeitraumes Uneinigkeit. WIECZOREK & GLADE (2005, S.334) zu Folge werden innerhalb der unterschiedlichen Studien Zeiträume von 2 bis 45 Tagen verwendet. Auch hier hängt die Entscheidung von den unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten ab. So können zum Beispiel unterschiedliche Evapotranspirationsraten oder die vorhandenen Bodeneigenschaften die signifikante Länge des Zeitraums erheblich beeinflussen WIECZOREK & GLADE (2005, S.334).

2.3 Niederschlagsschwellenwerte

Schwellenwerte spielen in vielen Bereichen der Wissenschaft eine Rolle. Nach LESER (2005, S.823) sind Schwellenwerte „*an sich ökologische Werte, die beim Über- oder Unterschreiten zu Wirkungen an Organismen oder in Ökosystemen führen*“. WHITE et al. (1996 in GUZETTI et al. 2007, S.240) führen in ihrer Definition zusätzlich den Begriff der Minimal- und Maximalschwellenwerte an. Sie definieren Schwellenwerte als „*minimum or maximum level of some quantity needed for a process to take place or a state to change*“. Innerhalb der Forschung bezüglich gravitativer Massenbewegungen kamen die Schwellenwerte im Zuge der Frage auf, warum manche Niederschlagsereignisse Massenbewegungen auslösen und andere nicht (CROZIER 1986, S.171). Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen definieren die Niederschlagsmenge, Bodenfeuchte und andere hydrologische Bedingungen, die überschritten oder erreicht werden müssen, damit eine gravitative Massenbewegung ausgelöst werden kann (GUZETTI et al. 2007, S.240).

CROZIER (1986) zu Folge gibt es vier verschiedene Methoden, um Schwellenwerte zu erhalten: Die Theoretischen Methoden, bei denen mit vorher ermittelten

Wasseraufnahmeraten versucht wird zu bestimmen, wie viel Wasser in den Boden gelangt und somit die Stabilität herabsetzt. Bei den empirischen Tests kommt man zu den Schwellenwerten, indem man Experimente im Feld mit kontrollierten Massenbewegungen durchführt. Im Zuge der räumlichen beziehungsweise zeitlichen Korrelation werden Massenbewegungen räumlich beziehungsweise zeitlich mit klimatischen Ereignissen korreliert. (CROZIER 1986, S.171ff)

Nach WILSON (2000 in WIECZOREK & GLADE 2005, S.336) basieren erfolgreiche Niederschlagsschwellenwerte auf lokalen Bedingungen wie der Geologie, dem Klima und der Hanggeometrie.

CROZIER (1996) ist der Meinung, dass die Qualität der Niederschlagsschwellenwerte über die lokalen Bedingungen hinaus auch von der Vollständigkeit der Daten sowie der Größe und der Homogenität des Gebietes abhängen. Er definiert weiters den Maximalniederschlagsschwellenwert als Wert, über dem immer mit einer gravitativen Massenbewegung zu rechnen ist. Wird der Minimalschwellenwert unterschritten, kommt es zu keiner gravitativen Massenbewegung. Wird er überschritten kommt es unter gewissen Bedingungen zu einer gravitativen Massenbewegung. Darüber hinaus beschreibt Crozier mit „probability margin“ jenen Bereich, der zwischen den beiden Extremwerten liegt. Innerhalb dieses Bereiches, kommt es je nach Lage zu unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten beim Auftreten von gravitativen Massenbewegungen. (CROZIER 1986, S.174ff).

Es wird nun ein kurzer Überblick über die wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Niederschlagsschwellenwerte gegeben.

GUZETTI et al. (2007) und GUZETTI et al. (2008) stellen eine Übersicht über die unterschiedlichsten Niederschlagsschwellenwerte dar, die errechnet wurden. Außerdem wird auf die Arbeit von DE VITA & REICHENBACH (1998) verwiesen, die eine umfangreiche und sehr hilfreiche Literaturliste zum Thema der, durch Niederschlag ausgelösten, gravitativen Massenbewegungen liefert. WIECZOREK & GLADE (2005) verfassten ebenfalls eine Zusammenfassung der bisher verwendeten Schwellenwerte. Darüber hinaus liefert IRPI (2009) eine umfangreiche Sammlung verschiedenster Niederschlagsschwellenwerte.

GUZETTI et al. (2007) unterscheiden prinzipiell zwischen physikalisch basierten (prozessbasierten) und empirisch basierten Modellen zur Berechnung von Niederschlagsschwellenwerten.

2.3.1 Physikalisch-prozessbasierte Modelle

Diese Niederschlagsschwellenwerte basieren auf physikalisch-prozessbasierten Modellen, bei denen Hangstabilitätsmodelle um eine zusätzliche Komponente erweitert werden. Es

werden Infiltrationsmodelle hinzugefügt, um die Menge an vom Boden infiltriertem Wasser, welches den Porenwasserdruck erhöht, abschätzen zu können. WILSON (1989 in WIECZOREK & GLADE 2005, S.337) entwickelte das „leaky barrel“ Modell, bei dem mit einem oben offenem Fass mit einem Loch im Boden die Akkumulation von Niederschlag im Boden erklärt wird. Das Fass verliert durch das Loch mit einer bestimmten Rate Wasser und bekommt oben durch den Niederschlag mit einer anderen Rate Wasser zugeführt. WILSON & WIECZOREK (1995) verwendeten dieses Modell, um für eine Region in Kalifornien Niederschlagsschwellenwerte zu erstellen. CROSTA & FRATTINI (2003) koppelten drei verschiedene hydrologische Modelle mit einem Hangstabilitätsmodell in einer Region in den südlichen Alpen in Italien für flachgründige Rutschungen. BROOKS et al. (2004) verwendeten für zwei Regionen auf Neuseeland das kombinierte Hydrologie- und Stabilitätsmodell CHASM. TERLIEN (1998) verwendete das eindimensionale hydrologische Modell HYSWASOR um den fluktuiierenden Porenwasserdruck auf mit Asche bedeckten Hängen in Kolumbien zu simulieren.

GUZETTI et al. (2007, S.240ff) kritisieren die physikalisch-prozessbasierten Modelle bezüglich einiger Punkte: Einerseits benötige man für diese Modelle genaue räumliche Informationen zur Hydrologie, Morphologie, den Boden als auch der Lithologie, die für größere Regionen schwer zu bekommen seien. Andererseits seien sie eher nur für flachgründige Rutschungen und Muren geeignet und müssten sehr aufwendig durch reale Massenbewegungen erst kalibriert werden, um eingesetzt werden zu können.

Eine andere Möglichkeit, die Bodenfeuchte mit dem Vorkommen von Massenbewegungen zu korrelieren, ist ein Modell, das von CROZIER & EYLES (1980) entwickelt, von CROZIER (1999) getestet und von GLADE (2000) weiterentwickelt wurde. Mithilfe des Antecedent Soil Water Status Modells (ASWSM) kann der tägliche Wassergehalt im Boden festgestellt werden. Dabei wird die Wasserbilanz des Bodens, die durch Niederschlag, Abfluss, Evapotranspiration und durch die Eigenschaften des Bodens, wie etwa der Feldkapazität, beeinflusst wird, errechnet. Der tägliche Bodenwassergehalt errechnet sich aus den vorangegangenen Niederschlägen der letzten zehn Tage. Diese Niederschläge werden um den Betrag des Abflusses aus dem Hangsystem und der Evapotranspiration vermindert. Crozier und Eyles entwickelten darüber hinaus einen Verfallsfaktor für die vorangegangenen Niederschläge, der eine zentrale Bedeutung im ASWSM hat. Diesen Verfallsfaktor errechneten sie aus Abflussdaten von nahe gelegenen Flüssen, da diese Werte den Abfluss aus dem Boden repräsentieren. Somit hatten sie einen Faktor entwickelt, der den Beitrag der Niederschläge zum Wassergehalt des Bodens umso mehr vermindert, je länger sie zurückliegen. Letztendlich werden die Niederschlagsschwellenwerte durch die Gegenüberstellung von dem täglichen Niederschlag und den durch das ASWSM errechneten täglichen Werten des Bodenwassergehaltes errechnet. Obwohl das ASWSM von CROZIER

(1999) getestet wurde, fand es bis heute keine Anwendung in einem Frühwarnsystem (WIECZOREK & GLADE 2005, S.341).

2.3.2 Empirisch basierte Modelle

Die zweite große Gruppe, die GUZETTI et al. (2007) unterscheiden, sind die empirisch basierten Modelle zur Berechnung von Niederschlagsschwellenwerte. Sie basieren auf der Untersuchung von dezidierten Niederschlagsereignissen, die gravitative Massenbewegungen ausgelöst haben. Dabei gelten die niedrigsten Niederschlagsmengen, die eine gravitative Massenbewegung ausgelöst haben, als die Schwellenwerte. Stehen zusätzlich Daten von Niederschlägen, die keine gravitative Massenbewegungen ausgelöst haben, zur Verfügung, sind die Schwellenwerte genau die Grenzwerte zwischen den beiden Gruppen. (GUZETTI et al. 2007, S.241)

Nach GUZETTI et al. (2007, S.241) gibt es keine allgemein gültigen Eigenschaften von Niederschlagsereignissen, die gravitative Massenbewegungen auslösen. Der wichtigste Faktor sei jedoch die Niederschlagsintensität. Die Messung beziehungsweise der Vergleich von Niederschlagsintensitäten sei aber schwierig, da diese in unterschiedlichen Zeiträumen gemessen werden.

GUZETTI et al. (2007, S.241) als auch IRPI (2009) unterteilen die empirisch basierten Schwellenwerte in *globale, regionale und lokale Schwellenwerte*. Die regionalen und lokalen haben im Gegensatz zu den globalen Schwellenwerten einen eingeschränkten Geltungsbereich. Die regionalen Schwellenwerte gelten für ein Gebiet von einigen bis zu mehreren Tausend Quadratkilometern mit ähnlichen klimatischen und physiogeographischen Bedingungen, während lokale Schwellenwerte nur für ein Gebiet von einigen Hundert Quadratkilometern gültig sind (GUZETTI et al. 2007, S.241). Die besten Ergebnisse sind aufgrund der Homogenität der kleinen Untersuchungsgebiete durch lokale Schwellenwerte gegeben. Diese lassen sich jedoch nicht auf andere Gebiete übertragen.

GUZETTI et al. (2007) fassen unterschiedliche Typen von empirisch basierten Schwellenwerten zusammen: 1) Schwellenwerte, die auf verschiedenen Messgrößen von Niederschlag basieren (wie zum Beispiel Dauer und Intensität) 2) Schwellenwerte, die auch vorangegangene Niederschläge berücksichtigen und 3) andere Schwellenwerte.

Schwellenwerte, die auf verschiedenen Messgrößen basieren sind der häufigste Typ. Alleine Guzetti et al. (2007) listen 52 verschiedene Schwellenwerte, die errechnet wurden, auf. Eine der ersten und wichtigsten Arbeiten, was diese Schwellenwerte betrifft, ist die Arbeit von CAINE (1980). Er errechnete einen Schwellenwert aus Niederschlagsdauer in Stunden (D)

und Intensität in mm/h (I) für flachgründige Rutschungen. Formel 3 beschreibt den Schwellenwert in Form von einer Kurve.

$$I = 14.82D^{-0.39}$$

Formel 3: Schwellenwert für flachgründige Rutschungen nach CAINE (1980).

Alle Kombinationen aus Dauer und Intensität, die darüber liegen, lösen demnach eine gravitative Massenbewegung aus. Der Schwellenwert ist CAINE (1980) zu Folge aber nur für eine Niederschlagsdauer zwischen zehn Minuten und zehn Tagen gültig. Aus dieser Formel entwickelte sich eine generelle Form dieser Schwellenwerte, die GUZETTI et al. (2007) wie folgt beschreiben:

$$I = c + \alpha \times D^\beta$$

Formel 4: allgemeine Form der Intensitäts-Dauer Schwellenwerte nach GUZETTI et al. (2007, S.243).

wobei die Intensität in mm/h (I) und die Dauer in Stunden (D) in Beziehung zu einander stehen und durch die Parameter c , α und β , die größer Null sind, modifiziert werden. Weltweit gibt es eine Vielzahl an Arbeiten, bei denen Intensitäts-Dauer Schwellenwerte für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen berechnet wurden. LARSEN & SIMON (1993) haben zum Beispiel Intensitäts-Dauer Schwellenwerte für Puerto Rico errechnet. Ein Vergleich von Niederschlagsschwellenwerten unterschiedlicher Regionen kann nach GUZETTI et al. (2007, S.247) hergestellt werden, in dem die Intensität durch den Jahresniederschlag dividiert wird.

Zu der ersten Gruppe der empirisch basierten Niederschlagsschwellenwerte zählen GUZETTI et al. (2007) nicht nur die Intensitäts-Dauer Schwellenwerte, sondern auch jene die andere Messgrößen des Niederschlags berücksichtigen. Dies sind Messgrößen betreffend der Menge des Niederschlags wie zum Beispiel der tägliche Niederschlag, kumulativer oder normierter kumulativer Niederschlag, kritischer Niederschlag und der durchschnittliche Jahresniederschlag. GUDICINI & IWASA (1977 in GUZETTI et al. 2007) fanden für ein Gebiet in Brasilien heraus, dass wenn mehr als 12 Prozent des durchschnittlichen Jahresniederschlags bei einem Ereignis fallen, es unerheblich ist für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen, ob es zuvor geregnet hat oder nicht, während es sehr wohl von Bedeutung ist, wenn nur 8 bis 12 Prozent des durchschnittlichen Jahresniederschlags gefallen sind.

Zu der Gruppe der Niederschlagsschwellenwerte, die auf vorangegangenem Niederschlag beruhen, gehört auch das Antecedent Daily Rainfall Model (siehe Kapitel 5), das bei dieser

Arbeit verwendet wurde. Man verwendet bei solchen Schwellenwerten den Niederschlagswert am Tag des Ereignisses und stellt ihn dem vorangegangenen Niederschlag innerhalb eines bestimmten Zeitraumes gegenüber. Es gibt aber auch Schwellenwerte, wie zum Beispiel jene von GOVI et al. (1985 in GUZETTI et al. 2007, S.250), die nur auf vorangegangenen Niederschlägen basieren. Bei dieser Arbeit wurde für eine Region in Norditalien festgestellt, dass es innerhalb von 60 Tagen vor einer gravitativen Massenbewegung mindestens 140 Millimeter regnen muss und dass der Gesamtniederschlag, also vorangegangener Niederschlag plus Niederschlag am Tag des Ereignisses, mindestens 300 Millimeter betragen muss.

PASUTO & SILVANO (1998) beschäftigten sich mit kumulativem Niederschlag und Niederschlagsspitzen in einem Gebiet in den Dolomiten in Italien. Sie kamen zu dem Schluss, dass wenn der vorangegangene Niederschlag innerhalb von 15 Tagen mehr als 200 Millimetern betrug, das Auftreten von flachgründigen Rutschungen nur mehr abhängig vom Auftreten von Niederschlagsspitzen im Zeitraum von 1 bis 2 Tagen, die größer als 70 Millimeter sind, ist. GLADE et al. (2000) erstellten das „Antecedent Daily Rainfall Model“, das auf ein Modell von CROZIER & EYLES (1980) basiert und wandten es in drei verschiedenen Regionen in Neuseeland an. Dieses Modell wird in Kapitel 5 genauer erläutert. Eine andere Möglichkeit zeigt ALEOTTI (2004) auf. Er hat vorangegangenen und kritischen Niederschlag normiert und mit diesen normierten Werten Schwellenwerte für eine Region in Norditalien errechnet.

Was die zu berücksichtigende Länge des vorangegangenen Niederschlags betrifft gibt es große Unterschiede. Für die Qualität der Niederschlagsschwellenwerte ist der Zeitraum, über den der vorangegangene Niederschlag in die Berechnungen mit einbezogen wird, aber essentiell. Die einzelnen Autoren haben unterschiedlich lange Zeiträume verwendet. GLADE et al. (2000) bezogen die Niederschläge der letzten 10 Tage in ihre Berechnungen mit ein, PASUTO & SILVANO (1998) testeten Zeitspannen von 1 bis 120 Tagen und berücksichtigten letztendlich 15 Tage lang den vorangegangenen Niederschlag. ALEOTTI (2004) verwendete Zeiträume von 7, 10 und 15 Tagen und TERLIEN (1998) verwendete 2, 5, 15 und 25 Tage lange Perioden. GUZETTI et al. (2007) führen die Variabilität der Länge des Zeitraumes, in dem der vorangegangene Niederschlag berücksichtigt wird, auf mehrere Faktoren zurück. Erstens sind sie der Meinung, dass sich unterschiedliche lithologische und morphologische Bedingungen, die Vegetation und der Zustand des Bodens im Untersuchungsgebiet auf die am besten geeignete Länge auswirken. Zweitens spielen GUZETTI et al. (2007) zu Folge das Klimaregime und andere meteorologische Bedingungen eine erhebliche Rolle und drittens ist die Heterogenität der Niederschlagsdaten und der Daten bezüglich der gravitativen Massenbewegungen von großer Bedeutung. (GUZETTI et al. 2007, S.252)

3 Untersuchungsgebiet

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten physiogeographischen Eigenschaften des Vinschgau dargestellt.

3.1 Geographische Lage

Der Vinschgau ist ein alpines Talsystem in Südtirol mit einigen Seitentälern. Südtirol ist der nördlichste Teil des südeuropäischen Landes Italien. Der Vinschgau liegt im Westen von Südtirol und grenzt im Norden an Österreich und im Westen an die Schweiz (Abbildung 10).

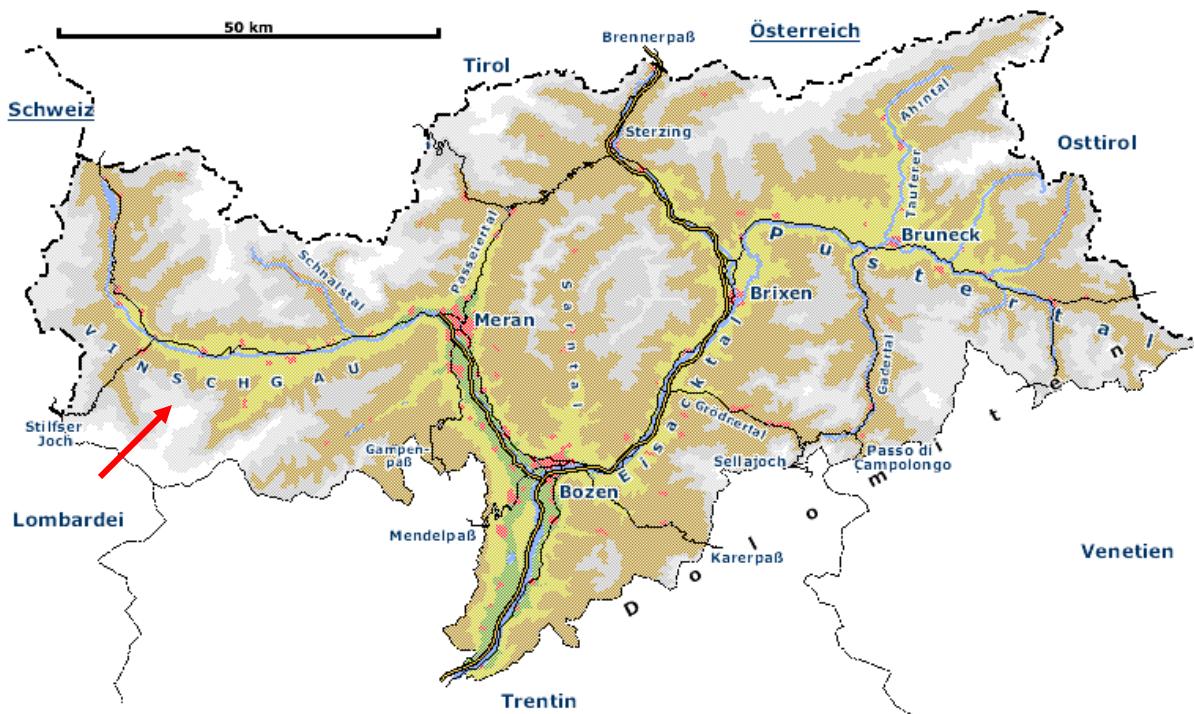


Abbildung 10: Übersichtskarte Südtirol, nach www.info-suedtirol.com, verändert.

BOSELLINI (1998) zu Folge gehört der Vinschgau zu den Alpen jedoch nicht zu den Dolomiten. Nach ORTNER & MAYR (1993, S.13) reicht der Vinschgau von der Innenschlucht bei Finstermünz bis nach Töll bei Meran. Das Tal verläuft im wesentlichen von West nach Ost, lediglich im oberen Teil des Tales verläuft es kurz in Nord-Süd Richtung. Der Vinschgau ist das Tal der jungen Etsch, die nach 415 Kilometern Länge in die Adria fließt. Der Name Vinschgau ist auf die Venosten, einer in vorrömischer Zeit hier sesshaften Bevölkerung, zurückzuführen (MENARA 2002, S.20). Im Norden wird es durch die südlichen

Ausläufer der Ötztaler Alpen begrenzt, während es im Süden durch die Ortler Alpen umgeben ist. Die das Tal umgebenden Gebirge übersteigen oftmals 3000 Meter Seehöhe. Der Ortler ist mit seinen 3905 Metern Seehöhe nicht nur die höchste Erhebung im Vinschgau, sondern auch der höchste Berg Südtirols. Die Ortler und die Ötztaler Alpen weisen vergletscherte Teile auf. Darüber hinaus liegt am Ortler mit dem Suldenferner der größte Gletscher Südtirols.

Man unterscheidet im Vinschgau zwischen dem „Sonnenberg“ und dem „Norderberg“. Der Sonnenberg stellt die steilen großteils unbewaldeten Südflanken der Ötztaler Alpen dar, an denen vorwiegend aufgrund der Trockenheit Steppenvegetation zu finden ist (ORTNER & MAYR 1993, S.13). Die ist eine Besonderheit im zentralalpinen Raum. Außerdem findet man an diesen Hängen einige Bachgräben und viele Erosionsrinnen als typisches Kennzeichen einer Steppenlandschaft (MENARA 2002, S.20). Im Gegensatz dazu versteht man im Vinschgau unter Norderberg die nordwärts gerichteten Hänge der Ortlergruppe, die durchwegs mit Wald bedeckt sind (ORTNER & MAYR 1993, S.13).

Aufgrund der einzelnen Höhenstufen des Talbodens, die durch große Murkegel ausgebildet werden, unterteilt man den Vinschgau in drei Bereiche. Den oberen, den mittleren und den unteren Vinschgau. MENARA (2002, S.24) zu Folge reicht der obere Vinschgau vom Ursprung der Etsch bei Reschen bis zum Fuß des großen Murkegels der Malser Haide bei Mals. Der Talboden befindet sich hier auf einer Seehöhe zwischen fast 1500 Metern und etwa 850 Metern. Im oberen Vinschgau befindet sich der seit 1950 aufgestaute Reschensee. Den mittleren Vinschgau bezeichnet MENARA (2002, S.28) als jenen Teil, der von der Malser Haide bis zum großen Murkegel der Gadria Mure zwischen Laas und Schlanders reicht. Hier liegt der fast völlig ebene und sehr breite Talboden auf Seehöhen zwischen ungefähr 700 bis 1000 Metern. Nach MENARA (2002, S.36) handelt es sich bei dem unteren Vinschgau um das Gebiet zwischen Schlanders und Töll, das einige Kilometer westlich von Meran liegt. Der Talboden erreicht hier nur mehr etwas mehr als 600 Meter Seehöhe und ist somit deutlich tiefer als im mittleren Vinschgau.

Die größten Seitentäler des Vinschgaus sind das Münstertal, welches bis in die Schweiz reicht, das Suldener Tal, das Martelltal und das Schnalstal.

3.2 Klima

Die isolierte Binnenlage des Vinschgaus beeinflusst das Klima maßgeblich. Die das Tal umgebenden Berge blockieren die Feuchtigkeitszufuhr vom Atlantik und den Mittelmeer, sodass lediglich die Hochlagen viel Feuchtigkeit erhalten, während es in den Tälern zu geringen Niederschlagsmengen kommt (KLEBELSBERG 1948, S.13). ORTNER & MAYR (1993, S.13) sprechen von einem inneralpinen Trockental und der trockensten Wärmeinsel der Ostalpen mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 550 Millimetern. Auch KLEBELSBERG (1948, S.14) beschreibt für den Vinschgau einen durchschnittlichen Jahresniederschlag, der unter 600 Millimetern liegt. So lag der Jahresniederschlag beispielsweise in Schlanders im Vinschgau 2004 bei 550.6 mm, 2005 bei 450.4 mm und

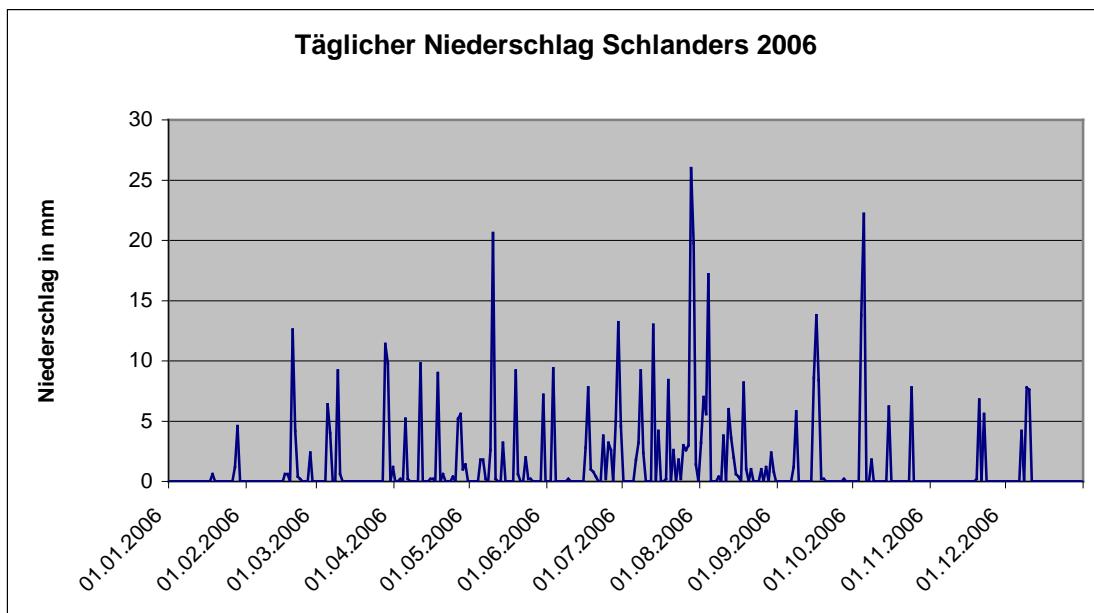


Abbildung 11: täglicher Niederschlag in Schlanders 2006.

2006 bei 504.4 mm. Betrachtet man die täglichen Niederschlagsmengen eines Jahres (Abbildung 11), so erkennt man, dass die höchsten Spitzen zwischen Mai und Oktober auftreten. Darüber hinaus kam es im Jahr 2006 in Schlanders nur sechs Mal zu einem täglichen Niederschlag, der mehr als 15 Millimeter betrug. In Abbildung 12 sind die monatlichen Niederschläge der Wetterstation Schlanders für die Jahre 1998, 2005 und 2006 dargestellt. Zu den höchsten Niederschlagsmengen kam es 1998 und 2005 im Oktober, während 2006 im Juli der meiste Niederschlag gefallen ist. Darüber hinaus sind 1998 94%, 2005 86% und 2006 80% des Jahresniederschlags im Zeitraum von April bis Oktober gefallen.

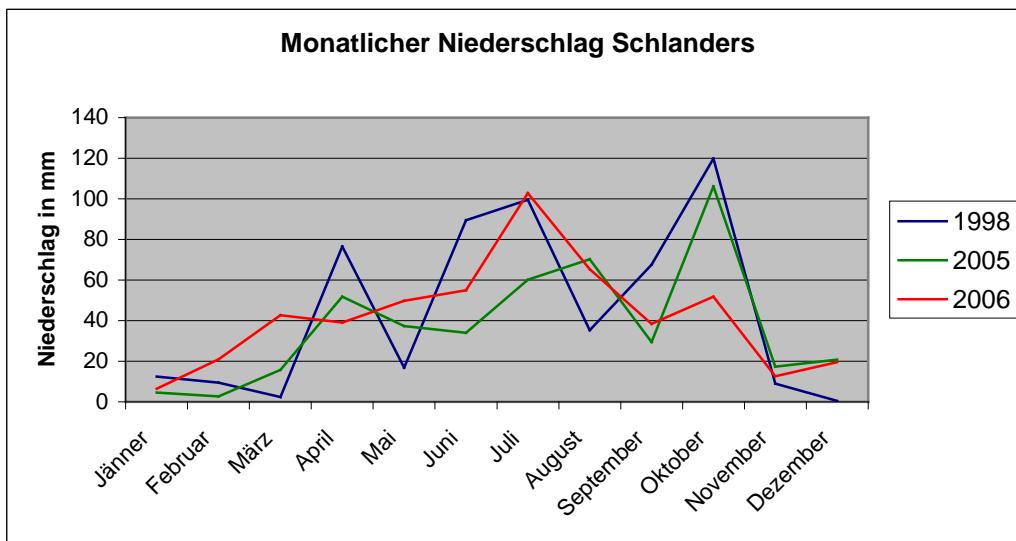


Abbildung 12: monatlicher Niederschlag in Schlanders 1998, 2005 und 2006.

KLEBELSBERG (1948, S.14) weist darauf hin, dass in den Taltiefen des Vinschgau nicht immer mit einer geschlossenen Schneedecke zu rechnen ist. Durch die gering vorhandene Feuchtigkeit kommt es auch weniger zu Nebel und Bewölkung als in anderen Alpentälern. Bozen weist zum Beispiel nur neun Nebeltage im Jahr auf (KLEBELSBERG 1948, S.14). Die häufig vorherrschenden Nordwestwinde begünstigen die Nebel- und Wolkenbildung ebenfalls nicht (ORTNER & MAYR 1993, S.13). MENARA (2002, S.21) spricht von ausdörrenden Winden. Die hohe Sonneneinstrahlung und die geringen Niederschläge führen zu der bereits angesprochenen Steppenvegetation an den südexponierten Hängen im Vinschgau, die eine Besonderheit innerhalb des Alpenraumes darstellt (MENARA 2002, ORTNER & MAYR 1993).

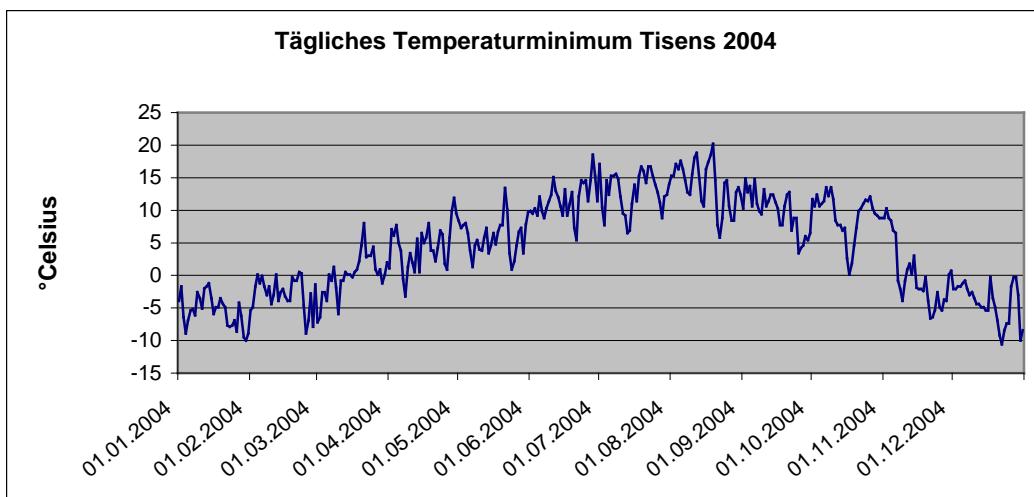


Abbildung 13: tägliches Temperaturminimum in Tisens 2004.

Die Temperatur im Vinschgau ist deutlich höher als in anderen Alpentälern. So sinkt das Wintermittel nicht unter 0° Celsius. Kortsch im Vinschgau weist ein Wintermittel von 0.1° Celsius, ein Frühjahrsmittel von 9.0° Celsius und ein Herbstmittel von ebenfalls 9.0° Celsius auf. (KLEBELSBERG 1948, S.14)

Temperaturdaten standen im Rahmen dieser Arbeit nur von der Ortschaft Tisens, die zehn Kilometer südlich von Meran liegt, zur Verfügung. Das tägliche Temperaturminimum (Abbildung 13) lag 2004 in Tisens nur an einem Tag unter -10° Celsius. Frost gab es generell von Anfang November bis Mitte April. Im Sommer sinkt die Temperatur niemals unter 5° Celsius und nur selten unter 10° Celsius.

3.3 Geologie

Während des Erdmittelalters vor 225 Millionen Jahren waren weite Teile der Erdoberfläche von Meeren bedeckt. Eines dieser Meere war die Tethys, die vom atlantischen bis zum pazifischen Ozean reichte. Einen Teil der Tethys stellte das Alpine Geosynkinalmeer dar, welches durch unterseeische Schwellen in einzelne Tröge unterteilt war. Die während des Erdmittelalters in diesen Trögen abgelagerten Sedimentmassen wurden während der alpidischen Gebirgsbildung auf- und zusammengeschoben. Die dabei entstandenen Deckensysteme entsprechen den ehemaligen Trögen im Alpinen Geosynkinalmeer. (STAINDL 1982, S.23)



Abbildung 14: Geologische Übersichtskarte Südtirol aus STAINDL (1982, Buchdeckel), verändert; die rote Linie zeigt den Verlauf der Etsch durch den Vinschgau.

Das für den Vinschgau bedeutende Deckensystem ist das Ostalpin, wobei man jenes weiter unterteilen kann. Das Mittelostalpine Altikristallin und das Mittelostalpine Mesozoikum sind die im Vinschgau vorkommenden Deckensysteme. Auf der geologischen Übersichtskarte

von Südtirol (Abbildung 14) sind die einzelnen geologischen Zonen abgebildet. Bezuglich der schlechten Qualität der Karte ist zu sagen, dass im Rahmen dieser Arbeit keine andere geologische Karte zur Verfügung stand, die eine so genaue geologische Untergliederung des Vinschgaus wie die Karte von STAINDL (1982) aufweist.

Der Vinschgau liegt zum größten Teil in der Vinschgauer Schieferzone, hat aber auch Anteile an der Zone der alten Gneise, am Quarzphyllit, an den Gneisen und Glimmerschiefern der Stubaier und Ötztaler Alpen und in geringem Ausmaß auch Anteil an den Engadiner Dolomiten. Alle geologischen Zonen mit Ausnahme der Zone der Engadiner Dolomiten, die zum mittelostalpinen Mesozoikum zählt, gehören zum mittelostalpinen Altkristallin.

Im Folgenden sollen die einzelnen geologischen Zonen kurz erläutert werden, die von STAINDL (1982) ausführlich beschrieben worden sind.

Die *Vinschgauer Schieferzone* hat im Norden Anteile an den Ötztaler Alpen, im Süden an den Ortler Alpen und Anteile im Westen und Südwesten an den Münstertaler Alpen. Die wichtigsten Gesteine dieser geologischen Zone sind Phyllitgneise mit Granitgneis Einlagerungen, Granatphyllite, plagioklasführende Biotitglimmerschiefer und die Laaser Gesteine (STAINDL 1982, S.37). Die Phyllitgneise stellen die unterste Lage, vor allem am Nordrand der Vinschgauer Schieferzone, dar. STAINDL (1982, S.37) erwähnt die teilweise sehr mächtigen Granitgneislager, wie zum Beispiel die Münstertaler Granitmasse zwischen dem Schlinigertal und dem Münstertal. Die Granatphyllite befinden sich STAINDL (1982, S.39) zu Folge nordöstlich des Haupttales besonders zwischen Mals und Matsch, südöstlich des Matscher Tales und von dort ziehen sie sich an der Nordseite der Litzner- und Mastnaungruppe entlang bis Schnals. STAINDL (1982, S.39) beschreibt die Granatphyllite, die über den zuvor beschriebenen Phyllitgneisen liegen als grünlichgraue von Rutschflächen durchzogene Phyllite mit lagenweiser Granatanreicherung. Die plagioklasführenden Biotitglimmerschiefer folgen auf die Granatphyllite oder auf die Phyllitgneise, wo Granatphyllite fehlen und weisen oft keine scharfe Abgrenzung auf (STAINDL 1982, S.39). Das Laaser Gestein ist in der Vinschgauer Schieferzone von großer Bedeutung und findet nach STAINDL (1982, S.39) seine Verbreitung nördlich des Haupttales nur an den Südflanken der Litzner- und Mastnaungruppe, während es südlich des Haupttales eine sehr große Verbreitung aufweist. Es zieht sich dort von der Nordabdachung der Laaser Gruppe bis hin zum Talausgang bei Meran, wo es immer schmäler wird (STAINDL 1982, S.39). Laut STAINDL (1982, S.39ff) handelt es sich bei dem Laaser Gestein um Glimmerschiefer (Laaser Schiefer) und Marmorlager in Form von Laaser Marmor. Er beschreibt den Laaser Schiefer als teils Muskowit, teils Biotit, teils Zweiglimmerschiefer. Der Laaser Marmor ist STAINDL (1982) zu Folge ein weißer, mäßig feinkörniger Kalkmarmor mit Mächtigkeiten von teilweise über 100 Metern.

Im Süden des Vinschgaus liegt die *Marteller Quarzphyllit Zone* ohne scharfe Grenzen zur Vinschgauer Schieferzone. Diese Zone hat einen großen Anteil an den Ortler Alpen. Das vorherrschende Hauptgestein ist der Quarzphyllit, wobei auch häufig Amphibolite, vor allem in der südlichen Laaser Gruppe vorkommen. (STAINDL 1982, S.40ff)

Die Zone der *Gneise und Glimmerschiefer der Stubaier und Ötztaler Alpen* reicht in den nördlichen Teil des Vinschgaus im Bereich der Ötztaler Alpen herein. Das Hauptgestein der Ötztaler Alpen sind Biotitplagioklasgneise, daneben kommen aber auch Glimmerschiefer im inneren Matschertal (vorwiegend Muskowitschiefer) vor (STAINDL 1982, S.34ff). Außerdem findet man STAINDL (1982, S.36) zu Folge sehr häufig Einlagerungen granitisch-dioritischer und amphibolitischer Orthogneise, wie zum Beispiel Muskowitzgranitgneise im Rojental oder Augen- und Flasergneise im inneren Schnalstal.

Die *Zone der alten Gneise* hat lediglich einen kleinen Anteil am Vinschgau im Westen von Meran. Sie besteht hauptsächlich aus Biotitplagioklasgneisen, die den Gneisen der Ötztaler Alpen sehr ähnlich sind. Bei Meran findet man darüber hinaus Phyllitgneise als dunkle, fast schwarze mylonitische Schiefer. Die radioaktiven Quellen am Vigiljoch stellen eine geologische Besonderheit in der Zone der alten Gneise dar. (STAINDL 1982, S.42)

Die Ortler Trias als Teil der Engadiner Dolomiten zählt als einzige geologische Zone nicht zum mittelostalpinen Altkristallin, sondern zum mittelostalpinen Mesozoikum. Sie hat nur einen kleinen Anteil am Vinschgau innerhalb der Ortlergruppe. Es handelt sich hierbei um Trias Kalke, die westlich über Gomagoi und in der nördlichen Ortlergruppe zu finden sind und deren Hauptmasse hell anwitternde dolomitische Kalke sind (STAINDL 1982, S.46ff).

3.4 Geomorphologie

Für das Vorhandensein von Muren ist Niederschlag notwendig. Deshalb könnte man zu dem Schluss kommen, dass im Vinschgau, einem der trockensten Täler der Alpen, die Voraussetzungen für Muren nicht gegeben sind. Doch gerade wegen dieser Trockenheit gibt es viele Muren, da es durch sommerliche Platzregen besonders an den steilen, trockenen und vegetationsarmen Südhängen des Tals zu besonders vielen Muren kommt (ORTNER & MAYR 1993, S.13). Deshalb stellen die großen Murkegel, die das Tal in unterschiedliche Höhenstufen unterteilen (siehe auch Kapitel 3.1), eine geomorphologische Besonderheit dar. FISCHER (1975) hat diese Murkegel detailliert beschrieben.

Der größte Murkel des Vinschgaus aber auch der gesamten Alpen ist die Malser Haide mit einer Fläche von 13 km^2 und einem Volumen von 1550 Millionen m^3 . Tiefbohrungen wurden bis zu einer Tiefe von 181 Metern durchgeführt. Die Ablagerungen der Gadria Mure haben eine Fläche von 10 km^2 und ein Volumen von 1350 Millionen m^3 . Außerdem existieren noch

zwei größere Murkegel bei Rabland und Tarsch. Das Material der Muren stammt von eiszeitlichen Moränen, deren Bildungsalter zwischen den Rückzugsstadien der letzten Eiszeit und der frühgeschichtlichen Zeit liegt. (STAINDL 1982,S.117ff)

Das trockene Klima hat mit den Waalen zu einer weiteren anthropogen geschaffenen Landschaftsform geführt. Es handelt sich dabei um künstlich geschaffene Bewässerungskanäle, die aus Stein gemauert, mit Holz gerahmt oder in den Fels gehauen sind und waagrecht die Hänge durchlaufen. Viele von ihnen wurden durch moderne Bewässerungssysteme ersetzt und sind nicht mehr in Verwendung. Zurück bleiben einzelne Streifen am Hang, wo sich die Vegetation besonders gut ausbreiten kann. (MENARA 2002, S.21).

4 Daten

In diesem Kapitel sollen die Daten, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden näher erläutert werden. Diese Daten sind zur Übersicht in Tabelle 4 aufgelistet. Die Daten sind darüber hinaus der CD-ROM im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Daten.

	Format	zeitliche und räumliche Auflösung	Herkunft
Niederschlagsdaten	Excel	17 Wetterstationen mit unterschiedlich langen Zeitreihen von 1920-2007; täglicher Niederschlagswert von 9-9 Uhr	Hydrographisches Amt Bozen
Ereignisdaten	Excel Arc Gis	351 beobachtete Mur-ereignisse seit 867; verortet mit geographischen Koordinaten	Amt für raumbezogene und statistische Informatik Bozen
Abflussdaten	Excel	tägliche Abflusswerte zweier Pegel von 1977 bis 2008	Hydrographisches Amt Bozen

4.1 Niederschlagsdaten

Die Niederschlagsdaten, die bei dieser Arbeit verwendet wurden, stammen vom hydrographischen Amt der autonomen Provinz Bozen. Es handelt sich dabei um Werte, die mit einem Niederschlagsmesser mit Wippe ermittelt wurden. Im Laufe der 1980er Jahre wurden die Wetterstationen automatisiert. Die täglichen Werte wurden von 09:00 bis 09:00 Uhr gemessen. Die Einheit der Niederschlagsdaten ist Millimeter. Im Vinschgau liegen 17 Wetterstationen vor, deren Daten für diese Arbeit zur Verfügung standen. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 15 zu erkennen.

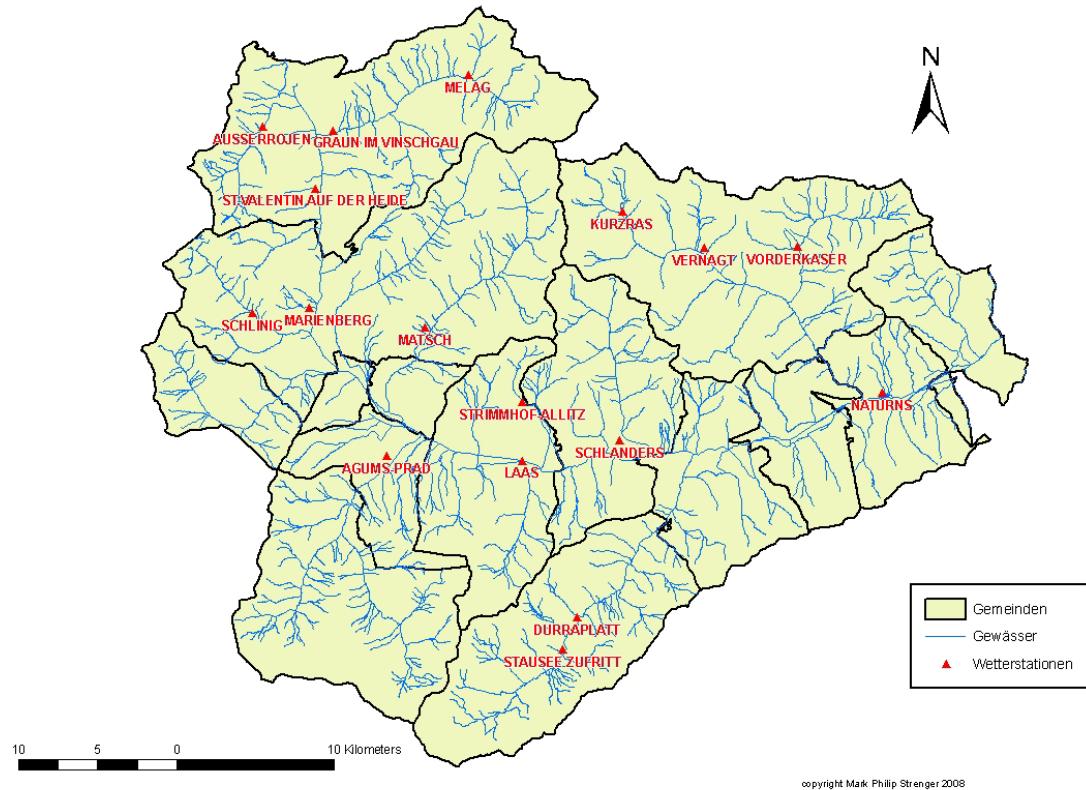


Abbildung 15: Lage der verfügbaren Wetterstationen.

Die Niederschlagsdaten sind in unterschiedlich langen Zeitreihen vorhanden. Die Übersicht über die einzelnen Zeitreihen der Niederschlagsdaten ist in Tabelle 4 dargestellt. Die längste Zeitreihe weisen die Stationen in Agums Prad und Naturns auf, bei denen die Aufzeichnungen seit dem 01.01.1920 vorhanden sind. Die kürzeste Zeitreihe weist die Station in Strimmhof-Allitz auf, bei der erst seit 01.01.1993 der Niederschlag aufgezeichnet wurde.

Tabelle 5: Zeitreihen der Niederschlagsaufzeichnung der Wetterstationen im Vinschgau.

	St. Valentin	Zufritt	Strimrhof	Vernagt	Vorderkaser	
Beginn der Datenreihe	01.07.1920	01.01.1972	01.01.1993	01.01.1953	01.01.1927	
Ende der Datenreihe	31.12.2007	31.12.2007	31.12.2007	31.12.2007	31.12.2007	

4.2 Abflussdaten

Die Abflussdaten stammen ebenfalls vom hydrographischen Amt der autonomen Provinz Bozen. Im Rahmen dieser Arbeit standen die Daten von zwei Pegelstationen an der Etsch im Vinschgau zur Verfügung. Bei diesen Daten handelt es sich um tägliche Durchschnittswerte, deren Einheit m^3/s ist.

Die *Pegelstation Spondinig* liegt am Flusskilometer 36.6, hat ein Einzugsgebiet von 671km^2 und weist eine mittlere Einzugsgebietshöhe von 2167 Meter auf. Zudem sind 2.6 Prozent des Einzugsgebietes vergletschert. Die Ganglinie des Pegels wird durch die Produktionsrhythmen der Kraftwerksgruppe Glurns mit dem Reschenstaumamm in St.Valentin stark beeinflusst. An Werktagen sind die Tagesabflüsse das 2-3 fache des nächtlichen Grundabflusses (Hydroreport 2004). Von der Messstelle in Spondinig lagen die Daten vom 16.05.1985 bis zum 30.04.2008 vor.

Die *Pegelstation Töll* liegt weiter flussabwärts bei Flusskilometer 66.2 vor dem Zusammenfluss der Falschauer und der Passer. Der Pegel hat ein Einzugsgebiet von 1675.6km^2 , das zu 3.86 Prozent vergletschert ist. Die mittlere Einzugsgebietshöhe beträgt 2111 Meter. Die Station liegt oberhalb der Ableitungen der Etschwerke, weist aber trotzdem starke tägliche und saisonale Schwankungen auf, die durch die Kraftwerke Glurns, Laas, Kastebell, Naturns und deren Speicherbecken in St.Valentin, Zufritt und Vernagt verursacht werden (Hydroreport 2005). Von der Pegelstation in Töll standen die Abflusswerte vom 01.01.1977 bis zum 30.04.2008 zur Verfügung.

4.3 Ereignisdaten

Die Ereignisdaten stammen vom Amt für raumbezogene und statistische Informatik der autonomen Provinz Bozen. Der Datensatz umfasst 351 dokumentierte Murereignisse im Vinschgau, die alle mittels Koordinaten verortet und deren Lage in Abbildung 16 dargestellt

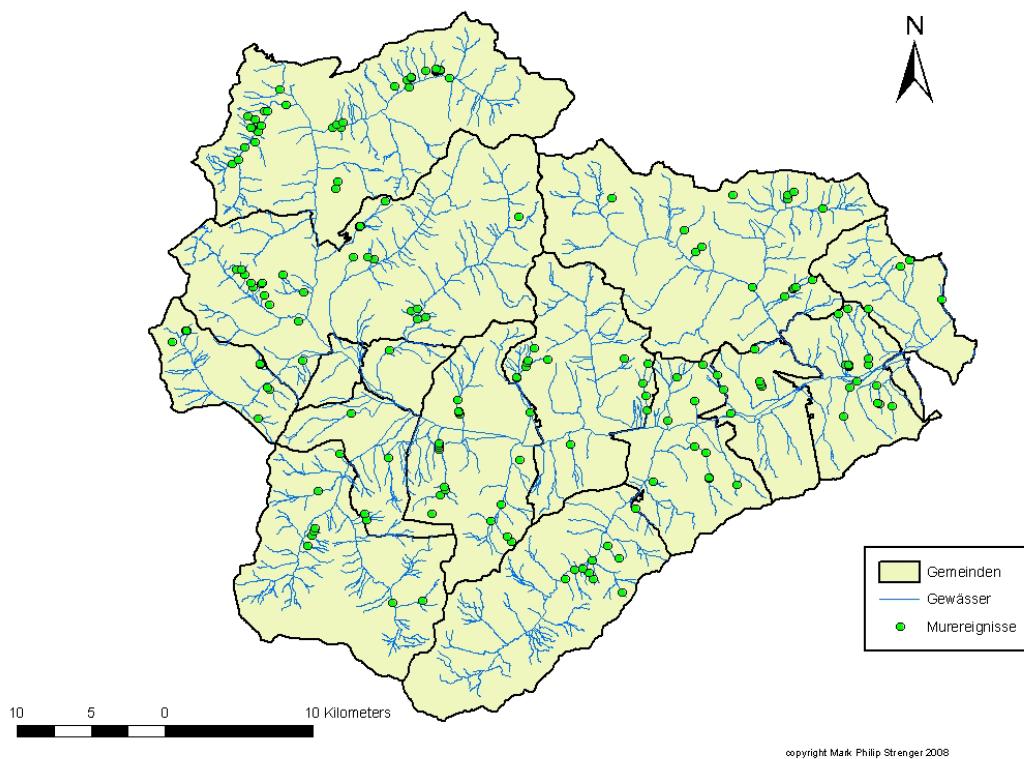


Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Murereignisse im Vinschgau.

ist. Zu der Abbildung ist hinzuzufügen, dass nicht alle 351 Ereignisse zu erkennen sind, weil einige sehr nahe beieinander liegen oder am selben Ort. Dadurch kann man bei der Größe der Karte nicht alle Ereignisse einzeln erkennen.

Die Daten werden seit 1998 mittels standardisierten Formulars erhoben, welches ständig weiter entwickelt wird. Es wird versucht mit diesem Formular eine Vielzahl von Informationen zu erheben. Unter anderem die Basisinformationen wie Datum und Ort aber auch Informationen betreffend der Schäden, der geomorphologischen Eigenschaften der Mure und der Interviews, die geführt wurden. Zusätzlich wird auch noch eine Kartierung mit Standardlegende und Photodokumentation erstellt.

Für die Ereignisse vor 1998 wurden historische Quellen und andere Dokumente analysiert und Daten daraus gewonnen. Dadurch ist die Qualität der Daten von den Ereignissen vor 1998 dementsprechend schlechter. Das älteste, dokumentierte Ereignis fand im Jahr 867 statt und das aktuellste des Datensatzes wurde am 15.06.2007 dokumentiert.

Der Datensatz enthält eine Vielzahl an Informationen, die für diese Arbeit relevanten möchte sollen im Folgenden erläutert werden, bezüglich der anderen Informationen wird auf den Anhang verwiesen, der einen Auszug des Datensatzes enthält.

Die Ereignisse wurden in zwei Datumskategorien unterteilt. Ereignisse, deren Datum mit absoluter Sicherheit bekannt ist, wurden dem Typ „sicheres Datum“ zugeordnet. Bei

Ereignissen, wo man sich bezüglich des Datums nicht sicher ist, spricht man vom Typ „unsicheres Datum“. Zusätzlich zu den genauen Koordinaten wird jedes Ereignis einem Gewässer und einer Gemeinde zugeordnet. Außerdem beinhaltet der Datensatz noch die Kategorien Notizen und Literaturangaben.

5 Methodik

In diesem Kapitel wird das bei dieser Arbeit verwendete Modell und die durchgeführten Berechnungen genau erklärt. In Abbildung 17 sind alle Arbeitsschritte in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

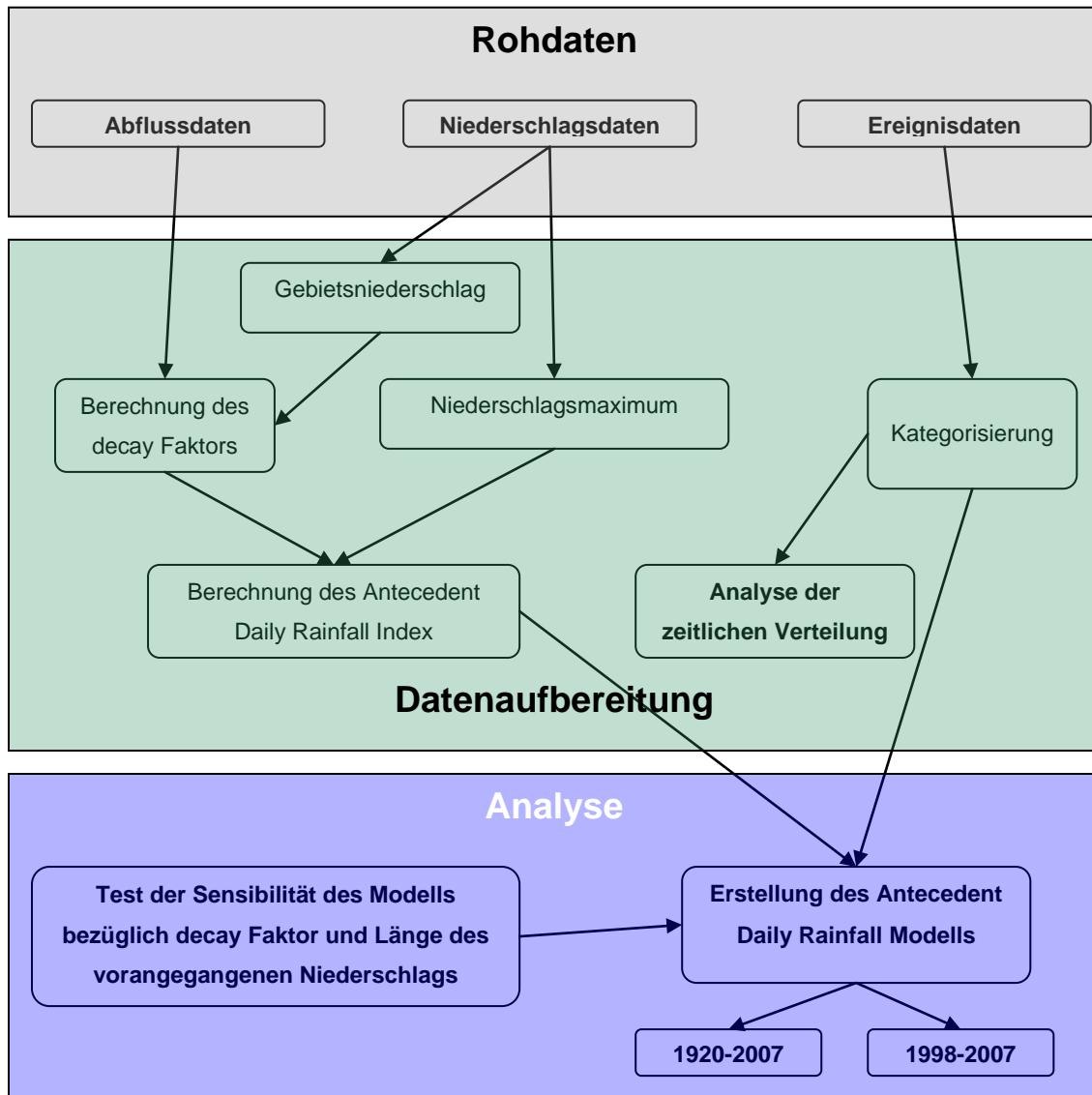


Abbildung 17: Darstellung der durchgeführten Arbeitsschritte.

5.1 Erklärung des Modells

Das “Antecedent Daily Rainfall Model” (ADRM) nach GLADE et al. (2000) dient der Erstellung von Niederschlagsschwellenwerten für gravitative Massenbewegungen für ein

bestimmtes Gebiet. Dabei wird der Niederschlag an jedem Tag dem Niederschlag, der an den vorangegangenen Tagen gefallen ist gegenübergestellt. Darüber hinaus, werden die Tage grundsätzlich in Tage mit beobachteten Ereignissen und Tage ohne beobachtete Ereignisse unterteilt. Im Englischen bezeichnet man den vorangegangenen Niederschlag als „*antecedent precipitation*“, daher der Name des Modells. Nach der Erstellung des Modells ist es möglich, die Niederschlagsschwellenwerte zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Modell zur Berechnung der Niederschlagsschwellenwerte gewählt, weil dabei als Eingangsparameter nur Daten bezüglich der Niederschlagsmengen und bezüglich des Abflusses notwendig sind.

Bei dem Modell wird jeweils nur das Maximum aller an einem Tag gemessenen Niederschlagswerte im Untersuchungsgebiet verwendet, da angenommen wird, dass das Maximum der Niederschlagswert ist, der die Mure am wahrscheinlichsten auslöst (GLADE et al. 2000). Es ist klar, dass das zu Fehlern führen kann, jedoch gibt es keine andere Möglichkeit im Rahmen dieses Modells mit den vorliegenden Daten, den Niederschlag in einer anderen Form zu berücksichtigen.

Das ADRM bietet die Möglichkeit die Bodenfeuchte nur anhand von Niederschlagsdaten in die Berechnungen der Niederschlagsschwellenwerte mit einfließen zu lassen. Unter trockenen Bedingungen gibt der vor einem bestimmten Tag gefallene Niederschlag die Menge an im Boden befindlichem Wasser wieder, während er unter feuchten Bedingungen angibt, wie viel zusätzliches Gravitationswasser im Boden vorhanden ist. Wenn der vorangegangene Niederschlag ausreichend war um Oberflächenabfluss zu generieren, kommt es zu einer Überschätzung des Anteils der Bodenfeuchte durch das Modell (GLADE et al. 2000).

Das ADRM wurde von CROZIER & EYLES (1980) entwickelt und beinhaltet den „Antecedent Rainfall Index“ nach BRUCE & CLARK (1966 in GLADE et al. 2000, S.1066), der den vorangegangenen Niederschlag darstellt:

$$r_{a_0} = kr_1 + k^2 r_2 + \dots + k^n r_n$$

Formel 5: Antecedent Rainfall Index nach BRUCE & CLARK (1966), aus GLADE et al. (2000, S.1066).

r_{a_0} = vorangegangener täglicher Niederschlag in mm, basierend auf den Maxima der Niederschlagswerte in mm für den Tag 0

k = Konstante, die den Abfluss aus dem Boden repräsentiert

r_n = maximaler im Untersuchungsgebiet gefallener Niederschlag in mm am n-ten Tag vor dem Tag 0

CROZIER & EYLES (1980) verwendeten nach BRUCE & CLARK (1966) für k einen Wert von 0.84, welcher anhand von Abflussdaten aus Ottawa (USA) errechnet wurde. Die Annahme konstanter Raten von Evaporation und Abfluss liegen diesem Modell zu Grunde.

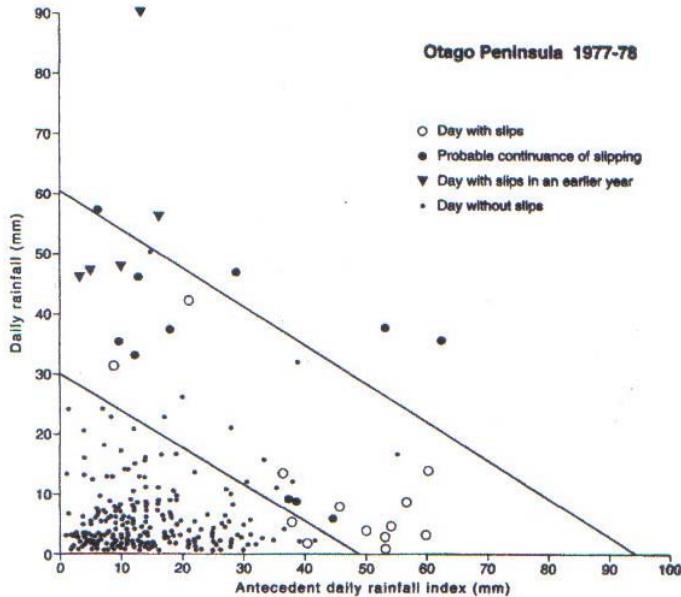


Abbildung 18 : Ergebnis des Antecedent Daily Rainfall Modells für die Otago Halbinsel, Neuseeland nach CROZIER & EYLES (1980) aus GLADE et al. (2000, S.1067).

Die Ergebnisse des Modells sind in Abbildung 18 dargestellt. Bei dem Modell wird der an jedem Tag im Untersuchungszeitraum gemessene Niederschlag, dem für jeden Tag errechneten „Antecedent Daily Rainfall Index“ gegenübergestellt. Bei den Tagen wird zwischen jenen an denen gravitative Massenbewegungen auftraten, jenen an denen keine auftraten und jenen Tagen an denen es wahrscheinlich zu Massenbewegungen gekommen ist unterschieden.

Die beiden Linien innerhalb des Diagramms stellen den maximalen und den minimalen Schwellenwert dar. Das heißt, bei allen untersuchten Tagen unterhalb des minimalen Schwellenwertes ist es nie zu einer Massenbewegung gekommen, während es bei allen Tagen über dem maximalen Schwellenwert immer zu Massenbewegungen gekommen ist.

GLADE et al. (2000) errechneten für ihre Arbeit in Neuseeland einen eigenen Faktor, mit dem Ziel die naturräumlichen Eigenschaften ihres Untersuchungsgebietes besser zu repräsentieren. Dieser „decay factor“ wurde aus der Analyse von Abflussganglinien des

Hauptgerinnes im Untersuchungsgebiet gewonnen. Dabei wurden die Rückgangsraten einzelner Abflussspitzen errechnet. Es wurden aber nur jene Abflussspitzen berücksichtigt, bei denen der Niederschlag vor Beginn des Abflussrückgangs aufgehört hat, da sonst der Niederschlag den Rückgang beeinflusst hätte. Aus den einzelnen Rückgangsraten wurde dann ein Durchschnitt errechnet, der den Abfluss aus dem Boden repräsentieren sollte. GLADE et al. (2000) modifizierten die Formel von (CROZIER & EYLES 1980), indem sie ihren „decay factor“ einfügten:

$$r_{a_0} = r_1 + 2^d r_2 + 3^d r_3 + \dots + n^d r_n$$

Formel 6: Antecedent Daily Rainfall Index nach GLADE et al. (2000, S. 1068).

r_{a_0} = vorangegangener täglicher Niederschlag in mm

d = „decay factor“, errechnet aus den Rückgangsraten von Abflussspitzen

n = Anzahl der Tage vor dem Tag 0

r_n = maximaler im Untersuchungsgebiet gefallener Niederschlag in mm am n-ten Tag vor dem Tag 0

Die Wahl der Anzahl der Tage (n), die man bei der Berechnung des „Antecedent Daily Rainfall Index verwendet, hängt vom Untersuchungsgebiet und vom Wert des „decay factor“ ab. Normalerweise berücksichtigt man die Niederschläge der 10 bis 30 vorangegangener Tage, jedoch haben einige Autoren auch andere Zeiträume bei ihren Untersuchungen verwendet.

5.2 Berechnungen und Modifikationen des Modells

Bei der Berechnung der Niederschlagsschwellenwerte für den Vinschgau wurde im Rahmen dieser Arbeit das „Antecedent Daily Rainfall Model“ nach GLADE et al. (2000) verwendet.

Als Eingangsparameter standen für diese Arbeit Daten bezüglich des Niederschlags und des Abflusses der Etsch, sowie Daten über die einzelnen Murereignisse zur Verfügung. Zur Berechnung der Schwellenwerte wurden nur die Ereignisdaten ab 1920 verwendet, da die Niederschlagsdaten nur ab diesem Zeitpunkt zur Verfügung gestanden sind.

5.2.1 Berechnung des decay Faktors

Der „decay factor“ gibt die Wasserhaltefähigkeit des Bodens an. Das heißt je negativer der Faktor, desto kürzer ist die Verweildauer des Niederschlags im Boden.

Der decay Faktor vermindert die Gewichtung des vorangegangenen Niederschlags um die Zeit, die seit dem Niederschlag vergangen ist und um den damit verbunden Abfluss aus dem Boden. Vereinfacht gesagt, wenn Niederschlag fällt, fließt ein Teil davon ab und dieser Abfluss wird über den decay Faktor berücksichtigt.

Der decay Faktor wurde durch die Analyse der Abflussganglinien der Etsch errechnet. Im Detail mussten jene Abflussspitzen herausgesucht werden, bei denen der Niederschlag vor Einsetzen des Abflussrückgangs aufgehört hat, damit es zu keiner Verfälschung durch den Niederschlag selbst kommen kann. Dies verlangte nach einem Vergleich von Abfluss und Niederschlag. Da im Rahmen dieser Arbeit aber keine Niederschlagswerte von den Pegelstationen, bei denen der Abfluss gemessen wurde, zur Verfügung standen, musste zum Vergleich mit der Abflussganglinie der selbst ermittelte Gebietsniederschlag herangezogen werden.

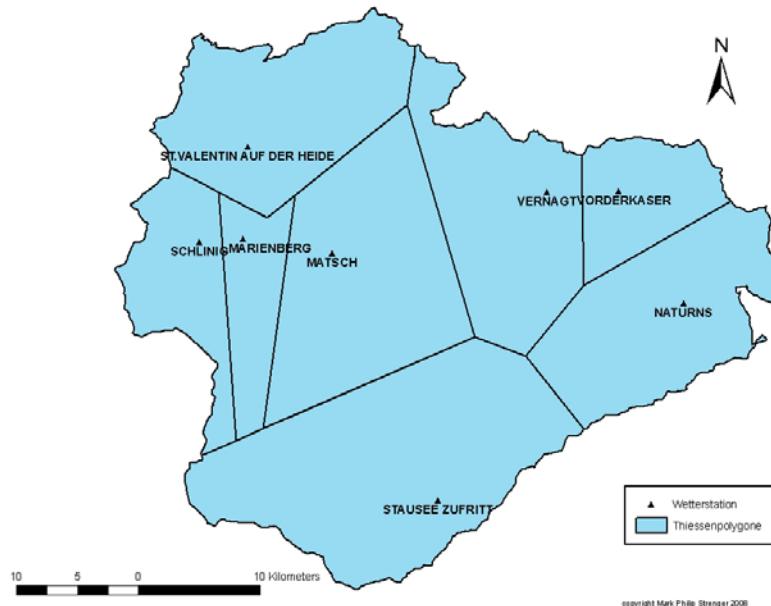


Abbildung 19: Thiessenpolygone zur Ermittlung des Gebietsniederschlags für den Vinschgau.

Der Gebietsniederschlag wurde mit Hilfe von Thiessenpolygonen ermittelt. Es handelt sich hierbei um ein gewichtetes arithmetisches Mittel. Das Untersuchungsgebiet wird dabei in einzelne Polygone unterteilt. Jede Wetterstation wird durch ein Polygon repräsentiert und hat je nach Größe des Polygons einen unterschiedlich großen Anteil am Gesamtniederschlag.

Die Bildung der Polygone erfolgt nach folgendem Prinzip. Jede Station wird durch jeweils eine Gerade mit ihren benachbarten Stationen verbunden. Danach werden genau in der Mitte dieser Geraden die Normale dazu eingezeichnet. Die Schnittpunkte aller Normalen rund um die Wetterstation ergeben die Eckpunkte der einzelnen Polygone. Bei dieser Arbeit wurde händisch eine Zeichnung angefertigt, die Zeichnung eingescannt und georeferenziert, um dann mit der Software Arc Gis die Flächen der einzelnen Polygone ausrechnen zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 19 dargestellt.

Da die Abflussdaten nur von 01.01.1977 bis 30.04.2008 vorlagen, war es auch nur erforderlich den Gebietsniederschlag für diesen Zeitraum zu berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit, konnten bei der Berechnung nur die Daten der Wetterstationen, die in Tabelle 6 aufgelistet sind, verwendet werden, da von den restlichen Wetterstationen im Vinschgau für diesen Zeitraum die Niederschlagsdaten nicht zur Verfügung gestanden sind.

Tabelle 6: Flächenausmaß der einzelnen Thiessenpolygone zur Erstellung des Gebietsniederschlags.

	Marienberg	Matsch	Naturns	Schlins
Fläche in km ²	78.65	267.34	217.31	111.93
	St. Valentin	Stausee Zufritt	Vernagt	Vorderkaser
Fläche in km ²	219.65	369.65	207.27	96.34

Mithilfe der Formel 7 lässt sich der Gebietsniederschlag für jeden Tag im Untersuchungszeitraum errechnen:

$$P = \sum_1^n A_i / A_g \times P_i$$

Formel 7: Berechnung des Gebietsniederschlags mit der Thiessenpolygon Methode.

P= gewichteter, gemittelter Niederschlag

P_i= Niederschlag der Station i

A_i= Fläche des Polygons der Station i

A_g= Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets

n= Anzahl der Stationen

Es wurde der gemessenen Niederschlag jeder Station mit dem Quotient aus Fläche des Polygons und Gesamtfläche multipliziert. Die Ergebnisse jeder Station werden addiert, um den Gebietsniederschlag zu erhalten.

Den errechneten Gebietsniederschlag kann man nun bei der Analyse der Abflussdaten von 1977 bis 2008 verwenden. Zur Berechnung des decay Faktors mussten, wie bereits erwähnt, jene Zeiträume gefunden werden, innerhalb derer es zu einem von Niederschlag unbeeinflussten Abflussrückgang gekommen ist. Diese Rückgänge sind im Untersuchungszeitraum kaum zu beobachten gewesen, vor allem weil die Abflussganglinien der beiden Pegelstationen sehr stark von Kraftwerken beeinflusst sind (HYDROREPORT 2005). Diese Tatsache ist in Abbildung 20 sehr gut zu erkennen. Die

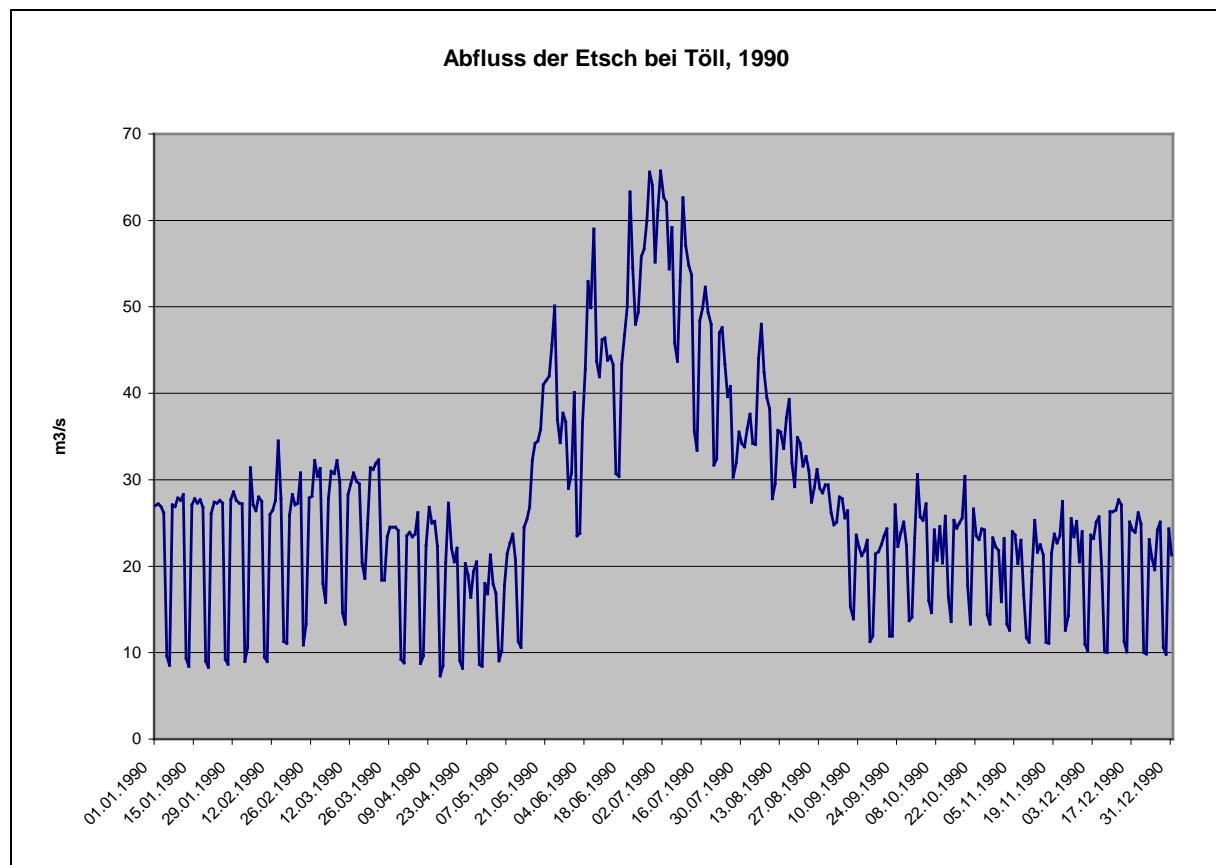


Abbildung 20: Abflussganglinie der Etsch bei der Pegelstation Töll für das Jahr 1990.

regelmäßigen Schwankungen, die durch die Kraftwerksbetriebe entlang der Etsch entstehen sind deutlich zu erkennen, vor allem von Jänner bis Mai und von September bis Dezember. Deshalb wurde bei der Analyse zur Errechnung des decay Faktors immer nur der Zeitraum von Mai bis September untersucht, da man zu dem Zeitpunkt davon ausgehen kann, dass die Schwankungen, die durch die Kraftwerke auftreten, durch den hohen Abfluss im Frühsommer und Sommer überdeckt worden sind. Es ist jedoch offensichtlich, dass es

durch die von Kraftwerken beeinflussten Abflussdaten zu erheblichen Fehlern kommen kann, die aber in Kauf genommen werden müssen, da keine anderen Abflussdaten zur Verfügung gestanden sind. Durch alle Stellen innerhalb der Abflussganglinie, die den Anforderungen entsprechen, wurde eine Gerade als Trendlinie gelegt, deren Steigung mithilfe der Formel 8 berechnet werden konnte. Die durchwegs hohen Anpassungswerte des statistischen R²-Werts in Tabelle 7, rechtfertigen die Verwendung einer linearen Trendlinie für die Abflussrückgänge.

$$y = kx + d$$

Formel 8: Allgemeine Formel einer linearen Gerade.

y= beliebiger Abflusswert

x= Zeitpunkt des Abflusswertes (Datum)

d= konstanter Abstand der Geraden (Trendlinie) zur x-Achse

k= Steigung der Geraden

Da es sich bei den Abflussrückgängen um abfallende Werte handelt und die Trendlinie daher ebenfalls abfallend ist, ist die Steigung k immer negativ. Von 1977 bis 2008 konnten lediglich acht Abflussrückgänge gefunden werden, die den Anforderungen entsprechen. Die Werte sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Errechnete Abflussrückgänge, die den Anforderungen entsprochen haben.

Beginn des Rückgangs	Ende des Rückgangs	Steigung der Geraden	R ²	Pegelstation
28.09.1977	01.10.1977	-2.91	0.95	Töll
08.09.1985	14.09.1985	-3.38	0.86	Töll
29.06.1986	02.07.1986	-1.85	0.89	Töll
28.06.1992	01.07.1992	-1.96	0.89	Töll
18.09.1994	21.09.1994	-1.51	0.98	Töll
27.06.1995	30.06.1995	-1.36	0.65	Spondinig
10.08.1997	14.08.1997	-2.48	0.92	Töll
08.06.2005	12.06.2005	-0.99	0.89	Spondinig

Der endgültige decay Faktor für den Vinschgau ergibt sich nun aus dem Mittelwert der Steigungen der Trendlinien für die gefundenen gültigen Abflussrückgänge. Der Mittelwert und Decay Faktor beträgt somit -2.055. Der Standardfehler des Mittelwertes beträgt 0.29. Mit einer Standardabweichung von 0.81 ist dieser Mittelwert statistisch durchaus vertretbar.

Der Wert von -2.055 für den decay Faktor vom Vinschgau ist durchaus schlüssig, da er mit den Eigenschaften des Untersuchungsgebietes einhergeht. Ein Wert von -2.055 steht für

eine kurze Verweildauer des Niederschlagswassers im Boden und für einen damit verbundenen schnellen Abfluss aus dem Hangsystem. Das ist für den Vinschgau sicher zutreffend, da es sich um ein alpines, trockenes Gebiet handelt mit dementsprechend geringen Bodenmächtigkeiten, was dazu führt, dass der Boden nur kleine Mengen Wasser für kurze Zeit halten kann.

5.2.2 Berechnung des „Antecedent Daily Rainfall Index“

Bei GLADE et al. (2000) wurden zur Berechnung des ADRI immer die maximalen im Untersuchungsgebiet aufgetretenen Niederschläge verwendet. Aufgrund der hohen Anzahl an Wetterstationen im Vinschgau, deren Daten zur Verfügung gestanden sind, wurde überlegt für die Tage, an denen eine Mure stattgefunden hat, den Wert der Station zu verwenden, die im Umkreis von 15 Kilometer den maximalen Niederschlagswert aufgewiesen hat. Diese Überlegung wurde aber wieder verworfen, da die Wahl der Größe des Umkreises, den man zu Rate zieht, sehr subjektiv und durch keinerlei Fakten zu begründen wäre.

Deshalb wurde zur Berechnung des ADRI immer der maximale Niederschlagswert verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass eine Mure immer durch diesen Wert ausgelöst wird.

5.2.3 Kategorisierung der Murereignisse

Im Ereignisdatensatz wurde von Anfang an vom Amt für statistische und raumbezogene Informatik zwischen zwei Kategorien bei den Murereignissen unterschieden. 157 von den insgesamt 351 Murereignissen wurden der Kategorie „sicheres Datum“ und die restlichen 194 der Kategorie „unsicheres Datum“ zugeordnet. Aufgrund der Beschaffenheit der Niederschlagsdaten war es notwendig eine neue Kategorie einzuführen. Da die Niederschlagsdaten täglich von 09:00 bis 09:00 Uhr aufgezeichnet wurden, gibt es für jedes Datum immer zwei gültige Niederschlagswerte. Am 17.Juli zum Beispiel, fällt der Niederschlag von 00:00 bis 09:00 Uhr in die Zeit des Niederschlagswertes vom 17.Juli, regnet es jedoch während des größeren Anteil des Tages von 09:00 bis 24:00 Uhr, kann man das nur am Niederschlagswert des 18.Juli ablesen. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit die Kategorie „wahrscheinliches Ereignis“ eingeführt. Es handelt sich dabei um Tage, die genau einen Tag nach einem Murereignis mit sehr niedrigem Niederschlag einen hohen Niederschlagswert aufweisen. Es wird dabei angenommen, dass der für die Mure verantwortliche Niederschlag nicht zwischen 00:00 und 09:00 Uhr, sondern zwischen 09:00

und 24:00 Uhr gefallen ist. Daher wurde bei diesen Murereignissen das Datum um einen Tag nach vorne verschoben.

5.2.4 Analyse der zeitlichen Verteilung der Murereignisse

Es wurde versucht anhand der zur Verfügung gestandenen Ereignisdaten, herauszufinden, ob Muren im Vinschgau hauptsächlich im Sommer abgehen und man somit daraus schließen kann, dass Sommergewitter und die damit verbundenen intensiven Niederschläge der häufigste Auslöser sind.

Der Datensatz beinhaltet 350 beobachtete Murereignisse ab dem Jahr 867. Um die zeitliche Verteilung nicht zu verfälschen, wurde, wenn mehrere Ereignisse an einem Tag beobachtet wurden, diese nur als ein Ereignis angesehen, weil man nicht davon ausgehen kann, dass an jedem Tag alle tatsächlich abgegangenen Muren im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet wurden. Demnach wurde die zeitliche Verteilung der Tage analysiert, an denen mindestens eine Mure beobachtet wurde. Im Vinschgau wurden an 219 verschiedenen Tagen Muren beobachtet. Mithilfe einer statistischen Analyse wurde untersucht, ob sich diese 219 Tage auf einen bestimmten Zeitraum des Jahres beschränken.

5.2.5 Erstellung des Modells

Bei der Erstellung des Modells, wird jeder Tag im Untersuchungszeitraum durch einen Punkt innerhalb eines Streudiagramms dargestellt, das mithilfe der Software SPSS erstellt wurde. Die genauen Programmbefehle sind dem Anhang zu entnehmen. Auf der x-Achse wird der Antecedent Daily Rainfall Index und auf der y-Achse das im Untersuchungsgebiet aufgetretene Niederschlagsmaximum aufgetragen. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Murereigniskategorien mit Hilfe von unterschiedlichen Symbolen dargestellt. Ist an dem Tag keine Mure beobachtet worden, wird der Tag mit einem grauen Punkt dargestellt. Tage, an denen zumindest eine Mure der Kategorie „sicheres Datum“ beobachtet worden ist, wurden mit einem blauen X dargestellt. Auch wenn mehrere Ereignisse an einem Tag beobachtet worden sind, wurde das nur als ein Ereignis angesehen. Es wäre sinnlos mehrere Ereignisse an einem Tag darzustellen, weil es sich dabei um ein und denselben Punkt in der Graphik handeln würde. Mit einem grünen Dreieck werden Tage versehen, denen ein Murereignis der Kategorie „unsicheres Datum“ zugeordnet worden ist. Die im Rahmen dieser Arbeit eingeführte Kategorie „wahrscheinliches Ereignis“ wird mit einem roten Pluszeichen dargestellt.

Es wurde im Zuge dieser Arbeit bei dem Modell der minimale, der maximale, der 25-Prozent und 50-Prozent Niederschlagsschwellenwert bestimmt.

Die Schwellenwerte, die das Diagramm in einzelne Bereiche unterteilen werden durch Geraden der Form $y = kx + d$ dargestellt, wobei d der Wert ist wo die Gerade des Schwellenwertes die x - und y -Achse schneidet und k immer -1 ist. Setzt man den aktuellen ADRI für x in die Schwellenwertgerade ein, kann man den Niederschlag y errechnen, der notwendig wäre eine Mure mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit auszulösen.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse der zeitlichen Verteilung der Murereignisse und die Ergebnisse des Modells dargestellt und beschrieben.

6.1 Zeitliche Verteilung der Murereignisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Analyse der zeitlichen Verteilung der Murereignisse im Vinschgau dargestellt. Insbesondere wird dabei der Zeitraum von 1920 bis 2007 berücksichtigt.

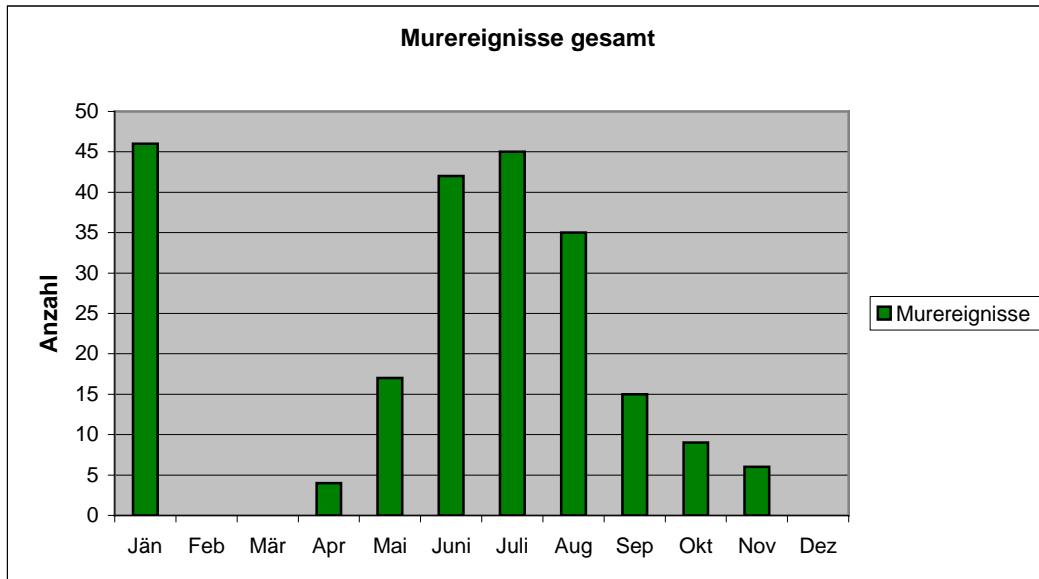


Abbildung 21: Zeitliche Verteilung aller Murereignisse.

In Abbildung 21 ist die zeitliche Verteilung der Tage im Zeitraum von 1920 bis 2007, an denen Muren beobachtet wurden, dargestellt. Dieser ist zu entnehmen, dass der Großteil der Muren, nämlich 70 Prozent, im Zeitraum von Mai bis September, aufgezeichnet wurde. Auffällig ist die mit 46 hohe Anzahl der beobachteten Murereignisse im Jänner, wohingegen in den restlichen Wintermonaten keine einzige Mure beobachtet wurde.

Die zeitliche Verteilung ab 1920 (Abbildung 22) - der Zeitpunkt ab dem die Ereignisse zur Berechnung der Niederschlagsschwellenwerte herangezogen wurden - liefert ein anderes Bild. Ab 1920 wurden 90 Prozent der Muren im Zeitraum von Mai bis September beobachtet.

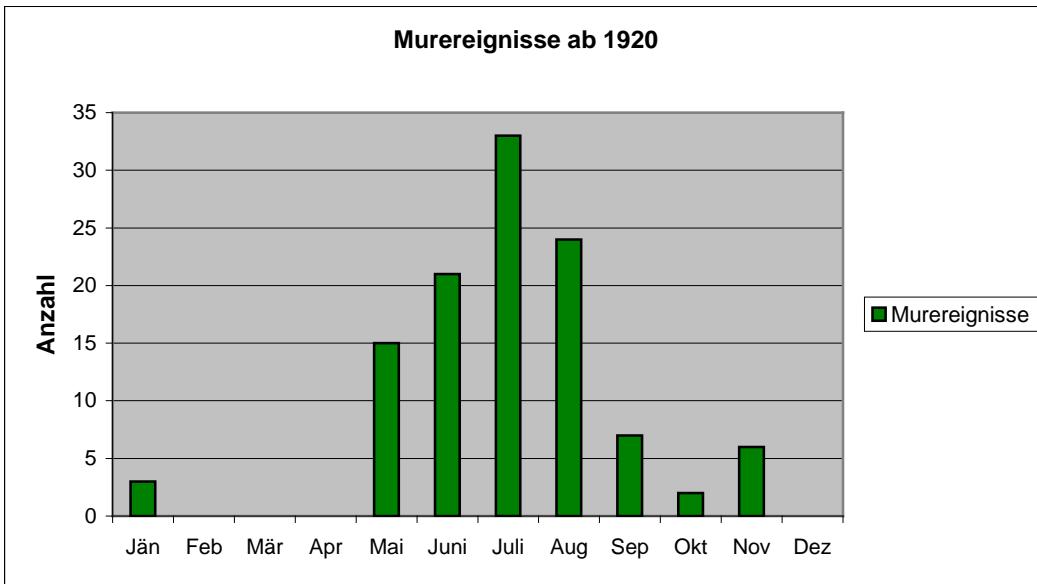


Abbildung 22: Zeitliche Verteilung der Murereignisse ab 1920.

Außerhalb dieses Zeitraums wurden nur drei Muren im Jänner, zwei im Oktober und zwölf im November dokumentiert.

Berücksichtigt man bei der Analyse nur noch die beobachteten Murereignisse der Kategorie „sicheres Datum“, verändert sich die Verteilung erneut (Abbildung 23). So wurde dann im gesamten Winter keine Mure beobachtet. Noch immer 71 Prozent aller nach 1920 beobachteten Muren, deren Datum als sicher gilt, ereigneten sich im Sommer (Juli bis September). Im Oktober wurde eine und im November wurden vier Muren mit sicherem Datum beobachtet.

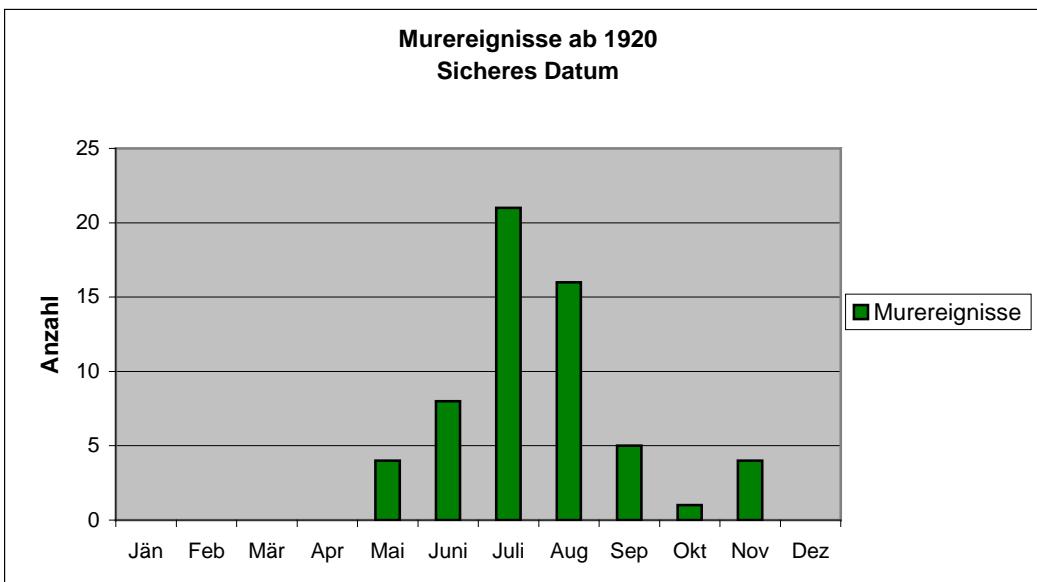


Abbildung 23: Verteilung der Murereignisse der Kategorie „Sicheres Datum“ ab 1920.

6.2 Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells

In Abbildung 24 ist das Antecedent Daily Rainfall Modell für den gesamten Untersuchungszeitraum von 1920-2007 für den Vinschgau abgebildet.

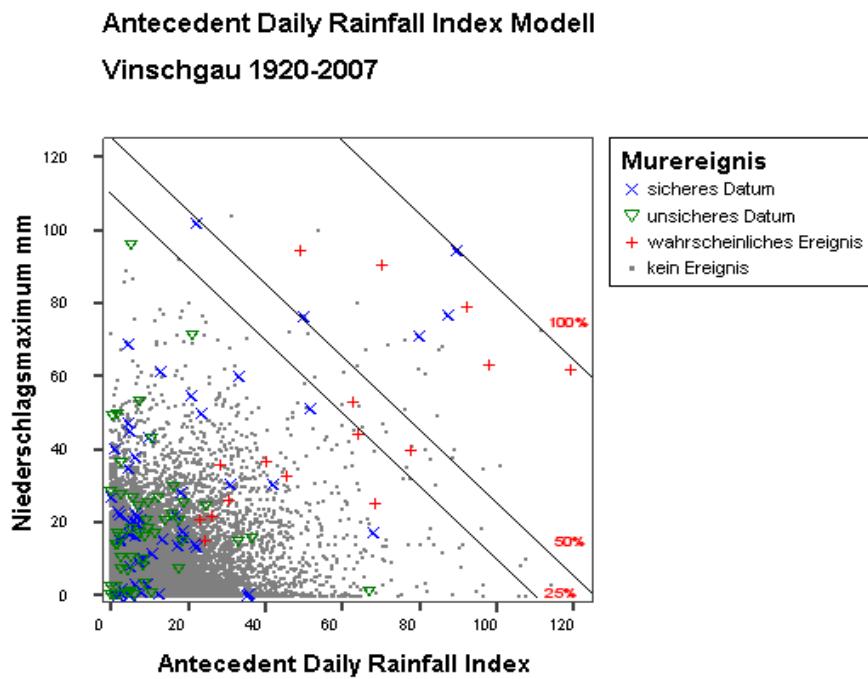


Abbildung 24: Antecedent Daily Rainfall Modell für den Vinschgau, 1920-2007, die eingezeichneten Geraden stellen die Niederschlagsschwellenwerte für die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten dar.

Auffallend bei der Betrachtung der Verteilung der Murereignisse ist die hohe Anzahl an beobachteten Muren, die nur einen geringen Niederschlag und einen niedrigen Antecedent Daily Rainfall Index (ADRI) aufweisen. 25 Murereignisse wurden an Tagen mit einem Niederschlag kleiner zehn Millimeter als auch einem ADRI unter zehn beobachtet. Zehn davon gehören der Kategorie „sicheres Datum“ an. Die restlichen fünfzehn wurden der Kategorie „unsicheres Datum“ zugeordnet. Im oberen Wertebereich sieht man, dass es sehr viele Tage mit hohem Niederschlag, mit hohem ADRI oder gar mit hohem Niederschlag und hohem ADRI gibt, an denen keine Mure beobachtet wurde. An 20 Tagen, an denen ein ADRI und ein Niederschlag von mehr als 50 Millimetern zu verzeichnen war, ist keine Mure beobachtet worden. Keiner dieser 20 Tage ist nach 1998 verzeichnet worden, dem Zeitpunkt ab dem die Murereignisse mit standardisiertem Formular erhoben wurden. Von 1920 bis 2007 gab es 25 Tage ohne Murereignis, an denen es mehr als 70 Millimeter regnete.

Lediglich ein Tag davon war nach 1998. An 109 Tagen mit einem ADRI größer 60 wurde keine Mure beobachtet, wobei elf Tage davon nach 1998 lagen.

Die Niederschlagsschwellenwerte sind ebenfalls eingezeichnet. Der minimale Schwellenwert ist gleich null, weil Murereignisse an Tagen beobachtet wurden, an denen kein Niederschlag gefallen ist und der ADRI 0,01 betragen hat. Deshalb ist der minimale Niederschlagsschwellenwert auch nicht eingezeichnet. Der maximale Niederschlagsschwellenwert ist durch die Gerade $y = -x + 187$ bestimmt. Das heißt, Niederschlag und ADRI an einem Tag müssen in Summe 187 betragen, damit man statistisch zu 100 Prozent mit einer Mure rechnen kann. Der 50-Prozent Schwellenwert ist durch $y = -x + 127$ und der 25-Prozent Schwellenwert durch $y = -x + 112$ bestimmt.

Da ab 1998 die Murereignisse mit standardisiertem Formular aufgezeichnet worden sind, ist damit zu rechnen, dass sich die Qualität der Ereignisdaten ab diesem Zeitpunkt verbessert hat. Diese Verbesserung ist an der Tatsache zu erkennen, dass ab 1998 nur mehr 7 von 46 beobachteten Muren der Kategorie „unsicheres Datum“ zugeordnet wurden. Deshalb wurde das Modell ein zweites Mal nur für den Zeitraum von 1998 bis 2007 erstellt.

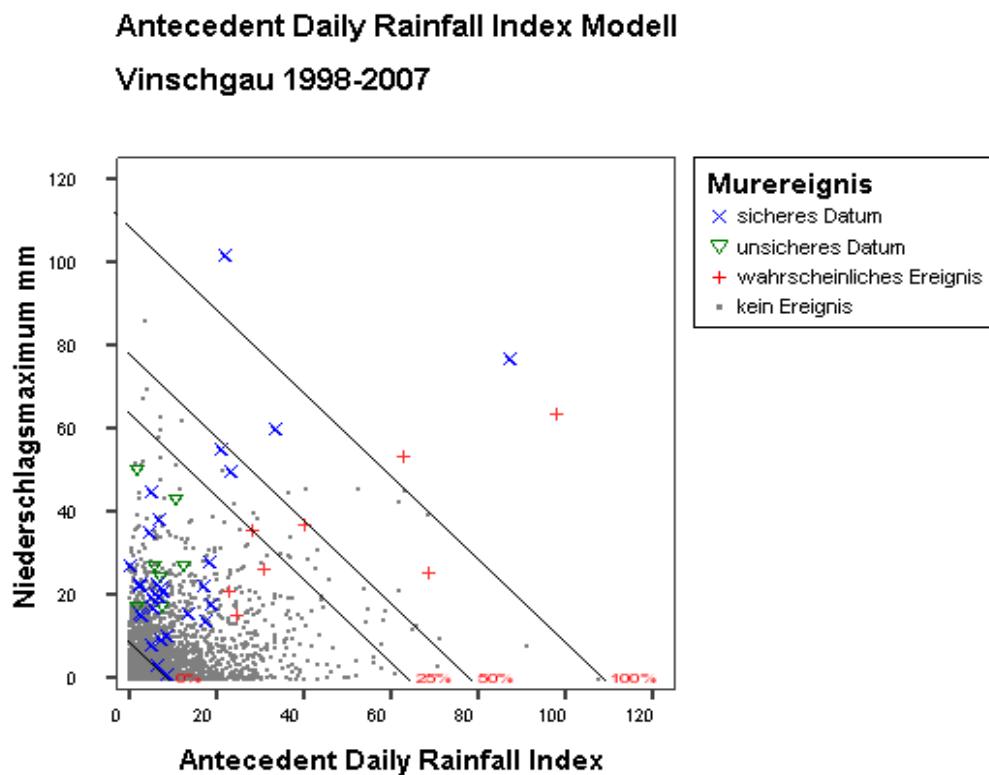


Abbildung 25: Antecedent Daily Rainfall Modell für den Vinschgau 1920-2007, die eingezeichneten Geraden stellen die Niederschlagsschwellenwerte für die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten dar.

Das Ergebnis ist in Abbildung 25 dargestellt. Im Vergleich zu dem Modell von 1920 bis 2007 fallen einige Unterschiede auf. Es existieren nur mehr acht Tage ohne Murereignis, an denen sowohl Niederschlag als auch ADRI größer als 30 sind. Lediglich an zwölf Tagen ohne beobachtetes Murereignis hat es mehr als 50 Millimeter geregnet. An 24 Tagen, an denen keine Mure dokumentiert worden ist, ist der ADRI höher als 50 gewesen.

Die Niederschlagsschwellenwerte liegen deutlich niedriger als in der Periode von 1920 bis 2007. Der minimale Schwellenwert liegt bei zehn ($y = -x + 10$). Der maximale Schwellenwert wird durch die Gerade $y = -x + 110$ bestimmt und liegt somit knapp unter dem 25-Prozent Schwellenwert des Zeitraumes 1920 bis 2007. Statistisch ist mit einer 50 prozentigen Wahrscheinlichkeit von Muren zu rechnen, wenn der ADRI und der Niederschlag an einem Tag zusammen 79 oder mehr betragen ($y = -x + 79$). Der 25-Prozent Schwellenwert wird durch die Gerade $y = -x + 65$ bestimmt.

7 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse der zeitlichen Verteilung der Murereignisse und die Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells diskutiert.

7.1 Diskussion der Ergebnisse der Analyse der zeitlichen Verteilung

Im Vinschgau würde man sich erwarten, dass es hauptsächlich im Sommer zu Murenabgängen kommt. Betrachtet man jedoch die zeitlichen Verteilungen der beobachteten Murereignisse über die verschiedenen Zeiträume hinweg, so fällt die ungewöhnlich erscheinende Tatsache auf, dass im Jänner an 46 verschiedenen Tagen Muren beobachtet werden konnten. Unterzieht man den Datensatz einer genaueren Betrachtung, kommt man zu wichtigen Erkenntnissen.

43 der 46 Muren, die im Jänner beobachtet wurden, fanden vor 1920 statt und 41 davon am 1.Jänner des jeweiligen Jahres, teilweise mehrere Jahrhunderte zurückliegend. Diese 41 Murereignisse werden innerhalb des Datensatzes - nicht ohne Grund - der Kategorie „unsicheres Datum“ zugeordnet. Bei all diesen Ereignissen war aufgrund von historischen Quellen, wie zum Beispiel Chroniken oder Feuerwehreinsatzberichten, lediglich das Jahr des Ereignisses bekannt. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die Verfasser des Datensatzes in diesen Fällen den Ereignissen den 1.Jänner als Datum zuwiesen, ohne gewusst zu haben, wann in dem jeweiligen Jahr die Mure tatsächlich stattgefunden hat. Die restlichen beiden Muren, die im Jänner vor 1920 beobachtet worden sein sollen, gehören innerhalb des Datensatzes zu der Kategorie „sicheres Datum“. Eine davon wurde am 29.01.1862 beobachtet. Die Daten von diesem Ereignis entstammen aus der Naturchronik Tirol von FLIRI (1998). Schlägt man dieses Ereignis in der Chronik nach, so erfährt man, dass die Mure ebenfalls nicht eindeutig diesem Datum zugeordnet werden konnte. Die andere Mure im Jänner vor 1920 der Kategorie „sicheres Datum“ wurde am 31.01.1889 beobachtet. Auch diese Daten entstammen einer Chronik und sind ob ihrer Genauigkeit anzuzweifeln. Somit verbleiben noch drei Muren nach 1920, die im Jänner beobachtet wurden und zu der Kategorie „unsicheres Datum“ zählen. Zu der Mure am 01.01.1934 sind keine weiteren Informationen innerhalb des Datensatzes vorhanden. Auch hier wird angenommen, dass lediglich das Jahr der Mure bekannt war. Die Informationen über das Ereignis am 01.01.1970 stammen von FLIRI (1998). In seiner Chronik ist bei diesem Ereignis jedoch lediglich das Jahr 1970 und kein genaues Datum vermerkt. Die Mure vom 01.01.1989

wurde laut Datensatz aus photographischem Material rekonstruiert, darüber hinaus enthält dieser Datensatz keine weiteren Informationen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass es sich bei allen Muren, denen innerhalb des Datensatzes ein Datum im Jänner zugewiesen wurde, um jene handelt, bei denen lediglich das Jahr bekannt war. Außerdem konnte gezeigt werden, dass im Untersuchungsgebiet Muren hauptsächlich im Sommer abgehen. Seit 1920 beschränkte sich das Auftreten von beobachteten Muren auf den Zeitraum von Mai bis November. Diese Tatsache geht mit der These einher, Muren würden im Alpenraum und insbesondere im Vinschgau großteils durch Starkniederschläge im Rahmen von sommerlichen Gewittern ausgelöst.

7.2 Diskussion der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells

Unter den Ergebnissen des ADRM finden sich einige Tatsachen, die einer näheren Erläuterung bedürfen. Es wird im Folgenden versucht, Erklärungen für die Ergebnisse zu finden und sie zu interpretieren.

Die Tatsache, dass es sehr viele Tage gibt, an denen große Mengen an Niederschlag gefallen sind, aber dennoch keine Mure beobachtet wurde, scheint zunächst ungewöhnlich. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass irgendwo im Untersuchungsgebiet an diesen Tagen eine Mure abgegangen ist, sie aber von niemandem beobachtet und aufgezeichnet wurde. Dass große Teile des Vinschgaus schwer zugänglich sind, weil es sich teilweise um Hochgebirge handelt, trägt dabei sicherlich entscheidend zu den unvollständigen Aufzeichnungen der Muren bei.

Unterzieht man im Zeitraum von 1998 bis 2007 alle Tage ohne beobachteter Mure, die über dem 50-Prozent Niederschlagsschwellenwert liegen, einer genaueren Untersuchung, ergibt sich folgendes Bild: Von diesen zwölf Tagen waren zwei im Sommer, die restlichen wurden im Oktober und November aufgezeichnet. Wie bereits gezeigt werden konnte, wurden im Vinschgau auch im Oktober und November Muren beobachtet. Einige der Tage ohne Murenbeobachtung waren unmittelbar nach einem Murereignis und weisen wegen der hohen Niederschläge vom Vortag noch einen hohen ADRI-Wert auf. Es könnte aber auch sein, dass sich weitere Muren ereignet haben, die niemand beobachten konnte. Die Tatsache, dass an sehr vielen Tagen im November trotz hohem Niederschlag keine Mure beobachtet wurde, könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Niederschlag in Form von Schnee gefallen ist. Da zur Berechnung des Modells immer nur der maximale Niederschlagswert herangezogen wird, kann es sein, dass gerade dieser Wert von einer Wetterstation stammt, die sehr hoch liegt und es dort geschneit haben könnte, während es im Tal geregnet hat. Tatsächlich wurden die hohen Niederschlagswerte an den Novembertagen, an denen keine

Mure beobachtet wurde und die auch nicht kurz vor oder nach einem beobachteten Murereignis lagen, ausschließlich an Wetterstationen verzeichnet die über einer Seehöhe von 1000 Metern liegen. Es wäre daher wünschenswert diese These mit Temperaturdaten der einzelnen Wetterstation zu überprüfen, jedoch standen im Zuge dieser Arbeit diese Daten nicht zur Verfügung.

Außerdem scheint es eine Schwäche des Modells zu sein, dass an Tagen direkt nach Murereignissen der ADRI-Wert, bedingt durch den hohen Niederschlag vom Vortag, noch immer sehr hoch ist. Fällt an solchen Tagen gleichzeitig nur eine geringe Menge oder kein Niederschlag, kommt es nicht zur Auslösung einer Mure. Das könnte darauf hinweisen, dass im Vinschgau der am Tag des Ereignisses gefallene Niederschlag wichtiger für die Auslösung einer Mure ist als der vorangegangene Niederschlag.

Eine weitere Frage, die sich einem bei der Betrachtung der Ergebnisse aufdrängt, ist, warum es vor allem von 1920 bis 2007 aber auch von 1998-2007 einige Murereignisse gab, die an Tagen aufgezeichnet wurden, an denen es sehr wenig geregnet hat und der ADRI einen niedrigen Wert aufwies. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Muren wahrscheinlich von lokal begrenzten Starkniederschlägen ausgelöst wurden. Lokal begrenzte Niederschläge werden natürlich nicht immer von einer der Wetterstationen, deren Daten im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen, registriert, weil die räumliche Verteilung der Stationen innerhalb des Vinschgaus doch sehr groß ist. MENARA (2003) und ORTNER & MAYR (1993) sprechen ebenfalls von sommerlichen Gewittern als typische Auslöser von Muren im Vinschgau. Dass lokal begrenzte Starkniederschläge dafür verantwortlich sind, dass es im Modell einige Murereignisse mit nur geringem Niederschlag gegeben hat, wird auch durch die Tatsache untermauert, dass von 1998 bis 2007 87 Prozent und von 1920 bis 2007 75 Prozent dieser Ereignisse zwischen Juni und September stattfanden, also einer Zeit während der es im Vinschgau typischerweise zu sehr vielen lokalen Gewitterzellen kommt, deren Niederschlag sehr ergiebig sein kann.

Auffallend bei den Resultaten sind auch die großen Unterschiede zwischen dem Ergebnis für den Zeitraum von 1920 bis 2007 und jenem von 1998 bis 2007. Das Ergebnis ab 1998 kommt näher an die Erwartungen heran, da es zwischen 1920 und 1998 deutlich mehr beobachtete Murereignisse gibt, die nur geringe Niederschlagswerte und niedrige ADRI-Werte aufweisen. Darüber hinaus gab es ab 1920 weitaus höhere Niederschlagswerte, die nicht mit einem Murereignis in Verbindung gebracht werden konnten. Das mag daran liegen, dass sich die Ereignisdokumentation in den letzten Jahrzehnten stark verbessert hat. Ab 1998 wurden die Ereignisse mit einem standardisierten Formular erhoben. So gehören im Zeitraum von 1920 bis 2007 noch 41 Prozent der Murereignisse der Kategorie „unsicheres Datum“ an, während es im Zeitraum von 1998 bis 2007 nur mehr 15 Prozent der beobachteten Muren sind, die dieser Kategorie zugeordnet wurden. Die Qualität des

Ergebnisses für den Zeitraum von 1920 bis 2008 wurde sicher auch dadurch negativ beeinflusst, dass für diesen Zeitraum nicht von allen Wetterstationen Niederschlagsdaten zur Verfügung standen.

Auch die Niederschlagsschwellenwerte unterscheiden sich deutlich für die beiden Zeiträume. Von 1998 bis 2007 liegen sie deutlich tiefer als für den Zeitraum ab 1920. Diese Tatsache ist ebenfalls auf die zuvor genannten Unterschiede bezüglich der Datenverfügbarkeit und Datenqualität für die zwei verschiedenen Zeiträume zurückzuführen. Da das Ergebnis für den Zeitraum von 1998 bis 2007 realistischere Niederschlagsschwellenwerte ergibt, soll im Folgenden nur mehr auf diese Werte eingegangen werden. Der minimale Schwellenwert liegt bei zehn. Das heißt, es wurde im Untersuchungsgebiet von 1998 bis 2007 keine Mure beobachtet, bei der der Tagesniederschlag und der ADRI addiert weniger als zehn ergaben und davon kann auch in Zukunft ausgegangen werden. Im Gegensatz dazu konnte, sobald der Tagesniederschlag und der ADRI addiert 110 oder mehr ergaben, immer eine Mure beobachtet werden.

Vergleicht man die Resultate dieser Arbeit mit den Ergebnissen von PASUTO & SILVANO (1998), die ähnliche Niederschlagsschwellenwerte für ein Gebiet circa fünfzig Kilometer südöstlich vom Vinschgau erstellt haben, so kann man einige Unterschiede feststellen. Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass Pasuto und Silvano ihre Untersuchung für ein anderes Gebiet mit anderen geologischen und klimatischen Eigenschaften, für gravitative Massenbewegungen generell und mit einer anderen Methode durchgeführt haben. Dennoch ist es notwendig die Ergebnisse zu vergleichen, um die prinzipiellen Unterschiede, die bei Niederschlagsschwellenwerten auftreten können, aufzuzeigen. Pasuto und Silvano haben herausgefunden, dass in ihrem Untersuchungsgebiet hohe Niederschläge an einem Tag alleine nicht ausreichen, um eine gravitative Massenbewegung auszulösen. So kam in ihrem Untersuchungsgebiet, wenn es an ein bis zwei Tagen 100-150 Millimeter geregnet hat und es in den 15 Tagen davor aber nur zu einem kumulativen Niederschlag von weniger als 50 Millimetern gekommen ist, in nur elf Prozent der Fälle zu gravitativen Massenbewegungen (PASUTO & SILVANO 1998, S.186). Diese Tatsache steht ganz im Gegensatz zum Vinschgau, wo 72 Prozent der ab 1998 dokumentierten Murereignisse an Tagen stattfanden, an denen der ADRI kleiner als 20 war. Dies deutet darauf hin, dass im Vinschgau der Niederschlag am Tag der beobachteten Mure wesentlich bedeutender für ihre Auslösung ist als der vorangegangene Niederschlag.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Ergebnisse im Zeitraum von 1920 bis 2007 aufgrund mangelnder Datenqualität und nicht vorhandener Vollständigkeit nicht sehr aussagekräftig sind. Das Modell für den Zeitraum von 1998 bis 2007 liefert aufgrund der verbesserten Ereignisdokumentation und dem dichteren Wetterstationsnetz ab 1998

realistischere Niederschlagsschwellenwerte. Dennoch bedürfen auch diese Werte einer Verbesserung.

Es konnte gezeigt werden, dass das Antecedent Daily Rainfall Modell durchaus in der Lage wäre realistische Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von Muren zu berechnen, wenn man davon ausgehen kann, dass im Untersuchungsgebiet Muren nur durch Niederschläge ausgelöst werden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die zur Verfügung gestandenen Daten bei weitem nicht ausreichend waren, um realistische Resultate zu erhalten. Insbesondere bezüglich der Qualität der Ereignisdaten, sind erhebliche Verbesserungen notwendig. Darüber hinaus wäre eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung der Niederschlagsdaten von Vorteil.

8 Sensibilität des Modells

Entscheidend für die Qualität der Ergebnisse ist auch die Länge des Zeitraums, der herangezogen wird um den vorangegangenen Niederschlag zu berechnen und die Genauigkeit mit der der decay Faktor, die Menge an im Boden gespeichertem Niederschlag wiedergibt. Deshalb soll hier die Sensibilität des Modells bezüglich dieser beiden Faktoren untersucht werden.

8.1 Sensibilität bezüglich des decay Faktors

Der decay Faktor gibt an, wie lange das Niederschlagswasser im Boden verweilt und somit zur Auslösung von Muren beitragen kann. Es wurde anhand von Abflussdaten der Etsch ein Faktor von -2.055 errechnet, was prinzipiell einen eher schnelleren Abfluss aus dem Boden darstellt. Der Wert von -2.055 scheint für den Vinschgau passend zu sein, da es sich um ein eher trockenes alpines Tal mit geringeren Bodenmächtigkeiten handelt und somit einem schnellen Abfluss aus dem Boden nichts im Wege steht.

Es wurde nun versucht herauszufinden, wie sensibel das Antecedent Daily Rainfall Modell auf eine Änderung des decay Faktors reagiert, um beurteilen zu können, in welchem Ausmaß der decay Faktor zur Qualität der Ergebnisse beiträgt.

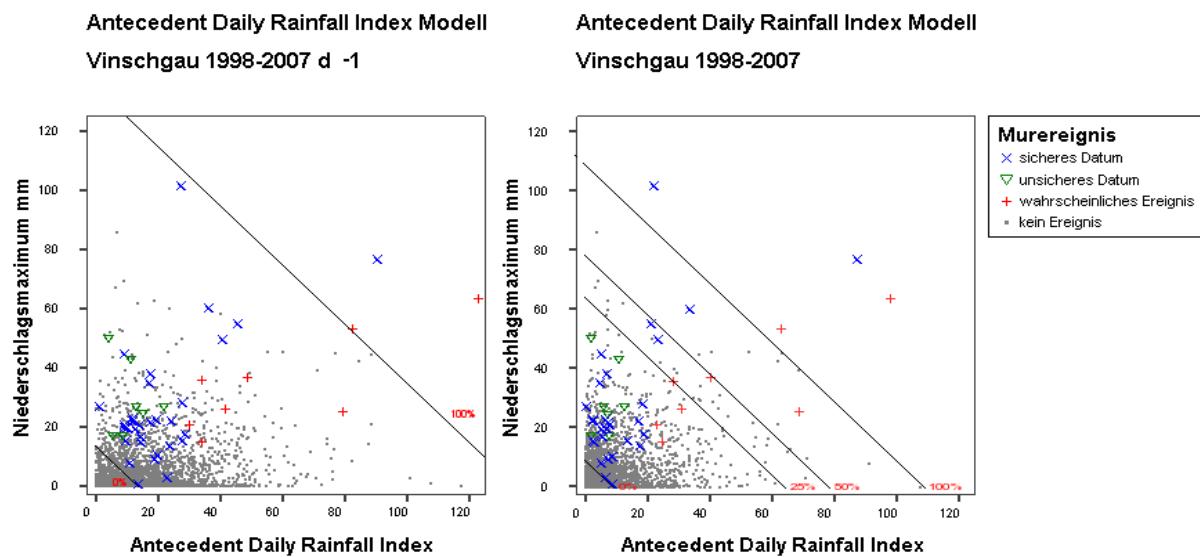


Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit einem decay Faktor von -1 (links) und -2.055 (rechts).

In Abbildung 26 ist zu sehen, wie sich das Ergebnis verändert, wenn der decay Faktor vergrößert wird. Ein größerer Wert des decay Faktors bedeutet, dass das Niederschlagswasser länger im Boden gespeichert bleibt. Das hat zur Folge, dass sich der Antecedent Daily Rainfall Index erhöht, da dieser die Menge an im Boden befindlichen Wasser wiedergibt. Eine Vergrößerung des Faktors d von -2.055 auf -1, bewirkt prinzipiell eine Verschiebung auf der x-Achse nach rechts. Diese Verschiebung findet aber in unterschiedlichem Ausmaß statt. Umso höher der kumulative Niederschlag an den zehn vorangegangenen Tagen war, desto größer fällt auch die Verschiebung nach rechts aus. Dieselbe Verschiebung ist bei den Schwellenwerten zu beobachten. Sowohl der minimale als auch der maximale Niederschlagsschwellenwert verschieben sich auf der x-Achse nach rechts. Hat es an den vorangegangenen Tagen gar nicht geregnet, tritt natürlich keine Verschiebung auf.

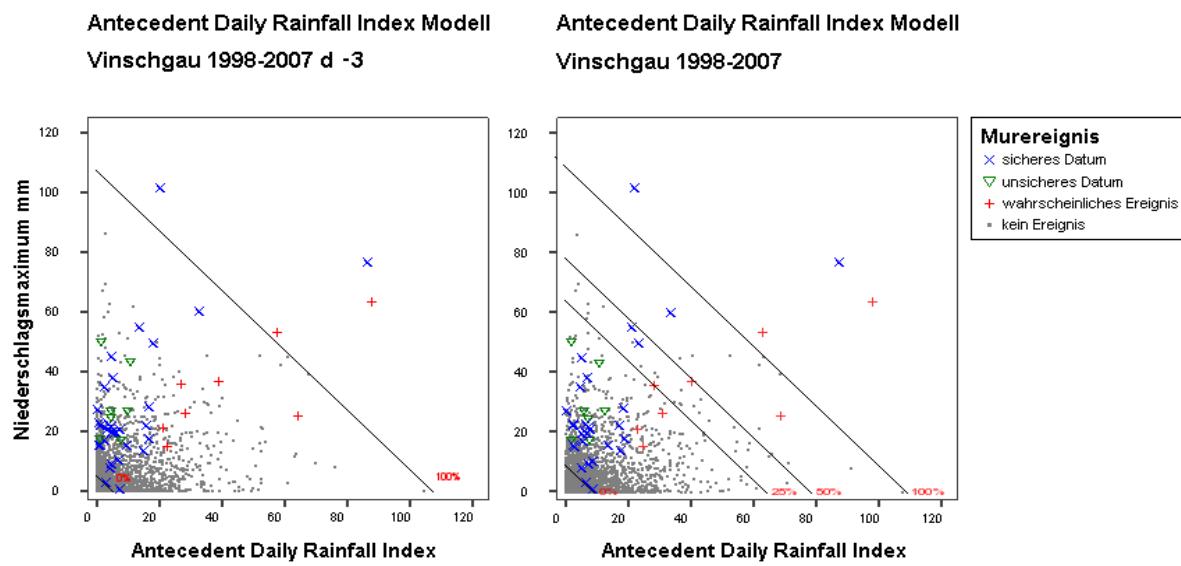


Abbildung 27: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit einem decay Faktor von -3 (links) und -2.055 (rechts).

Verringert man den decay Faktor (Abbildung 27), verschieben sich die Werte auf der x-Achse nach links. Durch den schnelleren Abfluss aus dem Boden, werden die Werte des ADRI kleiner. Es steht demnach weniger Wasser im Boden zur Disposition. Die Verschiebung nach links fällt jedoch im Gegensatz zu der Verschiebung nach rechts, die aufgrund der Verkleinerung des decay Faktors auftritt, deutlich schwächer aus. Das hat den Grund, dass die Verweildauer des Wassers bei einem decay Faktor von -2.055 ohnehin schon sehr kurz ist. Fließt das Wasser nun bei einem decay Faktor von -3 noch schneller aus dem Boden ab, so bleibt die Möglichkeit zur Veränderung sehr gering. Weitere Berechnungen haben gezeigt, dass eine weitere Verringerung des decay Faktors zu geringen bis gar keinen Änderungen bezüglich der Ergebnisse des Modells geführt hat.

Insgesamt hat also der decay Faktor einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse des Modells. Aber ab einem gewissen Wert, etwa zwischen -2 und -3, hat die Verringerung jedoch nur mehr einen geringen Einfluss auf die Resultate.

8.2 Sensibilität bezüglich der Länge des vorangegangenen Niederschlags

GLADE et al. (2000) haben bei ihrer Arbeit in Neuseeland bei der Berechnung des ADRI zehn Tage lang den vorangegangenen Niederschlag berücksichtigt. Auch im Rahmen dieser Arbeit wurden zehn Tage verwendet. Einige andere Autoren haben bei anderen Modellen unterschiedlich lange Zeiträume verwendet.

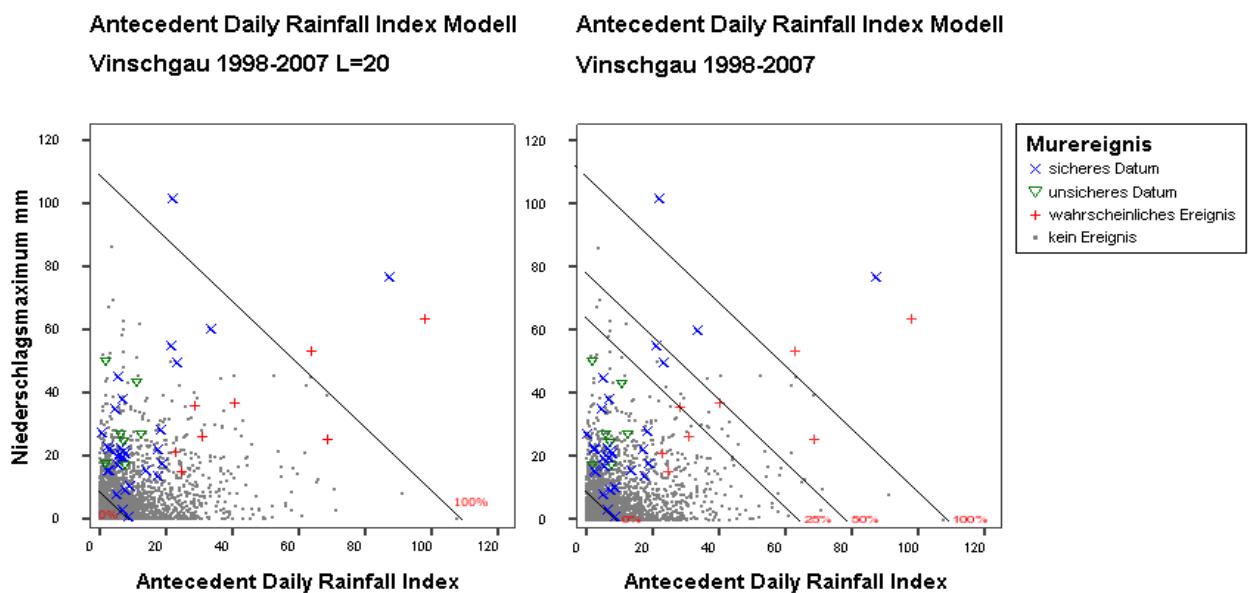


Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 20 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.

Abbildung 28 zeigt, warum der vorangegangene Niederschlag von zehn Tagen für das Antecedent Daily Rainfall Modell ausreichend ist. In der Abbildung sind die Ergebnisse des Modells mit einer berücksichtigten Länge von zehn und zwanzig Tagen vorangegangenem Niederschlag dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausweitung auf zwanzig Tage so gut wie keine Veränderungen mit sich bringt. Die Werte des ADRI erhöhen sich nur minimal. Der Grund dafür ist in der Formel (Formel 6, Kapitel 5.), die dem Modell zugrunde liegt, zu suchen. Bei der Berechnung des ADRI werden die Niederschlagswerte der vorangegangenen Tage umso mehr durch den decay Faktor verringert, je länger sie zurückliegen. Liegen nun die Niederschläge mehr als zehn Tage zurück, so werden sie so

stark verringert, dass sie nicht mehr ins Gewicht fallen. Ein Niederschlag von 50 Millimetern zum Beispiel, der 15 Tage zurückliegt, trägt zum ADRI des Tages nur mehr mit einem Wert von 0.19 bei.

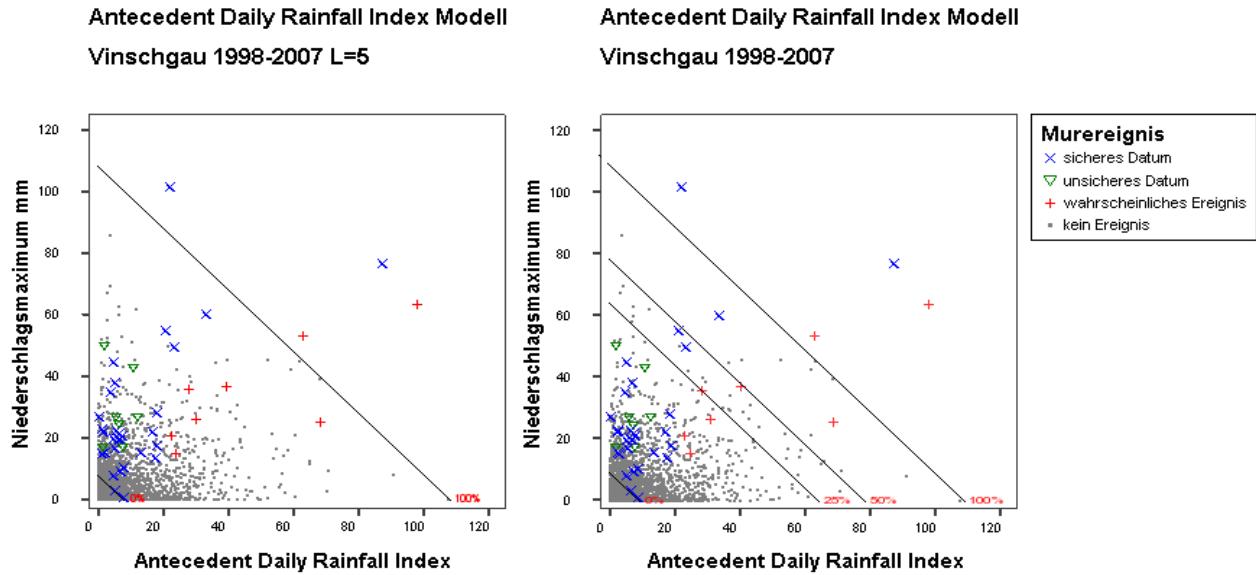


Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 5 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.

Auf der anderen Seite gilt es zu klären, was passiert wenn man die Länge von zehn Tagen verkürzt. Abbildung 29 zeigt, dass eine Verkürzung auf fünf Tage nahezu keine Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Generell werden die ADRI-Werte, wenn zwischen den fünf und zehn Tagen überhaupt Niederschlag gefallen ist, etwas kleiner. Jedoch ist die Verringerung der Werte so gering, dass sie nicht von Bedeutung ist. Auch der minimale und der maximale Niederschlagsschwellenwert verschieben sich auf der x-Achse um einen geringen Betrag nach links. So liegt der maximale Schwellenwert bei dem Modell mit zehn Tagen bei 109.77, während er bei dem Modell mit fünf Tagen bei 108.88 liegt. Auch der minimale Schwellenwert verschiebt sich nur um einen Wert von 1.33 nach links. Die Ursache für diese geringe Auswirkung einer Verkürzung um fünf Tage hat einen mathematischen Grund. Für den Vinschgau wurde im Rahmen dieser Arbeit ein relativ niedriger decay Faktor von -2.055 errechnet. Dieser Faktor bewirkt, dass Niederschläge die bereits sechs Tage zurückliegen schon um den Faktor 0.025 vermindert werden. Das heißt, dass zum Beispiel ein Niederschlag von 30 Millimetern, der bereits sechs Tage zurückliegt zum ADRI-Wert nur mehr mit einem Wert von 0.75 beiträgt. Die Niederschläge, die also zwischen sechs und zehn Tagen zurückliegen, tragen nur mehr in sehr geringem Ausmaß zu einer Erhöhung des ADRI-Werts bei. In weiterer Folge wurde das Modell auch mit drei Tagen vorangegangenem Niederschlag erstellt. Es hat sich gezeigt, dass sich die ADRI-Werte bei drei Tagen stärker

vermindern. Berücksichtigt man nur mehr zwei Tage lang den vorangegangenen Niederschlag, verändern sich die Ergebnisse schon deutlich (Abbildung 30). Die Anordnung der einzelne Datenpunkt verschiebt sich merklich. Der minimale Schwellenwert hat sich von 9.77 auf 5.33 verschoben, der maximale Schwellenwert jedoch nur von 109.77 auf 108. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass diese Schwellenwerte von einzelnen Werten der Tage, die rund um die Schwellenwerte liegen, abhängen und deren Veränderung deshalb nicht sehr aussagekräftig ist.

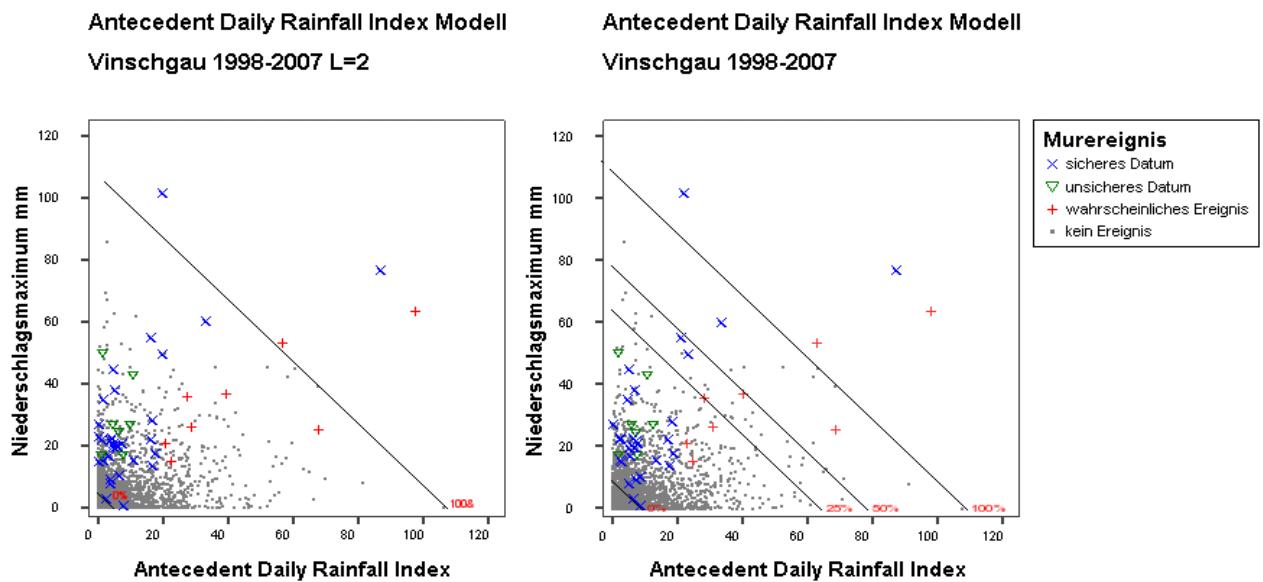


Abbildung 30: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 2 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.

Letztendlich konnte bewiesen werden, dass es vertretbar ist, zehn Tage vorangegangener Niederschlag bei dem Antecedent Daily Rainfall Model für den Vinschgau zu berücksichtigen. Eine Ausweitung auf zwanzig Tage brachte keine Veränderung der Ergebnisse. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass es aufgrund des niedrigen decay Faktors im Vinschgau auch zulässig wäre nur fünf Tage lang den vorangegangenen Niederschlag zu berücksichtigen. Zusätzlich ist es jedoch von den Daten und dem Untersuchungsgebiet abhängig wie weit man den Zeitraum des vorangegangenen Niederschlags, den man berücksichtigt, verkürzen kann.

9 Ausblick

Um bessere Ergebnisse erzielen zu können, ist es unumgänglich die Qualität der Daten zu verbessern. Die Ereignisdaten, die Niederschlagsdaten aber auch die Abflussdaten, die bei dieser Arbeit zur Verfügung standen, sind überaus verbesserungsbedürftig.

Eine genauere und sorgfältigere Erhebung der einzelnen Murereignisse würde dazu führen, dass man ausschließen kann, dass Muren, die sich ereignet haben, nicht beobachtet wurden. Eine sorgfältigere Erhebung der Ereignisdaten wird im Vinschgau bereits seit 1998 durchgeführt. Was die Ereignisse davor betrifft, gilt es, die Daten und deren Quellen erneut zu überprüfen und quellenkritisch zu lesen.

Darüber hinaus wäre es wünschenswert, bessere Niederschlagsdaten zur Verfügung zu haben, da es sich gezeigt hat, dass durch das vorhandene Netz an Wetterstationen nicht alle Niederschläge, die Muren ausgelöst haben, erfasst werden konnten. Außerdem waren die Niederschlagsdaten aufgrund ihrer Messung von 9 bis 9 Uhr nur bedingt mit dem Ereignisdatensatz kompatibel. Wetterradardaten könnten hier einen besseren Dienst bei der vollständigen Erfassung und der Kompatibilität der Niederschläge leisten. Mithilfe des Wetterradars könnten Niederschlagsdaten mit einer höheren zeitlichen und räumlichen Auflösung zur Verfügung stehen. Solche Daten gibt es vom Vinschgau auch bereits, jedoch standen sie für diese Arbeit nicht zur Verfügung.

Auch die Genauigkeit des decay Faktors, der die Verweildauer des Niederschlagswassers im Boden angibt, kann entscheidend verbessert werden. Die Abflussdaten, mithilfe derer der Faktor errechnet wurde, wiesen starke Beeinträchtigungen durch die Etschkraftwerke auf. Daher wäre es notwendig Abflussdaten von den Nebenflüssen der Etsch, an denen keine Kraftwerke liegen, für das Modell verwenden zu können, um die Qualität des decay Faktors verbessern zu können. Generell wäre es sinnvoll Bodeneigenschaften, wie zum Beispiel Feldkapazität, im Vinschgau zu erheben. Dadurch könnte man Modelle verwenden, die die Bodeneigenschaften zusätzlich berücksichtigen. GLADE (2000) zum Beispiel hat das Antecedent Soil Water Status Modell verwendet, dass zusätzlich zum Antecedent Daily Rainfall Modell die Bodeneigenschaften berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Differenzierung der Niederschläge nach ihrer Höhenlage. Zum Einen wird es mit zunehmender Höhe immer wahrscheinlicher, dass der Niederschlag in Form von Schnee fällt und somit nicht direkt zur Auslösung von Muren beitragen kann. Zum Anderen liegt die nächstgelegene Wetterstation und das Anrissgebiet der beobachteten Mure nicht immer auf derselben Höhe, womit es dazu kommen kann, dass eine Mure beobachtet wird, ohne dass an der nächstgelegenen Wetterstation Niederschläge registriert

werden. Hier würden Wetterradardaten beide Probleme lösen, da es möglich ist diese der Höhe nach aufzulösen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich Muren im Vinschgau nur im Zeitraum von Mai bis November und hauptsächlich während der Sommermonate ereignen. Deshalb wäre der nächste Schritt, das Modell nur auf den Zeitraum von Mai bis November zu beschränken und die restlichen Monate bei der Berechnung der Niederschlagsschwellenwerte nicht zu berücksichtigen. Das könnte zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisse führen, weil man dadurch einen großen Anteil von Tagen mit hohen Niederschlägen, an denen keine Mure beobachtet worden ist, aus dem Modell herausnehmen könnte.

Lohnenswert wäre auch eine verbesserte Anpassung der Schwellenwertsgeraden an die umliegenden Werte. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Geraden mit einer Steigung von -1 verwendet. Es wäre auch möglich gewesen die Niederschlagsschwellenwerte mithilfe von anderen Kurven darzustellen. CROZIER & EYLES (1980) haben zum Beispiel Geraden mit flacheren Steigungen verwendet. Bei dem Ergebnis ab 1920 wäre das aufgrund der Lage der Datenpunkte nicht möglich gewesen und bei dem Ergebnis ab 1998, hätten flachere Geraden dazu geführt, dass der minimale Schwellenwert einen deutlich geringeren Niederschlagswert aufgewiesen hätte. GLADE et al. (2000) verwendeten bei ihrer Arbeit verschiedene Kurven als Niederschlagsschwellenwerte. Sie unterzogen ihre Ergebnisse einer statistischen Prüfung, um die ideale Kurvenform für den Niederschlagsschwellenwert jedes einzelnen Ergebnisses herauszufinden. Das wäre prinzipiell im Zuge dieser Arbeit auch möglich gewesen, hätte aber deren Rahmen gesprengt.

10 Zusammenfassung

Muren sind innerhalb der Alpen eine häufig auftretende Naturgefahr, die große Schäden anrichten kann. Deshalb wird der Bedarf innerhalb der Gesellschaft nach Schutzmaßnahmen immer lauter. Frühwarnsysteme können einen großen Beitrag zum Schutz vor Muren leisten. Ein wichtiger Bestandteil solcher Frühwarnsysteme sind Niederschlagsschwellenwerte, mithilfe derer man Aussagen darüber treffen kann, wie wahrscheinlich das Auftreten von Muren bei bestimmten Niederschlagsmengen ist. Wird zum Beispiel der maximale Niederschlagsschwellenwert überschritten oder erreicht, kommt es statistisch mit einer hundert prozentigen Wahrscheinlichkeit zu einer Mure. Solche Niederschlagsschwellenwerte bilden also eine Grundlage für Frühwarnsysteme. Die zentrale Hypothese dieser Arbeit lautete also, dass die Auslösung von Muren im Vinschgau an Niederschlagsschwellenwerte gekoppelt ist, die mithilfe von statistischen Modellen berechnet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Niederschlagsschwellenwerte für die Auslösung von Muren mithilfe des Antecedent Daily Rainfall Models nach GLADE et al. (2000) für den Vinschgau errechnet.

Zu Beginn dieser Arbeit standen Niederschlagsdaten von 17 Wetterstationen des hydrographischen Amts Bozen mit unterschiedlich langen Zeitreihen zur Verfügung. Die längste Zeitreihe geht bis zum Jahr 1920 zurück. Darüber hinaus stand ein Datensatz des Amts für raumbezogene und statistische Informatik in Bozen zur Verfügung, der 351 dokumentierte Murereignisse mit geographischer Lage und Datum beinhaltete. Außerdem wurden die Abflussdaten von zwei Pegelstationen an der Etsch, die das Hauptgerinne im Vinschgau darstellt, verwendet.

Bei dem Antecedent Daily Rainfall Modell werden jedem Tag zwei Werte zugeordnet: der maximale Niederschlag, der im Untersuchungsgebiet an diesem Tag aufgetreten ist, und der maximale Niederschlag, der an den dem Murereignis vorangegangenen zehn Tagen gefallen ist. Der vorangegangene Niederschlag wird durch einen Verfallskoeffizienten, dem decay Faktor, der mithilfe von den Abflussdaten errechnet wird, vermindert. Dieser decay Faktor soll den vorangegangenen Niederschlag um jenen Betrag vermindern, der in Form von Abfluss aus dem Hang verloren geht. Das Ergebnis des Modells stellt ein Streudiagramm aller Tage dar, die prinzipiell in Tage mit keinem beobachteten Murereignis und Tage mit einer beobachteten Mure unterteilt werden. Innerhalb dieses Diagramms wurden dann die Niederschlagsschwellenwerte eingezeichnet.

Vor der Erstellung des Modells, wurde der Ereignisdatensatz einer Analyse unterzogen, bei der festgestellt werden konnte, dass Muren im Vinschgau nur im Zeitraum von Mai bis November, hauptsächlich jedoch in den Sommermonaten, stattfinden.

Das Modell für den Zeitraum von 1920 bis 2007 lieferte keine realistischen Resultate. Einerseits gab es sehr viele Tage mit hohen Niederschlagswerten, an denen keine Mure beobachtet werden konnte und andererseits gab es viele Tage mit niedrigen oder gar keinen Niederschlägen, an denen eine Mure beobachtet wurde. Das liegt daran, dass einerseits nicht alle aufgetretenen Muren beobachtet werden konnten und andererseits dass nicht alle lokalen Niederschläge durch das Netz der Wetterstationen aufgezeichnet werden konnten.

Um das Modell zu verbessern, wurde es nochmals nur für den Zeitraum von 1998 bis 2007 erstellt, da die Aufzeichnung der Muren ab 1998 durch die Einführung eines standardisierten Formulars verbessert wurde. Die Ergebnisse für diesen Zeitraum waren realistischer. Es konnte für den Vinschgau nachgewiesen werden, dass der Niederschlag am Tag der Mure wesentlich größere Bedeutung für die Auslösung einer Mure hat, als der vorangegangene Niederschlag. Die errechneten Niederschlagsschwellenwerte sind aufgrund zahlreicher Mängel der Daten in Frage zu stellen. Die Niederschlagsdaten wiesen eine geringe räumliche Auflösung auf. Da es sehr häufig lokal begrenzte Sommergewitter sind, die Muren auslösen, war die Art der Niederschlagsdaten nur begrenzt für das Modell geeignet. Auch der Ereignisdatensatz wies erhebliche Mängel auf. Nach einer genauen Prüfung hat sich ergeben, dass bei einer Vielzahl von Ereignissen das Datum nicht bekannt war und diesen deshalb ein beliebiges Datum zugeordnet wurde.

Außerdem wurde die Sensibilität des Modells bezüglich des decay Faktors und der Länge des Zeitraums, innerhalb dessen man den vorangegangenen Niederschlag berücksichtigt, getestet. Es zeigte sich, eine Ausweitung von 10 auf 20 Tage keine Änderungen bewirkte. Auch eine Herabsetzung des Zeitraums auf fünf Tage veränderte die Ergebnisse nicht. Der decay Faktor hat einen wesentlich größeren Einfluss auf das Modell. Fällt der decay Faktor jedoch unter einen Wert von etwa -2, hat die Verringerung keinen großen Einfluss mehr auf die Ergebnisse des Modells.

Es wurde im Rahmen dieser Arbeit bewiesen, dass das Antecedent Daily Rainfall Modell für Muren angewendet werden kann. Letztendlich konnte gezeigt werden, dass im Vinschgau der Niederschlag, der am Tag der Mure fällt, wesentlich wichtiger für die Auslösung ist, als der vorangegangene Niederschlag. Darüber hinaus können die Erkenntnisse dieser Arbeit zu einer verbesserten Anwendung des Antecedent Daily Rainfall Modells für Muren beitragen. Mit einer gezielten Verbesserung der Daten, kann das Modell durchaus als Grundlage zur Konzeption von Frühwarnsystemen für Muren dienen, indem es realistische Niederschlagsschwellenwerte liefert.

11 Literaturverzeichnis

- AHNERT F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. Ulmer, Stuttgart.
- ALEOTTI P. (2004): A warning system for rainfall-induced shallow failures. In: Engineering Geology 73, S.247-265.
- AULITZKY H. (1980): Preliminary Two-fold classification of torrents. Interpraevent 1980, Vol. IV, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung Klagenfurt, S.285-309
- BEVERAGE J.P. und CULBERTSON J.K. (1964): Hyperconcentrations of suspended sediment. In: Journal of the Hydraulics Division, A.S.C.E., 90, S.117-128.
- BOSELLINI A. (1998): Geologie der Dolomiten. Verlagsanstalt Athesia, Bozen.
- BROOKS S.M., CROZIER M.J., GLADE T. und ANDERSON M.G. (2004): Towards Establishing Climatic Thresholds for Slope Instability: Use of a Physically-based Combined Soil Hydrology-slope Stability Model. In: Pure and Applied Geophysics, 161, S.881-905.
- BRUCE J.P. und CLARK R.H. (1966): Introduction to Hydrometeorology. Pergamon Press.
- BRUNSDEN D. (1984): Mudslides. In: Slope Instability. Wiley, Chichester, S.363-418.
- CAINE N. (1980): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, Series A, Vol. 62, S.23-27.
- CHLEBORAD A.F., ELLIS W.L. und KIBLER D. (1997): Results of Site Investigation and Instrumentation of the Keno Gulch Landslide/Debris-flow Source Area, Aspen, Colorado (USGS Open File Report 97-717). US Geological Survey, Reston, VA.
- COSTA J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. In: COSTA J.E. und FLEISHER P.J. (Hrsg.), Developments and Applications of Geomorphology, S.268-317, Springer Verlag, Berlin.
- COUSSOT P. und MEUNIER M. (1996): Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth-Science Reviews 40, S.209-227.
- CROSTA G.B. und FRATTINI P. (2003): Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 3, S.81-93.
- CROZIER M.J. (1986): Landslides: causes, consequences & environment. Croom Helm, London.
- CROZIER M.J. (1999): Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. Earth Surface Processes and Landforms 24 (9), S.825-833.
- CROZIER M.J. und EYLES R.J. (1980): Assessing the probability of rapid mass movement. In: Proc. Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, Vol. 6, Wellington: New Zealand Institution of Engineers, S.247-251.

- CRUDEN D.M. (1991): A Simple Definition of a Landslide. In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Nr.43, S.27-29.
- CRUDEN D.M. und VARNES D.J. (1996): Landslides types and processes. In: Turner, A.K. & Schuster, R.L. (Hrsg.) (1996): Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C., S.36-75.
- CORNFORTH D.H. (2005): Landslides in Practice. Wiley, Hoboken.
- DEGANUTTI A.M., MARCHI L. und ARATTANO M. (2000): Rainfall and debris-flow occurrence in the Moscardo basin (Italian Alps). In: WIECZOREK G.F. und NAESER N.D. (Hrsg.), Debris flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment: Proceedings of the 2nd Int. Conference, Taipei, Taiwan. A.A. Balkema, Rotterdam.
- DE VITA P. und REICHENBACH P. (1998): Rainfall-triggered Landslides: a reference list. In: Environmental Geology 35, S.219-233.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN M.L. (Hrsg.) (1996): Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Wiley, Chichester.
- FISCHER K. (1975): Murkegel, Schwemmkegel und Kegelsimse in den Alpentälern (unter besonderer Berücksichtigung des Vinschgaus). In: Mitteilungen Geogr. Gesellschaft 50, S.127-159.
- FLIRI F. (1998): Naturchronik von Tirol. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- GLADE T. (2000): Modelling landslide-triggering rainfalls in different regions of New Zealand - the soil water status model. In: Zeitschrift f. Geomorphologie, Suppl.-Bd.122, S.63-84.
- GLADE T., CROZIER M. und SMITH P. (2000): Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". In: Pure and Applied Geophysics 157, S.1059-1079.
- GOUDIE A. (2002): Physische Geographie. Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg.
- GUDICINI G. und IWASA O.Y. (1977): Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. In: Bulletin Int. Ass. Eng. Geol., 16, S.13-20.
- GUZETTI F., PERUCCACCI S., ROSSI M., STARK C.P. (2007): Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. In: Meteorology and Atmospheric Physics 98, S. 239-267.
- GUZETTI F., PERUCCACCI S., ROSSI M., STARK C.P. (2008): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. In: Landslides 5, S. 3-17.
- HORTON R.E. (1938): Phenomena of the contact zone between the ground surface and a layer of melting snow. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Paris, 244, S.545-561.
- HUNGR O. (2005): Classification and terminology. In: JAKOB M. und HUNGR O. (Hrsg.) (2005): Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer, Berlin, S.9-23.

- HUTCHINSON J.N. (1988): Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, General Report. In: Landslides, Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides, Vol.1, S.3-35.
- HYDROREPORT (2004) – Südtirol Alto Adige: Sonderdruck zum Klimareport Nr. 105, Nr. 9/2004; Hydrographisches Amt der autonomen Provinz Bozen.
- HYDROREPORT (2005) – Südtirol Alto Adige: Sonderdruck zum Klimareport Nr. 109, Nr.1/2005; Hydrographisches Amt der autonomen Provinz Bozen.
- IRPI (2009): <http://rainfallthresholds.irpi.cnr.it/> (abgerufen im Februar 2009)
- JACKSON L.E., KOSTASCHUK R.A. und Mac DONALD G.M. (1987): Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. Geological Soc. of America Reviews in Engineering Geology, 7, S.115-124
- JOHNSON A.M. und RODINE J.R. (1984): Debris flow. In: BRUNSDEN D. und PRIOR D.B. (Hrsg.): Slope Instability, S.257-361.
- KERSCHNER H. (1999): Muren als geomorphologische Phänomene. In: Relief Böden Paläoklima, Band 14, S.77-95
- KHEGAI A.Y., POPOV N.V., PLEKHANOV P.A. und KEREMKULOV V.A. (1992): Experiments at the Chemolgan debris-flow testing ground, Kazakhstan. Landslide News 6, S.27-28.
- KLEBELSBERG R. (1948): An der Etsch und im Gebirge, 5.Bändchen. Verlag A. Weger, Brixen.
- LARSEN M.C. und SIMON A. (1993): A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. In : Geografiska Annaler, 75A, S.13-23.
- LESER H. (Hrsg.) (2005): DIERCKE-Wörterbuch Allgemeine Geographie. Westermann, München.
- LUZIAN R. (Hrsg.) (2002): Wildbäche und Muren. Eine Wildbachkunde mit einer Übersicht von Schutzmaßnahmen der Ära Aulitzky. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien.
- MENARA H. (2002): Lieblingsland Südtirol. Verlagsanstalt Athesia, Bozen.
- ORTNER P. und MAYR C. (1993): Kulturlandschaft Südtirol. Verlagsanstalt Athesia, Bozen.
- PASUTO A. und SILVANO S. (1998): Rainfall as a trigger of shallow mass movements. A case study in the Dolomites, Italy. In: Environmental Geology 35 (2-3), S.184-189.
- PIERSON T.C. (2005): Hyperconcentrated flow - transitional process between water flow and debris flow. In: Jakob M. und Hungr O. (Hrsg.), Debris flow hazards and related phenomena. Springer, Berlin, S.159-202.
- PIERSON T.C. und COSTA J.E. (1987): A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. Geological Soc. of America Reviews in Engineering Geology 7, S.1-12.
- SCHNEIDER-MUNTAU B. und FELLIN W. (2005): Fallstudie Mure Nals: Untersuchung des Muranbruchs mittels Standsicherheitsberechnung. In: Öst. Ingenieurzeitung- und Architekturzeitung (ÖIAZ) 150, Heft 2-3, S.42-45

- SCHUSTER R.L. und WIECZOREK G.F. (2002): Landslide triggers and types. In: Rybár J., Stemberk J. und Wagner P. (Hrsg.), Proceedings of 1st Europeen Conference on Landslides, Prague, A.A. Balkema, Rotterdam, (S.59-71).
- SELBY M.J. (1993): Hillslope Materials and Processes. Oxford Univ. Press, Oxford.
- SHARPE C.F.S (1938): Landslides and Related Phenomena. Columbia University Press, New York.
- STAINDL A. (1982): Kurze Geologie von Südtirol. Verlag A. Weger, Brixen.
- STARKE L. (1979): The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. In: Geographica Polonica, 41, S.13-20.
- STINY J. (1910): Die Muren. Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. Wagner, Innsbruck.
- TAKAHASHI T. (2007): Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis Group, London.
- TERLIEN M.J.M. (1998): The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. In: Environmental Geology, 35 (2-3), S. 124-130.
- VARNES D.J. (1978): Slope movements: type and processes. In: Eckel E.B. (Hrsg.): Landslides Analysis and Control, Transportation Research Board, Special Report 176, National Academy Press, Washington D.C., S. 11-33.
- VAW (1992): Murgänge 1987. Dokumentation und Analyse, Teil 1.-Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Bericht 97.6.
- WANNANEN A.O., HARRIS D.D. und WILLIAMS R.C. (1970): Floods of December 1964 and January 1965 in the Far Western States. Part 2: Streamflow and Sediment Data (USGS Water-Supply Paper 1866B). US Geological Survey, Reston, V.A.
- WEBER A. (1964): Studienblätter zur Wildbach- und Lawinenverbauung.
- WHITE I.D., MOTTERSHEAD D.N. und HARRISON J.J. (1996): Environmental Systems. Chapman & Hall, London.
- WIECZOREK G.F. (1987): Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: COSTA J.E. und WIECZOREK G.F. (Hrsg.), Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation. Geological Society of America, Boulder, CO.
- WIECZOREK G.F. und GLADE, T. (2005): Climatic Factors influencing occurence of debris flows. In: Jakob M. und Hungr O. (Hrsg.), Debris flow hazards and related phenomena. Springer, Berlin, S.325-362.
- WILSON R.C. (1989): Rainstorms, pore pressures and debris flows: A theoretical framework. In: SADLER P.M. und MORTON D.M. (Hrsg.), Landslides in Semi-Arid Environment. Inland Geological Society, Riverside, CA.

WILSON R.C. (2000): Climatic variations in rainfall thresholds for debris-flow activity. In: CLAPS P. und SICCARDI F. (Hrsg.), Proceedings of the 1st Plinius Conference on Mediterranean Storm, Maratea, Italien, European Geophysical Union and Editoriale Bios.

WILSON R.C. und WIECZOREK G.F. (1995): Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. In: Environmental and Engineering Geoscience, 1 (1), S. 11-27.

ZEPP H. (2002): Grundriß Allgemeine Geographie: Geomorphologie. Schöningh, Paderborn.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konsistenzgrenzen nach ATTERBERG (in ZEPP 2002, S. 108 nach GOUDIE 1998)	8
Abbildung 2: Schema eines Earth Flows (aus CRUDEN & VARNES 1996, S.65).....	9
Abbildung 3: Schema eines Dry Sand Flows (aus CRUDEN & VARNES 1996, S.65).	9
Abbildung 4: Wildbachklassifikation nach AULITZKY 1980 (aus LUZIAN 2002, S. 30).....	16
Abbildung 5: Feilenanbruch (nach WEBER 1964 aus LUZIAN 2002, S.31).	17
Abbildung 6: Muschelanbruch (nach WEBER 1964 aus LUZIAN 2002, S.37).....	18
Abbildung 7 : Querschnitt einer Murbahn mit abgelagerten Levees (aus KERSCHNER 1999, S.79).....	20
Abbildung 8: Grenze zwischen Abfluss, hyperkonzentriertem Fließen und Muren bezüglich des Scherwiderstandes in Abhängigkeit von der Sedimentkonzentration (aus PIERSON 2005, S.163).....	23
Abbildung 9: Bingham'sches Fließmodell (nach JOHNSON & RODINE 1984 aus KERSCHNER 1999, S. 81)	24
Abbildung 10: Übersichtskarte Südtirol, nach www.info-suedtirol.com, verändert.....	33
Abbildung 11: täglicher Niederschlag in Schlanders 2006.	35
Abbildung 12: monatlicher Niederschlag in Schlanders 1998, 2005 und 2006.	36
Abbildung 13: tägliches Temperaturminimum in Tisens 2004.....	36
Abbildung 14: Geologische Übersichtskarte Südtirol aus STAINDL (1982, Buchdeckel), verändert; die rote Linie zeigt den Verlauf der Etsch durch den Vinschgau.....	37
Abbildung 15: Lage der verfügbaren Wetterstationen.....	42
Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Murereignisse im Vinschgau.....	43
Abbildung 17: Darstellung der durchgeführten Arbeitsschritte.	46
Abbildung 18 : Ergebnis des Antecedent Daily Rainfall Modells für die Otago Halbinsel, Neuseeland nach CROZIER & EYLES (1980) aus GLADE et al. (2000, S.1067).	48
Abbildung 19: Thiessenpolygone zur Ermittlung des Gebietsniederschlags für den Vinschgau.....	50
Abbildung 20: Abflussganglinie der Etsch bei der Pegelstation Töll für das Jahr 1990.	52
Abbildung 21: Zeitliche Verteilung aller Murereignisse.	57
Abbildung 22: Zeitliche Verteilung der Murereignisse ab 1920.	58
Abbildung 23: Verteilung der Murereignisse der Kategorie „Sicheres Datum“ ab 1920.....	58
Abbildung 24: Antecedent Daily Rainfall Modell für den Vinschgau, 1920-2007, die eingezeichneten Geraden stellen die Niederschlagsschwellenwerte für die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten dar.	59

Abbildung 25: Antecedent Daily Rainfall Modell für den Vinschgau 1920-2007, die eingezeichneten Geraden stellen die Niederschlagsschwellenwerte für die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten dar	60
Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit einem decay Faktor von -1 (links) und -2.055 (rechts).....	67
Abbildung 27: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit einem decay Faktor von -3 (links) und -2.055 (rechts).....	68
Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 20 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.	69
Abbildung 29: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 5 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.	70
Abbildung 30: Vergleich der Ergebnisse des Antecedent Daily Rainfall Modells mit 10 Tagen (rechts) und mit 2 Tagen berücksichtigtem vorangegangenen Niederschlag.	71

13 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach CRUDEN & VARNES (1996, S. 38), verändert.</i>	5
<i>Tabelle 2: Gefälle und Rauhigkeit von Murkegeln und Schwemmfächern nach JACKSON et al. 1987 in DIKAU et al. 2002, S.166.....</i>	20
<i>Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Abfluss, hyperkonzentriertem Fließen und Muren (nach COSTA 1984 in SELBY 1993, S. 302, verändert).</i>	24
<i>Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Daten.</i>	41
<i>Tabelle 5: Zeitreihen der Niederschlagsaufzeichnung der Wetterstationen im Vinschgau. ...</i>	42
<i>Tabelle 6: Flächenausmaß der einzelnen Thiessenpolygone zur Erstellung des Gebietsniederschlags.....</i>	51
<i>Tabelle 7: Errechnete Abflussrückgänge, die den Anforderungen entsprochen haben.</i>	53

14 Anhang

Anhang I: kurzer wissenschaftlicher Lebenslauf

Anhang II: Auszug aus dem Ereignisdatensatz

Anhang III: Befehle im SPSS zur Erstellung des Modells

Anhang I: kurzer wissenschaftlicher Lebenslauf

2001: Beginn des Studiums der Geographie an der Universität Wien

2005: Abschluss des 1. Studienabschnitts

2005: Beginn des 2. Studienabschnitts, Theoretische und Angewandte Geographie mit dem Schwerpunkt Geomorphologie, selbstständige Spezialisierung auf gravitative Massenbewegungen und insbesondere Muren, Absolvierung mehrerer Lehrveranstaltungen des Masterstudienlehrgangs Mountain Risk Engineering an der Universität für Bodenkultur in Wien

2007: Absolvierung eines Praktikums in der Firma Geo Expert Research & Planning GmbH

2009: Abgabe der Diplomarbeit

Anhang II: Auszug aus dem Murereignisdatensatz

Datum	Datumtyp	Gewässer	Schäden Verbauungen	Verkehrsnetz	Priv Gebäude	Note
31.07.1968	Sicheres Datum	A.420.20 - Naumaierbach	0	0	0	Taufers/Münstertal Turnaunacker Mure
06.08.1995	Sicheres Datum	A.220.5 - Lahnbach	1	1	0	"Caused by a big storm, the debris flow obstructed the underpass of the National Road n. 38 and flooded the carriageway. The day after the phenomenon occurs again but in a lighter magnitude."
01.08.1996	Unsicheres Datum	A.375 - Tschengelserbach	0	0	0	Evento recuperato da foto d'ufficio. PI 96124 (?). Sgomberati ca 1000 m per 9.000.000 di lire
01.08.1996	Unsicheres Datum	A.340.10 - Gadriabach (Quadriab.)	0	0	0	Evento recuperato da foto d'ufficio. PI 96124 (?). Sgomberati ca 9000 m per 63.000.000 di lire
28.07.1997	Unsicheres Datum	A.505.85 - Kapplerbach	0	0	0	28.07.1997 Kapplbach Mure, Ursache heftiger Regen (Einsatzbericht FF Langtaufers)
20.07.1998	Sicheres Datum	A.230.40 - Montferterbach	1	1	0	Area di deposito: 2,5 -3ha;
06.08.1999	Sicheres Datum	A.285.80	1	0	0	MORFOMETRIA EVENTO: deflusso massimo: 12 m^3/sec;
06.08.1999	Sicheres Datum	A.400.45.30 - Alpenrosenbach	0	0	0	NOTE: Rio Rododendro (2046 / A.400.45.30); MORFOMETRIA EVENTO: deflusso massimo: 15 m^3/sec;
06.08.1999	Sicheres Datum	A.300 - Vezzanerbach (Lahngraben)	0	0	0	NOTE: nessun danno; MORFOMETRIA EVENTO: deflusso massimo: 40 m^3/sec;
16.08.1999	Sicheres Datum	A.375 - Tschengelserbach	0	1	0	NOTE: danno a opera di presa?; MORFOMETRIA EVENTO: inclinazione media: 28%; deflusso massimo: 14 m^3/sec;

Datum	Ortschaft	Tote	Schäden Wirtschaft	Landwirtschaft	History	Volumen	Fotos	Gemeinde	Literaturtitel	Literatur Autoren
31.07.1968	Turnauna	0	0	1	1	0	0	Taufers im Münstertal	Naturchronik von Tirol	Fliri, Franz
06.08.1995		0	0	0	1	12000	0	Naturns		
01.08.1996		0	0	0	1	0	0	Laas		
01.08.1996		0	0	0	1	9000	0	Laas		
28.07.1997	Vallelunga - Langtaufers - Kappl	0	0	0	1	0	0	Graun im Vinschgau	Einsatzbericht der FF Langtaufers	
20.07.1998		0	0	0	0	8500	15	Schländers		
06.08.1999	Martell	0	0	0	0	3000	2	Martell		
06.08.1999	Trafoi	0	0	1	0	8000	8	Stilfs		
06.08.1999	Goldrain	0	0	0	0	3000	3	Schländers		
16.08.1999	Tschengels	0	0	1	0	20000	28	Laas		

Anhang III: Befehle im SPSS zur Erstellung des Modells

Ausgabe erstellt		21-JAN-2009 16:44:22
Kommentare		
Eingabe	Daten	C:\Dokumente und Einstellungen\Mark\Desktop\Diplomar beit\Daten\Modell\Modellberechnung endgültig.sav
	Filter	filter_\$ (FILTER)
	Gewichtung	<keine>
	Aufgeteilte Datei	<keine>
Syntax		IGRAPH /VIEWNAME='Streudiagramm' /X1 = VAR(adri) TYPE = SCALE /Y = VAR (maximum) TYPE = SCALE /COLOR = VAR(murereig) TYPE = CATEGORICAL /COORDINATE = VERTICAL /TITLE='Antecedent Daily Rainfall Index Modell' /SUBTITLE='Vinschgau 1998-2007' /X1LENGTH=3.0 /YLENGTH=3.0 /X2LENGTH=3.0 /CHARTLOOK='C:\Programme\SPSS \Looks\Klassik.clo' /CATORDER VAR(murereig) (DESCENDING VALUES OMITEMPTY) /SCATTER COINCIDENT = NONE.
Ressourcen	Verstrichene Zeit	0:00:00,03