



# Geomorphologische Untersuchungen zu Muren im Gamperdonatal



***Diplomarbeit***

***am Institut für Bautechnik und Naturgefahren***

*vorgelegt von*

*Seeberger Georg*

*zur Erlangung des akademischen Grades*

*Diplomingenieur*

**Betreuer:**

*Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl*

*Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna*

## **Kurzfassung**

Muren sind gravitative Massenverlagerungsprozesse, die ein fließendes Verhalten aufweisen und grundsätzlich aus den Komponenten Wasser, Luft, Feinmaterial und Grobmaterial bestehen.

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist der Vergleich von Muren in Schutthalden und Muren in bestehenden Gerinnen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einer im Gamperdonatal in Vorarlberg durchgeführten Kartierung von je 5 Muren, sowie der Ausarbeitung der geomorphologischen Unterschiede.

Zur Erfassung und Gegenüberstellung dieser Merkmale wurden im Sommer 2013 und 2014 Querprofile, Längsneigungen, Korngrößenverteilungen und für Muren typische geomorphologische Strukturen aufgenommen. Dabei konnten Unterschiede bei den Sammelgebieten, bei den Quer- und Längsprofilen, am Mur- bzw. Schuttkegel, in der Häufigkeit und in der Entstehung festgestellt werden. Beim Vergleich der Korngrößenverteilungen konnten keine signifikanten Unterschiede ausgemacht werden.

Zusätzlich wurde eine Versuchsanlage konstruiert und versucht eine Mure in einer Schutthalde nachzustellen. Dabei wurden die Mindestneigung für das Auftreten von Muren sowie die Auswirkung einer Änderung der Wasserinputdauer und der Neigung für das Modell bestimmt.

## **Abstract**

Debris flows are gravitational mass movement processes which have a flowing behavior and basically consist of the components water, air, fine material and coarse material.

This master thesis deals with the comparison of talus slope debris flows and channelized debris flows. The emphasis is on a survey of 5 debris flows each, conducted in Gamperdonatal in Vorarlberg, and the documentation of the geomorphological differences.

For capturing and comparison of these characteristics cross sections, longitudinal inclinations, grain size distribution and typical geomorphological pattern were recorded during summer of 2013 and 2014. We found differences in contributing areas, in the transverse and longitudinal profiles, deposition pattern on fans and talus slopes, in the frequency and in the likely formation. When comparing the grain size distribution, no significant differences were identified.

Additionally an experimental setup was constructed to simulate a miniaturized debris flow on a talus slope. The minimum required slope, the effect of a change in the water input time and the inclination of the model were determined.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>4</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>13</b>
<b>VORWORT</b> .....	<b>14</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG</b> .....	<b>15</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>16</b>
1.1 Problemstellung (G.S.) .....	16
1.2 Fragestellung und Zielsetzung .....	17
1.3 Theoretische Grundlagen .....	18
1.3.1 Massenumlagerungsprozesse (G.S.) .....	18
1.3.2 Murgang (G.S.) .....	18
1.3.2.1 Definitionen (G.S.) .....	19
1.3.2.2 Einzugsgebiete (M.B.) .....	23
1.3.2.3 Mur- bzw. Schuttkegel (M.B.) .....	24
1.3.2.4 Querprofile (M.B.) .....	26
1.3.3 Murgangentstehung (G.S.) .....	27
1.3.3.1 Entstehungsmechanismen nach TOGNACCA (1999) (G.S.): .....	27
1.3.3.2 Auslösebedingungen (G.S.) .....	29
<b>2 METHODEN</b> .....	<b>32</b>
2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes (M.B.) .....	32

---

2.1.1	Geografie (M.B.).....	32
2.1.2	Geschichte und Chronik (M.B.) .....	33
2.1.3	Entwässerung, Hydrologie und Meteorologie (M.B.) .....	34
2.1.4	Geologie und Geomorphologie (M.B.).....	38
2.1.4.1	Überblick (M.B.).....	38
2.1.4.2	Untersuchungsgebiet (M.B.) .....	39
2.1.4.3	Hauptdolomit (M.B.) .....	42
2.1.4.4	Aufnahmegebiete (M.B.).....	43
2.1.4.5	Panülerkopf (M.B.) .....	43
2.1.4.6	Fundelkopf (M.B.).....	44
2.1.5	Vegetation (M.B.).....	45
<b>2.2</b>	<b>Methodik Feldarbeit .....</b>	<b>47</b>
2.2.1	Vorbereitung und Datengrundlagen (M.B.) .....	47
2.2.2	Kartierung (M.B.) .....	47
2.2.3	Gefälleverlauf (G.S.).....	49
2.2.4	Querprofile (M.B.).....	49
2.2.5	Korngrößenverteilung (G.S.) .....	50
<b>2.3</b>	<b>Methodik Labor .....</b>	<b>53</b>
2.3.1	Korngrößenanalyse der Proben (G.S.).....	53
2.3.2	Mineralogische Untersuchung, Gesamtmineralbestand (G.S.).....	54
<b>2.4</b>	<b>Methodik Modell (G.S.).....</b>	<b>54</b>
2.4.1	Ähnlichkeit eines hydraulischen Modells (G.S.) .....	54
2.4.2	Aufbau Versuchsanlage (G.S.).....	56
2.4.3	Versuche (G.S.).....	58
2.4.4	Dimensionslose Kennzahlen (G.S.).....	58
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION - FELDARBEIT (M.B.) .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Kartierung (M.B.) .....</b>	<b>59</b>
3.1.1	Einzugsgebiete (M.B.) .....	59

---

3.1.1.1	Fundelkopf (M.B.).....	59
3.1.1.2	Panülerkopf (M.B.) .....	60
3.1.1.3	Bärrarüfe (M.B.).....	62
3.1.1.4	Rinne 3 (M.B.).....	63
3.1.2	Sammelgebiete (M.B.) .....	64
3.1.2.1	Fundelkopf (M.B.).....	64
3.1.2.2	Panülerkopf (M.B.) .....	65
3.1.2.3	Bärrarüfe (M.B.).....	66
3.1.2.4	Rinne 3 (M.B.).....	68
3.1.3	Mur- bzw. Schuttkegel (M.B.) .....	69
3.1.3.1	Fundelkopf (M.B.).....	69
3.1.3.2	Panülerkopf (M.B.) .....	71
3.1.3.3	Bärrarüfe (M.B.).....	72
3.1.3.4	Rinne 3 (M.B.).....	75
3.1.4	Zeitliche Kartierung und Frequenz (M.B.).....	80
3.1.4.1	Bärrarüfe (M.B.).....	80
3.1.4.2	Rinne 3 (M.B.).....	83
<b>3.2</b>	<b>Gefälleverlauf (M.B.).....</b>	<b>85</b>
3.2.1	Fundelkopf (M.B.) .....	85
3.2.2	Panülerkopf (M.B.).....	87
<b>3.3</b>	<b>Querprofile (M.B.).....</b>	<b>89</b>
3.3.1	Gegenüberstellung (M.B.).....	89
3.3.1.1	Innere Bildstöcklerüfe (M.B.) .....	89
3.3.1.2	Rinne 3 (M.B.).....	91
<b>3.4</b>	<b>Korngrößenverteilung (G.S.) .....</b>	<b>99</b>
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION - LABOR (G.S.).....</b>	<b>100</b>
4.1	Korngrößenanalyse der Proben (G.S.) .....	100
4.2	Mineralogische Untersuchung (G.S.) .....	100

---

<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE DISKUSSION MODELL (G.S.)</b> .....	<b>102</b>
5.1	Vergleich (G.S.) .....	103
5.2	Dimensionslose Kennzahlen (G.S.) .....	105
5.3	Videoaufnahmen (G.S.) .....	106
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>107</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>110</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>115</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht über die Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (ONR 24800, 2009) .....	19
Abbildung 2:	Typischer Längsschnitt durch einen Murschub mit abnehmender Feststoffkonzentration von der Front gegen den hinteren Teil nach PIERSON (1986), modifiziert, aus RICKENMANN (2014) .....	21
Abbildung 3:	Komplexer Aufbau eines Murkegels im Ritigraben (Schweiz) nach STOFFEL (2013); .....	25
Abbildung 4:	Durch Georadar ermittelte interne Schichtung von Mur -bzw. Schuttkegeln nach SASS und KRAUTBLATTER (2006). B: inhomogener Schichtaufbau eines Murkegels durch zahlreiche Murablagerungen; C: oberflächenparallele Schichtung in Schuttkegeln durch Steinschlag..	25
Abbildung 5:	Paralleler Schichtaufbau eines Schuttkegels im Reintal (SASS und KRAUTBALTTER 2006) ...	26
Abbildung 6:	Einteilung der Querprofile einer Murrinne nach HÜBL (2009) .....	27
Abbildung 7:	Empirische Beziehungen für kritische Niederschlagsverhältnisse bei der Auslösung von Murgängen. Die Daten für die Schweiz sowie das entsprechende Grenzkriterium stammen von ZIMMERMANN et al. (1997). Das Grenzkriterium für Österreich ist von HÜBL, J. BOKU Universität Wien, (2001). Die Grenzbedingung für die weltweiten Daten stammt von CAINE (1980) und basiert auf flachgründigen Hangrutschungen und Hangmuren aus RICKENMANN (2014). .....	30
Abbildung 8:	Konzeptionelles Modell der Zwischenspeicherung von Schutt in step-pool Systemen nach KEAN et al. (2013). (a) lokale Deposition von Geschiebe im flachen Bereich; (b) weitere Ablagerungen formen einen wasserdurchlässigen Damm und weiteres Material kann sich darüber akkumulieren; (c) gefüllter Speicher; (d) durch weiteren Eintrag wird ein Murschub ausgelöst; .....	31
Abbildung 9:	Wesentliche Geschiebelieferungsprozesse in Wildbächen und die Rolle bei der Bildung von Murgängen (RICKENMANN 2014) .....	31
Abbildung 10:	Überblick über das Gamperdonatal mit den zwei Aufnahmegebieten, A: Bärarüfe westlich des Fundelkopfes, B: Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes .....	32
Abbildung 11:	Mittlere jährliche Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet und die Verteilung der Messstationen um die Aufnahmegebiete nach dem AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG (2001) .....	35
Abbildung 12:	Links: Ganglinie des Jahresniederschlags für den Rätikon (rot); rechts: Häufigkeit und zeitliche Verteilung für das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte des Tagesniederschlags in der nahegelegenen Gemeinde Bürs (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2001) .....	37

Abbildung 13: Dolomitrhomboeder im Transportgebiet der Bärarüfe, längste Achse ca. 60 cm lang .....	38
Abbildung 14: Geologisch-tektonische Übersichtskarte Vorarlbergs der GBA Wien (1998).....	39
Abbildung 15: Tektonische Karte des Rätikons mit den zwei Aufnahmegebieten nach KOBEL (1969), die grüne Linie stellt den Schnitt der Abbildung 16 dar .....	40
Abbildung 16: Profil durch das Untersuchungsgebiet nach KOBEL (1969), Position des Schnittes in Abbildung 15 nachzusehen .....	41
Abbildung 17: Fließrichtung der Gletscher während der Würmeiszeit nach SEIJMONSBERGEN (1992) .....	42
Abbildung 18: Geomorphologische Karte des Aufnahmegebietes westlich des Panülerkopfes nach HEISSEL et al. (1965) .....	43
Abbildung 19: Störungen in den Sammelgebieten der Muren westlich des Panülerkopfes nach BISCHOF (2010) .....	44
Abbildung 20: Geomorphologische Karte des Aufnahmegebietes westlich des Fundelkopfes nach HEISSEL et al. (1965) .....	45
Abbildung 21: Feldkartierung der Rinne 2; zu sehen sind: Position der Querprofile und Fotos (Sx1 bis Sx7), Murablagerung (schwarz), Verschneidungspunkt (rot), Stellen mit lateraler Erosion (blau) und Blöcke (blaue Kreise).....	48
Abbildung 22: Aufnahmeformular für die Querprofile .....	50
Abbildung 23: Die drei Hauptachsen eines Steines. Bei der Linienzahlanalyse wird die mittlere Achse (b-Achse) gemessen (FEHR, 1987) .....	50
Abbildung 24: Prinzipskizze zur Linienzahlanalyse, Draufsicht. Erfasst für die Analyse werden die b-Achsen der dunkel eingefärbten Steine, die in Berührung mit der aufgespannten Linie stehen (BEZZOLA 2004).....	51
Abbildung 25: Beispiel für eine Ergänzung der Feinkomponenten nach Fuller. Lineare Skalierung .....	52
Abbildung 26: Beispiel für eine Ergänzung der Feinkomponenten nach Fuller. Logarithmische Skalierung;	53
Abbildung 27: Versuchsanlage: Beregnungsanlage (A), Reservoir mit Dosieranlage (B), Wassereinleitung (C), Rinne (D), Wasserauffangbehälter (E), Gitter (F), Neigungsmesser ( $\alpha$ ).....	56
Abbildung 28: Korngrößenverteilung Sand Vorderbergerbach.....	57
Abbildung 29: Korngrößenverteilung Bruchkorn .....	57
Abbildung 30: Die 5 untersuchten Rinnen westlich des Fundelkopfes von Nord nach Süd: Studazug, Bärarüfe, Äußere Bildstöcklerüfe, Innere Bildstöcklerüfe und die Jobanrüfe .....	59
Abbildung 31: Die 5 untersuchten Muren westlich des Fundelkopfes von Ost nach West: Rinne 7, Rinne 5, Rinne 4, Rinne 3 und Rinne 2 .....	61

Abbildung 32: Einzugsgebiet der Bärarüfe, die hellblaue Fläche stellt den unbewaldeten Teil des Murkegels dar .....	62
Abbildung 33: Einzugsgebiet der Rinne 3 .....	63
Abbildung 34: Sammelgebiete der 5 untersuchten Muren am Westhang des Fundelkopfes.....	64
Abbildung 35: Sammelgebiete der 5 untersuchten Schutthaldenmuren.....	65
Abbildung 36: Sammelgebiet der Bärarüfe: A: große Störungszone; B: flache Teilstrecke an der der Schutt zwischengespeichert wird; C: einer der drei canyonartigen Rinnen kurz vor dem Übergang in den Murkegel .....	67
Abbildung 37: Sammelgebiet der Rinne 3: A: Mit Schnee verfüllte Senke in der Hauptrinne erschwert die Zwischenspeicherung von Schutt; B: Unterbrechung der Hauptrinne durch einen ca. 60 m Absturz; C: Schneefeld am Übergang zwischen Fels und Schuttkegel .....	68
Abbildung 38: Murkegel der 5 kartieren Muren westlich des Fundelkopfes .....	69
Abbildung 39: Verhältnis von Sammelgebietsfläche zu Murkegelfläche der Muren westlich des Fundelkopfes (in ha).....	70
Abbildung 40: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes.....	71
Abbildung 41: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes.....	72
Abbildung 42: Murkegel der Bärarüfe. A: Hauptgerinne mit Levees und Seitenerosion; B: Levees und Ablagerungen des letzten Ereignisses mit Verschneidungspunkt (roter Querstrich); C: Position der aktuellen Rinne sowie Position von früheren Rinnen und früheren Levees; D: Gesamtüberblick über den Murkegel der Bärarüfe .....	74
Abbildung 43: A: Hauptgerinne mit bewachsenen Levees und Seitenerosion; B: Ablagerung und Verschneidungspunkt des letzten Ereignisses; C: frühere Rinnen und Levees zum Teil schon bewachsen; D: Gesamtüberblick über den Murkegel der Bärarüfe.....	75
Abbildung 44: Schuttkegel der Rinne 3. A: Position des aktuellen Rinne und Seitenerosion; B: Ablagerungen, Levees und Überschneidungspunkt (roter Querstrich) des letzten Ereignisses; C: Levees und Gerinne früherer Ereignisse; D: Gesamtüberblick über den Schuttkegels der Rinne 3 .....	76
Abbildung 45: Schuttkegel der Rinne 3: A: Hauptgerinne mit starker lateraler Erosion entlang des Transportgebietes; B: Ablagerung und Überschneidungspunkt des letzten Ereignisses; C: frühere Gerinne und Levees; D: Gesamtüberblick über den Schuttkegel der Rinne 3 .....	77
Abbildung 46: Feilanbruch (A), Keilanbruch (B) nach Stiny (1931).....	78

Abbildung 47: Aufbau eines Mur- bzw. Schuttkegels; rechts: starke Durchmischung von feinem und grobem Material im Transportgebiet der Bärarüfe; rechts: feines und grobes Material parallel zur Schuttkegeloberfläche geschichtet (Transportgebiet Rinne 4); die Höhe wurde links lotrecht und rechts normal zur Schichtung gemessen .....	79
Abbildung 48: Murgangaktivität am Fundelkopf zwischen 1951 und 2012 .....	81
Abbildung 49: Kartierung der Ereignisse der Bärarüfe zwischen 1951 und 2012 .....	82
Abbildung 50: Murgangaktivität am Panülerkopf zwischen 1951 und 2013.....	83
Abbildung 51: Kartierung der Ereignisse Rinne 3 zwischen 1951 und 2013 .....	84
Abbildung 52: Überblick über die Sammelgebiete und die Bereiche I - IV der Muren westlich des Fundelkopfes.....	85
Abbildung 53: Überblick über die Sammelgebiete und die Bereiche I - IV der Muren westlich des Panülerkopfes. ....	87
Abbildung 54: Neigungen und Distanzen der Bereiche I - IV der Inneren Bildstöcklerüfe (Tabelle). Die Bereiche (rechts) wurden nach charakteristischen Querprofilen (links unten) eingeteilt. Die Position der Querprofile und der Bereiche I - IV ist links oben ersichtlich .....	90
Abbildung 55: Neigungen und Distanzen der Bereiche I - IV der Rinne 3 (Tabelle). Die Bereiche (rechts) wurden nach charakteristischen Querprofilen (links unten) eingeteilt Die Position der Querprofile und der Bereiche I - IV ist links oben ersichtlich.....	91
Abbildung 56: Querprofil beim Felsauslass der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts) ....	92
Abbildung 57: Querprofil im Bereich I (Kegelspitze) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts) .....	93
Abbildung 58: Querprofil im Bereich II (Transportgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts) .....	94
Abbildung 59: Querprofil im Bereich III (Verschneidungsgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts).....	95
Abbildung 60: Querprofil im Bereich IV (Ablagerungsgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts).....	96
Abbildung 61: Kartierung eines kleinen Murabganges in der Rinne 3 (links). Die Ablagerung und die Levees befinden sich in der Gegend des Verschneidungspunktes der Mure von 2012 oder 2013. Der Verlauf der Profilform ist rechts dargestellt. Das Querprofil ändert sich von fast eben (DEM 2009 vor der Mure 2012/2013) über u-förmig (Profil von der Aufnahme 2013) bis zu einem trapezförmigen Profil (Aufnahme 2014). ....	97
Abbildung 62: Vergleich: punktierte Linien sind Schutthalde muren; durchgängige Linien sind Muren in bestehenden Gerinnen .....	99

---

Abbildung 63: Verteilung der Feinanteile.....	100
Abbildung 64: Mineralphasen der Bodenprobe bei Rinne 3 .....	101
Abbildung 65: Murgangversuch mit 4 Liter Wassermenge, 35 Grad Neigung und Querprofilen; Begrenzung in weiß.....	103
Abbildung 66: Wassermenge von 4 Litern und Neigung von 20 Grad (A), 25 Grad (B), 30 Grad (C) und 35 Grad (D); Begrenzung in weiß .....	104
Abbildung 67: Wassermenge von 5 Liter und Neigung von 20 Grad (A), 25 Grad (B), 30 Grad (C) und 35 Grad (D); Begrenzung in weiß .....	105
Abbildung 68: Gegenüberstellung der Querprofile der zwei Arten von Muren in den Bereichen I - IV .....	108
Abbildung 69: Stratigrafisches Sammelprofil der sedimentären Schichtfolgen mit ungefähren, relativen Mächtigkeiten im Bereich des Untersuchungsgebietes nach BISCHOF (2010) .....	115

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Eigenschaften der charakteristischen Verlagerungsprozesse in Wildbächen ONR 24800 (2009).....	22
Tabelle 2:	Klassifizierung des Leitprozesses eines Einzugsgebietes nach WILFORD et al. (2004) .....	23
Tabelle 3:	Charakteristische Neigungen von Ablagerungskegeln nach ONR 24800 (2009).....	24
Tabelle 4:	Jahreszeiten- und Jahressummen des Niederschlages (mm) in verschiedenen Höhenstufen für den Walgau und das Rätikon, berechnet aus Höhenregressions-Modellen (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2001). .....	36
Tabelle 5:	Kenndaten der Einzugsgebiete der Muren am Westhang des Fundelkopfes .....	60
Tabelle 6:	Kenndaten der Einzugsgebiete der Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes .	61
Tabelle 7:	Kenndaten der Sammelgebiete der Muren westlich des Fundelkopfes .....	65
Tabelle 8:	Kenndaten der Sammelgebiete der Schutthaldenmuren .....	66
Tabelle 9:	Kenndaten der Murkegel westlich des Fundelkopfes .....	70
Tabelle 10:	Kenndaten der Schuttkegel westlich des Panülerkopfes .....	72
Tabelle 11:	Neigungsübersicht über die Sammelgebiete und Murkegel der Muren westlich des Fundelkopfes .....	86
Tabelle 12:	Neigungsübersicht über die Sammelgebiete und Murkegel der Muren westlich des Panülerkopfes .....	88
Tabelle 13:	Dimensionslose Kennzahlen .....	105
Tabelle 14:	Geomorphologische Merkmale und durchschnittliche Neigung der zwei verschiedenen Arten von Muren.....	107
Tabelle 15:	Niederschlagsdaten der nahegelegenen Messstellen; AMT DER VORARLBERGER LANDERSREGIERUNG (2001) .....	116

## **Vorwort**

### Danksagung:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna

Monika Stanzer

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Franz Ottner

DI Fritz Zott

Martin Falkensteiner

WLV Bludenz

Florian Dietrich

Agrar Nenzing

DI Siegbert Terzer

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, Oktober 2015

### Autoren:

Aufgrund des großen Projektumfangs der vorliegenden Arbeit, wurde diese von zwei Autoren verfasst. Die Kapitel sind im Inhaltsverzeichnis dem jeweiligen Autor zugeordnet. Jene Kapitel, welche im Inhaltsverzeichnis mit keiner Autorenbenennung versehen sind, wurden gemeinsam erarbeitet. Grund für die gemeinsame Ausarbeitung ist die Tatsache, dass die Geländebegehung und Kartierung alleine nicht möglich gewesen wären. Die einzelnen Kapitel sind mit den Initialen M.B. für Markus Beck G.S. für Georg Seeberger gekennzeichnet.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung (G.S.)

Das Gamperdonatal im Südwesten Vorarlbergs ist ein "Hotspot" für Murgänge. Eine Besonderheit dieser Gegend ist, dass hier auf relativ kleiner Fläche eine größere Anzahl von zwei verschiedenen Arten von Murgängen zu finden ist. Zum einen sind es die klassischen Muren, die einem bestehenden Wildbachgerinne folgen und zum anderen Muren, die in Schutthalden entstehen.

Dieses Gebiet ist für wissenschaftliche Untersuchungen interessant, denn beide Arten von Murgängen liegen im Hauptdolomit und haben etwa die gleiche Exposition. Aufgrund der geringen Distanz zwischen den Murgängen sind die Witterungsbedingungen sehr ähnlich und die Vorfeuchten sind vergleichbar. Bei Extremniederschlägen können natürlich auch hier die Bedingungen räumlich variieren.

Muren beschädigen oder verlegen regelmäßig die einzige Straße, die das Feriendorf im Gamperdonatal mit der Marktgemeinde Nenzing verbindet. Im Schnitt muss die Straße jedes Jahr ein- bis zweimal für Räumungsarbeiten gesperrt werden. Alle 3 Jahre sind Instandsetzungsarbeiten an der Böschung oder Asphaltreparaturen an ein bis zwei Stellen notwendig. Die Kosten pro Sanierungsstelle betragen durchschnittlich ca. 5.000 - 10.000 €. Beim Hochwasser im August 2005 musste die Straße für 10 Tage gesperrt werden. Die Straße wurde an mehreren Stellen mit über 2500 m<sup>3</sup> Geröll verlegt. Auf einer Strecke von 1,6 km waren Neubau- oder Asphaltierungsarbeiten notwendig. Die Kosten dafür beliefen sich auf ca. 400.000 €, wovon ca. 50 % durch den Katastrophenfonds refundiert wurden (TERZER, 2015).

Weitaus größer als das finanzielle Risiko ist im Gamperdonatal das Risiko für die menschliche Gesundheit. Muren können Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s (54 km/h) erreichen und es können Blöcke von bis zu 50 Tonnen verfrachtet werden (RICKENMANN, 2011). Aufgrund dieser Eigenschaften sind die Murgänge im Gamperdonatal lebensgefährlich für Wanderer und Personen welche mit Fahrzeugen die Straße befahren.

## **1.2 Fragestellung und Zielsetzung**

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den morphologischen Unterschied zwischen Murgängen in einem bestehenden Gerinne und Muren in Schutthalden, die sich ihr Gerinne selbst formen, vielleicht Muren oder murähnliche Prozesse ausbilden und oft noch in der Schutthalde zum Stehen kommen, herauszuarbeiten. Die Fragestellung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Was sind die Unterschiede zwischen Muren in einem bestehenden Gerinne und Muren in Schutthalden?
- Welche Bedingungen sind Voraussetzung für Muren oder murartigen Transport?

Diese Fragen werden durch folgende Schritte beantwortet:

- Geomorphologische Kartierung der Muren im Gerinne und der Muren in Schutthalden
- Kartierung morphologischer Merkmale ausgewählter Muren seit 1951
- Bestimmung der Sammelgebiete und deren relevante Kennzahlen
- Erstellung von Längs- und Querprofilen und vergleichendes Gegenüberstellen der aufgenommenen Muren
- Modellversuch: Versuch der Nachbildung einer Mure in einer bestehenden Schutthalde

## **1.3 Theoretische Grundlagen**

### **1.3.1 Massenumlagerungsprozesse (G.S.)**

Massenumlagerungsprozesse sind ein Oberbegriff für Massenbewegungen einerseits und Massentransporte andererseits. Bei Massentransporten wird die Masse (Felsblöcke, Lockermaterial, Erdgut, organische Materialien) durch ein Transportmittel oder Träger befördert. Als Träger findet man meistens Wasser, aber auch Luft oder Eis können als Fördermittel dienen. Ein klassischer Massentransport ist z.B. der fluviale Geschiebetrieb. Bei Massenbewegungen dagegen bewegt sich die Masse von selbst unter der Einwirkung der Gravitationskraft ohne den Einfluss eines Schmiermittels. Typische Beispiele sind Felsstürze oder Erdbeben. Es gibt aber Phänomene, für welche eine eindeutige Zuordnung zum einen oder zum anderen Prozess schwierig oder gar nicht möglich ist. Dies ist der Fall für einige Fließphänomene, unter anderem für Murgänge. Es ist ein Streitpunkt, ob Murgänge eher zu den Massenbewegungen oder zu den Massentransporten gezählt werden sollen (TOGNACCA 1999).

### **1.3.2 Murgang (G.S.)**

Murgänge sind laut COSTA (1984) gravitative Massenverlagerungsprozesse, die ein fließendes Verhalten aufweisen und grundsätzlich aus den Komponenten Wasser, Luft, Feinmaterial und Grobmaterial bestehen.

Murgänge lassen sich aufgrund ihrer Materialzusammensetzung und ihrem Verhältnis zwischen solider und fluider Phase von anderen terrestrischen Massenumlagerungsprozessen qualitativ unterscheiden. Die Übergänge zu anderen Prozessen (Geschiebetransport, hyperkonzentrierter Abfluss, Rutschung, Gerölllawine, Schlammstrom) sind jedoch fließend und heutzutage sind noch keine allgemeingültigen Kriterien bekannt, die eine zweifellose und saubere Abtrennung der verschiedenen Phänomene ermöglichen (siehe Abbildung 1) (TOGNACCA, 1999; HÜBL et al., 2012; ONR 24800, 2009).

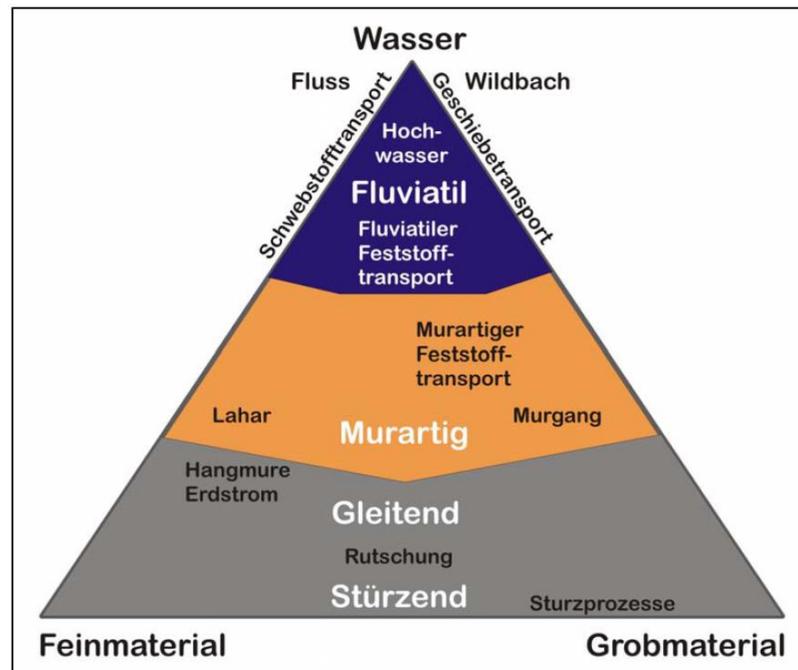


Abbildung 1: Übersicht über die Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten (ONR 24800, 2009)

Der Hauptgrund für die unklare Abgrenzung zu anderen Umlagerungsprozessen liegt in der Komplexität der Vorgänge. Die größte Schwierigkeit liegt laut TOGNACCA (1999) darin, dass man versucht, die einzelnen Prozesse zu klassifizieren ohne genaue Kenntnis ihrer physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu haben. Aus diesem Grund werden immer wieder neue Klassifikationsansätze vorgeschlagen, die für eine bestimmte Zeit der Forschung dienen, bis sie dank neuer Erkenntnisse überholt oder verbessert werden.

### 1.3.2.1 Definitionen (G.S.)

Neben einer klaren Abgrenzung zu anderen Massenumlagerungsprozessen fehlt auch eine einheitliche Definition für den Begriff Murgang. In der Literatur findet man eine große Anzahl verschiedener Definitionen.

Beispiele:

- "Ein Murgang ist in der Regel ein schnellfließendes Gemisch von Lockermaterial und unterschiedlichen Anteilen von Wasser. Murgänge weisen an der Front eine hohe Feststoffkonzentration auf und zeichnen sich durch ein schubartiges Fließverhalten aus, das sich deutlich von Reinwasser-Abfluss unterscheidet." (RICKENMANN, 2014, 48)

- "Murgänge sind mehrphasige, instationäre, ein breites Spektrum an Erscheinungsbildern aufweisende, terrestrische Massenumlagerungsprozesse, die wegen ihres Wasseranteils ein fluidähnliches Verhalten zeigen und die gleichzeitig verschiedene rheologische Verhaltensmuster aufweisen können." (TOGNACCA, 1999, 13)
- „A debris flow is a gravity-induced mass movement intermediate between landslide and waterflooding, with mechanical characteristics different from either of these processes". (JOHNSON, 1970, zitiert nach TOGNACCA 1999)
- "Debris flows are rapidly flowing mixtures of water, clay, and granular materials and often triggered by torrential rains in mountainous areas." (WANG et al., 2008, 47)
- TAKAHASHI (2007) definiert einen Murgang 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, and it attains larger mobility from the enlarged void space saturated with water or slurry“
- „Eine Mure setzt sich aus Wasser, Fein- und Grobgeschiebe zusammen und kann deshalb als 3-Phasen Gemisch bezeichnet werden. In Muren tritt keine Entmischung auf, da alle Fraktionen mit etwa derselben Geschwindigkeit bewegt werden. Durch die hohe effektive Viskosität entsteht eine laminare Strömung, in der Störungen rasch gedämpft werden. Das äußere Erscheinungsbild einer Mure ist die Murwelle, die in Front, Körper und Schwanz gegliedert werden kann.“ (HÜBL, 1995, 194)
- „Debris flows are geophysical phenomena intermediate in character between rock avalanches and flash floods. They commonly originate as water-laden landslides on steep slopes and transform into liquefied masses of fragmented rock, muddy water, and entrained organic matter that disgorge from canyons onto valley floors.“ ( IVERSON, 2013, 573)
- Laut ONR 24800 (2009) ist Murgang eine "langsam bis schnell abfließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz, die sich dann entwickelt, wenn in kurzer Zeit große Geschiebemengen verfügbar werden".  
Die mittransportierten Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt zwischen 1700 kg/m<sup>3</sup> und 2400 kg/m<sup>3</sup>, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration von 40 Prozent bis 70 Prozent typisch ist.

Zusätzlich wird laut ONR 24800 (2009) eine einzelne deutlich ausgeprägte Welle eines Murgangs als Murschub bezeichnet (Abbildung 2).

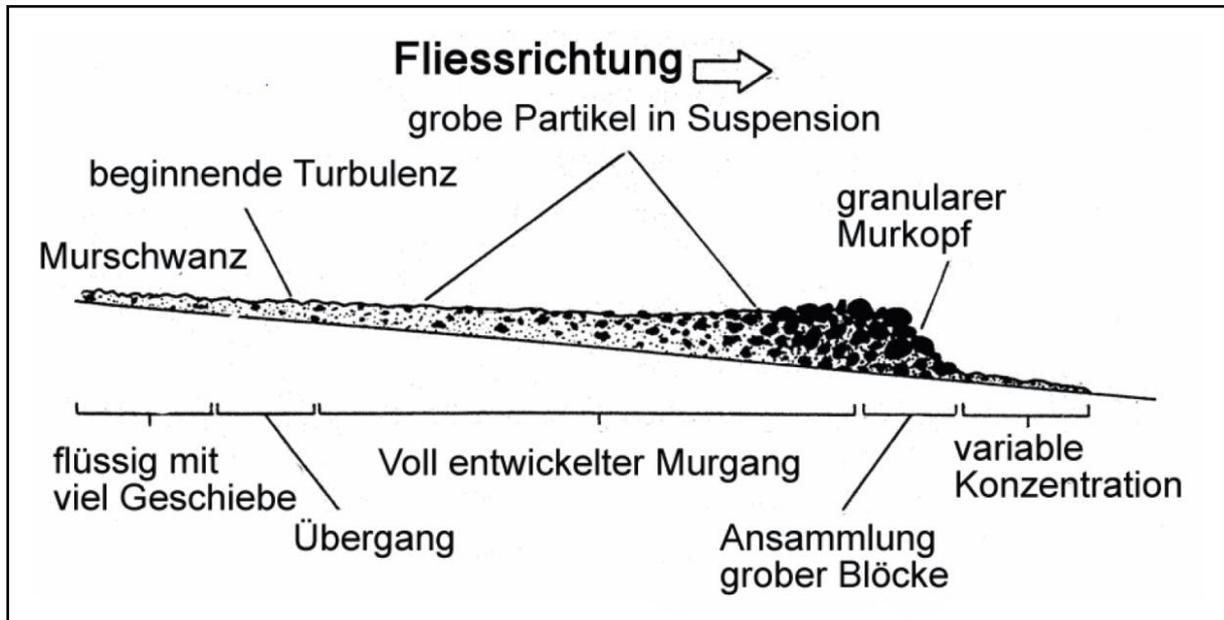


Abbildung 2: Typischer Längsschnitt durch einen Murschub mit abnehmender Feststoffkonzentration von der Front gegen den hinteren Teil nach PIERSON (1986), modifiziert, aus RICKENMANN (2014)

Ein Murgang kann sich laut ONR 24800 (2009) aus mehreren Murschüben zusammensetzen, die einer bereits ausgebildeten Tiefenlinie folgen und eine typische Bewegungsform sowie charakteristische Ablagerungsformen (gemäß Tabelle 1) aufweisen.

Muren oder murähnliche Prozesse hinterlassen häufig typische geomorphologische Strukturen (AULITZKY, 1992). Solche morphologische Besonderheiten sind lappenförmige Ablagerungen, seitliche Levees und Zwischenablagerungen von Muren in meist tief eingeschnittene Rinnen (JOHNSON, 1984). Auch der Über- oder Verschneidungspunkt ist charakteristisch für Muren. Er stellt jenen Punkt dar, an dem sich die im Schutt eingetiefte Rinne über die Geländeoberfläche erhebt. Dies ist meist der Übergangspunkt zwischen Transport- bzw. Erosionsgebiet und dem Ablagerungsgebiet (BLAIR et al., 1994).

Tabelle 1: Übersicht über die Eigenschaften der charakteristischen Verlagerungsprozesse in Wildbächen ONR 24800 (2009)

Verlagerungstyp	Hochwasser		Mure	
	fluvial	Fluvialer Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
Verlagerungsart	fluvial		murartig	
Terminus	Hochwasser	Fluvialer Feststofftransport	Murartiger Feststofftransport	Murgang
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwach Feststofftransport stark		Murgang
Fließverhalten	newtonisch	newtonisch	annähernd newtonisch	nicht newtonisch
Vol. Feststoffkonzentration $c_v$ (Bereich)	Promillebereich	0 % bis 20 %	20 % bis 40 %	> 40%
Größtkorn	mm bis cm	bis dm	bis m	bis m
Dichte (Bereich)	1000 kg/m <sup>3</sup>	< 1300 kg/m <sup>3</sup>	1300 kg/m <sup>3</sup> bis 1700 kg/m <sup>3</sup>	> 1700 kg/m <sup>3</sup>
Bestimmung des Reinwasser-Abflusses möglich	ja	eingeschränkt	nein	nein
Pegelschlüssel erstellbar	ja	ja	nein	nein
$Q_{\text{gesamt}}/Q_{\text{Hochwasser}}$	1	1 bis 1,4	1,4 bis 3,5	> 3,5
Viskosität (ungefähr)	0,001 Pa bis 0,01 Pa	0,01 Pa bis 0,2 Pa	0,2 Pa bis 2 Pa	> 2 Pa
Scherfestigkeit	keine	keine	keine	vorhanden
maßgeblich wirkende Kräfte	Turbulenz, Schleppspannung	Turbulenz, Schleppspannung	Auftrieb, Turbulenz, Schleppspannung, dispersiver Druck	Auftrieb, dispersiver Druck, viskose und friktionale Kräfte
Verteilung der Feststoffe im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe sohlennah (rollend, hüpfend, springend) und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe und Schweb verteilt im Querschnitt	Feststoffe verteilt im Querschnitt
Ablagerungsform (stumme Zeugen)	Bankige Feinstoffrückstände	Sortierte Fächer und Lappen	Bänke und Lappen, zumeist korngestützt, Grobgeschiebe bis in Höhe Wasserspiegel abgelagert	Murköpfe, Murfirste (Levéés) und zungenförmige Lappen, korn- oder matrixgestützt, zumeist scharfe Begrenzung der Ablagerungen, U-förmiges Abflussprofil
Sortierung der abgelagerten Feststoffe	vorhanden	vorhanden	eher nicht vorhanden	nicht vorhanden
Entmischung der Ablagerungen	ja	ja	ja/nein	nein
Schaden durch	Wasser und Schweb	Wasser, Schweb und Geschiebe	Feststoffe und Wasser	Feststoffe (und Wasser)

Ebenso wird in der ONR 24800 (2009) zwischen granulären, steinigen Muren mit überwiegendem Anteil von groben Komponenten (Blöcke, Steine, Kies) und geringem Anteil an feinkörniger Matrix (kleiner 1 mm) und feinkörnigen Schlammuren die überwiegend oder ausschließlich aus feinkörnigem Material (kleiner 1mm) bestehen unterschieden.

In dieser Arbeit werden granuläre, steinige Muren behandelt und wir halten uns dabei an die Definitionen der ONR 24800.

### 1.3.2.2 Einzugsgebiete (M.B.)

Muren treten hauptsächlich in kleinen Einzugsgebieten (> 25 km<sup>2</sup>) mit einem mittleren Gerinnegefälle größer als 5 - 10 Prozent auf (RICKENMANN und SCHEIDL, 2010). Um den Leitprozess für die Einzugsgebiete zu bestimmen werden die Melton-Zahl (MELTON, 1965), das Reliefverhältnis (STRAHLER, 1958) und die Kombination aus beiden verwendet (Tabelle 2). Die Melton-Zahl ergibt sich aus der Höhendifferenz im Einzugsgebiet im Verhältnis zur Quadratwurzel der Einzugsgebietsfläche. Das Reliefverhältnis errechnet sich aus der Höhendifferenz des Einzugsgebietes dividiert durch die Gerinnelänge.

$$\text{Melton-Verhältnis: } M_E = \frac{\text{Elev}_{\max} - \text{Elev}_{\min}}{\sqrt{A_c}}$$

$$\text{Reliefverhältnis: } R = \frac{\text{Elev}_{\max} - \text{Elev}_{\min}}{L_G}$$

Tabelle 2: Klassifizierung des Leitprozesses eines Einzugsgebietes nach WILFORD et al. (2004)

Variables	Class boundaries		
	Floods	Debris floods	Debris flows
Melton and length	Melton <0.3	Melton 0.3 to 0.6 Melton >0.6 and length >2.7 km	Melton >0.6 and length <2.7 km
Melton and relief ratio	Melton <0.3	Melton 0.3 to 0.77 Melton >0.77 and relief ratio <0.42	Melton >0.77 and relief ratio >0.42

### 1.3.2.3 Mur- bzw. Schuttkegel (M.B.)

Die meisten Mur- bzw. Schuttkegel, die es in den Alpen gibt, entwickelten sich nach dem Rückgang der Gletscher aus dem Pleistozän, welche die Talböden bedeckten (BARONI et al., 2013). Die Neigung und die Art der Schichtung dieser Kegel sind von Eigenschaften wie Höhe, Neigung, Topographie und dem Kluffgefüge der darüber liegenden Felswand abhängig (SASS und KRAUTBLATTER, 2006).

Murkegel entstehen durch die Akkumulation von Sediment infolge von Massenbewegungsprozessen und Umlagerungsprozessen wie fluvialer Feststofftransporte, murartige Feststofftransporte und Muren (RICKENMANN und SCHEIDL, 2013). Ihre Morphologie reicht von einzelnen Murablagerungen über Murfächer und Murkegel bis zu gigantischen fluviatilen "Megafächern" (HARVEY, 2011) und wird durch die Prozesse und durch den Wasser und Sedimenteintrag aus dem Sammelgebiet gesteuert (HARVEY, 2013). Der Übergang vom Sammelgebiet zum proximalen Kegelbereich ist durch einen markanten Knick in der Längsneigung gekennzeichnet (KAITNA und HÜBL, 2013). Die Neigung der Kegel selber liegt zwischen 10 und 30 Grad (

Tabelle 3).

Tabelle 3: Charakteristische Neigungen von Ablagerungskegeln nach ONR 24800 (2009)

Ablagerungsprozess	Kegelneigung	Kegelform
Steinschlag und Felssturz	30 ° bis 40 °	Schuttkegel
Muren, Rutschungen	10 ° bis 30 °	Murkegel, Schuttkegel
Murartiger Feststofftransport, Geschiebetransport	5 ° bis 15 °	Schwemmkegel
Hochwasser und fluvialer Feststofftransport	< 5 °	Schwemmfächer

Die Schichtung der Murkegel ist sowohl im Längs als auch im Querprofil sehr inhomogen (Abbildung 4, B), was durch unzählige ineinander verschachtelte Murablagerungen (Abbildung 3) interpretiert werden kann (SASS und KRAUTBLATTER, 2006).

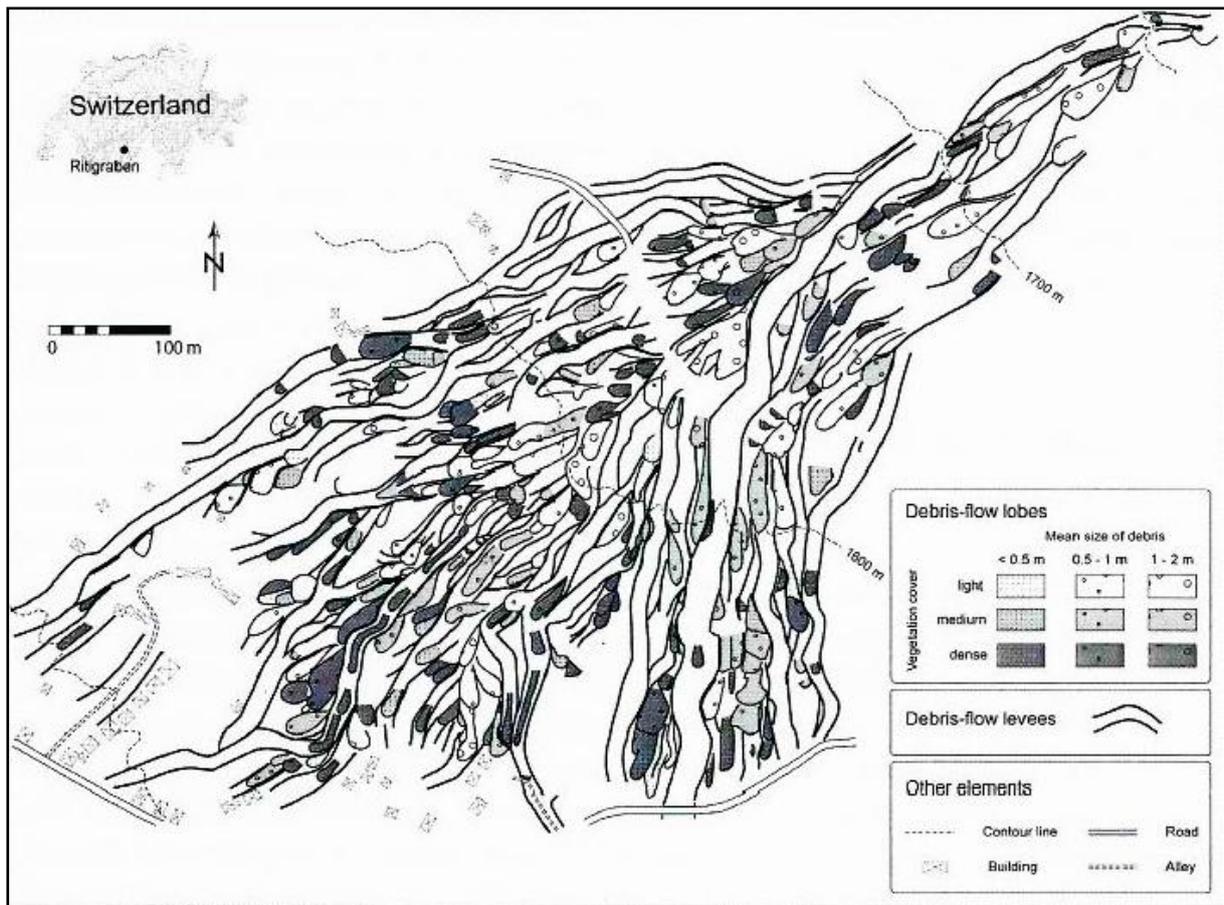


Abbildung 3: Komplexer Aufbau eines Murkegels im Ritigraben (Schweiz) nach STOFFEL (2013);

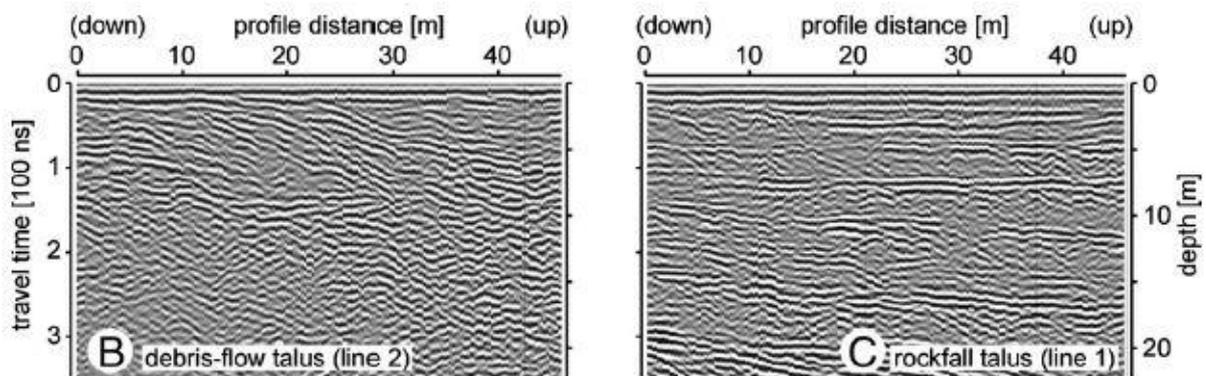


Abbildung 4: Durch Georadar ermittelte interne Schichtung von Mur - bzw. Schuttkegeln nach SASS und KRAUTBLATTER (2006). B: inhomogener Schichtaufbau eines Murkegels durch zahlreiche Murablagerungen; C: oberflächenparallele Schichtung in Schuttkegeln durch Stein-schlag

Schuttkegel entwickeln sich hauptsächlich durch Steinschlag oder Felssturz durch die Erosion der darüber liegenden Felswand (HUTCHINSON, 1998). Aber auch so genannte „dry grain flows“ können zum Aufbau beitragen. Sie entstehen durch Stein-

schlag oder durch übersteilte Schuttkegelablagerungen und enden als kohäsionsloser trockener Strom mit bis zu mehreren Metern Länge (SASS und KRAUTBLATTER, 2006). Auch die Verlagerung von Lockermaterial durch Schnee spielt vor allem an den Schnittpunkten der Schuttkegel eine Rolle. Die mittlere Neigung am proximalen Kegelbereich ist bei einer hohen Beteiligung von Steinschlag und Felssturz jedenfalls größer als 25 - 30 Grad (BARONI et al., 2013).

Durch Steinschlag oder Felsstürze ist die innere Schichtung von Schuttkegeln sowohl im Längs-, als auch im Querprofil, parallel zur Geländeoberfläche (Abbildung 4, C und Abbildung 5). Die übereinander gestapelten Schichten unterscheiden sich an ihrem Verhältnis von grobem zu feinerem Material. Grobkörnige Schichten entwickeln sich hauptsächlich nach starkem Frost-Tau-Wechsel, während feinkörnige Schichten durch das Ausräumen von kleinen Zwischenspeichern während starken Niederschlagsereignissen entstehen (SASS und KRAUTBLATTER, 2006).

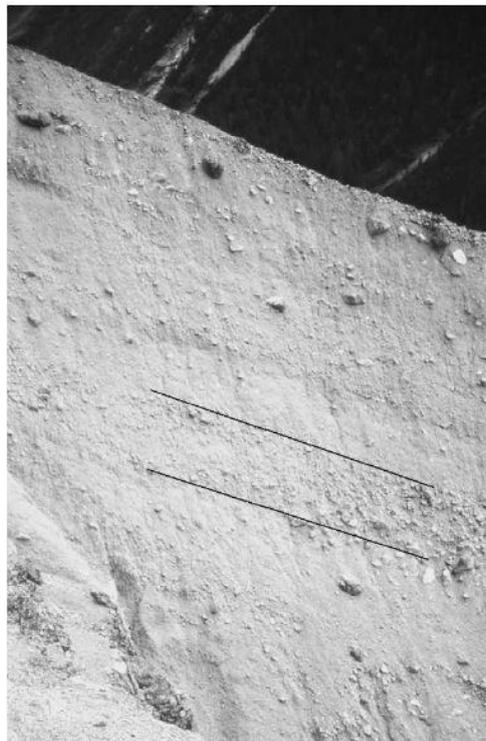


Abbildung 5: Paralleler Schichtaufbau eines Schuttkegels im Reintal (SASS und KRAUTBLATTER 2006)

#### **1.3.2.4 Querprofile (M.B.)**

In einer natürlichen Murrinne können die unterschiedlichen Formen von Querprofilen grob in die drei Haupttypen V-Profil, rechtwinkeliges Profil und Trapezprofil eingeteilt

werden (HAN et al., 2014). HÜBL (2009) hat diese grobe Einteilung mit U-Profilen und Levees ergänzt (Abbildung 6).

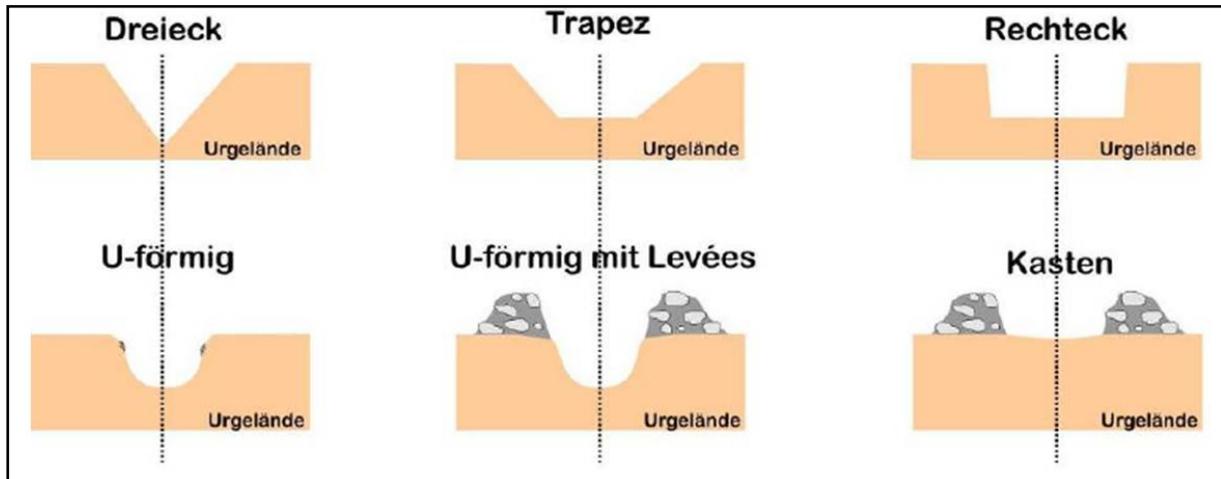


Abbildung 6: Einteilung der Querprofile einer Murrinne nach HÜBL (2009)

### 1.3.3 Murgangentstehung (G.S.)

Muren entstehen bei einer kritischen Kombination aus Wassereintrag, Sedimentverfügbarkeit und Hangneigung (RICKENMANN und ZIMMERMANN, 1993; TAKAHASHI, 1981).

#### 1.3.3.1 Entstehungsmechanismen nach TOGNACCA (1999) (G.S.):

In der folgenden Klassifizierung wird von der grundlegenden Unterscheidung zwischen Entstehung infolge bodenmechanischer Instabilität und Entstehung infolge progressiver Erosion ausgegangen. Die Unterscheidung zwischen mechanischer Instabilität und progressiver Erosion ist von grundlegender Bedeutung, da die zwei Mechanismen zu unterschiedlichen Gefährdungsbildern führen.

#### Entstehung infolge bodenmechanischer Instabilität:

Bodenmechanische Instabilität kann entweder durch eine innere oder eine äußere Ursache hervorgerufen werden:

- Innere Ursachen: Sie resultieren in einer Verminderung der inneren Scherfestigkeit des Bodens. Beispiele:
  - Innere Erosion
  - Verwitterung
  - Veränderung der chemischen Struktur eines bindigen Bodens

- **Äußere Ursachen:** Sie resultieren in einer Zunahme der auf dem Boden wirkenden Spannung. Die häufigsten Einflüsse, die zu einer Zunahme der Belastung und eventuellen Destabilisierung führen, sind:
  - Anstieg des Grundwasserspiegels
  - Aufbau von Porenwasserüberdrücken
  - Abbau der kapillaren Spannung infolge eindringender Wasserfront
  - Plötzliche Belastung infolge von Rutschung, Steinschlag, Wasserabfluss, Erdbeben, Windstoß, Vibrationen von Baumwurzeln

#### Entstehung infolge progressiver Erosion:

Verschiedene Ursachen können zu einer mehr oder weniger plötzlichen Belastung einer Hangpartie oder eines Bachbettes durch Oberflächenwasser und zu einer progressiven Erosion führen:

- Plötzliche Niederschläge
- Schnee- oder Eisschmelzen
- Veränderung eines subglazialen Abflusssystems
- Ausbruch einer Wassertasche im Gletscher oder eines Gletschersees
- Blockade eines Gerinnes durch eine Rutschung und Überlaufen des aufgestauten Wassers (TOGNACCA, 1999)

#### **Unterscheidung nach Anrisszonen:**

Aufbauend auf der Einteilung von TAKAHASHI (1981) unterscheiden RICKENMANN und ZIMMERMANN (1993) 4 verschiedene Anrisstypen die nach den Anrisszonen in die 2 Hauptgruppen Hang- und Gerinneanrisstypen einteilt werden:

#### **Slope Type Starting Zones (Hanganrisstypen):**

- Typ 1: Hanginstabilität: Die Anrisszonen liegen im steilen, oft nur wenig konsolidierten Lockermaterial (recent to subrecent morainic or slope debris (Moränen, glaziale Talverfüllung)). In vielen Fällen findet eine rückschreitende Erosion statt. Der Oberflächenabfluss ist laut GAMMA (1999) oft von untergeordneter Bedeutung und in Permafrostgebieten können sich flachgründige Rutschungen in der Auftauschicht ereignen. Die Hangneigung beträgt zwischen 27 und 38 Grad.
- Typ 2: Kontakt Felswand - Schutthalde: Diese Anrisszonen liegen im Kontaktbereich von Felswand und steilen Schutthalden. Die Neigungen liegen wie bei Typ 1 zwischen 27 und 38 Grad. Beim sog. fire - hose effect wird in den Fels-

wänden und Couloirs über der Schutthalde Wasser konzentriert und trifft anschließend auf den obersten Bereich der Schutthalde. Diese Wassermassen bewirken dann eine Mobilisierung des Lockermaterials. Dies gilt laut GAMMA (1999) auch für Schuttansammlungen unter Wasserfällen. Oft kann eine progressive Erosion beobachtet werden.

### **Valley Type Starting Zones (Gerinneanrisstypen):**

- Typ 3: Bettverflüssigung: Hier befindet sich die Anrisszone in steilen Felscouloirs die sich im Laufe der Zeit mit Lockermaterial füllen (z.B. Moräne, Stein Schlag). Felswände und Fels am Boden limitieren die Erosion. Die Schuttmassen waren oft bis vor wenigen Jahrzehnten noch mit Eis bedeckt. Die Neigungen liegen zwischen 24 und 35 Grad.
- Typ 4: Verklausung: Größere Ansammlungen von Schutt in einem Gerinnebett werden durch erhöhten Abfluss plötzlich mobilisiert. Die Erosion ist oft progressiv und das Anfangsvolumen ist oft klein im Vergleich zum Endvolumen. Laut GAMMA (1999) sind solche Anbrüche häufig auf den Bruch einer kurzen Verklausung (z.B. durch Holz) oder einer anderen Abflussbehinderung zurückzuführen. Die Neigung liegt zwischen 13 und 33 Grad.

#### **1.3.3.2 Auslösebedingungen (G.S.)**

Intensive und lang andauernde Schneeschmelzen erhöhen durch die zunehmende Bodensättigung die Disponibilität für Murgänge. Im Alpenraum führen aber häufig erst zusätzliche intensive Niederschläge zu größeren Murgangereignissen. Bei der Auslösung spielt das Wasser die entscheidende Rolle. In den hochalpinen Schutthalden kann die Destabilisierung bereits durch eine unterirdische Sättigung des Lockermaterials erreicht werden. Weil nicht nur der Oberflächenabfluss eine Rolle spielt, ist für die Auslösung nicht allein die Regenintensität von Bedeutung, sondern auch das Ausmaß der Bodensättigung durch längeranhaltende Niederschläge. Im inneralpinen Bereich sind zur Murgangbildung eher kleinere auslösende Niederschläge erforderlich. Dies könnte mit den kleineren, mittleren Jahresniederschlägen, im Vergleich zu den randalpinen Gebieten, zusammenhängen. Die Bedingungen für kritische Niederschlagsverhältnisse werden häufig in Form der mittleren Niederschlagsintensität  $I$  [mm/h] und der Dauer  $DN$  [h] des auslösenden Niederschlagsereignisses dargestellt. Einige dieser empirischen Grenzbedingungen, im Vergleich mit Daten aus Österreich, sind in Abbildung 7 dargestellt (RICKENMANN 2014).

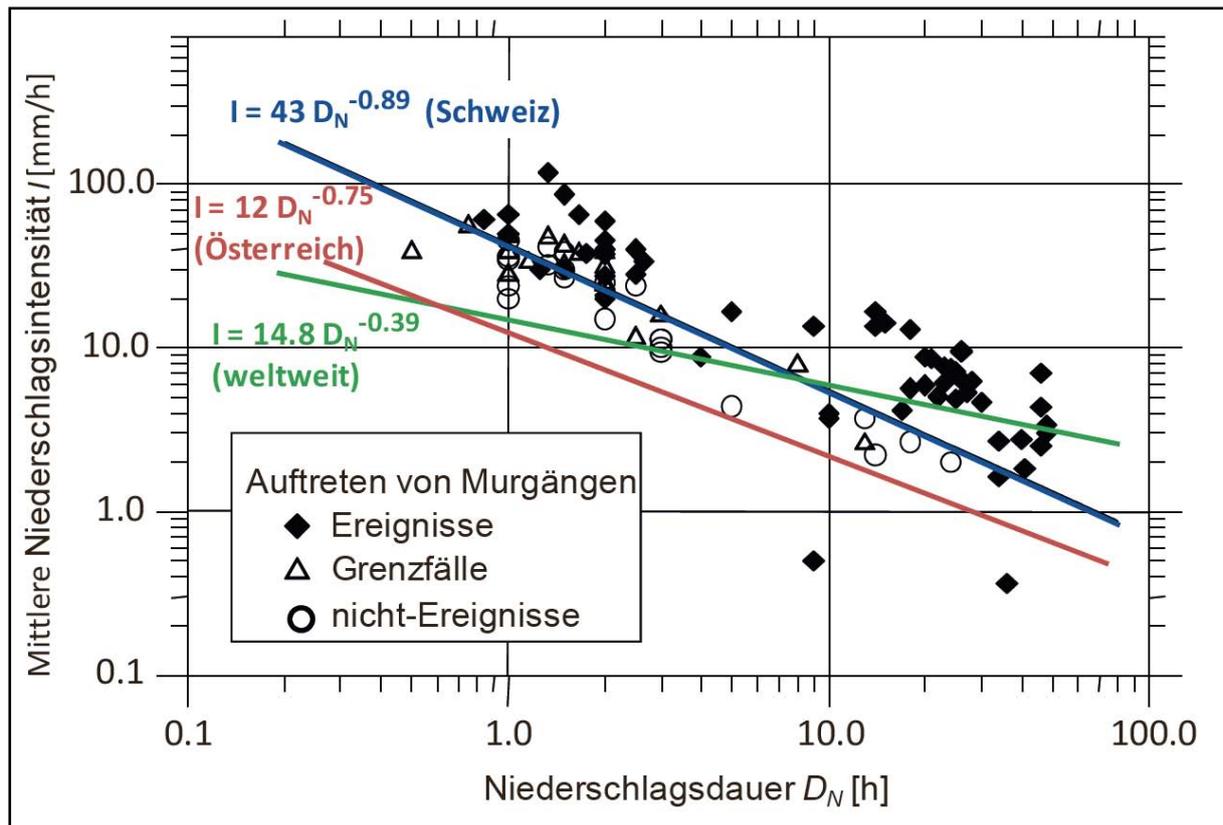


Abbildung 7: Empirische Beziehungen für kritische Niederschlagsverhältnisse bei der Auslösung von Murgängen. Die Daten für die Schweiz sowie das entsprechende Grenzkriterium stammen von ZIMMERMANN et al. (1997). Das Grenzkriterium für Österreich ist von HÜBL, J. BOKU Universität Wien, (2001). Die Grenzbedingung für die weltweiten Daten stammt von CAINE (1980) und basiert auf flachgründigen Hangrutschungen und Hangmuren aus RICKENMANN (2014).

Da für die Bildung eines Murgangs eine Mindestmenge an Gesteinsmaterial plötzlich in Bewegung geraten muss, können in Wildbachgerinnen Murgänge auftreten, wenn in der Sohle genügend Geröll zum Abtransport bereitliegt. Bei häufig auftretenden, so genannten Step-Pool Systemen, dienen die flachen Teilstücke als Zwischenspeicher (Abbildung 8). Vor allem in steilen Gerinnen und bei Engstellen mit vorgängiger Behinderung des Materialflusses (eventuell mit Verklausung) oder bei einer abrupten Zunahme der Erosion im Gerinne kann dieser Vorgang auftreten. Eine Abgrenzung des Prozesses Murgang zu anderen Arten der Feststoffverlagerung in Wildbächen und den Zusammenhang bei der Bildung von Murgängen ist in Abbildung 9 dargestellt (RICKENMANN, 2014).

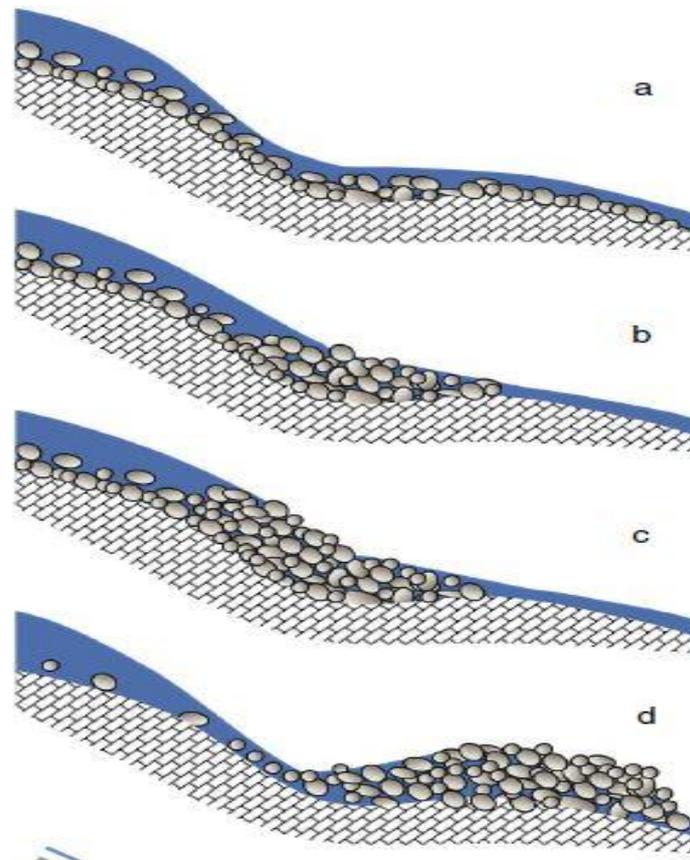


Abbildung 8: Konzeptionelles Modell der Zwischenspeicherung von Schutt in step-pool Systemen nach KEAN et al. (2013). (a) lokale Deposition von Geschiebe im flachen Bereich; (b) weitere Ablagerungen formen einen wasserdurchlässigen Damm und weiteres Material kann sich darüber akkumulieren; (c) gefüllter Speicher; (d) durch weiteren Eintrag wird ein Murschub ausgelöst;

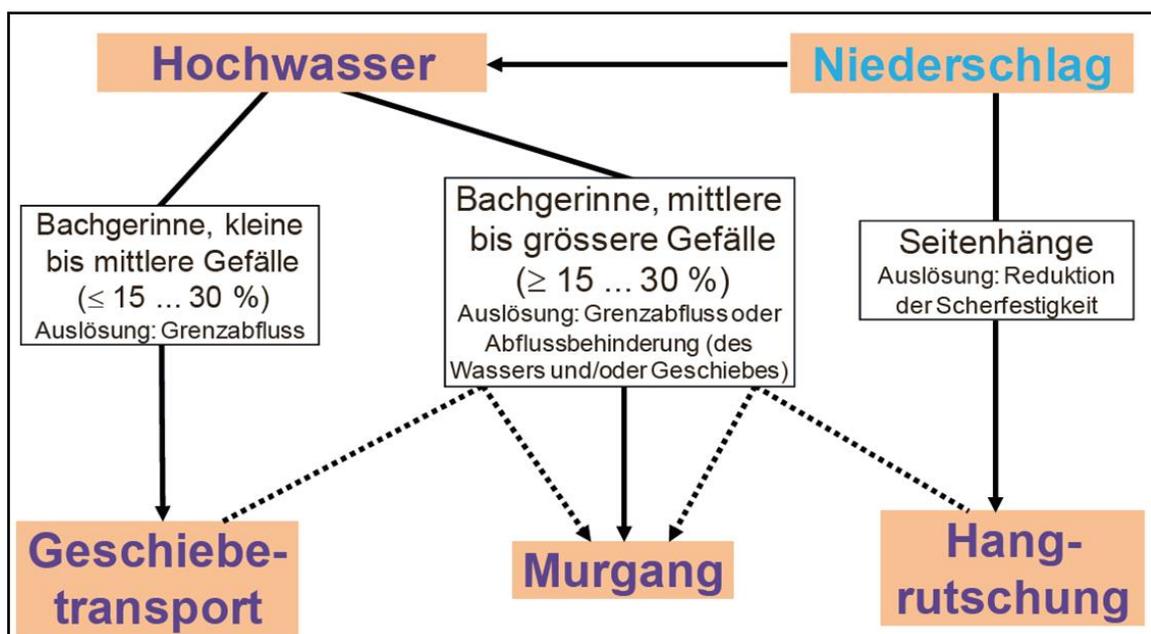


Abbildung 9: Wesentliche Geschiebelieferungsprozesse in Wildbächen und die Rolle bei der Bildung von Murgängen (RICKENMANN 2014)

## 2 Methoden

### 2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes (M.B.)

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit setzt sich aus zwei, voneinander getrennten, Aufnahmegebieten zusammen. Es wurden sowohl die kanalisiert Muren westlich des Fundelkopfes, (auch Fundl oder Fundel) als auch die Muren in der Dolomitschutthalde westlich des Panüelerkopfes (auch Panüelerkopf oder Panüeler) untersucht (Abbildung 10).

#### 2.1.1 Geografie (M.B.)

Beide Gebiete liegen im Gamperdonatal, welches mit einer Fläche von rund 68 km<sup>2</sup> einen Großteil der 110,35 km<sup>2</sup> großen Marktgemeinde Nenzing, Vorarlberg, Österreich ausmacht. Das Gebiet wird von der Agrargemeinschaft Nenzing bewirtschaftet. Auch die Mautstraße entlang der Meng wird von ihr verwaltet. Die Straße ist nur im Sommer für Touristen und Erholungssuchende geöffnet und muss des Öfteren wegen Hochwässern, Rutschungen oder Murablagerungen geräumt bzw. erneuert werden.

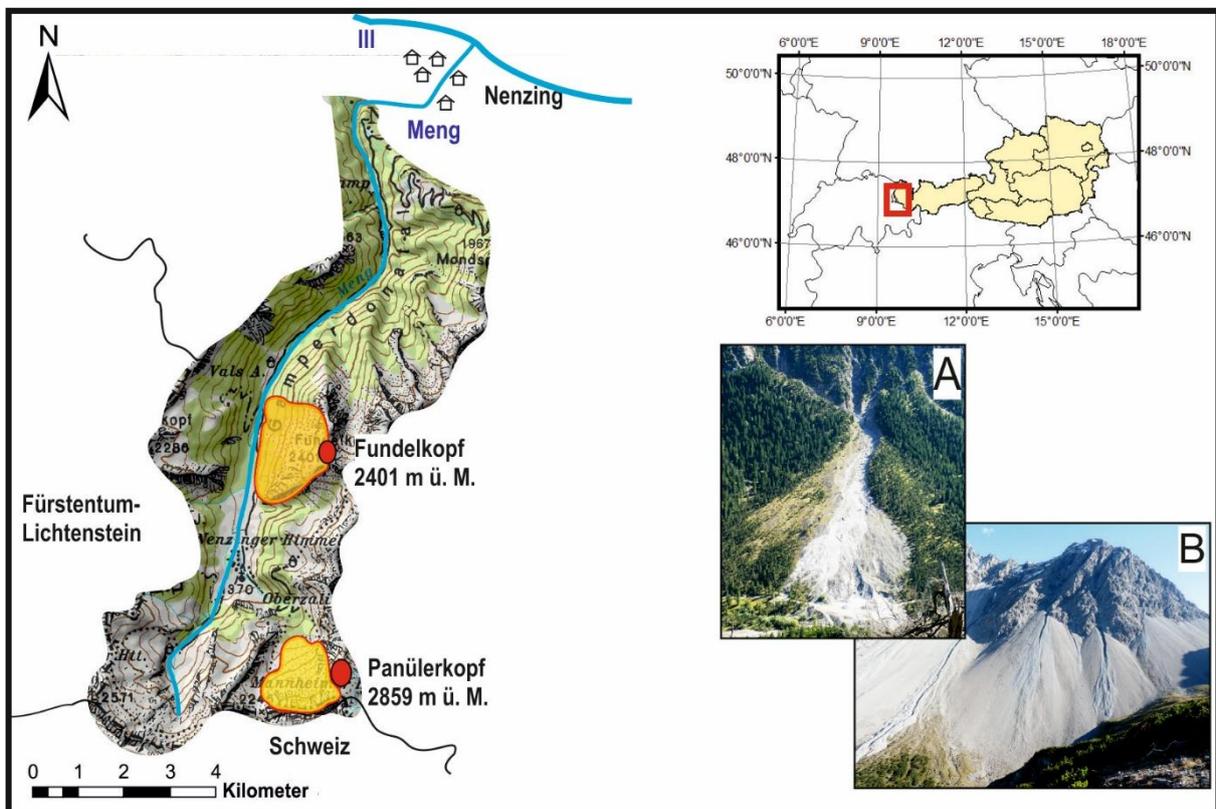


Abbildung 10: Überblick über das Gamperdonatal mit den zwei Aufnahmegebieten, A: Bärarüfe westlich des Fundelkopfes, B: Muren in der Schutthalde westlich des Panüelerkopfes

Entwässert wird das Gamperdonatal durch die Meng in Richtung Norden in die Ill (Abbildung 10). Die Ill selbst hat ihre Quelle in der Silverettagrube im Montafon auf rund 2240 m ü. A. und mündet zwischen Nofels und Meiningen in den Rhein. In dieser Gegend bildet der Rhein gleichzeitig die Grenze zwischen Österreich und der Schweiz. Inmitten des Rätikon gelegen, wird das Gamperdonatal im Westen vom Malbuntal, Fürstentum Liechtenstein und im Süden von der Gemeinde Seewis im Prättigau, Schweiz umgeben. Östlich grenzt das Brandnertal, ebenfalls dem Bezirk Bludenz zugehörig, an das Gamperdonatal. Mit 2964 m ü. A. ist die Schesaplana der höchste Berg im Rätikon und wird nur durch den Brandner Gletscher von dem 2859 Meter hohen Panülerkopf getrennt. Am Ostrand des Rätikons verläuft, dem Rhein folgend, die nord-süd gerichtete Rheintal-Splügen-Comersee Linie welche die Alpen geografisch in Ost- und Westalpen aufteilt (Abbildung 14). Somit befindet sich das Untersuchungsgebiet am Westrand der Ostalpen und ist durch seine Grenzlage dementsprechend tektonisch beansprucht.

### **2.1.2 Geschichte und Chronik (M.B.)**

Der folgende Überblick über die Flurnamen und die Geschichte im Untersuchungsgebiet ist durch ein Interview mit dem Archivar der Marktgemeinde Nenzing Thomas Gamon entstanden.

Das Tal bezieht seinen Namen aus dem Rätoromanischen und bedeutet so viel wie "unteres Feld". Grundbesitzer ist die Agrargemeinschaft Nenzing, eine Körperschaft öffentlichen Rechts, die 1965, also vor 50 Jahren, gegründet wurde und mit insgesamt ca. 80 km<sup>2</sup> die Größte des Landes ihrer Art darstellt. Das Aufnahmegebiet nördlich des Fundelkopfes gehörte bis zum Jahr 1972 den Bundesforsten, auch Ärar genannt und wurden in den folgenden Jahren von der Agrargemeinschaft Nenzing zurückgekauft.

Die Flurnamen im Untersuchungsgebiet stammen meist aus der hier einstmals gesprochenen rätoromanischen Sprache. Zum Ende des Mittelalters starb diese Sprache im südlichen Vorarlberg aus. Geblieben sind aber einige Reliktwörter, die auch heute noch für die Namensgebung im Untersuchungsgebiet prägend sind.

Panüeler Kopf: Das Wort stammt aus dem rätoromanischen „Bagnöl“ oder „Bagniel“ und bedeutet so viel wie Hirschsee oder Hirschbad. Diese Bezeichnung wanderte auf

die ganze Umgebung, den Berg darüber und auf die angrenzende Alpe. Der See selber, also der eigentliche Hirschsee, bekam die deutsche Übersetzung (TIEFENTHALER, 1968).

Fundel/Fundelkopf: "Bezog sich früher auf den Talboden, stammt von „fundus“ für Boden, Grund mit Suffixendung –ulu als Verkleinerungsboden, also kleiner Boden, wanderte dann auf den darüber liegenden Berg hinauf". (TIEFENTHALER, 1968, 106)

Bärrarüfe: Hier wurden früher öfters Bären gesichtet. Das Wort Rüfe wird heute noch häufig verwendet und dürfte aus dem Rätoromanischen (ruina oder rovina) stammen und bedeutet so viel wie Erdrutsch oder Geröllhalde.

Salaruel: "Tal zwischen dem Hirschsee und dem Salarueljoch, rätoromanisch, bedeutet Engtal, Korridor". (TIEFENTHALER, 1968, 193) In alten Karten auch Salarul bezeichnet.

### **2.1.3 Entwässerung, Hydrologie und Meteorologie (M.B.)**

#### Entwässerung

Die ca. 68 km<sup>2</sup> Einzugsgebiet werden von der Meng in Richtung Norden entwässert (Abbildung 10). Sie entspringt im Bereich der "Roten Wand", auf ungefähr 2390 Meter Seehöhe und legt auf ihrem rund 18 km langen Weg bis zur Mündung in die Ill bei Nenzing rund 1740 Höhenmeter zurück. Die Wasserscheide im südlichen Gamperdonatal bilden im Wesentlichen die Staatsgrenzen zur Schweiz, zum Fürstentum Liechtenstein und die Grenze zum Brandnertal. Lediglich im Bereich zwischen Gamsgrat und dem Augstenberg weicht die Wasserscheide von der Staatsgrenze zu Liechtenstein ab. Die Flanken werden von zahlreichen seitlichen Zubringern in die Meng entwässert. Sie führen großteils nicht stetig, sondern nur während bzw. nach Starkniederschlägen Wasser. Neben den Wassermassen die von den Wildbächen der Einhänge abgeleitet werden, sind es vor allem fluviatile Feststofftransporte und häufig auch Muren, die für die Wildbäche im Untersuchungsgebiet charakteristisch sind.

## Meteorologie

Vorarlberg zählt zu den niederschlagsreichsten Regionen Österreichs. Der Großteil der Niederschläge fällt im Sommer (37,3 %), das Minimum liegt im Winter (18,2 %). Im Frühling und Herbst fällt 22,2 bzw. 22,3 % des Jahresniederschlages (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2001). Das Klima ist ozeanisch beeinflusst und oft von feuchten Westwinden geprägt. Die von Westen und Norden kommenden Wolken verweilen an den sich erhebenden Alpen und es kommt zu so genannten Stauniederschlägen. Die Niederschlagsmenge nimmt also Richtung Norden (Bregenzerwald) und mit ansteigender Seehöhe zu (Abbildung 11).

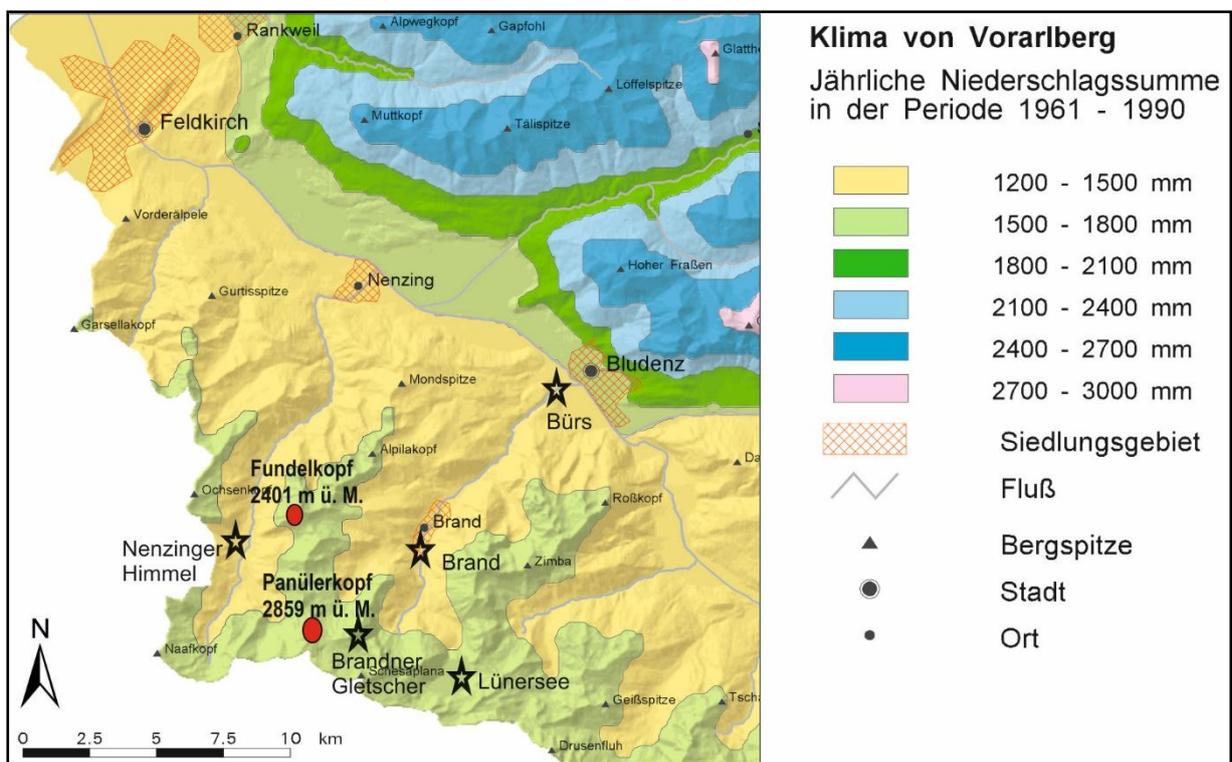


Abbildung 11: Mittlere jährliche Niederschlagsmenge im Untersuchungsgebiet und die Verteilung der Messstationen um die Aufnahmegebiete nach dem AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG (2001)

Um die jahreszeitliche und die Jahresniederschlagssumme besser beschreiben zu können, wurden für die Höhenstufen im Walgau und im Rätikon mittels Höhenregressionsmodellen genauere Werte errechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Jahreszeiten- und Jahressummen des Niederschlages (mm) in verschiedenen Höhenstufen für den Walgau und das Rätikon, berechnet aus Höhenregressions-Modellen (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2001).

Seehöhe (m)	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahressumme
<b>1200</b>	335	482	296	321	1434
<b>1400</b>	342	485	300	332	1459
<b>1600</b>	348	487	302	343	1480
<b>1800</b>	353	489	305	352	1499
<b>2000</b>	358	492	307	360	1517
<b>2200</b>	362	493	309	367	1531
<b>2400</b>	366	495	311	373	1545
<b>2600</b>	370	497	313	379	1559
<b>2800</b>	373	498	314	385	1570
<b>3000</b>	376	499	316	390	1581

In der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes befinden sich fünf Messstationen. Es sind dies die Stationen Nenzinger Himmel, Brand, Bürs, Lünersee und Brandner Gletscher (Abbildung 11). Für Brand, Bürs und den Lünersee stehen stündliche Niederschlagsdaten seit 1961 zur Verfügung. Für den Brandner Gletscher gibt es seit 1961 nur die mittleren Jahresniederschlagssummen. Diese Messstation befindet sich nur rund 2 km von den Sammelgebieten des Panülerkopfes entfernt. Für die Muren am Fundelkopf ist die Messstelle Nenzinger Himmel, mit einer Entfernung von rund 2 km, am nächsten. Sie liefert meteorologische Daten im 5-Minuten-Intervall, allerdings erst seit 1999. Angaben zu Aufzeichnungen dieser Messstellen sind im Anhang zusammengefasst.

Im Zeitraum zwischen dem Orthofoto vom 17.08.2012 und der Geländeaufnahme am 20.08.2013 sind in der Schutthalde westlich des Panülerkopf insgesamt 5 Muren abgegangen. Da die angrenzende Messstelle Brandner Gletscher nur Jahresniederschlagssummen sammelt, wurden die Niederschlagswerte der nächstgelegenen Station Nenzinger Himmel genauer untersucht.

Das Jahr 2012 lag mit 1715 mm Jahresniederschlag über dem langjährigen Mittelwert von 1696 mm. Vor allem der 22.08.2012 kommt mit 22,1 mm/h Niederschlag für

das Auslösen der Muren in Betracht. 20,2 der 22,1 mm sind alleine zwischen 22:10 und 22:25 gefallen. Aber auch am 20.08.2012 fielen 12,7 mm innerhalb von 10 Minuten. Am 24. und am 25.08.2012 waren es je maximal 10mm/h. Am 9. und 10.10.2012 fielen insgesamt 95,7 mm wobei 8 mm/h nie überschritten wurden. Der September verlief weitestgehend trocken.

Das Jahr 2013 war mit 1382 mm Jahresniederschlag deutlich unter dem langjährigen Jahresdurchschnitt. Eine längere durchgehende Regenperiode gab es nur Anfang Mai. Hier fielen über 54 Stunden verteilt 151,6 mm, wobei hier eine Intensität von 8 mm/h nie überschritten wurde. Im Juni und Juli gab es in diesem Gebiet keine nennenswerten Niederschlagsereignisse.

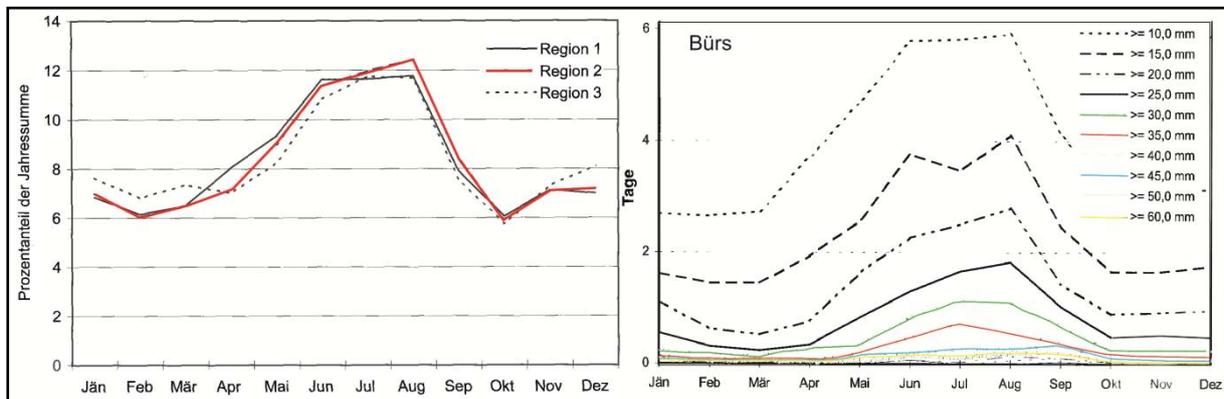


Abbildung 12: Links: Ganglinie des Jahresniederschlages für den Rätikon (rot); rechts: Häufigkeit und zeitliche Verteilung für das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte des Tagesniederschlages in der nahegelegenen Gemeinde Bürs (AMT DER VORARLBERGER LANDESREGIERUNG, 2001)

Da Muren aber stark von lokalen Starkniederschlägen abhängig sind, können diese Werte nur als Anhaltspunkt betrachtet werden. Die Häufigkeit der Gewitter in der angrenzenden Gemeinde Bürs liegt im Jahresmittel bei 21,1. Die meisten davon (15,1) fallen in die Monate Juni, Juli und August. Dies stimmt auch mit der Überschreitung bestimmter Schwellenwerte des Tagesniederschlages überein (Abbildung 12 rechts). Die maximale Anzahl von Gewittern waren in der Messperiode 1961 - 1990 bei 11 Gewittern im Juni und 11 im August.

### 2.1.4 Geologie und Geomorphologie (M.B.)

Neben der hydrologischen Komponente kommt der Geologie, und damit verbunden der Geomorphologie, eine besonders große Bedeutung für das Auftreten von fluviatilen Massenbewegungsprozessen zu. Durch die lokalen geologischen Voraussetzungen sind wichtige Parameter wie Verwitterungsanfälligkeit, Form des Anbruchs und Gesteins- bzw. Gebirgsdurchlässigkeit gegeben. Vor allem die grusige Verwitterung des Hauptdolomits zu kleinen Rhomboedern bis zu einem Meter Tiefe (FELLEHNER, 2004) und dessen hoher Oberflächenabfluss (SUTTERLÜTTI, 1990) sind ausschlaggebend für die Entstehung von Schutthalden bzw. für das Auftreten von Muren im Untersuchungsgebiet.

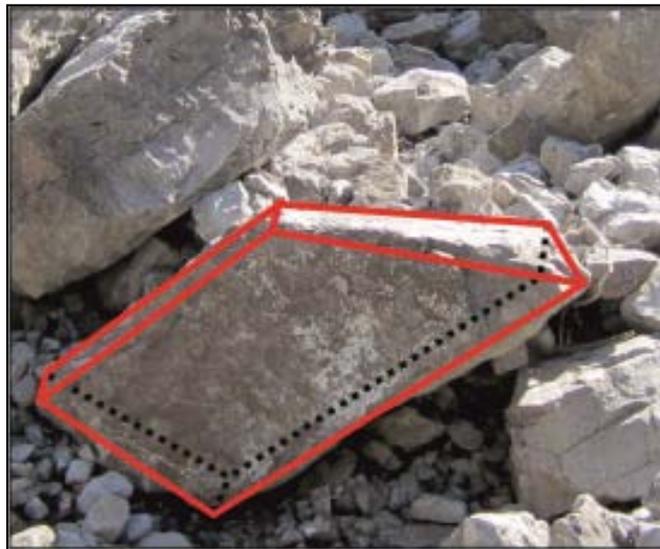


Abbildung 13: Dolomitrhomboeder im Transportgebiet der Bärarüfe, längste Achse ca. 60 cm lang

#### 2.1.4.1 Überblick (M.B.)

Wie in 2.1.1 angesprochen verläuft die geographische Trennungslinie zwischen Ost- und Westalpen vom Bodensee dem Rhein entlang durch das Fürstentum Liechtenstein (Abbildung 14). Die geologische Abgrenzung beider Einheiten ist jedoch weit schwieriger. "Bestimmte für die Westalpen typische Gesteinsserien aus der Schweiz ziehen sich nach Osten weiter und die Westalpen im geologischen Sinne setzen sich so in die Ostalpen hinein fort." (BÖGEL und SCHMIDT, 1976, 12) Die geologische Trennlinie durch Vorarlberg verläuft also von Hindelang über Oberstorf-Mittelberg nach SW bis Vaduz (RICHTER, 1978). "Dem entsprechend finden sich im Ländle

gleichermaßen Gesteine vom ehemaligen Süd(ost)rand Europas, als auch Gesteine, die nähere Beziehungen zu Afrika aufweisen." (FRIEBE, 2004, 19)

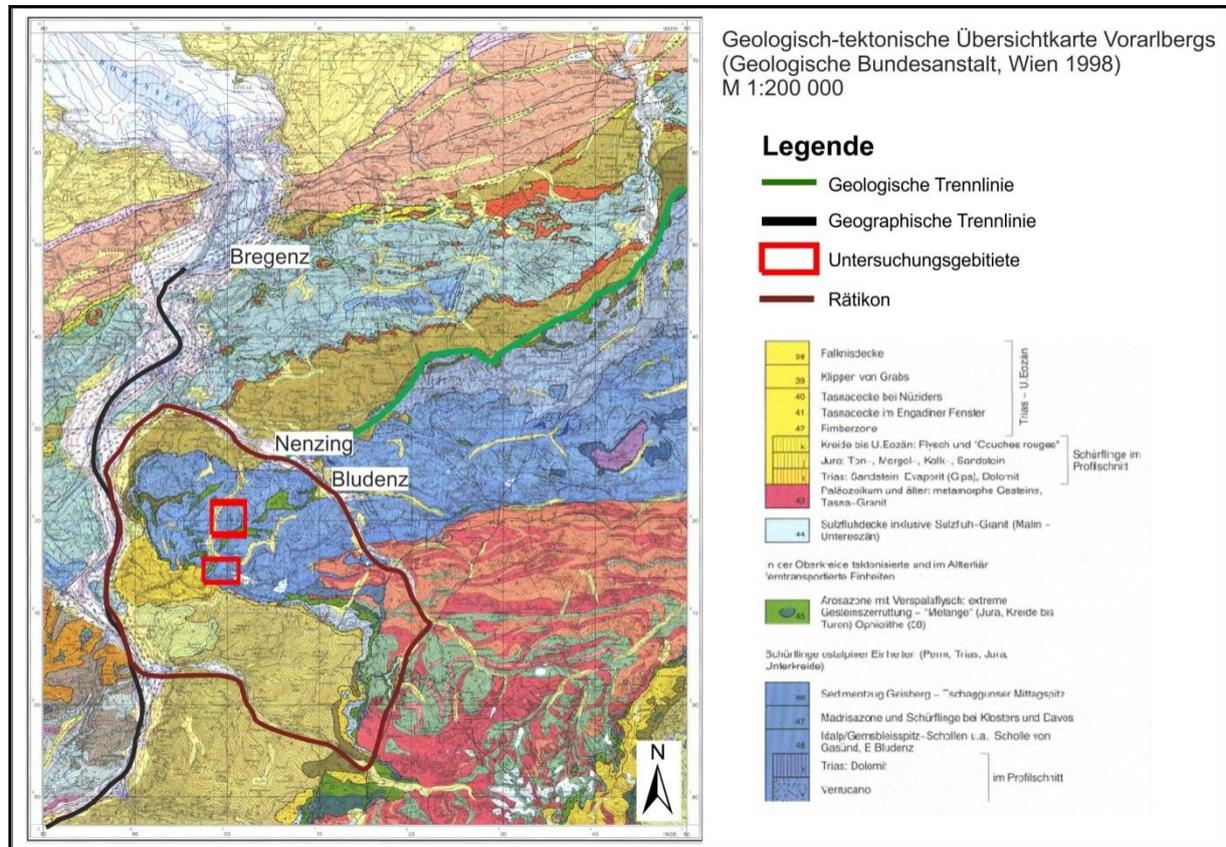


Abbildung 14: Geologisch-tektonische Übersichtskarte Vorarlbergs der GBA Wien (1998)

Nördlich dieser Trennlinie liegen die Einheiten der Westalpen wie Penninikum und Helvetikum. So befindet sich etwa das Siedlungsgebiet von Nenzing auf nordpenninischem Flysch (auch ostalpine Flyschzone oder reno-danubischer Flysch) welcher über Helvetikum und Molasse überschoben ist (GWINNER, 1978). Im Süden liegen die Ostalpinen Einheiten wie Silverettakristallin, Grauwackenzone und Nördliche Kalkalpen (von S nach N) (BÖGEL und SCHMIDT, 1976). Der geologische Übergang zwischen Penninikum (Westalpin) und den nördlichen Kalkalpen (Ostalpin) ist im Walgau durch den Beginn des Rätikons gekennzeichnet (Abbildung 15).

#### 2.1.4.2 Untersuchungsgebiet (M.B.)

Das Gamperdonatal liegt im Dreiländereck des Rätikongebirges. Das Rätikon entstand im Zuge der Alpenbildung die vor rund 250 Mio. Jahren begann und auch heute noch andauert (LABHART, 2004). Er beobachtet Hebungsraten in der Umgebung

von Feldkirch von + 2,5 mm/Jahr während sich die Alpen um Wiener Neustadt um 1/mm Jahr senkten. STEINHAUSER (1991) gibt Hebungsraten für die gesamten Ostalpen im Bereich von 0,1 bis 0,5 mm/Jahr an.

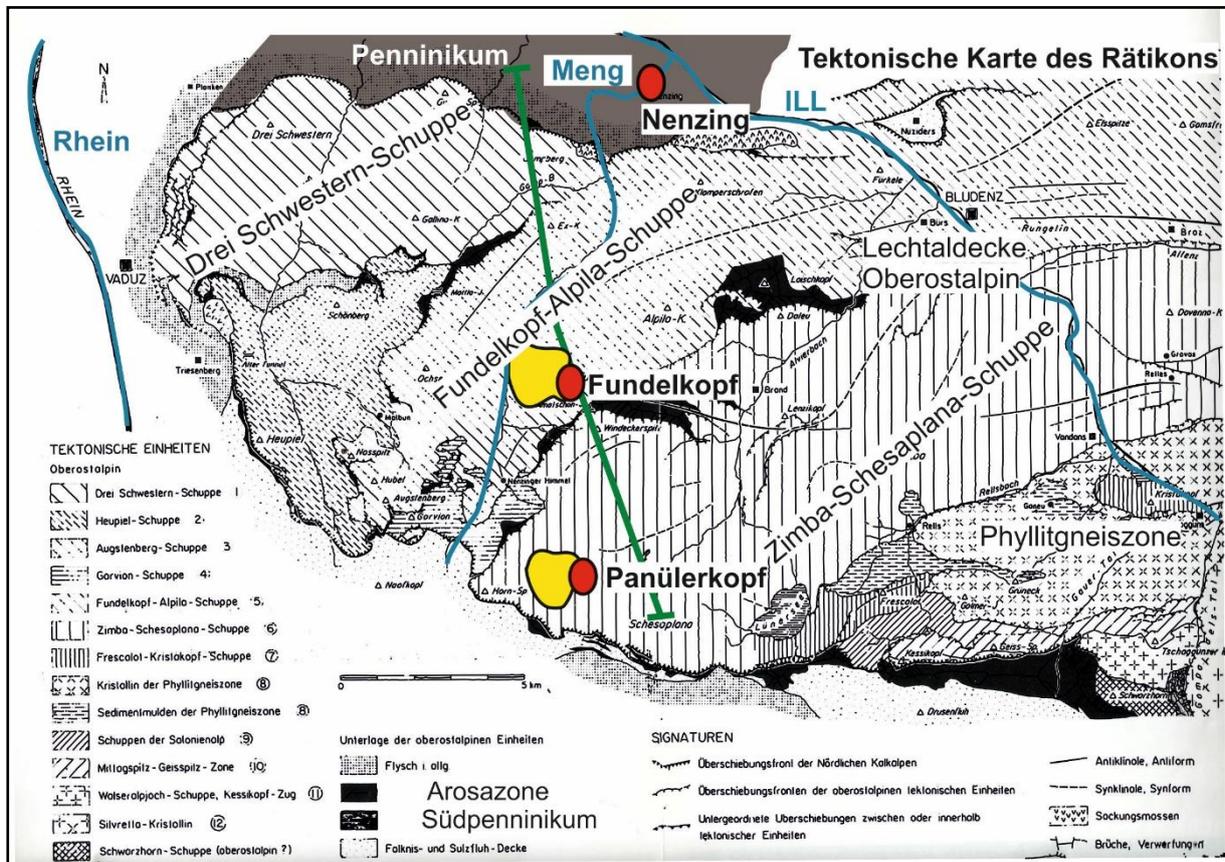


Abbildung 15: Tektonische Karte des Rätikons mit den zwei Aufnahmegebieten nach KOBEL (1969), die grüne Linie stellt den Schnitt der Abbildung 16 dar

Charakteristisch für die Morphologie der Nördlichen Kalkalpen und somit auch für das Rätikon sind die bis zu 600 m mächtigen Hauptdolomitmassen (RICHTER, 1978). Die beiden Aufnahmegebiete liegen auf zwei verschiedenen Schuppen der Lechtaldecke, (Abbildung 15) welche fast ausschließlich aus Gestein aus der Trias aufgebaut sind. Die Schuppen liegen dachziegelartig übereinander und fallen vorwiegend nach Südosten ein (TOLLMANN, 1976). Die Grenzen verlaufen von Nordosten nach Südwesten, was durch eine stärkere Nordbewegung des östlichen Teils der Lechtaldecke interpretiert werden kann (REITHOFER et al., 1964).

Das Aufnahmegebiet westlich des Fundelkopfes liegt auf der Fundelkopf-Alpija-Schuppe, jenes westlich des Panülerkopfes auf der Zimba-Schesaplana-Schuppe (Abbildung 15). Stratigraphisch sind sie relativ ähnlichen aufgebaut. Auf der Zimba-Schesaplana-Schuppe sind Kössener Schichten zu erkennen, welche auf der

Fundelkopf-Alpila-Schuppe fehlen (Abbildung 16). Sie haben aber am hier vorgelagerten Panülerkopf nur mehr eine geringe Mächtigkeit.

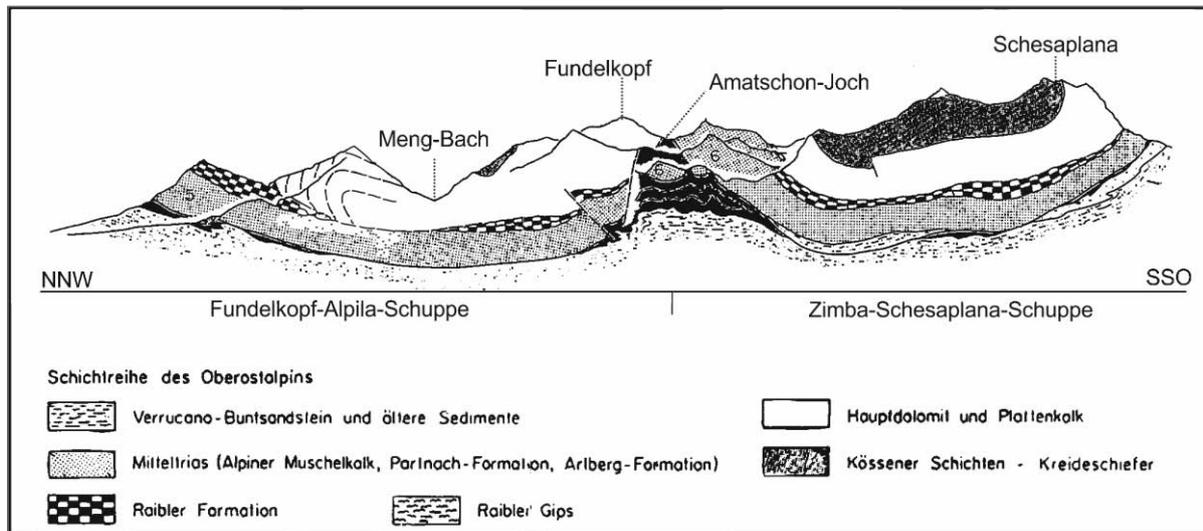


Abbildung 16: Profil durch das Untersuchungsgebiet nach KOBEL (1969), Position des Schnittes in Abbildung 15 nachzusehen

Auch die Lage und Bewegungsrichtung der Gletscher während der letzten Eiszeiten haben das Gamperdonatal stark geprägt (Abbildung 17). So liegen die heutige Siedlung Nenzinger Himmel und der Märchenwald auf Ablagerungen des Salaruegletschers (MEYER, 1978). Auch die Schutthalde westlich des Panülerkopfes baut auf Salaruegletschermoränen auf (SUTTERLÜTTI, 1990). Wahrscheinlich sind auch die Murablagerungen westlich des Fundelkopfes von Seitenmoränen unterlagert. Beobachtungen von Moränendecken des Gamperdonagletschers von KRASSER (1955) lassen dies vermuten.



Abbildung 17: Fließrichtung der Gletscher während der Würmeiszeit nach SEIJMONSBERGEN (1992)

#### 2.1.4.3 Hauptdolomit (M.B.)

"Die Formation des Hauptdolomits setzt sich aus 600 m mächtigen, hellbraunen oder hellgrauen, meist gut gebankten Dolomiten zusammen." (SUTTERLÜTTI, 1990, 10) Der meist gut gebankte und vielfach rhythmisch geschichtete Hauptdolomit (RICHTER, 1978) ist durch seine Erosionsbeständigkeit Hauptgipfelbilder im Rätikon. Er verhält sich spröde unter Druck (RICHTER, 1978 und SUTTERLÜTTI, 1990) und es kommt zu einem feinklüftigen Zerbrechen. Aufgrund der Feinklüftigkeit im Dolomit kommt es dazu, dass ein Großteil der Lösungskapazität des Wassers im Dolomit (Gehalt an aggressiven  $\text{CO}_2$ ) nach kurzer Fließstrecke verbraucht ist (PAVUZA und TRAINDL, 1983 und 1985). "Dadurch wird eine Vergrößerung des Kluftvolumens durch Lösungserscheinungen verhindert." (SUTTERLÜTTI, 1990, 12) Der Hauptdolomit verwittert also rein mechanisch (FELLEHNER, 2004).

Obwohl die Gesteinsdurchlässigkeit von Dolomit vernachlässigbar klein ist, kann Wasser durch Klüfte und Störungen tief in den Fels eindringen. Untersuchungen im Bereich des Fundelkopfes haben Kf-Werte von  $3 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $6 \cdot 10^{-4}$  m/s ergeben (SUTTERLÜTTI, 1990). Mit diesem Durchlässigkeitsbeiwert ist der Fels laut DIN 18130 (2011) stark durchlässig.

#### 2.1.4.4 Aufnahmegebiete (M.B.)

Sowohl der Panülerkopf als auch der Fundelkopf sind hauptsächlich aus grauem, steilwandigem Hauptdolomit aufgebaut (MEYER, 1978). Eigene Untersuchungen und die Untersuchungen von SUTTERLÜTTI (1990), BERTLE (1982) und FELLEHNER (2004) an anderen Bergen im Rätikon kamen zum gleichen Ergebnis.

#### 2.1.4.5 Panülerkopf (M.B.)

Die Schutthalde westlich des Panülerkopfes besteht aus Hauptdolomit, der von den durchschnittlich 49 Grad steilen Flanken des Massives in Form von Steinschlag, Felssturz und zum Teil auch fluviatil abgetragen wird. Die Schutthalde setzt sich aus mehreren großen Schuttkegeln unterhalb von großen Sammelgebieten zusammen und erstreckt sich von ca. 2300 m. ü. A. bis hinunter ins Kar des Salaruelgletschers auf rund 1790 m, wo die Moränen des Salaruelgletschers zum Teil von der Schutthalde überdeckt werden (Abbildung 18).

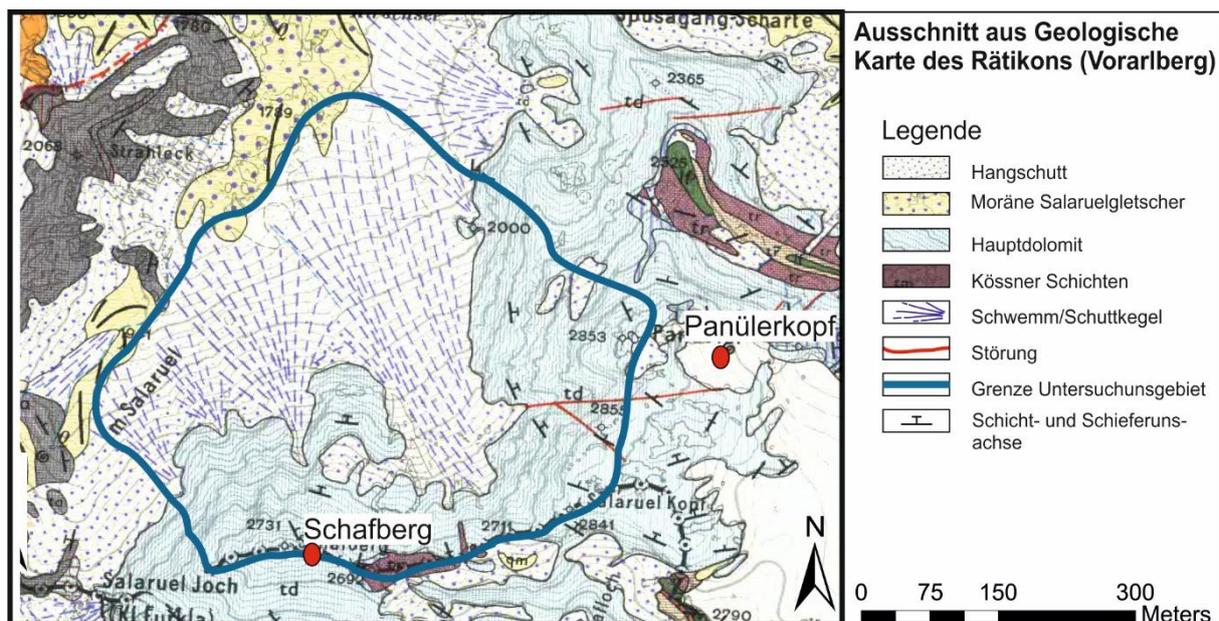


Abbildung 18: Geomorphologische Karte des Aufnahmegebietes westlich des Panülerkopfes nach HEISSEL et al. (1965)

Dass die Schutthalde so stark ausgeprägt ist, ist nicht zuletzt auf die zahlreichen Störungen durch die Brandner Synklinale zurückzuführen (Abbildung 19). Solche Störungszonen sind die Hauptschuttbildner der Nördlichen Kalkalpen (RICHTER, 1978). Der Schutt baut sich aus rhomboederförmigen Blöcken mit einem mittleren Durchmesser von 1 - 20 cm auf (FELLEHNER, 2004). Es ist eine deutliche Gradierung mit groben Blöcken in den unteren Bereichen zu erkennen (KRAINER, 1988). Vegetation



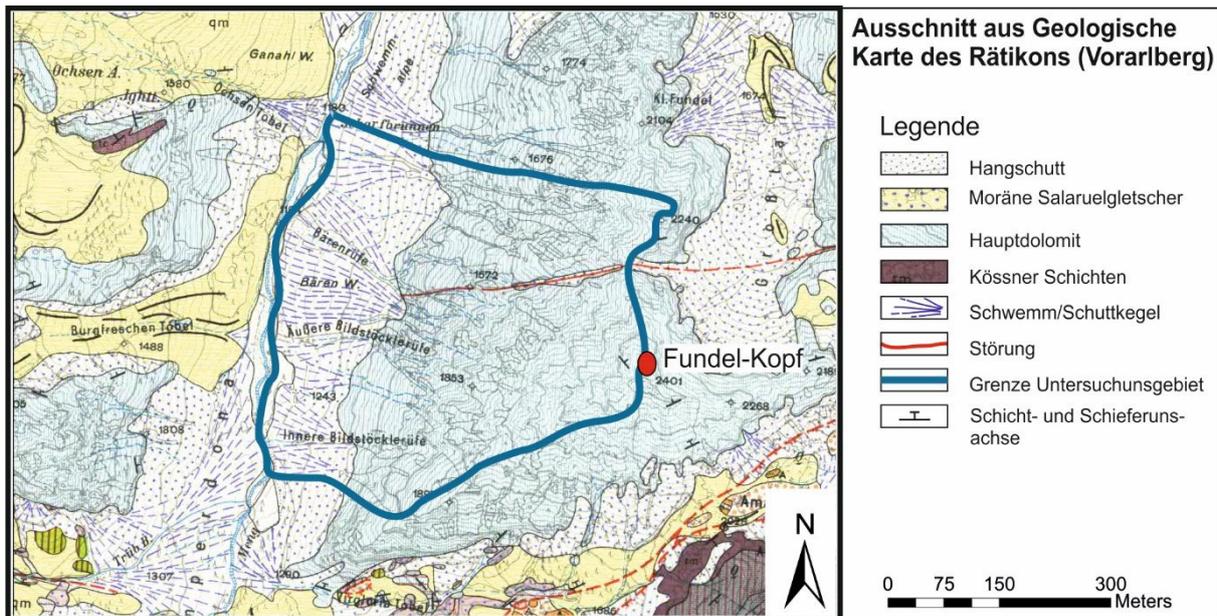


Abbildung 20: Geomorphologische Karte des Aufnahmegebietes westlich des Fundelkopfes nach HEISSEL et al. (1965)

Am Fuße des Dolomitmassives bilden sich unterhalb großer Sammelgebiete Murkegel mit einer mittleren Neigung von 21 Grad. Vor allem der Murkegel der Bärarüfe wird im Westen durch den Vorfluter begrenzt. Die Meng hat hier im gesamten Bereich einen Einfluss auf die Morphologie der Murablagerungen (Abbildung 20). Der Einfluss dürfte aber aufgrund der geringen Neigung in diesem Bereich eher gering sein. "Begründet werden kann diese flache Strecke durch einen Aufstau des oberen Gamperdonatales durch einen Vorstoß des Großtalschwemmfächers über die Meng." (SUTTERLÜTTI, 1990, 24) Neben dem Vorfluter wird die Morphologie der Murkegel durch die von NNO nach SSW verlaufende Mautstraße beeinflusst.

### 2.1.5 Vegetation (M.B.)

Das Untersuchungsgebiet gehört zum Wuchsgebiet 4.1 "Nördlichen Randalpen - Westteil". Für dieses Wuchsgebiet erfolgt die Einteilung der Höhenstufen laut KILIAN et al. (1994) in die hochmontane (1200-1450), tiefsubalpine (1450-1650) und hochsubalpine (1650-1950) Stufe.

Der tiefste Punkt im Untersuchungsgebiet bilden die Murablagerungen des "Studazug" auf rund 1184 Meter Seehöhe. Die Murkegel westlich des Fundelkopfes erstrecken sich von hier bis auf maximal 1433 Meter. Die natürliche Waldgesellschaft dieser Stufe ist ein Fichten-Tannenwald (Abietetum) (MAYER, 1974). "Auf dem Murkegel selber hat sich allerdings eine Ersatzgesellschaft zu der für diese Höhenla-

ge und dieses Wuchsgebiet typische natürliche Waldgesellschaft eines Fichten-Tannenwaldes oder subalpinen Fichtenwaldes gebildet." (NEUMANN, 2011, 38). Durch den karbonatischen und stark durchlässigen Untergrund hat sich hier die Spirke durchsetzen können. Die angrenzenden weniger aktiven Bereiche sind hauptsächlich mit Fichten und Weißtannen bewachsen.

Ab der Kegelspitze auf rund 1433 Metern beginnt die tiefsubalpine Stufe (1450-1650). Mit steigender Seehöhe wird der Fichten-Tannenwald durch einen subalpinen Karbonat- Alpendost-Fichtenwald abgelöst. Im Untersuchungsgebiet wird die Fichte (*Picea abies* (L.) selten, während die Bergkiefer (*Pinus mugo* subsp. *mugo*) fast den gesamten Westhang des Fundelkopfes bedeckt. Die Bergkiefer wächst hier flächig bis zum Ende der hochsubalpinen Höhenstufe (1950 m) während Einzelindividuen bis ca. 2100 m anzutreffen sind. Auf den Schuttkegeln des Panülerkopfes, die sich von 1788 m bis auf 2300 m. ü. A. erstrecken, sind lediglich am flachen Übergang zwischen Schutthalde und dem Talboden des Salarueltales Bergkiefern anzutreffen. An den im Mittel 31 Grad steilen Hängen der Schutthalde ist keine holzige Vegetation vorhanden.

## **2.2 Methodik Feldarbeit**

### **2.2.1 Vorbereitung und Datengrundlagen (M.B.)**

Die vor der Geländebegehung beschafften Daten waren digitale Höhenmodelle und Orthofotos der Jahre 1951, 1973, 2001, 2005, 2006, 2009 und 2012. Die Höhenmodelle stammen vom Landesvermessungsamt Vorarlberg und die Orthofotos wurden vom forsttechnischen Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Bludenz und der Agrargemeinschaft Nenzing zur Verfügung gestellt. Niederschlagsdaten der Messtelle Nenzinger Himmel wurden vom Hydrographischen Dienst bereitgestellt. Informationen über historische Ereignisse stammen von DI Terzer.

### **2.2.2 Kartierung (M.B.)**

Als Grundlage für die Kartierung dienen die Aufzeichnungen der Begehungen im August 2013 und September 2014 von je 5 Muren am Westhang des Fundelkopfes und 5 Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes. Es wurden diejenigen Muren ausgewählt, bei denen die Merkmale des letzten Murenabganges gut sichtbar und repräsentativ waren. Für die Kartierung im Feld wurden Orthofotos der ausgewählten Muren im Maßstab 1:1500 und 1:2500 der Jahre 2009 und 2012 verwendet. Das Hauptaugenmerk bei der Aufnahme lag auf den morphologischen Merkmalen des letzten Ereignisses. Neben der Kartierung wurden Fotos von jedem Aufnahmepunkt, von markanten Spuren im Gelände als auch von der gesamten Rinne gemacht und die Position der Fotos digital verortet.

Mithilfe des digitalen Höhenmodells aus dem Jahr 2009 wurden die Mur- bzw. Schuttkegel, alte Levees und heute inaktive Gerinne unterhalb der Vegetation rekonstruiert und kartiert. Für das Kapitel 3.1.4 (Zeitliche Kartierung und Frequenz) wurden sämtliche Orthofotos von 1951 bis 2012 chronologisch übereinander gelegt. So konnten die Unterschiede zwischen den Orthofotos identifiziert und kartiert werden. Da die Orthofotos nicht jährlich aufgenommen wurden, kann aber keine genaue Angabe zur Jahreszahl oder eine Zuordnung von auslösenden Niederschlägen vorgenommen werden. Im Detail stehen Orthofotos der Jahre 1951, 1973, 2001, 2005, 2006, 2009 und 2012 zur Verfügung, wobei die Fotos des Jahres 2005 nur für die Muren am Fundelkopf vorliegen. Sie wurden nach dem Hochwasser außerplanmäßig nur entlang von Gewässern aufgenommen. Da im Zuge der Feldaufnahme 2013 und 2014 immer nur die Mur - bzw. Schuttkegel begangen wurden, stammen die Kartie-

zung und sämtliche Kenngrößen der Sammelgebiete ausschließlich aus den Programmen Esri ArcMap (Projektion GK M 28) und Global Mapper. Zur Erstellung der Detailkartierung wurden zusätzlich die Programme Esri ArcScene und CorelDraw verwendet.

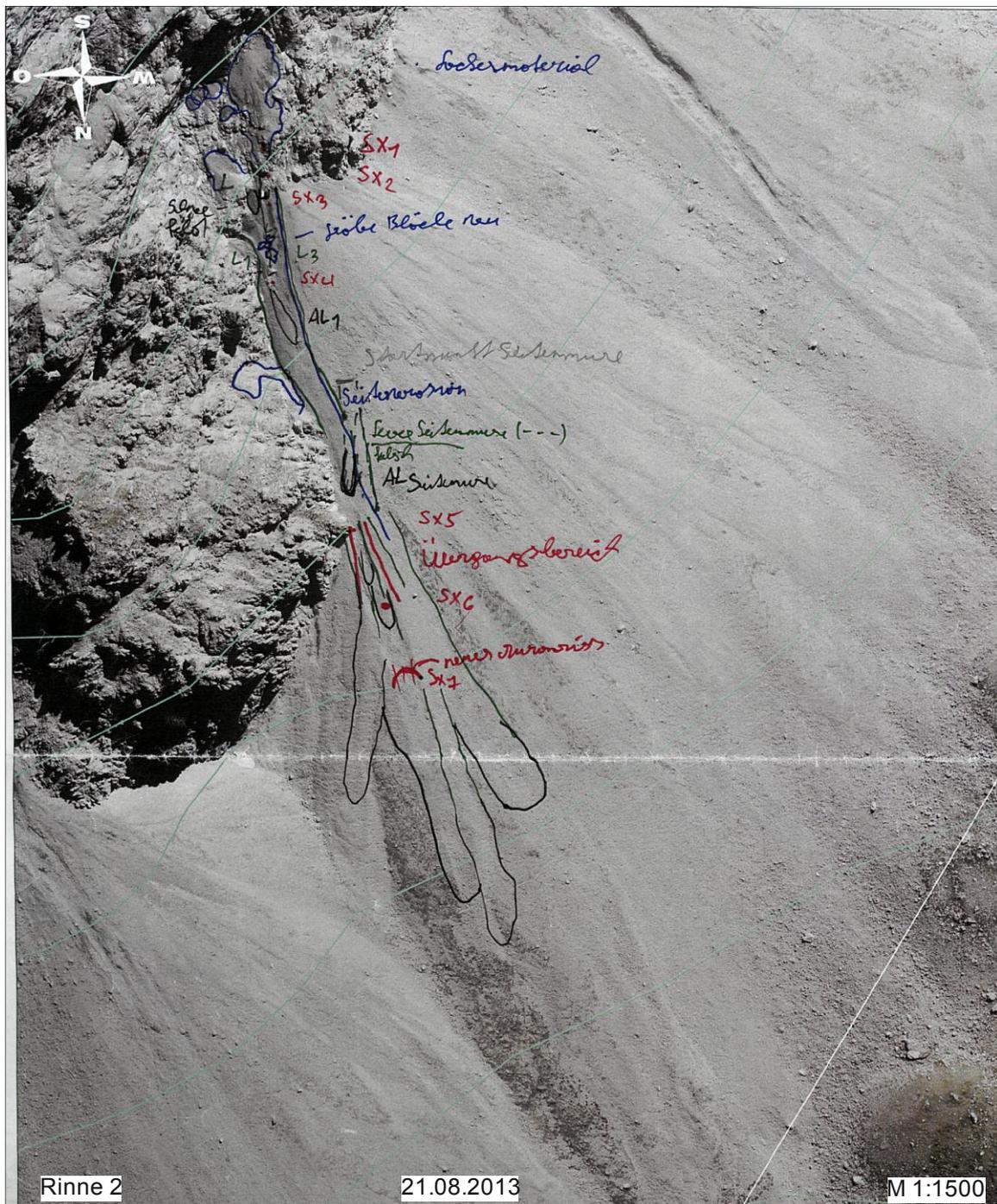


Abbildung 21: Feldkartierung der Rinne 2; zu sehen sind: Position der Querprofile und Fotos (Sx1 bis Sx7), Murablagerung (schwarz), Verschneidungspunkt (rot), Stellen mit lateraler Erosion (blau) und Blöcke (blaue Kreise)

### 2.2.3 Gefälleverlauf (G.S.)

Mittels Laser-Distanz-Messer TruPulse 360 wurden Längsprofile in allen Rinnen sowie auf den Schutthalden erstellt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Vom höchsten begehbaren Punkt der Rinne aus wurden Himmelsrichtung, Neigungswinkel, Horizontal-, Vertikal- und Schrägdistanz zum nächsten relevanten Punkt gemessen. An diesen Punkten wurden Fotos nach unten und oben sowie ein Querprofil aufgenommen. Aufnahmepunkte wurden definiert durch Neigungsänderung, Querprofiländerung, Änderung der Himmelsrichtung, Änderung der Erosion/Ablagerung, Änderung des Untergrundmaterials und teilweise bei einer Änderung der Vegetation.

### 2.2.4 Querprofile (M.B.)

Um typische Querprofile für die Muren westlich des Fundelkopfes und jene westlich des Panülerkopfes zu identifizieren, wurde jede der 10 ausgewählten Muren von der Kegelspitze bis zum Endpunkt der Ablagerung begangen. Querprofile wurden an Stellen aufgenommen, an denen sich Merkmale wie Längsneigung, Neigung der Einhänge, der Untergrund oder die Breite der Rinne markant änderten. An diesen Stellen wurde mittels Laser Distanzmesser TruPulse 360 die Neigung der Einhänge (lotrecht) und der Sohle und die dazugehörigen Distanzen gemessen und skizziert (Abbildung 3). Die Blickrichtung auf den Skizzen ist immer in Richtung Sammelgebiet (von unten nach oben). Neben den Neigungen, Distanzen und der Profilform wurden zusätzlich Levees, Murablagerungen, der Untergrund und Seitenerosion auf der Querprofilskizze eingezeichnet.

Das Erste Profil jeder Mure wurde am Felsauslass der Sammelgebiete aufgenommen. Für die Muren am Fundelkopf wurden je Rinne zwischen 11 und 21 Querprofile angefertigt. Für die morphologisch homogeneren Muren der Schutthalde westlich des Panülerkopfes wurden zwischen 6 und 14 Querprofile je Mure angefertigt. Als Grundlage für die graphische Darstellung dienten hauptsächlich unsere Geländeaufnahmen. Merkmale die außerhalb der Rinnen liegen und deshalb nicht im Detail vermessen wurden, konnten mittels ArcGis und Global Mapper rekonstruiert und skizziert werden. Alle Skizzen wurden mittels CorelDraw maßstabsgetreu ( $M = 1:187,5$ ) angefertigt.

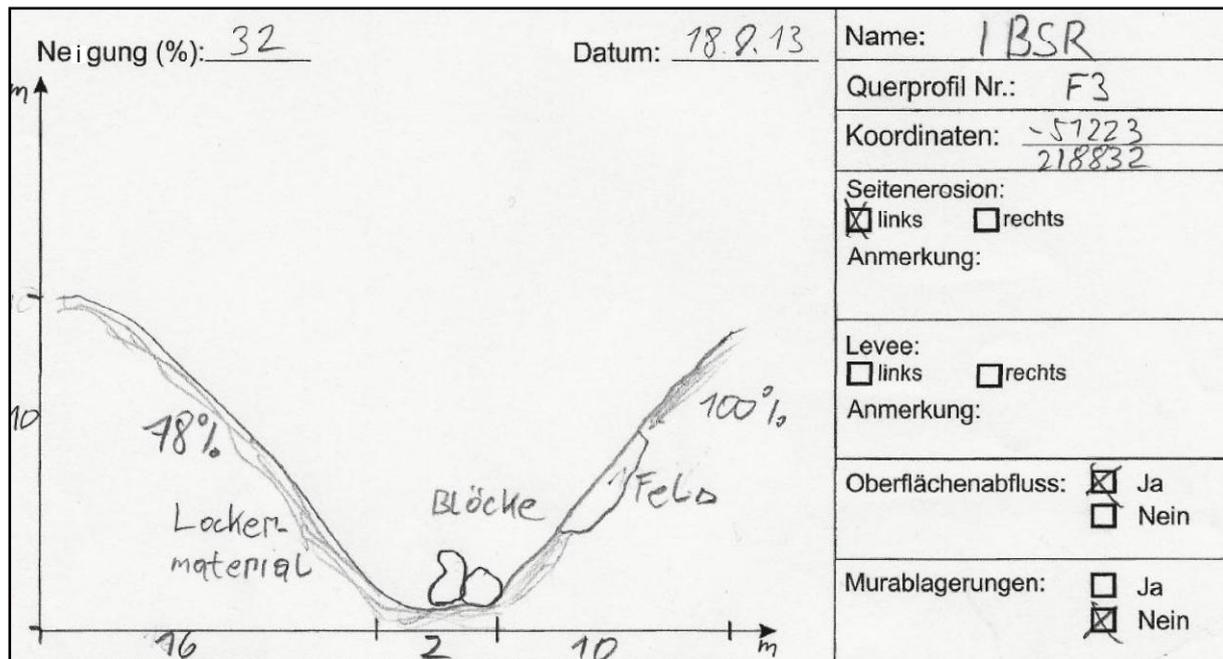


Abbildung 22: Aufnahmeformular für die Querprofile

### 2.2.5 Korngrößenverteilung (G.S.)

Zur Erfassung der Korngrößenverteilung der Grobkomponenten wurden in den Rinnen jeweils im Transit- und Ablagerungsgebiet, Linienzahlanalysen nach der von FEHR (1987) entwickelten Methode durchgeführt. Drei weitere Linienproben wurden in den Schuttkegeln gemacht.

Vorgangsweise: Mit einem Maßband wurde eine Linie auf der Kiessohle gespannt. Erfasst wurden mittels Holzmesskluppe die b-Achsen (siehe Abbildung 23) der Kieselemente, die in Berührung mit der aufgespannten Linie standen, und grösser waren als der zuvor definierte Schwellendurchmesser von 10mm (siehe Abbildung 24).

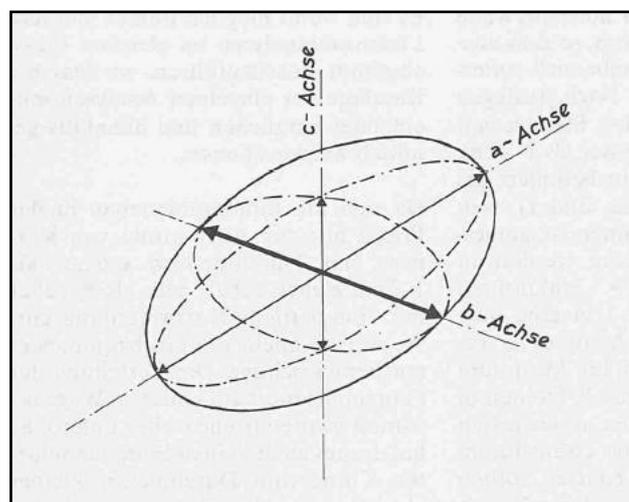


Abbildung 23: Die drei Hauptachsen eines Steines. Bei der Linienzahlanalyse wird die mittlere Achse (b-Achse) gemessen (FEHR, 1987).

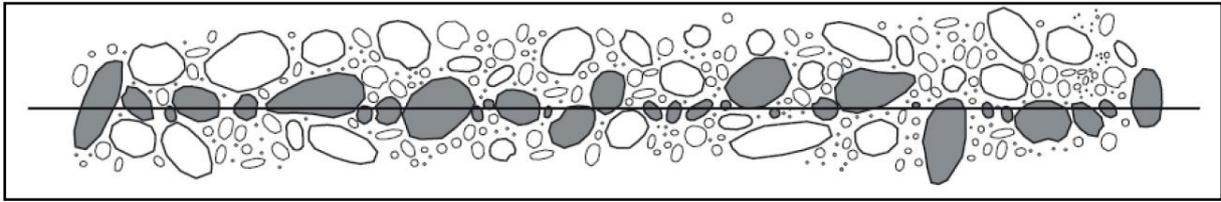


Abbildung 24: Prinzipskizze zur Linienzahlanalyse, Draufsicht. Erfasst für die Analyse werden die b-Achsen der dunkel eingefärbten Steine, die in Berührung mit der aufgespannten Linie stehen (BEZZOLA 2004).

Die Messdaten wurden bereits im Aufnahmeprotokoll im Feld in Fraktionen eingeteilt. Um die Repräsentativität der Analysen zu gewährleisten, wurden je Aufnahmepunkt mindestens 200 Steine gezählt, wobei mindestens 30 Steine zu den mittleren Fraktionen gezählt wurden. Die Umrechnung der Kornverteilung der Linienprobe der Deckschicht in eine äquivalente Kornverteilung der Unterschicht wurde im Anschluss in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgte die Umrechnung der Verteilung nach "Anzahl entlang einer Linie" in eine Verteilung nach "Gewicht in einem Volumen" über:

$$\Delta p_i = \frac{\Delta q_i d_{mi}^{0.8}}{\sum_1^n \Delta q_i d_{mi}^{0.8}}$$

Dabei ist  $\Delta p_i$  = Gewicht der Fraktion  $i$  / Gewicht der ganzen Probe (Volumengewichtsanalyse der Unterschicht),  $\Delta q_i$  = Anzahl Steine der Fraktion  $i$  / Anzahl Steine der ganzen Probe (Linienzahlanalyse der Deckschicht),  $d_{mi}$  = charakteristische (mittlerer) Korndurchmesser der Fraktion  $i$ ,  $n$  = Anzahl der Fraktionen.

Die feinsten Fraktionen der Linienzahlanalyse wurden dabei durch dieses Potenzgesetz überschätzt. Dies vor allem, weil mit der Methode der Linienzahlanalyse die Verteilung der feineren Komponenten, wegen der Schwierigkeit des Erfassens der Steine mit kleinem Durchmesser, nur ungenau bestimmt werden kann. Die Korngrößenverteilung wurde darum nach der Umrechnung mit folgender Beziehung korrigiert:

$$p_{ic} = 0.25 + 0.75 \sum_1^i \Delta p_i$$

wobei:

$p_{ic}$  = korrigierte Summenhäufigkeit der Fraktion  $i$ ,

$\Delta p_i$  = Gewicht der Fraktion  $i$  / Gewicht der ganzen Probe

Die so erhaltene Korngrößenverteilung musste nun noch durch die Verteilung der Feinkomponenten ergänzt werden. Ausgehend von der Annahme einer Verteilung nach Fuller, wurde ein Bereich der umgerechneten und korrigierten Linienzahlanalyse gesucht, in welchem die Steigung der Tangente (bei linearer Aufzeichnung der Korndurchmesser) derjenigen einer Fullerkurve folgt (Abbildung 25). Durch die Zusammenlegung beider Kurven erhielt man schließlich die Korngrößenverteilung (Abbildung 26).

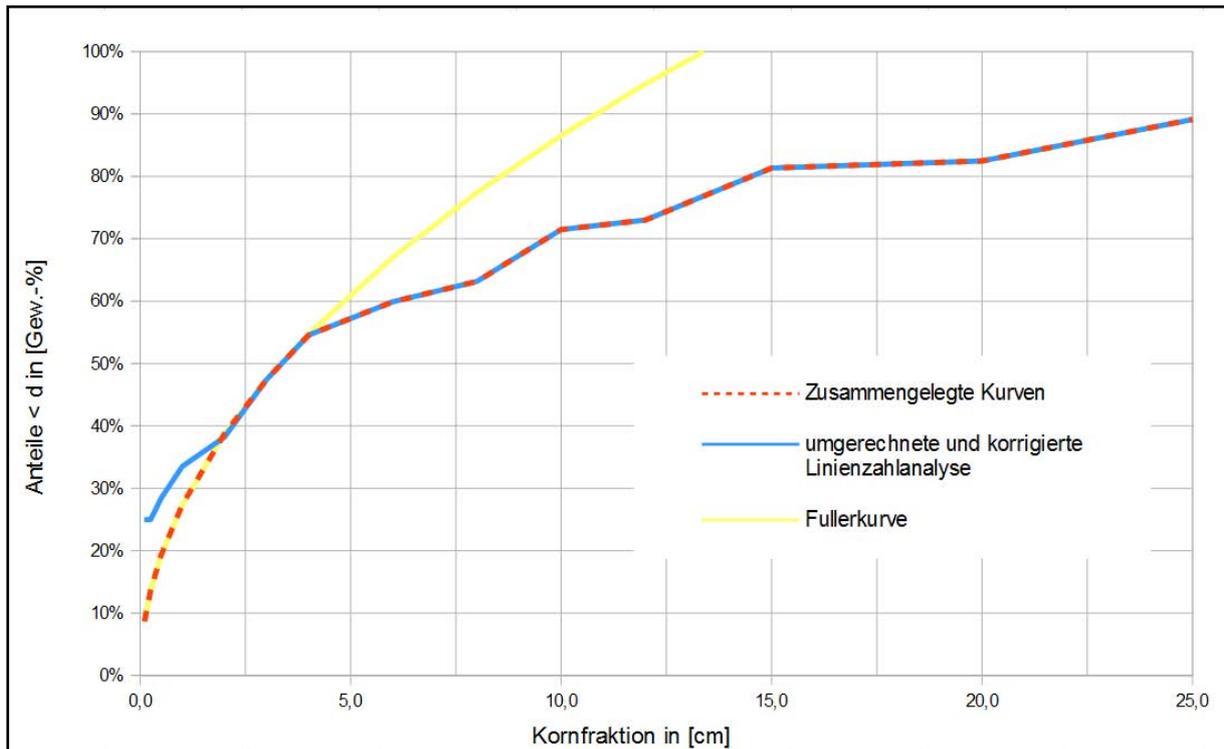


Abbildung 25: Beispiel für eine Ergänzung der Feinkomponenten nach Fuller. Lineare Skalierung

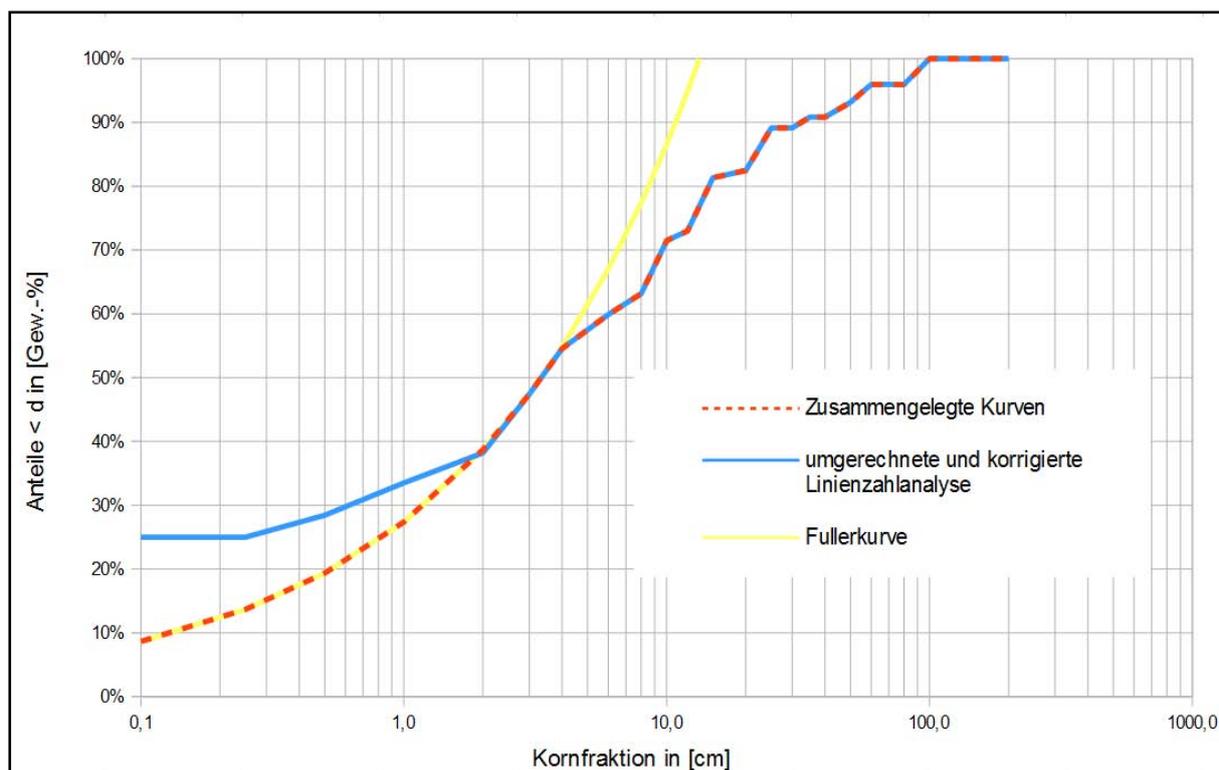


Abbildung 26: Beispiel für eine Ergänzung der Feinkomponenten nach Fuller. Logarithmische Skalierung;

## 2.3 Methodik Labor

### 2.3.1 Korngrößenanalyse der Proben (G.S.)

Die Korngrößenanalyse erfolgte durch eine Kombination aus Nasssiebung (Fraktionen > 20  $\mu\text{m}$ ) und Sedimentationsanalyse mittels Micromeritics SediGraph 5000 ET (Fraktionen  $\leq$  20  $\mu\text{m}$ ).

50 g der luftgetrockneten Probe wurden zur Dispergierung und Zerstörung der organischen Substanz über mehrere Tage mit insgesamt ca. 200 ml 10%igem Wasserstoffperoxid versetzt. Nach Beendigung der Reaktion wurde überschüssiges Wasserstoffperoxid durch Auskochen im Wasserbad bei 95°C entfernt. Nach Ultraschallbehandlung wurde die Probe gesiebt. Die Siebrückstände (> 2000 $\mu\text{m}$ , > 630 $\mu\text{m}$ , > 200 $\mu\text{m}$ , > 63  $\mu\text{m}$  und > 20  $\mu\text{m}$ ) wurden getrocknet und gewogen. Zur Bestimmung des Wassergehaltes wurde eine Teilprobe des luftgetrockneten Bodens bei 105°C getrocknet.

Vom Siebdurchgang < 20  $\mu\text{m}$  wurde eine Teilprobe für die Sedimentationsanalyse eingedickt, mit 0,05 % Natriumpolyphosphatlösung versetzt und nach Ultraschallbe-

handlung im Sedigraph gemessen. Aus den Ergebnissen der Siebanalyse und der Sedimentationsanalyse wurde die Korngrößenverteilung ermittelt.

### **2.3.2 Mineralogische Untersuchung, Gesamtmineralbestand (G.S.)**

Mittels Röntgendiffraktometrie (X-ray diffraction - XRD) wurden Mineralphasen qualitativ und auch semiquantitativ erfasst.

Die untersuchten Proben wurden folgendermaßen aufbereitet:

Die einzelnen Proben wurden getrocknet, in einer Scheibenschwingmühle analysefein vermahlen und nach dem backloading Verfahren präpariert. Die Messung erfolgte in einem Panalytical X'Pert Pro MPD Diffraktometer mit automatischem Divergenzschlitz, Cu LFF Röhre 45 kV, 40 mA, und einem X'Celerator Detektor. Die Messzeit war 25 s, mit einer Schrittweite  $0,017^\circ$  von  $2^\circ$  bis  $70^\circ 2\Theta$ . Aus diesen Aufnahmen wurde der qualitative Mineralbestand ermittelt.

## **2.4 Methodik Modell (G.S.)**

Ein weiterer Punkt dieser Arbeit ist die Durchführung eines Modellversuchs. Dazu wurde im Labor auf der BOKU eine Versuchsanlage konstruiert. Die grundlegende Frage dabei war, welche Bedingungen Voraussetzung für Murgang oder murartigen Transport sind. In der Versuchsanlage soll Reinwasserabfluss auf einen Schuttkegel treffen und dort zu Murgang oder murartigem Transport führen.

### **2.4.1 Ähnlichkeit eines hydraulischen Modells (G.S.)**

Das allgemeine Ähnlichkeitsprinzip der Physik sagt aus, dass in einem geometrisch ähnlichen - vergrößerten oder verkleinerten - Modell die physikalischen Vorgänge gleiche physikalische Ursachen haben. Da dies nach einer mechanischen Ähnlichkeit der ablaufenden Prozesse verlangt, ist die geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit erforderlich.

Geometrische Ähnlichkeit ist gegeben, wenn alle entsprechenden Strecken der Länge  $l$  in der Natur ( $N$ ) und im Modell ( $M$ ) in einem konstanten Verhältnis zu einander stehen. Dieses Verhältnis ist die Maßstabszahl  $M_l$ .

$$M_l = \frac{l_N}{l_M} = \frac{\text{Naturgröße}}{\text{Modellgröße}} = \text{Längenmaßstab}$$

Die kinematische Ähnlichkeit beinhaltet die zeitabhängigen Vorgänge:

$$M_t = \frac{t_N}{t_M} = \text{Zeitmaßstab}$$

Die dynamische Ähnlichkeit beinhaltet die Kräfteverhältnisse:

$$M_f = \frac{F_N}{F_M} = \text{Kräftemaßstab}$$

Damit dynamische Ähnlichkeit besteht müssen die Umrechnungsverhältnisse aller Kräftearten (z.B. Trägheit, Gewicht, Reibung, Kapillarität, Elastizität) gleich groß sein:

$$M_T = M_G = M_R = M_K = M_E$$

Ersetzt man die Maßstabszahlen der Kräftearten durch die ihrer Grunddimensionen, so kann daraus die Aussage abgeleitet werden, dass die Verwendung des gleichen Mediums nur bei Maßstab 1 möglich ist. Für alle anderen Maßstäbe müsste ein Medium mit anderen Eigenschaften im Modell eingesetzt werden. Dies ist jedoch technisch oder wirtschaftlich kaum erfüllbar. Angenäherte dynamische Ähnlichkeit ist allerdings durch Vernachlässigung bestimmter Kräfteinflüsse erreichbar. Aus der Kombination der permanent wirkenden Trägheitskräfte mit anderen Kräftearten ergeben sich verschiedene Ähnlichkeitsgesetze. Diese sich aus dem Gleichgewicht der dominierenden Kräfteverhältnisse ergebenden Ähnlichkeitsgesetze sagen aus, dass neben den geometrischen Größen alle anderen physikalischen Größen mit festgelegtem Maßstabsfaktor zu übertragen sind (MARTIN, 2008).

Bei Modellversuchen in offenen Gerinnen wird zumeist das Froude'sche Ähnlichkeitsgesetz herangezogen. Es besagt, dass die Froudezahlen der Strömungen in der Natur und im Modell gleich groß sein müssen.

Die Einhaltung der vollen dynamischen Ähnlichkeit bei Versuchen mit Sediment-Wassergemischen ist in der Praxis nahezu unmöglich (IVERSON, 2015). Die Modellversuche in der vorliegenden Arbeit konzentrieren sich auf die qualitative und quantitative Beobachtung der Erosions- und Ablagerungsgeometrien. Auch wenn keine dynamischen Parameter während des Versuchs aufgenommen werden, ist zu erwarten, dass gewisse Kraftverhältnisse nicht korrekt skaliert werden. Im Besonderen erwarten wir, dass die Kapillarkräfte in den Modellversuchen stark überrepräsentiert sind und der Effekt von Porenwasserdruck generell unterschätzt wird. Deshalb sollen die hier vorgestellten Versuche keine genauen Abbildungen von Muren darstellen, sondern nur grobe Anhaltspunkte und Trends zu bestimmten Parametern (mindest-Neigung, Trend Auslauflänge, etc.) liefern.

### 2.4.2 Aufbau Versuchsanlage (G.S.)

Die Versuchsanlage wurde so konstruiert, dass eine Neigung von 0 bis 45° beliebig einstellbar war. Die Bodenplatte mit den Maßen 130 cm mal 50 cm und einer Fläche von 0,65 m<sup>2</sup> wurde mit einem Gitternetz als Rauigkeitselement versehen und mit 25 cm hohen Seitenwänden (Abbildung 27, D) ausgestattet. Zur Schaffung der benötigten Vorfeuchte wurde eine Beregnungsanlage mit Durchflussmesser (Abbildung 27, A) installiert. Am oberen Ende der Versuchsrinne wurde eine Platte mit größerer Neigung angebracht, die den anstehenden Fels darstellt (Abbildung 27, C). Über diese Platte wurde Wasser eingeleitet und so ein Reinwasserabfluss simuliert. Für die Einleitung des Wassers wurde eine Dosieranlage mit einstellbarem Durchfluss (Abbildung 27, B) und einstellbarer Wassermenge installiert. Am unteren Ende der Rinne wurde ein feinmaschiges Gitter (Abbildung 27, F) angebracht, um den Abfluss des infiltrierten Wassers zu gewährleisten. Als Modellgeschiebe wurde eine Mischung aus Bruchkorn und Sand gewählt. Das Mischungsverhältnis von Bruchkorn (Abbildung 28) zu Sand (Abbildung 29) in Gewichtsanteilen betrug 1:1,2.

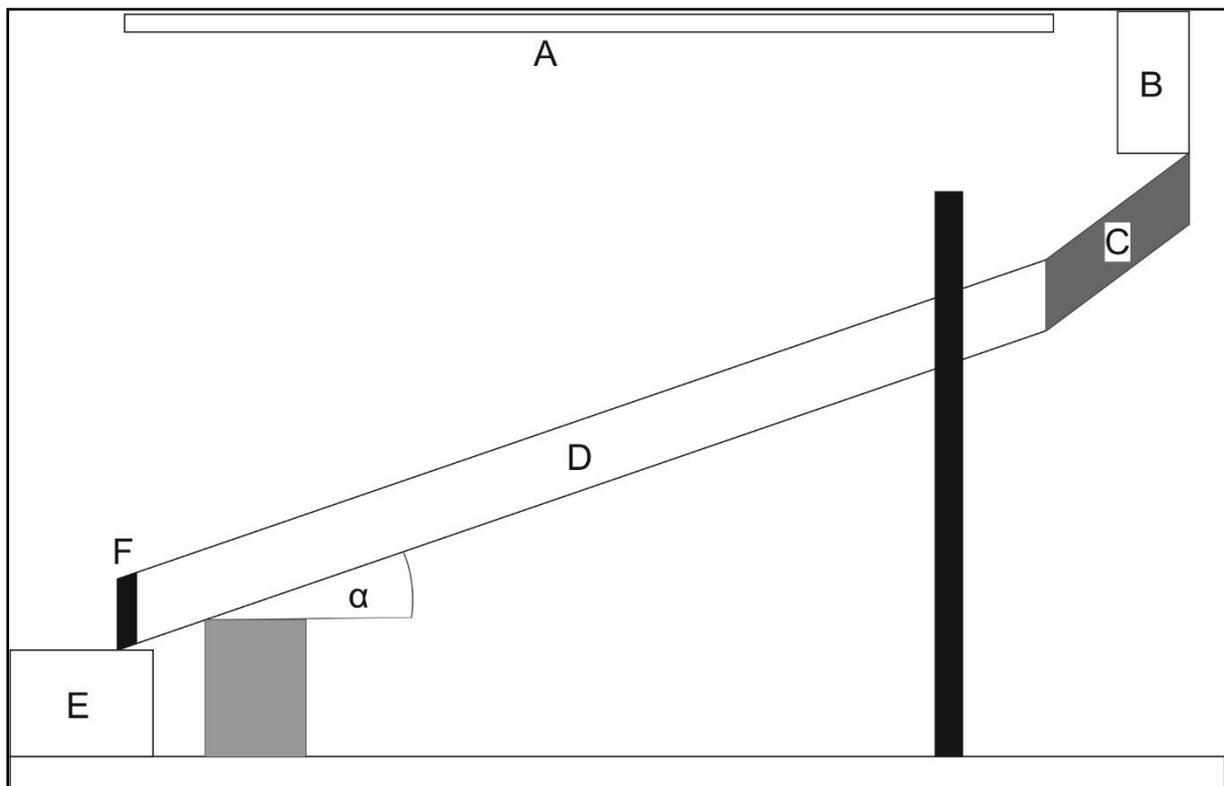


Abbildung 27: Versuchsanlage: Beregnungsanlage (A), Reservoir mit Dosieranlage (B), Wassereinleitung (C), Rinne (D), Wasserauffangbehälter (E), Gitter (F), Neigungsmesser ( $\alpha$ )

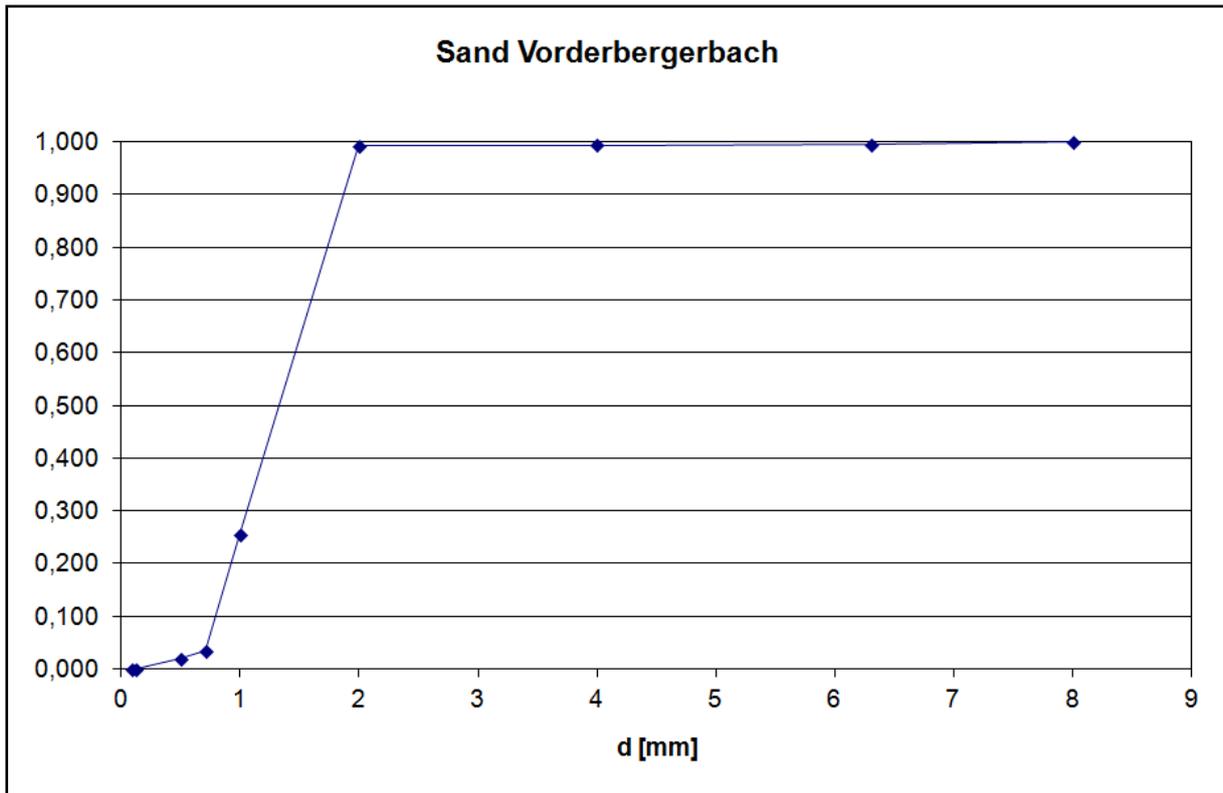


Abbildung 28: Korngrößenverteilung Sand Vorderbergerbach

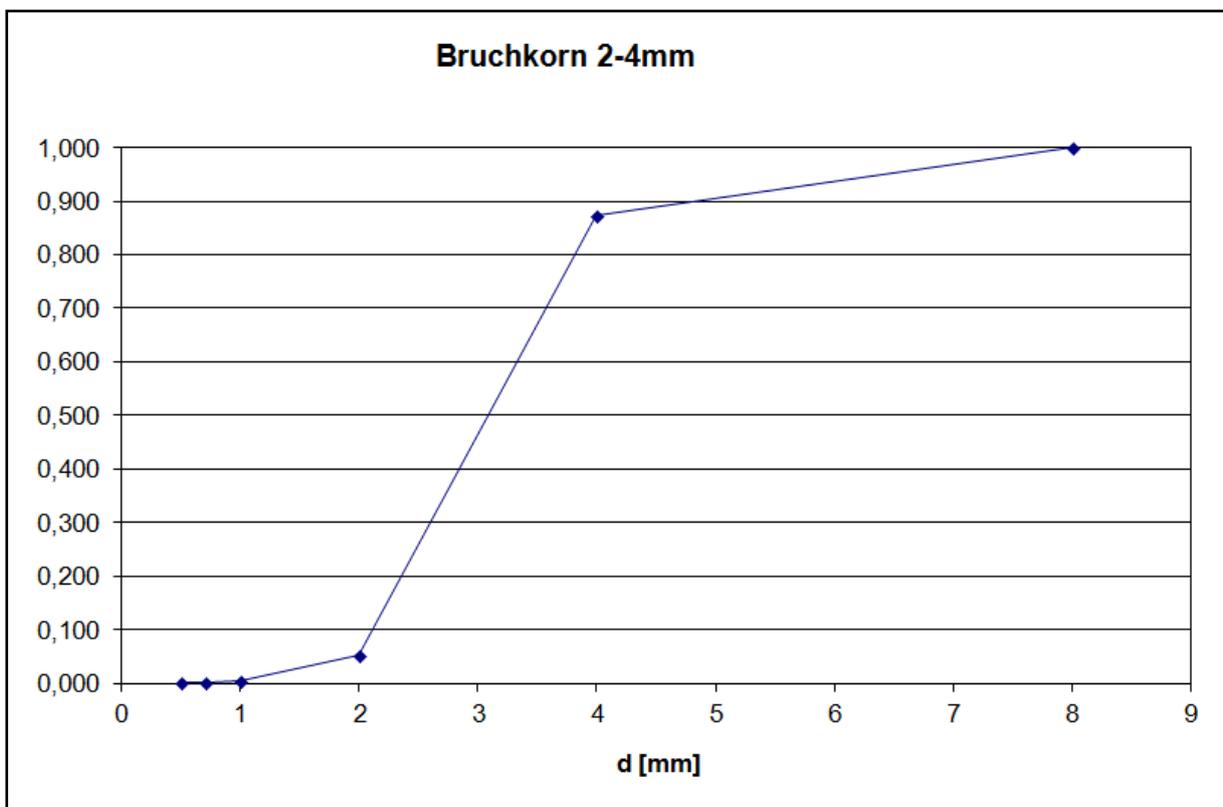


Abbildung 29: Korngrößenverteilung Bruchkorn

### 2.4.3 Versuche (G.S.)

Für die Versuche wurde die Versuchsrinne 14 cm hoch mit Geschiebe gefüllt. Dann wurde durch Beregnung mit 0,90 Liter pro Minute, welche bei einer Fläche von 0,65 m<sup>2</sup> einer Wassermenge von 1,4 Liter/m<sup>2</sup>/min (84 mm/h) entspricht, die Vorfeuchte geschaffen. Durch diese Beregnung wurde ein Niederschlagsereignis aus dem Jahr 2012 simuliert. Die Niederschlagsmenge stammt aus einer Messstelle im Gamperdonatal, welche am 22.08.2012 ein Starkregenereignis mit einem Niederschlag von 21 mm in 15 Minuten aufzeichnete. Anschließend wurde bei einer Neigung von 15°, eine Wassermenge von 0,6 Liter pro Sekunde für eine Dauer von 5 Sekunden eingeleitet. Bei diesem Versuch infiltrierte nahezu das gesamte Wasser ohne murartigen Transport hervorzurufen. In weiteren Versuchen wurde die Neigung kontinuierlich erhöht und schließlich konnten bei 20° Neigung und 0,8 Liter pro Sekunde murartige Transporte beobachtet werden. Anschließend wurden jeweils mindestens drei Versuche bei 20, 25, 30 und 35° und 4 bzw. 5 Liter Wassermenge und einem Durchfluss von 0,8 Liter pro Sekunde durchgeführt. Zur Dokumentation der entstandenen Erosion und Ablagerung wurde alle 10 Zentimeter ein Querprofil aufgenommen. Zusätzlich wurden die Versuche gefilmt und mittels Fotos dokumentiert.

### 2.4.4 Dimensionslose Kennzahlen (G.S.)

Zur Ermittlung dimensionsloser Kennzahlen wurden die Gesamtlänge, Länge der Ablagerung, Lage des Geländeverschnidungspunktes, die maximale Breite der Ablagerung und die Länge bis zur maximalen Breite der Ablagerung aufgenommen. Die Werte aus jeweils mehreren Versuchen wurden gemittelt und daraus folgende dimensionslose Kennzahlen erstellt:

$Abl/GesL = \text{Länge der Ablagerung} / \text{Gesamtlänge}$

$LB_{max}/Abl = \text{Länge bis zur max. Breite der Ablagerung} / \text{Länge der Ablagerung}$

$B_{max}/Abl = \text{max. Breite der Ablagerung} / \text{Länge der Ablagerung}$

$B_{max}/GesL = \text{max. Breite der Ablagerung} / \text{Gesamtlänge}$

### 3 Ergebnisse und Diskussion - Feldarbeit (M.B.)

#### 3.1 Kartierung (M.B.)

##### 3.1.1 Einzugsgebiete (M.B.)

###### 3.1.1.1 Fundelkopf (M.B.)

Auf der Westseite des Fundelkopfes gibt es insgesamt 21 murfähige Einzugsgebiete. Die Größe der Einzugsgebiete reicht von 0,7 ha bei der kleinsten Mure südlich der Jobanröfe bis ca. 76 ha bei der Bäraröfe. Der Großteil der kleineren Muren ist zurzeit wenig aktiv und so fiel die Auswahl für die Aufnahme auf die 5 größten und auch aktivsten Einzugsgebiete westlich des Fundelkopfes. Namentlich sind es von Nord nach Süd: Studazug, Bäraröfe, Äußere Bildstöckleröfe und die Innere Bildstöckleröfe. Die Bezeichnung der südlichsten Röfe konnte nicht ausgemacht werden und wurde so als „Jobanröfe“ benannt (Abbildung 30).

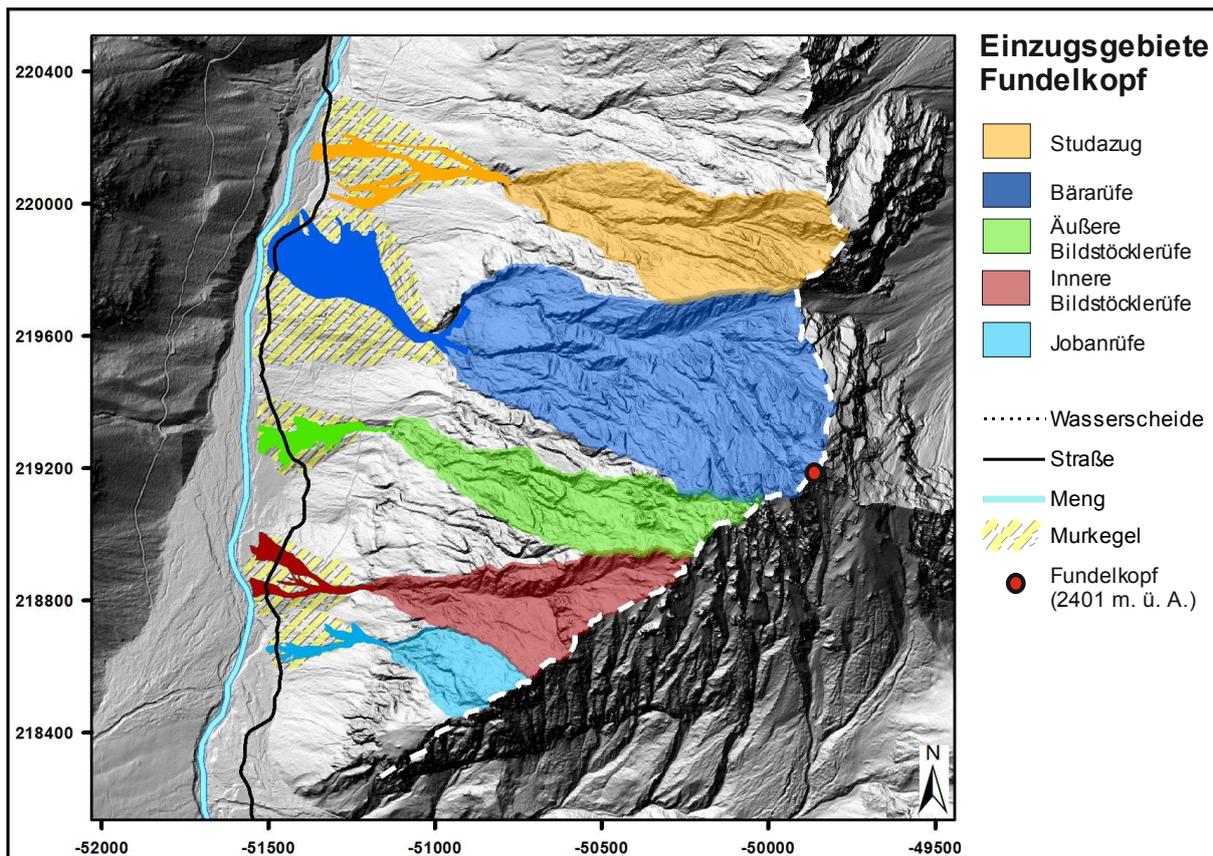


Abbildung 30: Die 5 untersuchten Rinnen westlich des Fundelkopfes von Nord nach Süd: Studazug, Bäraröfe, Äußere Bildstöckleröfe, Innere Bildstöckleröfe und die Jobanröfe

Die mittlere Einzugsgebietsfläche liegt bei 33,8 ha mit einer durchschnittlichen Neigung entlang der Hauptrinne von 35,7 Grad, wobei die Neigung von der Bärarüfe Richtung Norden und Süden stetig zunimmt. Den höchsten Punkt erreicht das Einzugsgebiet der Bärarüfe, das sich bis zum Gipfel des Fundelkopfes auf 2401 Metern erstreckt. Der tiefste Punkt reicht beim Studazug bis zum Vorfluter auf 1184 Metern Seehöhe. Die mittlere Höhendifferenz liegt bei 993 Metern bei einer durchschnittlichen Gerinnelänge von 1583 Metern. Melton-Verhältnisse größer 1,52 schließen auf den Leitprozess Murgang. Auch die Kombination aus Melton-Zahl und Gerinnelänge bzw. Melton-Zahl und Reliefverhältnis bestätigen dies (Tabelle 5).

Tabelle 5: Kenndaten der Einzugsgebiete der Muren am Westhang des Fundelkopfes

Fundelkopf	Studazug	Bärarüfe	Äußere Bildstöcklerüfe	Innere Bildstöcklerüfe	Jobanrüfe	Min	Max	Mittel
Einzugsgebiet (ha)	37,8	75,9	23,1	21,9	10,2	10,2	75,9	33,8
Neigung mittel (°)	33,3	32,2	36,6	36,0	40,4	32,2	40,4	35,7
H max	2236	2401	2341	2166	1892	1892	2401	2207
H min	1184	1194	1215	1227	1251	1184	1251	1214
H diff	1052	1207	1126	939	641	641	1207	993
Gerinnelänge	1617	1932	1510	1352	886	886	1932	1459
Melton-Verhältnis	1,87	1,52	2,50	2,19	2,26	1,52	2,50	2,07
Reliefverhältnis	0,68	0,63	0,75	0,70	0,73	0,63	0,75	0,70

### 3.1.1.2 Panülerkopf (M.B.)

Die Westseite des Panülerkopfes setzt sich aus insgesamt 22 murfähigen Einzugsgebieten zusammen. Das Kleinste ist ca. 0,8 ha groß und befindet sich westlich der Rinne 2, wo die Schutthalde bereits an Mächtigkeit verliert (Abbildung 31). Die zahlreichen kleineren Einzugsgebiete sind durch kleine Muren mit schwach ausgeprägten Merkmalen charakterisiert und wurden daher nicht kartiert. Das weitaus größte Einzugsgebiet hat mit 61 ha die Rinne 5 (Tabelle 6). Der größte Schuttkegel der Schutthalde befindet sich ebenfalls unterhalb dieser Rinne. Die durchschnittliche Neigung entlang der Hauptrinne der kartierten Einzugsgebiete liegt bei ca. 43,3 Grad wobei auch hier die Rinne 5 (34,6 Grad) durch ihre große Auslauflänge vom Mittel am stärksten abweicht. Die Einzugsgebiete erstrecken sich vom Panülerkopf auf 2859 m. ü. A. bis hinunter in das Salarueltal auf 1788 Metern. Die maximale Höhendifferenz beträgt 1071 Höhenmeter, das Mittel liegt bei 828 Metern (Tabelle 6). Dies spiegelt sich auch im Melton-Verhältnis wider. Die kleinste Melton-Zahl liegt bei 1,6

was klar für Muren als Leitprozess spricht. Auch die Kombination aus Melton-Zahl und Gerinnelänge bzw. Melton-Zahl und dem Reliefverhältnis führen zum gleichen Ergebnis (Tabelle 6).

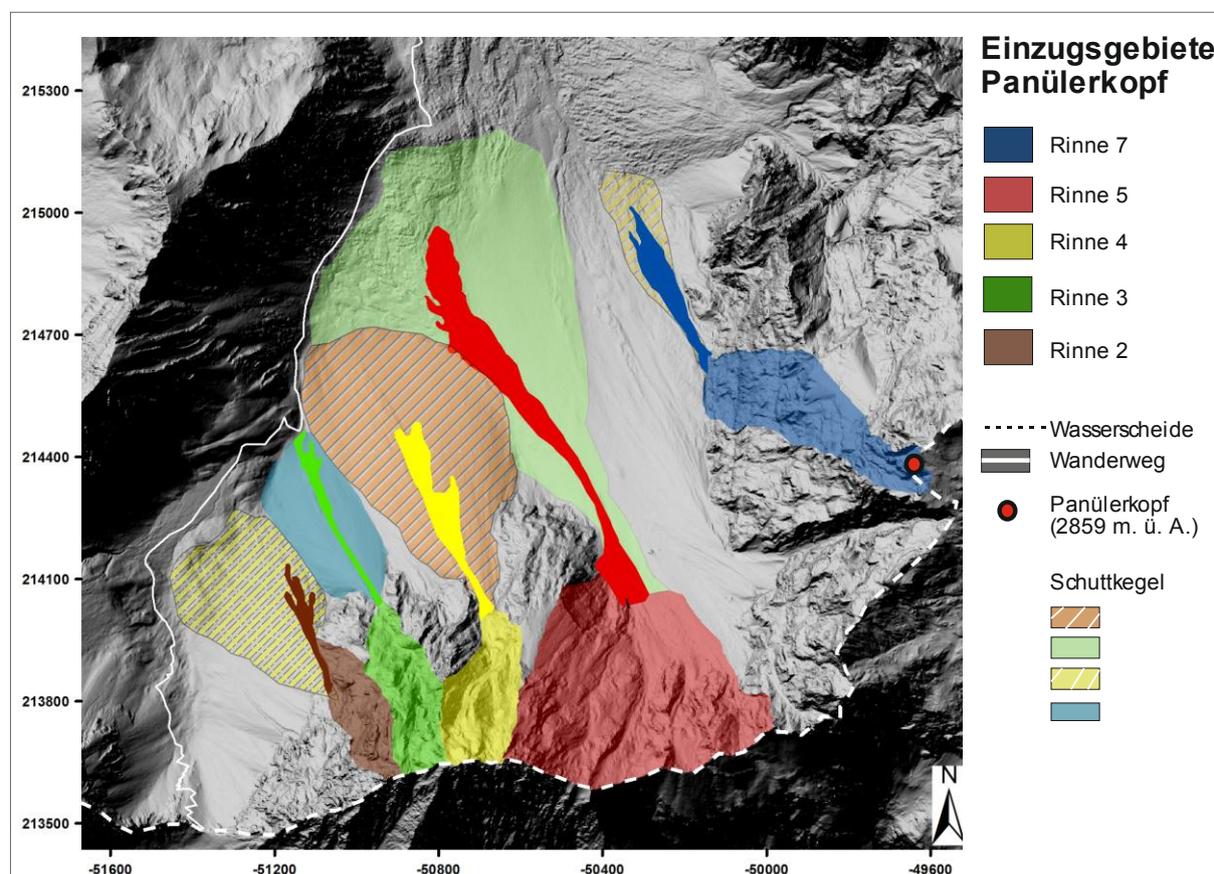


Abbildung 31: Die 5 untersuchten Muren westlich des Fundelkopfes von Ost nach West: Rinne 7, Rinne 5, Rinne 4, Rinne 3 und Rinne 2

Tabelle 6: Kenndaten der Einzugsgebiete der Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Panülerkopf	Rinne 2	Rinne 3	Rinne 4	Rinne 5	Rinne 7	Min	Max	Mittel
Einzugsgebiet (ha)	14,8	12,4	27,9	61,0	13,1	12,4	61,0	25,8
Neigung mittel (°)	45,3	45,0	43,3	34,6	48,3	34,6	48,3	43,3
H max	2562	2723	2725	2691	2859	2562	2859	2712
H min	2020	1872	1938	1788	1800	1788	2020	1884
H diff	542	851	787	903	1059	542	1059	828
Gerinnelänge	626	918	928	2490	982	626	2490	1189
Melton-Verhältnis	2,52	3,49	2,81	1,63	3,22	1,6	3,5	2,7
Reliefverhältnis	0,87	0,93	0,85	0,36	1,08	0,4	1,1	0,8

### 3.1.1.3 Bärarüfe (M.B.)

Die Bärarüfe (Abbildung 30) ist mit einer Gesamteinzugsgebietsfläche von rund 76 ha flächenmäßig die größte Mure auf der Westseite des Fundelkopfes. Die Spitze des Fundelkopfes auf 2401 Meter bildet gleichzeitig den höchsten Punkt des Einzugsgebietes. Die längste canyonartige Rinne legt auf ihrem rund 1932 Meter langen Weg vom Gipfel des Fundelkopfes bis zum Verschneidungspunkt 1207 Höhenmeter zurück. Obwohl die durchschnittliche Neigung mit 32,2 Grad deutlich unter dem Mittelwert liegt, sprechen sowohl Melton-Zahl als auch Reliefverhältnis für Murgang als Leitprozess (Tabelle 5).

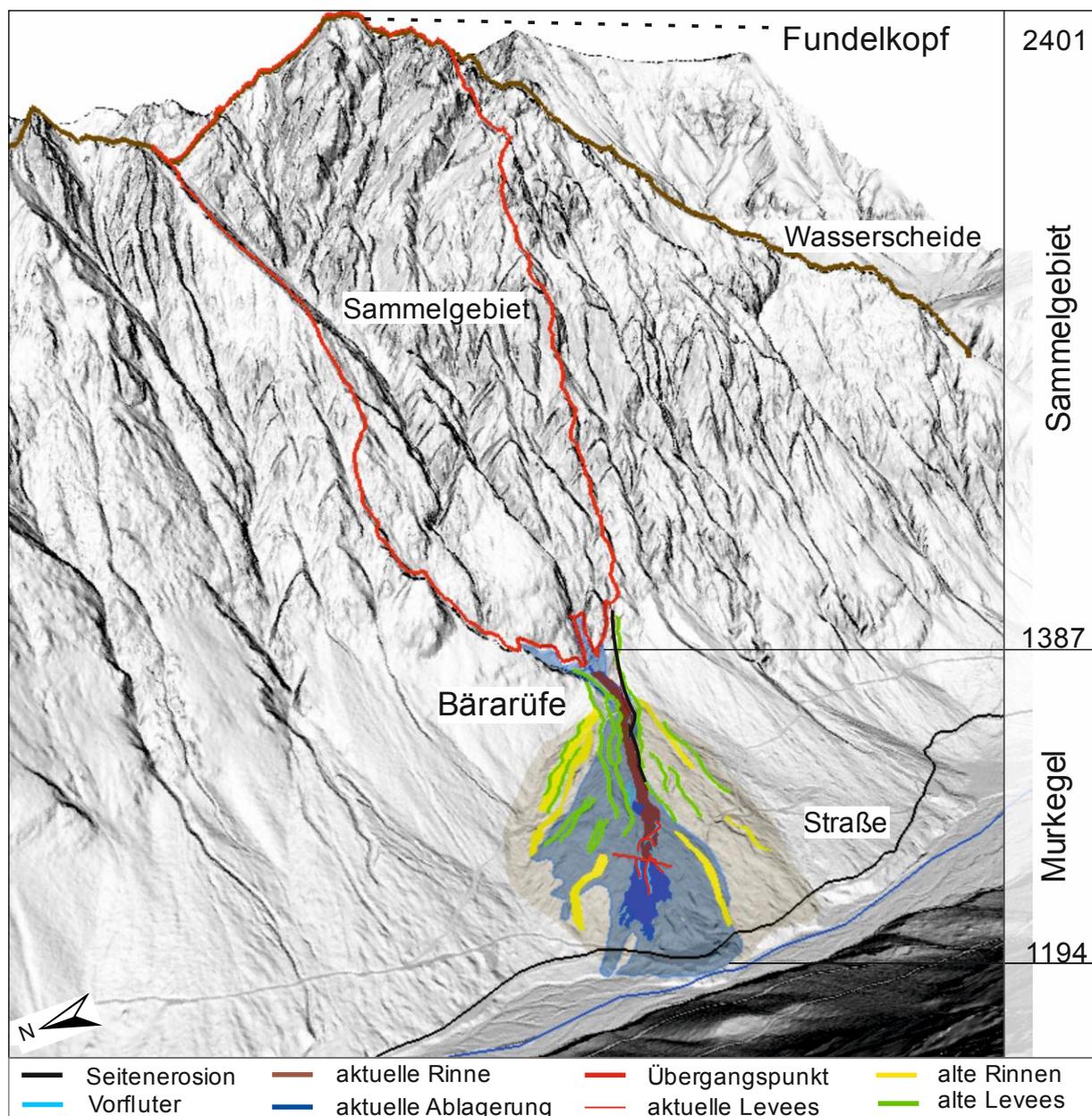


Abbildung 32: Einzugsgebiet der Bärarüfe, die hellblaue Fläche stellt den unbewaldeten Teil des Murkegels dar

### 3.1.1.4 Rinne 3 (M.B.)

Das Einzugsgebiet ist im Mittel 45 Grad in Richtung Norden geneigt. Die Rinne legt auf ihrem Weg von der Wasserscheide bis zu ihrem Ende rund 918 Meter und 851 Höhenmeter zurück (Tabelle 7). Die Wasserscheide bildet hier gleichzeitig die Grenze zur Schweiz. Mit einer Melton-Zahl von 3,49 und einem Reliefverhältnis von 0,93 ist der Leitprozess als Murgang zu klassifizieren.

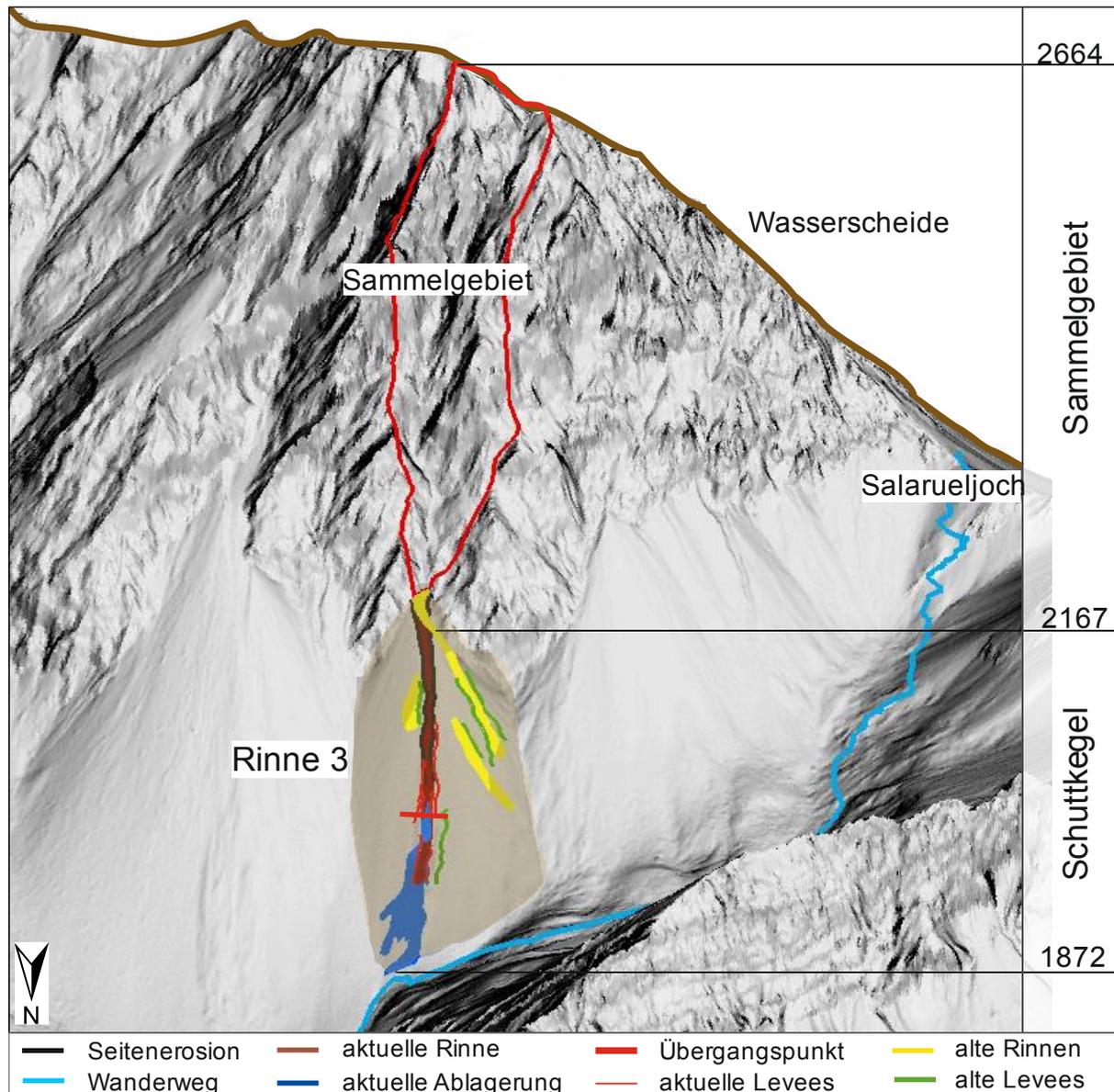


Abbildung 33: Einzugsgebiet der Rinne 3

### 3.1.2 Sammelgebiete (M.B.)

#### 3.1.2.1 Fundelkopf (M.B.)

Die Sammelgebiete der beiden Aufnahmegebiete unterscheiden sich stark voneinander. Die Sammelgebiete westlich des Fundelkopfes sind mit 24,7 ha mehr als zweieinhalbmal so groß wie jene des Panülerkopfes und bilden im Fels tief eingeschnittene Rinnen mit flachen Teilstrecken ( $< 15$  Grad) an denen der Schutt zwischengespeichert wird. Aufgrund der geringeren Seehöhe und der geringeren Neigung sind die Sammelgebiete des Fundelkopfes im Mittel zu rund 58 Prozent mit Bergkiefern bewachsen (Abbildung 34). Dies schlägt sich auch in der möglichen Erosionsrate nieder. Sie wurde nach SASS (2006) und HOFFMANN und SCHROTT (2002) berechnet und ergibt Werte von durchschnittlich  $21,5 \text{ m}^3$  bei einer Erosionsrate von  $0,15 \text{ mm/Jahr}$  und  $143 \text{ m}^3$  bei einer Erosionsrate von  $1,0 \text{ mm/Jahr}$  (Tabelle 7).

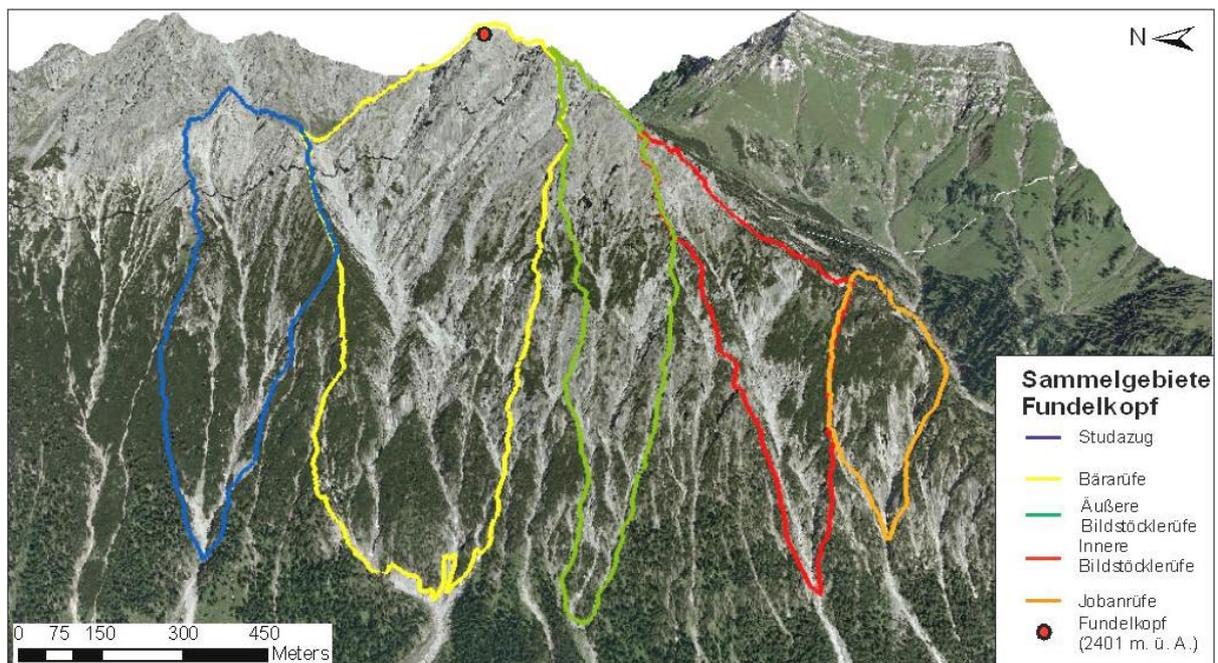


Abbildung 34: Sammelgebiete der 5 untersuchten Muren am Westhang des Fundelkopfes

Tabelle 7: Kenndaten der Sammelgebiete der Muren westlich des Fundelkopfes

Fundelkopf	Studa zug	Bära rüfe	Äußere Bildstöcke rüfe	Innere Bildstöcke rüfe	Joban rüfe	Min	Max	Mittel
Sammelgebiet (ha)	27,8	54,6	18,1	16,3	6,8	6,8	54,6	24,7
davon Fels (ha)	13,0	36,4	12,9	7,2	2,2	2,2	36,4	14,3
Neigung mittel (°)	37,4	37,5	40,6	39,5	46,7	37,4	46,7	40,3
H max (m. ü. A.)	2236	2401	2341	2166	1892	1892	2401	2207
H min (m. ü. A.)	1405	1387	1338	1365	1433	1338	1433	1386
H diff (m)	831	1014	1003	801	459	459	1014	822
Gerinnelänge (m)	1195	1428	1251	1103	600	600	1428	1115
Erosion (m <sup>3</sup> /Jahr)								
0,15 mm/Jahr	19,5	54,5	19,4	10,9	3,3	3,3	54,5	21,5
1,0 mm/Jahr	130	364	129	72	22	22	364	143

### 3.1.2.2 Panülerkopf (M.B.)

Die Sammelgebietsfläche der Schutthaldenmuren sind im Mittel 49,2 Grad in Richtung Norden geneigt (Tabelle 8). Sie sind im Vergleich zu den Muren am Fundelkopf ohne Vegetation und tief eingeschnittene Rinnen im Fels sind die Ausnahme. Das Fehlen von flachen Teilstrecken oder die Verfüllung dieser durch Schneefelder erschwert die Zwischenspeicherung von Schutt im Sammelgebiet (Abbildung 37, A). Die durchschnittliche Erosionsrate liegt bei 14,4 bis 96 m<sup>3</sup> pro Jahr (Tabelle 8).

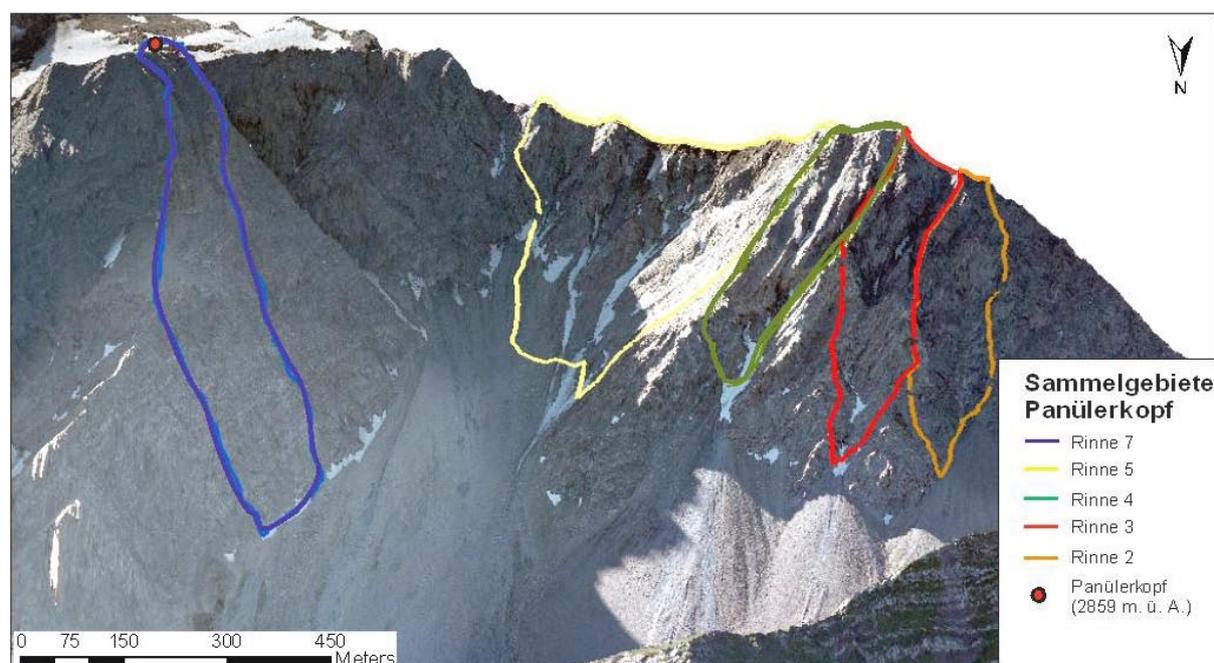


Abbildung 35: Sammelgebiete der 5 untersuchten Schutthaldenmuren

Tabelle 8: Kenndaten der Sammelgebiete der Schutthaldenmuren

Panülerkopf	Rinne 2	Rinne 3	Rinne 4	Rinne 5	Rinne 7	Min	Max	Mittel
Sammelgebiet (ha)	3,8	5,0	5,5	24,6	9,0	3,8	24,6	9,6
Neigung mittel (°)	50,2	50,1	49,5	42,1	54,2	42,1	54,2	49,2
H max (m. ü. A.)	2562	2723	2725	2691	2859	2562	2859	2712
H min (m. ü. A.)	2242	2167	2288	2299	2037	2037	2299	2207
H diff (m)	320	556	437	392	822	320	822	505
Gerinnelänge (m)	432	648	549	1290	756	432	1290	735
Erosion (m <sup>3</sup> /Jahr)								
0,15 mm/Jahr	5,6	7,5	8,2	36,8	13,6	5,6	36,8	14,4
1,0 mm/Jahr	38	50	55	246	90	38	246	96

### 3.1.2.3 Bärarüfe (M.B.)

Das Sammelgebiet der Bärarüfe reicht vom Gipfel des Fundelkopfes auf 2401 m. ü. A. bis zum Beginn der Kegelspitze auf 1387 Meter Seehöhe. Es setzt sich aus drei canyonartigen Rinnen, die sich auf rund 1400 Meter Seehöhe vereinen, zusammen. Die Hauptrinnen im zerklüfteten Massiv sind bis zu 30 m tief und durch kleine Abstürze mit flachen Teilstrecken geprägt (Abbildung 36). In diesen Rinnen wird das erodierte Material zwischengespeichert und kann somit als Quellgebiet für Muren fungieren (KAITNA et al., 2013). Die Hauptrinne im Sammelgebiet der Bärarüfe erstreckt sich bis zum Gipfel des Fundelkopfes und ist bis zum Übergang an der Kegelspitze ca. 1430 Meter lang.

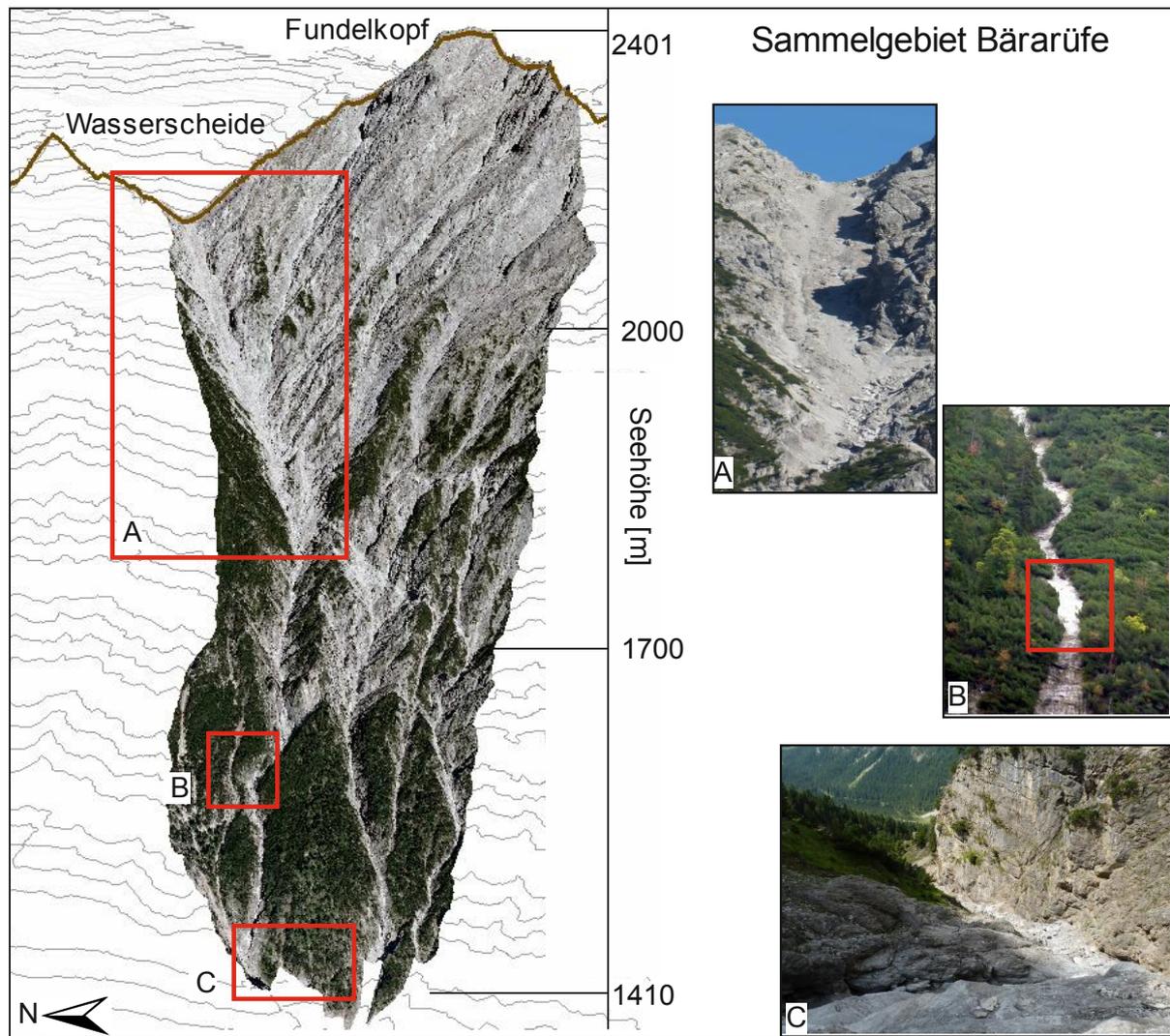


Abbildung 36: Sammelgebiet der Bärarüfe: A: große Störungszone; B: flache Teilstrecke an der der Schutt zwischengespeichert wird; C: einer der drei canyonartigen Rinnen kurz vor dem Übergang in den Murkegel

Am nordöstlichen Ende des Sammelgebietes ist eine große von West nach Ost verlaufende Störung zu erkennen (Abbildung 36, A). Solche Störungszonen sind im kleineren Maßstab auf die ganze Westflanke verteilt und sind hier die Hauptschuttbildner für Muren (RICHTER, 1978) (Abbildung 34). Das Gebiet ist im Mittel  $37,5^\circ$  in Richtung Westen geneigt. Der Leitprozess des Sammelgebietes ist mit einer Melton-Zahl von 1,37 und einem Reliefverhältnis von 0,71 klar als Murgang zu klassifizieren (WILFORD et al., 2004). Bergkiefern wachsen bis auf eine Seehöhe von 2100 Meter und bedecken bei der Bärarüfe ca. 18,2 ha (~ ein Drittel der Fläche) des gesamten Sammelgebietes. Die Erosionsrate liegt bei der Bärarüfe zwischen  $54,5$  und  $364 \text{ m}^3$  im Jahr (Tabelle 7).

### 3.1.2.4 Rinne 3 (M.B.)

Das 5 ha große Sammelgebiet der Rinne 3 reicht vom Grat auf 2664 m. ü. A. bis zum Beginn der Kegelspitze auf 2167 Meter Seehöhe.

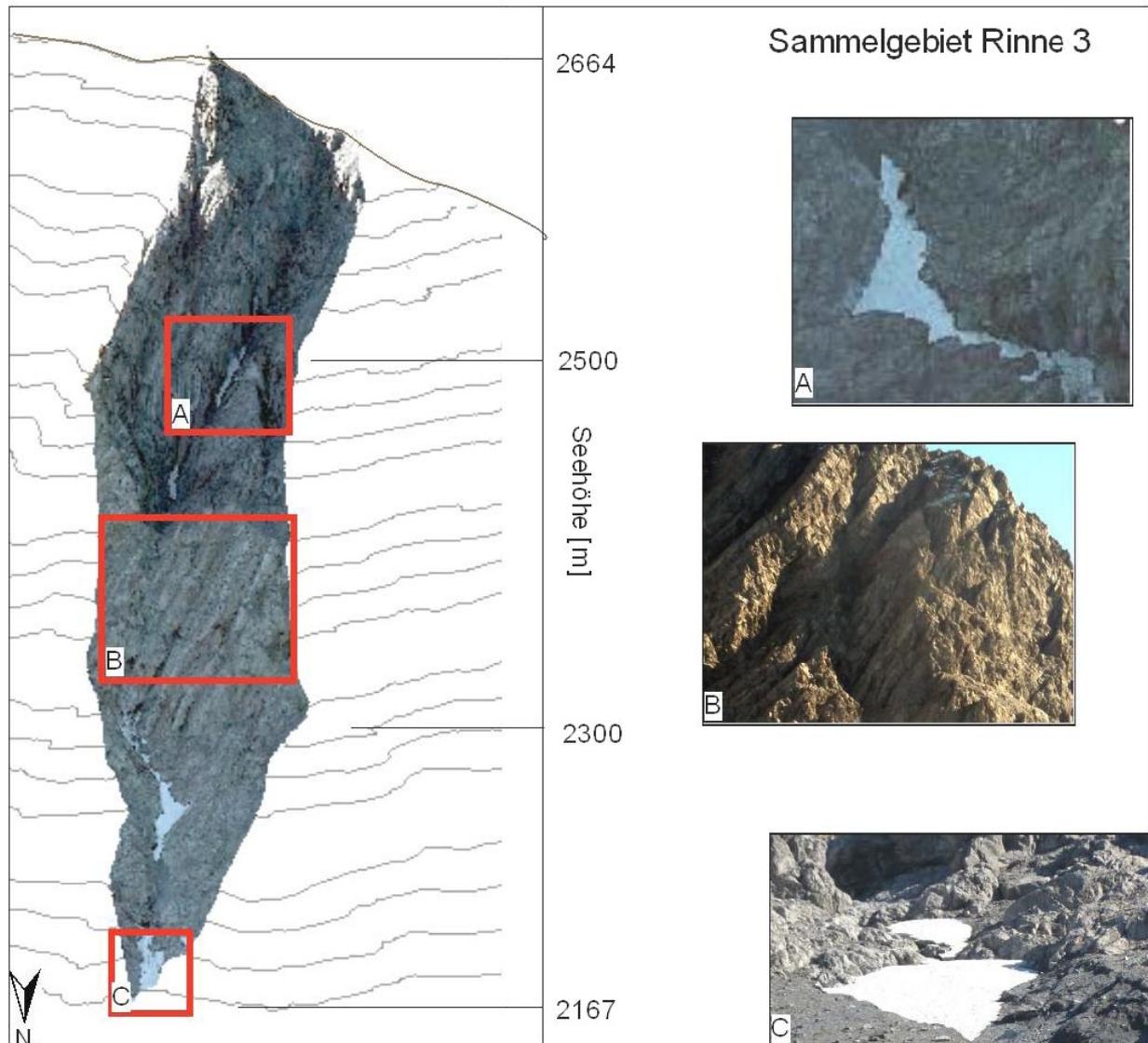


Abbildung 37: Sammelgebiet der Rinne 3: A: Mit Schnee verfüllte Senke in der Hauptrinne erschwert die Zwischenspeicherung von Schutt; B: Unterbrechung der Hauptrinne durch einen ca. 60 m Absturz; C: Schneefeld am Übergang zwischen Fels und Schuttkegel

Es setzt sich aus einem 648 m langen Hauptgerinne zusammen, welches sich auf rund 2400 Metern auflöst und sich erst nach einem ca. 60 Meter Absturz weiter fortsetzt. (Abbildung 37, B). Die Senken im seichten Hauptgerinne sind meist ganzjährig mit Schnee verfüllt, was die Zwischenspeicherung von Schutt und somit die Entstehung von Muren im Sammelgebiet erschwert (Abbildung 37, A). Das im Sammelgebiet erodierte Material gelangt oft direkt als Steinschlag oder Felssturz auf die

Schutthalde. Auch am Übergang zwischen Fels und Lockermaterial befindet sich meist ein Schneefeld (Abbildung 37, C). Das Gebiet ist im Mittel 50 Grad in Richtung Norden geneigt und kann jährlich zwischen 7,5 und 50 m<sup>3</sup> Schutt produzieren (Tabelle 8).

### 3.1.3 Mur- bzw. Schuttkegel (M.B.)

#### 3.1.3.1 Fundelkopf (M.B.)

Die 5 untersuchten Murkegel am Westhang des Fundelkopfes sind mit einer durchschnittlichen Fläche von 9,1 ha auch gleichzeitig die größten (Abbildung 38). Die Fläche reicht von 3,4 ha bei der Jobanrufe bis zu 21,3 ha bei der Bärarufe (Tabelle 9). Die Kegelfläche dieser Muren beträgt zwischen 25 und 50 Prozent der Sammelgebietsfläche. Die Kegel sind zwischen 17 und 27,1 Grad geneigt und legen vom proximalen bis zum distalen Kegelbereich zwischen 123 und 221 Höhenmeter zurück (Tabelle 9). Neben der Fläche der Murkegel nimmt auch die Länge der Rinne mit steigender Sammelgebietsfläche zu. Die längste Rinne mit 743 m liegt im Murkegel der Bärarufe, die kürzeste Rinne mit 416 m ist unterhalb des Sammelgebietes der Jobanrufe.

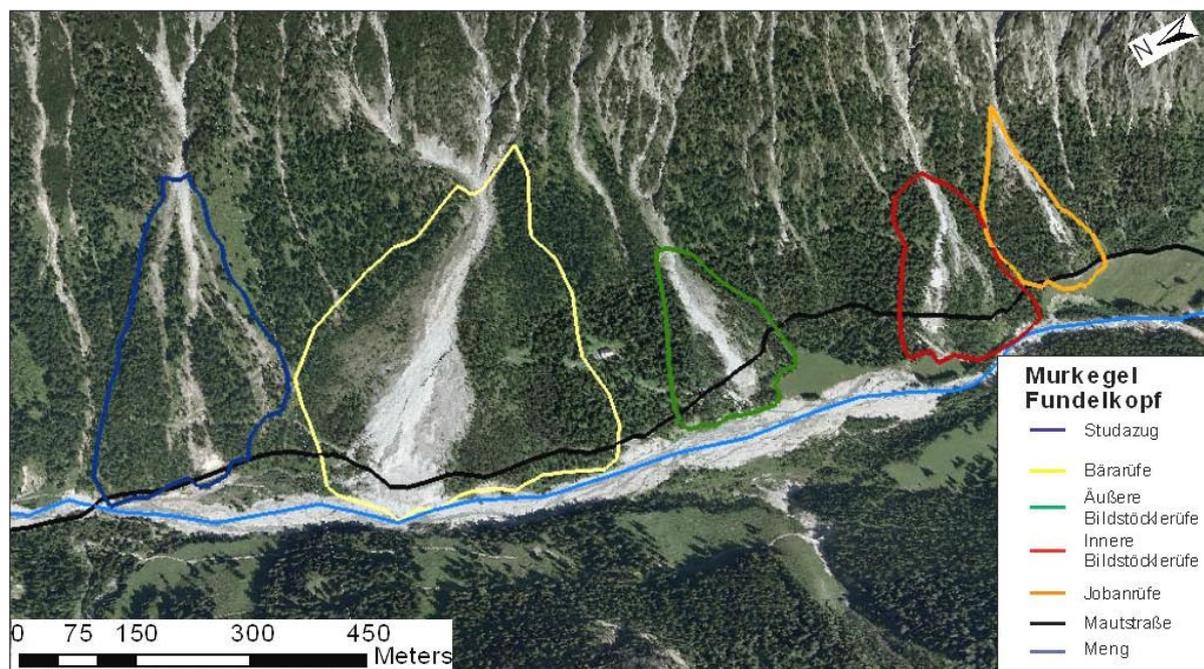


Abbildung 38: Murkegel der 5 kartierten Muren westlich des Fundelkopfes

Die Größe dieser Kegel ist von der Größe des darüberliegenden Sammelgebietes abhängig (Abbildung 39). Die Fläche der Kegel beträgt dabei im Mittel gut ein Drittel (~ 37 %) von jener der Sammelgebiete.

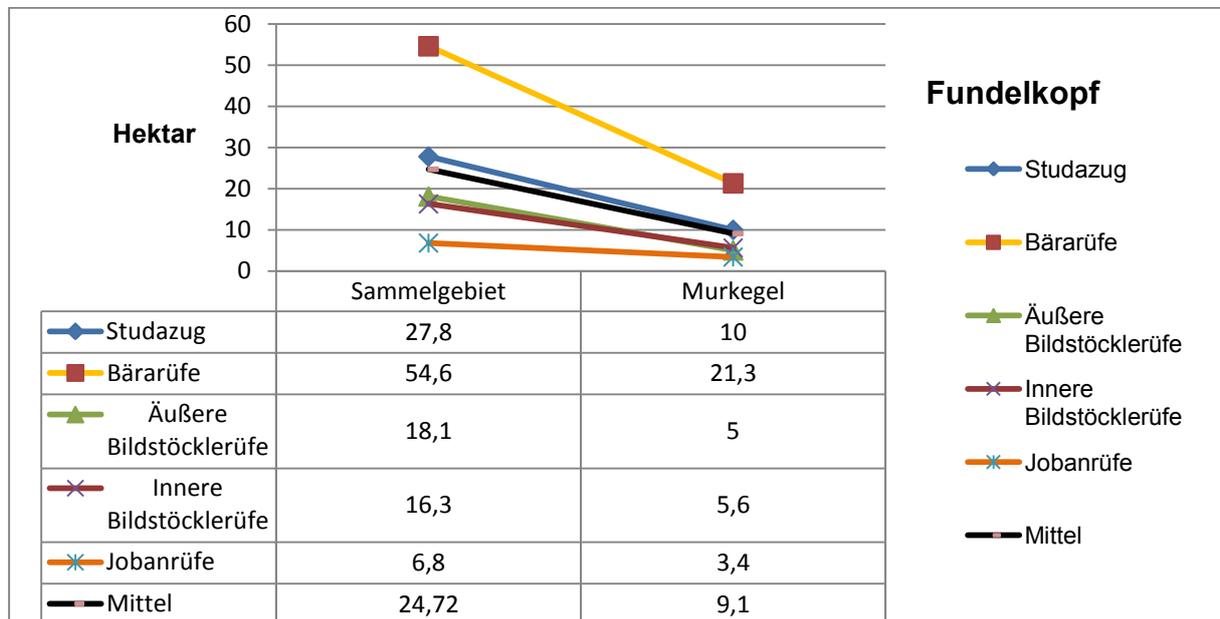


Abbildung 39: Verhältnis von Sammelgebietsfläche zu Murkegelfläche der Muren westlich des Fundelkopfes (in ha)

Bis auf den Murkegel der Jobanrüfe reichen alle Kegel bis zum Vorfluter und werden von diesem auch beeinflusst (Abbildung 38). Untersuchungen an anderen unbeeinflussten Kegeln haben aber gezeigt, dass der Einfluss hier sehr gering sein dürfte. Auch die Straße hat kaum einen Einfluss auf die Morphologie dieser Kegel.

Tabelle 9: Kenndaten der Murkegel westlich des Fundelkopfes

Muren Fundelkopf	Studa zug	Bära rüfe	Äußere Bildstöckle rüfe	Innere Bildstöckle rüfe	Joban rüfe	Min	Max	Mittel
Murkegel ge- samt (ha)	10,0	21,3	5,0	5,6	3,4	3,4	21,3	9,1
H max (m. ü. A.)	1405	1387	1338	1365	1433	1338	1433	1385,6
H min (m. ü. A.)	1184	1194	1215	1227	1251	1184	1251	1214,2
H diff (m)	221	193	123	138	182	123	221	171,4
L ges (schräg)	638	743	437	418	416	416	743	530,4
Neigung Kegel mittel (°)	21,8	17	17,2	20,4	27,1	17	27,1	20,7

### 3.1.3.2 Panülerkopf (M.B.)

Die Schuttkegel der Dolomitschutthalde sind zwischen 4,1 ha unterhalb der Rinne 7 und 36,4 ha unterhalb der Rinne 5 groß, der Mittelwert liegt bei 16,3 ha (Abbildung 41: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Tabelle 10). Ein direkter Zusammenhang zwischen Sammelgebietsfläche und Schuttkegelgröße konnte allerdings nicht festgestellt werden. Die Kegel sind im Mittel 31,4 Grad steil, was laut BARONI et al. (2013) hauptsächlich auf Steinschlag und Felssturz als Kegelaufbauprozess schließen lässt. Durch die Verbreiterung des Salarueltales von SSW in Richtung NNO (Abbildung 40) kann sich der Schutt besser verteilen und die Neigung der Kegel nimmt somit von der Rinne 2 bis zur Rinne 5 ab. Die Höhendifferenz beträgt zwischen proximalem Kegelbereich und distalem Kegelbereich zwischen 222 und 511 Höhenmeter. Die Rinnen sind im Durchschnitt 657 Meter lang und können in Abhängigkeit von der Sammelgebietsgröße bis zu 1203 Meter erreichen (Abbildung 41: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Tabelle 10).

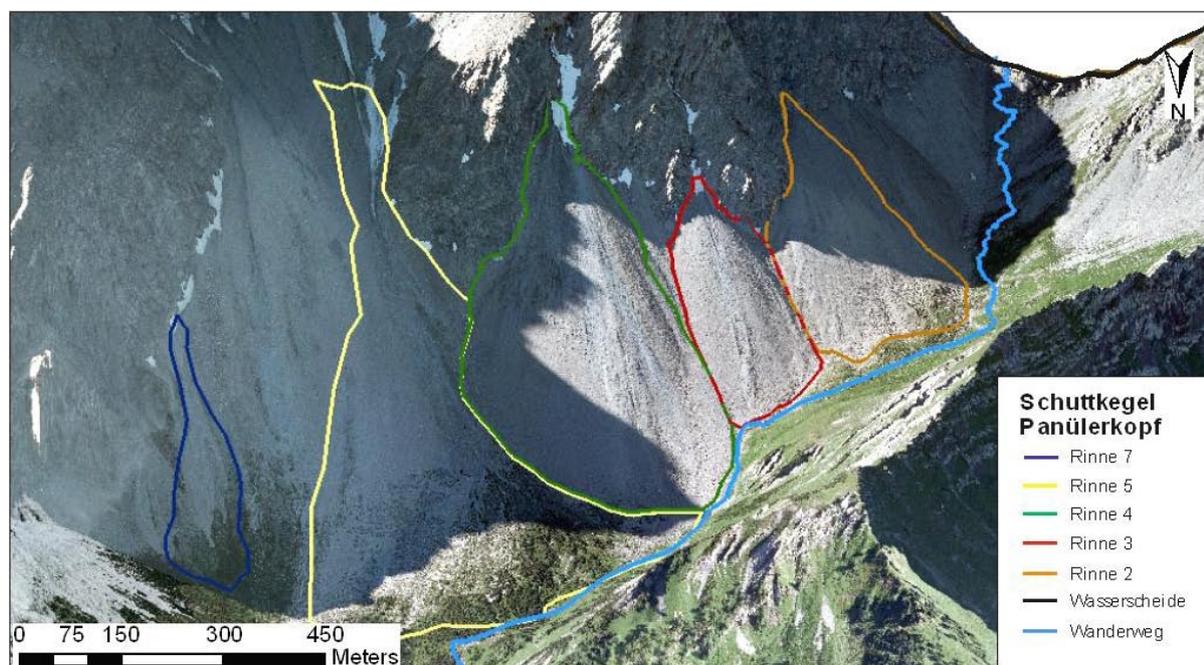


Abbildung 40: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Das Verhältnis von Kegelfläche und Sammelgebietsfläche ist hier umgekehrt verglichen mit den Muren westlich des Fundelkopfes (Abbildung 39 und Abbildung 41). Die mittlere Schuttkegelfläche der Muren nördlich des Panülerkopfes ist fast doppelt so groß wie ihre Sammelgebietsfläche, die Murkegel westlich des Fundelkopfes machen hingegen nur gut ein Drittel der Sammelgebietsfläche aus. Im Vergleich zu den Muren westlich des Fundelkopfes sind diese Schuttkegel aber hauptsächlich durch Material aus Steinschlag und Felssturz aufgebaut. Eine Ausnahme bildet die Rinne 7 (Abbildung 41). Sie nimmt durch ihre relativ geringe Kegelhöhe von 28,6 Grad und ein relativ großes Sammelgebiet von 9 ha eine besondere Stellung ein.

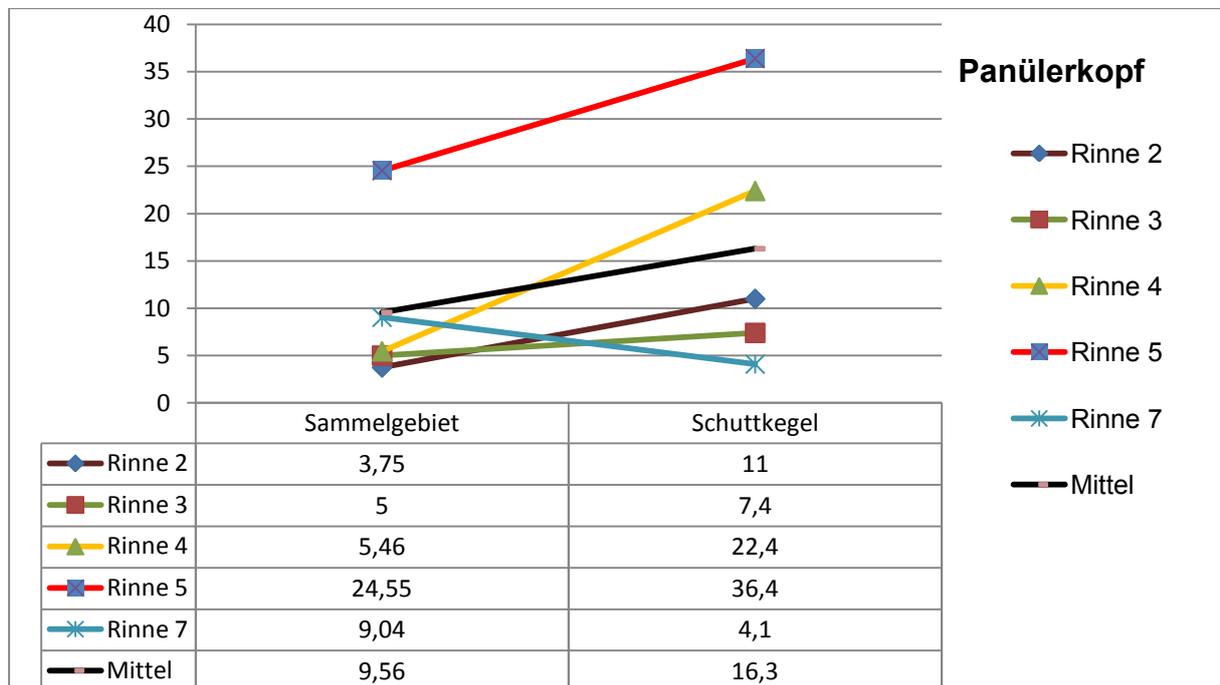


Abbildung 41: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Tabelle 10: Kenndaten der Schuttkegel westlich des Panülerkopfes

Muren Panülerkopf	Rinne 2	Rinne 3	Rinne 4	Rinne 5	Rinne 7	Min	Max	Mittel
Schuttkegel gesamt (ha)	11,0	7,4	22,4	36,4	4,1	4,1	36,4	16,3
H max (m. ü. A.)	2242	2167	2288	2299	2037	2037	2299	2206,6
H min (m. ü. A.)	2020	1872	1938	1788	1800	1788	2020	1883,6
H diff (m)	222	295	350	511	237	222	511	323
L ges (schräg)	407	563	617	1203	497	407	1203	657
Neigung Kegel mittel (°)	34,5	32,9	34,4	26,6	28,6	26,6	34,5	31,4

### 3.1.3.3 Bärarüfe (M.B.)

Der Murkegel der Bärarüfe beginnt direkt nach der Vereinigung der 3 größten Rinnen des Sammelgebietes auf rund 1387 Meter Seehöhe und nimmt eine Gesamtfläche von 21 ha ein. Die im oberen Transportgebiet bis zu 30 Meter breite Rinne wird auf beiden Seiten von bis zu mehreren Meter hohen Levees begrenzt, die aber mittlerweile mit Spirken und Fichten bewachsen sind (Abbildung 43, A). Auf der orographisch rechten Seite der Rinne sind die Levees gut erkennbar. Sie zeigen, dass sich das Gerinne immer weiter in den Murkegel einschneidet (Abbildung 43, D oben). Der Kegel befindet sich nicht im Gleichgewichtszustand von Sedimentinput und Sedimentoutput und es kommt zu einer abwärts schreitenden Erosion des Kegels (HÜBL, 2008). Ursache können längere Erosionsphasen ohne ausreichend Schuttfuhr aus dem Sammelgebiet sein (BARONI et al., 2013). Das ganze Gerinne befindet sich im Lockermaterial des Murkegels wobei Seitenerosion hauptsächlich auf der orographisch linken Seite auftritt (Abbildung 42, A und Abbildung 43, A).

Das letzte größere Ereignis auf dem Murkegel der Bärarüfe hat zwischen 2009 und 2012 stattgefunden. Die ca. 1,2 ha großen Ablagerungen dieses Ereignisses reichten bis auf mehrere Meter an die Mautstraße (Abbildung 42, B und Abbildung 43, B). Die Straße wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach durch die Bärarüfe verschüttet (NEUMANN, 2011). Auch die Meng wurde in der Vergangenheit durch die Bärarüfe aufgestaut. Sowohl die Meng als auch die Straße haben hier, wenn auch nur in einem geringen Ausmaß, einen Einfluss auf die Morphologie der Bärarüfe. Weitere Ablagerungen im Bereich der Kegelspitze lassen darauf schließen, dass die Muren schon im Sammelgebiet entstehen (Abbildung 42, B).

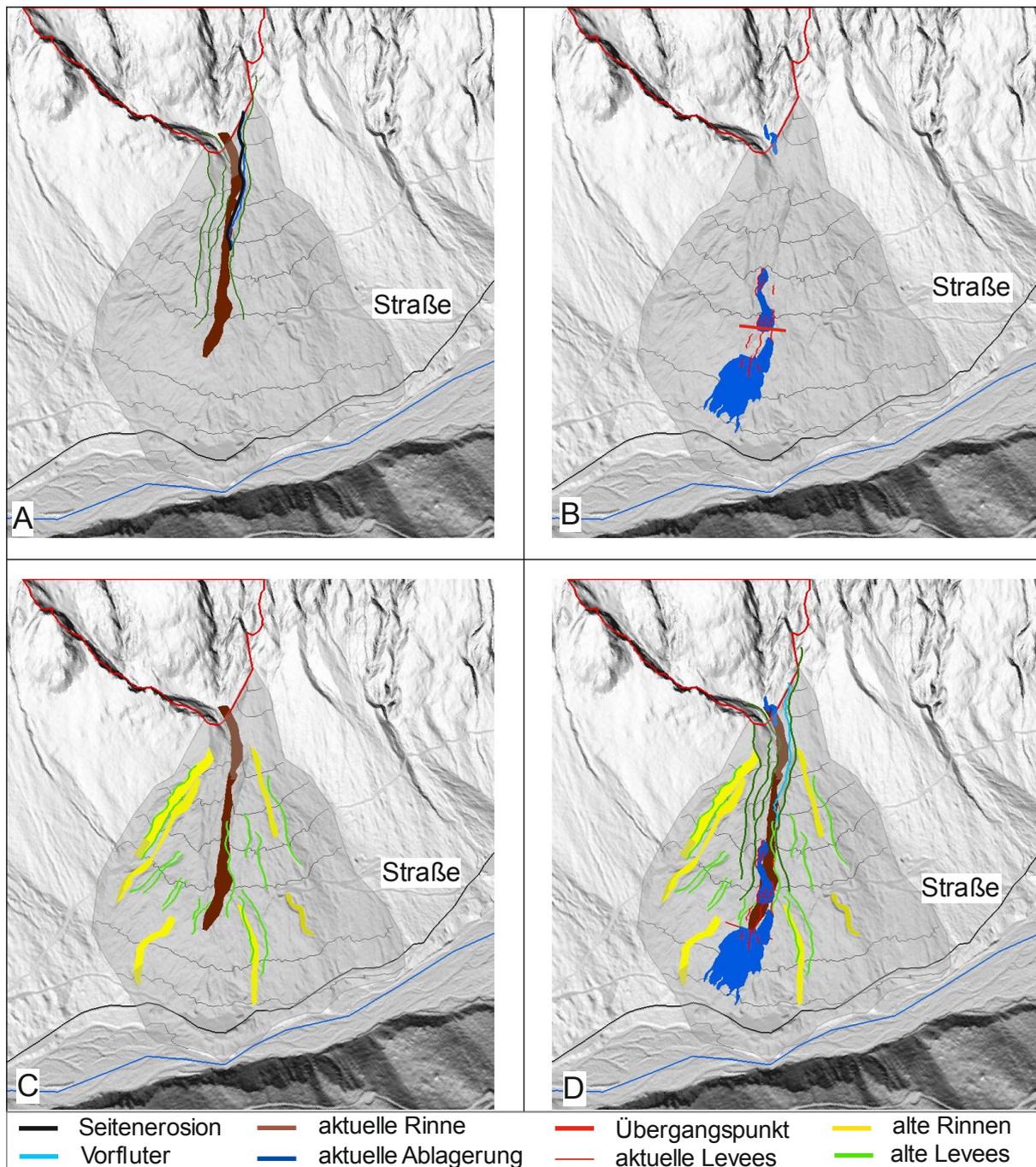


Abbildung 42: Murkegel der Bärarüfe. A: Hauptgerinne mit Levees und Seitenerosion; B: Levees und Ablagerungen des letzten Ereignisses mit Verschneidungspunkt (roter Querstrich); C: Position der aktuellen Rinne sowie Position von früheren Rinnen und früheren Levees; D: Gesamtüberblick über den Murkegel der Bärarüfe

Die Rinne war nicht immer so zentral auf dem Kegel wie sie es jetzt ist. Es zeigt sich, dass sich die Rinne ständig verlagert und somit zum komplexen Aufbau des Murkegels steuert (Abbildung 42, B und Abbildung 43, B).

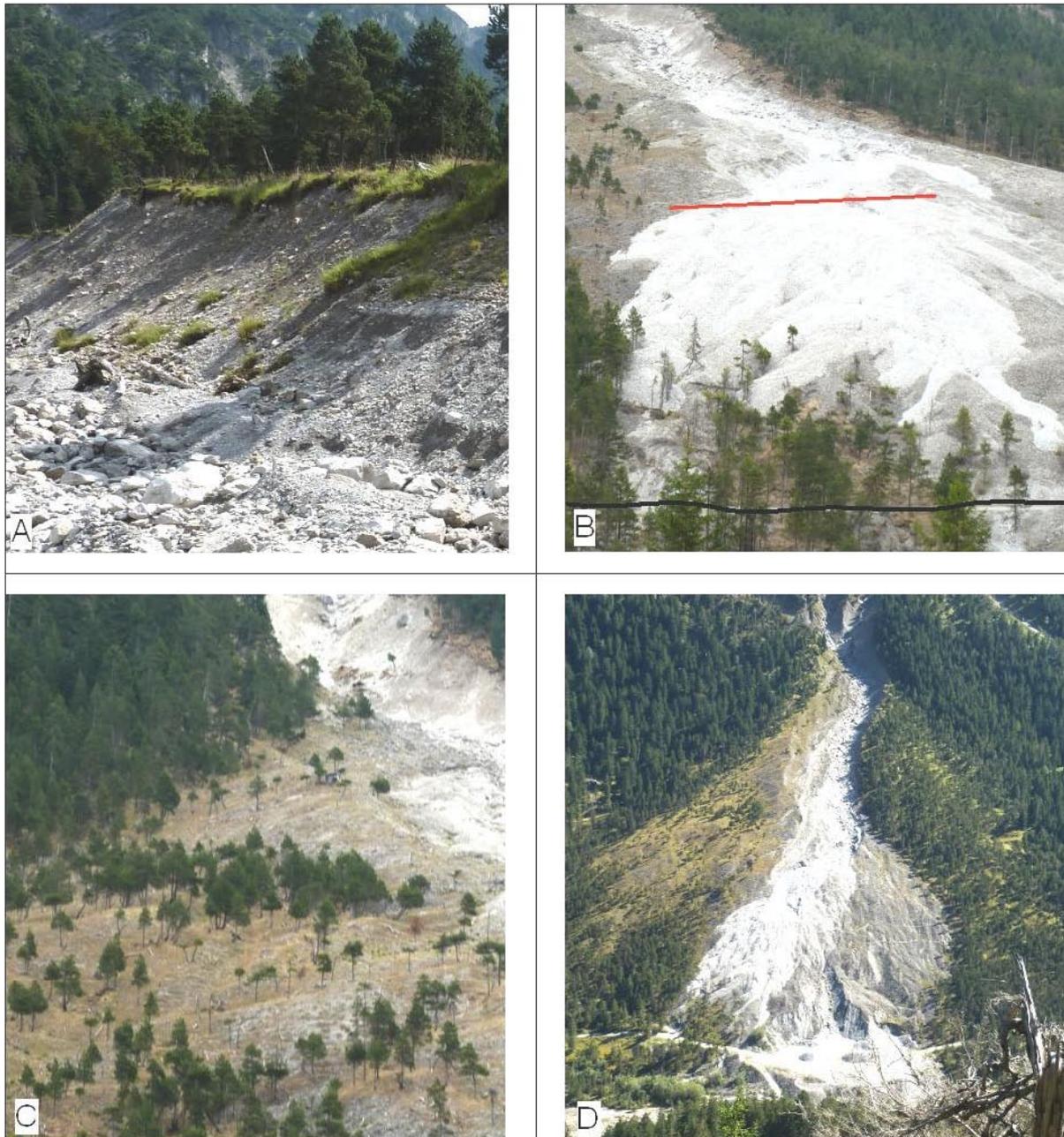


Abbildung 43: A: Hauptgerinne mit bewachsenen Levees und Seitenerosion; B: Ablagerung und Verschneidungspunkt des letzten Ereignisses; C: frühere Rinnen und Levees zum Teil schon bewachsen; D: Gesamtüberblick über den Murkegel der Bärarüfe

#### 3.1.3.4 Rinne 3 (M.B.)

Der Schuttkegel der Rinne 3 beginnt auf rund 2167 Meter Seehöhe und nimmt eine Gesamtfläche von 7,4 ha ein (Abbildung 41: Schuttkegel unterhalb der Sammelgebiete der untersuchten Muren in der Schutthalde westlich des Panülerkopfes

Tabelle 10). Die an der Kegelspitze bis zu 30 Meter breite Rinne verschmälert sich bis zum Verschneidungspunkt bis auf 9 m Breite. (Abbildung 45, C). Seitenerosion ist

vor allem im Transportgebiet stark ausgeprägt (Abbildung 44, A und Abbildung 45, A). Die Ablagerung des letzten Ereignisses reicht beinahe bis zum Wanderweg (Abbildung 44, B und Abbildung 45, B). Auf dem Schuttkegel selber sind zahlreiche Anzeichen von früheren Murrinnen zu erkennen (Abbildung 44, C Abbildung 45, C). Der gesamte Schuttkegel dieser Rinne ist insgesamt viel homogener als der Murkegel der Bärarüfe aufgebaut (Abbildung 44, D und Abbildung 45, D).

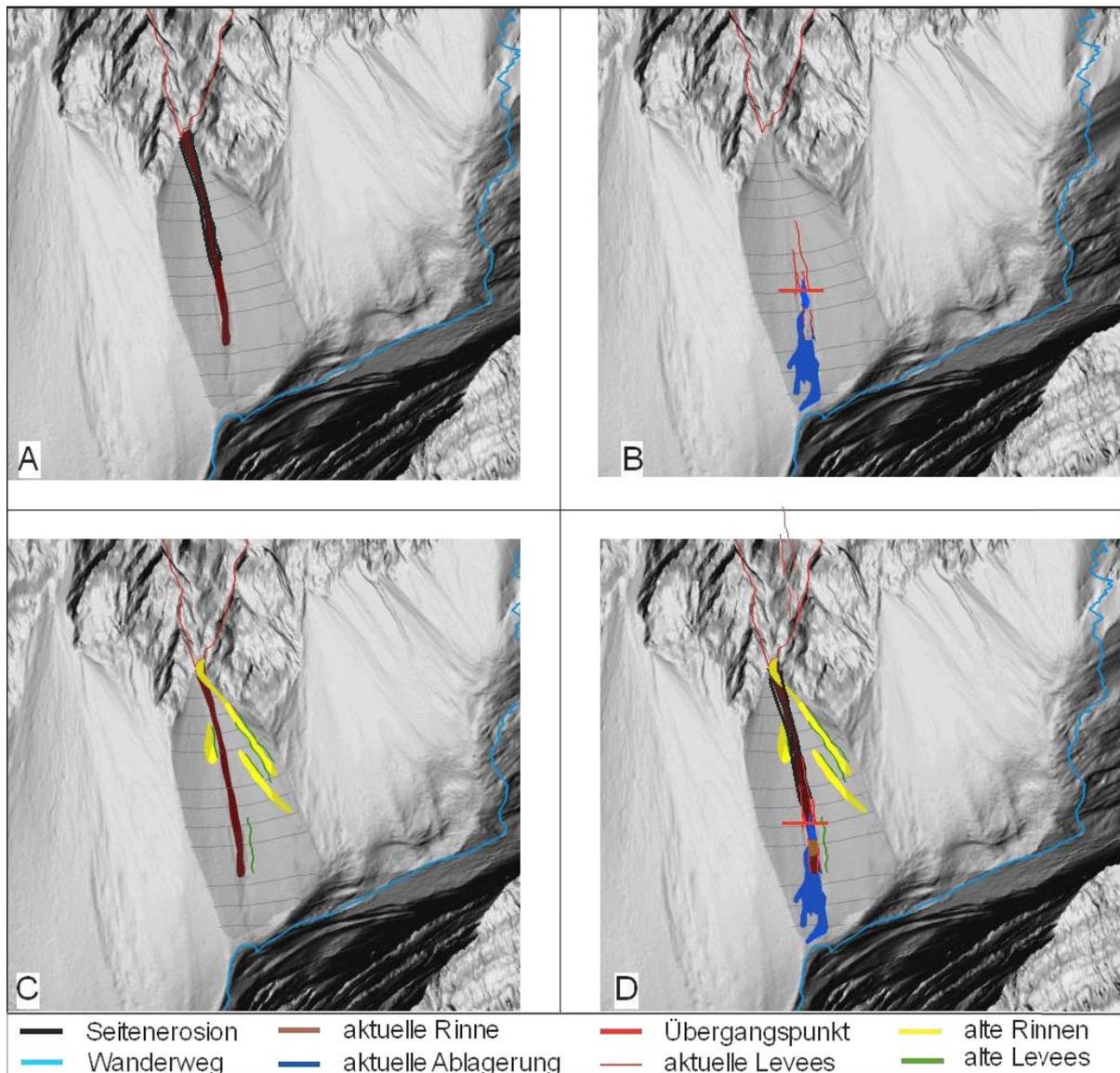


Abbildung 44: Schuttkegel der Rinne 3. A: Position der aktuellen Rinne und Seitenerosion; B: Ablagerungen, Levees und Überschneidungspunkt (roter Querstrich) des letzten Ereignisses; C: Levees und Gerinne früherer Ereignisse; D: Gesamtüberblick über den Schuttkegel der Rinne 3

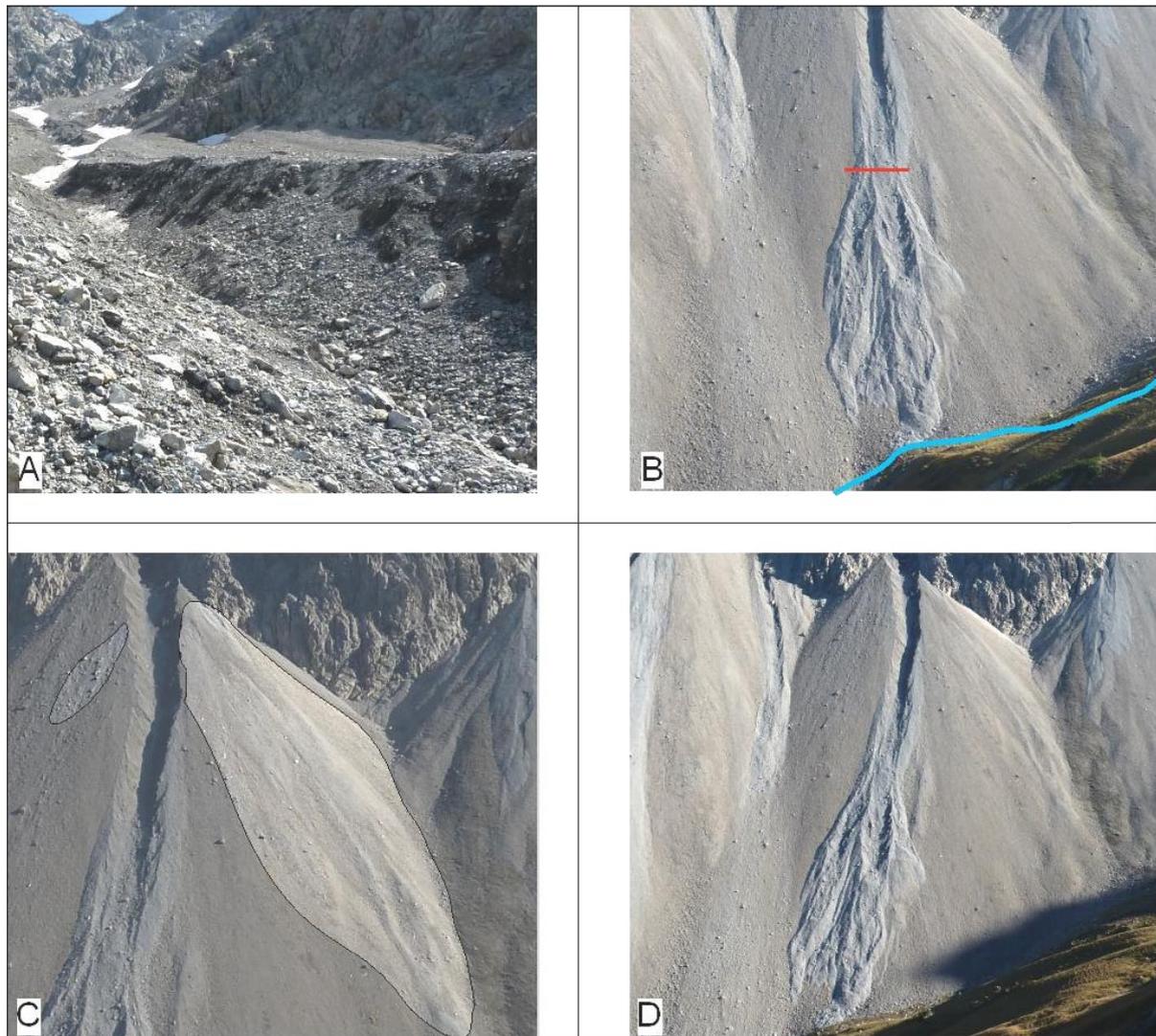


Abbildung 45: Schuttkegel der Rinne 3: A: Hauptgerinne mit starker lateraler Erosion entlang des Transportgebietes; B: Ablagerung und Überschneidungspunkt des letzten Ereignisses; C: frühere Gerinne und Levees; D: Gesamtüberblick über den Schuttkegel der Rinne 3

Die Anbrüche der Muren in den Schutthalen haben große Ähnlichkeiten mit den von Stiny (1931) beschriebenen Keilanbrüchen. Laut Stiny (1931) bildet sich an Stellen an denen ein eine große Wassermenge über eine Felswand oder eine steile Felsstufe auf lockeren Schutt herabstürzt ein tiefer Kolk aus und es werden erhebliche Geröllmengen talwärts geschoben. Daraufhin brechen die seitlichen Lockermassen nach, fallen in den Kolk und werden aus diesem wieder ausgestrudelt. Jedes folgende stärkere Hochwasser vertieft diese Wirbelgrube. Auf diese Weise entstehen Anbrüche welche an ihrem oberen, an die Felswand anschließenden Ende am tiefsten und am breitesten sind aber nach unten immer schmaler werden (Abbildung 46, B). Während sogenannte Feilenanbrüche (Abbildung 46, A) das Ergebnis eines nach unten immer mehr gesteigerten, an Wirksamkeit zunehmenden Tiefenschurfes sind,

erzeugt die Keilanbrüche eine abnehmende Schurfkraft. Viele Keilanbrüche, wie auch die Anbrüche im Gamperdonatal, liegen den größten Teil des Jahres trocken, andere führen in den Trockenzeiten spärlich Wasser. Während dieser Zeit arbeiten andere geologische Kräfte wie Austrocknungsrisse, Kammeis, Frost, Regen und Hagel an der Feinformung des Anbruchs und der Herstellung von Gleichgewichtsböschungen. Der von den Flanken abgelöste Schutt häuft sich längs der Hangfüße in der Sohle an und wird von Hochwässern abgeführt.

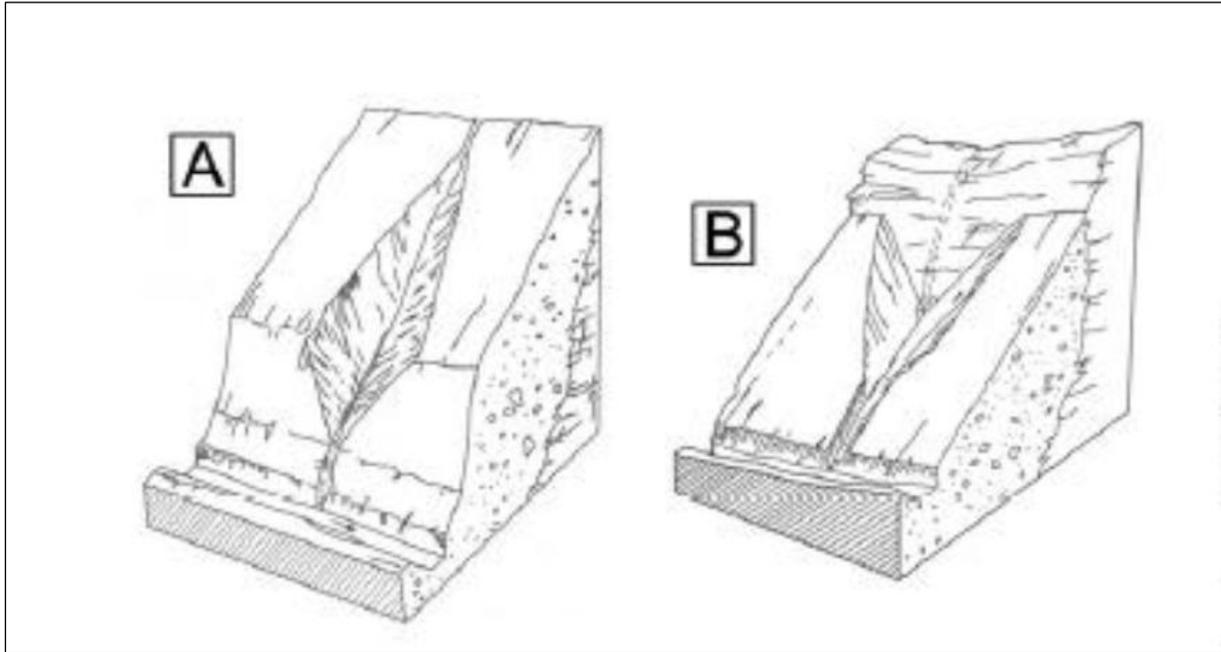


Abbildung 46: Feilanbruch (A), Keilanbruch (B) nach Stiny (1931)

Aufgrund der unterschiedlichen Prozesse, die zur Entstehung der Mur- bzw. Schuttkegel führen, unterscheidet sich auch ihr interner Aufbau voneinander. Die hauptsächlich durch Muren geformten Murkegel westlich des Fundelkopfes zeigen eine starke Durchmischung von feinem und grobem Material, während die Schuttkegel westlich des Panülerkopfes schichtig aufgebaut sind (Abbildung 47). Die Schichten liegen parallel zur Kegeloberfläche und unterscheiden sich durch ihr Verhältnis von grobem zu feinem Material.

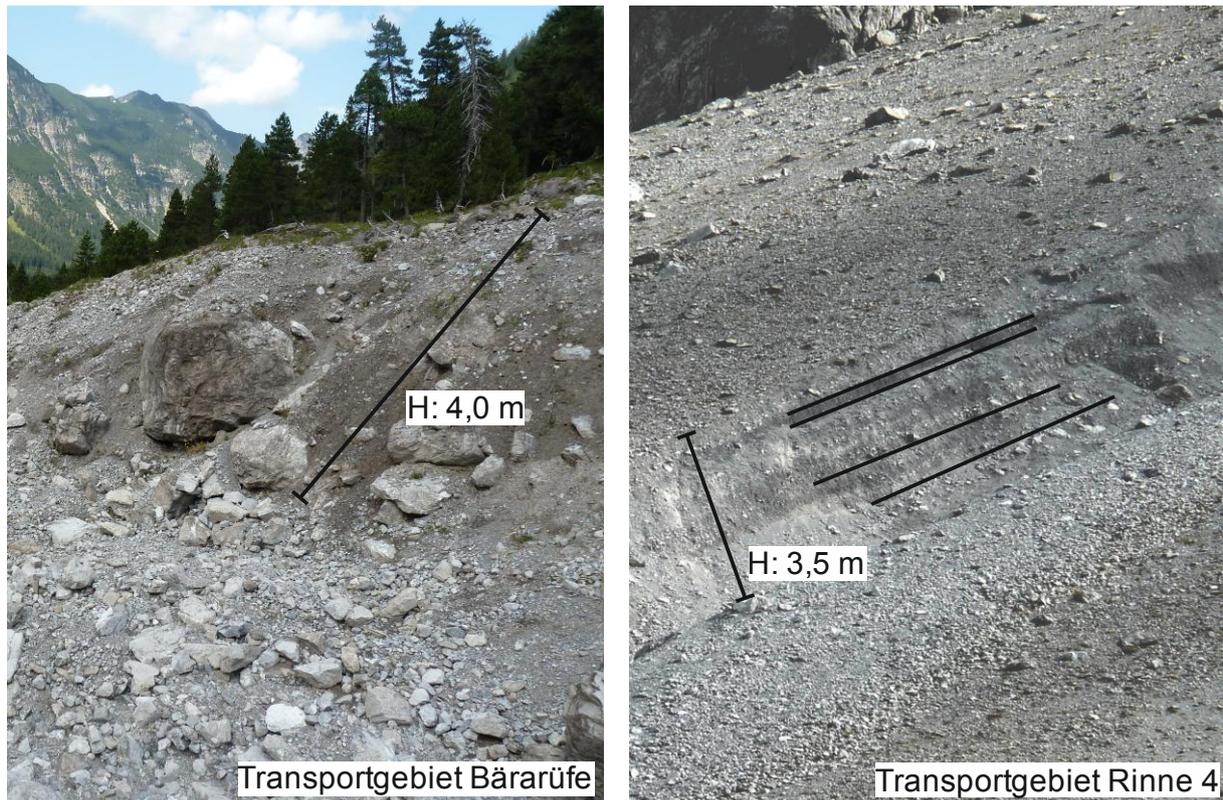


Abbildung 47: Aufbau eines Mur- bzw. Schuttkegels; rechts: starke Durchmischung von feinem und grobem Material im Transportgebiet der Bärarüfe; rechts: feines und grobes Material parallel zur Schuttkegeloberfläche geschichtet (Transportgebiet Rinne 4); die Höhe wurde links lotrecht und rechts normal zur Schichtung gemessen

### **3.1.4 Zeitliche Kartierung und Frequenz (M.B.)**

Durch den Vergleich der Orthofotos seit dem Jahr 1951 und der Feldaufnahme 2013 und 2014 konnten Zeiträume verschiedenstarker Aktivitäten festgestellt werden. Mit 28 Ereignissen (Abbildung 47) waren Murgänge am Westhang des Fundelkopfes mehr als doppelt so häufig wie Muren in der Schutthalde mit 13 Abgängen (Abbildung 49). Diese Zahlen müssen allerdings kritisch betrachtet werden, da der zeitliche Abstand zwischen den Orthofotos von 1951 bis 2001 sehr groß ist. Auffällig ist, dass alle aufgenommenen Muren westlich des Panülerkopfes zwischen dem Orthofoto am 17.08.2012 und der Geländebegehung am 20.08.2012 abgegangen sind.

Für die Detailkartierung wurden die Bärarüfe und die Rinne 3 ausgewählt. Die Bärarüfe ist mit 7 kartierten Muren die Aktivste westlich des Fundelkopfes. Obwohl laut Orthofotos der Schutthalde die Rinne 5 mit 4 Abgängen am aktivsten war, wurde aus repräsentativen Zwecken die zweitereignisreichste Rinne 3 ausgewählt (Abbildung 49).

#### **3.1.4.1 Bärarüfe (M.B.)**

Seit 1951 konnten bei der Bärarüfe 7 Ereignisse ausgemacht werden (Abbildung 48). Es ist anzunehmen, dass zwischen den Orthofotos vor dem Jahr 2001 noch mehr Ereignisse stattgefunden haben.

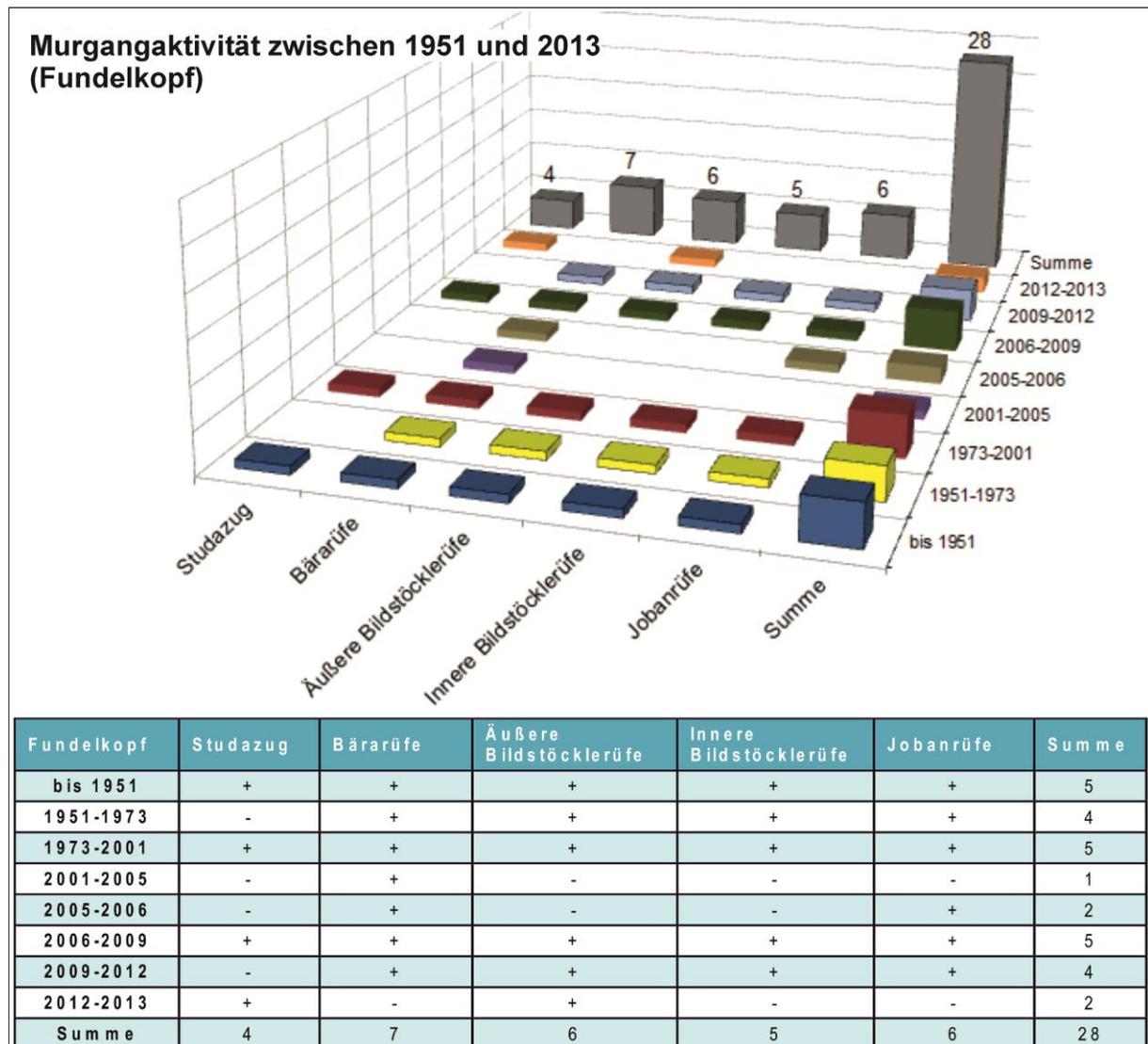


Abbildung 48: Murgangaktivität am Fundelkopf zwischen 1951 und 2012

Auf dem Orthofoto des Jahres 1951 sind die Ablagerungen der Muren über die Mautstraße bis ins Bachbett der Meng vorgestoßen (Abbildung 49, 1951). Bis zum Jahr 2001 ist der gesamte Wald zwischen den Ablagerungen von 1951 abgestorben und verschwunden (Abbildung 49, 1973 und 2001). Dies deutet darauf hin, dass die Mure vor 1951 nicht in diesem Bereich abgelagerte. Tatsächlich konnten für 1951 relativ frische Ablagerungen südlich der jetzigen Rinne der Bärrarüfe identifiziert werden. Auf dem Orthofoto nach den Hochwässern von 2005 ist im unteren Bereich des Murkegels eine neue Rinne entstanden (Abbildung 49, 2005). Grund dafür ist der Einschnitt in den Kegel durch die Mautstraße. Auf den Orthofotos 2006 - 2009 wurden frische Ablagerungen ausgemacht, die sich jeweils fast bis zur Mautstraße erstreckten (Abbildung 49, 2006, 2009 und 2012).

Auch NEUMANN (2011) hat auf der Bärarüfe dendrogeomorphologische Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Rekonstruktion der Murgangaktivitäten angestellt. Er konnte zwischen 1839 und 2007 16 Ereignisjahre identifizieren.

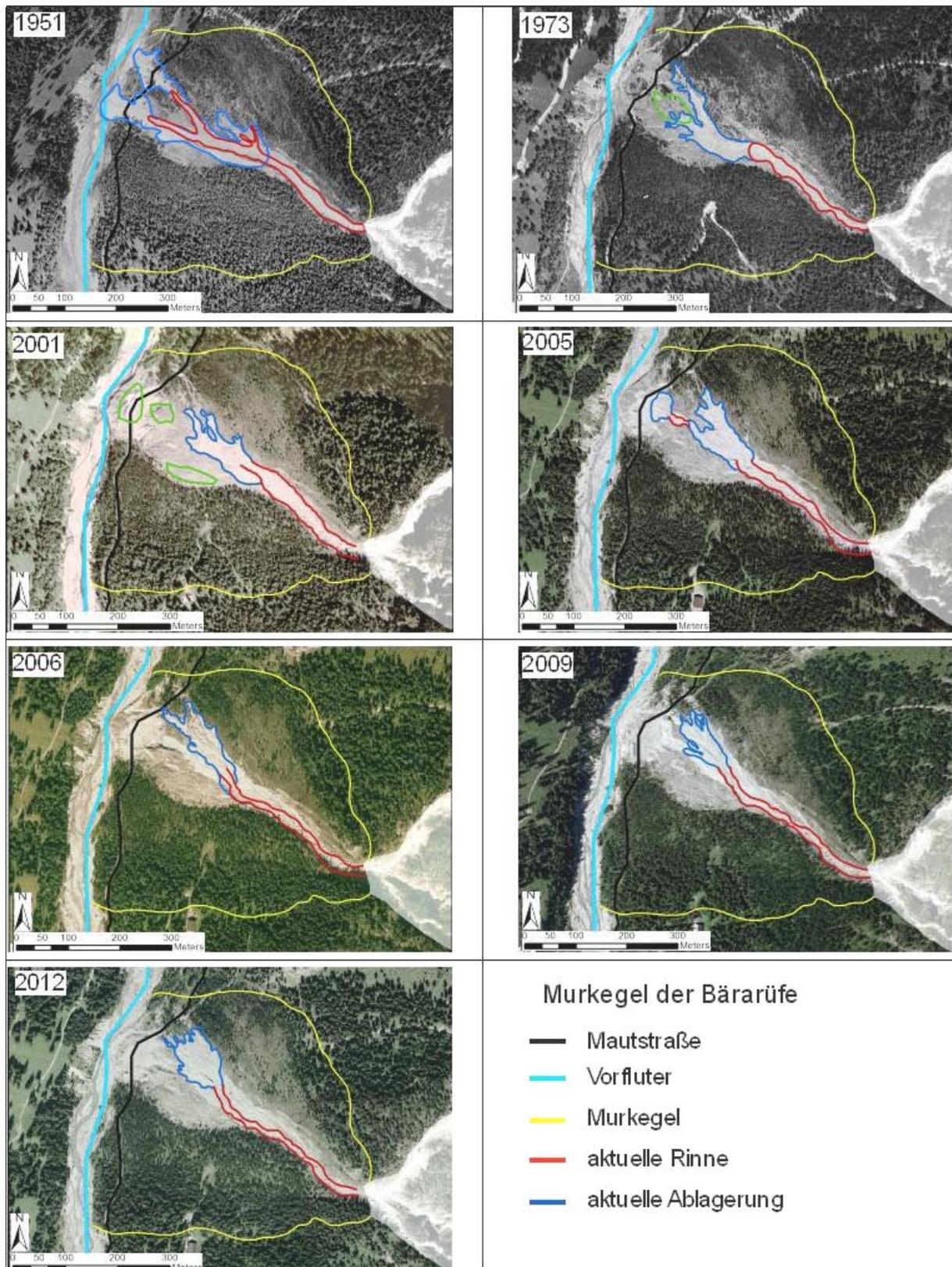


Abbildung 49: Kartierung der Ereignisse der Bärarüfe zwischen 1951 und 2012

### 3.1.4.2 Rinne 3 (M.B.)

Bei der Rinne 3 konnten zwischen 1951 und 2013 lediglich 3 Murabgänge identifiziert werden (Abbildung 50). Es gibt auch keine Anzeichen, dass im Zeitraum 1951 bis 2001 Muren abgegangen sind.

Auf dem Orthofoto des Jahres 1951 konnten 3 ehemalige, zum Teil verfüllte Rinnen identifiziert werden. Die meiste Aktivität lag dazumal am westlichen Schuttkegelrand (Abbildung 51, 1951). Die heutige Rinne war aber damals schon erkennbar. Zwischen 1951 und 1973 wurde die aktuelle Rinne durch ein Murereignis ausgeräumt (Abbildung 51, 1973). Der gleiche Vorgang spielte sich auch zwischen 2012 und 2013 ab (Abbildung 51, 2013). Diese Ablagerungen reichen fast bis zum Wanderweg durch das Salarueltal.

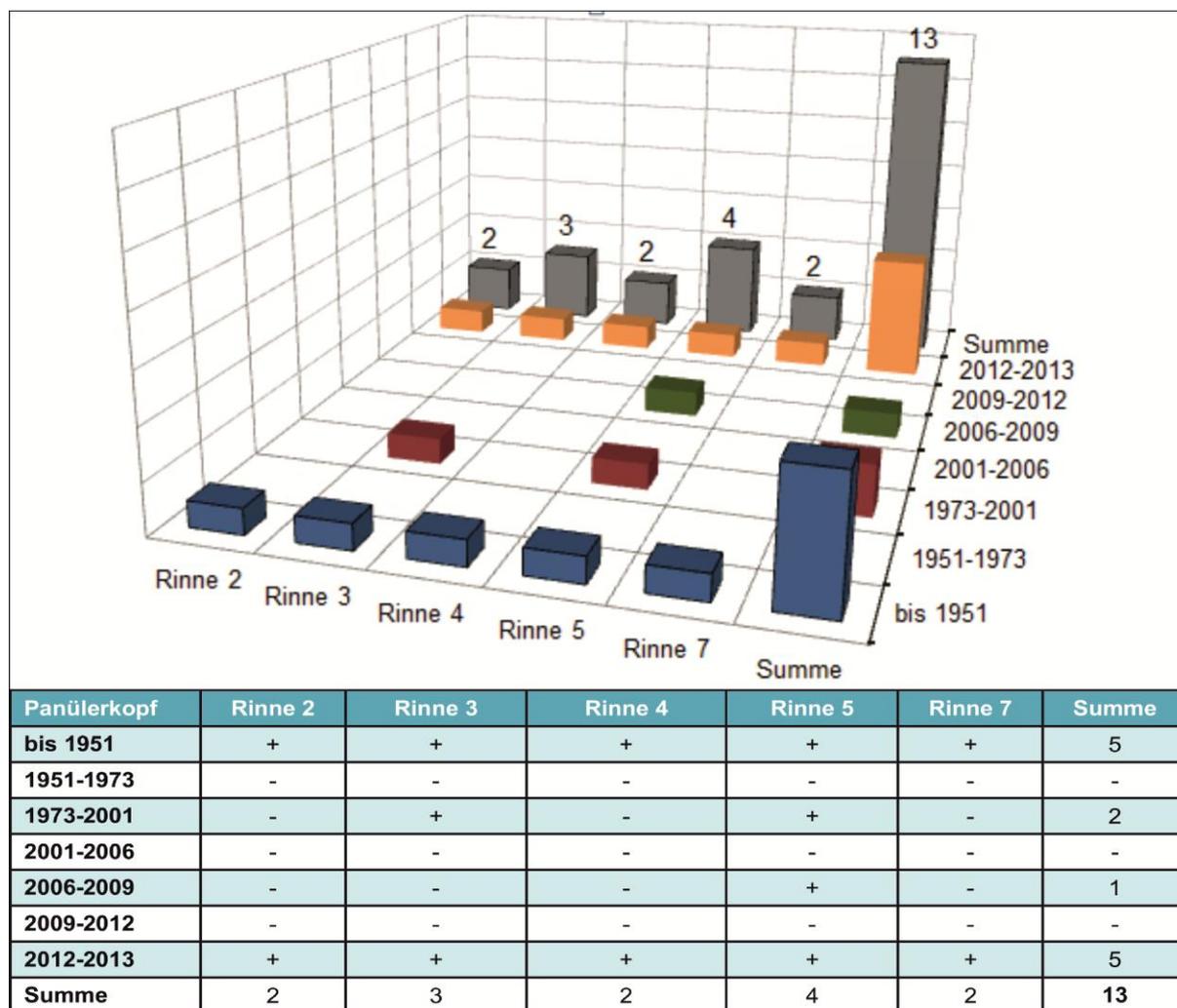


Abbildung 50: Murgangaktivität am Panülerkopf zwischen 1951 und 2013

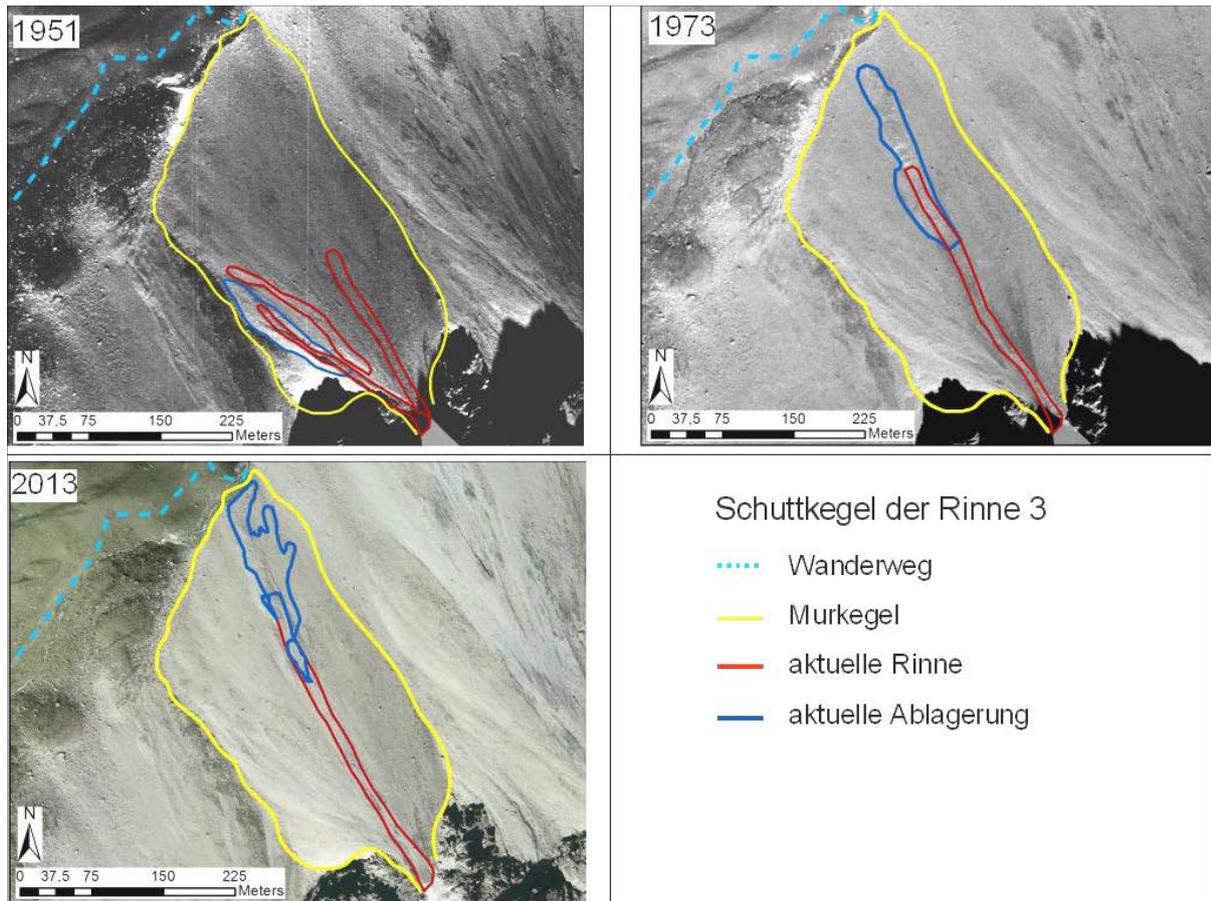


Abbildung 51: Kartierung der Ereignisse Rinne 3 zwischen 1951 und 2013

### 3.2 Gefälleverlauf (M.B.)

Jede Mure wurde nach ihren Querprofilen entlang der Rinne in 4 Bereiche eingeteilt. Diese Bereiche werden auch für die Neigungsübersicht beibehalten.

#### 3.2.1 Fundelkopf (M.B.)

Die 5 Einzugsgebiete (Abbildung 52) setzen sich aus im Mittel 24,7 ha großen und 40,3 Grad steilen Sammelgebieten und im Mittel 9,1 ha großen und 20,7 Grad steilen Murkegeln zusammen (Tabelle 11).

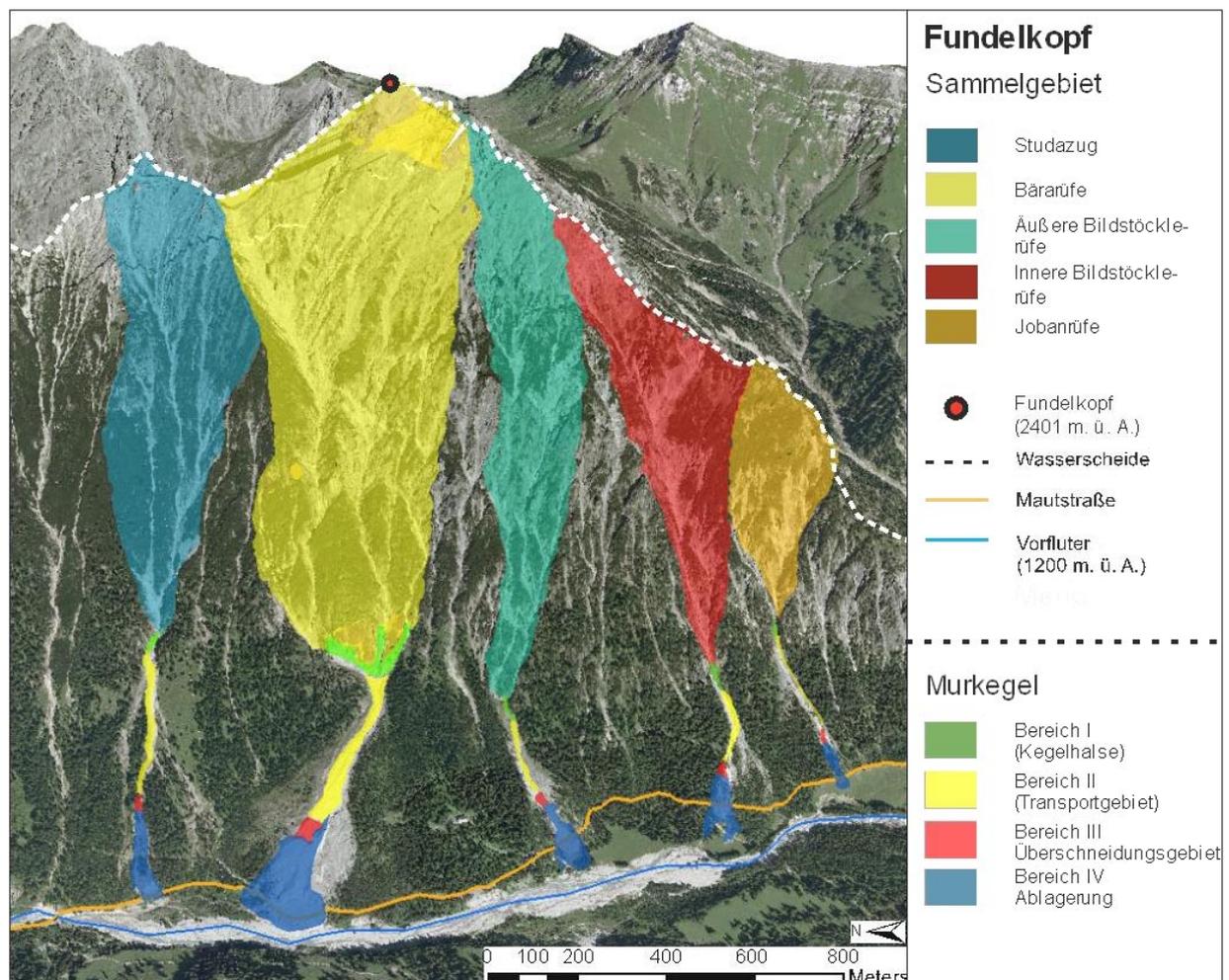


Abbildung 52: Überblick über die Sammelgebiete und die Bereiche I - IV der Muren westlich des Fundelkopfes

Der Bereich I nimmt zwischen 7,6 und 13,7 Prozent der maximalen Auslauflänge ein und ist mit einer Neigung von 25,7 Grad deutlich der steilste Bereich am Murkegel. Der längste Abschnitt auf der Strecke vom proximalen Murkegel bis zum Endpunkt der Ablagerung ist das Transportgebiet (Bereich II). Er nimmt zwischen 41,9 und 56,4 Prozent der Strecke ein und ist im Mittel 20,7 Grad geneigt.

Auf diesen Bereich folgt der Verschneidungsbereich (Bereich III) der im Mittel 7,1 Prozent einnimmt und 18,6 Grad geneigt ist. Der Überschneidungspunkt der letzten Ereignisse liegt dabei zwischen 59,3 und 68,8 Prozent der maximalen Auslauflänge. Der Mittelwert liegt bei 64,3 %.

Die Ablagerungen (Bereich IV) nehmen zwischen 27,2 und 37,3 Prozent der Gesamtlänge ein und sind mit 17,9 Grad Neigung am flachsten. Die Neigung nimmt im Mittel vom Sammelgebiet bis zum Endpunkt der Ablagerungen stetig ab (Tabelle 11).

Tabelle 11: Neigungsübersicht über die Sammelgebiete und Murkegel der Muren westlich des Fundelkopfes

Fundelkopf Bereiche I - IV	Studazug	Bärrüfe	Äußere Bildstöcklerüfe	Innere Bildstöcklerüfe	Jobarrüfe	Min	Max	Mittel
<b>Sammelgebiet (ha)</b>	27.8	54.6	18.1	16.3	6.8	6.8	54.6	24.7
<b>Neigung (°)</b>	37.4	37.5	40.6	39.5	46.7	37.4	46.7	40.3
<b>Länge schräg (m)</b>								
I	49	96	60	52	35	35	96	58
II	355	383	183	181	235	181	383	267
III	37	50	31	32	34	31	50	37
IV	197	214	163	153	113	113	214	168
<b>Lges schräg (m)</b>	638	743	437	418	416	416	743	530
<b>Länge schräg (%)</b>								
I	7,6	12,9	13,7	12,5	8,3	7,6	13,7	11,0
II	55,6	51,6	41,9	43,3	56,4	41,9	56,4	49,8
III	5,8	6,8	7,1	7,6	8,1	5,8	8,1	7,1
IV	30,9	28,8	37,3	36,6	27,2	27,2	37,3	32,1
<b>Neigung (°)</b>								
I	25,9	18,8	23,6	23,3	36,8	18,8	36,8	25,7
II	21,9	15,0	17,0	20,8	28,8	15,0	28,8	20,7
III	19,7	16,9	13,0	20,5	23,1	13,0	23,1	18,6
IV	19,9	17,5	15,0	16,9	19,9	15,0	19,9	17,9
<b>Neigung mittel (°)</b>	21,8	17,0	17,2	20,4	27,1	15,5	27,1	20,7
<b>Murkegel gesamt (ha)</b>	10,0	21,3	5,0	5,6	3,4	3,4	21,3	9,1
<b>ÜP nach (m)</b>	422	504	259	249	286	249	504	344
<b>ÜP in %</b>	66,1	67,8	59,3	59,6	68,8	59,3	68,8	64,3

### 3.2.2 Panülerkopf (M.B.)

Die 5 Einzugsgebiete (Abbildung 53) setzen sich aus im Mittel 9,6 ha großen und 49,2 Grad steilen Sammelgebieten und im Mittel 16,3 ha großen und 31,4 Grad steilen Schuttkegeln zusammen (Tabelle 12).

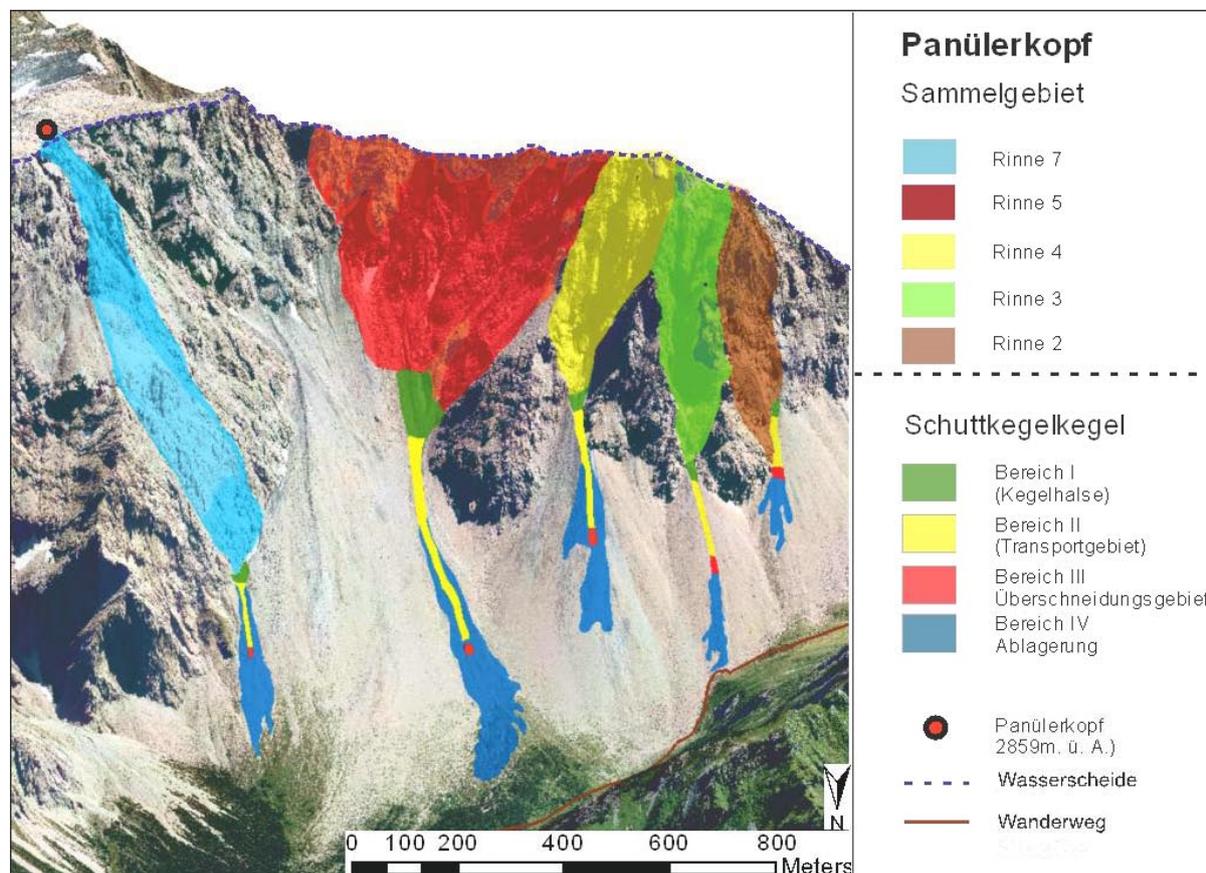


Abbildung 53: Überblick über die Sammelgebiete und die Bereiche I - IV der Muren westlich des Panülerkopfes.

Der erste Bereich am proximalen Schuttkegel (Bereich I) macht zwischen 8,4 und 16,4 Prozent der Gesamtlänge der Muren aus und ist zugleich mit einer mittleren Neigung von 33,3 Grad der steilste Bereich des Schuttkegels.

Im Gegensatz zu den Muren am Fundelkopf ist hier das Transportgebiet (Bereich II) nicht der längste Abschnitt. Das Gebiet nimmt zwischen 32,3 und 48,9 Prozent der Strecke ein und ist durchschnittlich 31,9 Grad geneigt.

Der Verschneidungsbereich (Bereich III) nimmt zwischen 2,8 und 9 Prozent ein und ist mit 31,7 Grad nur unwesentlich flacher als das Transportgebiet. Die Distanz von der Kegelspitze bis zum Verschneidungspunkt lag bei den letzten Ereignissen zwi-

schen 45,5 und 75,4 Prozent der maximalen Auslauflänge wobei der Mittelwert bei 56,2 Prozent liegt.

Der Ablagerungsbereich (Bereich IV) nimmt bei den Schutthaldenmuren den größten Teil der Strecke ein. Er liegt zwischen 33,9 und 51,8 Prozent der Gesamtlänge und ist mit 28,6 Grad auch hier der flachste Bereich. Die Neigung nimmt auch hier im Mittel vom Sammelgebiet bis zum Endpunkt der Ablagerungen stetig ab, ist aber zwischen Bereich I und III relativ konstant. (Tabelle 12).

Tabelle 12: Neigungsübersicht über die Sammelgebiete und Murkegel der Muren westlich des Panülerkopfes

Panülerkopf Bereiche I - IV	Rinne 2	Rinne 3	Rinne 4	Rinne 5	Rinne 7	Min	Max	Mittel
<b>Sammelgebiet (ha)</b>	3.8	5.0	5.5	24.6	9.0	3.8	24.6	9.6
<b>Neigung mittel (°)</b>	50.2	50.1	49.5	42.1	54.2	42.1	54.2	49.2
<b>Länge schräg (m)</b>								
I	44	55	56	197	42	42	197	79
II	131	193	302	565	170	131	565	272
III	37	43	45	33	27	27	45	37
IV	195	272	215	408	258	195	408	270
<b>Lges schräg (m)</b>	407	563	617	1203	497	407	1203	657
<b>Länge schräg (%)</b>								
I	10,8	9,8	9,0	16,4	8,4	8,4	16,4	10,9
II	32,3	34,2	48,9	46,9	34,3	32,3	48,9	39,3
III	9,0	7,7	7,3	2,8	5,5	2,8	9,0	6,4
IV	47,9	48,2	34,8	33,9	51,8	33,9	51,8	43,3
<b>Neigung (°)</b>								
I	36,7	33,8	35,1	33,3	27,7	27,7	36,7	33,3
II	33,1	33,8	34,7	28,4	29,6	28,4	34,7	31,9
III	34,9	33,9	34,0	26,1	29,5	26,1	34,9	31,7
IV	33,3	30,2	33,7	18,5	27,6	18,5	33,7	28,6
<b>Neigung mittel (°)</b>	34,5	32,9	34,4	26,6	28,6	25,2	35,0	31,4
<b>Schuttkegel gesamt (ha)</b>	11,0	7,4	22,4	36,4	4,1	4,1	36,4	16,3
<b>ÜP nach (m)</b>	194	270	379	778	226	194	778	386,6
<b>ÜP in %</b>	47,7	48,0	75,4	64,7	45,5	45,5	75,4	56,2

### **3.3 Querprofile (M.B.)**

#### **3.3.1 Gegenüberstellung (M.B.)**

Alle untersuchten Muren konnten aufgrund der Form ihres Querprofiles in 4 unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Die Bereiche I - Kegelspitze, II - Transportgebiet, III - Verschneidungsgebiet und IV - Ablagerungsgebiet unterscheiden sich nicht nur bezüglich ihres Querprofiles, sondern auch durch für Muren typische morphologische Merkmale entlang der Rinne. Zusätzlich zu den 4 Bereichen am Mur- bzw. Schuttkegel wurden für jede Mure Profile vom Felsauslass aufgenommen.

Zur Gegenüberstellung der Querprofile und Merkmale wurde für den Felsauslass und für die Bereiche I - IV je ein repräsentatives Querprofil ausgewählt. Stellvertretend für die Muren westlich des Fundelkopfes wird die Innere Bildstöcklerüfe beschrieben, die Muren in der Dolomitschutthalde westlich des Panülerkopfes werden durch die Rinne 3 vertreten. Ihr Erscheinungsbild und die Neigungen am Mur- bzw. Schuttkegel sind repräsentativ und nahe am Mittelwert (Tabelle 11 und Tabelle 12). Das linke Querprofil bei der Gegenüberstellung ist immer die Innere Bildstöcklerüfe, das Rechte die Rinne 3.

##### **3.3.1.1 Innere Bildstöcklerüfe (M.B.)**

Bei der Feldaufnahme wurden insgesamt 13 Querprofile in der Inneren Bildstöcklerüfe aufgenommen (Abbildung 54, links oben und Anhang). Sie legt auf ihrem Weg von der Kegelspitze auf rund 1365 Metern Seehöhe, bis zum Endpunkt der Ablagerung, auf rund 1227 Metern Seehöhe, 418 Meter zurück. Die mittlere Neigung liegt bei 20,4 Grad, wobei die Neigung von der Kegelspitze Richtung Endpunkt der Ablagerung stetig abnimmt. Der Überschneidungspunkt liegt nach 249 Meter bei einer Neigung von durchschnittlich 20,5 Grad (Abbildung 54, Tabelle). Die Einteilung der Mure in die 4 Bereiche (Abbildung 54, rechts) erfolgt nach dem Vorkommen charakteristischer Querprofile (Abbildung 54, links unten), die anschließend im Detail dargestellt werden.

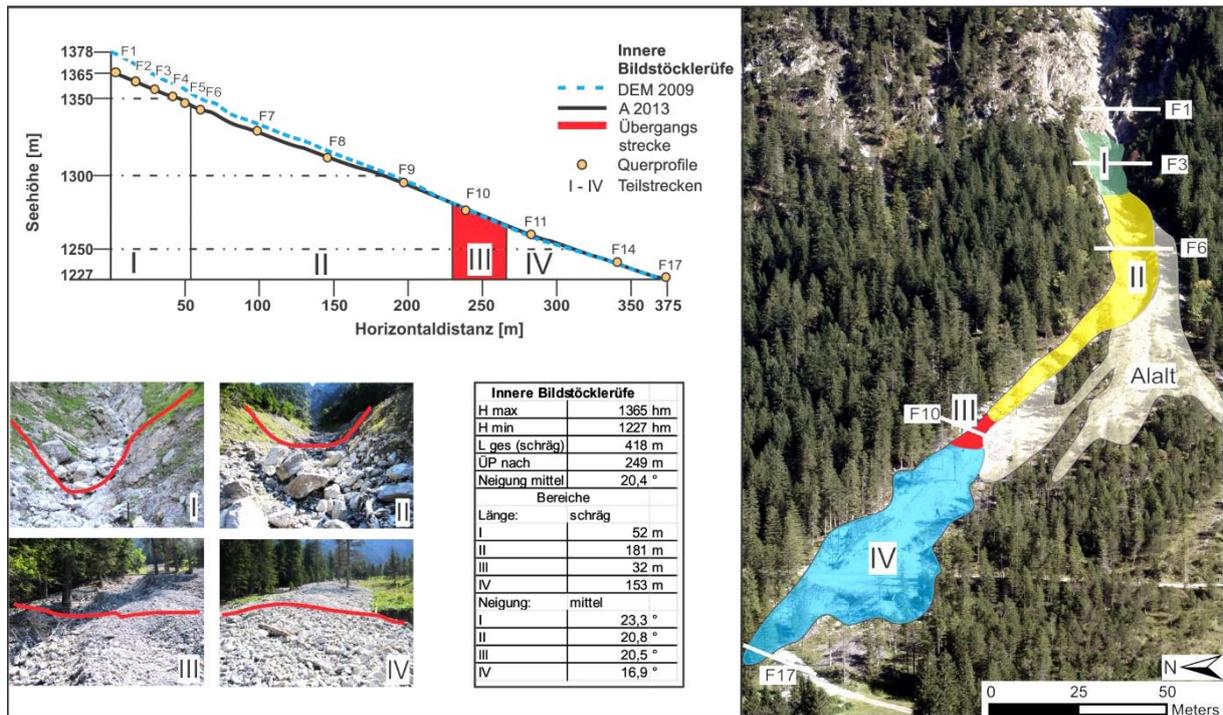


Abbildung 54: Neigungen und Distanzen der Bereiche I - IV der Inneren Bildstöcklerlüfe (Tabelle). Die Bereiche (rechts) wurden nach charakteristischen Querprofilen (links unten) eingeteilt. Die Position der Querprofile und der Bereiche I - IV ist links oben ersichtlich

### 3.3.1.2 Rinne 3 (M.B.)

Bei der Feldaufnahme im August 2013 wurden insgesamt 14 Querprofile der Rinne 3 aufgenommen (Abbildung 55, links oben und Anhang). Auf ihrem Weg von der Kegelspitze auf rund 2167 Metern Seehöhe bis zum Endpunkt der Ablagerung auf rund 1872 Metern Seehöhe legt sie 563 Meter zurück. Der Verschneidungspunkt liegt nach 270 Meter bei einer Neigung von durchschnittlich 33,9 Grad (Abbildung 55, Tabelle). Die Einteilung der Mure in die 4 Bereiche (Abbildung 55, rechts) erfolgt ebenfalls nach dem Vorkommen charakteristischer Querprofile (Abbildung 55, links unten), die anschließend im Detail dargestellt werden.

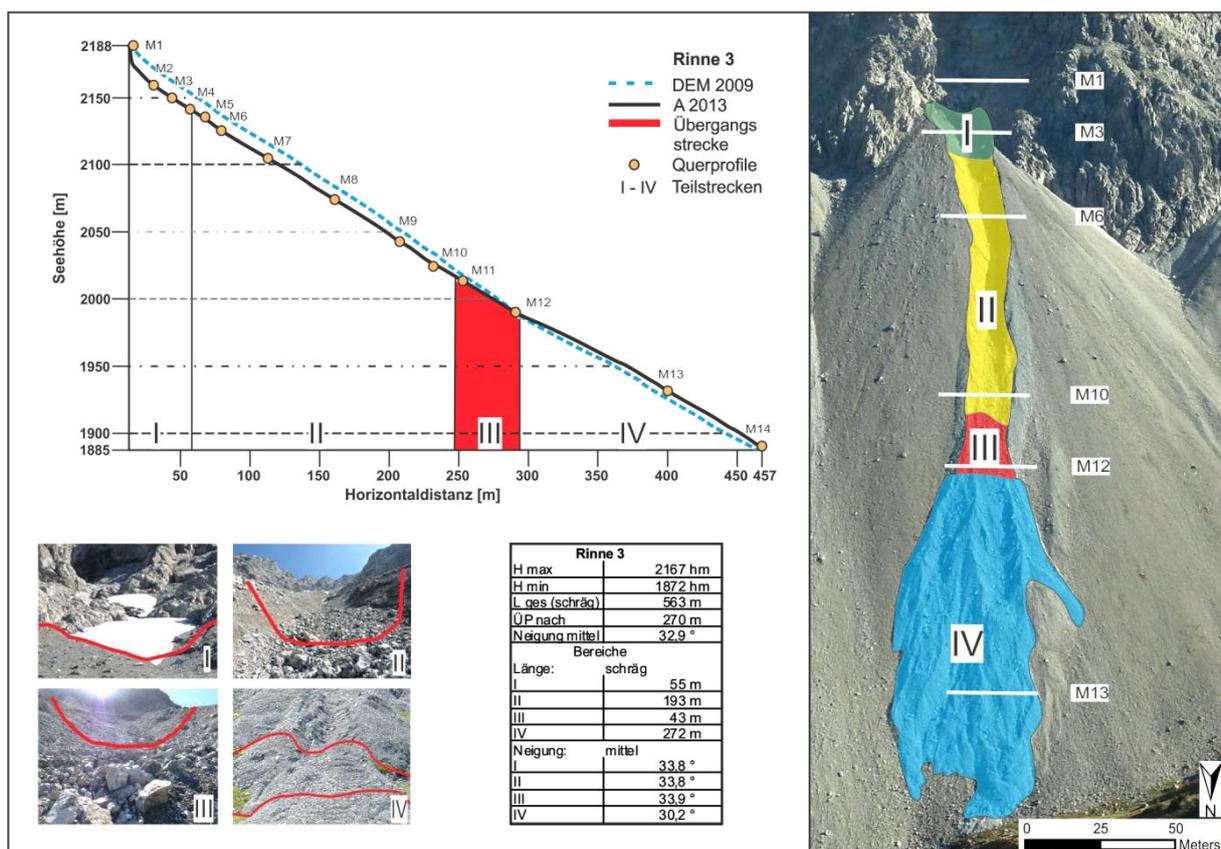


Abbildung 55: Neigungen und Distanzen der Bereiche I - IV der Rinne 3 (Tabelle). Die Bereiche (rechts) wurden nach charakteristischen Querprofilen (links unten) eingeteilt Die Position der Querprofile und der Bereiche I - IV ist links oben ersichtlich

## Felsauslass

Die Formen der Profile unterscheiden sich in diesem Bereich stark voneinander. Die Längsneigung ist ungefähr gleich der der Sammelgebiete und liegt im Mittel bei 40 bzw. 49 Grad.

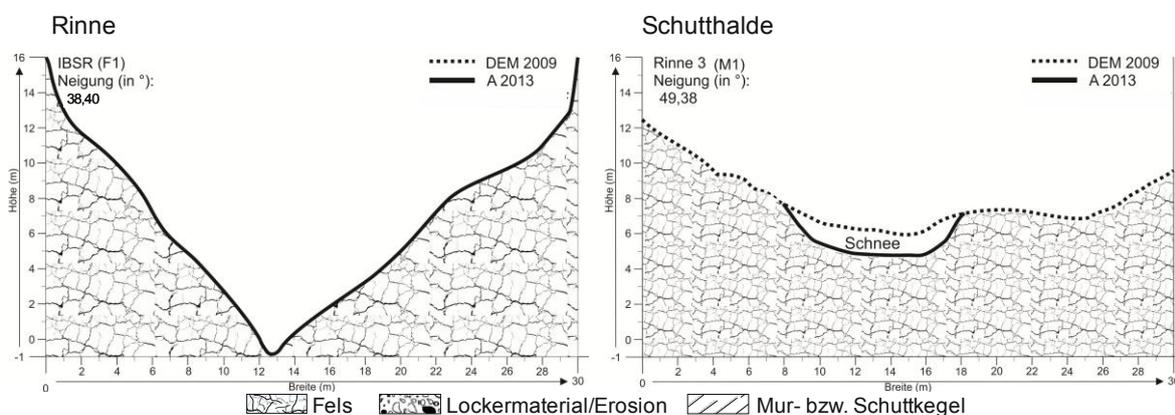


Abbildung 56: Querprofil beim Felsauslass der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts)

Der Felsauslass bildet bei den Muren westlich des Fundelkopfes ein tief (bis zu 50 m) eingeschnittenes V-Profil (Abbildung 56, links). Die Neigung der Einhänge liegt zwischen 50 und 90 Grad. In diesem Bereich, sowie im gesamten Sammelgebiet, gibt es, im Vergleich zur durchschnittlichen Gerinneneigung, flache Teilstrecken, (< 15 Grad) die als Zwischenspeicher für Schutt aus Erosion und kleinen Muren dienen.

Der Felsauslass der Muren westlich des Panülerkopfes ist flach und oft mit mehreren Wasserwegen durchzogen. Inmitten dieser Fläche liegt meist eine Vertiefung, welche oft ganzjährig von Schneefeldern bedeckt ist (Abbildung 56, rechts). Sie sind ein Zeichen für starke Akkumulation in diesem Bereich. Der im Querprofil flache Auslass kann seitlich durchaus durch bis zu 90 Grad steile Dolomitwände begrenzt werden.

## Bereich I (Kegelspitze)

Die Querprofile wurden jeweils am Beginn der Mur- bzw. Schuttkegel aufgenommen. Auch hier unterscheiden sich die Profile stark voneinander. Die Längsneigung liegt im Mittel bei 26 bzw. 33 Grad.

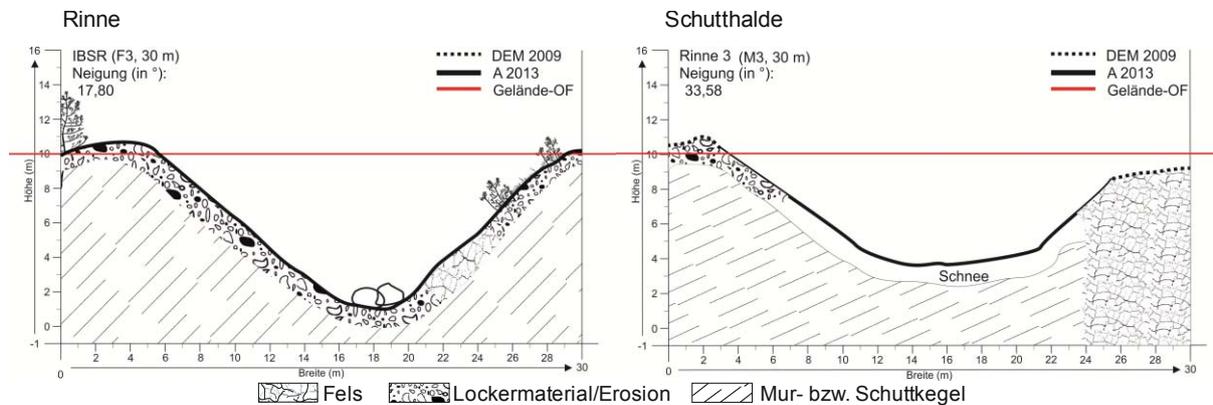


Abbildung 57: Querprofil im Bereich I (Kegelspitze) der Inneren Bildstöckerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts)

Die Murrinnen behalten ihr V-Profil vom Felsauslass bis zum Ende des Bereiches I bei. Das Profil wird meist einseitig von Felsbändern begrenzt (Abbildung 57, links). Längs betrachtet ist dieser Bereich sehr inhomogen. Es bilden sich Step-Pool Systeme die ähnlich wie im Sammelgebiet als Zwischenspeicher für kleinere Murablagerungen dienen. Zusätzlich sind hier deutliche Anzeichen für Oberflächenabfluss erkennbar. Levees und Murablagerungen am Beginn dieses Bereiches lassen darauf schließen, dass Muren schon im Sammelgebiet entstehen.

Auch hier sind die Rinnen der Schutthalden je nach Schneefall im Winter bzw. Witterung im Sommer das ganze Jahr mit Schneefeldern bedeckt (Abbildung 57, rechts). Schmelzen diese Felder, bildet sich ein Absturz zwischen Felsauslass und beginnender Schutthalde. Übrig bleiben bis zu 35 Meter weite, an den Seiten durch Erosion stark abgeflachte Wannen, welche sich im Lockermaterial des Schuttkegels bis zum Beginn des Bereiches II kontinuierlich verschmälern. Bei diesen Muren konnten in diesem Bereich weder Levees, Murablagerungen noch Anzeichen für Oberflächenabfluss festgestellt werden.

## Bereich II (Transportgebiet)

In diesem Bereich sind sich Muren im Gerinne und Muren in Schutthalden morphologisch am ähnlichsten. Die Längsneigung liegt im Mittel bei 21 bzw. 32 Grad.

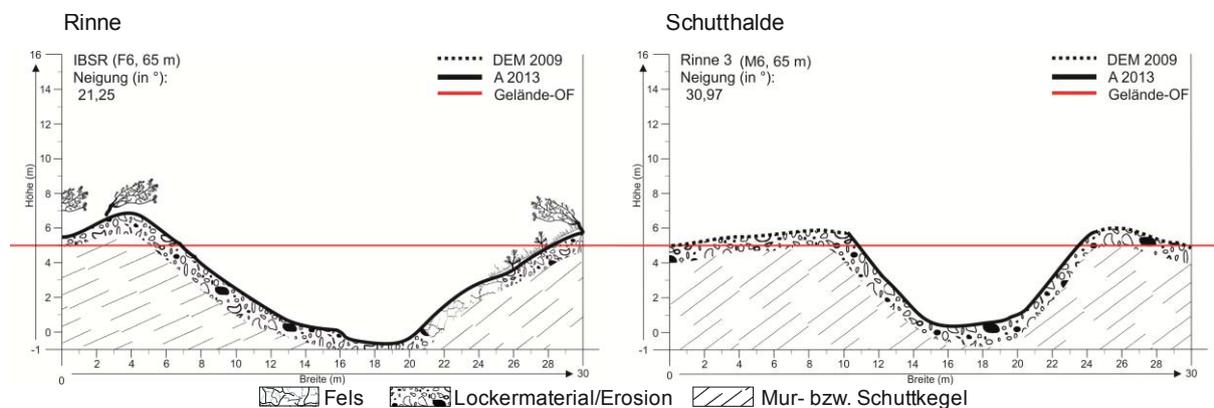


Abbildung 58: Querprofil im Bereich II (Transportgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts)

Das V-förmige Querprofil im Sammelgebiet und an der Kegelspitze weitet sich hier zu einem breiten U-Profil auf (Abbildung 58, links). Dieses Profil wird bis auf kleinere Murablagerungen, Levees und kleinflächige Seitenerosion im Großen und Ganzen auf der gesamten Transportstrecke beibehalten. Lediglich Breite und Tiefe der Rinne nehmen bis zum Bereich III kontinuierlich ab. Die Levees befinden sich innerhalb der aktuellen Rinne und sind selten höher als einen Meter über der Sohle. Stark gerundete und große helle Blöcke und das Fehlen von Schutt kleinerer Fraktionen lassen auf regelmäßigen Oberflächenabfluss schließen. In diesem Bereich kommt es nicht selten zu Ablagerungen kleiner Muren.

Die Form des Querprofils im Transportgebiet der Schutthaldenmuren ist stark vom Verfüllungsgrad der Rinne abhängig (Abbildung 61). Die Form ändert sich generell von einer Fläche (bei großen Schneefeldern) oder einer weiten Wanne zu einem u- bis trapezförmigen Querprofil (Abbildung 58, rechts). Seitenerosion ist im gesamten Bereich stark ausgeprägt. Wie schon in Bereich I gibt es keine Anzeichen für Oberflächenabfluss. Levees können am Ende des obersten Drittels beginnen. Sie befinden sich meist an der Seite der Rinne auf der Schutthaldenoberfläche und können sich somit bis zu 5 Meter über der Sohle befinden. Gegen Ende dieses Bereiches können Levees und kleine Murablagerungen auch in der Rinne auftreten (Abbildung 61).

## Bereich III (Verschneidungspunkt)

In diesem Bereich unterscheiden sich die Profile stark voneinander. Die Längsneigung liegt im Mittel bei 19 bzw. 32 Grad, der Verschneidungspunkt durchschnittlich nach 64 bzw. 56 Prozent der maximalen Auslauflänge.

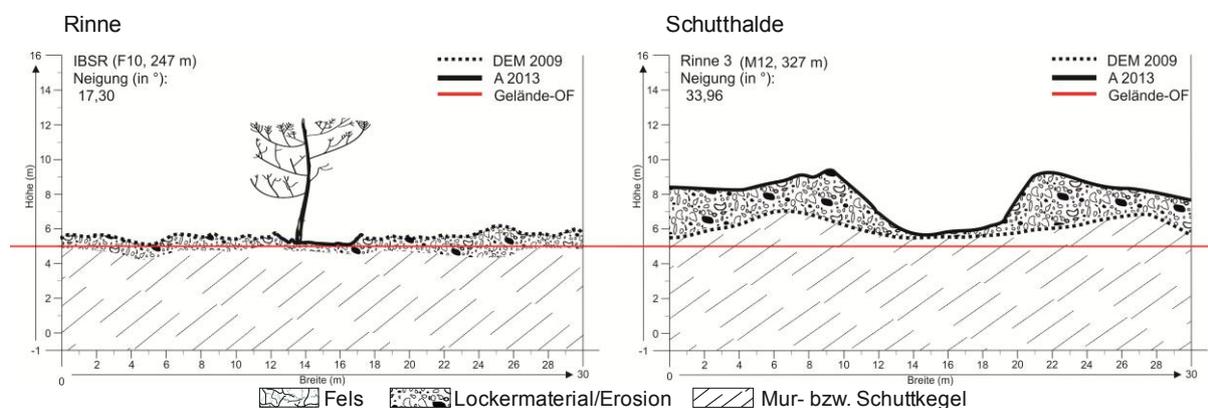


Abbildung 59: Querprofil im Bereich III (Verschneidungsgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts)

Die Muren westlich des Fundelkopfes verlieren im Bereich des Übergangspunktes die morphologische Form einer Rinne. Die Einhänge der Rinne werden gegen Ende des Transportgebietes immer niedriger bis sie am Verschneidungspunkt mit der übrigen Murkegeloberfläche auf einer Ebene liegen (Abbildung 59, links).

Die Muren der Schutthalde können in diesem Bereich, wie die Muren westlich des Fundelkopfes, eben mit der Geländeoberfläche sein. Weitaus häufiger aber wächst das Gerinne über die Schuttkegeloberfläche hinaus (Abbildung 59, rechts). Sie bildet sich in der soeben entstandenen Ablagerung und kann sich fast bis zum Endpunkt dieser durchziehen. Sie wird aber in den Bereichen II - IV durch laterale Erosion, Steinschlag oder durch kleinere Muren schnell verfüllt.

### Bereich IV (Ablagerungsgebiet)

Auch in diesem Bereich gibt es große Unterschiede zwischen den Muren westlich des Fundelkopfes und den Schutthaldenmuren. Die Längsneigung liegt im Mittel bei 18 bzw. 29 Grad.

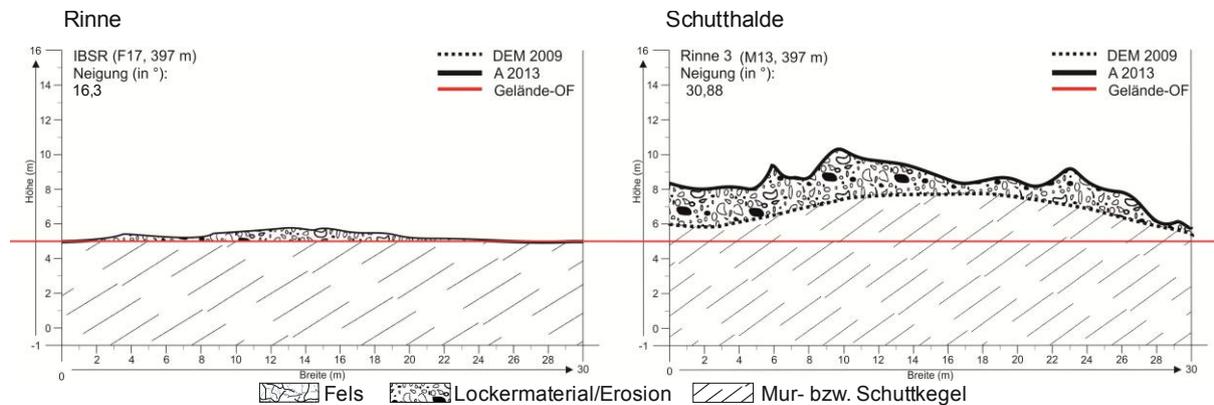


Abbildung 60: Querprofil im Bereich IV (Ablagerungsgebiet) der Inneren Bildstöcklerüfe (links) und der Rinne 3 (rechts)

Die flachen Ablagerungen der Muren am Westhang des Fundelkopfes gehen meist fließend in das angrenzende Gelände über. Das Material wird flächig auf den Murkegeln verteilt und erreicht selten Höhen von mehr als 70 cm (Abbildung 60, links).

Die eher seltenen Muren der Schutthalde bilden keine komplexen Ablagerungskegel wie jene des Fundelkopfes. Sie lagern auf den homogenen Schuttkegeln ab und wachsen dementsprechend bis zu 5 Meter über die Geländeoberfläche hinaus (Abbildung 60, rechts).

## Änderung des Querprofils mit der Zeit

Durch die Aufnahmen 2013 und 2014 konnte ein kleiner Murgang, der sich in der Zwischenzeit in der Rinne 3 ereignete, beschrieben werden. Hier sind die Querprofile, die eine Schutthaldenmure im Transportgebiet annehmen kann gut zu erkennen.

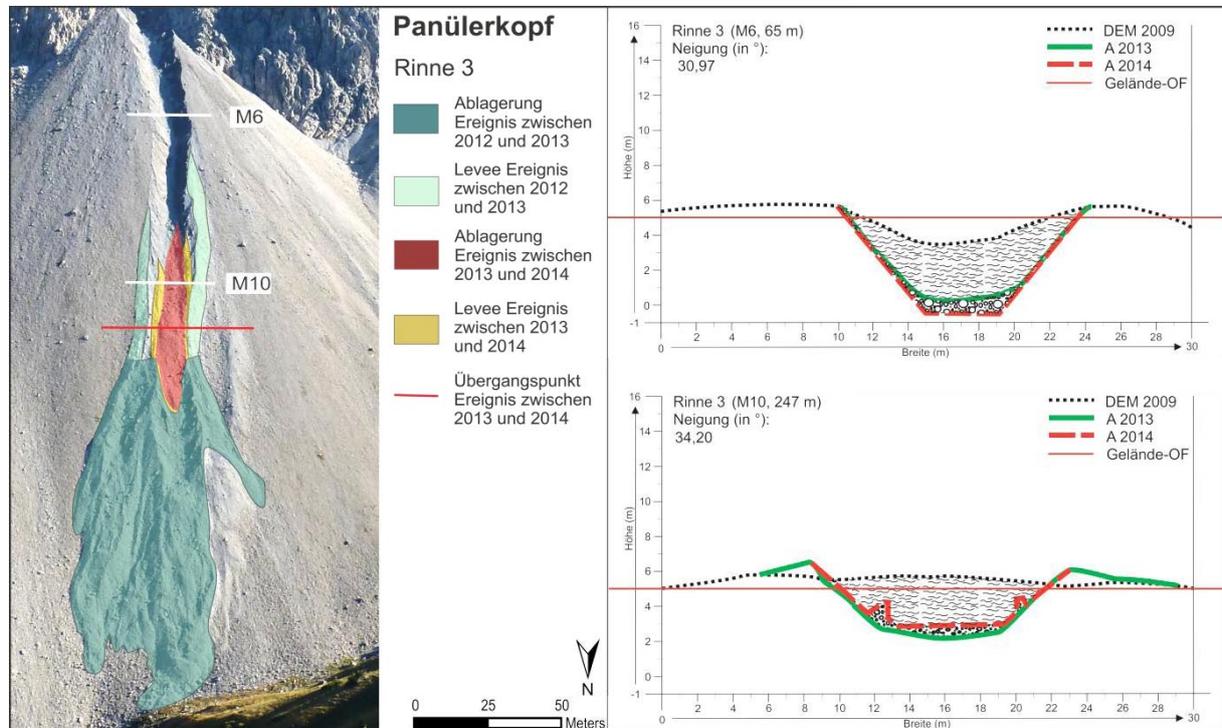


Abbildung 61: Kartierung eines kleinen Murabganges in der Rinne 3 (links). Die Ablagerung und die Levees befinden sich in der Gegend des Verschneidungspunktes der Mure von 2012 oder 2013. Der Verlauf der Profilform ist rechts dargestellt. Das Querprofil ändert sich von fast eben (DEM 2009 vor der Mure 2012/2013) über u-förmig (Profil von der Aufnahme 2013) bis zu einem trapezförmigen Profil (Aufnahme 2014).

Die Rinne war bis zum Orthofoto 2012 beinahe völlig verfüllt (Abbildung 61, DEM 2009). Zwischen dem Orthofoto und der Feldaufnahme 2013 wurde das gesamte Lockermaterial mobilisiert und abtransportiert. Die entstandene Murrinne wurde bis dahin aber zum Teil durch Steinschlag und laterale Erosion wieder aufgefüllt (Abbildung 61, A 2013). An Stellen mit weniger Seitenerosion waren hingegen Trapezprofile gut erkennbar. Nach einem weiteren kleinen Ereignis, wahrscheinlich 2014 kurz vor der zweiten Aufnahme, konnte die Rinne ohne Verfüllung betrachtet werden. Auch hier waren Trapezprofile gut erkennbar (Abbildung 61, A 2014).

Die Ablagerungen des Ereignisses zwischen 2013 und 2014 begannen einige Meter vor dem Verschneidungspunkt des Ereignisses 2012/2013. Das gesamte Material wurde in der Rinne bei ca. 32 Grad Längsneigung abgelagert (Abbildung 61, links).

### 3.4 Korngrößenverteilung (G.S.)

Beim Vergleich der Korngrößenverteilungen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schutthaldenmuren und den Muren in bestehenden Rinnen beobachtet werden (Abbildung 62). Der  $d_{30}$  der untersuchten Proben lag zwischen 0,4 und 1,55 cm, der  $d_{50}$  zwischen 1,2 und 5 cm, der  $d_{84}$  zwischen 3,4 und 33 cm und der  $d_{90}$  lag zwischen 3,8 und 44 cm.

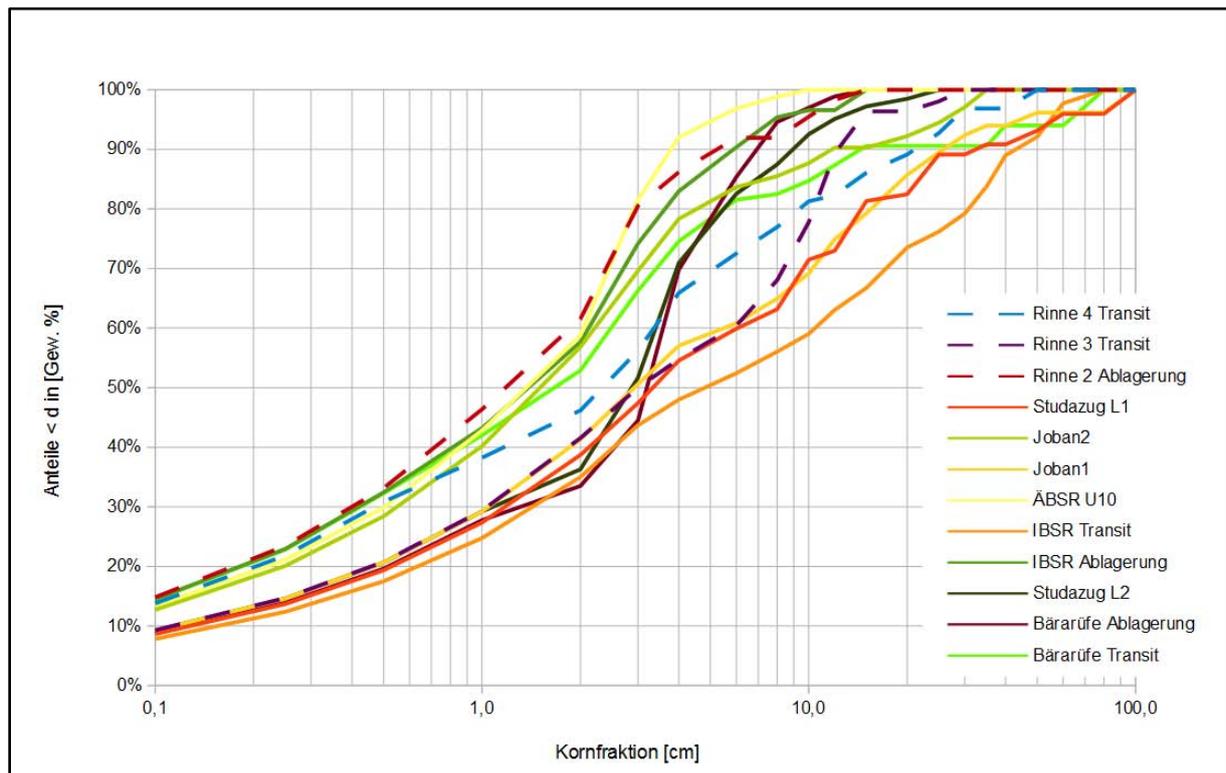


Abbildung 62: Vergleich: punktierte Linien sind Schutthaldenmuren; durchgängige Linien sind Muren in bestehenden Gerinnen

## 4 Ergebnisse und Diskussion - Labor (G.S.)

### 4.1 Korngrößenanalyse der Proben (G.S.)

Die Ergebnisse der Siebanalyse und der Sedimentationsanalyse wurden zusammengelegt und daraus eine Korngrößenverteilungskurve für die Feinanteile ermittelt (Abbildung 63).

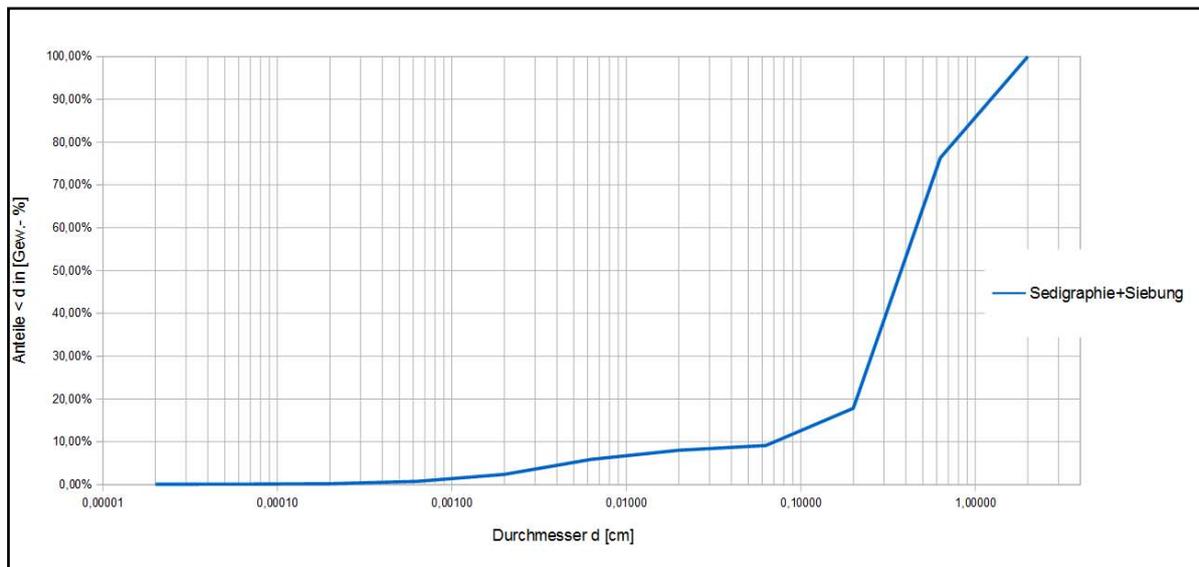


Abbildung 63: Verteilung der Feinanteile

### 4.2 Mineralogische Untersuchung (G.S.)

Das Ergebnis der röntgendiffraktometrischen Untersuchung ist in Abbildung 64 dargestellt. Durch den Peak bei 2,89 Ångström konnte Dolomit als Hauptbestandteil der Probe identifiziert werden.

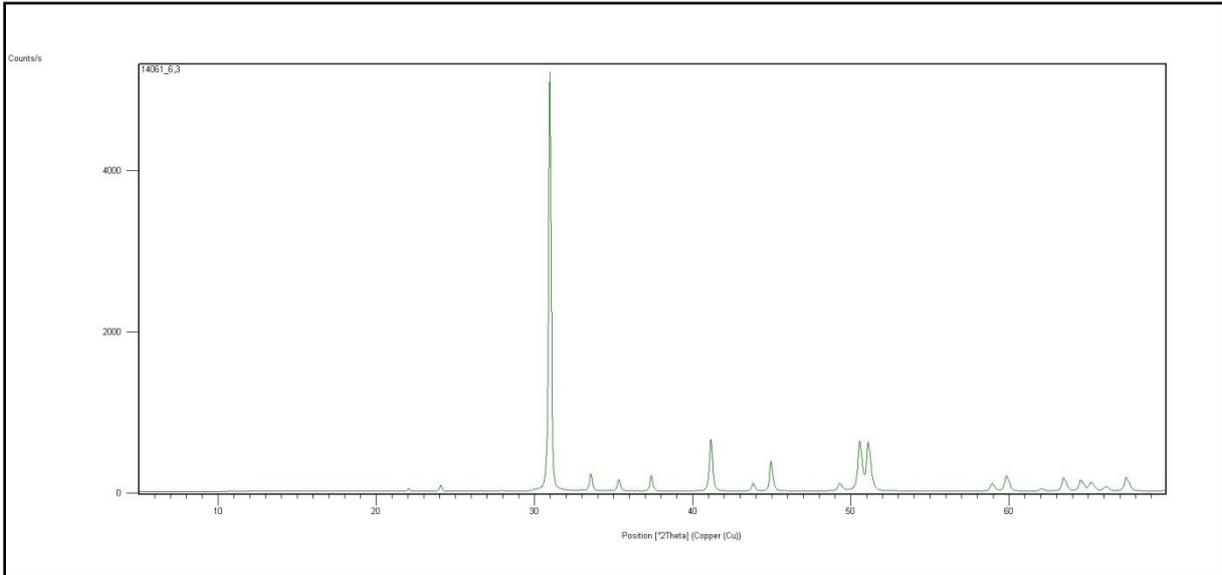


Abbildung 64: Mineralphasen der Bodenprobe bei Rinne 3

## 5 Ergebnisse Diskussion Modell (G.S.)

Grundlegend ist zu sagen, dass es möglich war, mit der Versuchsanlage murartigen Transport nachzustellen. Die niedrigste Neigung bei der ein Transport stattfand lag bei 17 Grad und einem Wassereintrag von 0,6 Liter pro Sekunde. Versuche mit 20 Grad Neigung 0,8 Liter pro Sekunde zeigten schon deutlich murartigen Transport. Die größte Neigung, bei der Versuche durchgeführt wurden, war 35 Grad. Die dabei entstandenen Erosions- und Ablagerungsformen weisen Ähnlichkeiten mit echten Murgängen auf. Laut GLADE (2004) kommen Muren in Schutthalden relativ schnell zum Stillstand bevor sie den Talboden erreichen, da der Schuttkegel durch seine Porosität und hohe Infiltrationsrate die Muren entwässert. Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei den Modellversuchen beobachtet werden. Ebenso bildeten sich u- und trapezförmige Kanäle (Abbildung 65), die teilweise von leveeartigen Ablagerungen gesäumt waren. Ein Unterschied zu Ablagerungen in der Natur war, dass hier vermutlich durch Kapillarkräfte vereinzelt sehr steile, teilweise senkrechte bis überhängende Ablagerungen entstanden.

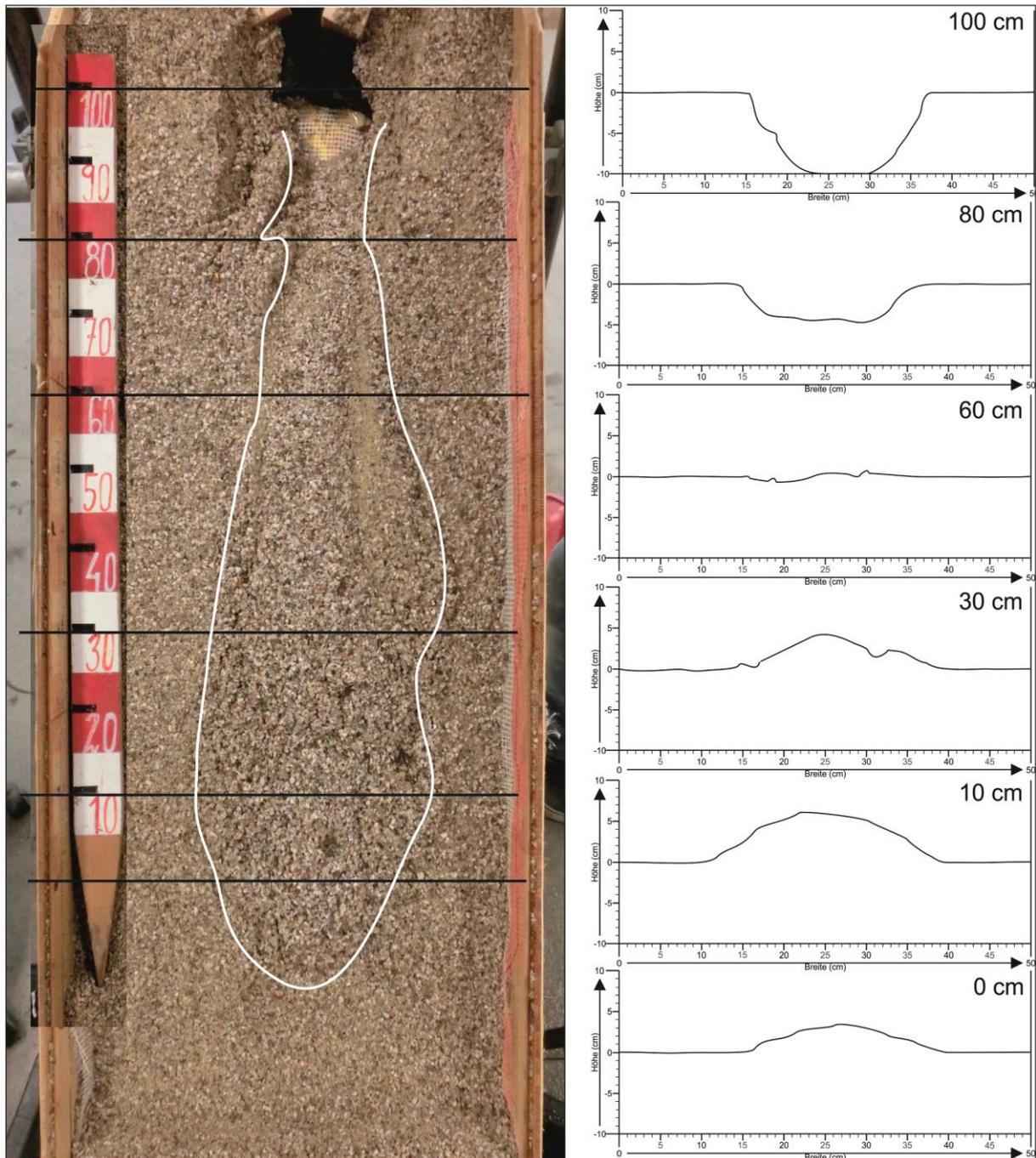


Abbildung 65: Murgangversuch mit 4 Liter Wassermenge, 35 Grad Neigung und Querprofilen; Begrenzung in weiß

### 5.1 Vergleich (G.S.)

Die Fotos aus Versuchen mit einem Wassereintrag von 0,8 Liter/Sekunde für eine Dauer von 5 Sekunden, also einer Gesamtmenge von 4 Litern, sind in Abbildung 66 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass mit zunehmender Neigung die Auslauflänge größer wird. Die durchschnittliche Auslauflänge bei einer Neigung von 20 Grad be-

trug 56 cm, bei 25 Grad 67 cm, bei 30 Grad 73 cm und bei einer Neigung von 35 Grad 116 cm.

Die Fotos aus Versuchen mit einem Wassereintrag von 0,8 Liter/Sekunde für eine Dauer von 6,25 Sekunden sind in Abbildung 67 dargestellt. Auch bei diesen Versuchen mit einer größeren Wassermenge von 5 Liter ist klar ersichtlich, dass mit zunehmender Neigung auch die Auslauflänge zunimmt. Die durchschnittliche Auslauflänge bei einer Neigung von 20 Grad betrug 64 cm, bei 25 Grad 74 cm, bei 30 Grad 76 cm und bei einer Neigung von 35 Grad 121 cm.

Der Vergleich der Versuche mit unterschiedlicher Wassermenge zeigt, dass bei gleichem Durchfluss aber größerer Wassermenge die Länge der Erosionsstrecke sowie die Länge der Ablagerung zunimmt.

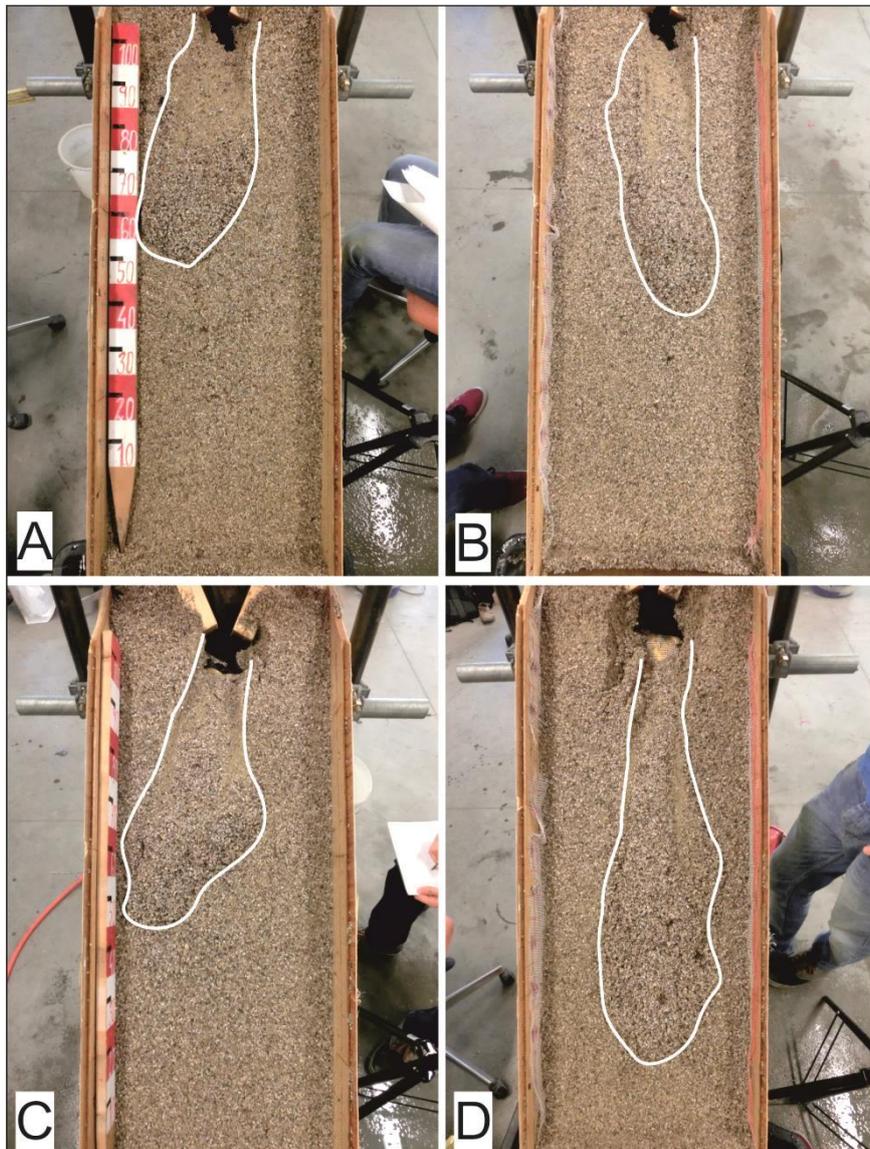


Abbildung 66: Wassermenge von 4 Litern und Neigung von 20 Grad (A), 25 Grad (B), 30 Grad (C) und 35 Grad (D); Begrenzung in weiß

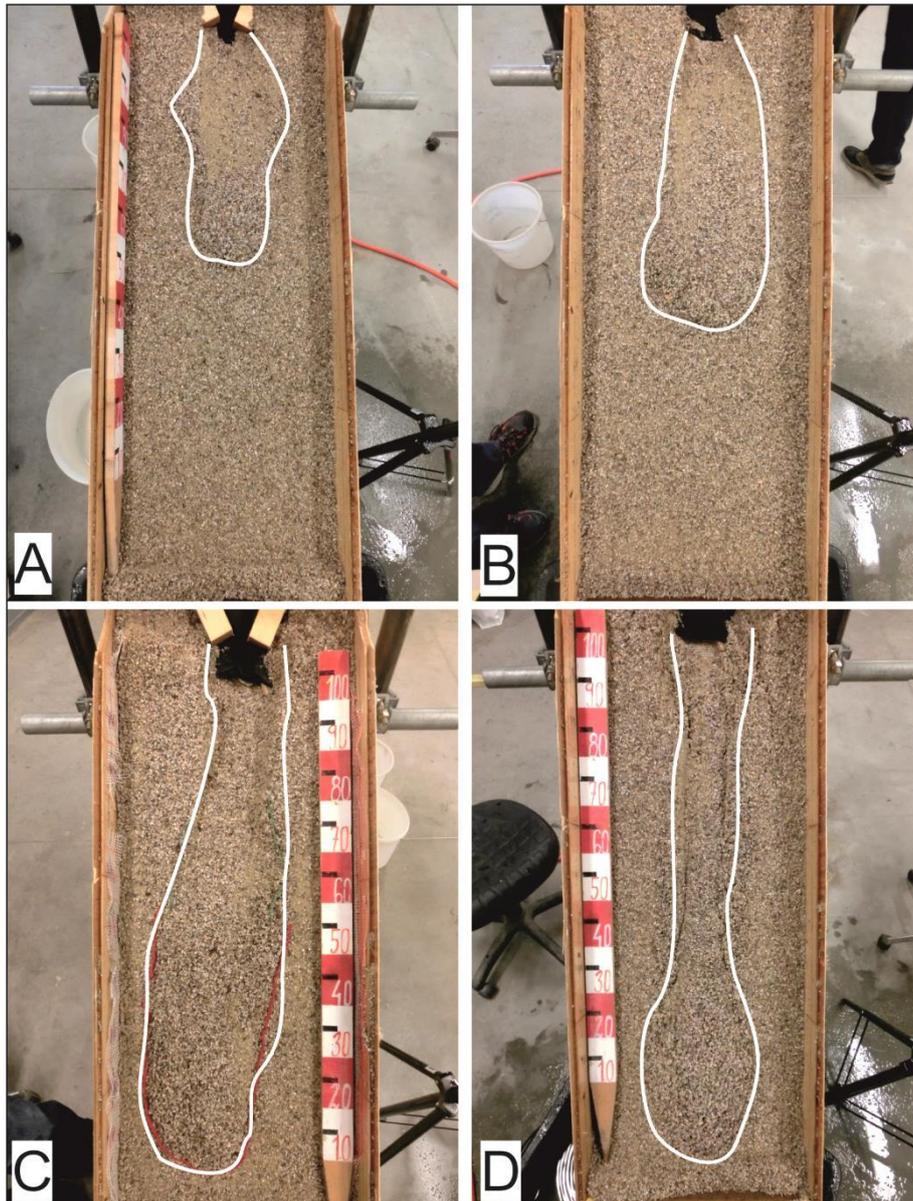


Abbildung 67: Wassermenge von 5 Liter und Neigung von 20 Grad (A), 25 Grad (B), 30 Grad (C) und 35 Grad (D); Begrenzung in weiß

## 5.2 Dimensionslose Kennzahlen (G.S.)

Die gemittelten Kennzahlen aus dem Modellversuch sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Dimensionslose Kennzahlen

Wassermenge	4 Liter				5 Liter			
Neigung (°)	20	25	30	35	20	25	30	35
Üp/GesL	0,40	0,45	0,42	0,39	0,45	0,47	0,44	0,45
Abl/GesL	0,60	0,55	0,58	0,61	0,55	0,53	0,56	0,55
LBMax/ GesL	0,56	0,73	0,66	0,82	0,68	0,75	0,68	0,71
Bmax/Abl	0,58	0,50	0,56	0,40	0,51	0,65	0,56	0,57
Bmax/GesL	0,35	0,28	0,32	0,24	0,28	0,34	0,31	0,31

### **5.3 Videoaufnahmen (G.S.)**

Videoaufnahmen der Versuche können im Internet unter folgender Adresse abgerufen werden: <https://www.youtube.com/channel/UCH-IbfzbcZ9iMwF69K8uQbA>

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die geomorphologischen Unterschiede zwischen den zwei verschiedenen Arten von Muren (Tabelle 14) werden durch die Voraussetzungen im Sammelgebiet bestimmt.

Tabelle 14: Geomorphologische Merkmale und durchschnittliche Neigung der zwei verschiedenen Arten von Muren

<b>Sammelgebiet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rinne</li> </ul> 40 °, <u>Step-Pool Systeme</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutthalde</li> </ul> 49 °, selten <u>Step-Pool Systeme</u>
<b>Kegelhals</b>	26 °, <u>Step-Pool Systeme</u> , <u>Murablagerungen</u> , <u>Levees</u> in der Rinne und Oberflächenabfluss	33 °, homogen, keine <u>Murablagerungen</u> und <u>Levees</u> , kein Oberflächenabfluss
<b>Transportgebiet</b>	21°, homogen, OF- Abfluss, <u>Levees</u> und Ablagerungen, wenig laterale Erosion	32°, homogen, kein OF-Abfluss, <u>Levees</u> ab dem ersten Drittel außerhalb der gebildeten Rinne möglich, Ablagerungen im unteren Drittel möglich, starke laterale Erosion
<b>Überschneidungs-Gebiet</b>	19 °, eben mit <u>Murkegel</u> , Oberflächenabfluss möglich	32 °, kann Profil über Schuttkegeloberfläche behalten kein Oberflächenabfluss
<b>Ablagerung</b>	18 °, starke Umlagerung	29 °, kaum Umlagerung

Während die Sammelgebiete der Muren westlich des Fundelkopfes tief eingeschnittene Felscouloirs mit flachen Teilstrecken (< 15 Grad) aufweisen, sind jene des Panülerkopfes eher flächig und ohne tief eingeschnittene Felsrinnen. Die flachen Teilstrecken dienen als Zwischenspeicher für erodiertes Material (KEAN et al. 2013), welches durch Starkregenereignisse oder langanhaltenden Niederschlag mobilisiert wird und als Ausgangspunkt für die Bildung von Muren dienen kann. Bei den Muren in Schutthalden wird nur ein geringer Teil des erodierten Materials im Sammelgebiet zwischengespeichert. Obwohl Melton-Verhältnisse größer 1,6 auf Murgang als Leitprozess im Sammelgebiet schließen lassen, gelangt der Großteil des Schutts in Form von Steinschlag oder Felssturz auf die Schutthalde. Die Muren werden durch das Auftreffen des Wassers aus den Sammelgebieten auf den proximalen Kegelbereich ausgelöst (GLADE, 2004). Der genaue Entstehungsmechanismus konnte nicht eindeutig geklärt werden. Auch der Einfluss der Schneefelder am Übergang zwischen Fels und Schutthalde ist fraglich (Abbildung 68, rechts oben). Da der Anriss der Muren aber bis an die Felswand reicht, wird angenommen, dass zum Zeitpunkt der Murabgänge keine Schneefelder vorhanden waren. Sie könnten das Lockermaterial

am proximalen Kegelbereich vor direktem Wassereinfluss und somit vor Erosion schützen, aber auch durch das Abschmelzen den näheren Bereich vorbefeuchten.

Die unterschiedlichen Prozesse, die zur Entstehung der Mur- bzw. Schuttkegel führen, beeinflussen auch die Morphologie der Murrinne (Abbildung 68) und den internen Aufbau der Kegel. Durch den Leitprozess Murgang entstehen flache (ca. 21 Grad), stark durchmischte Murkegel. Die steilen (ca. 31 Grad) Schuttkegel hingegen zeigen eine Oberflächenparallele Schichtung mit variablen Anteilen an grobem Material, was auf unterschiedliche Verwitterungsprozesse zurückzuführen ist. Bei starkem Frost-Tau-Wechsel verwittert der Dolomit zu größeren Bestandteilen und wird direkt in Form von Steinschlag auf dem Schuttkegel abgelagert. Während des Sommers verwittert der Fels zu feinerem Material, das im Sammelgebiet zwischengespeichert und nach langanhaltenden bzw. intensiven Regenschauern ausgespült und abgelagert wird (SASS und KRAUTBLATTER, 2006).

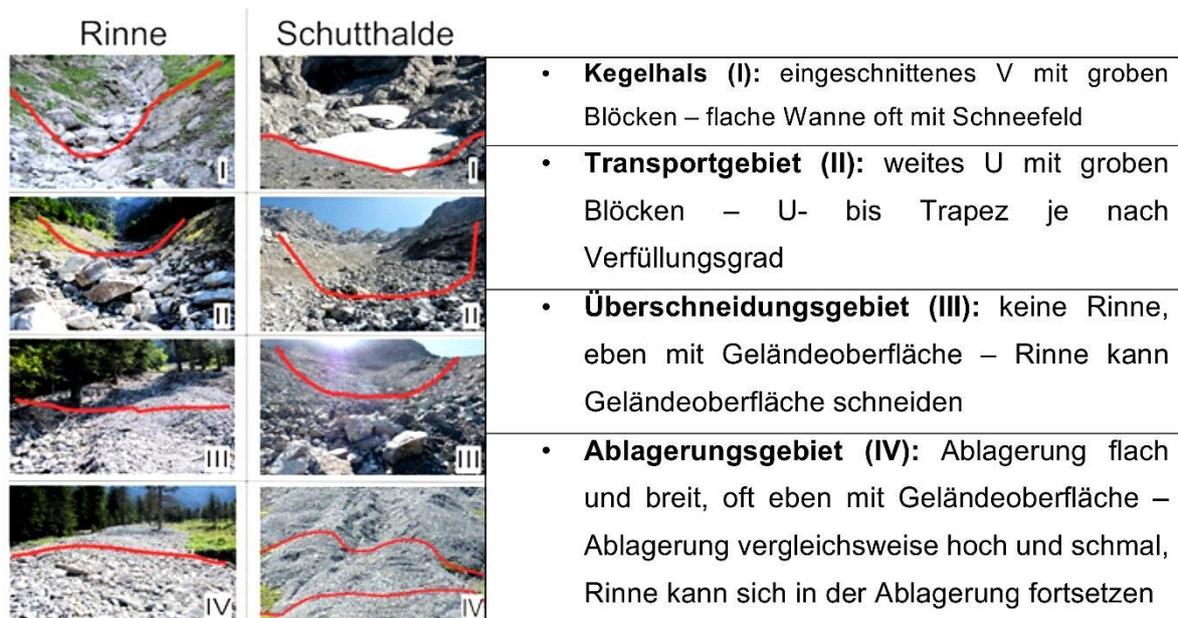


Abbildung 68: Gegenüberstellung der Querprofile der zwei Arten von Muren in den Bereichen I - IV

Die zeitliche Kartierung und Abschätzung der Frequenz der Muren kann nur als grober Anhaltspunkt dienen, da speziell zwischen den Orthofotos 1951 und 2001 bzw. 1973 und 2001 große Zeiträume liegen. Man kann aber sehr wohl sagen, dass Muren in Schutthalden deutlich seltener auftreten als Muren in einem bereits bestehenden Gerinne.

Da der Modellversuch einfach gehalten wurde und klassische wasserbauliche Ähnlichkeitsgesetze nicht ausreichen, sind die erzielten Ergebnisse nicht 1 zu 1 auf Vorgänge in der Natur übertragbar. Bei den Versuchen konnten Muren und deren typische Merkmale dargestellt werden, wobei sich aufgrund der Kapillarkräfte jedoch sehr steile, teilweise sogar überhängende, Ablagerungen ausbildeten. Davon abgesehen zeigt sich ein Trend, dass bei gleichem Durchfluss aber größerer Wassermenge die Länge der Erosionsstrecke sowie die Länge der Ablagerung zunimmt.

Um die Vorgänge für die Entstehung einer Mure in einer Schutthalde besser nachvollziehen zu können, wäre momentan ein idealer Zeitpunkt. Da die Rinnen, die bei den Ereignissen zwischen 2012 und 2013 entstanden sind, noch kaum mit Material verfüllt sind, könnte hier die Dynamik zwischen Eintrag und Abtransport gut beobachtet werden.

## Literaturverzeichnis

AMT DER VORARLBERGER LANDERSREGIERUNG (Hrsg.). (2001): Klima von Vorarlberg: Eine Anwendungsorientierte Klimatographie. Bd. 2, Bregenz.

AULITZKY, H. (1992): Die Sprache der „Stummen Zeugen“, Tagungspublikation Interprävent. Bd. 6: 139-174.

BARONI, C. et al. (2013): Vegetation Analysis on Composite Debris Cones. In: Dating Torrential Processes on Fans and Cones, London: Springer Verlag, 187-203.

BEZZOLA, G.R.(2004): Vorlesungsmanuskript „Flussbau“, Professur für Wasserbau, Prof. H.-E. Minor, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),ETH Zürich.

BISCHOF, M: (2010): Zur Geologie und Tektonik im südwestlichen Rätikon (Vorarlberg). Dipl.-Arb., Institut für Geologie und Paläontologie Innsbruck.

BLAIR, T. C.; MCPHERSON, J. P. (1994): Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. Journal of Sedimentary Research A: Sedimentary Petrology & Processes 64: 3.

BÖGEL, H.; SCHMIDT, K. (1976): Kleine Geologie der Ostalpen, Thun: Ott Verlag.

CARL, B.; GENTILI, R.; ARMIRAGLIO, S. (2013): Vegetation analysis on composite debris cones. In: Dating Torrential Processes on Fans and Cones, London: Springer Verlag, 187-201.

COSTA, J. E. (1984): Physical Geomorphology of Debris Flows: Developments and applications of geomorphology. J. E. Costa and P. J. Fleisher. Berlin, Springer-Verlag: 268-317.

DIN-18130, (1989): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts; Laborversuche, Normenausschuss Bauwesen (NABau). Teil 1, DIN Deutsches Institut für Normung.

FEHR, R. (1987): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilung VAW Nr. 92 ETH-Zürich.

FELLEHNER, M. (2004): Der Hauptdolomit als Grundwasserspeicher in den Nördlichen Kalkalpen. Diss., Marburg/Lahn.

- FRIEBE, J. G. (2004): Zur Geologie Vorarlbergs - eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung verkarstungsfähiger Gesteine: Vorarlberger Naturschau 15. Dornbirn: Inatura, 19-40.
- GAMMA, P. (1999): dfwalk - Ein Murgang- Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Diss., Universität Bern.
- GAMON, T. (2015): Flurnamenkarte der Marktgemeinde Nenzing. Archiv der Marktgemeinde Nenzing. - Maßstab 1:6600.
- GLADE, T. (2004): Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. *Geomorphology* 66: 189-213.
- GWINNER, M. P. (1978): Geologie der Alpen. 2. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart.
- HAN, Z. et al. (2014): A new approach for analysing the velocity distribution of debris flows at typical cross-sections. *Natural Hazards* 74: 2053-2070.
- HARVEY, A. (2011): Dryland Alluvial Fans. In: *Arid Zone Geomorphology: Process, Forms and Change in Drylands*, 3. Aufl. John Wiley and Sons, 333-371.
- HARVEY, A. (2013): Processes of Sediment Supply to Alluvial Fans and Debris Cones, In: *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, London: Springer Verlag, 15-35.
- HOFFMANN, T.; SCHROTT, L. (2002): Modelling sediment thickness and rockwall retreat in an Alpine valley using 2D-seismic refraction (Reintal, Bavarian Alps). *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 127: 153-173.
- [http://www.landesmuseum.at/pdf\\_frei\\_remote/SBAWW\\_198\\_0179-0195.pdf](http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/SBAWW_198_0179-0195.pdf)  
(09.06.2015).
- HÜBL J. (1995): Muren: Prozesse und Ablagerungsformen. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- HÜBL, J. (2008): Ereignisdokumentation Prozesse: Wasser. Universitätskurs Ereignisdokumentation. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur. Wien [unveröffentlicht].
- HÜBL, J. (2009): Ereignisdokumentation Prozesse: Wasser. Universitätskurs Ereignisdokumentation. Institut für Alpine Naturgefahren. Universität für Bodenkultur. Wien [unveröffentlicht].

- HÜBL, J., FLEISCH, M., CHIARI, M., KAITNA, R. (2012): Physikalische Modellversuche zur Optimierung der Geschieberückhaltesperre am Gadriabach (Vinschgau, Südtirol); IAN Report 144, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien.
- HUTCHINSON, J.N. (1998): A small-scale field check on the Fisher-Lehmann and Bakker-Le Heux cliff degradation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 913-926.
- IVERSON R.M. (2013): Mechanics of Debris Flows and Rock Avalanches. In: *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, Vol. 1, 573-587.
- JOHNSON, A.M. (1984): Debris flow. Slope instability (ed. by BRUNSDEN, D., PRIOR, D.B.): 257-361.
- KAITNA, R.; HÜBL, J. (2013): Silent Witnesses for Torrential Processes, In: *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, London: Springer Verlag, 111-131.
- KEAN, W.J. et al. (2013): Runoff-generated debris flow: Observation and modelling of surge initiation, magnitude, and frequency. *Journal of geophysical research: Earth surface* 118: 1-18.
- KOBEL, M. (1968/69): Erläuterung zur Tektonik des Rätikons mit spezieller Berücksichtigung des Kalkalpenanteils. Zürich: Geologisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule und Universität Zürich.
- KRASSER, L. (1955): Bericht 1955 über die Aufnahmen auf Blatt Feldkirch (141). In: GBA (Hrsg.): *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*. Wien: GBA, 43-45.
- LABHART, T. P. (2004): *Geologie der Schweiz*. 6. Aufl., Thun: Ott Verlag.
- MARTIN, H. et al. (2008): *Technische Hydromechanik Band 4: Hydraulische und numerische Modelle*. Berlin: Verlag Bauwesen.
- MELTON, M. (1965): The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *J. Geol* 73: 1–38.
- MEYER, C. (1978): *Geologie der Lechtal-Decke im Gebiet des Gamperdona-Tales (W - Rätikon)*. Bern.
- NEUMANN, M. (2011): Räumliche und zeitliche Rekonstruktion der Murgangaktivität für alpine Einzugsgebiete: Eine dendrogeomorphologische Fallstudie. Dipl.-Arb., Univ. f. Bodenkultur Wien.

ONR-24800, (2009). Schutzbauwerke der Wildbachverbauung - Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung. Wien.

PIERSON, T. C. (1986): Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. Hillslope Processes, The Binghamton symp. In: geomorphology. A. D. Abraham. Boston, Allen & Unwin. 16: 269-296.

POISEL, R.; EPPENSTEINER, W. (1988): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung, Teil 1: Geomechanik des Systems "Hart auf Weich". Essen: VGE Verlag.

RICHTER, M. (1978): Sammlung geologischer Führer 49 (Vorarlberger Alpen).; Bd. 49, 2. Aufl., Berlin: Borntraeger.

RICKENMANN, D. (2001): Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bd. 124. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 51-77.

RICKENMANN, D. (2014): Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL Bern. 9: 105.

RICKENMANN, D.; SCHEIDL, C. (2010): Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. Earth Surface Processes and Landforms 35: 157-173.

RICKENMANN, D.; SCHEIDL, C. (2013): Debris-Flow Runout and Deposition on the Fan. In: Composite Debris Cones. In: Dating Torrential Processes on Fans and Cones, London: Springer Verlag, 75-95.

RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, Geomorphology 8: 175- 189.

SASS, O. (2006): Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods. Journal of Applied Geophysics 62: 254-269.

SASS, O.; KRAUTBLATTER, M. (2006): Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slopes: Genetic models derived from GPR measurements. Geomorphology 86: 176-192.

SEIJMONSBERGEN, A. C. (1992): Geomorphological evolution of an Alpine area and its application to geotechnical and natural hazard appraisal in the NW. Rätikon mountains and S. Walgva. Diss., Universität von Amsterdam.

STEINHAUSER, P. (1991): Über das Gleichgewicht der Ostalpen.

STINY, J. (1931): Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Wien: Springer Verlag.

STOFFEL, M. (2013): Tree-Ring Based Record of Debris-Flow Dynamics and Triggering Rain Storms at Ritigraben (Swiss Alps) since AD 1570, In: Dating Torrential Processes on Fans and Cones, London: Springer Verlag, 179-187.

STRAHLER, A. (1958): Dimensional analysis applied to fluvially dissected landforms. Geol. Soc. America 69: 279-300.

SUTTERLÜTTI, R. (1990): Die Hydrogeologie des Gamperdonatales unter besonderer Berücksichtigung der Weissbachquelle (Rätikon, Vorarlberg). Diss., Graz.

TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. Journal of Natural Disaster Science 1: 57-89.

TAKAHASHI, T. (2007): Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. London: Taylor and Francis.

TERZER, S. (2015): persönliche Mitteilung.

TIEFENHÄLER, E. (1968): Die rätoromanischen Flurnamen der Gemeinden Frastanz und Nenzing: Romanica Aenipontana. Bd. 4, Innsbruck: Institut für Romanische Philologie der Leopold Franzens - Universität.

TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Diss., ETH Zürich.

WANG, C.; LI, S., ESAKI, T. (2008): GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 47–58.

WILFORD, D. J. et al. (2004): Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. Landslides: 61-66.

# Anhang

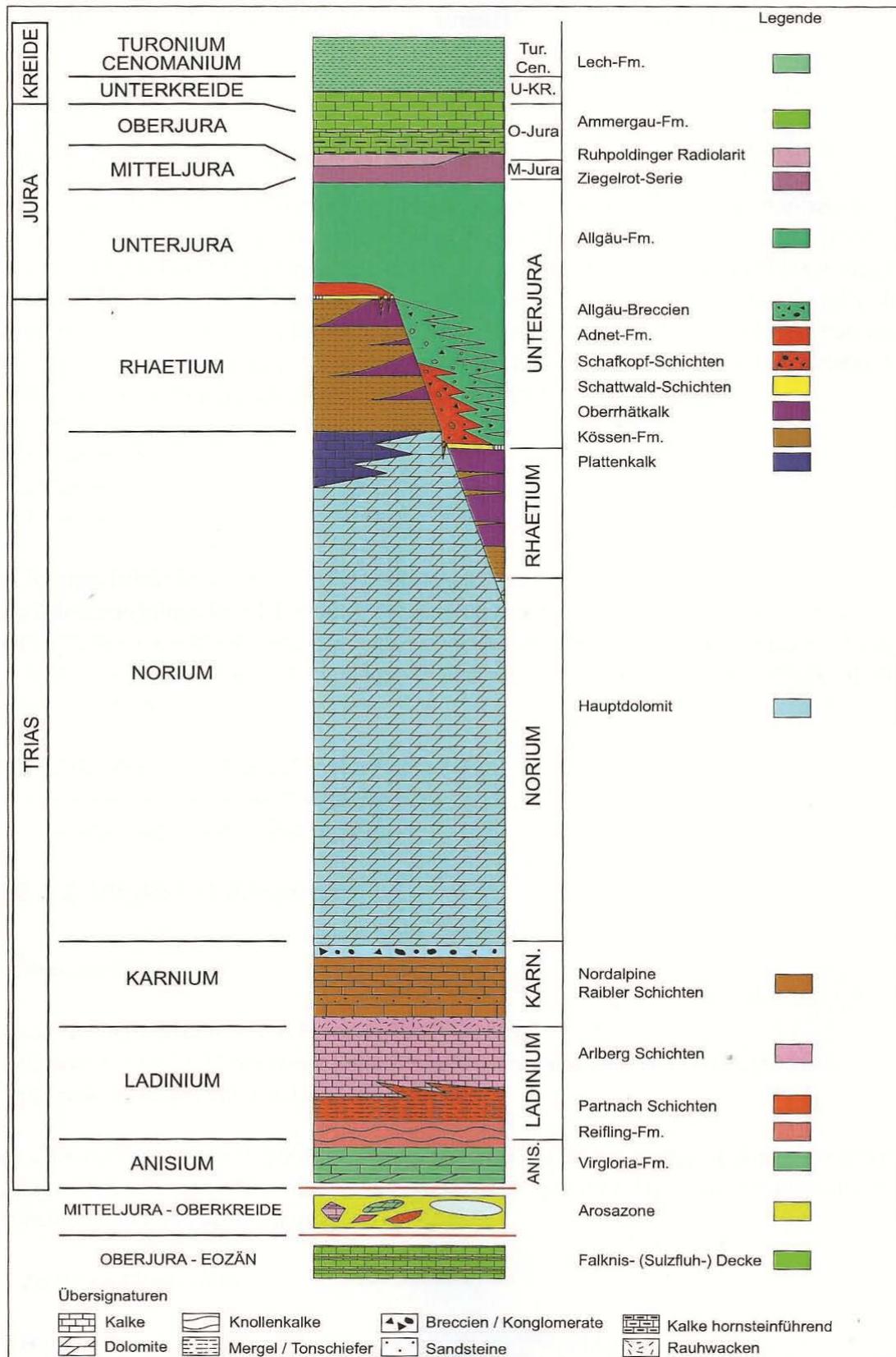


Abbildung 69: Stratigrafisches Sammelprofil der sedimentären Schichtfolgen mit ungefähren, relativen Mächtigkeiten im Bereich des Untersuchungsgebietes nach BISCHOF (2010)

Tabelle 15: Niederschlagsdaten der nahegelegenen Messstellen; AMT DER VORARLBERGER LANDERSREGIERUNG (2001)

Mittlere und maximale Niederschlagssummen in mm (1961 - 1990)								
Brand	Mai	Juni	Juli	August	September			
Mittel	145	190	206	202	139			
Max	335	283	389	329	336			
<u>Bürs</u>								
Mittel	130	162	164	171	116			
Max	249	296	287	307	340			
<u>Lünersee</u>								
Mittel	133	188	194	198	137			
Max	259	306	323	319	318			
Schwellenwerte	Brand		Bürs		Lünersee			
in mm (1961 - 1990)	Sommer	Herbst	Sommer	Herbst	Sommer	Herbst		
≥ 25	6	2,6	4,8	2	5,8	2,8		
≥ 30	4,4	1,6	3,1	1,2	3,7	1,7		
≥ 35	2,9	0,9	1,8	0,7	2,6	1		
≥ 45	1,1	0,4	0,5	0,3	1,1	0,6		
≥ 60	0,5	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1		
Durchschnittliche extreme Tagesmenge in mm (1961 - 1990)								
Bürs	62							
Brand	63							
Lünersee	60							
Absolute extreme Tagesniederschlagssumme in mm								
Bürs	125,5	05.09.1914 u 1984	1901 - 1990					
Brand	112,2	05.09.1984	1961 - 1990					
Lünersee	128,9	11.03.1968	1961 - 1990					
Mittlere extreme 24-stündige Tagessummen des Niederschlages in mm (1971 - 1990)								
	Mai	Juni	Juli	August	September	Sommer	Herbst	Jahr
Bürs	26	36	34	37	36	49	39	61
Brand	23	41	41	43	41	58	45	64
Lünersee	25	39	38	39	38	51	44	59
Durchschnittliche Zahl der Tage mit Gewitter (1961 - 1990)								
	Mai	Juni	Juli	August	September	Jahr		
Bürs								
mittel	2,7	4,5	6,3	4,3	1,6	21,1		
max	9	11	11	8	4	33		

Gegenüberstellung der Querprofile der Inneren Bildstöcklerüfe und der Rinne 3:

