

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL

Interaktion Murgang – Wald: Rekonstruktion von Ereignissen mit Hilfe von RAMMS

Dominik Hauser

Masterarbeit am Departement Umweltnaturwissenschaften
ETH Zürich

Institut für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Birmensdorf

Referentin: Dr. Monika Frehner ETH

Korreferent: Christoph Graf WSL

April 2011

Zusammenfassung

Im Gebiet der Westseite des Rossbergs oberhalb von Arth-Goldau flossen am 22. / 23. August 2005 an zwei Stellen Murgänge mit Geschiebevolumina von ca. 80`000 respektive 200`000 m^3 zu Tale. Das Transitgebiet beider Prozesse befand sich im Wald, losgelöst von einem Gerinne.

Dem numerischen Auslaufmodell RAMMS, ursprünglich für Fliessschneelawinen-simulationen entwickelt, fehlen im Modul Murgänge noch Erfahrungswerte bezüglich der Einstellung von Inputparameterwerten. Diese Studie soll dazu beitragen, diesem Manko Abhilfe zu schaffen.

Ziele dieser Studie waren eine möglichst realitätsgetreue Nachmodellierung der Murgänge mit Hilfe des Simulationsprogramms RAMMS und dabei die Ermittlung von Inputparametern wie den Reibungskoeffizienten μ und ξ, des aktiv-passiven Fliessdrucks λ und der Dichte von erodierbarem Geschiebematerial. Zentrale Bedeutung erhielt dabei die Bestimmung eines Wertes für die trockene Reibung μ in einem Waldperimeter. Zudem wurde die Interaktion des Waldes mit den Murgangereignissen untersucht, falls es Tendenzen gibt, dass der Wald einen Einfluss auf den Murgang ausgeübt hat und ob allenfalls einzelne Baumarten oder Durchmesserklassen in einem Schutzwald möglicherweise geeigneter sind.

Die Ereignisanalyse erfolgte anhand von Feldaufnahmen und bereits existierenden Publikationen. Die Modellierung in RAMMS verlief nach dem „back calculation"-Verfahren. Die Eigenschaften des Waldes wurden ebenfalls durch Literaturrecherchen und Feldaufnahmen ermittelt. Die Modellierung bestand aus einer Modellkalibrierung und darauf aufbauend verschiedene Sensitivitätsanalysen. Die Modellkalibrierung war für die Parametrisierung der Reibungsparameter, der Anriss- und Erosionsgebiete, sowie für die Modifikation am Höhenmodell unerlässlich. Die μ und ξ-Resultate aus der Kalibrierung der beiden Murgänge weichen markant von den bisherigen publizierten Ergebnissen ab, was mit den Fliesseigenschaften der beiden untersuchten Murgänge zu tun hat. Bei der Sensitivitätsanalyse resultierten die besten Ergebnisse mit einer Erhöhung des μ-Wertes für den Waldperimeter um 0.06 [-] und einem aktiv-passiven Fliessdruck λ von 1.0 [-]. Bei den Feldaufnahmen konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass eine Baumart oder eine Durchmesserklasse widerstandsresistenter gewesen ist. Der am häufigsten eingetretene Versagensmechanismus bei der Interaktion mit einem Murgang war Wurzelbruch, resp. –wurf.

In allen Analysen des Murgangs „Arth" konnten aussagekräftige Ergebnisse gefunden werden, die in sich konsistent sind und der Weiterentwicklung des RAMMS nützlich sein können. Dies war beim zweiten untersuchten Murgang („Goldau") nicht der Fall. Das Ausbleiben einer Tendenz für die Widerstandskraft der Baumarten dürfte an der Erosion gelegen haben. Zudem war die Energie der Murgänge zu gross. Als geeigneter gegen den Wurzelbruch/-wurf stellen sich Laubgehölze gegenüber Nadelgehölzen heraus.

Es bedarf noch weiterer Validierungsgebiete, um die in dieser Arbeit gefundenen Resultate zu verifizieren. Bei einer Interaktion Murgang-Wald sollten die Bodeneigenschaften in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

Dank

Diese Arbeit war nur möglich durch die Mithilfe zahlreicher Personen und es ist mir ein Anliegen, diesen dafür zu danken.

Als erstes gilt mein Dank für ihre fachliche Unterstützung meinen beiden Betreuungspersonen Christoph Graf und Monika Frehner. Wann immer ich ein Problem oder eine Frage bezüglich meiner Studie hatte, stand die Türe zu Christoph Grafs Büro offen. Mit seinem vertieften Wissen über Murgänge und dem RAMMS verhalf er dieser Arbeit zu einem besseren Resultat. Auch Monika Frehner brachte mit ihren fachlichen Inputs, insbesondere zum Bearbeitungssteil des Waldes, diese Studie weiter. Der Dank geht auch weiter an das ganze Murgang-Steinschlag-Lawinen-Team der WSL für die gute Zeit, die ich in Birmensdorf verbringen durfte.

Peter Bebi und Michaela Teich waren durch fachliche Anregungen, sowie Bereitstellen ihres Wissens hilfreich, die Arbeit zu entwickeln.

Ein grosses Dankeschön gebührt ebenfalls dem Forst- und Naturgefahrenamt des Kantons Schwyz, namentlich dem Kreisforstingenieur Joseph Gabriel, dem Kreisförster Sigi Weber und dem Naturgefahrenexperten Dr. Daniel Bollinger. Durch das zur Verfügung stellen von unzähligen hilfreichen Informationen, anregenden Diskussion, sowie einer geführten Exkursion durch das Untersuchungsgebiet, konnte eine breit fundierte Grundlage geschaffen werden, um die Murgänge untersuchen zu können. Des Weiteren möchte ich für die unkomplizierte und speditive Beantwortung einiger Fragen und Wünsche beim Sachbearbeiter des kantonalen Forstamts Schwyz, Bernhard Roth bedanken.

Einen Dank möchte ich auch Andrea Stocker aussprechen. Nicht nur für die kurzweilige Zeit zusammen im Büro, sondern ebenfalls für die tatkräftige Unterstützung bei Arbeiten im Arc-GIS und für das Tauschen ihrer Nachtlektüre zu Gunsten dem Gegenlesen dieser Arbeit. An der Korrektur ebenfalls mitgeholfen haben Andrea Marti, Alex Baumann und Samuel Gygli.

Für den Einsatz und die Hilfe während den Feldaufnahmen möchte ich dem Kluppierer Silas Hobi und dem GPS- und Vermessungsspezialisten Pat Thee danken. Ohne das Mitwirken der Beiden wäre eine derartig speditive und exakte Aufnahme der Daten nicht möglich gewesen.

Für unterhaltsame Stunden an der WSL am Mittags- und Tischtennistisch bin ich der Mannschaft des Studienganges Umweltnaturwissenschaften, Jahrgang 2011, dankbar.

Zu guter Letzt noch ein herzliches Dankeschön an meine Familie und Freundin Sarah, welche mir durch ihre moralische, wie auch finanzielle Unterstützung erlaubten, diese Masterarbeit und mein Studium erfolgreich gestalten zu können.

Diese Arbeit möchte ich meinem guten Freund Simon widmen.

Dominik Hauser

Birmensdorf, April 2011

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung I
Dank II
Inhaltsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis VI
Abbildungsverzeichnis VII
Abkürzungen und Bezeichnungen X
Pflanzennamen XII
1 Einleitung 1
1.1 Ausgangslage 1
1.2 Kontext und Motivation 2
1.3 Zielsetzung 2
1.4 Gliederung 2
2 Definitionen 4
2.1 Baum 4
2.2 Wald 4
2.3 Schutzwald 4
2.4 Waldmurgang 5
2.5 Der Wald als Murgangschutzwald 5
3 Untersuchungsgebiet und Ereignisbeschreibung 6
3.1 Untersuchungsgebiet 6
3.1.1 Lage 6
3.1.2 Klima 9
3.1.3 Geologie 14
3.1.4 Wald 18
3.2 Murgangbeschreibung 21
3.2.1 Murgang „Arth“ 21
3.2.2 Murgang „Goldau“ 24
4 Grundlagen 28
4.1 Murgang 28
4.1.1 Definition 28
4.1.2 Klassifikation der Zonen 30
4.1.3 Murgangentstehung 31
4.1.4 Transport 32
4.1.5 Ablagerung 35
4.2 RAMMS 35
4.2.1 Modellinput 37
4.2.2 Modelloutput 43

5 Vorgehen und Methodik 44
5.1 Modellierung der Murgänge in RAMMS 44
5.1.1 Vorgehen 44
5.1.2 Verwendete Daten 44
5.1.3 Veränderte Faktoren 47
5.1.4 Kalibrierungs-Kriterien 52
5.1.5 Erläuterungen zu den Messstandorten 54
5.1.6 Eruierung von „Best-Fit“-Wertepaaren 56
5.1.7 Sensitivitätsanalysen 56
5.2 Vorgehen der Untersuchung des Waldeinflusses auf die Murgänge 57
5.2.1 Methode 58
5.2.2 Vorgehen 60
5.2.3 Statistische Analyse 62
6 Resultate 64
6.1 Resultate der Modellierungen in RAMMS 64
6.1.1 Einfluss der Reibungsparameter auf die Fliessgeschwindigkeit und die Abflusshöhe 65
6.1.1.1 Einfluss der Reibungsparameter auf die maximale Fliessgeschwindigkeit 65
6.1.1.2 Einfluss der Reibungsparameter auf die maximale Abflusshöhe 66
6.1.2 Modellkalibrierung 66
6.1.2.1 Murgang „Arth“ 67
6.1.2.2 Murgang „Goldau“ 74
6.1.3 Sensitivitätsanalysen 80
6.1.3.1 Murgang „Arth“ 80
6.1.3.2 Murgang „Goldau“ 93
6.2 Resultate der Untersuchungen bezüglich der Interaktion Murgang-Wald 99
6.2.1 Deskriptive Statistik 100
6.2.1.1 Baumartenzusammensetzung 100
6.2.1.2 Durchmesser 105
6.2.1.3 Untersuchung der Versagensmechanismen 108
6.2.2 Literaturrecherchen 109
7 Diskussion 114
7.1 Ereignisse 114
7.2 Einfluss Reibungsparameter auf die Fliessgeschwindigkeit und Abflusshöhe 115
7.3 Modellkalibrierung 115
7.4 Sensitivitätsanalyse 117
7.4.1 Variation Δμ für den Waldperimeter 117
7.4.2 Variation des aktiv-passiven Fliessdruck Lambda λ 118
7.4.3 Spezifische Dichte des Erosionsmaterials 119

7.5 Diskussion der Untersuchungen bezüglich der Interaktion Murgang - Wald 119
7.6 Messstandorte 120
7.7 Grenzen des Modells RAMMS 121
7.8 Methodenkritik der Simulationen mit RAMMS 122
7.9 Methodenkritik der Feldaufnahmen 123
8 Schlussfolgerungen und Ausblick 124
8.1 Schlussfolgerungen 124
8.2 Ausblick 125
Literaturverzeichnis 127
Anhangsübersicht A-0

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufsummierte Tagesniederschläge der verschiedenen Messstationen während der Periode vom 15. bis 23. August 2005. 13
Tabelle 2: Zusammensetzung der bunten Rigi Nagelfluh, gemessen anhand von Bergsturzmaterial von 1806 in Goldau. 17
Tabelle 3: Charakteristika des Murgangs Arth 22
Tabelle 4: Charakteristika des Murgangs Goldau. 25
Tabelle 5: Kennzahlen der Anrissgebiete beider Murgänge 40
Tabelle 6: In RAMMS simulierte Anriss- und Erosionsvolumen für die beiden Murgänge „Goldau“ und „Arth“. 48
Tabelle 7: Übersicht der getroffenen Annahmen hinsichtlich der Datenwerte und Messpunkte 53
Tabelle 8: Outputdaten der Simulationen des Murgangs „Arth“ 70
Tabelle 9: Outputdaten der Simulationen des Murgangs „Goldau“ 77
Tabelle 10: Einstellungen der Voellmy-Salm Parameter für die Sensitivitätsanalyse des Waldeinflusses beim Murgang „Arth“. 81
Tabelle 11: Outputdaten der Sensitivitätsanalysen der drei untersuchten Inputparameter des Murgangs „Arth“. 82
Tabelle 12: Einstellungen der Voellmy-Salm Parameter für die Sensitivitätsanalyse des Waldeinflusses 94
Tabelle 13: Outputdaten der Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Goldau“ 95
Tabelle 14: Die zu erwartenden durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser verglichen mit den gemessenen Durchmessern in den fünf Aufnahmeflächen. 105
Tabelle 15: Der „U-Test“ (Mann-Whitney) angewendet auf die Teilflächen „Innen“ und „Aussen“ der fünf Aufnahmeflächen 106
Tabelle 16: Auflistung der am häufigsten in der Schweiz vorkommenden Baumarten bezüglich Wurzelsystem, Durchwurzelungstiefe und Anfälligkeit auf Wurzelbruch, resp. Wurzelwurf. 111
Tabelle 17: Zugfestigkeit der Wurzeln ausgewählter Baumarten. 112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte der Schweiz mit dem Untersuchungsgebiet als roten Punkt markiert 6
Abbildung 2: Karte des Gebietes rund um Arth-Goldau 7
Abbildung 3: Karte und Orthophoto des Untersuchungsgebietes im Verhältnis 50:50 übereinander projeziert, links der Murgnang „Arth“, rechts der Murgang „Goldau“ 8
Abbildung 4: Thematische Karte der Innerschweiz mit der mittleren jährlichen Temperatur, sowie der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge. 9
Abbildung 5: Klimadiagramme der Messstationen Rigi-Kulm und Schwyz 10
Abbildung 6: Thematische Karte mit allen Wettermessstationen der Innerschweiz 10
Abbildung 7: Interpolierte Tagesniederschläge über der Innerschweiz, basierend auf den Daten der Messstationen von MeteoSchweiz und unter Einbezug der Radardaten 11
Abbildung 8: Vergleich der Niederschlagsmessungen der Messstationen Sattel-Aegeri, Zugerberg und der privaten Messsation Gantlihof 12
Abbildung 9: Geologische Profile durch das Gebiet der Rigi und Rossberg. 15
Abbildung 10: W - E Profil durch die Rigi-Rossberg-Schuppe mit Angabe der Strömungsrichtungen 16
Abbildung 11: Schuttfächer der Rigi-Rossberg Schüttung 16
Abbildung 12: Die Standortsregionen der Schweiz aus forsttechnischer Sicht 18
Abbildung 13: Einteilung der Höhenstufen in den verschiedenen Standortsregionen 19
Abbildung 14: Das Untersuchungsgebiet mit den Waldabschnitten mit besonderer Schutzfunktion eingezeichnet 20
Abbildung 15: Kartierung der Wälder im Gebiet des historischen Bergsturzes von 1806 nach Strukturtypen. 20
Abbildung 16: Anrissgebiet des Murgangs „Arth“ vom Helikopter am Morgen des 23. August 2005 aus aufgenommen 23
Abbildung 17: Luftaufnahme vom Gantlihof und Färnisbüel, aufgenommen am Morgen des 23. August 2005. 24
Abbildung 18: Aufnahme des Murgangs „Goldau“ von der Anrisszone aus Richtung Goldau gesehen. 27
Abbildung 19: Klassifikation von Massenbewegungen in Hanglagen als Funktion des Feststoffgehaltes und der Materialeigenschaften 28
Abbildung 20: Schema eines Murgangs im Längsschnitt mit einer granularen Murenfront. 29

Abbildung 21: Ein potentielles Murganggebiet eingeteilt in die drei Zonen: 1) Anrissgebiet, 2) Transitzone und 3) Ablagerungsgebiet. 30
Abbildung 22: Querprofil eines Gerinnes und des Murgangs beim Durchfluss eines Murgangs und nach dem Murgang 33
Abbildung 23: Murgangklassifikation hinsichtlich Feststoffkonzentration und Feinanteil der Feststoffe. 34
Abbildung 24: Typische Sanduhrform einer Murgangfliessstrecke 35
Abbildung 25: Bandbreite der Reibungsparameter μ und ξ für verschiedene Massenbewegungsprozesse 37
Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Vallée de la Sionne. 38
Abbildung 27: Der Anrissbereich des Murgangs „Goldau“. 40
Abbildung 28: Der Anrissbereich des Murgangs „Arth“ im Gebiet Roren. 40
Abbildung 29: Shapefiles der beiden in RAMMS verwendeten „Waldflächen“. 41
Abbildung 30: Lage und Grösse der Erosionsflächen wie sie in RAMMS verwendet wurden. 42
Abbildung 31: Ablagerungshöhen des Murgangs „Arth“ 46
Abbildung 32: Differenzenmodell des Murgangs „Goldau“ 46
Abbildung 33: Querprofil durch ein virtuelles Gerinne 49
Abbildung 34: Aufnahme des Gantlihof am Morgen nach dem Ereignis 51
Abbildung 36: Die virtuellen Messstandorte der beiden Murgänge „Arth“ und „Goldau“ 55
Abbildung 37: Orographisch linksseitige Grenze des Murgangs Goldau mit dem Wald 58
Abbildung 38: Beschreibung und schemenhafte Darstellung der verschiedenen vorkommenden Versagensarten bei Bäumen durch externe oder interne Einflüsse 59
Abbildung 39: Standorte der fünf Aufnahmeflächen. 61
Abbildung 40: Schematische Darstellung einer Aufnahmefläche (hier Aufnahmefläche 1, „Goldau unten“) 62
Abbildung 41: Die Parameter des U-Tests, mit den Werten der Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“ 63
Abbildung 42: Einfluss der Reibungsparameter μ und ξ auf die Fliessgeschwindigkeit. 65
Abbildung 43: Einfluss der Reibungsparameter μ und ξ auf die maximale Abflusshöhe. 66
Abbildung 44: Abbildung der „Best-Fit“-Simulation für die Modellierung des Murgangs „Arth 68
Abbildung 45: Die Wertepaare der besten 20 % der Simulationen des Murgang „Arth“ 69
Abbildung 46: Abbildung der besten Modellierung des Murgangs „Goldau“ in RAMMS 75
Abbildung 47: Die Wertepaare der besten 10 % der Simulationen des Murgang „Goldau“ 76

Abbildung 48: Querprofile der Simulationen mit unterschiedlichem „Wald-μ“ des Murgangs "Arth" 84
Abbildung 49: Vergleich zwischen der Länge der Ablagerungsgebiete, gemessen von der Bahnunterführung bis zur Spitze des Murgangkopfes 85
Abbildung 50: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen „Wald-μ“ Szenarien.. 86
Abbildung 51: Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die trockene Reibung μ im Waldperimeter des Murgangs „Arth“ 87
Abbildung 52: Abbildungen der (maximalen) Abflusshöhen >0.5 m der Murgang „Arth“-Modellierung. 88
Abbildung 53: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen Fliessdruck λ-Szenarien.. 90
Abbildung 54: Gemessene Werte bei den Messstationen für die Simulationen des Murgangs „Arth“ mit unterschiedlichem aktiv-passiven Fliessdruck λ. 91
Abbildung 55: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen Erosionsmaterialdichte-Szenarien. 92
Abbildung 56: Gemessene Werte bei den Messstationen für die Simulationen des Murgangs „Arth“ mit unterschiedlicher Dichte des erodierbaren Materials 93
Abbildung 57: Konturen der Fliesswege und Ablagerungsflächen der verschiedenen „Wald-μ“-Varianten beim Murgang „Goldau“ 97
Abbildung 58: Vergleich zwischen der Länge der Ablagerungsflächen im Gebiet „Grosswiyer“, gemessen vom Austritt aus dem Wald bis zur Spitze des Murgangkopfes 98
Abbildung 59: Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die trockene Reibung μ im Waldperimeter des Murgangs „Goldau“ 99
Abbildung 60: Diagramme der Aufnahmeflächen 1 – 5, Anzahl Stämme pro Brusthöhendurchmesserklasse der einzelnen Baumarten. 102
Abbildung 61: Aufnahme von der Luv-Seite gegen einen Felsblock des 1806er Bergsturzes hin 103
Abbildung 62: Topographische Karte der Anriss- und Transitzone des Murgangs Goldau104
Abbildung 63: Diagramme der Aufnahmeflächen 1 – 5, Teilfläche „Innen“ und „Aussen“. 107
Abbildung 64: Fotos des Murgangs „Goldau“, aufgenommen kurz nach dem Ereignis..... 108
Abbildung 65: Schematische Darstellung der Wurzelsysteme 109
Abbildung 66: Skizzen der Wurzelsysteme aller untersuchten Baumarten 112
Abbildung 67: Bandbreiten der modellierten Resultate von den Murgängen „Arth“ und „Goldau“ 116

Abkürzungen und Bezeichnungen

BHD	[m]	Brusthöhendurchmesser, Baumdurchmesser auf 1.3 m Höhe
BK		Bestandeskarte
BSF		Wald mit besonderer Schutzfunktion
BUWAL		Bundesamt für Wald und Landschaft
DEM/DHM		Digitales Höhenmodel
DG	[%]	Deckungsgrad
DTM-AV		Spezifisches Höhenmodel
EK		Ertragsklasse
ETH		Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Arc-GIS		GIS-Softwareprodukt
GIS		Geographisches Informationssystem
GPS		Global Positioning System
h/d	[-]	Verhältnis Höhe/Durchmesser eines Baumes
h_{dom}	[m]	Oberhöhe
LFI		Landesforstinventar
LFI3-SW		Schutzwald im 3. Landesforstinventar
LK25		Landeskarte 1:25`000
m.ü.M.		Meter über Meereshöhe
NaiS		Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald
OMM		Obere Meeresmolasse
RAMMS		Rapid Mass MovementS, Softwareprodukt
shp		Shapefile
SLF		Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung, Davos
SZ		Kanton Schwyz
Sz	[N/ha]	Stammzahl (meistens pro Hektare)
UMM		Untere Meeresmolasse
USM		Untere Süsswassermolasse
VS-Modell		Voellmy-Salm Modell
WaG		Waldgesetz

WaV		Waldverordnung
WG		Waldgesellschaft
WSL		Eidgenössische Versuchsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf
λ	[-]	Koeffizient für den aktiv-passiven Fliessdruck
μ	[-]	Coulomb-Reibungskoeffizient für die trockene Reibung
ξ	[m/s^2]	Koeffizient für die turbulente Reibung

Pflanzennamen

Deutsch	Latein
Bergahorn	Acer pseudoplatanus
Bingelkraut	Mercurialis perennis
Brombeere	Rubus fruticosus
Buche, Rotbuche	Fagus sylvatica
Esche	Fraxinus excelsior
Feldahorn	Acer campestre
Fichte, Rottanne	Picea abies (früher picea excelsa)
Grünerle	Alnus viridis
Hagebuche, Hainbuche	Carpinus betulus
Himbeere	Rubus idaeus
Lärche	Larix decidua
Liguster	Ligustrum vulgare
Quirlblättrige Zahnwurz	Cardamine enneaphyllos
Stechpalme	Ilex aquifolium
Tanne, Weisstanne, Edeltanne	Abies alba
Waldföhre, Kiefer	Pinus sylvestris
Wildkirsche (Vogelkirsche)	Prunus avium

1 Einleitung

Murgänge treten häufig in Gebirgsregionen auf und stellen in den Alpen ein bedeutendes Gefahrenpotential dar. Nebst den Schneelawinen geht von Murgangprozessen die grösste (gravitative) Naturgefahr für Mensch und Infrastruktur aus. Jedes Jahr können Schadensummen von mehreren Millionen Franken in der Schweiz entstehen, manchmal fordert ein Murgang sogar Menschenleben (Gamma 1999). Eine ausreichende Menge Niederschlag, potentiell mobilisierbares Geschiebematerial und ein Gelände mit einem günstigen Gefälle (25-30%) reichen im Prinzip aus, um ein Murgangereignis auslösen zu können (Rickenmann 1995). Geeignete Schutz- und Überwachungsmassnahmen stellen daher einen wichtigen Eckpfeiler im Risikomanagement mit Murgängen dar.

Die vorliegende Studie befasst sich mit einem rechnergestützten Simulationsprogramm, welches Murgangprozesse zu modellieren versucht. Durch Weiterentwicklung sollten präzise und zutreffende Vorhersagen gemacht werden können. Dies kann zu einem besseren Schutz gegenüber den Naturgefahren verhelfen. Zu einer verbesserten Schutzwirkung gehört auch die Optimierung eines Schutzwaldes. Um diesem Ziel etwas näher zu kommen, wird in dieser Arbeit die Interaktion zwischen Murgang und Wald untersucht

1.1 Ausgangslage

Im Jahre 1806 erfuhr die Region westlich des Rossbergs durch einen gewaltigen Bergsturz grosses Unheil. 457 Menschen fanden bei dieser Naturkatastrophe den Tod, die Dörfer Goldau, Röthen und Buosigen wurden zerstört (Thuro, Berner et al. 2006). Ausgelöst wurde das Ereignis damals durch ergiebige Niederschläge.

Ebenfalls grosse Regenmengen brachten den Rossberg im August 2005 wieder in Bewegung. Zwei sehr grosse Murgänge lieferten den Beweis, dass das Gebiet oberhalb von Arth-Goldau noch lange nicht zur Ruhe gekommen ist. Während den Jahrhundertunwettern von Ende August 2005 flossen am Westende des Rossberges zwei Murgänge mit unterschiedlichen Kubaturen, einer transportierte rund 80`000 $m^3$ talwärts, der andere ungefähr 200`000 m^3, Richtung Arth, beziehungsweise Goldau. Glücklicherweise forderten die Ereignisse keine Todesopfer, es entstand allerdings Sachschaden in Millionenhöhe (mündliche Mitteilung von Josef Gabriel, Kreisforstingenieur des Kantons Schwyz, im April 2010). Die Murgänge wurden durch mehrere Ingenieurbüros eingehend untersucht und ausgewertet. Dabei kam zu Tage, dass die Fliessstrecke der beiden Murgänge praktisch ausnahmslos nicht in einem Gerinne und durch bewaldetes Gebiet floss, was für Murgänge sonst eher atypisch ist. In der Regel ereignen sich Murgänge in Wildbächen oder in Runsen. In solchen ist eine Pflanzenvegetation recht spärlich ausgebildet oder fehlt gänzlich, insbesondere für Bäume und Sträucher ist ein Wachstum in Runsen erschwert. Aus diesem Grund ist eine Abschätzung der Wirkung einer Waldstruktur bei einem Murgangereignis schwer zu machen, es fehlen Datensätze dazu (quantitativ und qualitativ).

1.2 Kontext und Motivation

Die Hauptmotivation für diese Arbeit war die oben beschriebene Eigenschaft der Murgänge, ungerichtet durch bewaldetes Gebiet geflossen zu sein. Dies ergab eine grosse Chance, die Interaktion zwischen Murgängen und Wald zu untersuchen. Die Aussicht, mit dieser Studie an der Weiterentwicklung des von der WSL und des SLF geleiteten Projekts RAMMS sich beteiligen zu können, war persönliche Motivation genug. Die technische Motivation bezüglich Weiterentwicklung des RAMMS bestand darin, ein Tool für den Endbenutzer zu entwickeln, mit welchem der User in seinen Simulationen eingeben kann, ob die Modellierung mit oder ohne Waldeinfluss berechnet werden soll. Falls dies der Fall sein würde, sollte sich der modellierte Murgang dementsprechend differenziert Verhalten. Momentan wird der Einfluss des Waldes in RAMMS so nachgebildet, indem die Reibungsparameterwerte für das μ und ξ vom Modul der Fliessschneelawinen übernommen werden ($\mu = +\Delta 0.02$ [-], $\xi = 400$ m/s^2). Dies ist unbefriedigend, da Fliessschneelawinen- und Murgangprozesse nur partiell Ähnlichkeiten miteinander haben. Mit Hilfe dieser Arbeit sollte diesem Manko Abhilfe geschaffen werden.

1.3 Zielsetzung

Diese Arbeit ist grob in zwei Teile unterteilt: Eine Untersuchung mit RAMMS und eine qualitative Untersuchung der Interaktion Murgang – Wald. Hauptziel in der Arbeit mit RAMMS besteht darin, mögliche Parameterwerte für den trockenen, resp. turbulenten Reibungskoeffizienten μ, bzw. ξ zu finden, welche ein Murgangereignis, dass durch einen Waldperimeter verläuft, korrekt abbildet. Des Weiteren sollen noch zwei weitere Inputparameter (der aktiv-passive Fliessdruck λ und die spezifische Dichte des Erosionsmaterials) einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. Damit soll zur Weiterentwicklung des RAMMS-Moduls Murgang beigetragen werden.

Der Fokus im Abschnitt ohne RAMMS, besteht in einer Untersuchung des Einflusses von Wald bei einem Murgangereignis. Durch Analysen soll abgeklärt werden, ob einzelne Eigenschaften des Waldes einen Einfluss auf einen Murgangprozess haben können. Untersucht wurden die Faktoren Baumart und Durchmesser auf eine mögliche Widerstandskraft gegenüber Murgängen. Ein Fernziel, zu welchem diese Arbeit beitragen soll, ist die abgeschlossene Suche eines *möglichst günstigen Schutzwaldes* hinsichtlich der Naturgefahr „Murgang“.

1.4 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. In *Kapitel 1* wurden bereits die Ausgangslage, die Zielsetzung, sowie der Kontext und die Motivation erörtert. *Kapitel 2* liefert für die Arbeit wichtige Definitionen. In *Kapitel 3* wird das Untersuchungsgebiet, sowie die zwei untersuchten Murgänge beschrieben. Die Grundlagen bezüglich Murgängen und dem Programm RAMMS werden in *Kapitel 4* erklärt. Das *Kapitel 5* dient zur Erläuterung der Methodik und Vorgehensweise. Die einzelnen Schritte werden beschrieben und allenfalls mit Diagrammen und Abbildungen dargestellt. Die Resultate der Untersuchungen werden in *Kapitel 6* aufgezeigt und anschliessend in *Kapitel 7* diskutiert. *Kapitel 8* beinhaltet die Schlussfolgerungen, sowie einen Ausblick und terminiert die Studie. Alle verwendete und zitierte Literatur ist nachfolgend in einem Literaturverzeichnis aufgeführt.

Im Anhang sind Tabellen und andere aufbereitete Daten wiedergegeben, welche zu den Resultaten geführt haben.

2 Definitionen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe definiert, welche im Verlaufe dieser Arbeit als Basis dienen. Definitionen sind ein wichtiger Bestandteil von Grundlagenkenntnissen, damit keine Missverständnisse entstehen.

2.1 Baum

Ein Baum im heutigen Kontext ist eine hölzerne Pflanze mit einem dominanten, aufrechten Stamm, welcher eine Höhe von mindestens 3 m erreichen kann (Körner 1998). Die Reproduktivität spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle.

2.2 Wald

Der Bund definiert laut Art. 2 des Waldgesetzes WaG "Wald" folgendermassen: "*Jede Fläche, die mit Waldbäumen oder Waldsträuchern bestockt ist und Waldfunktionen erfüllen kann".* Etwas konkreter steht in der Waldverordnung WaV , Art. 1:

1. Die Kantone bestimmen die Werte, ab welchen eine bestockte Fläche als Wald gilt, innerhalb der folgenden Bereiche:

a. Fläche mit Einschluss eines zweckmässigen Waldsaumes: 200 – 800 m^2;

b. Breite mit Einschluss eines zweckmässigen Waldsaumes: 10 – 12 m;

c. Alter der Bestockung auf Einwuchsflächen: 10 – 20 Jahre.

2. Erfüllt die Bestockung in besonderem Masse Wohlfahrts- oder Schutzfunktionen, so gilt sie unabhängig von ihrer Fläche, ihrer Breite oder ihrem Alter als Wald. Dies bedeutet, dass die Kantone einen gewissen Spielraum haben, was die Ausscheidung von Wald betrifft. Um Unklarheiten aus dem Weg zu räumen, wurden in dieser Arbeit die Bestimmungen des Landesforstinventars (LFI) verwendet. Diese stützen sich auf die Kriterien Waldbreite, Deckungsgrad (DG) und Oberhöhe (h_{dom}) (Mahrer 1976). Damit eine bestockte Fläche per Definition als Wald gilt, muss die Fläche eine Breite von mindestens 50 m aufweisen und einen DG von mindestens 20 % aufweisen. Falls eine Fläche schmaler als die minimal erforderten 50 m beträgt, muss der DG mehr als 20 % sein, damit sie trotzdem als Wald bezeichnet werden kann. Die h_{dom} dieser bestockten Fläche muss mindestens 3 m betragen, Aufforstungen, Schlag-, Brand- und Sturmflächen, Legföhren- oder Alpenerlen-beständen ausgenommen (Brändli 2010).

2.3 Schutzwald

Es gibt zwei Arten von Gefahren, vor denen ein Wald schützen kann (Duc, Brändli et al. 2004):

- Naturgefahren: Lawine, Steinschlag, Rutschprozess, Bodenerosion
- Zivilisationsgefahren: Lärm, Luftverschmutzung, etc.

Für die Schweiz und generell die meisten alpinen Länder hat die erstgenannte Funktion die weitaus grössere Priorität. Schutzwald an sich wird als Wald mit objektbezogener Schutzwirkung aufgefasst (Teich und Bebi 2009). Der Schutzbereich bezieht sich auf Menschen und Einrichtungen wie Gebäude und Infrastruktur.

Schutzwald mit Funktion Murgangschutzwald

Um als Murgangschutzwald seine Funktion ausüben zu können, muss der Wald per se in einem potentiellen Murgang- und Hangrutschungsgebiet liegen. Eigentliche Gefährdungsgebiete für Murgang gibt es nicht, meist sind sie mit anderen Rutschprozessen und Oberflächenerosion zusammengefasst. Um eine Grunddisposition zu erfüllen, sind folgende Faktoren Voraussetzung (Frehner, Wasser et al. 2005):

- Hangneigung ≥25°
- Art des Lockermaterials günstig
- Lückengrössen im Wald ausreichend gross
- Deckungsgrad ungenügend

2.4 Waldmurgang

In der Regel fliessen Murgänge in Bachbetten oder Runsen talwärts (Benda 1990; Coussot und Meunier 1996). Dies ist per Definition ein Merkmal eines Murgangs. Im Unterschied dazu können Erdrutsche nicht in einem Bachbett, sondern überall an steilen Hanglagen auftreten (Coussot und Meunier 1996). Es kann allerdings vorkommen, dass ein Murgang während des Transitprozesses das Bachbett oder die Runse, durch Blockierung oder Verklausung des Bachbetts verlässt. Das Bachbett wird hinterfüllt und neu ankommendes Material kann seitlich über die Begrenzung der Runse austreten. Ein Waldmurgang wird als solcher bezeichnet, wenn mindestens ein Teil seines Transitweges durch Wald im oben beschriebenen Sinne führt (mündl. Mitteilung C. Graf, 04. November 2010).

2.5 Der Wald als Murgangschutzwald

Die Wirkung des Murgangschutzwaldes teilt sich räumlich in das Entstehungs-, Transit- und Ablagerungsgebiet auf. Im Entstehungs- und Transitgebiet besteht die Wirkung des Waldes auf der Verminderung von akkumulierbarem Material, welches durch Rutschungs- und Erosionsprozesse bereitgestellt werden könnte. Im Ablagerungsgebiet kann allenfalls durch Stossprozesse an Bäumen Energie des Murgangs entzogen werden, was zu einer Reduktion der Geschwindigkeit führen kann (Frehner, Wasser et al. 2005).

3 Untersuchungsgebiet und Ereignisbeschreibung

In diesem Kapitel wird das Untersuchungsgebiet, inkl. der klimatischen und geologischen Verhältnisse erörtert. In diesen Abschnitt gehört auch die Beschreibung des Waldes des Untersuchungsgebietes. Anschliessend erfolgt eine Schilderung der zwei sich ereigneten Murgänge.

3.1 Untersuchungsgebiet

3.1.1 Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Zentralschweiz im Kanton Schwyz und befindet sich am nördlichen Rand der Alpenkette (Abbildung 1). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von den schweizer Vor- oder Randalpen (Marazzi 2005).



Abbildung 1: Karte der Schweiz mit dem Untersuchungsgebiet als roten Punkt markiert (Kartengrundlage: LK300 © swisstopo, 5704 000 000).

Wie der Abbildung 2 entnommen werden kann, ereigneten sich beide Murgänge auf der Westseite des Rossbergs. Dieser erstreckt sich im Osten vom südlichen Ende des Ägerisees bis nach Arth am Zugersee im Osten.

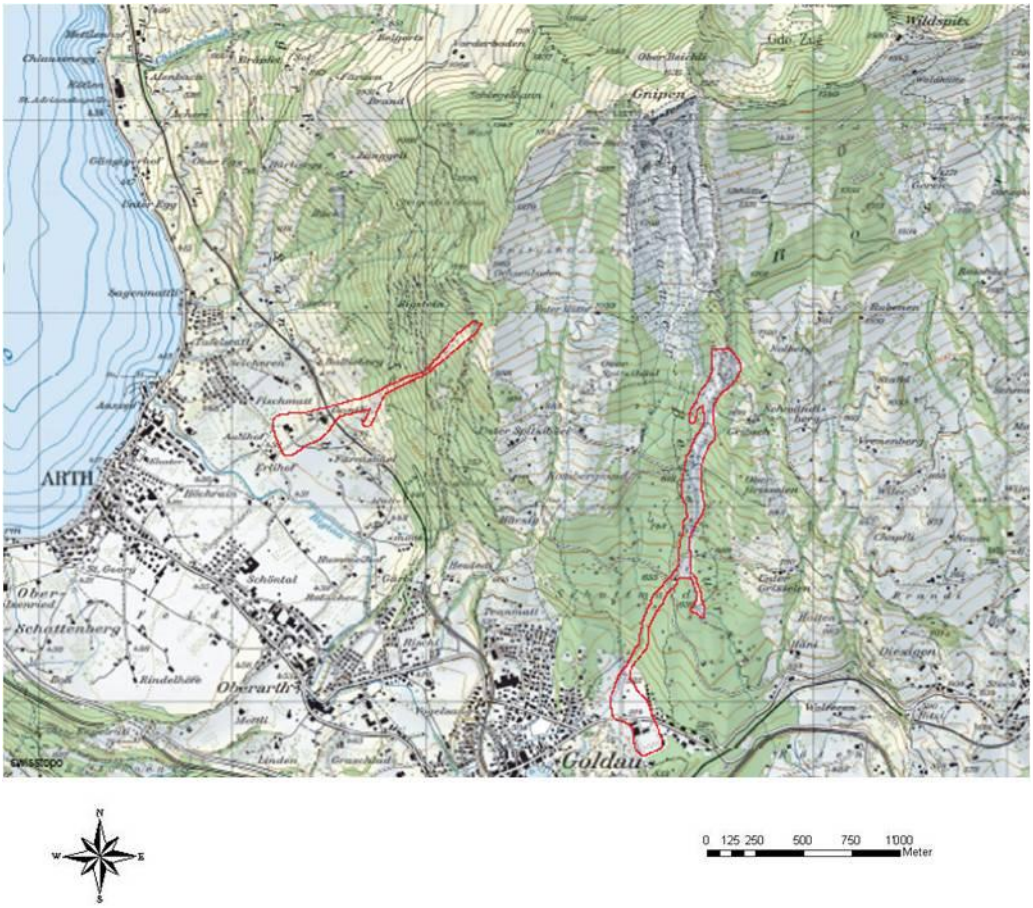


Abbildung 2: Karte des Gebietes rund um Arth-Goldau. Der Grat Rossbergs verläuft vom Punkt „Gnipen“ im Westen, über „Wildspitz“ und weiter nach Osten (nicht mehr in der Abbildung). Rot eingezeichnet sind die Prozessräume der beiden untersuchten Murgänge, links der Murgang "Arth", rechts der Murgang "Goldau" (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Der höchste Punkt, "Wildspitz", befindet sich bei den Koordinaten 686/500//215/450 auf 1580 m.ü.M. Auf der Krete befindet sich die Grenze der Kantone Zug (im Norden) und Schwyz (im Süden). Die Untersuchungsgebiete beider hier relevanten Murgangereignisse liegen auf dem Gebiet des Kantons Schwyz, beide im Gemeindeperimeter von Arth. Die Gemeinde Arth, bestehend aus den Dörfern Arth, Oberarth und Goldau, liegt am Westfuss des Rossbergs auf 422 m.ü.M. (Arth), 450 m.ü.M. (Oberarth), resp. 513 m.ü.M. (Goldau) (www.arth.ch, besucht am 19. Januar 2011). Der gebräuchliche Name Arth-Goldau existiert so als Gemeindename nicht. Er wird aber wahrscheinlich deswegen viel benutzt, da der gemeinsame Bahnhof der Dörfer Arth, Oberarth und Goldau "Arth-Goldau" heisst. Der Bahnhof ist im schweizerischen Bahnnetz ein wichtiger Knotenpunkt, und deshalb vielen Leuten bekannt. Diese verbinden wahrscheinlich den Namen des Bahnhofs mit der dazugehörenden Gemeinde. Auf einem Orthophoto, erstellt nach den Unwetterereignissen 2005, sind die Fliessstrecken der Murgänge gut zu erkennen (Abbildung 3).



Abbildung 3: Karte und Orthophoto des Untersuchungsgebietes im Verhältnis 50:50 übereinander projeziert, links der Murgnang „Arth“, rechts der Murgang „Goldau“ (Kartengrundlage: swissimage © swisstopo, 5704 000 000).

3.1.2 Klima

Das Untersuchungsgebiet befindet sich, wie bereits vorhergehend beschrieben in den Voralpen. Durch das vom Westwind geprägte Wetter in der Schweiz wird viel Feuchtigkeit vom Atlantik Richtung Alpenkamm transportiert. Dort kommt es durch eine orographische Hebung der Luftmassen zu vergleichsweise viel Niederschlag. In Abbildung 4 rechts ist dies am unteren Bildrand durch die dunklere Färbung, was einer höheren Niederschlagsmenge pro Jahr entspricht, sichtbar. In solchen Gebieten spricht man von ozeanischem Klima.

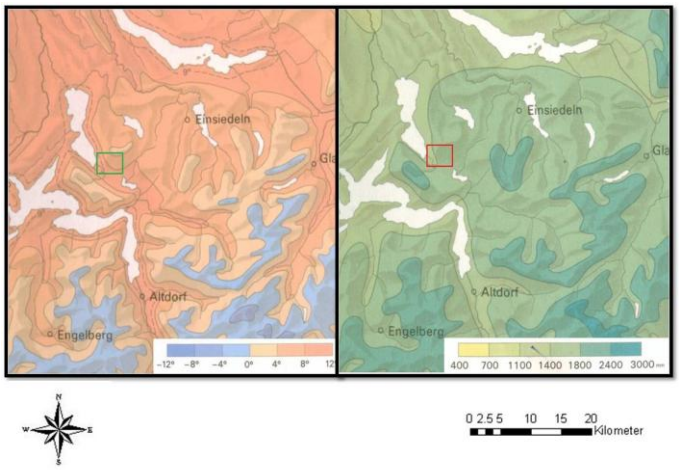


Abbildung 4: Thematische Karte der Innerschweiz mit der mittleren jährlichen Temperatur (links), sowie der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge (rechts). Das Untersuchungsgebiet ist durch das grüne (links), resp. rote (rechts) Rechteck lokalisiert (aus Kirchhofer (2000), erweitert).

Ozeanisches Klima zeichnet sich durch vergleichsweise hohe jährliche Niederschlagsmenge und relativ kleinen Temperaturunterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr aus. Die Übergangsperioden (Frühling und Herbst) fallen lang und ausgeprägt aus. Weiter ist charakteristisch, dass die Hauptmenge des jährlichen Niederschlags im Frühling und Sommer, insbesondere während den Monaten Juni, Juli und August fällt. Auf den Klimadiagrammen in Abbildung 5 sind diese Eigenschaften gut zu erkennen.

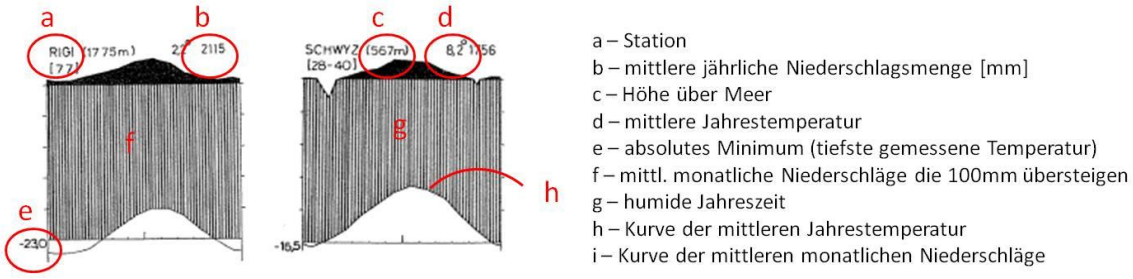


Abbildung 5: Klimadiagramme der Messstationen Rigi-Kulm und Schwyz, inkl. Legende. (Aus Walter und Lieth (1967), erweitert).

Im Untersuchungsgebiet sind keine Messstationen der MeteoSchweiz zu finden. Die Stationen Schwyz und Rigi-Kulm sind von der Distanz am nächsten dem Rossberg gelegen und zeichnen sich durch ähnliche orographische Gegebenheiten wie am Gipfel des Rossbergs (Rigi-Kulm), resp. Arth (Schwyz) aus (Abbildung 6).

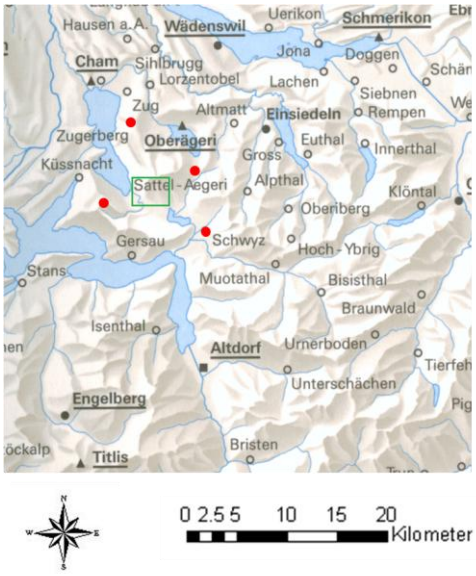


Abbildung 6: Thematische Karte mit allen Wettermessstationen der Innerschweiz. Die Stationen Rigi-Kulm, Schwyz, Zugerberg und Sattel-Aegeri sind rot markiert, das Untersuchungsgebiet grün (Aus Kirchhofer (2000), leicht verändert).

Abbildung 4 zeigt, dass das Gebiet am Hangfuss des Rossbergs bei Arth-Goldau mit demjenigen von Schwyz vergleichbar ist, was das Temperatur- und Niederschlagsregime betrifft. Die Messwerte aufgenommen auf der Rigi-Kulm, sind bedingt auf den östlich davon gelegenen Rossberg applizierbar. Durch die vorherrschende Westwindströmung im Untersuchungsperimeter (und in Mitteleuropa allgemein), wird an der Rigi mehr orographische Hebung stattfinden und dadurch fällt tendenziell mehr Niederschlag als auf der gleichen Höhe über Meer am Rossberg. Allerdings sind die Unterschiede vermutlich

klein genug, um trotzdem die Werte verwenden, resp. auf das Untersuchungsgebiet extrapolieren zu können.

Des Weiteren wurden für Untersuchungen bezüglich des Unwetterereignisses vom August 2005 Messdaten der Stationen Sattel-Aegeri und Zugerberg verwendet (Abbildung 6). Die Klimadiagramme der Stationen Rigi-Kulm und Schwyz sind bereits älteren Datums, aber trotzdem noch aussagekräftig. Die jährlich anfallende Niederschlagsmenge, die Verteilung des Niederschlags über die Monate hinweg und die jährliche mittlere Temperatur haben sich nur geringfügig verändert (geht aus einem Vergleich der Daten des Klimadiagramms von 1967 mit den Klimanormwerten von 1961-1990 hervor (MeteoSchweiz 2010)). Die Veränderung des mittleren jährlichen Niederschlags der beiden Messreihen dürfte aufgrund des sich veränderten Messstandorts zustande gekommen sein.

Niederschlag während den Ereignissen

Für die Beurteilung der Niederschlagssituation am Rossberg während der Periode der Unwetter wurden die Messdaten der umliegenden Stationen Rigi-Kulm, Schwyz, Zugerberg und Sattel-Aegeri herbeigezogen (Abbildung 6). Hunziker (2006) hat zusätzlich aus den Radardaten (Auflösung: pro 5 Minuten ein Radarbild) eine Auswertung vorgenommen. Diese ist primär von qualitativer Natur. Aus den Daten der Messstationen und Radarbilder hat MeteoSchweiz eine Gitterinterpolation für die Gebietsniederschläge bei Arth-Goldau und Umgebung durchgeführt (Abbildung 7). Ebenfalls verwendet wurden die Daten der gemessenen Tagesniederschläge einer privaten Messstation, welche sich bei der zum Gantlihof gehörenden Obstbaumanlage befindet.

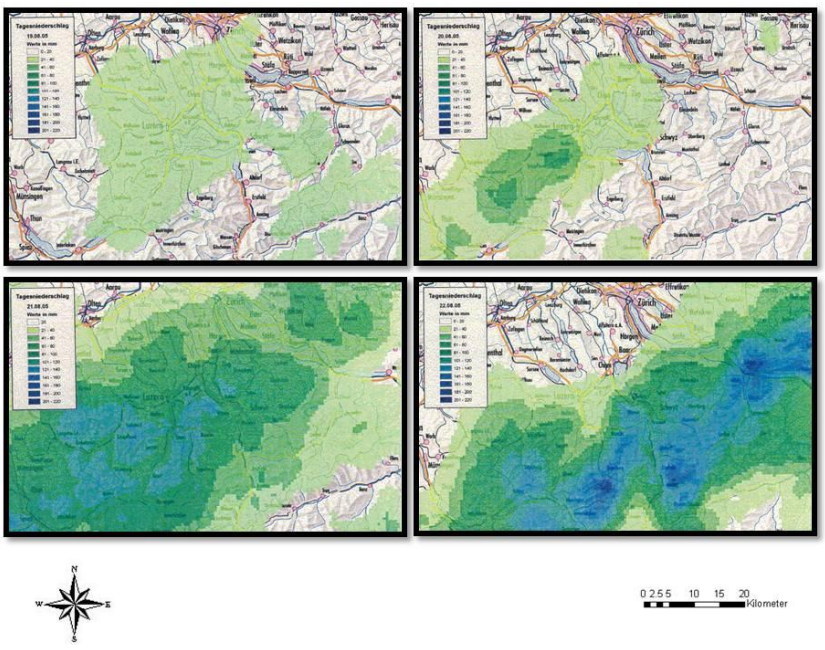


Abbildung 7: Interpolierte Tagesniederschläge über der Innerschweiz, basierend auf den Daten der Messstationen von MeteoSchweiz und unter Einbezug der Radardaten (l.o. 19.08.2005, r.o. 20.08.2005, l.u. 21.08.2005, l.u. 22.08.2005) (Hunziker 2006).

Ein Vergleich zwischen den aufsummierten Niederschlagsinterpolationen der MeteoSchweiz und den Radardaten zeigt, dass eine Unterschätzung bei den Radardaten stattfindet. Möglicherweise hat der Radarstrahl unter oder über der niederschlagswirksamen Wolkenschicht gemessen (Hunziker 2006).

In der Abbildung 7 wird ersichtlich, wie das Unwetter während der Periode vom 20. - 22. August 2005 von Westen nach Osten über die Schweizer Voralpen und Alpen hinweg gezogen ist, mit einem Peak des maximalen Tagesniederschlags am 22. August 2005. Auf den interpolierten Bildern wird allerdings ersichtlich, dass die grössten Niederschlagsmengen nicht über dem Gebiet des Rossbergs fielen, sondern weiter südlich davon (blaue und dunkelblaue Zonen). Die Abbildung 8 illustriert gut die kleinräumige Variabilität in den Niederschlagssummen. Diese kann für kleine Distanzen grosse unterschiedliche Messwerte hervorbringen. Beispiele hierfür sind die Stationspaare Weesen (271 mm[1]) und Obstalden (120 mm), sowie Hondrich (211 mm) und Wimmis (174 mm), gemessen ebenfalls während den Unwettern im August 2005.

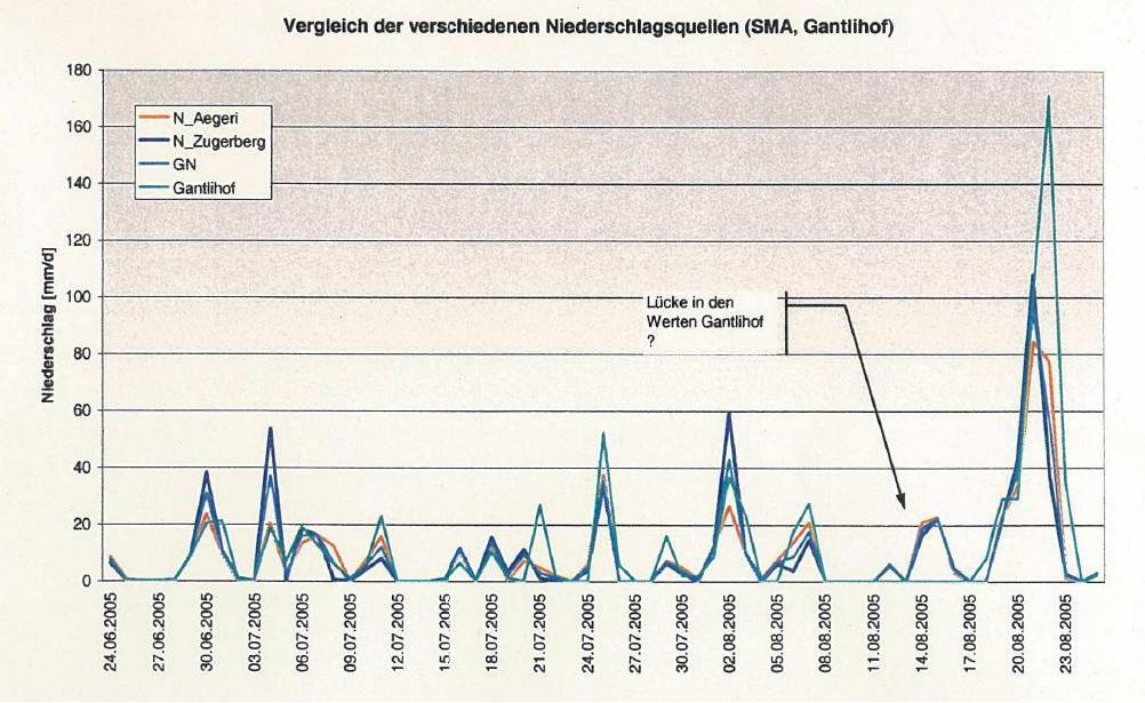


Abbildung 8: Vergleich der Niederschlagsmessungen der Messstationen Sattel-Aegeri, Zugerberg und der privaten Messsation Gantlihof (Hunziker 2006).

Solche grossen Unterschiede auf kleinsten örtlichen Distanzen sind auch bei den Messwerten der Messstationen Sattel-Aegeri, Zugerberg und der privaten Messstation Gantlihof zu verzeichnen, wie in Abbildung 8 in der Zeit zwischen dem 20. und dem 23. August 2005 gut zu erkennen ist. Einen Vergleich zwischen diesen Messstationen ziehen zu können ist schwierig, da die private Messstation beim Gantlihof nicht über eine längere Zeitreihe verfügt.

[1] Aufsummierte 3-Tagesniederschläge vom 20. – 22. August 2005 (MeteoSchweiz 2006).

In der Abbildung 8 sind die aufsummierten Tagesniederschläge der MeteoSchweiz-Messstationen Sattel-Aegeri (orange), Zugerberg (dunkelblau) und der privaten Messstation Gantlihof (grün) aufgetragen. Weiter wurde aus den Messwerten der Stationen Sattel-Aegeri und Zugerberg der Durchschnitt errechnet (hellblaue Kurve). Dies, um einen Mittelwert für das Untersuchungsgebiet am Rossberg zu erhalten, welches luftlinienmässig ungefähr in der Mitte der beiden Messstationen liegt (Abbildung 7). Werden die Daten der unterschiedlichen Messstationen miteinander verglichen, kann für die Periode vom 24. Juni bis 23. August 2005 eine gute Übereinstimmung festgestellt werden, mit Ausnahme des Abschnitts vom 11. - 23. August. Während dieser Periode weist die Messstation Gantlihof keine (11. – 17. August), oder sonst massiv höhere Niederschlagswerte auf. Wie oben beschrieben, könnte dies auf lokale Disparitäten oder möglicherweise auf einen Fehler in der Aufzeichnung der Messstelle Gantlihof zurückzuführen sein.

Unabhängig der Messstation zeigt die Abbildung 8 aber auf, dass während den Tagen des Unwetters hohe bis sehr hohe Niederschlagswerte verzeichnet wurden. In Sattel-Aegeri wurden zum Beispiel am 21. August 2005 84.3 mm und am 22. August 77.3 mm Niederschlag gemessen (Tabelle 1). Diese einzelnen Tageswerte sind noch nicht extrem hoch (der Tagesrekord für die Messstation Sattel-Aegeri beträgt 145 mm, gefallen am 09. September 1934 (MeteoSchweiz 2006)). Werden jedoch die Niederschlagssummen der beiden Tage mit den höchsten aufgezeichneten Niederschlagswerten (21. und 22. August) kumuliert, ergibt sich mit 161.6 mm den höchsten jemals gemessenen Wert dieser Station (vormals 145 mm, gefallen am 09. – 10. September 1934 (MeteoSchweiz 2006)). Mit 218.3 mm nehmen die summierten 5-Tagesniederschläge vom 18. – 22. August 2005 den zweiten Rang in der Rangliste der höchsten jemals gemessenen Niederschlagswerte der Station Sattel-Aegeri ein. Einzig während der Periode vom 22. – 26. Juli 1982 fiel mit 220.5 mm noch etwas mehr Regen (MeteoSchweiz 2006). Vergleichbare Umstände treffen auch auf die Messstation Schwyz zu.

Tabelle 1: Aufsummierte Tagesniederschläge der verschiedenen Messstationen während der Periode vom 15. bis 23. August 2005 (Hunziker (2006).

Datum	Station Sattel-Aegeri	Station Zugerberg	Station Gantlihof	Interpolation Rossberg
15.08.2005	22.6 mm	22.1 mm	0 mm	22.35 mm
16.08.2005	3.5 mm	4.6 mm	0 mm	4.05 mm
17.08.2005	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
18.08.2005	0.2 mm	0 mm	8 mm	0.1 mm
19.08.2005	22.8 mm	21.5 mm	29 mm	22.15 mm
20.08.2005	33.7 mm	42.8 mm	29 mm	38.25 mm
21.08.2005	84.3 mm	107.9 mm	101 mm	96.1 mm
22.08.2005	77.3 mm	36.7 mm	171 mm	57 mm
23.08.2005	1.2 mm	2.6 mm	0 mm	1.9 mm

Der Niederschlag spielt eine zentrale Rolle in der Auslösung von Murgängen. Wichtige Komponenten sind die Niederschlagssumme und die Niederschlagsintensität. Was der auslösende Faktor für die Murgangereignisse am Rossberg war, lässt sich nur schwer abschätzen. Zimmermann, Mani et al. (1997) haben eine Formel entwickelt, mit der sich anhand von Niederschlagsintensitäten und Niederschlagsdauer den Grenzwert eines Murgang auslösenden Ereignisses berechnet werden kann (Gleichung 1)

Der Grenzwert für randalpine Zonen folgt der Beziehung:

$$I = 32 \times D^{-0.70} \quad [1]$$

I bezeichnet die mittlere Niederschlagsintensität [mm/h] und D die Dauer des Niederschlags [h]. Demnach erfordert ein 24-stündiger Niederschlag eine mittlere Intensität von 3.5 mm/h, resp. eine Regensumme von 83 mm während dieser Zeit. Für 48-stündigen Niederschlag gelten dementsprechend die Werte 2.1 mm/h, resp. 102 mm (Zimmermann, Mani et al. 1997). Die Niederschlagssummen während den Unwetterereignissen im August 2005 bestätigen also diese Regel. Allerdings muss man vorsichtig sein mit dem Umgang mit diesen Grenzwerten, für jedes potentielle Murgangereignis, insbesondere der Topographie wegen, gelten zum Teil andere Werte (Badoux, Graf et al. 2009).

3.1.3 Geologie

Geologisch gesehen gehört das Gebiet um den Rossberg zum Mittelland. Das Gebiet des Mittellandes deckt sich mit demjenigen des Molassebeckens. Als Molasse werden die Ablagerungen im Vorland eines sich faltenden Gebirges genannt (Labhart 2009). Der Rossberg gehört zur subalpinen Molasse (Thuro, Rick et al. 2006). Die verschiedenen Molassearten (obere und untere Meeresmolassen, obere und untere Süsswassermolassen) wurden durch Vorschub der helvetischen Decken überfahren. Dies hat zur Folge, dass die Schichten verfaltet oder in einfallende Schuppen zerlegt wurden. Diese Zone, in welcher dieser Prozess stattgefunden hat, wird subalpine Molasse genannt. Typisch für solche subalpinen Molassen sind langgestreckte Höhenzüge, in welchen sich Mergellagen mit Nagelfluhbänken abwechseln.

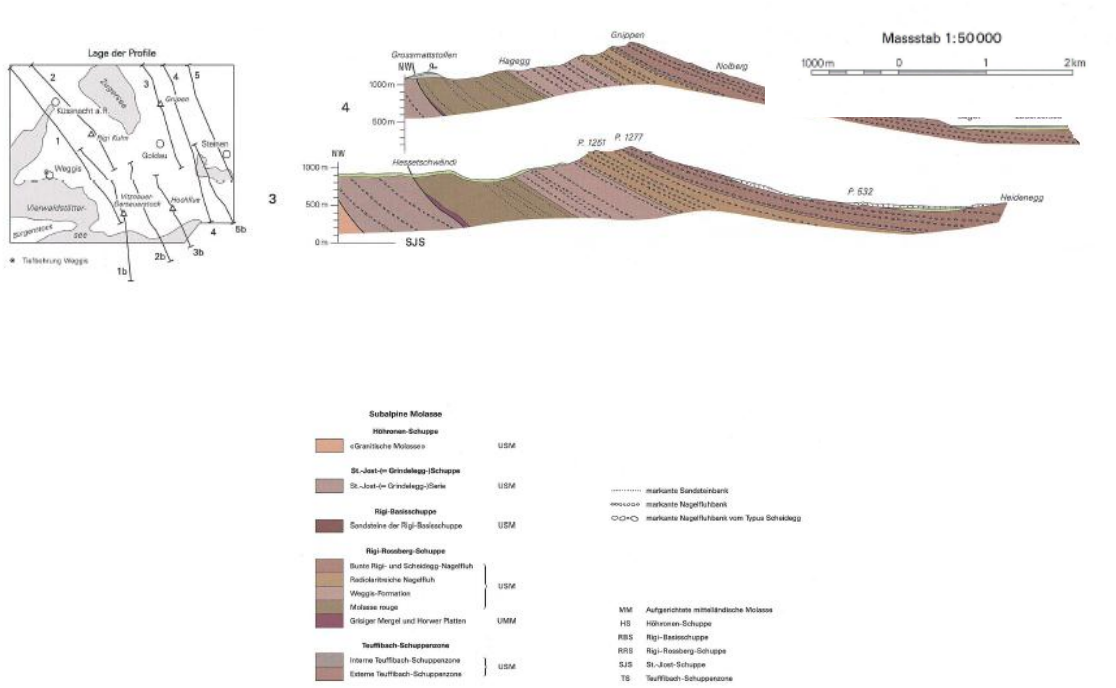


Abbildung 9: Geologische Profile durch das Gebiet der Rigi und Rossberg. Für das Verständnis der Geologie im Untersuchungsgebiet sind die Profile Nr. 3 und 4 von Interesse (aus Hantke , leicht verändert).

Eine solche Schuppe ist ausgeprägt an der Rigi und Rossberg erkennbar (Abbildung 9). Deshalb wird sie auch als Rigi-Rossberg-Schuppe bezeichnet. Sie ist aus verschiedenen übereinanderliegenden Nagelfluhschichten aufgebaut, wobei die bunte Rigi-Nagelfluh die mächtigste Schicht ist (Abbildung 10). Ebenfalls kommen die Scheidegg-Nagelfluh-Schicht, Radiolaritreiche Nagelfluh-Schicht und die Weggis-Formations-Schicht vor. Anhand der erkennbaren Strömungsrichtungen der einzelnen Schichten lassen sich die Schuttfächer des ursprünglichen Flusssystems herleiten (Abbildung 11).

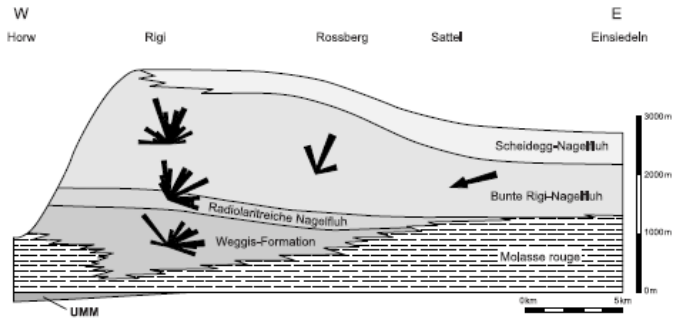


Abbildung 10: W - E Profil durch die Rigi-Rossberg-Schuppe mit Angabe der Strömungsrichtungen (Hantke 2006).

Die bunte Rigi-Nagelfluh besteht aus Kristallin führender Kalk-Dolomit-Nagelfluh mit Mergel- und Sandsteinzwischenschichten. Die Nagelfluhbänke sind am Rossberg zwischen 5 – 10 m Meter dick, die Mergel- und Sandsteinschichten 2 – 3 m (Grundmann 2006). Die Nagelfluhschichten sind hart und verwitterungsresistent. Vor Ort sind sie als steile Felswände erkennbar. Dies im Gegensatz zu den Mergel- und Sandsteinschichten, welche weicher und verwitterungsanfälliger und deshalb als flache Absätze wahrnehmbar sind. In Tabelle 2 ist eine Zusammensetzung der bunten Rigi-Nagelfluh mit den jeweiligen Materialanteilen aufgelistet.

Der grösste Anteil in der bunten Rigi-Nagelfluh macht dabei das Flysch aus. Flysch ist ein Sedimentgestein aus Breccien, Sandsteine und Tonschiefer und kann zum Teil auch Kleinfossilien enthalten (Labhart 2009). Am Rossberg wurden diesbezüglich Fossilien von verschiedenen Pflanzenresten, zum Teil ganze Baumstrünke, und Fährten von Vögeln, Rhinozeros, Tapir, Paarhufern und Schildkröten entdeckt (Thuro, Rick et al. 2006).

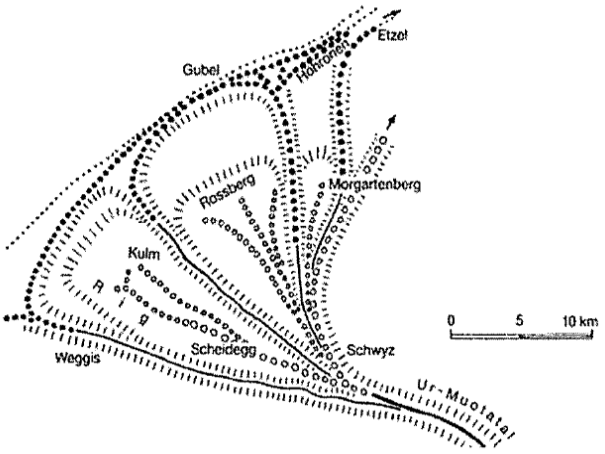


Abbildung 11: Schuttfächer der Rigi-Rossberg Schüttung (Vogel und Hantke 1988).

Die Nagelfluhbänke am Rossberg fallen in Richtung SSE ab (Grundmann 2006; Thuro, Rick et al. 2006). Zu den Neigungswinkeln der Schichten gibt es verschiedene Angaben. Hantke (2006) beziffert sie zwischen 11° - 13°, wobei sie am Gnipen bis 30° betragen können. Thuro, Rick et al. (2006) gibt den Winkel mit ungefähr 25° an, ebenfalls mit Unterschieden an Gipfel- und Hangfussbereich (ca. 30° resp. 15°) und in Thuro, Berner et al. (2006) wird von Winkeln von max. 27° (Grat zwischen Gnipen und Rossberg), 15° (Talbereich) und 20° (Durchschnitt) gesprochen.

Im Gipfelbereich und an den Abrisskanten der verschiedenen Bergstürze sind zum Teil markante Risse und Klüfte ersichtlich. Durch diejenigen sind die Abrissränder künftiger Fels- und allenfalls Bergstürze bereits vorgezeichnet. In die Klüfte sickert Wasser und verwittert das Gestein, sodass dieses brüchiger wird und somit auch anfälliger auf Abbrüche. Besonders labil und angreifbar auf solche Verwitterung sind die Mergel- und Sandsteinschichten. Bei Starkniederschlägen und grosser Nässe können darüber liegende Schichtpakete ins Gleiten geraten.

Tabelle 2: Zusammensetzung der bunten Rigi Nagelfluh, gemessen anhand von Bergsturzmaterial von 1806 in Goldau (Speck 1954).

Gestein	Anteil
Flysch	34%
Radiolarite	19%
Lias, Mergelfazies	13%
Trias Gesteine	10%
Kristallin	8%
Aptychenkalk	8%
Lias, Kalkfazies	4%
Mocausa-Konglomerate	4%

3.1.4 Wald

Anders als in der geologischen Einteilung ist der Rossberg forstwirtschaftlich nicht dem Mittelland, sondern den nördlichen Randalpen zuzuordnen (Ott, Frehner et al. 1997; Frehner, Wasser et al. 2005). Abbildung 12 zeigt die Einteilung nach Standortsregionen in der Schweiz.

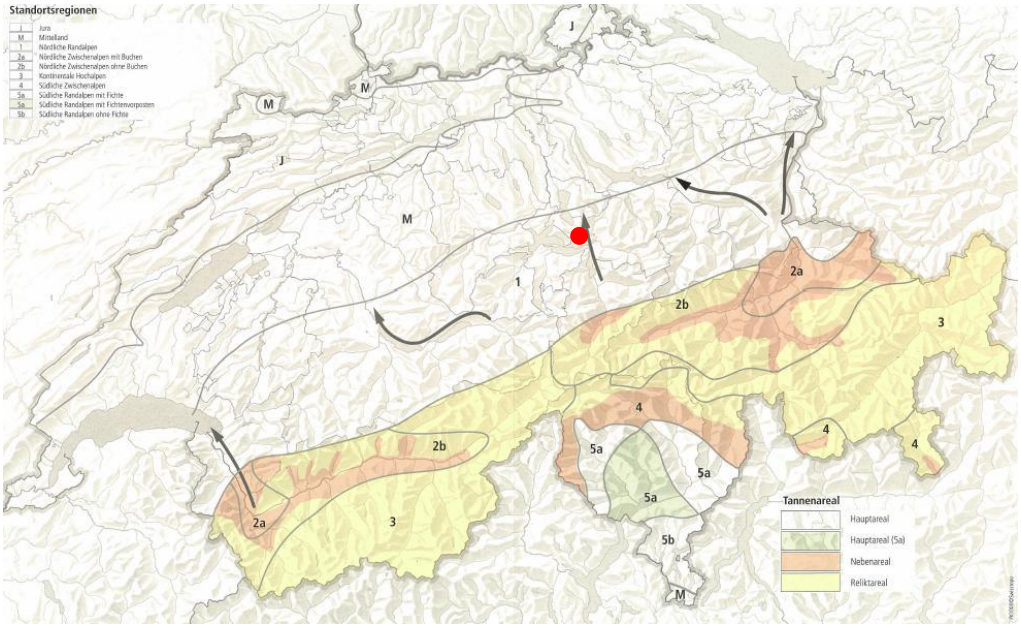


Abbildung 12: Die Standortsregionen der Schweiz aus forsttechnischer Sicht. Das Untersuchungsgebiet, rot markiert, liegt knapp innerhalb des Perimeters der nördlichen Randalpen (aus Frehner, Wasser et al. 2005).

Aus den Standortsregionen kann mit Hilfe der Darstellung aus dem Leitfaden für eine standortsgerechte Waldbehandlung oder dem NaiS-Ordner die Höhenstufe abgeleitet werden. Für die Wälder im Untersuchungsgebiet ergibt sich durch deren Höhenlagen die Höhenstufe Obermontan/Untermontan (höhere Lagen), bzw. Untermontan/Submontan (tiefere Lagen) (Abbildung 13). Da das bewaldete Gebiet rund um den Murgang „Goldau“ auf einer nadelholzfördernden Unterlage ist (siehe unten), dürfte sich das Anrissgebiet an der Grenze zur obermontanen Stufe befinden. Dies ist beim Anrissgebiet des Murgangs „Arth“ nicht der Fall, da es einerseits tiefer liegt (950 m.ü.M. im Gegensatz zu 1050 m.ü.M.) und andererseits auf eher laubholzfördernder Unterlage befindet. Die Exposition ist West-Süd-West.

Die Wälder rund um den Murgang „Goldau“ entsprechen eher einem Sonderwaldstandort denn einem „normalen“ Waldstandort der nördlichen Randalpen, weil sie sich auf den Ablagerungsgeschiebemassen des Bergsturzes von 1806 befinden. Der Boden ist sehr skelettreich, verdichtet und möglicherweise schlecht durchlüftet. Dies hat einen Einfluss auf die Stabilität, Wüchsigkeit und Baumartenzusammensetzung. Zudem liegen viele grosse Blöcke auf dem Gebiet herum, was das Mikroklima beeinflusst (Ott, Frehner et al. 1997). Die Wälder lassen sich in einer klassischen Form nach Ellenberg und Klötzli (1972) nicht in eine Waldgesellschaft zusammenfassen, zu divers sind einzelne Abschnitte. Frey (2005)

führte eine Kartierung des gesamten Bergsturzgebietes durch (Abbildung 15). Auf diesen Böden wachsen vor allem Fichten und Föhren, allerdings ist die Wüchsigkeit eher mässig bis schlecht. Die Waldstrukturen und die Fauna sind auf diesem Gebiet ausgesprochen divers, wie die Abbildung 15 gut erkenntlich aufzeigt. Die Wälder beim Murgang „Arth“ dagegen sind homogener, wüchsiger und stabiler. Im Ökogramm nach Frehner, Wasser et al. (2005) befinden sich die Wälder im leicht basischen Bereich und weder zu trocken, noch zu nass. Zudem sind die Böden mehrheitlich aktiv, was eine gute Durchlüftung garantiert. Zusammen mit der Exposition verspricht diese Kombination normalerweise eine gute Wuchskraft und eine hohe Stabilität.

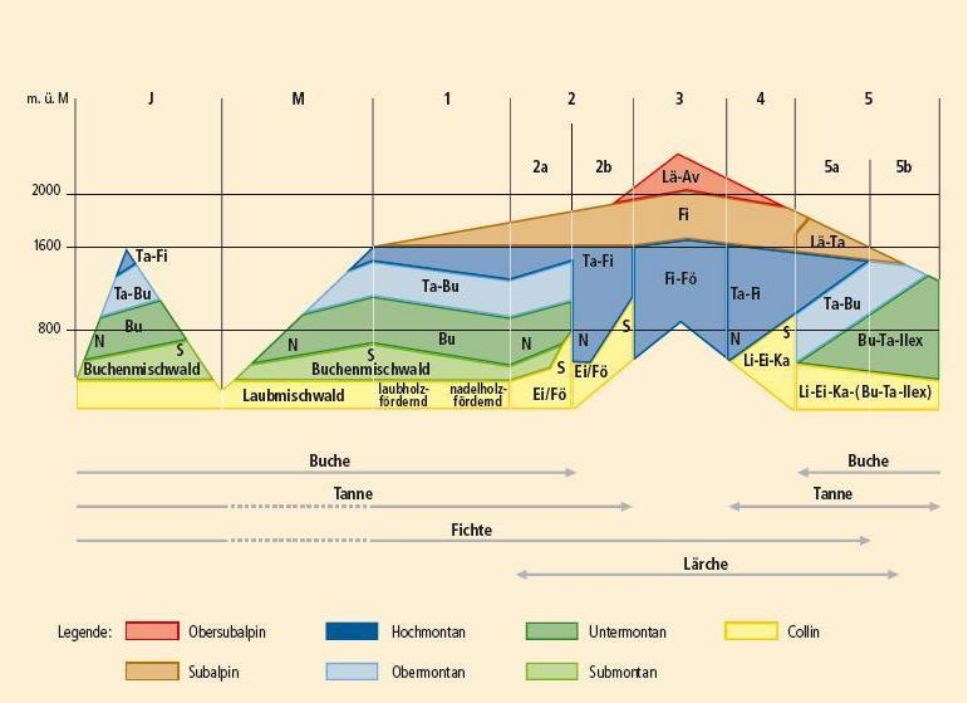


Abbildung 13: Einteilung der Höhenstufen in den verschiedenen Standortsregionen. Die Zahlen beziehen sich auf die in Abbildung 12 eingeführte Einteilung nach Standortsregionen (aus Ott, Frehner et al. 1997).

Die Wälder rings um den Murgang „Arth“ befinden sich in der Zone für *Wald mit besonderer Schutzfunktion* (Abbildung 14). Dies bedeutet, dass in diesen Gebieten die Schutzfunktion in jeder Hinsicht Priorität geniesst und Holzschläge demnach auch sorgfältig und zurückhaltend durchgeführt werden müssen. Die Pflege solcher Wälder sollte nicht vernachlässigt werden. Auch aus diesem Grund befindet sich der Wald beim Murgang „Arth“ in einem guten Zustand und kann eine Schutzfunktion erfüllen.

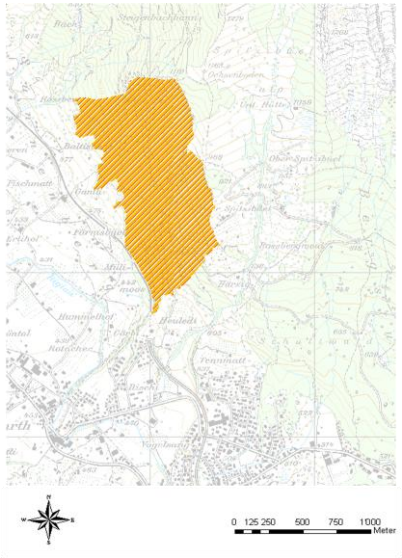


Abbildung 14: Das Untersuchungsgebiet mit den Waldabschnitten mit besonderer Schutzfunktion (orange schraffiert) eingezeichnet (Kartengrundlage: PK25© swisstopo, 5704 000 000).

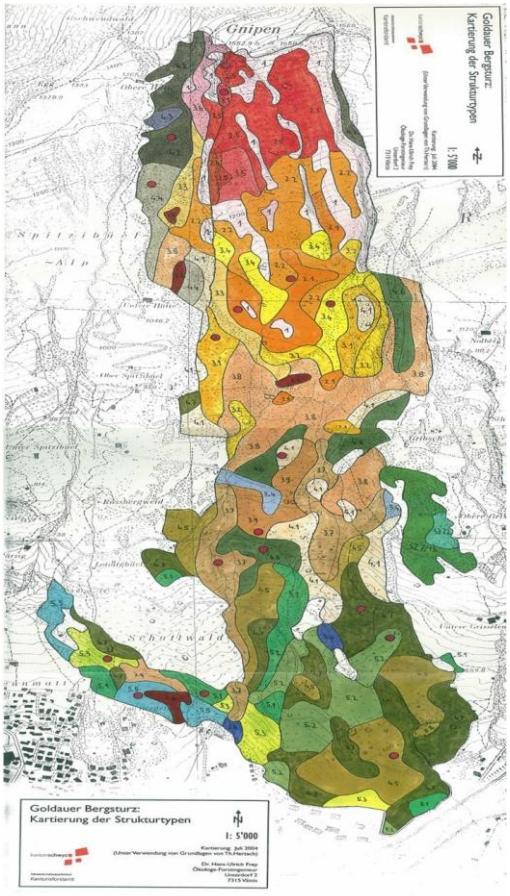


Abbildung 15: Kartierung der Wälder im Gebiet des historischen Bergsturzes von 1806 nach Strukturtypen (Frey 2005).

3.2 Murgangbeschreibung

Am Westrand des Rossbergs haben sich am während den Unwettern am 22./23. August 2005 zwei grosse Murgänge ereignet (Abbildung 2 und Abbildung 3). Um eine Unterscheidung vornehmen zu können und damit eine Verwechslung ausgeschlossen werden kann, werden in dieser Arbeit die beiden Murgänge mit unterschiedlichen Namen benannt. Diese Namen sind willkürlich und haben nur für diese Arbeit Relevanz.

Der Murgang, welcher sich am 22. August 2005 östlich von Arth ereignet hat, wird in dieser Arbeit mit "Arth" benannt. Er ist der westlicher gelegene der beiden Murgänge. Derjenige, welcher am 22./23. August nordöstlich von Goldau zu Tale kam, wird mit dem Namen "Goldau" versehen.

Insgesamt erstreckt sich das Untersuchungsgebiet beider Murgänge zusammengezählt über ungefähr 4 km^2.

3.2.1 Murgang „Arth“

Das Unwetter Norbert verursachte im Sommer 2005 heftige Unwetter und führte am 22. August zur Auslösung einer Rutschung, welche sich durch Verflüssigung und Akkumulation von weiterem Geschiebematerial zu einem Murgang entwickelte Thuro, Rick et al. 2006. Rund 80`000 m^3 Material gerieten so in Bewegung (Hunziker 2006; Thuro, Rick et al. 2006). Mehrere Murenschübe flossen im Gebiet Roren Richtung Gantli und Färnisbüel und übermurten den Bereich rund um den Gantlihof bis zu einem Meter hoch (Abbildung 17). Die wichtigsten Charakteristika des Murgangs „Arth“ sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Charakteristika des Murgangs „Arth“

Fläche des Einzugsgebietes oberirdisch	ca. 0.1 km^2 *
Fläche des Einzugsgebietes unterirdisch	ca. 1-2 km^2 *, **
Höchster Punkt des Untersuchungsgebietes	1580 m.ü.M.
Höchster Punkt des Anrissgebietes	950 m.ü.M.
Tiefster Punkt der Ablagerungszone	430 m.ü.M.
Exposition	Süd-West
Totale Länge des Murgangs	ca. 1400 m
Fläche Anrissgebiet	1200 m^2 *
Länge Ablagerungsgebiet	770 m
Mittleres Gefälle Anrissgebiet	80 - 100 %
Mittleres Gefälle Transitgebiet	75 – 80 %
Mittleres Gefälle Ablagerungszone	21 %
Durchschnittliches Gefälle	38 %
Mobilisiertes Geschiebematerial Anrissgebiet	48`000 m^3 *
Erosion im Transitgebiet	31`000 m^3 *
Geschiebematerialbilanz beim Kegelhals	52`000 m^3 *
Fläche Ablagerungsgebiet	114`000 m^2 *
Ablagerungsvolumen im Ablagerungsgebiet	48`500 m^3 *
Mittlere Geschwindigkeit am Murgangkopf	Wenige m/s, max. ca. 10 – 15 m/s ***

* Hunziker 2006

** Thuro, Rick et al. 2006

*** (Mündliche Aussage von S. Weber, 04. November 2010)

Einzugsgebiet

Das orographische Einzugsgebiet des Murgangs „Arth“ befindet sich rund um das Anrissgebiet, bis nördlich zur Kote 1165 "Ochsenboden". Es besitzt eine Grösse von ungefähr 10 ha. Trotz der ergiebigen Niederschläge, welches das Unwetter Norbert über die Zentralschweiz brachte, dürfte dieses oberirdische Einzugsgebiet zu klein gewesen sein, um das Material zu verflüssigen und einen Rutsch verursachen zu können (Thuro, Rick et al. 2006). Aus diesem Grunde werden noch unterirdische Zuflüsse vermutet. Berücksichtigt man die Topographie und die Schichtung der Nagelfluhbänder Hunziker 2006, dürfte sich dieses hydrologische Einzugsgebiet über eine Fläche von 1-2 km^2 vor allem in östlicher Richtung des Murgangs erstrecken.

Ablauf des Ereignisses:



Abbildung 16: Anrissgebiet des Murgangs „Arth“ vom Helikopter am Morgen des 23. August 2005 aus aufgenommen (Fotoaufnahme von D. Bollinger, 23. August 2005).

Die Niederschläge, welche das Unwetter Norbert verursachte (Kap. 3.1.2) und die geologischen Verhältnisse (Kap. 3.1.3) führten am 22. August 2005 zum hier beschriebenen Ereignis. Wahrscheinlich gegen 14.00 Uhr löste sich ungefähr bei Koordinate 684/220//213/930, Kote 950, eine spontane Rutschung (Thuro, Rick et al. 2006). Dies löste laut Thuro, Rick et al. (2006) mit Hilfe weiterer Verflüssigung an den umliegenden Hängen Rutschungen aus (Abbildung 16). Diese flossen in mehreren Schüben im bewaldeten und überwachsenen Bachgerinne talwärts. Durch die Bäume als Hindernisse entstanden Verklausungen, sodass der Murgang mit relativ geringer Geschwindigkeit vorwärts kam. Durch die Energie, mit welcher sich der Murgang nach unten wälzte, wurden auf einer Breite von ungefähr 20 – 30 m sämtliche Bäume in der Runse entweder gebrochen oder entwurzelt und mittransportiert. Der Murgang transportierte Gesteinsblöcke von bis zu 20 m^3 Grösse, der Landwirt des Gantlihofes spricht von Blöcken bis 50 m^3 (Hunziker, 2006). Über die Felsstufen bei Koordinate 684/000//213/700, Kote 800, erreichte der Murgangkopf Geschwindigkeiten von vermutlich etwas mehr als 10 m/s (mündl. Mitteilungen von S. Weber, Revierförster im Kanton Schwyz, 04. November 2010). In der Zeitspanne von 18.00 - 18.30 Uhr traten die ersten Schübe des Murgangs aus dem Wald aus. Der Murgang brach am Waldrand zuerst auf der orographisch linken Seite Richtung Färnisbüel aus, später auf der rechten Seite Richtung Gantlihof (Hunziker 2006). In diesem Bereich (Richtung Gantlihof) lagerte sich auch das meiste Material ab, beziehungsweise wurde weiter Richtung SBB-Bahnlinie und Gantlihof transportiert. Am Abend war das Gebiet rund um den Gantlihof bis zu 1 - 2 m hoch mit Geschiebe übermurt, mit Gesteinsblöcken von bis zu 3 - 4 m^3 Grösse. Schlamm und Feinmaterial wurden weiter bis zur Rigiaa geschwemmt (Abbildung 17).

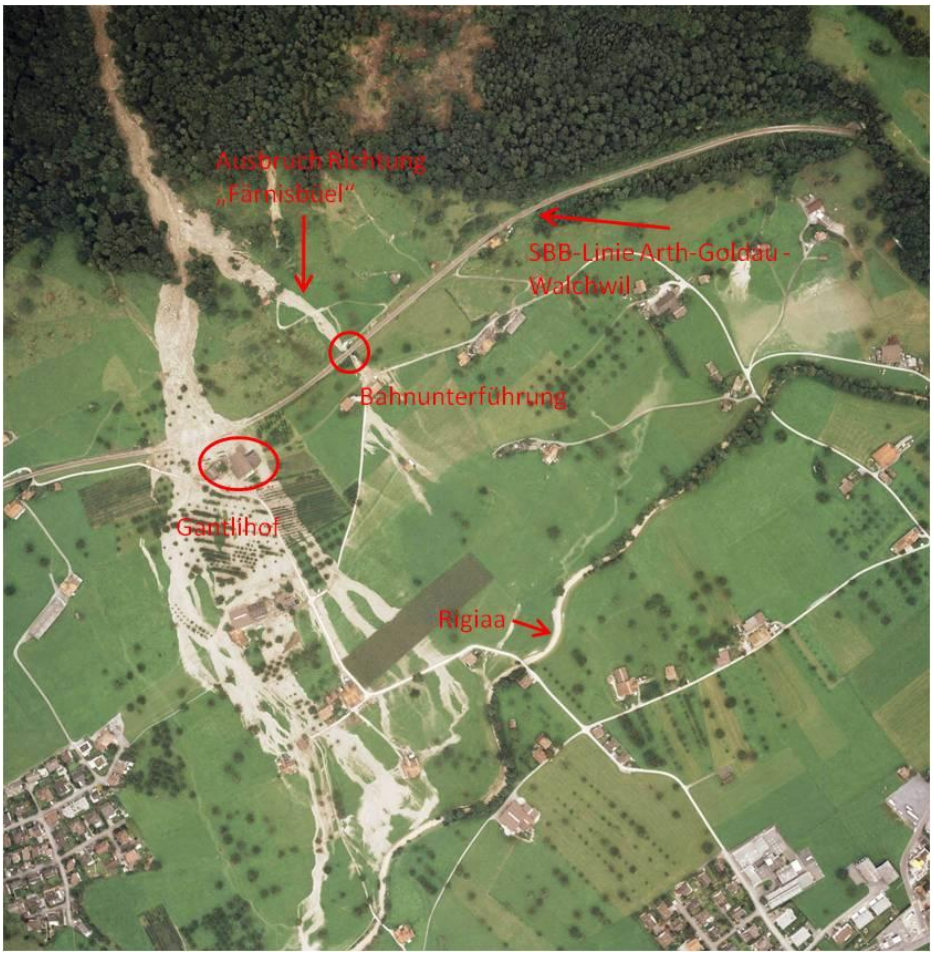


Abbildung 17: Luftaufnahme vom Gantlihof und Färnisbüel, aufgenommen am Morgen des 23. August 2005. Oben sieht man den Ausbruch des Murgangs nach rechts (Färnisbuel) und links (Gantlihof). Ebenfalls ersichtlich ist die Schneise im Wald, welche der Murgang geschlagen hat (Fotoaufnahme von D. Bollinger, 23.08.2005).

Auf beiden Seiten des Murgangs bildeten sich die für Murgänge normalerweise typischen Levées. Diese sind rund 2 Meter hoch und vor allem im oberen Teil, oberhalb der Felsstufen, ausgeprägt. Dass die Breite des Murgangs nicht mehr als ungefähr 20 m betrug, hat laut Revierförster S. Weber neben dem mobilisierten Volumen auch mit der Zusammensetzung und Struktur des Waldes zu tun.

3.2.2 Murgang „Goldau“

Ebenfalls durch die Regenfälle im Spätaugust 2005 wurde der Murgang auf dem Gebiet des historischen Bergsturzes in Goldau von 1806 ausgelöst. Durch die Infiltration von grossen Mengen an Regenwasser ereignete sich am Abend des 22. August 2005 oberhalb von Gribsch ein Felssturz, welcher sich zu einem Murgangprozess entwickelte. Dieser Murgang war von der Grösse und dem transportierten Volumen an Material her, mehr als doppelt so gross wie derjenige von Arth (ca. 190`000 m^3 mobilisiertes Geschiebe) (Terra Data 2007a). Durch das flache Gelände, die relativ geringe Verflüssigung des Materials und die enorme Breite der Front (max. 80-100 m breit), bewegte sich der Kopf des Murgangs nur sehr langsam vorwärts. Im Durchschnitt floss er mit wenigen Metern pro

Minute Richtung Goldau (Thuro, Rick et al. 2006; Zimmermann 2006). Am Morgen des 23. August 2005 erreichten die Ausläufer des Geschiebestroms den Tierpark Goldau und übermurten ihn und das anliegende Fussballfeld. Nachfolgend in Tabelle 4 sind die wichtigsten charakteristischen Parameter des Murgangs „Goldau“ aufgelistet.

Tabelle 4: Charakteristika des Murgangs „Goldau“.

Fläche des Einzugsgebietes oberirdisch	< 0.3 km^2 *
Fläche des Einzugsgebietes unterirdisch	Unbekannt
Höchster Punkt des Untersuchungsgebietes	1580 m.ü.M.
Höchster Punkt des Anrissgebietes	1050 m.ü.M.
Tiefster Punkt der Ablagerungszone	522 m.ü.M.
Exposition	Süden
Totale Länge des Murgangs	ca. 2500 m
Fläche Anrissgebiet	ca. 20`000 m^2 **
Länge Ablagerungsgebiet	ca. 1200 m
Mittleres Gefälle Anrissgebiet	65 - 90 %
Mittleres Gefälle Transitgebiet	31%
Mittleres Gefälle Ablagerungszone	12%
Durchschnittliches Gefälle	21%
Mobilisiertes Geschiebematerial Anrissgebiet	190`000 m^3 ***
Erosion im Transitgebiet	Keine, vernachlässigbar ***, ****
Geschiebematerialbilanz beim Kegelhals	Unbekannt
Fläche Ablagerungsgebiet	Unbekannt
Ablagerungsvolumen im Ablagerungsgebiet	Unbekannt
Mittlere Geschwindigkeit am Murgangkopf	Wenige m/min **

* (Zimmermann 2006)

** (Thuro, Rick et al. 2006)

*** (Terra Data 2007a)

**** (mündl. Mitteilungen von S. Weber und C. Graf, 04. November 2010)

Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet des Murgangs „Goldau“ erstreckt sich von der Abrisskante früherer Bergstürze (v.a. des 1806er Bergsturzes) im Osten bis hin zu den kleinen Gerinnen, welche später den Chapfbach bilden, im Westen. Im Norden bildet der Grat zwischen Gnipen und Wildspitz die Wasserscheide. Dies ergibt eine Fläche von ungefähr 30 ha, was mit Expertengutachten übereinstimmt (Zimmermann 2006). Längere und ergiebige Niederschläge vor dem 22. August und ein weitaus grösseres unterirdisches Einzugsgebiet dürften noch zusätzlich Wasser in das Anrissgebiet gebracht haben (Zimmermann 2006).

Ablauf des Ereignisses:

Durch die enormen Niederschläge wurden die Mergel- und Nagelfluhbänke im Gebiet der historischen Bergstürze von 1806 resp. des 13. Jahrhunderts (Röthener Bergsturz) richtiggehend mit Wasser gesättigt. Es bestanden an der Abbruchkante auch bereits Risse, welche bis in grössere Tiefen verwittert waren (Zimmermann 2006). Am Abend des 22. August löste sich bei Koordinate 685/500//213/670, Kote 1050, der Fels, bestehend aus Mergel-, Sandstein und Nagelfluhschichten (Kap. 3.1.3) auf ca. 10 - 20 m Höhe und einer Breite von ca. 180 m. Dieses Material stürzte über das Abbruchband des Bergsturzes von 1806 (Hantke 2006). Auf einer Fläche von ca. 2 ha gerieten so ca. 190`000 m^3 Material in Bewegung (Thuro, Brack et al. 2006; Terra Data 2007a). Durch die Verflüssigung und den ständigen Nachschub an Wasser entwickelte sich daraus ein Murgang. Der Grossteil des Geschiebes floss längs des Grisselenbaches ab. Dies auf einer Breite von 80 - 100 m. Ein schwach ausgebildetes Bachbett des Grisselenbaches hatte keinen Einfluss auf das Fliessverhalten und –richtung des Murgangs „Goldau“ (mündl. Mitteilungen von C. Graf und S. Weber, 04. November 2010).

Ein kleiner Teil des Geschiebematerials bahnte sich, auf der orographisch rechten Seite des Hauptarms, durch den Wald seinen Weg zu Tale (Abbildung 18). Nach ungefähr 200 m kam dieser Nebenarm allerdings zum Stillstand. Ein Grund für die geringe Länge dieses Arms könnte sein, dass diese Rutschung weniger verflüssigt war als der Hauptarm des Murgangs nebenan (Zimmermann 2006).



Abbildung 18: Aufnahme des Murgangs „Goldau“ von der Anrisszone aus Richtung Goldau gesehen. Rechts ersichtlich ist der kurze Nebenarm, welcher nach ca. 200 m im Wald zum Stillstand gekommen ist. Oben in der Bildmitte liegt der teilweise übermurte Tierpark Goldau (Fotoaufnahme von D. Bollinger, 23. August 2005).

Der Hauptteil des Geschiebes floss kontinuierlich Richtung Goldau, dies mit für Murgänge eher atypischen wenigen Metern pro Minute (Thuro, Brack et al. 2006; Zimmermann 2006). Grund dafür dürfte der unzureichende oberirdische Zufluss an Wasser sein, welcher eine komplette Verflüssigung und Veränderung der Rheologie verhinderte (Zimmermann 2006). Ungefähr bei Koordinate 685/350//212/700, Kote 680 - 670, gibt es eine Verflachung des Geländes. Dort staute sich der Murgangkopf auf und es kam zu Verklausungen, herbeigeführt durch mittransportierte Baumstämme und Felsblöcke des Bergsturzes von 1806 (Hantke 2006). Dies geschah 2 - 3 Stunden nach dem Felsabbruch. Durch den Rückstau des Materials bei dieser Geländeverflachung floss nachkommendes Geschiebe auf den bereits gestauten Murgangkopf auf. Als eine gewisse Höhe erreicht wurde, konnte Material rechtsseitig über den Bachbettrand austreten. Der Murgang wurde nach Süden/Südwesten, Richtung Schuttbach, umgeleitet (Annen 2007). Im und um das Gerinne des Schuttbaches flossen die Schlamm- und Geröllmassen Richtung Tierpark Goldau. In den Morgenstunden erreichte der Strom die Geländesenke bei Kote 522 ("Grosswiyer") und verschlammte diese flächendeckend. Ausläufer der Wasser- und Schlammmassen erreichten die Fussballplätze südlich von Punkt 514.

Bis zur Geländeverflachung bei Kote 670 wurde durch den Murgang eine Waldfläche von ca. 10 ha tangiert und zerstört (mündl. Aussage von S. Weber, 04. November 2010). Bei Feldbegehungen wurden Gesteinsblöcke von bis 10 m^3 Grösse gefunden, welche der Murgang transportierte. Diese Angaben decken sich auch mit Aussagen von Augenzeugen. Die weitaus grösseren Felsblöcke welche im Prozessraum liegen, stammen vom historischen Goldauer Bergsturz 1806 (Thuro, Rick et al. 2006). Sie wurden beim Ereignis umflossen, wirkten aber nicht als grosse Hindernisse. Ein Grund dafür könnte die geringe Geschwindigkeit gewesen sein, mit welcher sich der Murgang fortbewegte (Zimmermann 2006). Auf beiden Seiten der Murgangstrecke fehlen die typischen Levées praktisch vollständig. Dies könnte ebenfalls mit der Geschwindigkeit zu tun haben (Zimmermann 2006) .

4 Grundlagen

4.1 Murgang

4.1.1 Definition

«A debris flow is a gravity-driven flow of a water-saturated, highly concentrated mixture typically composed of poorly sorted rock, soil, organic matter, and sundry debris. It is part of a broader spectrum of geologic agents classified as sediment gravity rather than gravity acting only on the fluid, which then transports sediment, as is the case with typical streamflow» (Middleton und Southard 1977).

«Debris flows are churning, water-saturated masses of fine sediment, rocks, and assorted detritus that originate on mountain slopes and course down stream channels when they reach valley floors. Strong interactions of solid and fluid forces greatly influence the behavior of debris flows and distinguish them from related phenomena such as rock avalanches and waterfloods» (Iverson 1997).

Solche und ähnliche Definitionen von „Murgang“ findet man viele in der Literatur. Diese beiden oben Aufgeführten greifen die für diese Arbeit wichtigsten Punkte auf.

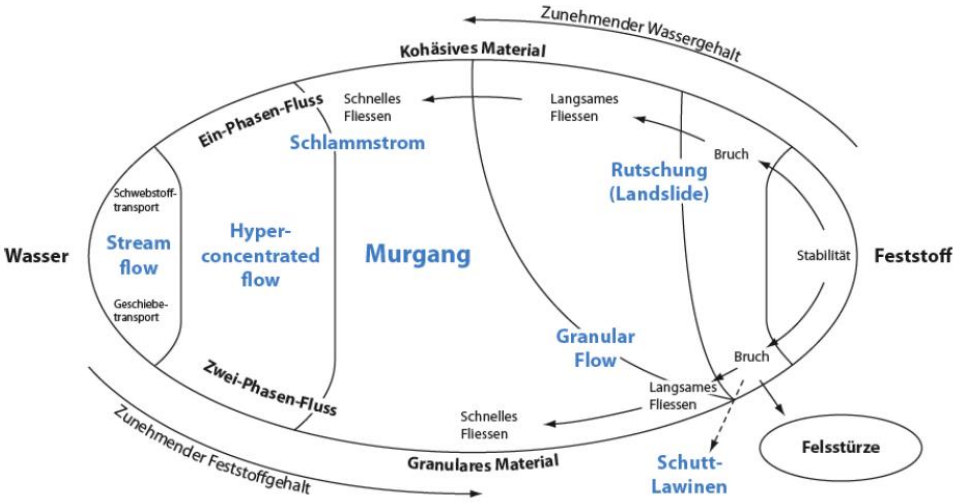


Abbildung 19: Klassifikation von Massenbewegungen in Hanglagen als Funktion des Feststoffgehaltes und der Materialeigenschaften (Coussot und Meunier (1996) aus Stricker (2010)).

Murgänge sind Massenverlagerungsprozesse, die ein fliessendes Verhalten aufweisen und grundsätzlich aus drei Komponenten bestehen: Wasser, Luft, Feinmaterial und grössere Steine (Costa 1984). Zu dem Stein-Luft-Wasser-Gemisch kommt häufig noch organisches Material wie Holz (Bäume oder Bestandteile davon) (Hungr 2005). Die Anteile der Materialzusammensetzung variieren in einer grossen Bandbreite (Abbildung 19), wobei je

nach Zusammensetzung dieses heterogenen Gemisches ein unterschiedliches Verhalten beobachtbar ist (Rickenmann 1996; Allen, Schneider et al. 2009).

In Abbildung 19 wird ein Versuch unternommen, Murgänge anhand der Material- und Feststoffeigenschaften einzuordnen und von anderen Massenverlagerungsprozessen abzugrenzen. Dies ist unter Umständen schwierig, da wie oben bereits erwähnt, diese und andere Eigenschaften unterschiedliche Werte annehmen können. Häufig wird unter „Murgang“ ebenfalls granularer Fluss und Schlammstrom eingebunden. Zwischen dem Prozess „Murgang“ und anderen verwandten Prozessen wird folgendermassen unterschieden:

- Rutschung: Gleitendes anstatt fliessendes Verhalten, kleinerer Wassergehalt (Coussot und Meunier 1996; Iverson, Reid et al. 1997).
- Geschiebetransport: Grösserer Wassergehalt (Haeberli und Naef 1988; Coussot und Meunier 1996).
- Felssturz: Kleinerer Wassergehalt (zeitweise gar kein Wasser), stürzendes anstatt fliessendes Verhalten, weniger Feinmaterial (Haeberli und Naef 1988; Hungr 2005).

Eine grosse Variation ist aber nicht nur bei Murgängen als ganze Einheit, sondern auch innerhalb eines Murgangs feststellbar (Rickenmann 1995; Tognacca 1999). So sind in der Transitzone die Feststoffe häufig an der Murenfront konzentriert, während dem der Murgangschwanz in der Regel eine wesentlich flüssigere Konsistenz aufweist (Abbildung 20).

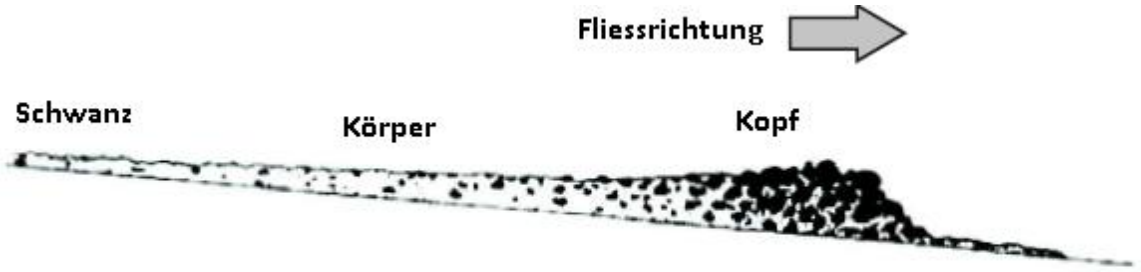


Abbildung 20: Schema eines Murgangs im Längsschnitt mit einer granularen Murenfront (aus Kowalski (2008), leicht verändert).

Einzelne Merkmale zu finden, welche für alle Murgänge zutreffen, ist schwierig. Es wird in dieser Arbeit darauf verzichtet Kennzahlen und Werte für die wichtigsten physikalischen Eigenschaften eines Murgangs (z.B. Maximalgeschwindigkeit, spezifische Dichte, Einfluss des Neigungswinkel auf das Fliessverhalten eines Murgangs, etc.) aufzuzählen. Diesbezüglich wird aber auf diverse Publikationen verwiesen: Costa 1984; Takahashi 1991; Rickenmann und Zimmermann 1993; Coussot und Meunier 1996; Iverson 1997; Keusen, Bollinger et al. 1998; Rickenmann 1999; Iverson und Denlinger 2001; Weber 2004; Rickenmann, Laigle et al. 2005; Takahashi 2007; Cesca und D'Agostino 2008; Allen, Schneider et al. 2009. Umfassende Werke momentaner Untersuchungen sind zum Beispiel die Bände: „International conferences on debris flow hazards mitigation: Mechanics, Predictions, Assessment“, welche jeweils nach den periodisch stattfindenen Konferenzen

herausgegeben werden. In Jakob und Hungr (2005) „Debris-flow hazards and related phenomena“ finden sich ebenfalls umfangreiche publizierte Untersuchungen.

4.1.2 Klassifikation der Zonen

Massenbewegungsprozesse, darunter auch Murgänge, werden in jeweils drei Gebiete eingeteilt: Anrisszone, Transitzone und Ablagerungszone (Coussot und Meunier 1996; Lorente, Begueria et al. 2003). Im Anrissgebiet „entsteht“ der Murgang. Material gerät ins Rutschen oder reisst an. In diesem Gebiet hat der Murgang eine positive Geschiebebilanz zu verzeichnen. Das heisst, dass Material akkumuliert wird. In der Transitzone wird das Material weiter transportiert, ohne dass es bereits wieder grossflächig stoppt. Durch so genanntes „Entrainment“ kann der Murgang weiter an Material dazugewinnen. Es kann aber auch sein, dass ein Teil der ursprünglichen Masse bereits wieder abgelagert wird. Die Bilanz kann positiv wie auch negativ sein. Im Ablagerungsgebiet schliesslich ist das Gelände so flach, dass der Murgang kontinuierlich an Energie verliert und Material abgelagert wird. Dadurch kommt der Murgang schliesslich zum Stoppen. Die Geschiebebilanz in dieser Zone ist negativ. Jedes Einzugsgebiet ist einzigartig und es gibt keine „Schablone“ für die Einteilung in die drei Gebiete. Abbildung 21 und Abbildung 24 zeigen eine schematische Einteilung eines potentiellen Murganggebietes.

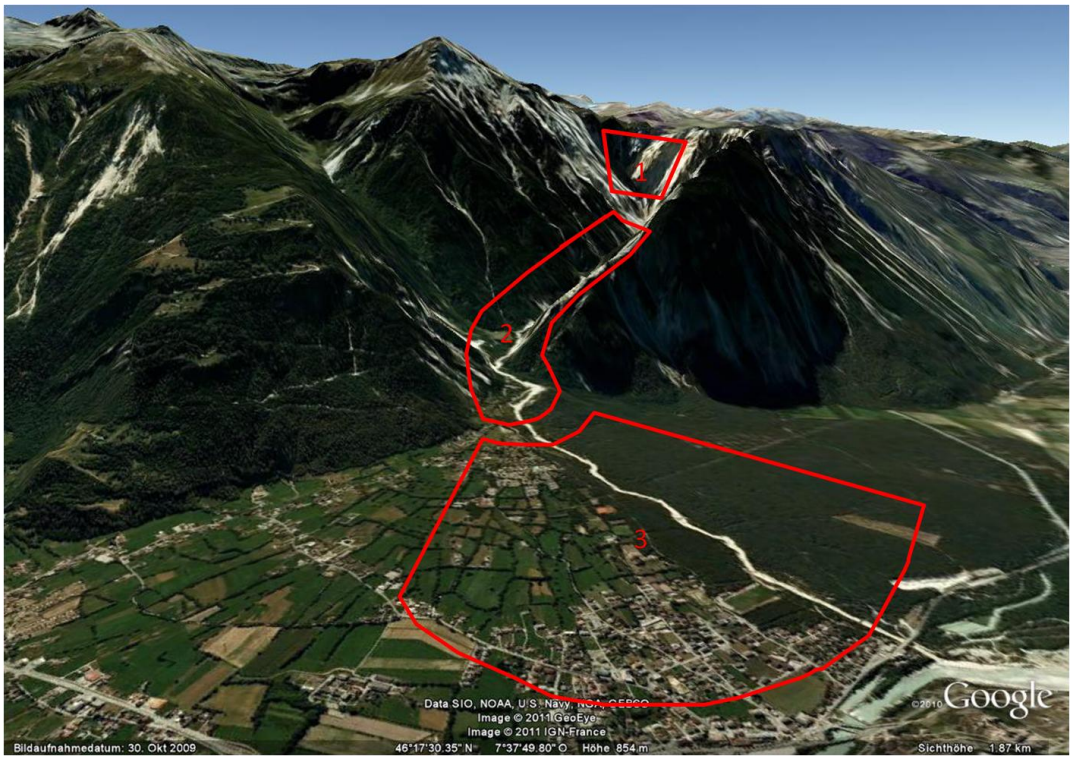


Abbildung 21: Ein potentielles Murganggebiet eingeteilt in die drei Zonen: 1) Anrissgebiet, 2) Transitzone und 3) Ablagerungsgebiet.

4.1.3 Murgangentstehung

Damit ein Murgang entstehen kann, sind mehrere Faktoren entscheidend. Dazu zählen topographische, hydrologische, sowie geologische Eigenschaften (Zimmermann, Mani et al. 1997). Weiter sind die Grundvoraussetzungen, die Grunddisposition von entscheidendem Einfluss. Die Grunddisposition sagt etwas über die Verfügbarkeit von Material und Geröll im Anrissgebiet und Gerinne aus, beispielsweise wie prädestiniert das Relief ist, Hangneigung, etc. Demgegenüber stehen die variablen Dispositionen, wie Jahreszeit und Materialeigenschaften (Stricker 2010).

Über die Murgangentstehung gibt es verschiedene Theorien. Ebenso gibt es verschiedene Ansätze die Ereignisse zu klassifizieren sind. Räumliche Ansätze (Entstehungsort (Takahashi 1981)), mechanische Ansätze (Johnson und Rhodine 1984), wie auch ein umfassender Ansatz (Entstehungsmechanismen und -ursachen (Tognacca 1999; Takahashi 2007)) wurden schon auf ihre Eignung als erklärende Theorie überprüft und angewendet. Letzterer unterscheidet die Entstehung eines Murgangs in interne und externe Auslösefaktoren. Innere Auslösefaktoren resultieren in einer Verminderung der bodenmechanischen Stabilität, welche wiederum mehrere Ursachen haben kann. Es führt aber nicht jede bodenmechanische Instabilität zu einem Murgang. Je nach Materialzusammensetzung, Sättigung, Wasserverfügbarkeit, Bodenstruktur, etc. kann sich auch eine Hangrutschung, resp. Hangmure entwickeln (Iverson, Reid et al. 1997).

Nach einer Zusammenstellung von Scheuner (2007) können folgende Faktoren eine Verminderung der bodenmechanischen Stabilität herbeiführen:

- Innere Erosion
- Verwitterung
- Permafrostdegradation
- Veränderung der chemischen Struktur eines bindigen Bodens
- Hydraulisch bedingte Abnahme der Scherfestigkeit

Als äussere Auslösefaktoren werden die Einflüsse gewertet, welche eine progressive Erosion zur Folge haben (Scheuner 2007):

- Plötzliche Starkniederschläge
- Schnee- und/oder Eisschmelze
- Veränderung des subglazialen Abflusssystems
- Ausbruch einer Wassertasche innerhalb eines Gletschers oder eines Gletschersees
- Blockade eines Gerinnes durch Verklausung oder seitliche Rutschung mit Überlaufen des aufgestauten Wassers
- Rutschungen, Erdbeben, Steinschlag

Anrissgebiete

Die oben aufgeführten Auslösefaktoren treten an verschiedenen Orten auf. Es kommt so zu unterschiedlichen Anrisszonen für Murgänge. Haeberli, Rickenmann et al. (1991) sowie Rickenmann und Zimmermann (1993) konzipierten ein Model, welches die Anrissgebiete in vier charakteristische Typen einteilt. Dabei werden zwischen zwei Entstehungsystemen unterschieden:

- Hanganrisszonen
  - Typ 1: *Rückschreitende Erosion*. In schwach konsolidierten, 27 - 38° steilen Schutthängen. Durch rückschreitende Erosion eines Quellhorizontes erfolgt häufig ein Anriss des Murganges.
  - Typ 2: *Kontakt Felswand – Schutthalde*. Der Anriss erfolgt im Kontaktbereich einer Felswand zu einer Schutthalde. In ebenfalls ca. 27 - 38° steilem Gelände entsteht ein Murgang meist nur unweit der Felswand entfernt.
- Gerinneanrisszonen
  - Typ 3: *Bettverflüssigung*. Ein mit Schutt gefülltes, 24 - 35° steiles Felsbachbett gerät durch eine Instabilität des Lockermaterials in der Bachsohle ins Rutschen.
  - Typ 4: *Verklausung*. Durch Verklausungen aufgestautes Lockermaterial im Bachbett wird plötzlich mobilisiert. Die Verklausungen können aus Holz oder kleineren Rutschungen bestehen. Im 13 - 33° steilen Bachbett verläuft die Erosion in der Regel progressiv (Allen, Schneider et al. 2009).

4.1.4 Transport

Im Transitgebiet sind bei der Untersuchung von Murgängen vor allem zwei Fragen von Interesse: *„Was geschieht während der Transportphase (Fliessverhalten)?“* und *„Wohin fliesst das Material (räumlicher Aspekt)?“*

Fliessverhalten

Das Fliessverhalten könnte auch als funktionaler Aspekt, im Gegenpol zum räumlichen Aspekt bezeichnet werden. Es gibt einige charakteristische Merkmale für das Fliessverhalten eines Murgangs. So bewegt sich ein Murgang meistens in mehreren Schüben wellenförmig talwärts (Costa 1984). Die Verteilung der Korngrössen des mitgeführten Materials und der Abflusstiefe nimmt dabei von der Murenfront bis hin zum Schwanz stetig ab. Andersherum verhält es sich mit der Geschwindigkeit, diese ist am Ende eines Murschubes höher als an der Murenfront. Ähnlich verhält es sich mit dem Wassergehalt innerhalb eines Murschubes; an der Front ist er wesentlich geringer als gegen Ende hin. Ein weiteres typisches Merkmal für einen Murgang sind die seitlichen Levées. Diese Murwälle an den Seiten des Gerinnes sind nach einem Durchgang eines Murgangs meist gut sichtbar (Abbildung 22). Levées zeigen typischerweise keine Sortierung nach Korngrösse auf.

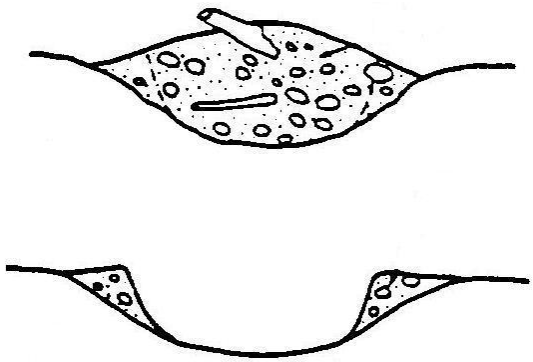


Abbildung 22: Querprofil eines Gerinnes und des Murgangs beim Durchfluss eines Murgangs (oben) und nach dem Murgang (unten). Die Levées an den seitlichen Rändern des Bachbettes sind gut ersichtlich (aus Gamma (1999), verändert).

Die oben beschriebenen Merkmale, sowie das Fliessverhalten werden zu einem grossen Teil von folgenden Einflussfaktoren bestimmt (Tognacca (1999):

- Feststoffkonzentration
- Charakteristik der flüssigen Phase
- Materialzusammensetzung der festen Phase

Das Verhältnis von fester/flüssiger Phase und Materialzusammensetzung unterliegt dabei einer grossen Variabilität (Tognacca 1999).

Die Variabilität dieser Komponenten erlaubt es, eine Murgangklassifikation nach ihrem Fliessverhalten vorzunehmen. Schatzmann und Vollmöller (2003) taten dies anhand der Abhängigkeit des Fliessverhaltens von der Feststoffkonzentration und dem Feinmaterialanteil (Abbildung 23). So konnten sie die Murgänge in granulare, viskos-granulare und viskose Murgänge, sowie in hyperkonzentrierte Abflüsse unterteilen.

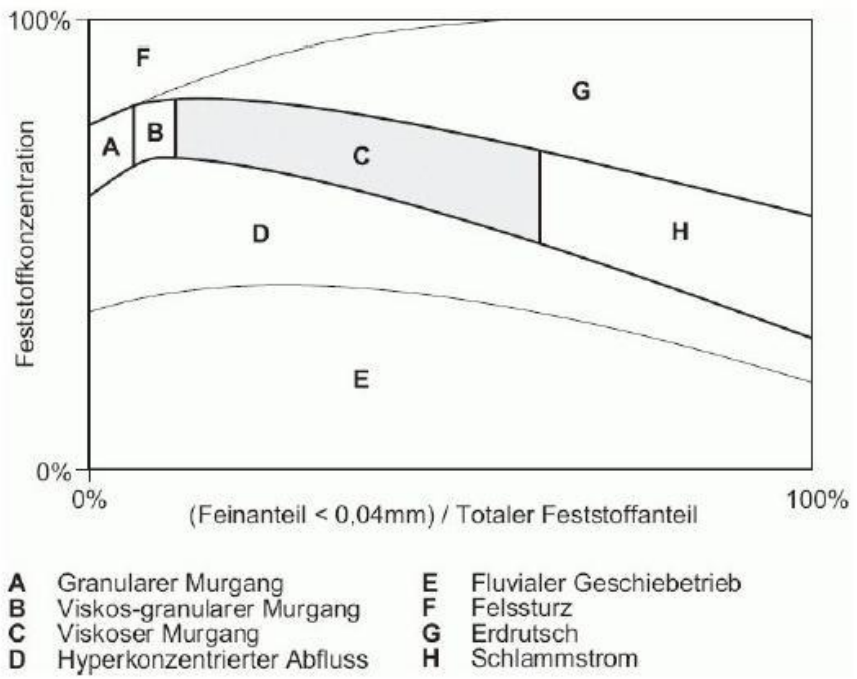


Abbildung 23: Murgangklassifikation hinsichtlich Feststoffkonzentration und Feinanteil der Feststoffe (Schatzmann und Vollmöller 2003).

Während der Murgang die Transitzone durchfliesst, kann er durch Erosion Geschiebe akkumulieren. Er kann auf diese Weise sein Volumen unter Umständen um ein Mehrfaches steigern. Voraussetzung dafür ist, dass entlang des Fliessweges Material zur Aufnahme bereit liegt. Dieses besteht vornehmlich aus Schutt, kann aber auch organischen Ursprungs sein. Die Erosionsfähigkeit hängt vom Gefälle, Fliessgeschwindigkeit, Fliessstreckenlayout, Oberflächenrauigkeit und Quantität vom vorhandenen erodierbaren Material ab (Schneider, Bartelt et al. 2010). Die Erosion wird in Tiefen- und Seitenerosion unterschieden (Hungr, McDougall et al. 2005). Die Tiefenerosion kann in Schutt oder verwittertem Fels bis 15 m erreichen, für gewöhnlich liegt sie aber bei weniger als 10 m (Haeberli, Rickenmann et al. 1991).

Räumlicher Aspekt

Ist ein Gerinne vorhanden, verläuft ein Murgang in der Regel in selbigem, da es meist in der Falllinie angelegt ist. Ist das Gelände steil genug, folgen Murgänge primär der Topographie. Ein Ausbruch aus einem Gerinne kann nach Gamma (1999) folgende Ursachen haben:

- Die Gerinnekapazität ist zu klein
- Verklausungen
  - Holz
  - Rutschungen
- Kunstbauten (Brücken, Durchlässe)

4.1.5 Ablagerung

Nach Durchqueren der Transitzone, welche meistens in schmalen Bahnen verläuft (der Engpass in der Sanduhrform (Abbildung 24)) weitet sich das Gelände resp. Fliessstrecke wieder auf. Häufig damit verbunden ist auch eine Abflachung des Geländes. Aus diesen Gründen reduziert sich dort die Fliessgeschwindigkeit und die Tendenz eines Stoppens des Murgangs nimmt zu.

Murkegel haben in der Regel ein konvexes Längsprofil und sind steiler als ähnlich grosse Kegel von fluvialen Fliessprozessen (Haeberli, Rickenmann et al. 1991). Das abgelagerte Material ist unsortiert, kann aber auch invers geschichtet sein (grosse Blöcke oben, Feinmaterial unten an der Sohle). Charakteristisch ist auch das abrupte Stoppen der Murzunge, dabei ist eine scharfe Abgrenzung deutlich zu erkennen. Sobald die Scherfestigkeit unter einen bestimmten Wert fällt, stoppt die Bewegung (Deformation) der Masse und sie hält an (Gamma 1999).

Im Ablagerungsgebiet sind normalerweise Levées zu erkennen (Abbildung 22). Des Weiteren sind häufig grosse bis sehr grosse Felsblöcke auf dem Murkegel anzutreffen. Die Oberfläche des ganzen Ablagerungsgebietes erscheint rau und ungeordnet, das Relief ist unruhig.

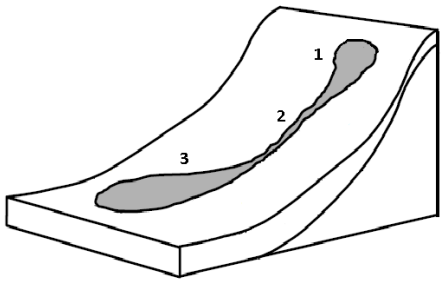


Abbildung 24: Typische Sanduhrform einer Murgangfliessstrecke mit: 1) dem Anrissgebiet, 2) dem Transitgebiet (Flaschenhals) und 3) dem Ablagerungsgebiet (aus Lorente, Begueria et al. (2003), verändert).

4.2 RAMMS

RAMMS ist ein rechnergestütztes Simulationsprogramm und steht für Rapid Mass MovementS. Es wird seit einigen Jahren am Institut für Wald, Schnee und Landschaft WSL, sowie an ihrem Tochterinstitut für Schnee- und Lawinenforschung SLF entwickelt. Ursprünglich wurde das Programm geschaffen, um das Fliess- und Auslaufverhalten von Lawinen zu modellieren (Christen, Bartelt et al. 2008). Die numerischen Berechnungen werden in einem zweidimensionalen Raum (x, y Koordinatensystem) durchgeführt. Die z-Komponente wird aus dem gemittelten Massenschwerpunkt jeder einzelnen Zelle im x, y Koordinatensystem errechnet (Christen, Kowalski et al. 2010). Somit ist RAMMS ein auf einem zweidimensionalen Berechnungsprozess basierendes Programm, welches die Resultate aber im dreidimensionalen Raum wiedergibt. Weil Ähnlichkeiten in der Dynamik

der Prozesse Lawinen, Murgang und Steinschlag bestehen, kann das Programm auch für diese Prozesse eingesetzt werden (Christen, Kowalski et al. 2010). Verschiedene Autoren untersuchten das Fliessverhalten von Lawinen und Murgängen und bestätigen deren Ähnlichkeiten (Bouchut et al. 2008; Iverson und Denlinger 2001; Swartz et al. 2003; Hürlimann et al. 2003). Das Lawinenmodul ist seit 2010 kommerziell erhältlich, die Module für Murgang und Steinschlag sind noch in Entwicklung. Das Lawinenmodul wurde bereits unter Anpassung der Parameterwerte in verschiedenen Studien für Murgänge (Scheuner 2007; Cesca und D`Agostino 2008; Stricker 2010), resp. Felsstürze und Eislawinen (Schneider, Bartelt et al. 2010; Knobel 2007) angewendet.

Eine gute Übersicht zum momentanen Stand Entwicklungsstand des RAMMS und die involvierten Gesetze und Formeln findet sich in der Publikation von Christen, Bartelt et al. (2010).

Schwierigkeiten bei der Entwicklung solcher dynamischen Modelle bestehen in der Wiedergabe der Fliessrheologie, welche das Verhalten im dreidimensionalen Gelände modelliert. In RAMMS können dafür 2 verschiedene Ansätze verwendet werden:

- Voellmy-Salm Ansatz
- Random kinetic energy model

Das *random kinetic energy model* hat einige Vorteile gegenüber dem Ansatz von Voellmy-Salm (Bsp. Verfolgung der Geschwindigkeitsentwicklung innerhalb der Lawine erlaubt realistischere Modellierung der Erosion und Ablagerung (Christen, Kowalski et al. 2010)). Allerdings ist dieser Ansatz noch zu unausgereift, weshalb bisher mehrheitlich der Voellmy-Salm Ansatz verwendet wurde, welcher auch in dieser Arbeit verwendet wurde (Armento, Genevois et al. 2008; Pirulli und Sorbino 2008; Christen, Kowalski et al. 2010; Liste nicht abschliessend).

Der VS-Ansatz basiert auf einer für granularen Fluss angepassten zweidimensionalen Flachwassergleichung (Stricker 2010). Das nähere Betrachten der Gleichungen und Ansätze des Voellmy-Salm Modells wird hier verzichtet Aber es wird an dieser Stelle auf die Publikationen von Christen, Kowalski et al. (2010) und Andres (2010) hingewiesen, welche die im Hintergrund verborgenen Gleichungen und Vorgänge verständlich und genau erläutern.

In dieser Arbeit von grösster Bedeutung bezüglich des Voellmy-Salm Ansatzes ist die Reibung. In diesem Ansatz wird die totale basale Reibung in zwei Terme aufgeteilt (Salm 1993):

- Einen geschwindigkeitsunabhängigen Coulomb-Term für trockene Reibung μ (Mü)
- Einen geschwindigkeitsabhängigen Term für turbulente Reibung ξ (Xi)

Diese Teilung der totalen Reibung in einen geschwindigkeitsabhängigen und -unabhängigen Term erlaubt die Modellierung von Lawinen/Murgang-Verhalten bei hoher Geschwindigkeit in der Anrisszone und das Stoppverhalten im Auslaufgebiet (Christen, Kowalski et al. 2010). Der Wert für die turbulente Reibung ξ wird durch die Geometrie und der Rauigkeit der Gleitfläche bestimmt. Dir trockene Reibung μ hängt vorwiegend von der Materialeigenschaft und dem Druck senkrecht zur Bodenoberfläche ab (Andres 2010).

Um eine numerische Berechnung durchführen zu können, sind neben den beiden Reibungsparametern sind noch weitere Modellinputs zu definieren, welche in den

folgenden Abschnitten beschrieben werden. Eine detaillierte Erörterung wird in Christen, Bartelt et al. (2008; 2010) abgehandelt.

4.2.1 Modellinput

Reibungsparameter μ und ξ

Wie oben bereits beschrieben nehmen diese beiden Variablen Einfluss auf die Reibung. Für das Modul Lawinen gibt es bereits Richtlinien, welche Wertepaare von μ und ξ bestimmte Voraussetzungen definieren (Christen, Bühler et al. 2010; Schneider, Bartelt et al. 2010). Für das Modul Murgänge hingegen existiert eine solche Hilfe noch nicht, ist aber Gegenstand laufender Arbeiten. In RAMMS können die Parameter automatisch berechnet oder manuell bestimmt werden. Zudem können sie über die ganze Länge des Ereignisses konstant gehalten oder variabel gestaltet werden.

Für die Festlegung der beiden Reibungsparameter werden aufgrund gemachter Erfahrungen folgende Verhaltensweisen erwartet: Je grösser der Wert für den geschwindigkeitsunabhängigen Coulomb-Term für trockene Reibung μ [-] gewählt wird, desto kürzer wird die Reichweite ausfallen. Je grösser der geschwindigkeitsabhängige Term für turbulente Reibung ξ [m/s^2] gewählt wird, desto höher die Fliessgeschwindigkeit (Scheuner 2007; Armento, Genevois et al. 2008; Stricker 2010; Christen, Kowalski et al. 2010).

Um den Bereich möglicher Wertepaare für die Suche nach „Best-Fit"-Kombinationen etwas einschränken zu können, orientiert sich diese Arbeit in einem ersten Schritt an Werten aus Publikationen (Scheuner 2007; Armento, Genevois et al. 2008; Sosio, Crosta et al. 2008; Andres 2010; Stricker 2010), sowie für das μ an Formeln aus Rickenmann, Jakob et al. (2005) (Abbildung 25). für den Reibungsparameter μ wurden Werte zwischen 0.03 und 0.40 [-] verwendet, für den Parameter ξ Werte zwischen 10 und 2`500 m/s^2.

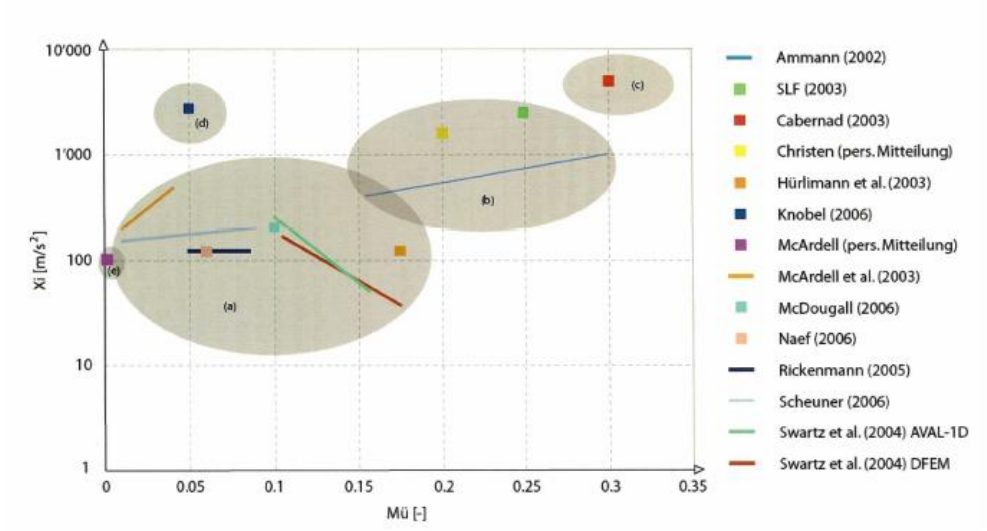


Abbildung 25: Bandbreite der Reibungsparameter μ und ξ für verschiedene Massenbewegungsprozesse: (a) Murgänge, (b) Lawinen, (c) Felsstürze, (d) Eislawinen, (e) Flutwellen (aus Scheuner 2007).

Höhenmodell

Als Grundlage jeder Berechnung muss ein digitales Gelände-/Höhenmodell (DGM oder DHM) vorhanden sein, welches das Relief des Untersuchungsgebietes wiedergibt.

Für die Simulationen der Arbeit wurde ein DTM-AV mit einer Auflösung von 2 m als bestes verfügbares Geländemodell verwendet. Die Topographie des DGM entsprach der Situation vor den Ereignissen im August 2005. Somit konnten die Simulationen mit der ursprünglichen Topographie durchgeführt werden. Es handelt sich um ein direkt erfasstes digitales Modell (direkt anstehender Boden ohne Bewuchs wie Bäume und Sträucher), welches durch ein flugzeuggestütztes Laserscanning erfasst wurde.

Orthophoto/Landeskarte 1:25`000

Die Karte und das Orthophoto werden georeferenziert über das DGM gelegt. Sie sind für die Berechnungen nicht zwingend notwendig, verhelfen aber dem Benutzer zu einer erleichterten Orientierung. Die Inputparameter und Resultate können verständlich und übersichtlich dargestellt werden. Das Aufnahmedatum der jeweiligen Orthophoto, resp. Ausschnitt der Landeskarte sollte korrespondieren, um Verwirrungen beim Betrachten zu verhindern. Ebenso verhält es sich mit dem DGM. In Abbildung 26 sind je ein DGM, Orthophoto und eine topographische Karte aus einem Geländeausschnitt abgebildet.

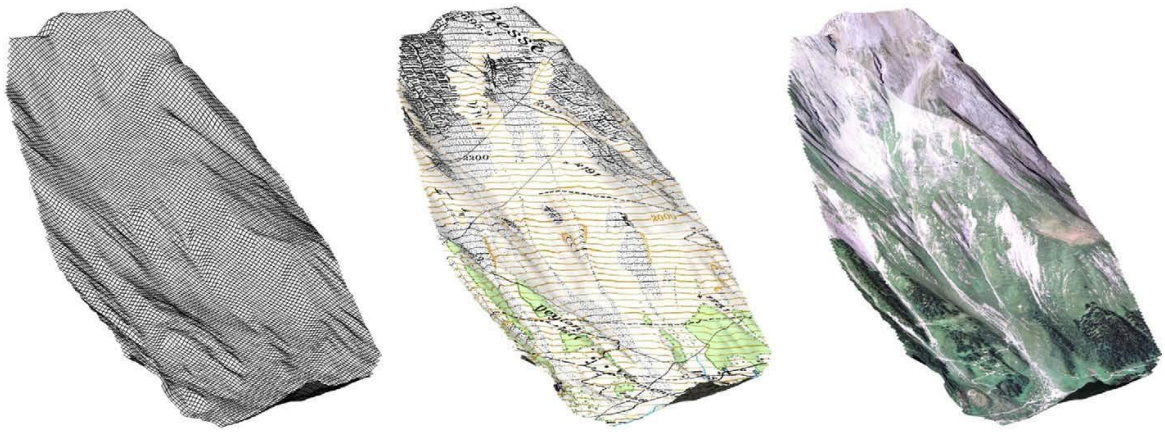


Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Vallée de la Sionne. Links das digitale Geländemodel (DHM), in der Mitte die dazu korrespondierende Landkarte und rechts das Orthophoto (Christen, Kowalski et al. 2010).

Gitterauflösung

Die Gitterauflösung gibt an, wie engmaschig die Berechnungen durchgeführt werden. In der Regel werden Gitterauflösungen zwischen 1 - 2 m verwendet, also proportional zum Volumen des Ereignisses (Stricker 2010).

Da es sich um aussergewöhnlich grosse Ereignisse handelt, wurden in dieser Arbeit mit Gitterauflösungen von 2.5 m gearbeitet.

Maximale Simulationsdauer

Mit dieser Funktion kann die Berechnungszeit für eine Simulation begrenzt werden. Ist allerdings nicht die Zeit das Stoppkriterium (Time end condition), sondern das Stoppen des Murgangs aufgrund des Energieverlustes (Low Flux), sollte die maximale Simulationsdauer gross genug gewählt werden (> als die Dauer des realen Murgangs).

Dump Step

Anhand der „dump steps“ kann angegeben werden, in welchen Intervallschritten eine Berechnung durchgeführt wird. Je kleiner das Intervall gewählt wird, umso genauer wird die Simulation berechnet. Allerdings benötigt ein kleineres Intervall dementsprechend mehr Speicherplatz auf dem Laufwerk des Rechners. Je nach verlangter Genauigkeit sollten die dump step Schritte angepasst werden.

Da es sich in „Arth“ und „Goldau“ um unterschiedlich grosse Murgänge gehandelt hat und sich die Speicherkapazität des verwendeten Rechners in engen Grenzen hielt, wurden für die Berechnungen dump step Intervallschritte von 10 – 30 s gewählt.

Dichte

Mit Dichte ist die effektive Materialgemischdichte gemeint, welche der Murgang transportiert. Diese kann wie bei Schneelawinen stark variieren (Scheuner 2007). Aus verschiedenen Publikationen geht allerdings hervor, dass eine Annahme der Dichte von 2000 kg/m^3 eine brauchbare bis gute Abschätzung sein dürfte (Costa 1984; Iverson 1997; Iverson und Denlinger 2001). Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit ebenfalls ein Wert von 2000 kg/m^3 angenommen.

Fliessdruck Lambda

Mit dem aktiv-passiven Fliessdruck λ wird die Energie beschrieben, welche bei der Streckung/Stauchung des Materials umgewandelt wird. Die Werte, welche dieser Koeffizient annehmen kann schwanken zwischen 0.5 und 4.6 [-] (Bartelt, Salm et al. 1999).

Aufgrund von Publikationswerten (Stricker 2010) und mündlichen Mitteilungen von B. McArdell und C. Graf wurden die Simulationen dieser Arbeit mit einem λ-Wert von 2.5, resp. 1.0 [-] durchgeführt (Kap. 5.1.7).

Anriss (release area)

Um einen Anriss zu modellieren, wird in RAMMS an der Stelle wo der Anriss stattfinden soll, eine Fläche ausgeschieden. Dazu definiert man eine konstante Anrisshöhe über die ganze Anrissfläche. So erhält man ein Anrissvolumen. Der Anriss wird somit als Blockanriss simuliert. Es ist möglich, verschiedene Anrissgebiete auszuscheiden, um verschiedenen Anrisshöhen und –volumina Rechnung tragen zu können. Sind die genauen Ausmasse des Anrisses nicht bekannt, sollte darauf geachtet werden, dass die Anrisshöhe nicht zu grosse Dimensionen annimmt. Andernfalls kann dies zu überhöhten Fliessgeschwindigkeiten führen.

Um die Anrissstellen und deren Ausmasse in RAMMS wiedergeben zu können, wurden diese anhand von Feldaufnahmen und Literaturrecherchen untersucht. Eine Auflistung der Anrissvolumina und –höhen ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tabelle 5: Kennzahlen der Anrissgebiete beider Murgänge (ohne Einbezug von Erosionsvolumen).

Murgang	Anrissfläche	Anrisshöhe	Anrissvolumen
	[m^2]	[m]	[m^3]
Goldau	22'825	6.40	191'700
Arth	8'925	4.03	48'500

Um die Anrisszone des Murgangs „Arth“ nachbilden zu können, wurden nebst einer Feldaufnahme vor Ort die Publikationen von Hunziker (2006) und Thuro, Rick et al. (2006) zu Rate gezogen. Zudem wurden Fotoaufnahmen, welche kurz nach dem Ereignis aufgenommen wurden, studiert. Aus dieser Fotoanalyse ging hervor, dass ca. 50`000 m^3 Material im Gebiet Roren anrissen (Abbildung 28).

Dasselbe Verfahren wurde ebenfalls für das Anrissgebiet des Murgangs „Goldau“ durchgeführt. Nebst Feldaufnahmen wurden der Bericht von Zimmermann (2006) und die Pläne des Differenzenmodells und des Höhenkurvenplans vom Ingenieurbüro Terra Data (2007a; 2007b) gesichtet. Das Anrissvolumen konnte so auf ca. 190`000 m^3 beziffert werden (Abbildung 27).

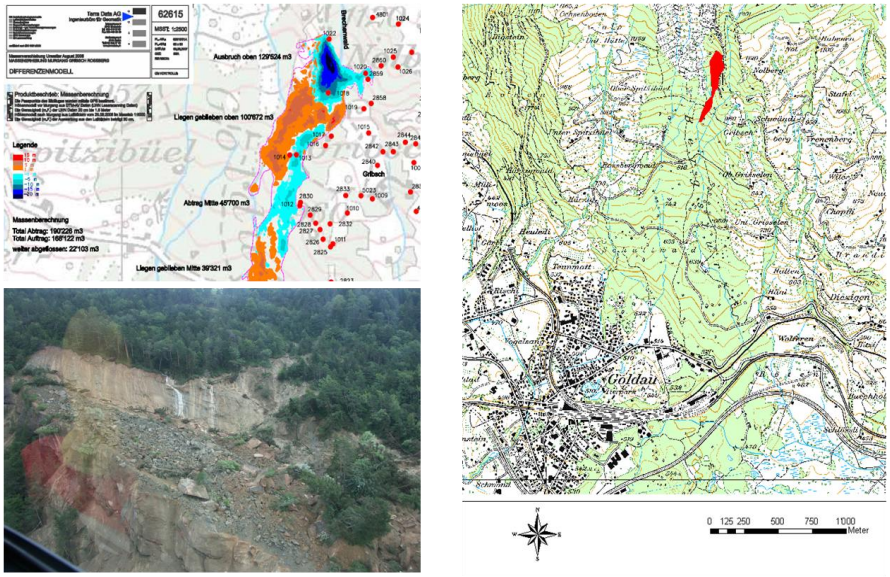


Abbildung 27: Der Anrissbereich des Murgangs „Goldau“. Links oben: Differenzmodell von Terra Data (2007a). Links unten: Fotoaufnahme des Anrissgebietes vom 23. August 2005 (aufgenommen von D. Bollinger). Rechts: Release area wie sie im RAMMS verwendet wurde (Kartengrundlage: PK25 © 2011 swisstopo, 5704 000 000).

Wald

Die Reaktion des Waldes auf einen Murgangereignis war ein Kernstück dieser Arbeit. Bisher fehlen Erfahrungen bezüglich Einfluss des Waldes auf ein Murgangereignis im

RAMMS. Vor allem quantitativ sind nur wenige Daten vorhanden. Gruber und Bartelt (2007) beschreiben in einem ersten Ansatz die Wirkung des Waldes auf die beiden Reibungsparameter μ und ξ (Erhöhung des Δμ um 0.02 [-] und einem fixem Wert für ξ von 400 m/s^2. Allerdings basiert diese Publikation auf Untersuchungen von Fliessschneelawinen und nicht von Murgängen. Trotzdem können die ermittelten Werte als ein erster Ausgangspunkt verwendet werden. Bartelt und Stöckli (2001) untersuchten den Einfluss von Bäumen (Wald) auf Fliessschneelawinen. Darin wird beschrieben, wie die Lawine beim Aufprall an Bäumen diese zwar brechen, knicken oder entwurzeln kann, jedoch bei diesen Vorgängen Energie verliert. Diese Verminderung der kinetischen Energie verlangsamt den Murgang.

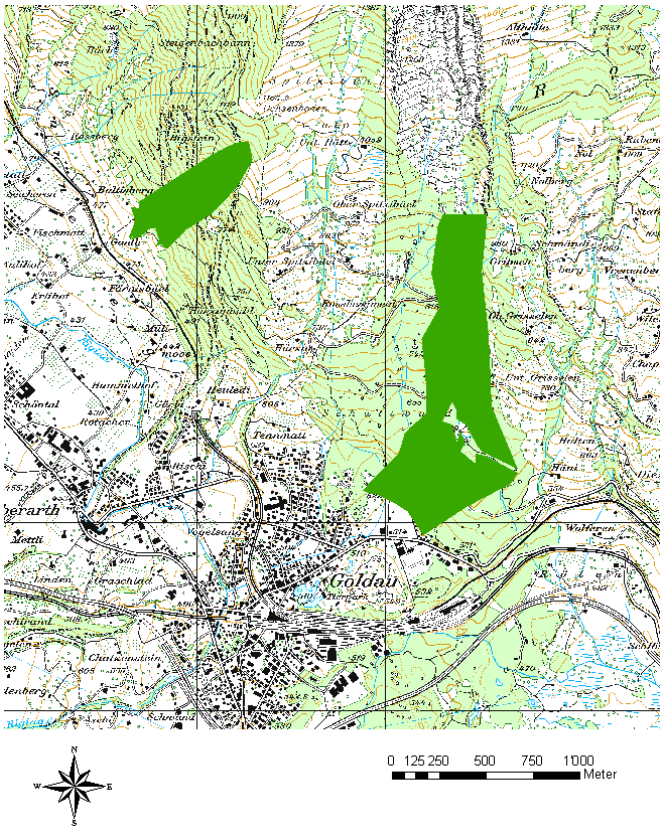


Abbildung 29: Shapefiles der beiden in RAMMS verwendeten „Waldflächen“. Die digitale Bestandeskarte ist abgebildet und liegt den beiden Polygonen zugrunde (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Um die Fläche des Waldes in RAMMS korrekt wiedergeben zu können, wurden einerseits die digitale Bestandeskarte von Arth und andererseits die topographische Landeskarte von vor 2005 im Massstab 1:25`000 verwendet. Aus diesen beiden Quellen konnte jeweils ein Shapefile für die betroffene Waldfläche beider Murgänge gezeichnet werden (Abbildung 29). Dieses Shapefile wurde anschliessend in RAMMS als „Waldfläche“ eingefügt. Der Wert für den Parameter μ wurde zu Beginn so belassen, wie er in der Literatur für Wald (und Fliessschneelawinen) angegeben wird. Dies war beim Parameter ξ nicht möglich, da der Wert aus der Literatur für Wald höher ist, als für diese beiden Murgänge überhaupt

möglich ist. Die Geschwindigkeiten der beiden Murgänge war zu gering, als dass man mit diesem Wert hätte operieren können. Aus diesem Grunde wurde der ξ-Wert des Waldes dem ξ-Wert des übrigen Geländes gleich gestellt. Näheres zu der Vorgehensweise wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Erosion

Um das komplexe Verhalten eines Fliessprozesses genauer wiedergeben zu können, besteht in RAMMS die Möglichkeit so genannte „Entrainment"-Prozesse mit einzubeziehen. Dabei handelt es sich um eine Aufnahme von Material aus dem Gerinne während des Fliessprozesses. Mit dieser Funktion können eine oder mehrere Flächen als Erosionsflächen ausgeschieden werden. Dies geschieht auf dem gleichen Weg wie eine release area gebildet wird. Diese Fläche kann mit verschiedenen Parametern noch spezifiziert werden: Höhe, Dichte, Erosionfaktor und Erosionsgesetz. Mit der Höhe bestimmt man die Erosionsmächtigkeit. Die Dichte beschreibt die spezifische Dichte des Materials, welches erodiert wird. Der Erosionsfaktor gibt an, zu welchem Prozentsatz die Erosionsfläche erodiert wird. Mit dem Erosionsgesetz wird schliesslich die Formel festgelegt, nach welcher das RAMMS die Erosionsberechnungen durchführt.

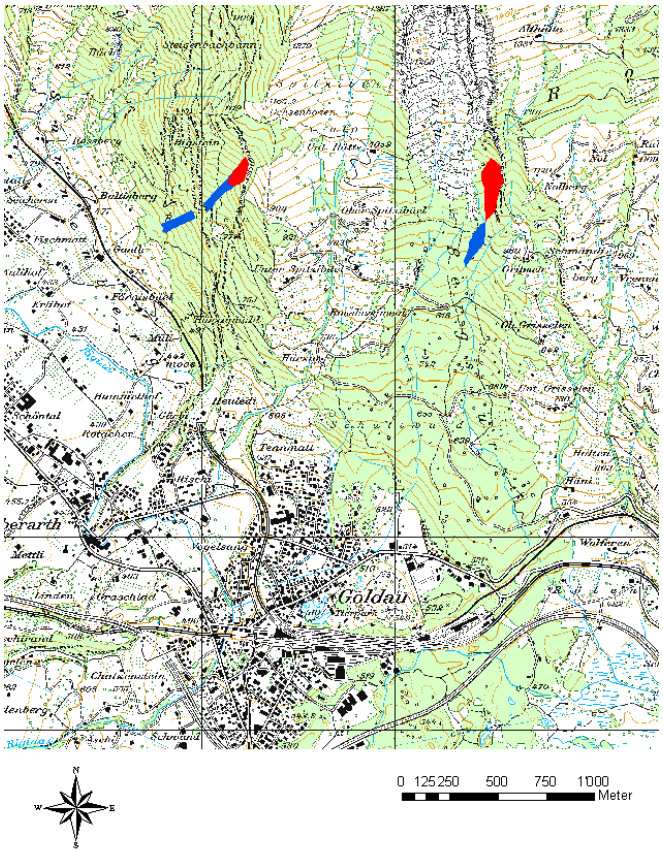


Abbildung 30: Lage und Grösse der Erosionsflächen wie sie in RAMMS verwendet wurden. Blau eingezeichnet sind die Erosionsflächen, rot die Anrissgebiete (wobei beim Murgang „Goldau die roten und blauen Gebiete zusammen ein grosses Anrissgebiet ergaben) (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Da im Unterschied zu Fliessschneelawinen (z.B. Christen, Bartelt et al. 2010) noch keine gesicherten Daten zu Erosion im Zusammenhang mit Murgängen für das RAMMS erhältlich sind, wurde vor allem anhand mündlicher Mitteilungen von C. Graf versucht realistische Simulationen zu berechnen. Die Grösse und Lage der Erosionsflächen konnte anhand von Feldbegehungen und des Differenzenmodels von Terra Data (2007a) abgeschätzt werden (Abbildung 30). Die Einflussfaktoren wurden nach Absprache mit C. Graf und aus Literaturrecherchen gewählt. Als Erosionsgesetz wurde das „velocity square driven law“ gewählt. Nähere Ausführungen dazu sind im Kapitel 5.1 beschrieben.

Interne kinetische Energie

Bei der Modellierung kann man die interne kinetische Energie im Rutsch- resp. Fliesskörper berücksichtigen mit dem Ziel ein realistisches Ablagerungsmuster zu rekonstruieren. So zeigten sich mit dieser Funktion deutlich bessere Resultate in RAMMS-Simulationen bei Fliessschneelawinen, sowie auch bei Hangmuren und Felsstürzen (Stricker 2007).

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde auf diese Funktion jedoch verzichtet.

Stopp-Kriterium

Mit der Funktion des Stopp-Kriteriums kann angegeben werden, wann im RAMMS eine Berechnung gestoppt werden soll. Falls die bewegende Masse des Prozesses einen vorher definierten Prozentsatz unterschreitet, wird die Berechnung terminiert. Damit kann verhindert werden, dass einzelne Berechnungen zu lange dauern, falls sich ein sehr kleiner Anteil des Fliessprozesses immer noch bewegt, welcher kaum mehr Einfluss auf den Gesamtprozess hat.

In dieser Arbeit wurde das Stopp-Kriterium bei 5 resp. 10% festgesetzt.

4.2.2 Modelloutput

RAMMS berechnet eine Vielzahl an Outputdaten. Es generiert Fliessgeschwindigkeit, Abflusshöhe, Auslaufdistanz, Erosion, Druck, Momentum, etc. Die Resultate sind in drei- oder zweidimensionaler Form ersichtlich. Des Weiteren kann an jedem beliebigen Punkt eine Profillinie erstellt werden. Die Resultate können als Shapefile oder ASCII-File exportiert werden. Ebenfalls möglich ist das Erzeugen eines Bildes (*jpg, *tiff, etc.) oder Animation (*gif).

5 Vorgehen und Methodik

Während diesem Abschnitt werden die Vorgehensweisen der RAMMS-Simulationen und der Feldaufnahmen für die Wald-Untersuchungen erläutert.

5.1 Modellierung der Murgänge in RAMMS

Die Modellierung der Simulationen mit dem Programm RAMMS hatte zum Ziel, die sich im August 2005 ereigneten Murgänge in Arth, („Arth“ und „Goldau“) möglichst realitätsgetreu nachzubilden. Darüber hinaus sollten aus den Simulationen Erfahrungen mit dem Programm gesammelt werden, die in die Weiterentwicklung des Moduls für Murgänge in RAMMS fliessen können.

5.1.1 Vorgehen

Die Modellierung der RAMMS-Simulationen beinhaltet eine Modellkalibrierung und Sensitivitätsanalysen verschiedener Parameter.

Ziel der Modellkalibrierung ist die Anpassung der murgang- und gebietsspezifischen Modellparameter an die Murgänge „Arth“ und „Goldau“, wobei das Anriss- und Erosionsvolumen der Murgänge variiert, sowie die Topographie verändert wurde. Die Kalibrierung in RAMMS erfolgte hinsichtlich der Voellmy-Salm Parameter μ und ξ. Mit der Kalibrierung der beiden Reibungsparameter und Veränderung der anderen Einflussgrössen wurde versucht, Werte für die trockene Reibung μ, resp. turbulente Reibung ξ zu finden, welche die ereigneten Murgänge vom August 2005 in einer Simulation am besten wiedergeben können.

Das Vorgehen basiert auf den Publikationen von Christen, Bartelt et al. (2010) und Bühler, Christen et al. (2010), welche anhand von Fliessschneelawinen eine „back calculation“ mit RAMMS durchführten.

5.1.2 Verwendete Daten

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits angemerkt, wurden die beiden in dieser Arbeit untersuchten Murgänge bereits detailliert vermessen und ausgewertet. Insbesondere der Bericht von Hunziker (2006) für den Murgang „Arth“, sowie derjenige von Zimmermann (2006) und die Pläne von Terra Data (2007a; 2007b) für den Murgang „Goldau“ enthielten die meisten (für die Untersuchungen dieser Arbeit) notwendigen Informationen. Weiter stellte Daniel Bollinger vom Amt für Naturgefahren des Kantons Schwyz seine Fotodokumentation über die Ereignisse zur Verfügung. Die Aufnahmen wurden noch während oder unmittelbar nach den Ereignissen gemacht. Dies ermöglicht eine realitätsgetreue Impression zu erhalten, wie die Ereignisse abgelaufen sind. Dazu wurden ebenfalls mehrere Feldbegehungen beider Gebiete durchgeführt, um einen persönlichen und genauen Eindruck der Geschehnisse zu erhalten und um allfällige weitere Daten zu sammeln.

Für die Daten der untersuchten Faktoren der Murgänge wurde folgende Literatur verwendet:

- Auslaufdistanzen
  - Fotodokumentation von D. Bollinger *(beide Murgänge)*
  - Differenzenmodell der Terra Data (2007a) *(Goldau)*
  - Höhenkurvenplan der Terra Data (2007b) *(Goldau)*
  - Bericht Zimmermann (2006) *(Goldau)*
  - Bericht Hunziker (2006) *(Arth)*

- (Maximale) Abflusshöhen
  - Bericht Zimmermann (2006) *(Goldau)*
  - Bericht Hunziker (2006) *(Arth)*
  - Mündliche Quellen (C. Graf, S. Weber) *(beide Murgänge)*
  - Feldbegehungen *(beide Murgänge)*

- (Maximale) Geschwindigkeit
  - Bericht Zimmermann (2006) *(Goldau)*
  - Bericht Thuro, Rick et al. (2006) *(Goldau)*
  - Bericht Hunziker (2006) *(Arth)*
  - Mündliche Quellen (C. Graf, S. Weber) *(beide Murgänge)*

- Fliessweg
  Fotodokumentation von D. Bollinger *(beide Murgänge)*
  Bericht Zimmermann (2006) *(Goldau)*
  Bericht Annen (2007) *(Goldau)*
  Bericht Hunziker (2006) *(Arth)*

Die Darstellung der Abflusshöhen von Hunziker (2006) in der Ablagerungszone ist in Abbildung 31 wiedergegeben, das Differenzenmodell von Terra Data (2007a) in Abbildung 32. Die vollständigen Pläne der Terra Data AG sind im Anhang angefügt. Auf ein Anhängen der kompletten Fotodokumentation von D. Bollinger im Appendix wurde verzichtet.

Die grössten Unsicherheiten der oben aufgelisteten Faktoren treten bei den Abflusshöhen, resp. Geschwindigkeiten auf. Es existierte[2] keine Messstation in den jeweiligen Gebieten, welche diese Grössen zum Zeitpunkt des Ereignisses hätten aufzeichnen können. Die Angaben, welche in den Berichten von Zimmermann (2006) und Hunziker (2006) gemacht werden, entstanden aus Berechnungen der Ereignisdauer, Fliessdistanz und Abschätzungen aus Erfahrungswerten, sowie von Augen- und Ohrenzeugen. Trotzdem wird auf eine Untersuchung dieser beiden Faktoren nicht verzichtet. Dies zum Einen weil die gemachten Angaben und Werte zwar nicht exakt erhoben, aber dennoch mit genügender Genauigkeit abgeschätzt werden konnten. Zum Anderen sind beide Grössen von erheblicher Wichtigkeit, sodass ein Weglassen ein Verfälschen der Simulationen zur Folge hätte und die Simulationen dieser Arbeit von geringerer Aussagekraft wären.

[2] Anmerkung: Es existiert auch heute noch keine Messstation, welche bei einem Murgang die Geschwindigkeit und Abflusshöhen messen könnte.

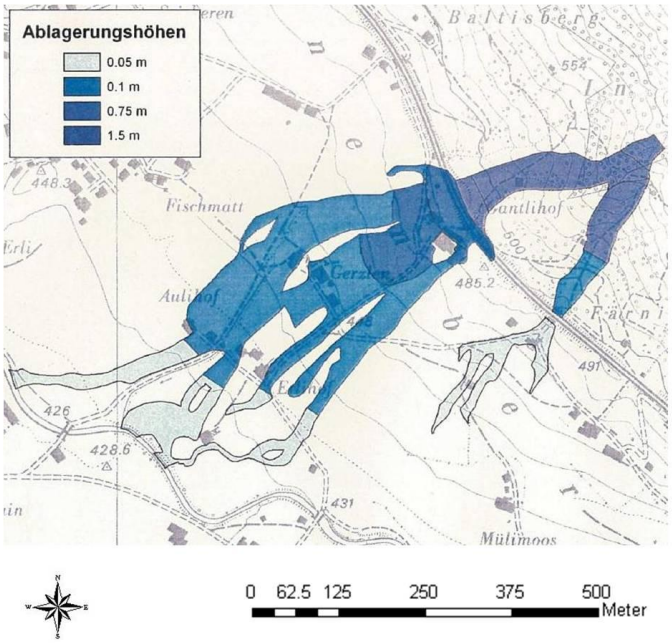


Abbildung 31: Ablagerungshöhen des Murgangs „Arth“, aufgenommen durch Hunziker (2006).

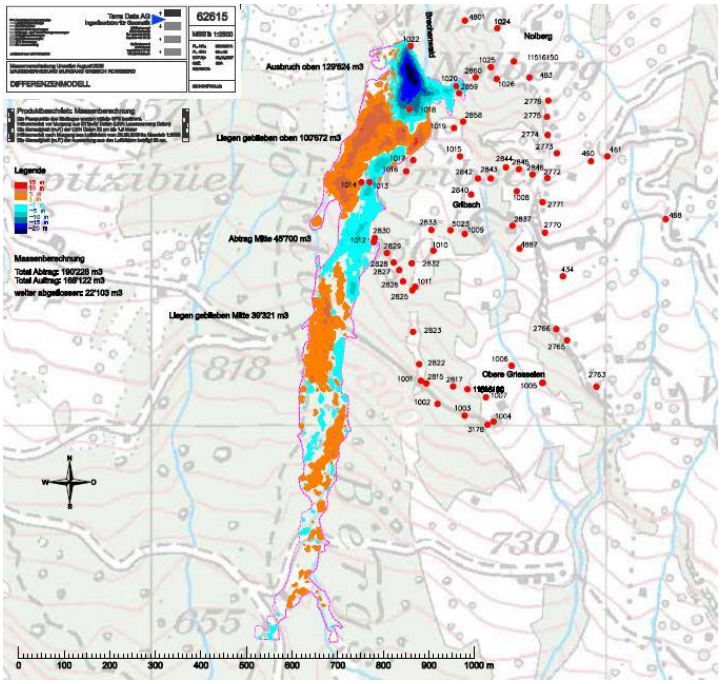


Abbildung 32: Differenzenmodell des Murgangs „Goldau“, aufgenommen mit GPS von Terra Data (2007a).

5.1.3 Veränderte Faktoren

Anrissvolumen und Erosion

Von beiden Murgängen waren die totalen Anrissvolumina bekannt (Hunziker 2006; Zimmermann 2006). Ebenfalls konnten Lokalität und Grösse der Anrissflächen ziemlich genau bestimmt werden. Vor allem beim Murgang „Goldau“ sind hier durch die GPS-Vermessungen der Terra Data AG exakte Angaben vorhanden. Die Anrisshöhen in RAMMS wurden mit Hilfe der jeweiligen Fläche und des Anrissvolumens berechnet (Kap. 4.2).

Aus den Berichten und Feldbegehungen ist bekannt, dass beim Murgang „Arth“ Erosionsprozesse in zwei Gebieten (ober- und unterhalb der Felsstufe bei Kote 800) stattgefunden haben. Verschiedene Spuren lassen auf Tiefenerosion schliessen: Vertiefung des Bachbettes, teilweise Ansätze von Levées und solider Fels an der Bachsohle. Hunziker (2006) hat die Erosion qualitativ und quantitativ aufgenommen. In RAMMS wurden daraus verschiedene Szenarien entwickelt. Durch eine Veränderung der Topographie (siehe unten) wurde das Gesamtvolumen des Murgangs geringfügig verändert. Ein künstlich erzeugter Damm verhinderte ein Ausbrechen des simulierten Murgangs in Richtung Färnisbüel. Um trotzdem mit der realen Geschiebebilanz übereinzustimmen, wurde in RAMMS das Volumen des Geschiebematerials, welches Richtung Färnisbüel ausgebrochen ist (ca. 8`000 m^3) vom Anriss- und/oder Erosionsvolumen subtrahiert (Tabelle 6).

Infolge der geringen Fliessgeschwindigkeit und der daraus resultierenden geringen Erosionsenergie, dürfte beim Murgang „Goldau“ keine oder nur wenig Erosion stattgefunden haben (Zimmermann 2006; mündl. Mitteilungen C. Graf und S. Weber, 04. November 2010). Dies bestätigten auch die Eindrücke der Feldbegehungen. Das Anrissgebiet war aber ziemlich gross und von eigenartiger Kontur (Abbildung 27). Es bestand nun die Möglichkeit das eine grosse Anrissgebiet in ein Kleineres umzuwandeln, bei welchem der abgetrennte Teil der Anrissfläche als Erosionsprozess simuliert wurde, weil in der Realität wahrscheinlich nicht die ganze Fläche der Anrisszone gleichzeitig ins Rutschen geraten ist. Eher der Fall gewesen sein dürfte, dass ein oberer Teil zuerst angerissen ist, und nachfolgend ein unterer durch die Instabilität und durch den ersten Anriss ebenfalls in Bewegung geriet. Da ein mehrphasiger Anrissprozess in RAMMS nicht modellierbar ist, wurde auf die Möglichkeit eines Anrisses mit Erosion gewechselt (Abbildung 30).

Folgende Situationen bezüglich Anriss und Erosion wurden simuliert:

Tabelle 6: In RAMMS simulierte Anriss- und Erosionsvolumen für die beiden Murgänge „Goldau“ und „Arth“.

Murgang	Anriss	Erosion
	[m^3]	[m^3]
Goldau	191`700	0
	154`000	35`000
Arth	78`200	0
	48`500	0
	48`500	31`000
	48`500	23`000
	40`500	31`000
	44`700	27`000

Topographie

Nach Modellierung von mehreren Simulationen fiel auf, dass die Fliesswege an gewissen Stellen nicht denjenigen der Wirklichkeit entsprechen. Dies traf bei beiden Murgängen zu und konnte bei praktisch allen verschiedenen Szenarien (Anriss- und Erosionsvolumen, μ und ξ Parametern) festgestellt werden. Auffallend an dieser Tatsache war der Ort dieses Phänomens, welches bei beiden Murgängen der Fall war, wo der Murgang aus dem Gerinne austrat (falls man das solche ein „Gerinne“ bezeichnen konnte). Beim Ereignis „Arth“ war dies kurz vor Austritt aus dem Wald der Fall. Ein Murschub brach Richtung Färnisbüel aus, während dem sich der grössere Teil Richtung Gantlihof bewegte. In der Realität konnte dies zwar auch so festgestellt werden, die Kubatur stimmt aber nicht überein. So simulierte RAMMS in den meisten Modellierungen den Ausbruch um ein Vielfaches grösser, mit mehr Geschiebe und ebenfalls in der totalen Länge der Murzunge.

Ein ähnliches Phänomen konnte beim Murgang „Goldau“ diagnostiziert werden. In diesem Fall trat der Murgang kurz nach der Überquerung der Strasse Richtung „Grosswiyer“ aus (Kap. 3.2.2) Hier floss weniger Material im Gerinne talwärts als das dies RAMMS simulierte.

Mögliche Ursachen für dieses Fehlverhalten des simulierten Modells gibt es mehrere. Ein möglicher Grund dürfte eine Verklausung sein, die RAMMS nicht simulieren konnte. Beim Fall „Arth“ könnte eine Verklausung dort aufgetreten sein, wo der Murgang das „Bachbett“ verlies. Nachdem ein erster Schub an besagter Stelle austreten konnte, verklauste sich ein Nachfolgender an dieser Austrittsstelle mit den am Gerinne stehenden Bäumen. Die anschliessenden Schübe wurden dadurch gezwungen im Bachbett weiter zu fliessen und traten so in Richtung Gantlihof aus dem Wald aus. Ähnlich könnte die Situation bei dem Murgang „Goldau“ gewesen sein, nur mit dem Unterschied, dass die Verklausung im Gerinne passierte. Dies etwas unterhalb der Strasse, welche nach Unter Grisselen führt. Eine solche Vermutung wird durch die Berichte von Zimmermann (2006) und Annen (2007)

gestützt. Beide beschreiben ein solches mögliches Szenario, welches zum Ausbruch des Murgangs geführt haben könnte.

Eine andere Erklärung für den in RAMMS zu gross geratenen Färnisbüel-Ausbruch des „Arth“-Murgangs könnte in der Rasterauflösung des Höhenmodells liegen. Das verwendete DTM-AV hat eine Auflösung von 2.5 m, das heisst, alle 2.5 m befindet sich ein gemessener Punkt (X-Koordinate, Y-Koordinate und exakte Höhe über Meer). Der Bereich, welcher zwischen zwei Gitterpunkten liegt, wird interpoliert. Es besteht die Möglichkeit, dass das Relief zwischen einzelnen Punkten nicht korrekt wiedergegeben wird, zum Beispiel eine Geländerippe nicht oder nur ungenügend im DTM-AV abgebildet wird (Abbildung 33). In der Realität hindert eine Überhöhung den Murgang am Austritt, oder erschwert ihn zumindest. Da diese Überhöhung nicht in RAMMS, resp. dem verwendeten Höhenmodell existiert, findet in diesem Fall der Murgang dieses Hindernis nicht vor und kann leichter aus dem Gerinne austreten.

Abschliessend kann allerdings nicht beurteilt werden, ob diese Theorien auch vollumfänglich der Realität entsprechen, denn dies sind Vermutungen und keine Tatsachen.



Abbildung 33: Querprofil durch ein virtuelles Gerinne. Die schwarze Linie entspricht der reellen Topographie, die rote derjenigen, wie sie möglicherweise in einem Höhenmodel (DTM-AV, etc.) wiedergegeben wird. Die roten Kreuze markieren die vom Höhenmodel aufgenommenen Rasterpunkte. Die Geländerippe am rechten Rand des Gerinnes wird nur ungenügend wiedergegeben.

Die zu grossflächige Darstellung des Ablagerungsgebietes des Murgangs „Arth“ in RAMMS kann möglicherweise noch andere Hintergründe haben. Ungefähr 200 m nach Austritt aus dem Wald trifft der Murgang auf den Bahndamm der SBB-Linie Goldau-Walchwil. Dieser ist ca. 3 m hoch und hat mehrere Unterführungen - so auch dort, wo der Fliessweg der Murzunge durchführt. Auf Fotos und Bildern ist ersichtlich, dass die Unterführungen mindestens temporär verstopft, resp. verklaust waren, so dass sich das Geschiebe an dieser Stelle aufgestaut hat (Abbildung 34).

In RAMMS wird keine Verklausung modelliert. Ein grosser Teil des Geschiebes fliesst ungehindert unter dem Bahndamm hindurch. Die Reichweite in RAMMS wird damit zu gross berechnet.

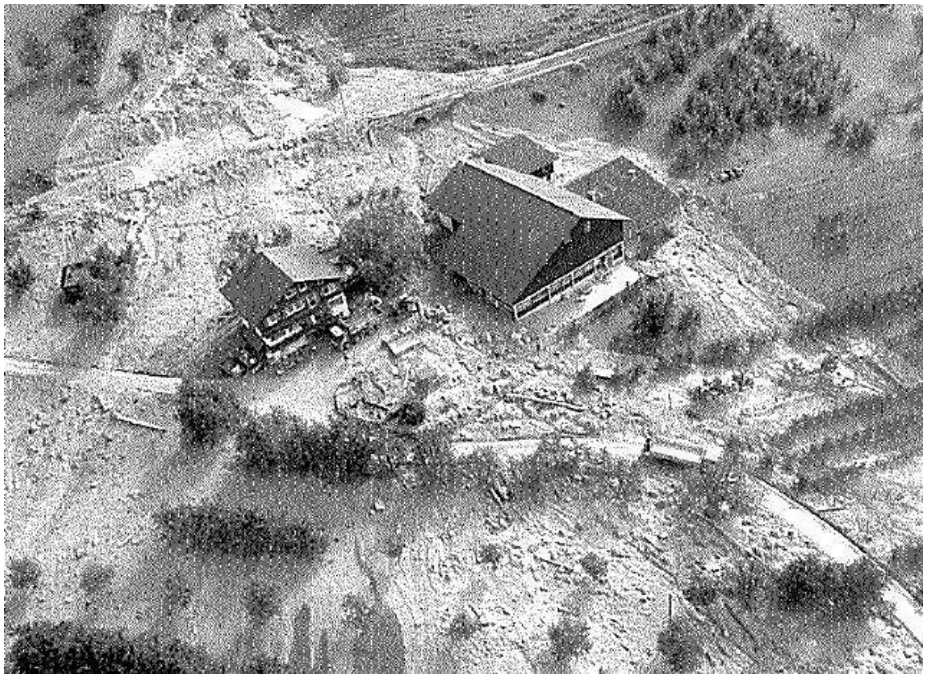


Abbildung 34: Aufnahme des Gantlihof am Morgen nach dem Ereignis. Oben mittig ist eine verstopfte Unterführung des Bahndammes sichtbar. Ähnlich sah es bei der Bahnunterführung bei Färnisbüel aus (aus Thuro, Rick et al. 2006).

Als Lösungsansatz für die beiden oben beschriebenen Fälle (Ausbruch beider Murgänge und fehlende Verklausung der Bahndammunterführung) wurde jeweils ein virtueller Damm konstruiert.

Beim Murgang „Arth“ wurde durch einen künstlich erzeugten Damm die Geländerippe, wo der Murgang ausbrach im Höhenmodel auf einer Länge von ca. 100 m um 10 m erhöht. Der erschaffene Damm wurde in den Berechnungen als erhöhte Geländerippe wiedergegeben, welche ein Ausbrechen des Murgangs an dieser Stelle erschweren sollte (Abbildung 35).

Um die Verklausungen im Gerinne (Ausbruch Murgang „Goldau“) und vor der Bahnunterführung (Verstopfung bei der Bahnlinie beim Murgang Arth) in RAMMS simulieren zu können, wurden ebenfalls künstliche Dämme an den betreffenden Stellen „gebaut“. Im Gegensatz zum anderen Fall wurden diese nicht als Erhöhung der Topographie, sondern als „echte“ Dämme projiziert. Somit wird die Topographie im DGM nicht um die Anzahl Meter erhöht, sondern auf das Relief im Modell ein Damm gesetzt. Die Ausmasse der Dämme betrugen ca. 20 m Länge und 3 m Höhe (ungefähr die Höhe des Bahndammes an dieser Stelle) parallel zur Bahnlinie (Bahnlinienunterführung „Arth“), resp. ca. 100 m Länge und 10 m Höhe quer über das angedeutete Gerinne (Murgangausbruch „Goldau“). Die virtuell erstellten Dämme sind in Abbildung 35 eingezeichnet.

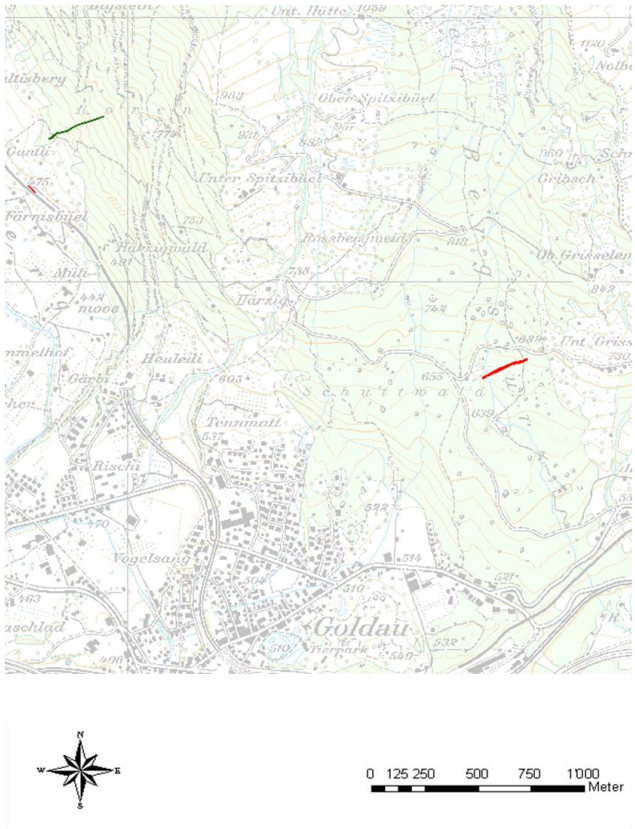


Abbildung 35: Lage und Grösse der virtuell gebauten Dämme (orange) und der Geländeerhöhung (dunkelgrün) (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Kalibrierung von μ und ξ

Um einen Ansatz zu erhalten in welchem Bereich sich die Werte der Reibungsparameter bewegen könnten, wurde diverse Literatur konsultiert (Zimmermann, Mani et al. 1997; Gamma 1999; Rickenmann, Laigle et al. 2005; Naef, Rickenmann et al. 2006; Scheuner 2007; Armento, Genevois et al. 2008; Pirulli und Sorbino 2008; Sosio, Crosta et al. 2008; Stricker 2010). Ausgegangen von diesen Erfahrungswerten wurden anschliessend Reibungsparameterpaare gesucht, welche die Kalibrierungskriterien am besten erfüllten (Kalibrierungskriterien siehe unten). Diese „Best-Fit“-Werte sind im Kapitel 6.1.2 zu finden, und bildeten den Ausgangspunkt für die Sensitivitätsanalysen.

5.1.4 Kalibrierungs-Kriterien

Die untersuchten Faktoren wurden oben bereits beschrieben. Da RAMMS alle diese Grössen zwar berechnen kann, aber wahrscheinlich nicht für alle gleichzeitig genügend gute Resultate liefert, wurden Prioritäten gesetzt. Das Priorisieren der Faktoren Auslaufdistanz, Abflusshöhe, Geschwindigkeit und Fliessweg basierte auf der Qualität der verfügbaren Daten.

Erste Priorität: Fliessweg

Zweite Priorität: Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche)

Dritte Priorität: (Maximale) Fliessgeschwindigkeit

Vierte Priorität: (Maximale) Abflusshöhe

Nachfolgende Erläuterungen sollen die Wahl der Prioritäten und die Vorgehensweise veranschaulichen:

Fliessweg: Der Fliessweg und die dabei inbegriffenen allfälligen Ausbrüche des Murgangs wurden qualitativ und quantitativ begutachtet. Anhand von Fotodokumentationen, aufgenommen während und nach den Ereignissen, konnten qualitative Vergleiche zu den RAMMS-Simulationen gezogen werden bezüglich Fliessweg, Breite des Murgangs, Ausbruchsort und Grösse eines Ausbruchs. Quantitativ wurde die Länge des allfälligen Ausbruchs gemessen und mit den Daten des real existierenden Ausbrucharms verglichen. Dazu wurde für den Fall „Arth“ die Aufnahme von Hunziker (2006) verwendet (Abbildung 31), für den Fall „Goldau“ das Differenzenmodell von Terra Data (2007a) (Abbildung 32).

Die Differenz der simulierten Längen der Ausbrüche wurde in Toleranzbereiche eingeteilt:

Abweichungsbereich ±10 %	gut	(grün)
Abweichungsbereich ±20 %	genügend	(gelb)
Abweichungsbereich >20 %	ungenügend	(rot)

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche): Die Auslaufdistanzen wurden qualitativ und quantitativ gemessen.

Die Auslaufdistanzen der Simulationen im Ablagerungsgebiet des Murgangs „Arth“ wurden mit der Aufnahme von Hunziker (2006) verglichen (Abbildung 31). Dies geschah primär auf dem 0.75 m und 1.5 m Niveau (durchschnittliche Ablagerungshöhe). Sekundär wurden auch Auslaufdistanzen kleinerer Niveaus in die Bewertung mit einbezogen. Diese waren allerdings mit einer grösseren Unsicherheit behaftet und hatten dadurch nur marginale Aussagekraft.

Bei den Simulationen des Murgangs „Goldau“ dienten die Terra Data (2007a; 2007b) Pläne, sowie Fotodokumentationen als Vergleichsreferenzen. Die Toleranzbereiche waren die gleichen wie beim Kriterium Fliesswege (Differenz ≤10 % grün, ≤20 % gelb, ≥20 % rot).

Abflusshöhe: Die maximale Abflusshöhe wurde bei beiden Murgängen an jeweils drei gewählten Punkten gemessen. Die Messstandorte werden im Kapitel 5.1.5 genauer erläutert.

Beim Murgang „Arth“ wurden die maximalen Abflusshöhen wie folgt geschätzt: Oberhalb der Felskante konnte bei Feldaufnahmen aufgrund von Spuren (Bachbettbreite/ -tiefe, Tiefenerosion) eine maximale Abflusstiefe von ungefähr 3.0 - 4.0 m abgeschätzt werden. Für die Simulationen wurde ein Wert von ≤ 4.0 m maximaler Abflusshöhe als gut eingestuft, bis 4.5 m als noch tolerierbar und noch höhere Werte als ungenügend (Tabelle 7). Beim Messpunkt *Austritt aus dem Wald* konnte aufgrund der Merkmale im Feld kein eindeutiger Maximalwert eruiert werden. Nach Abbildung 31 dürften die durchschnittlichen Abfluss-, resp. Ablagerungshöhen mindestens 1.5 m betragen haben. Deshalb wurden modellierte Werte an dieser Stelle grün eingefärbt, falls sie eine Höhe von mehr als 1.5 m aufwiesen, gelb falls sie zwischen 0 – 20 % geringere Höhen aufwiesen und rot falls noch geringere Höhen erreicht wurden. Beim Messpunkt *Gantlihof zwischen Stall und Haus* ist bekannt, dass die maximale Abflusshöhe an dieser Stelle zwischen 1 - 2 m betrug, rundherum im Schnitt 0.75 m (Hunziker 2006). Für die Simulationen wurde dieser Wertebereich als gutes Resultat eingestuft (0.75 – 1.8 m). Als noch genügend wurden Simulationen mit Werteabweichungen von bis zu 20 % akzeptiert.

Der Murgang „Goldau“ bietet weniger Anhaltspunkte. Einzig das Differenzenmodell von Terra Data (2007a) bietet beim Messpunkt *Strasse obere Grisselen* eine genügend gute Datengrundlage. Dort betrug die maximale Abflusshöhe laut Plan zwischen 1.0 – 5.0 m. Bis 5.5 m (≤10 % Toleranz) wurde ein simulierter Wert ebenfalls noch als genügend realitätsnah eingestuft.

Eine Zusammenstellung der oben genannten Grenz- und Toleranzwerte ist in Tabelle 7 zu sehen.

Tabelle 7: Übersicht der getroffenen Annahmen hinsichtlich der Datenwerte und Messpunkte. Alle Angaben in Metern.

Murgang	Gut	Genügend	Ungenügend
Arth			
Oberhalb Felskante	≤ 4.0	≤ 4.5	> 4.5
Vor Austritt aus dem Wald	≥ 1.5	≥ 1.2	< 1.2
Beim Gantlihof	0.75 - 2.0	≤ 2.2	< 2.2
Goldau			
Strasse obere Grisselen	≤ 5.0	≤ 5.5	> 5.5

Fliessgeschwindigkeit: Aufgrund fehlender Messstationen konnte an keiner Messstelle die maximale Geschwindigkeit exakt gemessen werden. Trotzdem konnte an einigen Punkten eine verlässliche Abschätzung gemacht werden. In mehreren Berichten wurden die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der jeweiligen Ereignisse geschätzt (Hunziker 2006; Thuro, Rick et al. 2006; Zimmermann 2006; Annen 2007). Die meisten Daten stammen von

Augenzeugenaussagen. Zusätzlich konnte die durchschnittliche Geschwindigkeit über die bekannte Gesamtdauer und totale Länge der Murgänge ungefähr ermittelt werden.

Murgang „Arth“: Nach Berichten zufolge und persönlichen Mitteilungen von S. Weber dürfte die maximale Geschwindigkeit oberhalb der Felskante nicht über 10 – 15 m/s betragen haben. Modellierte höhere Werte wurden deshalb rot deklariert. Beim Gantlihof bestehen Aussagen, dass die Geschwindigkeit „wenige m/s“ betragen hat (Hunziker 2006). Da dies aber für die meisten in RAMMS modellierten Werte zutrifft (Bandbreite grösstenteils von 1 – 5 m/s), konnten an diesem Punkt keine verlässliche und gut abgestützte Differenzierungen gemacht werden.

Murgang „Goldau“: Laut Publikationen und Augenzeugenberichten war die Maximal- und Durchschnittsgeschwindigkeit extrem niedrig - betrug wenige Meter pro Minute (Zimmermann 2006; Thuro, Rick et al. 2006; Annen 2007). Dies traf auf der ganzen Länge des Murgangs zu. In RAMMS gelang es nicht, auch nur annähernd die Geschwindigkeiten zu modellieren. Auch mit den besten Wertepaaren floss der Murgang um mindestens das 10 – 20 fache zu schnell talwärts (Kap. 6.1.2). Aus diesem Grund wurde auf eine Klassifikation des Faktors Geschwindigkeit am Murgang Goldau verzichtet.

Da die meisten oben genannten Daten Abschätzungen oder Annahmen sind, wurden bei der Beurteilung der einzelnen Simulationen die Grenzwerte nicht als absolut strikte und unumstössliche Ausschlusskriterien aufgefasst. Das Gesamtbild hatte ebenfalls einen Einfluss und ein Wertepaar konnte trotz nicht-Erfüllens einzelner Kriterien ein „Best-Fit“-Kandidat sein.

5.1.5 Erläuterungen zu den Messstandorten

Keine der beiden untersuchten Murgänge besass oder besitzt Messstationen, welche ein Ereignis hätte aufzeichnen können. Deshalb konnten die Messpunkte für die simulierten Murgänge in RAMMS mit Einschränkung frei gewählt werden. An ihrem Standort massen die Messstationen die maximale Geschwindigkeit, die maximale Abflusshöhe, den maximalen Druck und das Momentum für den modellierten Murgang. So schufen diese Messpunkte eine Basis für Vergleiche von modellierten Murgängen in RAMMS, nicht aber für Vergleiche mit den echten Murgängen.

Der Standort eines jeden Messpunktes wurde nicht zufällig, sondern nach bestimmten Grundsätzen gewählt, damit die Ergebnisse so aussagekräftig wie möglich waren. Gewählt wurden strategisch wichtige Punkte in den Murgangfliesswegen, an welchen aussagekräftige Informationen über die Abflusshöhen und Fliessgeschwindigkeiten der Murgänge gewonnen werden konnten. Auf der anderen Seite mussten die Standorte dort platziert werden, wo bereits Informationen über die reellen Murgänge vorhanden waren. Die Messstationen mussten so durch ein *Trade-Off*-Verfahren platziert werden.

Bei beiden Murgängen, „Arth“ und „Goldau“, massen an jeweils drei Standorten die virtuellen Messstationen die maximale Geschwindigkeit und die maximale Abflusshöhe (Abbildung 36).

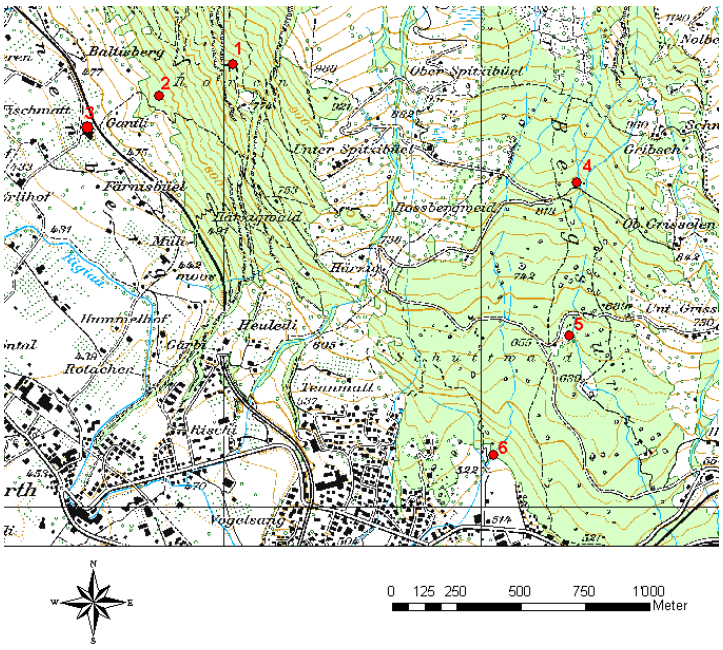


Abbildung 36: Die virtuellen Messstandorte der beiden Murgänge „Arth“ (1 – 3) und „Goldau“ (4 – 6):1) Oberhalb Felskante, 2) Vor Austritt aus dem Wald, 3) Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall, 4) Strasse obere Grisselen, 5) Bei Austritt aus dem Gerinne und 6) Bei Austritt aus dem Wald (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Murgang „Arth“

Messpunkt *Oberhalb Felskante (Nr. 1)*, Koordinaten 684/025//213/715, Kote 800.

Die Messstelle befindet sich kurz oberhalb der Kante, bei welcher sich der Murgang „Arth“ über die Felsen stürzte. An ihrem unteren Ende grenzt die obere Erosionsfläche an die „Messstation“. Durch die Spuren aus den Feldaufnahmen sind verlässliche Abschätzungen der maximalen Abflusshöhe machbar gewesen.

Messpunkt *Vor Austritt aus dem Wald (Nr. 2),* Koordinaten 683/675//213/570, Kote 560.

Kurz unterhalb des Ausbruchs Richtung Färnisbüel liegt der Messpunkt vor Austritt aus dem Wald. Die Messstelle befindet sich noch innerhalb des Waldperimeters. Durch Feldaufnahmen und Aufnahmen von Hunziker (2006) war eine Abschätzung der Abflusshöhe möglich.

Messpunkt *Beim Gantlihof zwischen Stall und Haus (Nr. 3),* Koordinaten 683/465//213/465, Kote 480.

Aufnahmestelle für die Messungen liegt auf dem Hofplatz zwischen dem Stall und dem Wohnhaus des Gantlihofes. Aufgrund des Berichts von Hunziker (2006) und mündlichen Mitteilungen von S. Weber konnten die Maximalgeschwindigkeit bzw. Abflusshöhe exakt genug abgeschätzt werden. Diese Messung erfolgte an einem Ort, der nicht mehr im Waldperimeter liegt.

Murgang „Goldau“

Messpunkt *Strasse obere Grisselen (Nr. 4),* Koordinaten 685/385//213/240, Kote 810.

Ungefähr in der Mitte des Murgangquerschnitts liegt der Messpunkt. An dieser Stelle im Wald ermittelte die Terra Data mittels GPS die Ablagerungs- resp. Abflusshöhe.

Messpunkt *Austritt aus dem Gerinne (Nr. 5),* Koordinaten 685/350//212/685, Kote 665.

Dieser Messpunkt befindet sich an der Stelle, wo der Murgang über dem Gerinne austrat und Richtung Grosswiyer weiterfloss. Es konnten keine verlässlichen Abschätzungen gemacht werden, aber aufgrund der Teilung des Murgangs sollte die Abflusshöhe geringer sein als beim oberen Messort. Liegt wie alle „Messstationen“ des Murgangs „Goldau“ im Waldperimeter.

Messpunkt *Austritt aus dem Wald (Nr. 6),* Koordinaten 685/060//212/195, Kote 525.

Wie der Name suggeriert, ist der Messpunkt kurz vor dem Waldrand lokalisiert. An dieser Stelle fächerte sich der Murgang noch nicht auf. Der Schwemmkegel befand sich gleich unterhalb davon. Aufgrund von Fotodokumentationen konnte die Abflusshöhe abgeschätzt werden. Diese ist allerdings mit einem beträchtlichen Unsicherheitsfaktor behaftet, da die Aufnahmen nur unpräzise Schlüsse zuliessen.

5.1.6 Eruierung von „Best-Fit“-Wertepaaren

Auf der Suche nach den besten Wertepaaren für das jeweilige Murgangereignis wurden alle mit RAMMS modellierten Simulationen mit den Kriterien für die Kalibrierung verglichen. Die Reihenfolge ergab sich durch die Prioritäten der einzelnen Faktoren.

5.1.7 Sensitivitätsanalysen

Nach der Kalibrierung der Reibungsparameter wurden mit den gefundenen „Best-Fit“-Wertepaaren Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Ziel dabei war es, Erfahrungen über die untersuchten Faktoren und deren Auswirkungen auf eine Modellierung zu sammeln. Ein zweites Ziel war eine mögliche Verbesserung der Modellierung des „Best-Fit“-Simulation zu erreichen.

Sensitivitätsanalyse „Wald-μ“

In den bisher durchgeführten Simulationen in RAMMS wurde dem Faktor Wald eine Erhöhung des Wertes für die trockene Reibung μ um Δ+0.02 [-] zugesprochen. Der Wert für die turbulente Reibung ξ wurde konstant gehalten, unabhängig ob „Wald“ oder „Nicht-Wald“.

In der Sensitivitätsanalyse für den Einfluss des Waldes wurde ausgehend von der „Best-Fit“-Simulation der Wert für das „Wald-μ“ variiert. In gleichmässigen Erhöhungen des μ auf der Fläche des Waldes um jeweils +Δ0.02 [-] wurden Simulationen in RAMMS modelliert. Ebenfalls wurde eine Simulation ohne Waldeinfluss modelliert, um Vergleiche anzustellen, welchen Einfluss der Wald (= Erhöhung des Δμ) auf eine Simulation in RAMMS hat.

Sensitivitätsanalyse Dichte des Erosionsmaterials

In der Kalibrierung betrug die spezifische Dichte des Erosionsmaterials konstant 1800 kg/m^3. Dieser Wert entspricht ungefähr der Dichte eines sehr skelettreichen Bodens, wie zum Beispiel eines Rohbodens oder Ranker (mündliche Mitteilung C. Graf und M. Frehner, 21. Februar 2011). Um einen möglichen Einfluss des Verhaltens der Murgänge hinsichtlich der Dichte untersuchen zu können, wurde der Wert variiert. Die veränderte Dichte des erodierbaren Materials wurde mit den Einstellungen der „Best-Fit"-Simulation modelliert. Ein „normaler" Waldboden hat eine spezifische Dichte von ungefähr 1500 kg/m^3 (Lüscher 1999), ein ausgeprägt felsiger und steiniger Boden ca. 2200 kg/m^3 (Andres 2010). Alle drei Werte wurden in einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Sensitivitätsanalyse aktiv-passiver Fliessdruck λ

Das verwendete λ ist ein veränderlicher Wert. Er wurde aufgrund mündlicher Mittelungen und einzelnen Publikationswerten auf 2.5 [-] gesetzt. Es existieren im Gegensatz zu anderen Inputparametern jedoch noch sehr wenige publizierte Vergleiche, es wäre deshalb durchaus möglich mit einem anderen Wert ein besseres Resultat zu erhalten. Nach Rücksprache mit C. Graf wurde die „Best-Fit"-Simulation mit einem Wert für λ von 1.0 [-] nochmals durchgeführt.

5.2 Vorgehen der Untersuchung des Waldeinflusses auf die Murgänge

Die Ziele dieser Untersuchungen sind eigentlich schon in der Fragestellung und Leitfragen erläutert worden. Primär geht es um die Interaktion der Murgänge mit dem umgebenden Wald. *Gibt es bei einem Murgangereignis Tendenzen hinsichtlich der Standfestigkeit einer Baumart und des Durchmessers (≈Alter eines Baumes)?* und *Welches sind die hauptsächlichen Versagensmechanismen der Bäume bei einem Murgangereignis?,* diese beiden Fragestellungen sollten zu beantworten sein. Als Untersuchungsgrundlagen dienten die auch in der RAMMS-Untersuchung verwendeten Murgangereignisse vom Rossberg im August 2005. Aufgrund der an diesen beiden Murgängen gewonnenen Erkenntnisse, sollte es möglich sein, allgemein gültige Aussagen machen zu können.

Durch Feldaufnahmen konnten die notwendigen Daten gesammelt werden. Diese wurden mittels einer Literaturrecherche weiter verarbeitet.

Die in dieser Arbeit gemachten Untersuchungen beschränken sich auf die Transitgebiete von Murgangprozessen. In der Anrisszone spielten durch die Art und Weise des Anrisses Waldeinflüsse keine entscheidende Rolle, wie dies in Kapitel 3.2 dokumentiert wird. Im Ablagerungsgebiet kamen Waldeinflüsse ebenfalls nicht zum Tragen. In der Ablagerungszone des Murgangs Arth befindet sich kein Wald. Beim Murgang Goldau trifft dies halbwegs zu, ein Teil des Ablagerungsgebietes befindet sich oberhalb des Gebietes "Grosswiyer" im Wald. Dieser wurde aber nicht untersucht, die Aufnahme beschränkten sich auch beim Murgang Goldau auf die Transitzone.

5.2.1 Methode

Einfluss Baumart

Diese Untersuchung sollte herausfinden, ob es Baumartes gab, welche den beiden Murgangereignissen punkto Standfestigkeit besser Paroli bieten konnte, will heissen, stehen geblieben ist, während dem andere Baumarten mit ähnlichem Bursthöhendurchmesser vom Murgang zerstört wurde.

Zu diesem Zweck wurden beide Murgänge auf der ganzen Länge der Transitzone auf stehengebliebene Bäume abgesucht. Dies auf der ganzen Breite des Fliessweges. Die Grenze dazu konnte visuell ziemlich scharf gezogen werden (Abbildung 37).



Abbildung 37: Orographisch linksseitige Grenze des Murgangs Goldau mit dem Wald. Die Grenzlinie kann ziemlich exakt festgelegt werden (Fotoaufnahme vom 09. November 2010).

Bei stehengebliebenen Bäumen im Gerinne wurde Standort, Art und Durchmesser (BHD) aufgenommen. Die Aufnahme des Durchmessers diente der zweiten Untersuchung, Abhängigkeit der Standfestigkeit bezüglich Durchmesserstärke. Das Notieren des Standortes diente als allgemeine Information und konnte eventuell weiter verwendet werden.

Weiter wurde in den Aufnahmeflächen bei allen Stämmen Art und Brusthöhendurchmesser aufgenommen. Genaueres über die Aufnahmeflächen ist im Kapitel 5.2.2 zu lesen. Die Baumartenverteilung in den Aufnahmeflächen wurde mit derjenigen der entsprechenden Waldgesellschaft nach Ellenberg und Klötzli (1972) verglichen. Als zusätzliche Vergleichsgrundlage wurden die Publikationen von Ott, Frehner et al. (1997), Frehner, Wasser et al. (2005), sowie von Frey (2005) verwendet. Die Vergleiche sollten allfällige Abweichungen in der Baumartenverteilung feststellen. Wäre dies der Fall, könnte daraus geschlossen werden, welche Baumarten das Murgangereignis besser überstanden haben.

Einfluss Durchmesser

Das Verfahren der Untersuchung der Durchmesser auf Brusthöhe basiert auf dem gleichen Prinzip wie oben beschrieben mit der Baumartenzusammensetzung. Als Vergleichsgrundlage diente bei dieser Analyse die Bestandeskarte des Kantons Schwyz. Da diese nur eine grobe Einteilungsskala aufweist, wurde eine zweite Vergleichsstudie durchgeführt. Die Aufnahmeflächen wurden parallel zur Fliessrichtung des Murgangs in zwei gleich grosse Hälften aufgeteilt, in eine „innere“ und eine „äussere“ Hälfte. Zwischen diesen beiden Hälften wurde jeweils die BHD-Verteilung verglichen. Mit dieser Methode sollte herausgefiltert werden, ob eine Ausdünnung in Richtung des Murgangs stattgefunden hat.

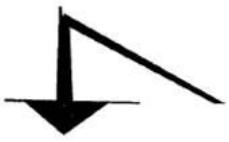
Versagensart		Beschreibung
Wurzelbruch		Ein oder mehrere Wurzeln auf der Leeseite sind gebrochen. Der Wurzelballen ist gebrochen, nur ein Teil wird angehoben. Der Stammfuss liegt direkt am Boden oder in nur geringer Höhe
Wurf		Der gesamte Wurzelteller wird ausgehoben. Der Wurzelteller bleibt erhalten und der Stammfuss liegt erhöht
Stockbruch		Der Stamm wird am Stammfuss gebrochen, der Wurzelteller bleibt im Boden
Stammbruch		Der Bruch erfolgt am Stamm, meist zwischen Fuss und unterem Kronenansatz

Abbildung 38: Beschreibung und schemenhafte Darstellung der verschiedenen vorkommenden Versagensarten bei Bäumen durch externe oder interne Einflüsse (Vanomsen 2006).

Bei den Feldaufnahmen und –begehungen wurde im Gerinne, sowie links- und rechtsseitig davon am Waldrand nach Spuren durch den Murgang zerstörter Bäume gesucht. Das Interesse dabei galt der Art des Versagensmechanismus. In Abbildung 38 werden die verschiedenen Versagensmechanismen illustriert. Ganze umgestürzte Bäume, (umgestürzte) Wurzelstöcke und –teller, Stirzel und gebrochene, stehende Stämme wurden dokumentiert. Liegendes Holz (Stämme, Äste, etc.) wurden nicht aufgenommen,

da diese nicht auf eine spezifische Versagensart hinweisen. Mit der Aufnahme dieser Daten, sollte herausgefunden werden, durch welchen Versagensmechanismus die Bäume hauptsächlich beim Durchgang des Murgangs beschädigt oder zum Absterben gebracht worden sind. Weiterführend könnte der Versagensmechanismus Aufschluss darüber geben, welche Baumart vielleicht am ehesten der Energie eines Murgangs standhalten könnte.

5.2.2 Vorgehen

Aufnahmeflächen

Um die Stammzahl, Brusthöhendurchmesser und Baumartenverteilung im relevanten Gebiet aufnehmen zu können, wurden 5 Aufnahmeflächen ausgeschieden. Diese ca. 20 x 20 m grossen Flächen wurden nicht zufällig irgendwo am Rossberg verteilt, sondern, durch Kriterien beeinflusst, willkürlich an spezifische Standorte platziert. In Abbildung 39 ist der Standort jeder Fläche eingezeichnet. Das Hauptkriterium war die Nähe zu den Murgangbahnen. Das eigentliche Interesse der Untersuchungen galt dem durch die Murgänge zerstörten Wald. Um eine grösstmögliche Simultanität aller Einflussfaktoren (Exposition, Relief, Boden, etc.) zu erreichen, wurden die Aufnahmeflächen so nah als möglich an die Murgangfliessstrecke gelegt. So befinden sich alle Flächen unmittelbar an den neuen durch die Murgangprozesse entstandenen Waldrändern. Das Nebenkriterium beinhaltet das platzieren der Aufnahmeflächen an neuralgischen Stellen. In der Nähe eines jeden Areals befindet sich oder ereignete sich etwas Aussergewöhnliches. Diese Seltsamkeiten sind nachfolgend aufgelistet:

Fläche 1: Unmittelbar oberhalb der Stelle, bei welcher der Murgang Goldau Richtung „Grosswiyer“ ausgebrochen ist.

Fläche 2: Oberhalb der Strasse „Obere Grisselen“. Gleich neben der Aufnahmefläche befindet sich ein grosser Felsblock vom Bergsturzereignis 1806.

Fläche 3: Zwischen der Hauptfliessstrecke des Murgangs "Goldau" und dem kleinen Nebenarm.

Fläche 4: Unmittelbar unterhalb des Anrissgebietes, wo sich der Murgang „Arth“ verengte und später über die Felskante floss.

Fläche 5: Etwas oberhalb der Ausbruchstelle, bei welcher sich der Murgang „Arth“ Richtung Färnisbüel bewegte.

Die willkürliche Verteilung der Aufnahmeflächen hatte als Hintergrund, ob aufgrund der Aufnahmen ein möglicher Grund für die dort passierten aussergewöhnlichen Ereignisse gefunden werden konnte.

Von allen Standorten sind im Anhang Fotodokumentationen zu finden.

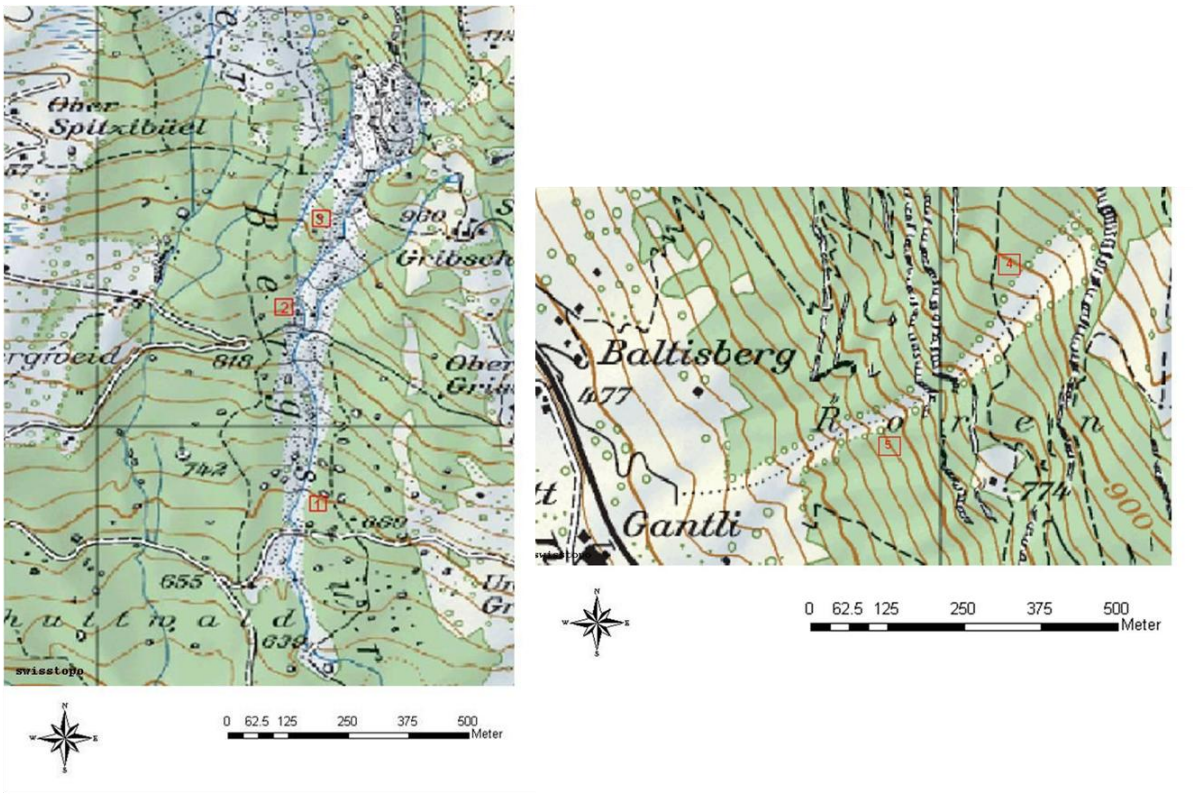


Abbildung 39: Standorte der fünf Aufnahmeflächen. Die Flächen 1 – 3 befinden sich beim Murgang „Goldau“ (links), Flächen 4 und 5 beim Murgang „Arth“ (rechts) (Kartengrundlage: PK25© swisstopo, 5704 000 000).

Die Aufnahmeflächen wurden wie folgt ausgeschieden: Am ausgewählten Standort bildete ein zufällig ausgewählter Baum den linken oder rechten unteren Eckpunkt des Vierecks (je nachdem, ob sich die Fläche links- oder rechtsseitig des Murgangs befand). Von diesem Eckpunkt wurde parallel zur Murgangfliessstrecke eine Länge von ca. 20 m abgemessen. Ein sich dort in der Nähe befindlicher Baum markierte den zweiten Eckpunkt. Dasselbe Verfahren, allerdings vom ersten Baum aus quer zur Fliesstrecke führte zum dritten Fixpunkt. Das Viereck vervollständigte ein vierter Baum, welcher von Eckpunkt zwei und drei eine Distanz von je ungefähr 20 m aufwies. Eine virtuelle Linie in der Mitte des ausgeschiedenen Gebiets hangparallel zur Fliessstrecke teilte die Aufnahmefläche nochmals in zwei gleich grosse Stücke. Innerhalb der ganzen Fläche wurden alle Bäume mit BHD grösser als 12 cm kluppiert und nach Baumart aufgenommen. Bäume mit BHD <12 cm wurden nicht aufgenommen mit der Annahme, Stämme mit solchen Durchmessern haben sicher keinen Einfluss auf den Fliessweg eines Murganges und sind nicht in der Lage einem solchen potentiell standzuhalten. Eine Darstellung einer Aufnahmefläche mit den Längenangaben der Seiten ist in Abbildung 40 zu sehen. Ein Protokoll aller Aufnahmeflächen ist im Anhang angefügt.

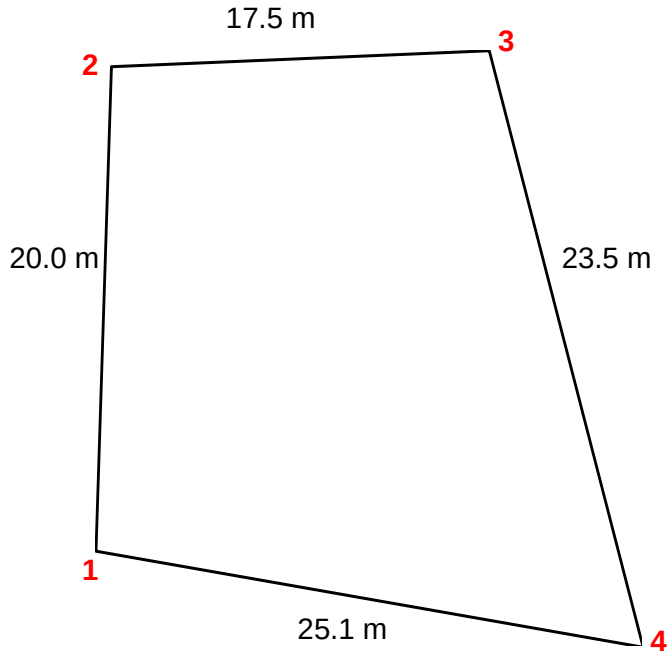


Abbildung 40: Schematische Darstellung einer Aufnahmefläche (hier Aufnahmefläche 1, „Goldau unten“). Innerhalb des Rechtecks wurden alle Bäume mit einem BHD>12 cm aufgenommen. Die Eckpunkte sind im Uhrzeigersinn nummeriert.

Einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen hat mit Sicherheit auch die Beschaffenheit und Struktur des Bodens. Je nach Bodentyp, Skelettgehalt, Vernässung, Verdichtung und pH-Wert ist ein Boden von einzelnen Baumarten einfacher oder schwieriger zu durchwurzeln. Je „besser“ ein Bodentyp für die Wüchsigkeit ist, desto widerstandsfähiger sind die Bäume (Brückner, Bibelriether et al. 1968; Ott, Frehner et al. 1997; Amann 2002).

Im Untersuchungsgebiet rund um den Murgang Goldau finden sich aussergewöhnliche Bodenverhältnisse vor. Da diese Fläche sich auf dem Gebiet des historischen Bergsturzes von 1806 befindet, ist der Boden ebenfalls durch dieses Ereignis geprägt. Der Boden ist sehr skeletteich, verdichtet, wasserdurchlässig und mit vielen grossen Stein- und Felsblöcken durchsetzt. Auf eine genaue Klassifizierung wurde in dieser Arbeit verzichtet, da dies keinen wesentlichen Einfluss auf die Resultate dieser Arbeit gehabt hätte. Dies im Gegensatz zum Einfluss der Bodeneigenschaften allgemein, welcher sicherlich einen grossen Einfluss auf die meisten Wald- und Baumparameter ausübt. Aufgrund der speziellen Bodenverhältnisse beim Murgang Goldau und der daraus schlechten Extrapolierbarkeit der Einflusswirkungen des Bodens auf eine allgemeine Ebene, wurde in dieser Arbeit dieses Themengebiet nicht weiter behandelt.

5.2.3 Statistische Analyse

Für diesen Teil der Untersuchungen wurde deskriptive und schliessende Statistik verwendet.

Deskriptive Statistik

In der deskriptiven Statistik kamen Tabellen und Säulendiagramme als Darstellungsarten vor. Diese beiden Methoden wurden in allen drei Teiluntersuchungen (Baumartenzusammensetzung, Brusthöhendurchmesser und Versagensmechanismen) verwendet. Als Einflussfaktoren für die Analysen wurden verwendet: Standort, Durchmesser, Baumart bei stehenden Bäumen und die Versagensart bei, durch die Murgänge, „zerstörten" Bäumen.

Schliessende Statistik

Bei der Untersuchung der Durchmesserverteilung in den beiden Hälften der Aufnahmeflächen kam nebst beschreibender auch schliessende Statistik vor. Mit dieser statistischen Analyse sollte herausgefunden werden, ob signifikante Unterschiede bezüglich Brusthöhendurchmesser der Bäume in den Teilflächen festzustellen sind. Zu diesem Zweck wurde der U-Test (Mann-Whitney) verwendet.

Der **U-Test** (auch Wilcoxon-Mann-Whitney-Test genannt) ist dem t-Test für unabhängige Stichproben ähnlich. Es handelt sich hier um ein parameterfreies Verfahren, das daher keine bestimmte Verteilungsform voraussetzt. Zudem braucht die abhängige Variable nur ordinalskaliert zu sein, da nicht die Messwerte selbst, sondern ihre Rangplätze verwendet werden. Für die Bestimmung der Prüfgröße U werden alle Beobachtungswerte zunächst in einer Folge aufsteigend sortiert und ihre Plätze (Ränge) durchnummeriert, um danach jeweils die Rangmittel der einzelnen Gruppen zu erhalten. Der U-Wert ergibt sich dann als die Anzahl der Inversionen (Umordnungen) der einzelnen Gruppenelemente die von der Extremverteilung zu der beobachteten führt. Als Prüfgröße verwendet man den kleineren der beiden Werte. U-Werte findet man tabelliert. Die Transformation auf Wahrscheinlichkeiten wird automatisch durchgeführt, indem der gefundene U-Wert in einen Abszissenwert Z einer entsprechenden Normalverteilung umgerechnet wird. Daraus ergeben sich die Signifikanzen P für die zweiseitige Fragestellung (Büning und Trenkler 1998; Stahel 2002). Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0.05$ festgelegt. Anhand der Aufnahmefläche 1 „Goldau unten" wird der U-Test beispielhaft angewendet (Abbildung 41).

	N	Rangmittel	U
Fläche Innen	15	14.7333333	101
Fläche Aussen	15	16.2666667	124

Z	P
-0.5002405	0.61690571

Abbildung 41: Die Parameter des U-Tests, mit den Werten der Aufnahmefläche „Goldau unten". N = Anzahl Messwerte, Rangmittel = Durchschnitt der Rangierungsplätze, U = „U-Wert" Anzahl Inversionen der einzelnen Gruppenelemente, Z = Abszissenwert, P = Signifikanzwert, Wahrscheinlichkeit, dass die beiden Stichproben miteinander korrelieren.

6 Resultate

Aufgeteilt in zwei Unterkapitel werden in diesem Abschnitt die erhaltenen Ergebnisse aus den Modellierungen in RAMMS, sowie die Resultate aus den Untersuchungen bezüglich des Einflusses des Waldes auf die Murgänge beschrieben und teilweise diskutiert.

6.1 Resultate der Modellierungen in RAMMS

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Modellkalibrierung und der Sensitivitätsanalysen dargestellt, erläutert und diskutiert. Des Weiteren erfolgt zu Beginn dieses Kapitels eine Überprüfung der Einflüsse der Reibungsparameter μ und ξ. Eine übergeordnete Diskussion wird in Kapitel 7 abgehandelt. Die Modellkalibrierung erfolgte durch das Variieren der Reibungsparameter μ und ξ, der Anriss- und Erosionsvolumina, sowie einer Veränderung der Topographie. Die Sensitivitätsanalysen verliefen über den Reibungsparameter μ für die Fläche des Waldes, der spezifischen Dichte des Erosionsmaterials und der Höhe des Wertes für das λ. Während die Untersuchung der Einflüsse der Voellmy-Salm Parameter an beiden Murgängen durchgeführt wird, werden in der Modellkalibrierung und Sensitivitätsanalysen die beiden Murgänge jeweils einzeln ausgewertet.

6.1.1 Einfluss der Reibungsparameter auf die Fliessgeschwindigkeit und die Abflusshöhe

Verschiedene Faktoren bewirken eine Variation der Reibungsparameter μ und ξ. Je nach Materialeigenschaften, Topographie, Vegetation, Anriss- und Erosionsvolumen verändern sich die Wertepaare μ und ξ, wie bereits in verschiedenen Quellen so publiziert wurde (Kap. 4.2). Ziel dieser Untersuchung war, die beiden Murgänge auf die existierenden „Faustregeln“ (Kap. 4.2) hin zu überprüfen.

6.1.1.1 Einfluss der Reibungsparameter auf die maximale Fliessgeschwindigkeit

Die Fliessgeschwindigkeit erfährt eine positive Beeinflussung durch eine Erhöhung der turbulenten Reibung ξ und eine negative Beeinflussung durch die trockene Reibung μ (Abbildung 42a und c). Die positive Korrelation von ξ und der Geschwindigkeit verläuft ungefähr linear. Der markante Anstieg der Geschwindigkeit bei Erhöhung der turbulenten Reibung (und ansonsten gleich bleibenden Bedingungen) kann bei beiden Murgängen beobachtet werden. Die trockene Reibung μ korreliert negativ mit der Geschwindigkeit. Der Grad des Ausmasses der negativen Beeinflussung ist allerdings nicht konstant über beide Murgänge. Beim Murgang „Goldau“ nahm die Geschwindigkeit infolge Zunahme der Reibung μ stark ab, wohingegen eine Abnahme der Geschwindigkeit beim Murgang „Arth“ nur schwach festzustellen war (Abbildung 42b und d). Zum Teil sind markante Knicke in den Linien zu erkennen (beispielsweise in Abbildung 1a). Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Skala nicht durchgehend linear verläuft, sondern logarithmisch aufgebaut ist.

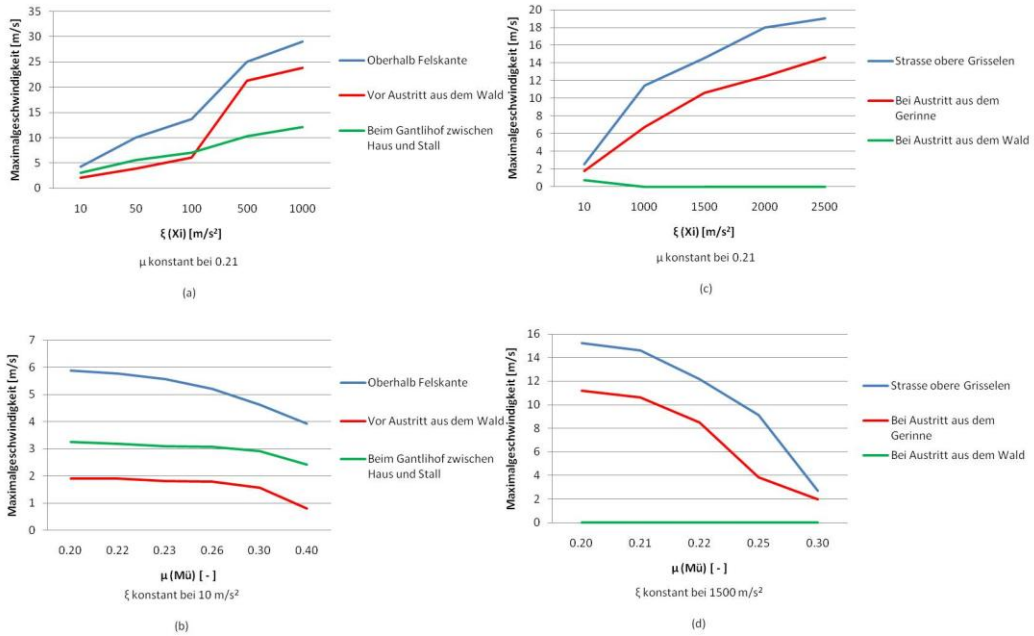


Abbildung 42: Einfluss der Reibungsparameter μ und ξ auf die Fliessgeschwindigkeit. a) Variation von ξ (Murgang „Arth“), b) Variation von μ (Murgang „Arth“), c) Variation von ξ (Murgang „Goldau“) d) Variation von μ (Murgang „Goldau“).

6.1.1.2 Einfluss der Reibungsparameter auf die maximale Abflusshöhe

Die beiden Murgänge, wie auch die einzelnen Messstationen, sind bezüglich des Einflusses der Reibungsparameter auf die maximale Abflusshöhe nicht kongruent. Während beim Murgang Arth die turbulente Reibung ξ die Abflusshöhe positiv beeinflusst, zeigt der Murgang Goldau ein gegenteiliges Verhalten (Abbildung 43a und c). Bei einigen Messpunkten zeigt eine Erhöhung der trockenen Reibung μ eine positive Tendenz (vor allem in den höher gelegenen Sektionen der Murgänge), bei den anderen ist keine oder eine schwach negative Tendenz auszumachen (Abbildung 43b und d).

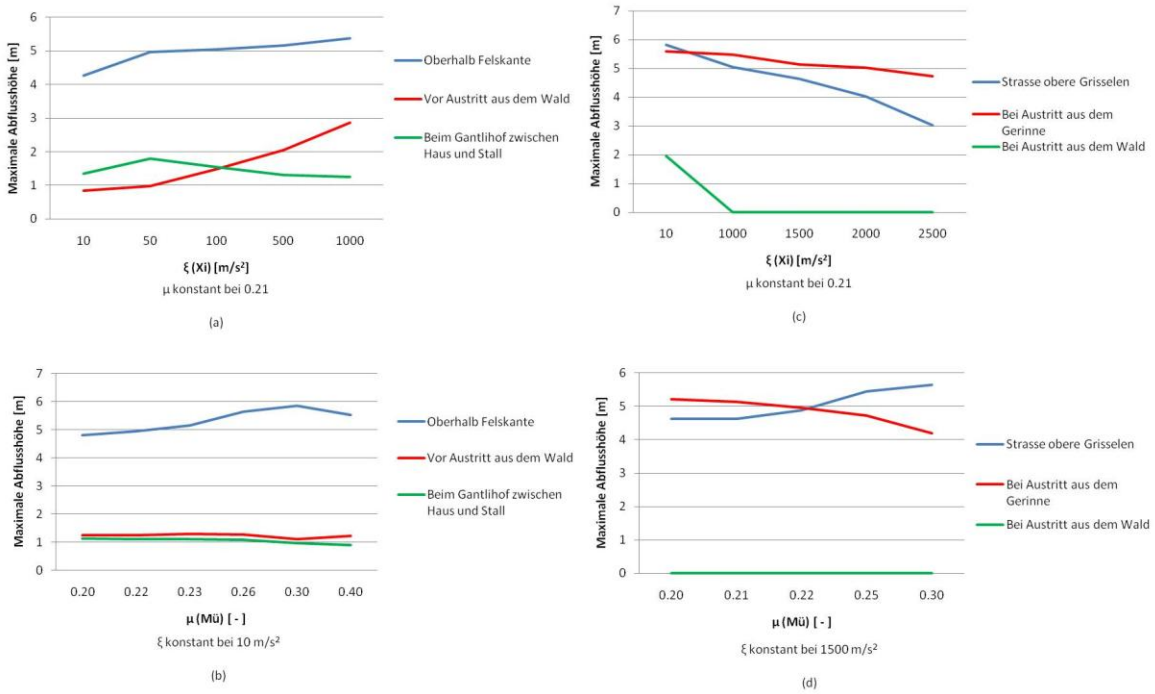


Abbildung 43: Einfluss der Reibungsparameter μ und ξ auf die maximale Abflusshöhe. a) Variation von ξ (Murgang „Arth“), b) Variation von μ (Murgang „Arth“), c) Variation von ξ (Murgang „Goldau“) d) Variation von μ (Murgang „Goldau“).

6.1.2 Modellkalibrierung

Nachfolgend werden die Resultate der Modellkalibrierung für beide Murgänge „Arth“ und „Goldau“ vorgestellt und kurz diskutiert. Die in diesem Kapitel gewonnen Ergebnisse dienen als Ausgangslage für die darauf folgenden Sensitivitätsanalysen. Die Modellkalibrierung, wie auch anschliessend die Sensitivitätsanalysen, behandeln die beiden Murgänge „Arth“ und „Goldau“ eigenständig.

6.1.2.1 Murgang „Arth“

Die besten Resultate für die Simulation des Murgangs „Arth“ wurden bei folgenden Einstellungen erreicht:

- Einen für Murgangmodellierungen in RAMMS vergleichsweisen hohen Wert für die trockene Reibung μ
- Einen für Murgangmodellierungen in RAMMS vergleichsweisen tiefen Wert für die turbulente Reibung ξ
- Eine Modellierung, welche einen Teil des total mobilisierten Materials als Erosion simuliert
- Eine Modellierung, welche Verklausungen durch Erstellen virtueller Dämme simuliert

In der Tabelle 8 sind von allen modellierten Simulationen des Murgangs „Arth“ in RAMMS (160 Simulationen) die besten 20 % davon (32) aufgelistet. In der Tabelle enthalten sind die Inputdaten (Anriss- & Erosionsvolumen und die Werte der Voellmy-Salm Parameter), die erhobenen Daten der Messpunkte, die maximale Geschwindigkeit des simulierten Murganges, die gemessene Länge der Ablagerungsfläche des Ausbruches Richtung Färnisbüel, sowie deren Differenz zur Länge des realen Ausbruches.

Rot umrandet ist diejenige Kombination von Einstellungen, welche bei der Auswertung aller Kriterien und Berücksichtigung der Prioritäten die beste Simulation liefert (Abbildung 44). Mit „der besten Simulation“ ist die dem Ereignis ähnlichste Modellierung gemeint und wird „Best-Fit“-Kombination genannt. Die Werte für die Reibungsparameter μ und ξ mussten für Murgangsimulationen in RAMMS atypisch hoch (0.25 [-] für die trockene Reibung μ), resp. tief (30 m/s^2 für die turbulente Reibung ξ) gewählt werden. Das Anriss- und Erosionsvolumen wurde bei dieser Variante mit Abstrichen realitätsgetreu modelliert, will heissen, ca. 45`000 $m^3$ Geschiebe, welches in der Anrisszone in Bewegung geriet und ca. 27`000 m^3 im Erosionsgebiet. Das Anriss- und Erosionsvolumen der „Best-Fit“-Kombination wurde um jeweils 4000 m^3 vom „Original“ verringert. Dies, um den Ausfall des Ausbruches nach Färnisbüel zu „kompensieren“ (Kap.5.1.3). Die Topographie des DGM wurde an zwei Stellen verändert. Zum Einen wurde eine Geländeerhöhung um 10 m bei der Ausbruchstelle modelliert, zum Anderen wurde der Tunnel bei der Bahnunterführung mittels eines Dammes blockiert. Beides aus den in Kap. 5.1 bereits erwähnten Gründen (Verklausungsunvermögen in RAMMS).

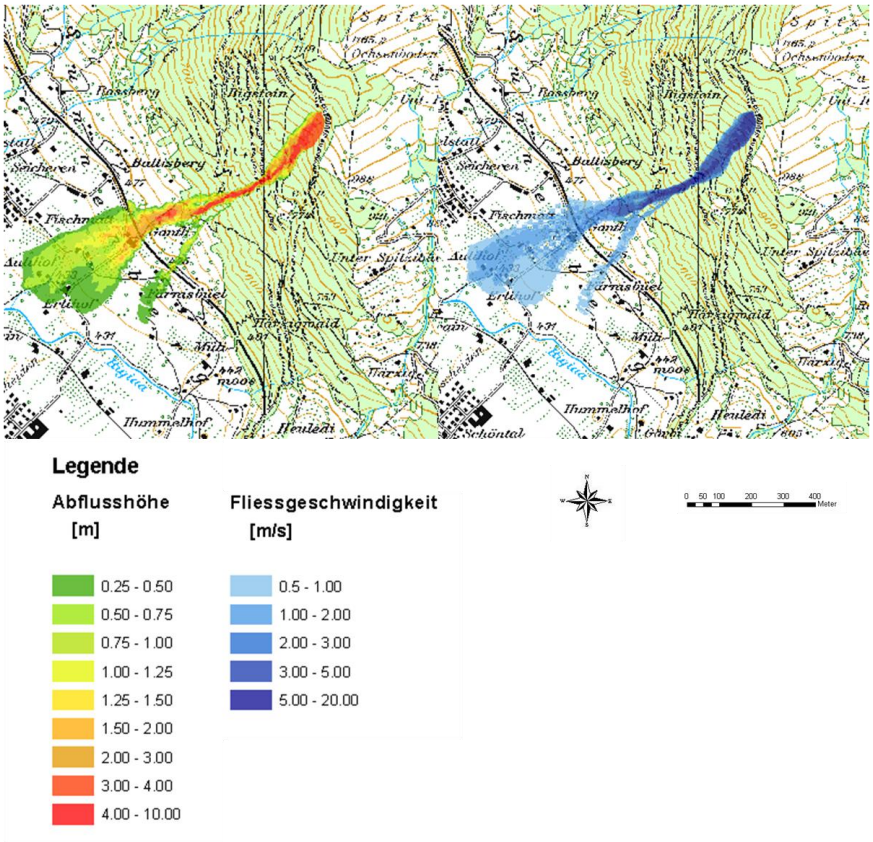


Abbildung 44: Abbildung der „Best-Fit“-Simulation für die Modellierung des Murgangs „Arth“, links die maximale Abflusshöhe, rechts die maximale Fliessgeschwindigkeit (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

In Abbildung 45 sind die μ und ξ-Kombinationen für die in Tabelle 8 aufgeführten Simulationen dargestellt. Werden diese mit den Wertepaaren aus der Abbildung 25 verglichen, stellt man fest, dass sich die in dieser Arbeit verwendeten Werte mehrheitlich ausserhalb der „Normwerte“ befinden. Mögliche Gründe werden in der Diskussion behandelt (Kap. 7.3).

Die grössten Probleme mit dem Modellieren des Murgangs „Arth“ ergaben sich bei der Simulation der Fliessstrecken. Generell flossen die Murgänge „zu breit“ talwärts, die Fliessbreite stimmt nicht mit der Realität zusammen. Weiter flossen die meisten Simulationen zudem zu weit, die Ablagerungsgebiete wurden zu gross dimensioniert dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auch bilanziert, dass die Murgänge zu viel Material bis nach unten in die Ablagerungszone transportierten und es dort zu einem Überschuss in der Geschiebebilanz der Modellierungen kam.

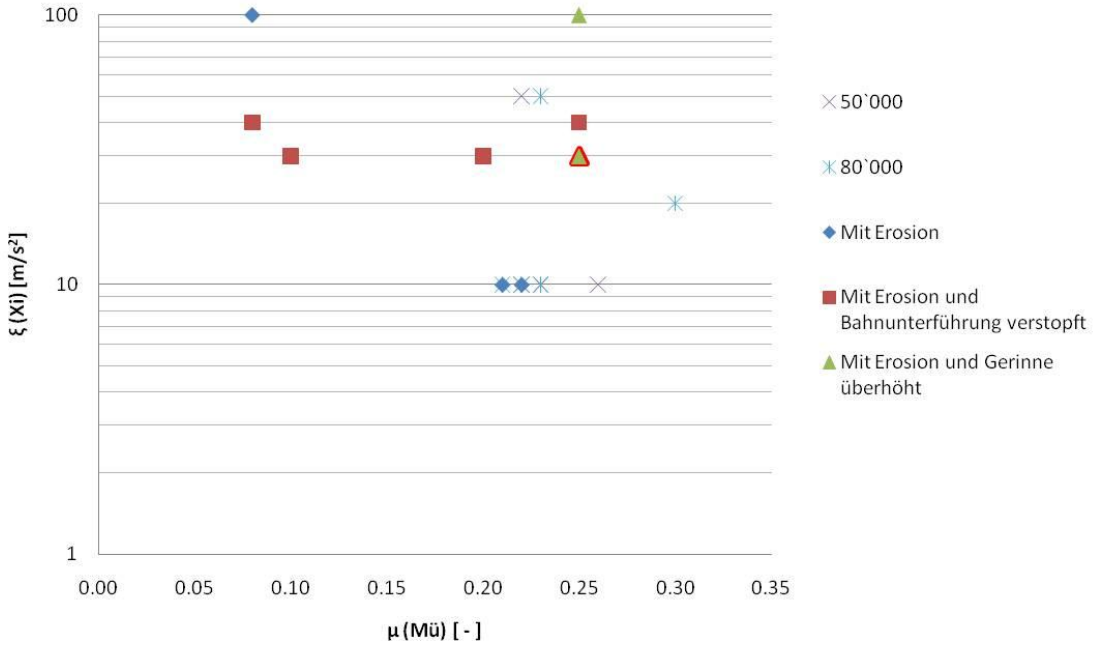


Abbildung 45: Die Wertepaare der besten 20 % der Simulationen des Murgang „Arth“. Die Werte für die trockene Reibung μ sind mehrheitlich grösser als 0.20 [-], diejenigen für die turbulente Reibung ξ grösstenteils kleiner als 50 m/s² (die Ordinate ist logarithmisch skaliert). Rot umrandet ist das μ-ξ-Wertepaar für die „Best-Fit“-Kombination.

Tabelle 8: Outputdaten der Simulationen des Murgangs „Arth“. Aufgeführt sind die besten 20% aller Modellierungen, aufgeteilt in die Einstellungen ihrer Anriss-/Erosionsvolumina und der (veränderten) Topographie. Rot eingerahmt ist die für den Murgang „Arth“ gefundene „Best-Fit“-Kombination (Forts. nächste Seite).

Murgang "Arth"	**Volumen**		**Voellmy-Reibung**			**Geschwindigkeit**			
Variation der Anrissvolumina und Topographie	Anriss	Erosion	μ [Mü]	μ [Mü] Wald	ξ [Xi]	Maximal	*Oberhalb Felskante*	*Vor Austritt aus dem Wald*	*Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall*
							684/025//213/715	683/710//213/570	683/465//213/465
	[m^3]	[m^3]	[-]	[-]	[m/s^2]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Arth 50`000									
	48`500		0.22	0.24	10	12.63	3.89	1.49	2.35
	48`500		0.22	0.24	50	14.49	10.19	4.32	5.83
	48`500		0.23	0.25	10	12.54	5.22	1.66	2.71
	48`500		0.26	0.28	10	13.07	5.31	1.97	2.51
Arth 80`000									
	78`200		0.21	0.23	10	13.90	5.89	1.91	3.26
	78`200		0.22	0.24	10	13.94	5.76	1.90	3.18
	78`200		0.23	0.25	10	13.85	5.57	1.81	3.10
	78`200		0.23	0.25	50	15.62	8.80	4.40	7.18
	78`200		0.30	0.32	20	14.26	6.40	2.47	4.67
Arth mit Erosion									
	48`500	31`000	0.08	0.10	100	42.29	14.68	7.78	3.97
	48`500	31`000	0.10	0.12	30	11.87	9.34	3.72	1.76
	48`500	31`000	0.21	0.23	10	12.29	4.32	1.61	2.46
	48`500	31`000	0.22	0.24	10	15.45	12.31	5.43	3.30
Arth mit Erosion und Bahnunterführung verstopft									
	48`500	31`000	0.08	0.10	40	13.66	10.54	4.31	2.24
	48`500	31`000	0.10	0.12	30	11.98	9.37	3.68	1.72
	48`500	31`000	0.20	0.22	30	11.19	7.58	3.40	1.43
	48`500	31`000	0.25	0.27	40	12.21	8.91	3.30	1.09
Arth mit Erosion und Gerinne überhöht									
	48`500	31`000	0.25	0.27	30	10.57	7.46	5.01	0.99
	40`700	31`000	0.25	0.27	100	16.77	12.22	8.59	1.50
	44`700	27`000	0.25	0.27	30	10.18	6.93	3.96	0.79

Abflusstiefe Maximal			Ausbruch Richtung Färnisbüel				
Oberhalb Felskante	*Vor Austritt aus dem Wald*	*Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall*	Länge Ablagerungsfläche ab Bahndamm	Differenz modelliert - gemessen	Differenz modelliert - gemessen	Abflusstiefe vor Bahndamm	Abflusstiefe bei Austritt aus dem Wald
684/025//213/715	683/675//213/570	683/465//213/465		220			
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]
4.30	1.76	0.92	420	420	91%	3.82	2.64
4.30	1.25	1.28	420	420	91%	3.99	2.43
4.41	1.74	0.93	420	420	91%	3.78	2.68
4.47	2.56	0.88	420	420	91%	3.52	1.82
4.80	1.24	1.12	420	420	91%	4.36	3.93
4.94	1.24	1.10	420	420	91%	4.43	3.45
5.14	1.29	1.11	420	420	91%	4.27	3.76
5.27	1.18	1.47	420	420	91%	4.56	2.87
5.49	1.07	1.08	420	420	91%	4.27	3.77
5.37	1.28	1.26	420	200	91%	4.85	1.72
4.95	1.22	1.11	420	200	91%	3.79	2.93
4.14	1.37	0.85	420	200	91%	3.58	2.40
5.77	1.52	1.12	420	200	91%	4.40	2.58
5.34	1.27	1.08	420	200	91%	3.07	2.30
4.94	1.23	1.10	420	200	91%	3.30	1.83
4.93	1.11	1.35	420	200	91%	3.08	2.25
4.61	0.98	1.32	420	200	91%	3.19	2.34
4.25	2.39	2.04	230	10	5%	1.69	0.28
4.50	2.49	1.95	80	-140	-64%	1.21	0.2
3.96	1.89	1.66	240	20	9%	1.09	0.18

Fliessweg

Werden die Reibungsparameter hinsichtlich der Fliessstrecke verglichen, erfuhren die Modellierungen mit hohen ξ- und tiefen μ-Werten die besten Resultate. Bei tiefen ξ- und hohen μ-Werten gerieten die Simulationen zu lang, die Ablagerungsfläche wurde zu mächtig und die laterale Ausbreitung des Murganges zu gross. Beide Parameter haben einen grossen Einfluss auf die Länge des Ablagerungsgebietes.

Die besten Resultate bezüglich des Fliessweges wurden mit einer Kombination von Anriss- und Erosionsvolumen erhalten. Wurde das gesamte Geschiebevolumen in der Anrisszone losgelöst, erfuhr der modellierte Murgang „Arth" eine zu grosse laterale Ausdehnung. Die Fliessbreite entspricht nicht mehr der Wirklichkeit, sondern fliesst um bis zu 100% zu breit über die Felskante bei Kote 800. Weiter unten verliefen die Simulationen ebenfalls noch zu breit ab, allerdings nicht mehr in den Grössenordnungen wie im oberen Teil der Transitstrecke. Die Simulationen mit einem Anrissvolumen von knapp 50`000 m^3, aber ohne Erosion, flossen nach ähnlichem Muster wie „mit Erosion" ab. Bei allen Simulationen verlief der Fliessweg bei der Messstation *Vor Austritt aus dem Wald* kurzzeitig nicht exakt in den gleichen Bahnen wie das reale Ereignis. Es erfolgte ein zu breiter Abfluss, bei welchem etwas oberhalb der originalen Fliessstrecke etwas zu viel Geschiebe transportiert wurde.

Ohne Modifikation der Topographie verliefen sämtliche Simulationen bezüglich Fliessstrecke nicht der Realität entsprechend, unabhängig der Anriss- und Erosionsvolumina. Der Ausbruch des Murgangs „Arth" Richtung Färnisbüel wurde durchgehend zu mächtig simuliert. Zu viel Geschiebe erreichte die Fläche südlich des Gantlihofes und daraus entsteht eine zu grosse Ablagerungsfläche. Diese erstreckte sich bis zur Rigiaa, was fast doppelt so lang wie beim richtigen Ausbruch ist. Die modellierte Verklausung der Bahnunterführung konnte dem keine Abhilfe schaffen (vgl. Spalte „Länge Ausbruchsfläche ab Bahndamm" in der Tabelle 8). Noch immer erreichte die Spitze der Ablagerungsfläche die Rigiaa, was einem Längenüberschuss von 91% entspricht. Verbesserte Resultate werden erhalten, wenn der Ausbruch fast ganz verhindert werden konnte. Durch die Erhöhung der Geländerippe gelangte nur noch ein Bruchteil der Geschiebemengen Richtung Färnisbüel, was sich in der Fläche und Länge des dortigen Ablagerungsgebietes niederschlug (im Bereich von -65% bis +10% der originalen Länge).

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche)

Hohe Werte für die beiden Reibungsparameter bildeten die Realität (Ablagerungshöhe und –fläche) am besten ab. Kleine Ablagerungshöhen (<0.10 m), welche vorwiegend aus Schlamm bestanden, verteilten sich bei allen Simulationen zu weitläufig auf den Gelände des Gantlihofes. Teilweise erreichten die Schlammmassen ebenfalls die Rigiaa, was nicht der reellen Ausbreitung der Ablagerungsflächen entspricht. Da die Ablagerungen auf diesem tiefen Niveau nicht unbedingt aussagekräftig sind, wurden die Simulationen auf dem Ablagerungshöhenniveau >0.75 m untersucht. Die räumliche Ausdehnung auf diesem Niveau des Murganges ist von Hunziker (2006) genau dokumentiert worden. Die exakte räumliche Ausbreitung konnte bei keiner Simulation genau modelliert werden, aber je grösser die Werte für beide Reibungsparameter μ und ξ gewählt wurden, desto eher entsprach die Fläche und Höhenverteilung des Geschiebes dem reellen Murgangkopf. Der modellierte Murgang in RAMMS stoppte abrupter und die Niveaus der verschiedenen Ablagerungshöhen folgten kürzer aufeinander, die Verteilung verlief steiler. Dieses Verhalten im Ablagerungsgebiet entspricht eher demjenigen eines „richtigen" Murganges und in diesem Fall auch eher dem Verhalten des Murgangs „Arth". Hohe Werte für die turbulente Reibung ξ bedeutete hohe Fliessgeschwindigkeiten (vergleiche Abschnitt Geschwindigkeit), was zu

Konflikten mit dem Faktor Fliessgeschwindigkeit führte. Es mussten diesbezüglich Kompromisse eingegangen werden.

Veränderungen an der Topographie im Transitgebiet und in der Ablagerungszone des Ausbruchs Richtung Färnisbüel hatten keine wesentliche Auswirkungen auf das Ablagerungsverhalten der Simulationen beim Gantlihof. Durch das Erhöhen der Geländerippe geriet mehr Material in die Ablagerungszone, was kleinräumig zu grösseren Ausdehnungen (Fläche und Höhe) führte. Durch Reduktion von Anriss- und/oder Erosionsvolumen konnte diese Auswirkungen verhindert werden.

(Maximale) Geschwindigkeit

Um im Murgang „Arth" geringe Fliessgeschwindigkeit zu simulieren, konnte einzig der turbulente Reibungskoeffizient ξ herabgesetzt werden. Weder Veränderungen der Anriss- und Erosionsvolumen, noch Modifikationen der Topographie verbesserten die Simulationen. Jedoch durch die stark positive Korrelation des Reibungsparameters ξ mit der maximalen Fliessgeschwindigkeit (Abbildung 42), konnten in RAMMS genügend tiefe Geschwindigkeiten modelliert werden. Bei ξ-Werten von kleiner als 100 m/s^2 stellten sich in den meisten Simulationen realitätskonforme Tempi ein, sowohl oberhalb der Felskante, wo ein Maximum zwischen 10 und 15 m/s toleriert wurde, wie auch in der Ablagerungszone. Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten bewegten sich bei den besten Simulationen im Raum Gantlihof bei 1 - 3 m/s, was den Aussagen von Augenzeugen (*„wenige Meter pro Sekunde"*) entspricht. Der andere Term für die Reibung des Voellmy-Salm Ansatzes, die trockene Reibung μ, bewirkte bei allen Messstationen einen weitaus geringeren Einfluss auf die Fliessgeschwindigkeiten der Simulationen.

(Maximale) Abflusshöhe

Die besten Resultate bezüglich der maximalen Abflusshöhen erreichten Simulationen, bei welchen das gesamte mobilisierte Geschiebevolumen in der Anrisszone und den Erosionsflächen aufgeteilt losgelöst wurde. Die Reibungsparameter μ und ξ besassen einen geringen Einfluss auf die Abflusstiefen einer Modellierung. Je grösser der Wert für die turbulente Reibung ξ war, desto grösser wahrscheinlich die Abflusstiefen oberhalb der Felskante und vor dem Austritt aus dem Wald und desto kleiner die Abflusstiefe beim Gantlihof (vergleiche Abbildung 43). Diese Mechanismen spielten vor allem bei hohen ξ-Werten (> 500 m/s^2) eine Rolle, bei niedrigeren Werten marginalisierte sich die Wirkung. Der Effekt ist allerdings im Vergleich mit dem Einfluss der Anriss- und Erosionsvolumina bescheiden. Bei Verteilung des gesamten Geschiebevolumes „Arth" auf die Anriss- und die beiden Erosionsflächen, konnte die zu grossen Abflusshöhen oberhalb der Felskante bei Kote 800 auf ein realistischeres Mass gesenkt werden (Tabelle 8). Ohne Erosionsflächen ober- und unterhalb der Felskante bestand die Tendenz, dass die Modellierung zu geringe Abflusstiefen an den beiden unteren Messstandorten simulierte. Vor allem bei Messpunkt *Vor Austritt aus dem Wald* wurden teilweise zu geringe Dimensionen gemessen.

Die künstlichen Eingriffe in die Topographie veränderten wie oben bereits angedeutet das Fliessverhalten vor allem im Ablagerungsgebiet. Die erhöhte Geländerippe erhöhte die transportierte Geschiebemenge Richtung Gantlihof, was an beiden dort befindlichen Messstationen zu einer Erhöhung der Abflusshöhenwerte führte. Das erhöhte Murgangvolumen im Ablagerungsgebiet Gantlihof stammte aus dem nicht mehr existierenden Ausbruch des Färnisbüelarms. Um wieder eher realitätskonforme Verhältnisse zu erhalten, wurde wie im obigen Kapitel bereits beschrieben, das Anriss- und

Erosionsvolumen angepasst. Dies führte zu besseren Ergebnissen im Vergleich der Modellierungen mit dem tatsächlichen Ereignis vom August 2005.

6.1.2.2 Murgang „Goldau“

Die besten Resultate für die Simulation des Murgangs „Goldau“ wurden bei folgenden Einstellungen erreicht:

- Einen für Murgangmodellierungen in RAMMS vergleichsweise niedrigen Wert für die turbulente Reibung ξ
- Eine Modellierung, welche das gesamte mobilisierte Material in einer Anrisszone auslöst
- Eine Modellierung, in welcher Verklausungen durch erstellen virtueller Dämme simuliert

In der Tabelle 9 sind von allen modellierten Simulationen des Murgangs „Goldau“ (90) die besten 10 % davon (9) aufgelistet. Anders als beim Murgang „Arth“ wurden in diesem Fall nicht die besten 20 % ausgewertet, da sonst die Qualität der Resultate beim Murgang „Goldau“ schlechter ausgefallen wäre. Hätte man trotzdem den Auswertungsbereich bei 20 % belassen, wäre die Aussagekraft der Resultate zu niedrig gewesen. In der Tabelle sind analog der obigen Auflistung für den Murgang „Arth“ die Inputdaten (Anriss- & Erosionsvolumen und die Werte der Voellmy-Salm Parameter), die erhobenen Daten an den Messpunkten, die maximale Geschwindigkeit des Murganges, die gemessene Länge der Ablagerungsfläche im Gebiet „Grosswiyer“, sowie deren Differenz zur Länge der realen Ablagerungsfläche aufgelistet.

Rot umrandet ist diejenige Kombination von Inputfaktoren, welche ausgewertet die beste Simulation liefert (Abbildung 46). Von einer „Best-Fit“-Kombination zu sprechen wäre allerdings vermessen, denn wie alle anderen Simulationen lieferte diese Modellierung kein zufriedenstellendes Ergebnis. Bei mehreren Kriterien konnte der ereignete Murgang „Goldau“ nicht genügend gut modelliert werden (mehr dazu in der Einzelkritik weiter unten). Nichtsdestotrotz können zu den erhaltenen Resultaten einige Aussagen gemacht werden. Die Wahl eines sehr geringe Wertes (<50 m/s^2) für die turbulente Reibung wurde notwendig, um so tiefe wie mögliche maximale Fliessgeschwindigkeiten zu erhalten. Bei der besten Simulation wurde ein ξ-Wert von 10 m/s^2 verwendet. Den Wert von 0.20 [-] für die trockene Reibung bei der „Best-Fit“-Kombination befindet sich im oberen Normbereich für Modellierungen von Murgängen in RAMMS. Das Anrissvolumen wurde nicht wie beim Murgang „Arth“ in ein Anriss- und Erosionsgebiet aufgeteilt. Dies zum Einen, weil es anders als beim Murgang „Arth“ keine nachweislich starken Erosionsprozesse gegeben hat und zum Anderen, weil die Simulationen mit einem Erosionsgebiet zu breite Fliesswege berechnet hatten. Die Erstellung eines künstlichen Dammes im Gerinne half, den Murgang im unteren Bereich besser nachbilden zu können. Ohne diese virtuelle Verklausung flossen teilweise zu geringe Geschiebemassen dem Ausbruchsfliessweg Richtung „Grosswiyer“ entlang. Vielfach wurde der erstellte Damm aber auch einfach umflossen und der Grossteil des Geschiebes bewegte sich wieder im „Gerinne“ weiter.

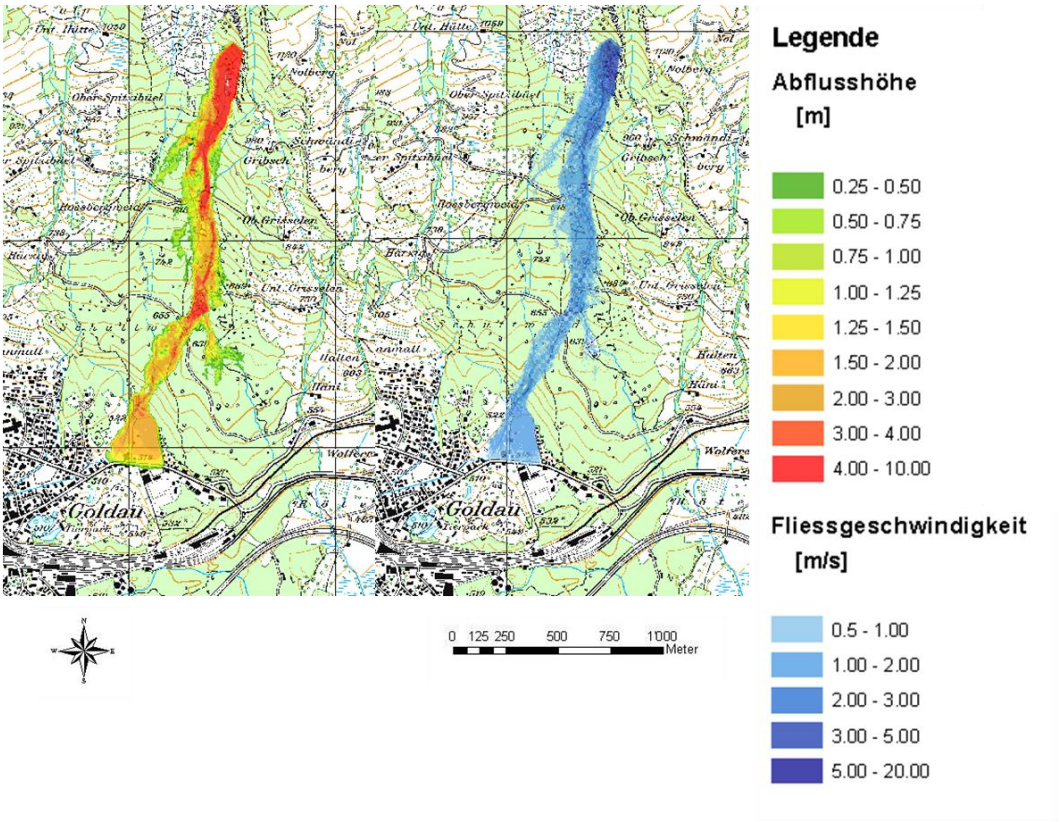


Abbildung 46: Abbildung der besten Modellierung des Murgangs „Goldau“ in RAMMS, links die maximale Abflusshöhe, rechts die maximale Fliessgeschwindigkeit (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Die μ und ξ-Werte für die in der Tabelle 9 aufgelisteten Simulationen sind in Abbildung 47 gegeneinander aufgetragen. Beim Vergleich mit den von Scheuner (2007) zusammengetragenen Wertepaaren fällt auf, dass die hier eingesetzten Voellmy-Salm Parameterwerte für ξ im eher tiefen Bereich liegen, die gewählten μ-Werte mehrheitlich in die „Normwert“-Verteilung passen (Abbildung 25). Probleme bei den Modellierungen machten vor allem die auf der ganzen Länge des Murgangs tiefen Fliessgeschwindigkeiten. Es konnte in keiner Simulation auch nur annähernd eine der Realität ähnliche Geschwindigkeit modelliert werden. Die in RAMMS errechneten Werte liegen im besten Fall ca. 10x und im schlechtesten Fall ca. 50x zu hoch (dies bei den besten 10 % aller Simulationen wohl gemerkt). Ausserdem floss der simulierte Murgang auf einer zu breiten Fliessstrecke talwärts. Diese und weitere Aspekte werden in der Diskussion nochmals aufgegriffen und ausführlich analysiert.

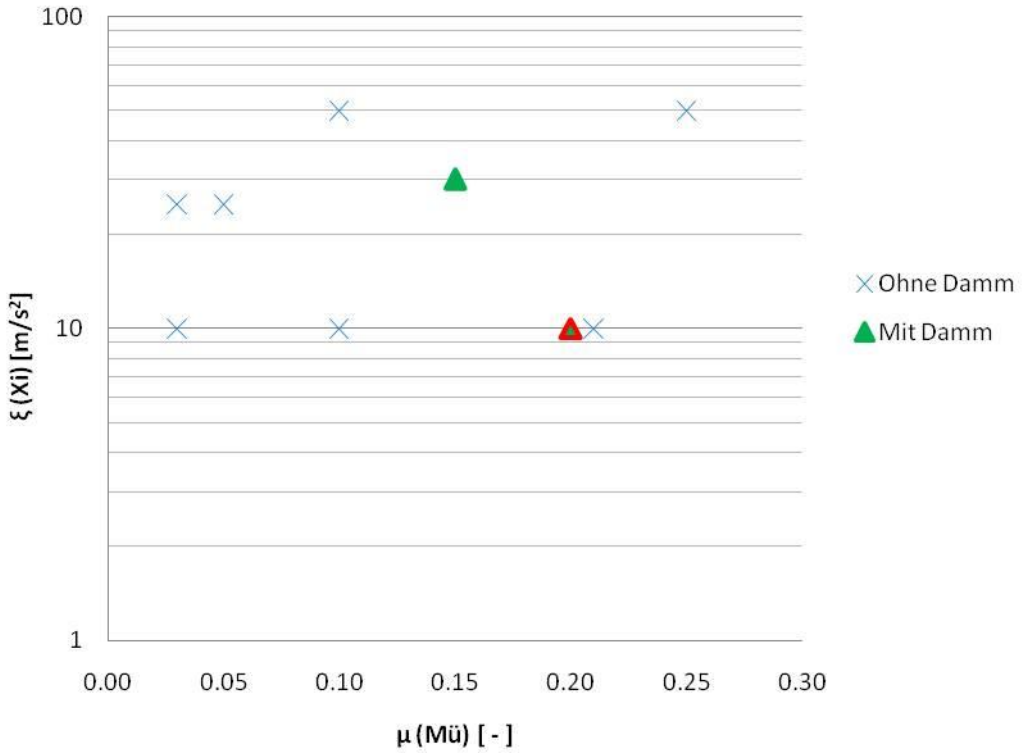


Abbildung 47: Die Wertepaare der besten 10 % der Simulationen des Murgang „Goldau“. Die Werte für die turbulente Reibung sind ξ kleiner als 50 m/s^2 (die Ordinate ist logarithmisch skaliert). Rot umrandet ist das μ-ξ-Wertepaar für die Kombination, welche die besten Resultate lieferte (von einem „Best-Fit“ sollte allerdings nicht gesprochen werden.

Tabelle 9: Outputdaten der Simulationen des Murgangs „Goldau“. Aufgeführt sind die besten 10% aller Modellierungen, aufgeteilt in die Einstellungen ihrer Anriss-/Erosionsvolumina, und der (veränderten) Topographie. Rot eingerahmt ist die für den Murgang „Goldau“ gefundene beste Simulation (Forts. nächste Seite).

Murgang "Goldau"	**Volumen**		**Voellmy-Reibung**			**Geschwindigkeit**			
Variation der Anrissvolumina und Topographie	Anriss	Erosion	μ [Mü]	μ [Mü] Wald	ξ [Xi]	Maximal	*Strasse obere Grisselen*	*Bei Austritt aus dem Gerinne*	*Bei Austritt aus dem Wald*
							685/385//213/240	685/350//212/685	685/060//212/195
	[m^3]	[m^3]	[-]	[-]	[m/s^2]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Ohne Damm									
	191`170	0	0.03	0.05	10	11.96	2.76	3.13	2.58
	191`170	0	0.03	0.05	25	25.95	6.24	2.91	2.55
	191`170	0	0.05	0.07	25	54.93	5.92	3.65	2.62
	191`170	0	0.10	0.12	50	31.79	5.37	2.94	1.65
	191`170	0	0.10	0.12	10	12.94	1.77	1.64	1.15
	191`170	0	0.21	0.22	10	72.49	2.51	1.79	0.73
	191`170	0	0.25	0.27	50	59.00	3.27	1.73	0.76
Mit Damm									
	191`700	0	0.20	0.22	10	20.35	1.91	1.69	2.34
	154`000	35`000	0.15	0.17	30	16.79	3.06	2.37	0.83

Abflusstiefe maximal			Ablagerungsgebiet Grosswiyer		
Strasse obere Grisselen	*Bei Austritt aus dem Gerinne*	*Bei Austritt aus dem Wald*	Länge Ablagerungsfläche Grosswiyer	Differenz modelliert - gemessen Grosswiyer	Differenz modelliert - gemessen Grosswiyer
685/385//212/240	685/350//212/685	685/060//212/195			
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]
5.87	4.51	2.15	420	100	31%
6.07	4.20	1.42	440	120	38%
5.81	4.50	1.99	390	70	22%
7.40	4.75	1.82	230	-90	-28%
6.11	4.25	1.59	470	150	47%
5.82	5.60	1.96	340	20	6%
5.39	4.00	0.61	215	-105	-33%
4.72	4.27	3.79	320	0	0%
5.63	4.34	2.50	380	60	19%

Fliessweg

Der Fliessweg wurde mit den meisten μ und ξ Wertepaaren in groben Zügen richtig simuliert. Bei allen Berechnungen wurde ein Ausbruch kurz nach dem Anrissgebiet modelliert. Hohe ξ-Werte (>500 m/s^2) führten in der Regel zu einer Verbreiterung des Fliessweges und Verkürzung der gesamten Länge des Murgangs. Die Breite der Fliessstrecke des echten Murganges „Goldau" (~80 m) konnte in der Regel nicht eingehalten werden, die lateralen Ausdehnungen bewegten sich bei 100 – 120 m an den breitesten Stellen. Der Ausbruch Richtung „Grosswiyer" konnte mit allen Reibungsparameterkombinationen simuliert werden. Je grösser der Wert für die turbulente Reibung ξ gewählt wurde, desto kürzer und weniger akzentuiert verlief der Murgang. Änderungen bei den Werten der trockenen Reibung μ hatten keinen grossen Einfluss auf den Fliessweg.

Bei einer Aufteilung des Anrissvolumens in ein Anriss- und ein Erosionsgebiet, konnten keine realitätsgetreuen Simulierungen beobachtet werden. Der modellierte Murgang floss zu weit auf der orographisch rechten Seite talwärts und überquerte eine sanfte Geländeerhöhung, welche beim Murgang „Goldau" als seitliche Ausbreitungsgrenze diente. Der kurze Ausbruch des Murgangarms nach dem Anrissgebiet wurde zu mächtig dargestellt. Die Länge, sowie auch die Breite und Mächtigkeit übertrafen die realen Ausmasse um mehr als 100 %.

Durch die Erstellung des Damms bei Kote 670 konnte der Fliessweg des modellierten Murganges bei einzelnen Simulationen besser nachgebildet werden. Die Verhältnisse entsprachen nach Einbau der künstlichen Blockade eher der Realität. Vielfach umfloss der simulierte Murgang aber den Damm nordseitig. Dies bewirkte eine Veränderung der Fliessstrecke (und anderen Parametern wie Auslaufdistanz, etc.) und verminderte die Qualität des Resultates. Anstatt im ursprünglichen Gerinne (bis zur Verklausung) und im Ausbrucharm Richtung „Grosswiyer" bewegten sich die Simulationen nach Umfliessen des Dammes ungerichtet weiter talwärts.

Auslaufdistanz

Fokussiert auf die Reibungsparameter kann ausgesagt werden, dass vor allem die turbulente Reibung ξ einen grossen Einfluss auf die Auslaufdistanz hat. Je grösser das ξ gewählt wird, desto kürzer fällt die Auslaufdistanz aus. Bei ξ-Werten von grösser als 500 m/s^2 erreichte der Murgang die Ablagerungsfläche „Grosswiyer" nicht mehr und stoppte bereits im Wald. Eine ähnliche Tendenz ist ebenfalls für den trockenen Reibungskoeffizienten μ feststellbar, allerdings nicht so ausgeprägt wie bei der turbulenten Reibung. Eine Erhöhung des Wertes für das μ, hatte eine Verkürzung der Auslaufdistanz zur Folge. Ähnlich wie beim Murgang „Arth" stoppt der Murgang abrupter, die Ablagerungsfläche läuft weniger flach aus.

Veränderungen bei den Anrisseigenschaften hatten keinen Einfluss auf die Auslaufdistanzen, oder eine Beeinflussung wurde durch diejenigen der Reibungsparameter überlagert.

Die Erstellung des Dammes bewirkte eine Verlängerung der Auslaufdistanzen. Dies, weil durch den Damm mehr Geschiebe Richtung „Grosswiyer" gelenkt wurde und sich durch das grössere Geschiebevolumen in den Auslaufdistanzen positiv niederschlug.

(Maximale) Geschwindigkeit

Die Fliessgeschwindigkeiten an den verschiedenen Messstandorten liessen sich einzig durch die Variation der Reibungsparameter μ und ξ beeinflussen. Weder eine Modifikation der Anriss- bzw. Erosionsvolumen, noch Veränderungen an der Topographie des Gebietes

bewirkten eine Veränderung der Fliessgeschwindigkeiten. Die Voellmy-Salm Parameter verhielten sich diametral: Während die turbulente Reibung ξ positiv mit der Fliessgeschwindigkeit korrelierte, war dies bei der trockenen Reibung μ negativ der Fall (Abbildung 42). Es konnte jedoch keine Kombination von hohem μ- und tiefem ξ-Wert modelliert werden, damit die Fliessgeschwindigkeiten in den Bereich der realen Geschwindigkeiten des Murgangs „Arth“ gebracht werden konnten. Wie oben bereits erwähnt, berechneten die Simulationen an allen Messstandorten massiv überhöhte Werte für die Fliessgeschwindigkeit. Nebst noch ein paar anderen Unzulänglichkeiten ist dieser Faktor, der Hauptgrund dafür, warum keine Simulation als „Best-Fit“-Modellierung proklamiert werden kann.

Maximale Abflusshöhe

Die maximalen Abflusshöhen waren durch die μ- & ξ-Parameter, verschiedene Anriss- und Erosionsvolumina und ebenfalls durch Veränderungen an der Topographie beeinflussbar. Bei den Reibungsparametern muss man die beiden Komponenten, wie auch die verschiedenen Messstationen unterscheiden. Das ξ hat die Tendenz, bei Erhöhung des Reibungswertes eine Verminderung der maximalen Abflusshöhe als Folge zu haben. Dies konnte bei allen Messpunkten so konstatiert werden. Das μ hat keine klare Tendenz. Im oberen Bereich des Murgangs erhöhte sich die Abflusstiefe bei Erhöhung des Wertes für die trockene Reibung, unteren erniedrigte sie die Abflusshöhe (Abbildung 43).

Eine Aufteilung des Anrissvolumens bedeutete am oberen Messpunkt *Strasse obere Grisselen* weniger grosse Abflusshöhen, da sich der Murgang auf einer grösseren Breite zu Tale bewegte. An den beiden unteren Messstationen konnte hingegen keine Veränderungen in den Abflusshöhen mehr festgestellt werden.

Beim untersten Messpunkt *Bei Austritt aus dem Wald* wurde der Effekt der veränderten Topographie eindeutig messbar. Die maximale Abflusshöhe stieg um 1- 2 m an, sobald der Damm die Geschiebemassen stark in Richtung „Grosswiyer“ ablenkte.

6.1.3 Sensitivitätsanalysen

Die verwendeten Daten und Analysen der Sensitivitätsanalysen basieren auf der Modellkalibrierung und den daraus gewonnenen Resultaten. Die aus der Kalibrierung hervorgegangenen „Best-Fit“-Kombinationen (im Falle des Murgangs „Goldau“ die pseudo-„Best-Fit“-Kombination) dienten als Ausgangssimulation, um an verschiedenen Inputparametern, wie dem Δμ für die Fläche des Waldes, dem aktiv-passiven Fliessdruck λ und der spezifischen Dichte des Erosionsmaterials (Murgang „Arth“), sowie dem Δμ für den Waldperimeter (Murgang „Goldau“), eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

6.1.3.1 Murgang „Arth“

Variation Δμ für den Waldperimeter

Ausgehend von den Parameterwerten der „Best-Fit“-Kombination wurde der Wert der trockenen Reibung μ im Waldperimeter verändert, bei Beibehaltung aller anderen Inputeinstellungen, um den Einfluss des Waldes auf die Murgangsimulationen zu eruieren. Bei einer Modellierung wurde auf eine Erhöhung des μ in der Waldfläche verzichtet. Diese Simulation bildete die „Nullvariante“, die Simulation modellierte einen Murgang ohne Waldeinfluss. In der Tabelle 10 sind die verschiedenen gewählten Einstellungen aufgelistet.

Tabelle 10: Einstellungen der Voellmy-Salm Parameter für die Sensitivitätsanalyse des Waldeinflusses beim Murgang „Arth“.

Bezeichnung	μ (ausserhalb der Waldfläche)	μ (Innerhalb der Waldfläche)	ξ
	[-]	[-]	[m/s^2]
0.00 *(Nullvar.)*	0.25	0.25	30
0.02 *(Best-Fit)*	0.25	0.27	30
0.04	0.25	0.29	30
0.06	0.25	0.31	30
0.08	0.25	0.33	30
0.10	0.25	0.35	30
0.20	0.25	0.45	30

An den drei Messstationen wurden die maximalen Fliessgeschwindigkeiten und Abflusshöhen gemessen. Dazu folgten Untersuchungen bezüglich des Fliessweges und der Auslaufdistanz. Ziel dieser Modellierungen war eine Verbesserung der „Best-Fit“-Simulation, sowie eine Erforschung der Auswirkungen, welche eine Veränderung des μ-Wertes auf die Waldfläche möglicherweise hat.

Auf den folgenden beiden Seiten sind die Resultate der Messungen an den drei Messpunkten für die Sensitivitätsanalyse aller untersuchten Inputparameter aufgelistet (Tabelle 11).

Tabelle 11: Outputdaten der Sensitivitätsanalysen der drei untersuchten Inputparameter („Wald-μ“, aktiv-passiver Fliessdruck und Dichte des erodierbaren Materials) des Murgangs „Arth“. Rot eingerahmt ist die für den Murgang „Arth in der Modellkalibrierung“ gefundene „Best-Fit“-Simulation (Fortsetzung nächste Seite).

Murgang "Arth"	**Volumen**		**Voellmy-Reibung**			**Parameter**	**Geschwindigkeit**			
Analysierter Inputparameter	Anriss	Erosion	μ [Mü]	μ [Mü] Wald	ξ [Xi]		Maximal	*Oberhalb Felskante*	*Vor Austritt aus dem Wald*	*Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall*
								684/025//213/715	683/710//213/570	683/465//213/465
	[m^3]	[m^3]	[-]	[-]	[m/s^2]		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
μ Waldperimeter						**Δμ**				
	41`700	27`000	0.25	0.25	30	+0.00	10.30	7.50	4.61	1.12
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	+0.02	10.18	6.93	3.96	0.79
	41`700	27`000	0.25	0.29	30	+0.04	10.02	6.66	3.50	1.10
	41`700	27`000	0.25	0.31	30	+0.06	9.83	6.06	3.33	1.07
	41`700	27`000	0.25	0.33	30	+0.08	9.83	5.87	3.27	0.99
	41`700	27`000	0.25	0.35	30	+0.10	9.48	4.99	3.03	1.07
	44`700	27`000	0.25	0.45	30	+0.20	8.60	4.47	2.52	1.11
Lambda						**λ**				
						[-]				
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	2.5	10.18	6.93	3.96	0.79
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	1.0	11.44	7.70	3.76	0.39
Dichte Erosionsmaterial						**Dichte**				
						[kg/m^3]				
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	1500	10.18	6.96	4.76	1.65
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	1800	10.18	6.93	3.96	0.79
	41`700	27`000	0.25	0.27	30	2200	10.18	6.89	4.11	1.09

Abflusstiefe maximal			Ausbruch Richtung Färnisbüel				
Oberhalb Felskante	*Vor Austritt aus dem Wald*	*Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall*	Länge Ablagerungsfläche ab Bahndamm	Differenz modelliert - gemessen	Differenz modelliert - gemessen	Abflusstiefe vor Bahndamm	Abflusstiefe bei Austritt aus dem Wald
684/025//213/715	683/675//213/570	683/465//213/465					
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[m]	[m]
4.14	2.15	1.80	180	-40	-18%	1.36	0.35
3.96	1.89	1.66	240	20	9%	1.09	0.18
3.90	1.87	1.58	130	-90	-41%	1.24	0.22
3.58	1.62	1.56	220	0	0%	1.00	0.18
3.27	1.58	1.38	150	-70	-32%	0.87	0.34
3.03	1.46	1.33	150	-70	-32%	0.67	0.28
2.58	1.40	1.21	230	10	5%	0.54	0.23
3.96	1.89	1.66	240	20	9%	1.09	0.18
4.87	2.47	1.85	120	-100	-45%	2.12	0.58
3.98	2.09	1.81	200	-20	-9%	1.60	0.21
3.96	1.89	1.66	240	20	9%	1.09	0.18
3.96	2.06	1.52	260	40	18%	1.00	0.38

Fliessweg

Die Fliesswege der verschiedenen Simulationen in dieser Sensitivitätsanalyse unterscheiden sich nicht markant voneinander. Einzig vor dem Verlassen des Waldes floss bei einigen Modellierungen ein kleiner Teil des Geschiebes auf der orographisch rechten Seite auf einer Länge von ca. 50 – 100 m als Nebenarm talwärts (Abbildung 52). Je höher der Wert für das „Wald-μ“ gewählt wurde, desto weniger stark ausgeprägt fiel dieser Nebenarm aus. Grund dafür könnte eine etwas veränderte Fliessbahn der Modellierungen kurz unterhalb der Felskante sein. Während diesem Abschnitt bewegten sich die modellierten Murgänge und ihre Abflusshöhenpeaks nicht am gleichen Ort weiter. Die Simulationen mit einem grossen Wert für die trockene Reibung μ im Waldperimeter in Fliessrichtung etwas weiter links als diejenigen, welche ein tiefes „Waldperimeter-μ“ als Inputparameter aufwiesen (Abbildung 48).

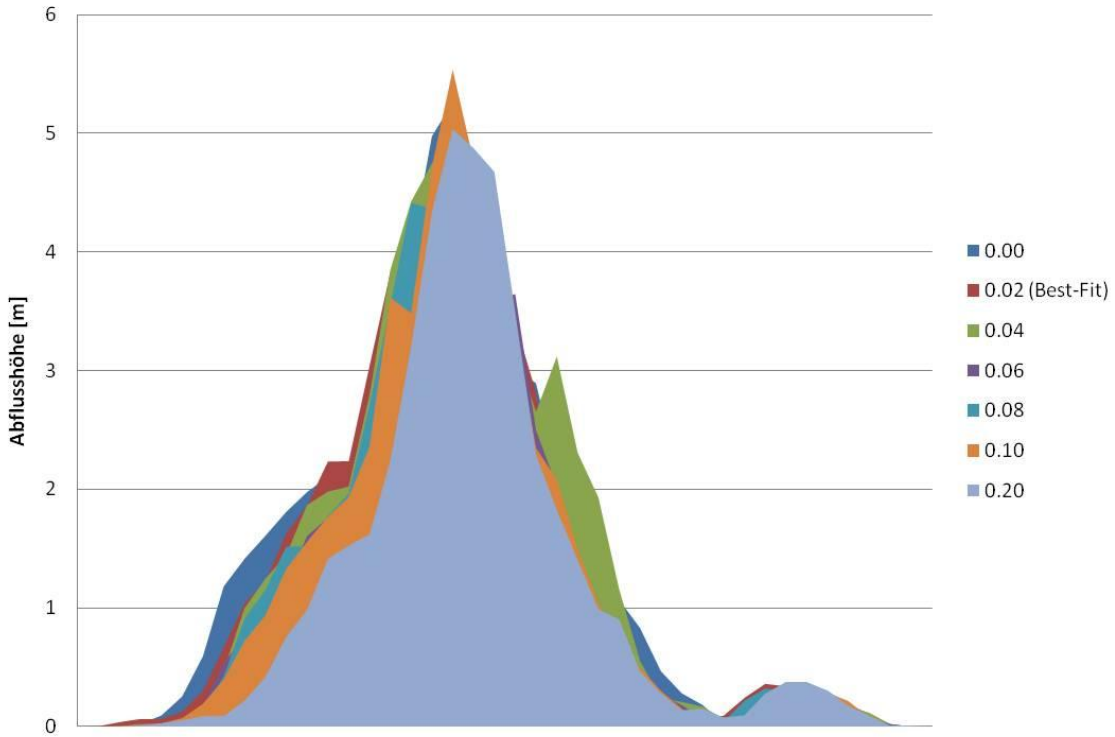


Abbildung 48: Querprofile der Simulationen mit unterschiedlichem „Wald-μ“ des Murgangs „Arth“. Die Querprofile wurden auf der 520 m Höhenkurve von Koordinate 683/815//213/670 bis 683/855//213/560 aufgenommen. Höher der Wert für trockene Reibung im Wald, desto tendenziell weiter rechts floss die Hauptgeschiebemenge. Das Diagramm stellt die Querprofile in der Blickrichtung von unten (Ablagerungsgebiet) nach oben (Anrisszone) dar.

Bei der Länge des Ablagerungsgebietes des Färnisbüelausbruches ist keine klare Tendenz ersichtlich. Die Distanzen von der Unterführung der SBB-Bahnlinie der einzelnen Simulationen bewegen sich zwischen 130 m und 240 m, wobei die Länge des „echten“ Murgangs 220 m betrug (Abbildung 49). Der Realität am nächsten simulierte die Modellierung mit einem μ für den Waldperimeter von 0.31 (Δμ +0.06) [-], welcher die exakt gleiche Ausbreitung berechnete wie der Ausbruch in der Realität vorkam. Die Schwankungen könnten auf verschiedenen Gründen basieren. Zum einen wirkt der veränderte μ-Parameter im Auslaufgebiet nicht mehr, da er sich ausserhalb des Waldes befindet. Dadurch beschränkt sich die Wirkung des Reibungsparameters auf den Fliessweg oberhalb der Bahnlinie. Je nach Wahl der trockenen Reibung schlägt der modellierte Murgang einen anderen Fliessweg ein und deshalb gerät mehr oder weniger Geschiebematerial in Richtung des Ausbruches nach Färnisbüel. Die gemessenen Werte aller hinsichtlich der Sensitivitätsanalyse durchgeführten Simulationen, entsprachen eher der Wirklichkeit als die meisten Modellierungen der Kalibrierung.

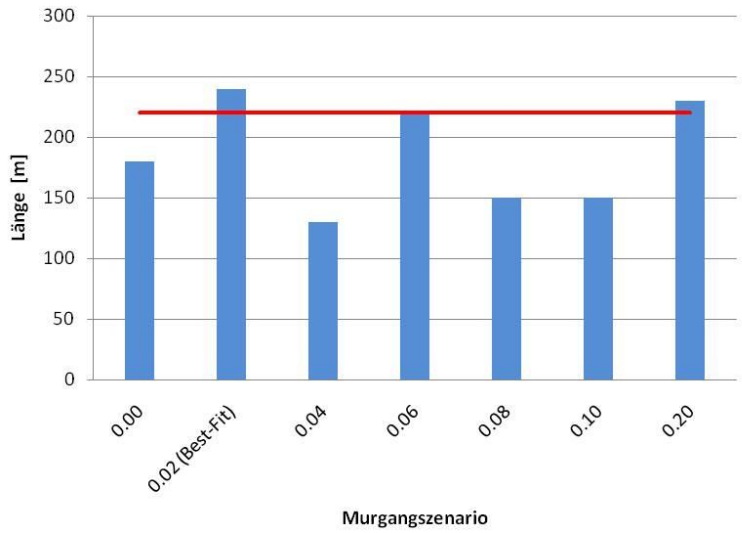


Abbildung 49: Vergleich zwischen der Länge der Ablagerungsgebiete, gemessen von der Bahnunterführung bis zur Spitze des Murgangkopfes. Die rote Linie markiert die effektive Länge der Ablagerungsfläche des Murgangs „Arth“.

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche)

Da auf dem Abflusshöhenniveau von 0.00 m keine präzisen Aussagen gemacht werden konnten, wurde die Analyse auf dem 0.5 m und 0.75 m Level durchgeführt.

Die Ablagerungsflächen bei allen Modellierungen ähneln sich von der Form und der Länge her (Abbildung 52). Die Spitze der Murgänge erreichten immer das Gebiet von „Gerzlen“ und stoppten unmittelbar davor oder danach. Die Ablagerungsfläche hinter dem Gantlihof (in Fliessrichtung) beschränkte sich bei allen Modellierungen auf eine kurze Distanz (ca. 50 m). Dies steht im Gegensatz zu den Erhebungen von Hunziker (2006), welcher die dortige Ablagerungsfläche auf dem 0.75 m Niveau länger und weiter nördlich festgestellt hat. In der Realität floss der Murgang anders als in den Modellierungen in einem Hauptarm und nicht

zwei Nebenarmen im Ablagerungsgebiet Richtung Rigiaa (Abbildung 50). Da alle Modellierungen die Ablagerungsfläche, im Vergleich zur realen Grösse des Ablagerungsgebietes des Murgangs „Arth“, ungefähr im gleichen Rahmen zu gross darstellten, kann keine Differenzierung nach Qualität der Simulationen gemacht werden.

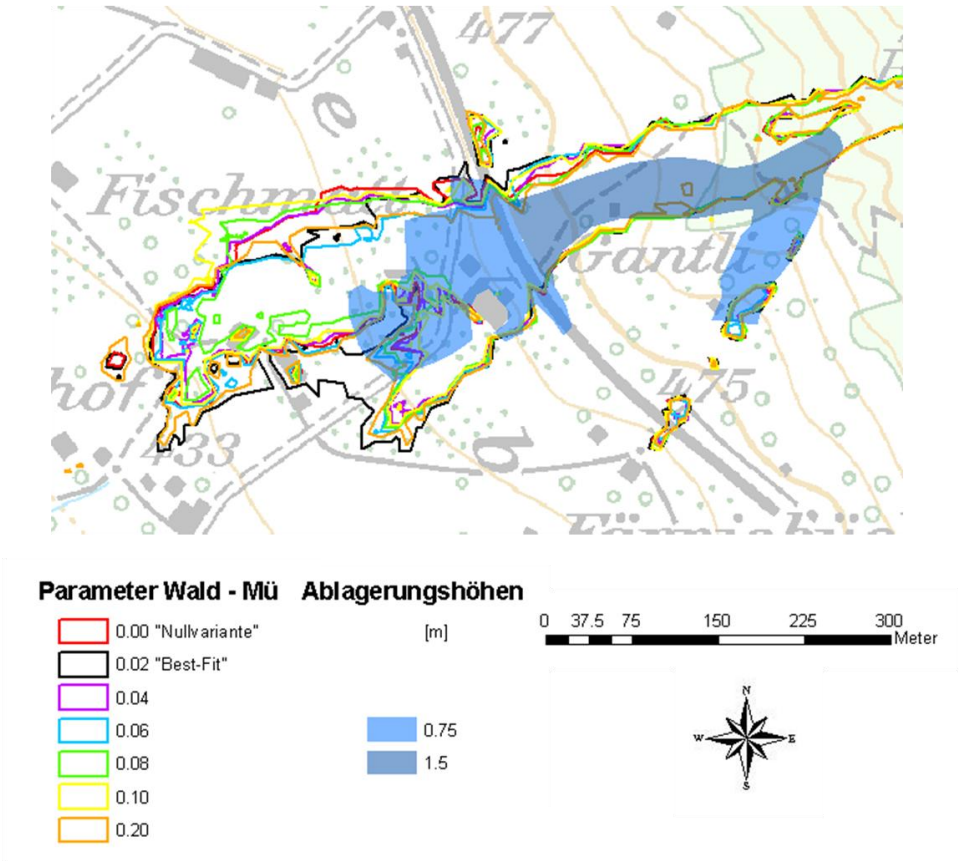


Abbildung 50: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen „Wald-µ“ Szenarien beim Murgang „Arth“. Verglichen wurden die Modellierungen auf der Ablagerungshöhe von 0.75 m. Hinterlegt ist die Darstellung von Hunziker (2006) als Vergleich mit der Realität (Kartengrundlagen: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

(Maximale) Fliessgeschwindigkeit

Das in Abbildung 42 erhaltene Resultat, dass bei grösser werdendem µ sich die Fliessgeschwindigkeiten des Murganges verringern, ist auch in dieser Untersuchung feststellbar. Je grösser das Δµ für den Waldperimeter gesetzt wurde, umso mehr verringerte sich die Fliessgeschwindigkeit an den Messpunkten, welche im Wald lagen (Abbildung 51b). Die Nullvariante, bei der ein Murgang ohne Waldeinfluss modelliert wurde, simuliert die höchsten Fliessgeschwindigkeiten, bei allen Messstationen. An der untersten Messung, *Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall*, wurde der Effekt des erhöhten „Wald-µ“ nicht mehr messbar nachgewiesen. Zwar fliesst dort die Nullvariante immer noch mit der grössten Geschwindigkeit, aber bei den anderen Simulationen mit unterschiedlich hohen Reibungsparameterwerten für den Waldperimeter (0.27 – 0.45 [-]) konnte keine Neigung in die eine oder andere Richtung eruiert werden. Die Fliessgeschwindigkeiten im Ablagerungsgebiet bewegen sich mit 0.79 m/s bis 1.11 m/s allerdings auf tiefem Niveau und

die Unterschiede sind relativ gering, sodass keine eindeutige Tendenz ausgemacht werden kann. Aufgrund der erhobenen Daten der oberen beiden Messstationen und den Aussagen aus den Berichten zufolge („Der Murgang [„Arth“] bewegte sich mit geringer Geschwindigkeit talwärts“), könnte daraus geschlossen werden, dass die Modellierung mit dem grössten Wert für die trockene Reibung im Wald die beste Simulation ergibt (was in diesem Falle die Simulation mit dem „Wald-μ“-Wert von 0.45 [-] wäre). Doch da keine exakten Messungen vom Ereignis im August 2005 vorhanden sind und der Ausdruck „wenige Meter pro Sekunde“ ein schwammiger ist, kann nicht klar herauskristallisiert werden, welcher Wert für die trockene Reibung der Beste für die Simulation des Murgangs „Arth“ hinsichtlich der Fliessgeschwindigkeit ist.

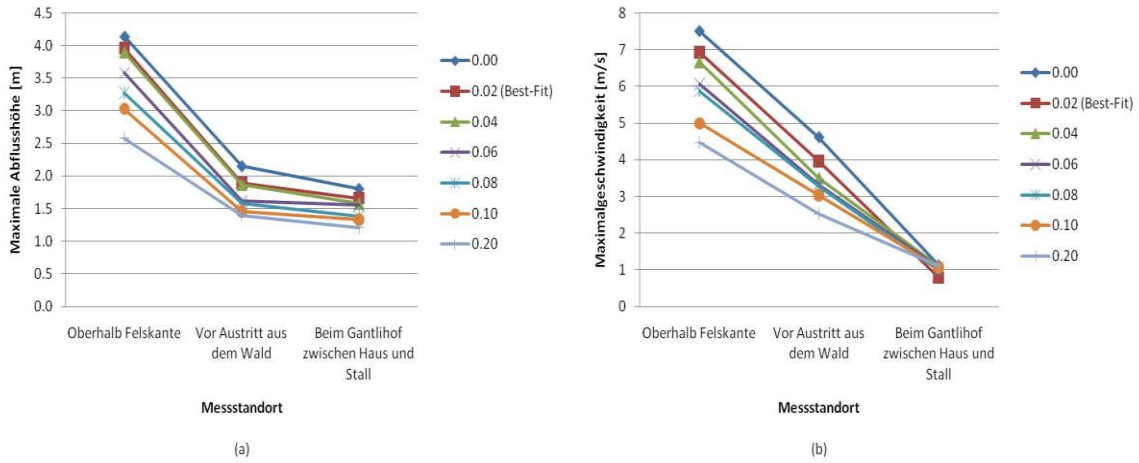


Abbildung 51: Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die trockene Reibung μ im Waldperimeter des Murgangs „Arth“ hinsichtlich: a) der maximalen Abflusshöhe und b) der maximalen Fliessgeschwindigkeit. Die mit „0.00“ bezeichnete Simulation entspricht der Nullvariante, einem Murgang ohne verändernden Einfluss eines Waldes.

(Maximale) Abflusshöhe

Ebenfalls negativ korreliert sind die maximalen Abflusshöhen mit den µ-Werten für die Waldflächen. Wie bei der maximalen Fliessgeschwindigkeit verringerte sich die maximale Abflusshöhe bei einer Erhöhung des „Wald-µ“-Wertes (Abbildung 51a). Dieses Resultat steht zwar nicht im krassen Widerspruch mit den Resultaten aus der Abbildung 43b, wo keine klare Tendenz resultierte, aber dieses Ergebnis ist eindeutiger und ohne Zweifel tendenziös. Die Neigung zieht sich bis zum untersten Messpunkt, auch dort war die Abflusshöhe am grössten, wo die trockene Reibung für die Waldfläche am geringsten gewählt wurde (Nullvariante). Durch die Veränderungen des Inputparameters gerieten einzelne Messungen einiger Modellierungen ausserhalb des optimalen Bereichs. Bei der Nullvariante war die Abflusshöhe beim Gantlihof etwas zu hoch, während dem bei den Simulationen mit den höchsten „Wald-µ“-Werten (0.35 bzw. 0.45 [-]) die Abflusshöhe bei der Messstation *Vor Austritt aus dem Wald* etwas zu tief ausfiel (Tabelle 11). Wie bei den Untersuchungen der maximalen Fliessgeschwindigkeiten ist es auch hier schwierig konkrete Aussagen zu machen, welche Variante die beste sein könnte, da die Vergleichsdaten vom Murgang „Arth“ unpräzise sind.

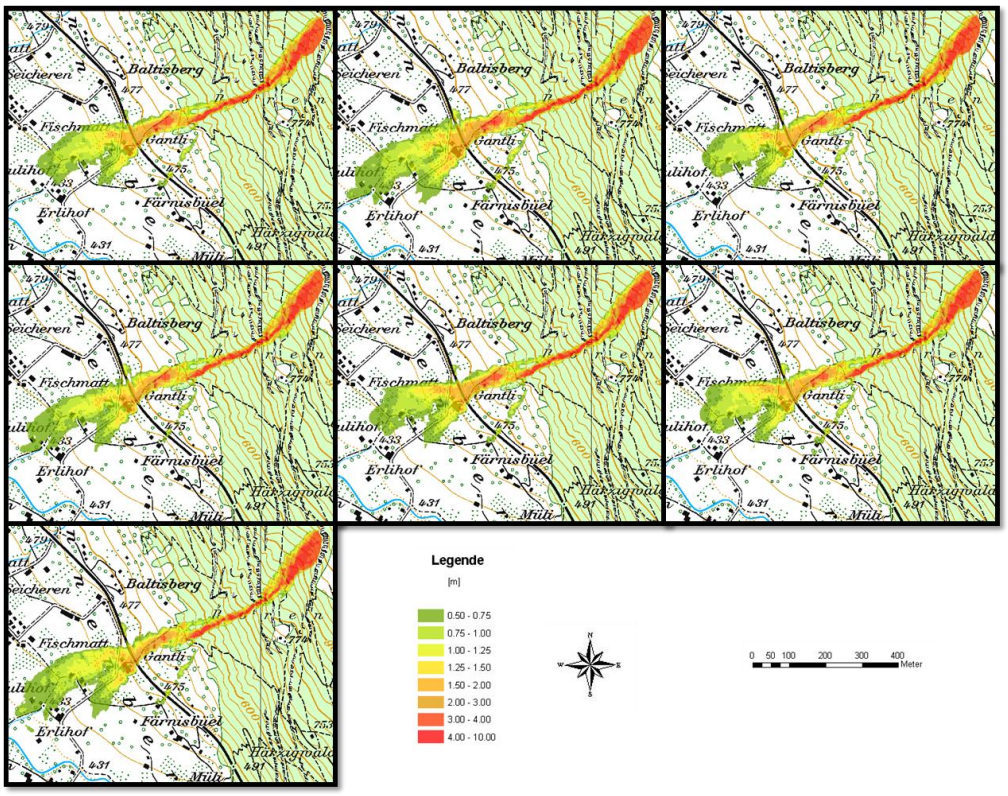


Abbildung 52: Abbildungen der (maximalen) Abflusshöhen >0.5 m der Murgang „Arth“-Modellierung. Der Wert für das µ des Waldperimeters nimmt von links nach rechts und von oben nach unten zu (von l.o. nach r.u.: „Wald-µ“= 0.00 (Nullvariante), 0.02 („Best-Fit“), 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.20 [-]) (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Variation des aktiv-passiven Fliessdrucks Lambda λ

Der aktiv-passive Fliessdruck λ beschreibt die umgewandelte Energie bei Streckungs- und Dehnungsprozessen des Geschiebes. Unterschiedliche Meinungen bei der Wahl des Wertes für den Fliessdruck bestärkten die Absicht eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Untersucht wurden die gleichen Outputdaten wie bei der Sensitivitätsanalyse der Reibungsparameter für die Waldfläche, auf dem Niveau von λ = 1.0 [-] und λ = 2.5 [-]. Als Ausgangseinstellung der Inputparameter diente die in der Modellkalibrierung gefundene „Best-Fit"-Simulation.

Fliessweg

Die Modellierung des Murgangs „Arth" mit einem aktiv-passiven Fliessdruck von 1.0 [-] verläuft markant schmäler als die „Best-Fit"-Modellierung, in welcher mit einem Fliessdruck von 2.5 [-] gerechnet wurde. Die λ = 1.0-Simulation fliesst nicht nur in einer engeren Fliesstrecke, sie simuliert auch keine Ausbrüche, welche es in der Realität nicht gegeben hat (kleiner Ausbruch nach rechts in Fliessrichtung, kurz vor dem Austritt aus dem Wald).

Bei der Ablagerungsfläche des Ausbruchs Richtung Färnisbüel ergeben sich grosse Unterschiede bezüglich der Länge. Während die „Best-Fit"-Simulation mit λ = 2.5 [-] nach 240 m stoppte, kam diejenige Modellierung mit λ = 1.0 [-] bereits nach der Hälfte davon (120 m) zum Stillstand (Tabelle 11). Im Vergleich mit dem Murgang „Arth" geriet die Simulation mit dem kleineren Wert für den aktiv-passiven Fliessdruck um 45 % zu kurz. Eine Verkleinerung des λ bringt somit keine Verbesserung in der Modellierung des Murgangs „Arth" in Bezug auf die Länge des Ablagerungsgebietes des Ausbruchs „Färnisbüel", sehr wohl aber im Bezug auf den Fliessweg im Transitgebiet.

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche)

Was beim Ausbruch Richtung Färnisbüel eintraf, ist auch im Ablagerungsgebiet „Gantlihof" der Fall: Je kleiner der Wert für das λ gewählt wird, desto kürzer verläuft die Auslaufdistanz (Abbildung 53). Anders als beim Ausbruch entspricht hier eine Verkleinerung des Ablagerungsgebietes eher der Realität. Eine Berechnung mit einem kleineren aktiv-passiven Fliessdruck als derjenige der „Best-Fit"-Modellierung simuliert den Murgang „Arth" besser.

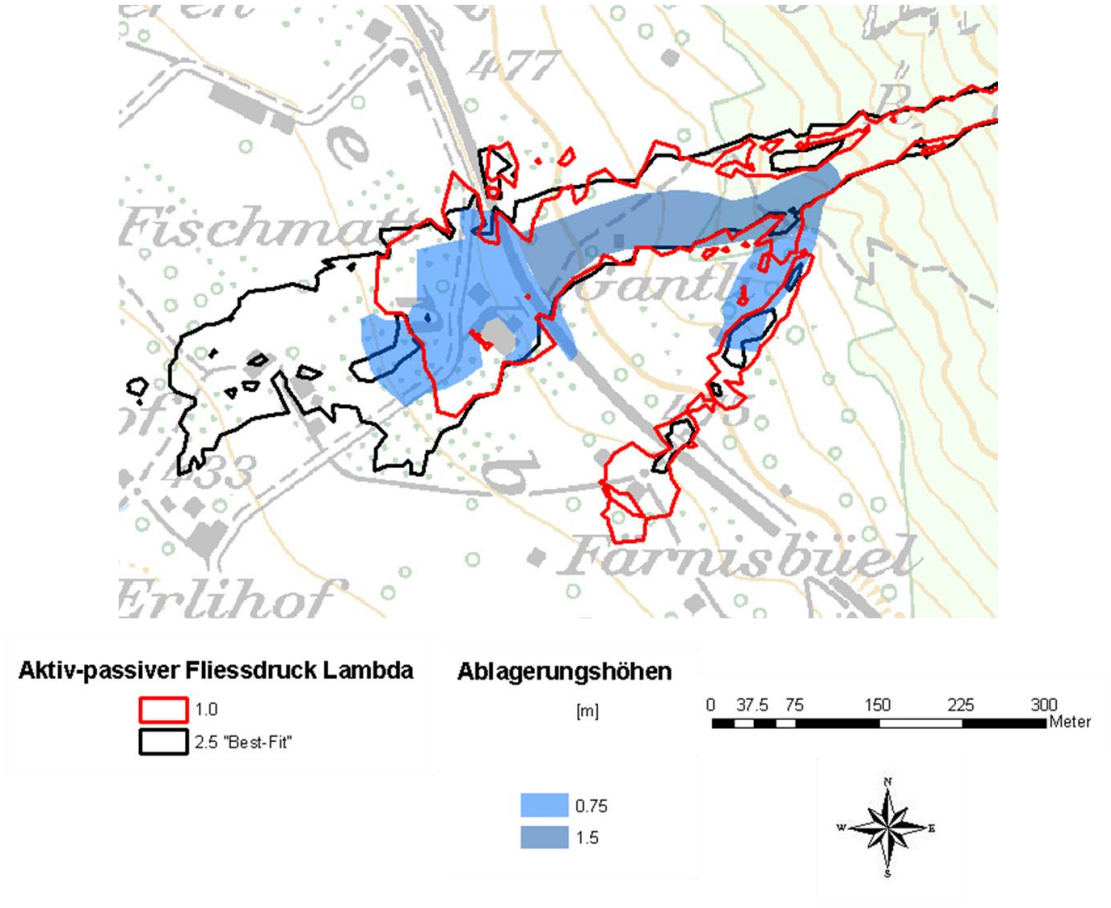


Abbildung 53: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen Fliessdruck λ-Szenarien. Verglichen wurden die Modellierungen auf der Ablagerungshöhe von 0.75 m. Hinterlegt ist die Darstellung von Hunziker (2006) als Vergleich mit der Realität (Kartengrundlagen: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

(Maximale) Fliessgeschwindigkeit

Die Abnahme der Fliessgeschwindigkeit vom Anriss- zum Ablagerungsgebiet verläuft bei der Modellierung mit einem Wert für den Fliessdruck λ von 1.0 [-] steiler als bei der „Best-Fit"-Kombination. Während am oberen Messstandort noch eine grössere Geschwindigkeit für das kleinere λ gemessen wurde, flossen beide Simulationen beim mittleren Messpunkt ungefähr gleich schnell und beim Gantlihof bewegte sich der modellierte Murgang mit dem aktiv-passiven Flussdruckwert von 1.0 [-] nur noch halb so schnell wie derjenige mit einem λ = 2.5 [-] (Abbildung 54b).

(Maximale) Abflusshöhe

Mit einem tieferen Wert für den aktiv-passiven Fliessdruck wurden durchwegs höhere maximale Abflusshöhen erzielt (Abbildung 54a). Die Abflusstiefen fielen bei λ = 1.0 [-] zwischen 10 – 23 % höher aus als beim λ = 2.5 [-]. Die grösseren Abflusshöhen brachten die Simulation mit verändertem aktiv-passiven Fliessdruck bei den Messpunkten *Oberhalb Felskante* und *Beim Gantlihof zwischen Haus und Stall* aus dem optimalen Bereich (Tabelle 11).

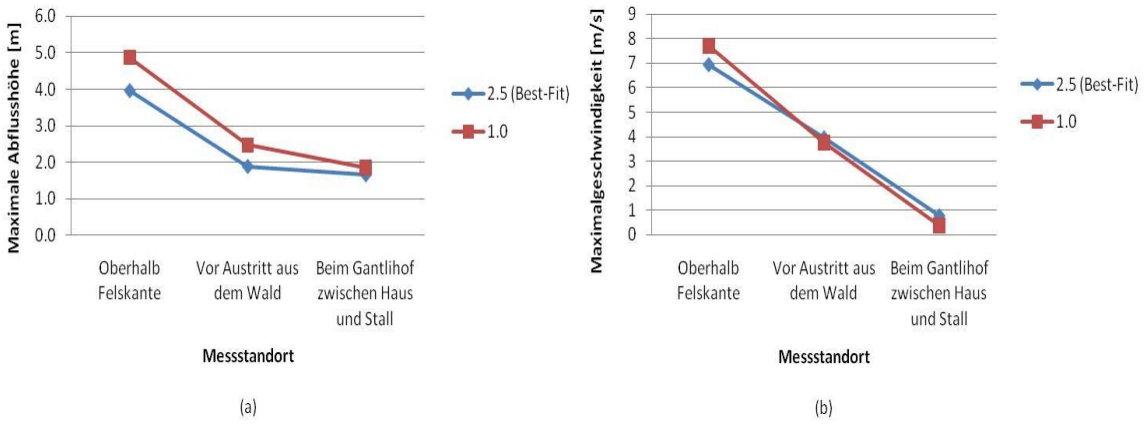


Abbildung 54: Gemessene Werte bei den Messstationen für die Simulationen des Murgangs „Arth“ mit unterschiedlichem aktiv-passiven Fliessdruck λ hinsichtlich: a) der maximalen Abflusshöhe und b) der maximalen Fliessgeschwindigkeit.

Spezifische Dichte des Erosionsmaterials

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, kann ein Waldboden unterschiedlich verdichtet sein. Um herauszufinden, ob eine Veränderung der Dichte einen Einfluss auf eine Simulation in RAMMS hat, wurde ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Der Wert der „Best-Fit“-Kombination wurde mit Werten aus der Literatur (1500 kg/m^3, resp. 2200 kg/m^3) variiert.

Fliessweg

Die Fliesswege der drei unterschiedlichen Dichte-Modellierungen unterschieden sich nicht voneinander. Im Anriss- und Transitgebiet bewegten sich alle Simulationen mit derselben Breite, die Richtung blieb bei allen praktisch genau gleich und auch alle modellierten Ausbrüche begannen am gleichen Ort (Abbildung 55).

Je kleiner die Dichte des erodierbaren Materials in der Simulation gewählt wird, desto kürzer wird die Ablagerungsstrecke des Ausbruchs Richtung Färnisbüel. Allerdings sind die Unterschiede relativ gering, sie bewegen sich zwischen -9 % und +18 % der gemessenen Distanz von der Bahnunterführung bis zur Spitze des Ablagerungsgebietes des Murgangs „Arth“ (Tabelle 11). Die Abflusstiefen vor dem Bahndamm verringern sich ebenfalls bei einer tieferen Dichte.

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsgebiet)

Die Länge, vor allem aber die Form der Fläche des Ablagerungsgebietes verändern sich mit den unterschiedlichen Einstellungen. Je weniger dicht das erodierbare Material modelliert wird, desto kürzer verläuft die Auslaufstrecke und desto weiter südlich kommt die Ablagerungsfläche zum Stoppen (Abbildung 55). In der „Best-Fit"-Simulation bildeten sich im Ablagerungsgebiet zwei ungefähr gleich lange und mächtige Ablagerungsarme. Bei Erhöhung der Dichte des Erosionsmaterials verschob sich dieses Gleichgewicht mehr zu Gunsten des nördlichen Armes, bei Herabsetzung wurde der Südliche länger und stärker ausgebildet. Die Variante mit einer Dichte des erodierbaren Materials von 1500 kg/m^3 entspricht bei Vergleich mit dem Ereignis „Arth" am ehesten der Realität (Abbildung 55).

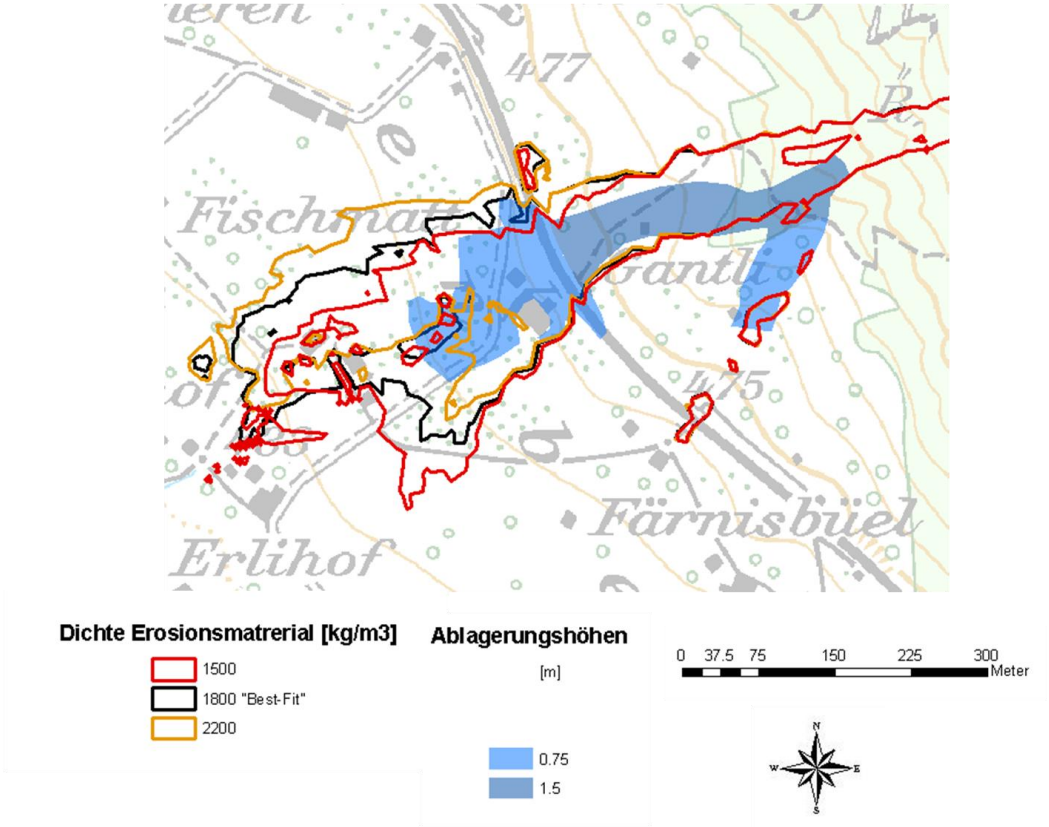


Abbildung 55: Konturen der Ablagerungsflächen der verschiedenen Erosionsmaterialdichte-Szenarien. Verglichen wurden die Modellierungen auf der Ablagerungshöhe von 0.75 m. Hinterlegt ist die Darstellung von Hunziker (2006) als Vergleich mit der Realität (Kartengrundlagen: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

(Maximale) Fliessgeschwindigkeit

Die Veränderung der Dichte als Inputparameter zieht keine klaren Konsequenzen bei den maximalen Fliessgeschwindigkeiten nach sich (Abbildung 56b). Beim obersten Messpunkt sind die Unterschiede marginal, vermutlich weil an dieser Stelle das erodierte Material erst zu fliessen begann. Die Fliessgeschwindigkeiten bei der „Best-Fit"-Kombination fallen durchwegs tiefer aus, als bei den beiden anderen Modellierungen (Tabelle 11). Da sich die Fliessgeschwindigkeiten an den Messstellen nur um max. 0.8 m/s unterschieden, verbleiben alle Simulationen hinsichtlich der Geschwindigkeit im grünen Bereich.

(Maximale) Abflusshöhe

Wie bei den maximalen Fliessgeschwindigkeiten sind die gemessenen Abflusshöhen konfus und nicht gerichtet verteilt. Einzig beim unteren Messpunkt beim Gantlihof scheint eine gewisse Tendenz durchzuschimmern. Dort ist die Dichte des erodierbaren Materials negativ mit der Abflusshöhe korreliert (Tabelle 11). Ansonsten zeigten sich keine (Messstelle *Oberhalb Felskante*), oder nur marginale Unterschiede (Messstelle *Vor Austritt aus dem Wald*) (Abbildung 56a). Durch die erhöhte Abflusstiefe beim Gantlihof fällt der Wert für die Modellierung mit der geringeren Dichte des Waldbodens aus dem optimalen Bereich, bleibt aber in einem akzeptablen Rahmen (Tabelle 11).

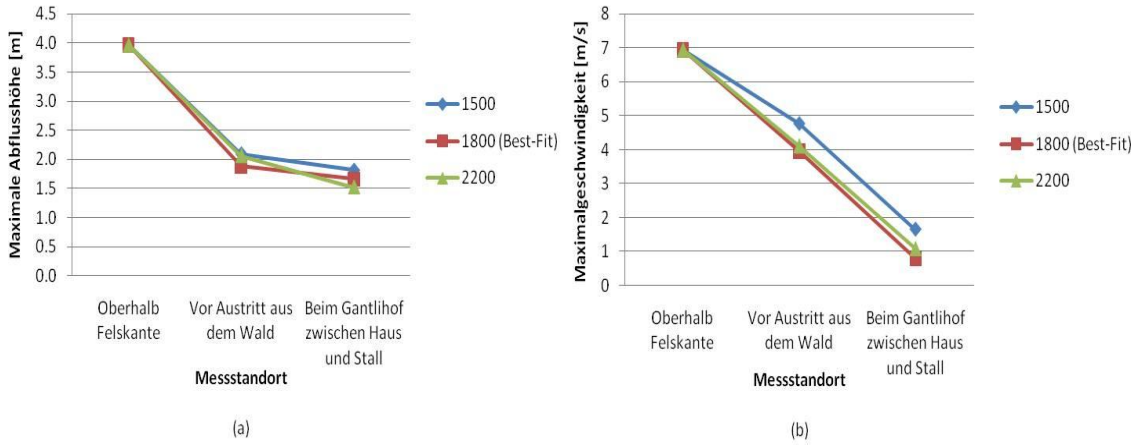


Abbildung 56: Gemessene Werte bei den Messstationen für die Simulationen des Murgangs „Arth“ mit unterschiedlicher Dichte des erodierbaren Materials hinsichtlich: a) der maximalen Abflusshöhe und b) der maximalen Fliessgeschwindigkeit.

6.1.3.2 Murgang „Goldau“

Variation Δμ für den Waldperimeter

Trotz den ungenügenden Resultaten in der Modellkalibrierung, sollte eine akzeptable Sensitivitätsanalyse möglich sein. Dafür wurden die Werte der Inputparameter der „besten“ Simulation des Murgangs „Goldau“ als Ausgangsgrössen verwendet und das Δμ für die Waldfläche variiert, analog zur Sensitivitätsanalyse beim Murgang „Arth“ (Kap. 6.1.3.1). In der Tabelle 12 sind die verwendeten Werte für die trockene Reibung des Waldperimeters aufgelistet.

Tabelle 12: Einstellungen der Voellmy-Salm Parameter für die Sensitivitätsanalyse des Waldeinflusses beim Murgang „Goldau“.

Bezeichnung	**μ (ausserhalb der Waldfläche**	**μ (innerhalb der Waldfläche)**	**ξ**
	[-]	[-]	[m/s^2]
0.00 *(Nullvar.)*	0.20	0.20	10
0.02 *(Best-Fit)*	0.20	0.22	10
0.04	0.20	0.24	10
0.06	0.20	0.26	10
0.08	0.20	0.28	10
0.10	0.20	0.30	10

Die Vorgehensweise entspricht derjenigen der Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Arth“, wobei bei diesem Murgang nur die Wirkung des „Wald-μ“ untersucht wurde. Auf den beiden folgenden Seiten sind die Resultate der Analyse aufgelistet (Tabelle 13).

Tabelle 13: Outputdaten der Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Goldau“. Rot eingerahmt ist die für den Murgang „Goldau“ in der Modellkalibrierung beste gefundene Kombination von Inputparametern (Fortsetzung nächste Seite).

Murgang "Goldau"	Volumen	Voellmy-Reibung			Geschwindigkeit			
Analysierter Inputparameter	Volumen	µ [Mü]	µ [Mü] Wald	ξ [Xi]	Maximal	Strasse obere Grisselen	Bei Austritt aus dem Gerinne	Bei Austritt aus dem Wald
						685/385//213/240	685/350//212/685	685/060//212/195
	[m^3]	[-]	[-]	[m/s^2]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
µ Waldperimeter								
	191`170	0.20	0.20	10	11.96	1.86	2.05	2.13
	191`170	0.20	0.22	10	20.35	1.91	1.69	2.34
	191`170	0.20	0.24	10	20.20	1.73	1.98	1.87
	191`170	0.20	0.26	10	11.96	1.66	2.29	1.77
	191`170	0.20	0.28	10	11.96	1.61	2.31	1.73
	191`170	0.20	0.30	10	11.96	1.56	2.36	1.64

Abflusstiefe maximal			Ablagerungsgebiet Grosswiyer		
Strasse obere Grisselen	Bei Austritt aus dem Gerinne	Bei Austritt aus dem Wald	Länge Ablagerungsfläche Grosswiyer	Differenz modelliert - gemessen Grosswiyer	Differenz modelliert - gemessen Grosswiyer
685/385//212/240	685/350//212/685	685/060//212/195			
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]
5.65	4.40	3.69	340	20	6%
5.25	4.27	3.79	320	0	0%
5.97	4.67	3.68	580	260	81%
6.27	4.45	3.54	560	240	75%
6.32	4.77	3.43	500	180	56%
6.56	4.83	2.35	440	120	38%

Fliessweg

Die Fliesswege der verschiedenen Varianten zeigen weder ein einheitliches Verhalten, noch können daraus Tendenzen oder Gesetzmässigkeiten abgeleitet werden. Einheitlich bei allen Modellierungen ist der zu breite Fliessweg über praktisch die ganze Strecke. Der westliche Rand der Simulationen stimmt mit der Ausbreitung des reellen Murgangs überein, an der Ostseite hingegen modellierte RAMMS die Murgänge zu weit nach rechts (orographisch). Zeugen davon sind auch die simulierten Ausbrüche, welche beim reellen Murgang nicht vorgekommen sind. Die Ausnahme bildet der oberste, bereits früher in dieser Arbeit erwähnte, kurze Ausbruch. Die Simulationen modellierten diesen Ausbruch ebenfalls, allerdings nicht in den richtigen Dimensionen. Die grössten Abweichungen bezüglich Fliessweg und Ablagerungsfläche wurden bei der Modellierung mit einem „Wald-μ“ von 0.04 [-] erhalten, gefolgt von den Simulationen mit den Parameterwerten für die trockene Reibung von 0.06, bzw. 0.08 [-]. Ein Weglassen der Waldwirkung ($\Delta\mu$ = 0.00 [-]) hatte im Vergleich zu den Modellierungen mit Waldwirkung keinen Einfluss auf den Fliessweg (Abbildung 57).

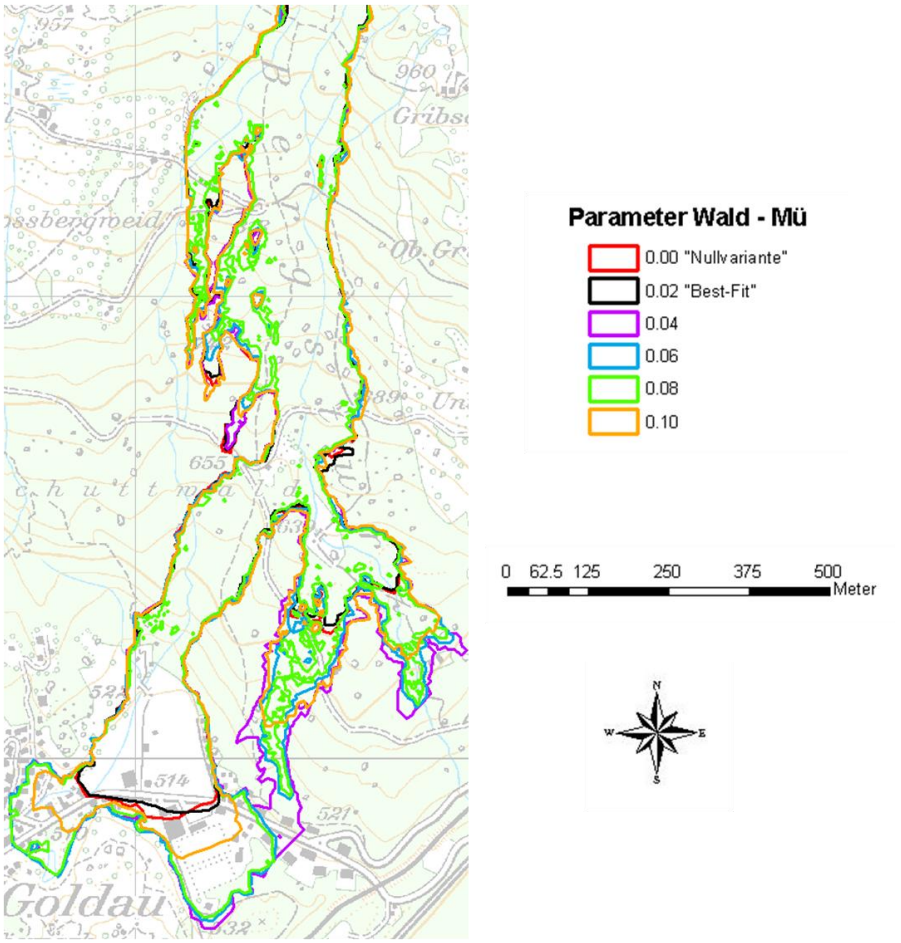


Abbildung 57: Konturen der Fliesswege und Ablagerungsflächen der verschiedenen „Wald-μ“-Varianten beim Murgang „Goldau“. Die Umrisse basieren auf einem Ablagerungshöhenniveau von 0.01 m (Kartengrundlagen: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

Auslaufdistanz (Grösse Ablagerungsfläche)

Die Grösse der Ablagerungsflächen der einzelnen Modellierungen zeitigen zwar keine Tendenz, aber aus den Resultaten lässt sich herauslesen, dass nur die „Best-Fit“- und die „Nullvariante“ gute Ablagerungsflächen simulieren (Tabelle 13). Alle anderen Modellierungen berechneten ein zu grosses Ablagerungsgebiet (Abbildung 58).

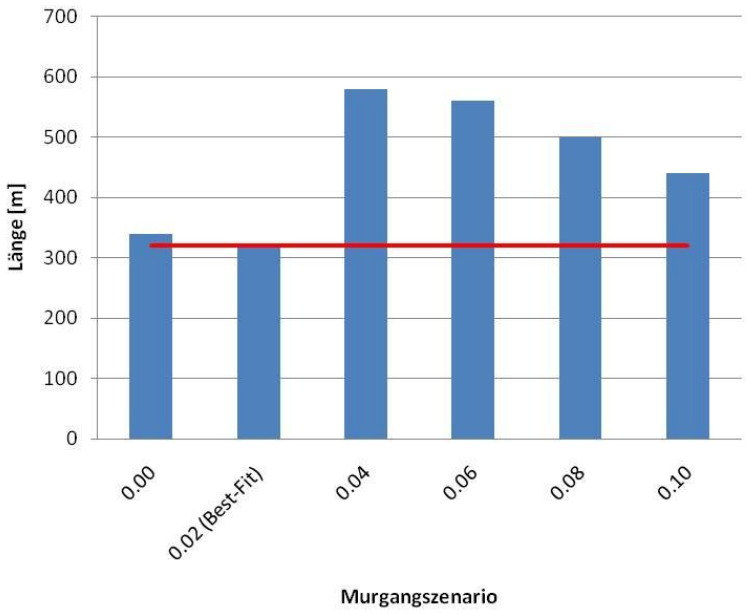


Abbildung 58: Vergleich zwischen der Länge der Ablagerungsflächen im Gebiet „Grosswiyer“, gemessen vom Austritt aus dem Wald bis zur Spitze des Murgangkopfes. Die rote Linie markiert die effektive Länge der Ablagerungsfläche des Murgangs „Goldau“.

(Maximale) Fliessgeschwindigkeit

Bis auf den Messstandort *Vor Austritt aus dem Gerinne* zeigten alle Modellierungen ein ähnliches Verhalten, aus welchem ein Rückschluss gezogen werden kann, dass je grösser der Koeffizient für die trockene Reibung µ im Waldperimeter gewählt wird, desto geringer wird die maximale Fliessgeschwindigkeit. Die „Null“- und die „Best-Fit“-Simulationen sind von dieser Regel ausgenommen. Sie wiesen ein umgekehrtes Verhalten auf, wenn auch nur mit geringen Differenzen in den Geschwindigkeitswerten. Am mittleren Messpunkt kann kein eindeutiges Verhaltensprinzip festgestellt werden. Die berechneten Geschwindigkeiten der der Simulationen 0.02 („Best-Fit“), 0.06 und 0.10 [-] verhielten sich diametral zum vorhin postulierten Muster (Abbildung 59). Die anderen beiden Modellierungen blieben dem erstgenannten Muster treu. Die Resultate der Messungen verglichen mit der Abstufung von den „Wald-µ“-Varianten stimmen an dieser Stelle nicht mehr überein, sodass keine verlässliche Aussage machbar ist. Zudem waren auch bei der „besten“ Variante (0.10 [-] an der obersten und untersten Messstelle) die maximalen Fliessgeschwindigkeiten um

Zehnerpotenzen zu hoch. Es trat bei Variation der „Wald-μ“-Werte bezüglich der Geschwindigkeiten keine Verbesserung des Modells ein.

(Maximale) Abflusshöhe

Keine bedeutende Annäherung an die Realität, bezüglich der maximalen Abflusshöhen, ist bei den modellierten Murgängen der Sensitivitätsanalyse erkennbar. Die Abflusshöhen nahmen bei allen Simulationen von oben nach unten hin ab, aber der Grad der Abnahme ist unterschiedlich. Die stärkste Abnahme erfuhren die Modellierungen mit den grössten Parameterwerten für die trockene Reibung, am schwächsten nahmen die „Best-Fit“- und die „Nullvariante“ ab (Abbildung 59). Durch die erhöhten Abflusswerte am oberen Messpunkt Strasse obere Grisselen fielen ausser der „Best-Fit“-Modellierung sämtliche Variationen aus der guten oder zumindest akzeptablen Bewertung. Es kam somit zu keiner Verbesserung der Modellierung des Murgangs „Goldau“ auf die maximale Abflusshöhe bezogen.

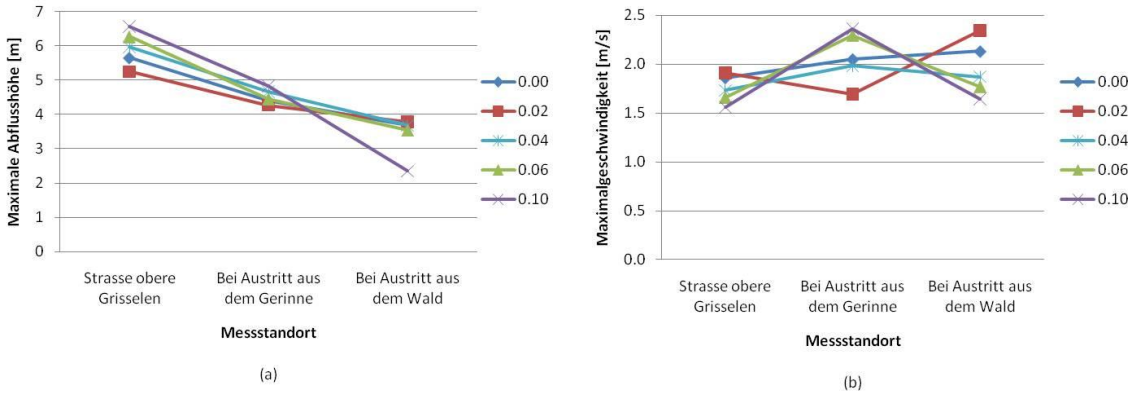


Abbildung 59: Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die trockene Reibung μ im Waldperimeter des Murgangs „Goldau“ hinsichtlich: a) der maximalen Abflusshöhe und b) der maximalen Fliessgeschwindigkeit. Die mit „0.00“ bezeichnete Simulation entspricht der Nullvariante, einem Murgang ohne Waldeinfluss.

6.2 Resultate der Untersuchungen bezüglich der Interaktion Murgang-Wald

Im anschliessenden Kapitel werden die Resultate aus den Feldaufnahmen dargestellt und erläutert. Ausgehend von den erhaltenen Ergebnissen konnten durch Literaturrecherchen weitere Schlüsse bezüglich der Baumartenzusammensetzung und dem Durchmesser von potenziell widerstandsfähigeren Waldbeständen gegenüber Murgängen gezogen werden. Da diese weiteren Untersuchungen formell gesehen bereits zur Diskussion gehören und somit der Übergang von den Resultaten zur Diskussion fliessend und nur schwer voneinander zu trennen ist, wurden beide Abschnitte zu Einem zusammengefasst. Die Methodenkritik und übergeordnete Diskussion der Ergebnisse finden anschliessend im Kapitel 7.5, resp. 7.9 statt.

6.2.1 Deskriptive Statistik

In allen fünf Aufnahmeflächen wurden total 198 Bäume aufgenommen. Das ergibt rund 40 Bäume pro Fläche. Des Weiteren wurden alle im Transitgebiet stehen gebliebenen Bäume miteinbezogen.

6.2.1.1 Baumartenzusammensetzung

Die Vergleiche der Baumartenzusammensetzungen in den Murganggebieten basieren auf den erhobenen Daten aus den Aufnahmeflächen und Werten aus der Literatur. Für die Artenverteilung in den Aufnahmeflächen 1 – 3 (Murgang „Goldau“) dient als Vergleichsbasis die Kartierung von Frey (2005), welcher auf dem Prozessgebiet des Bergsturzes von 1806 eine genaue Dokumentation der Baumarten (sowie Strauch- und Krautvegetation) und der Ertragsklassen durchgeführt hat (vergleiche Kapitel 3.1.4 und Abbildung 15)[3]. Die Baumartenhäufigkeit wird von 1 – 6 klassiert. Für die Aufnahmeflächen 4 und 5 wurden als Referenz die allgemeinen Daten aus den Waldgesellschaften von Ott, Frehner et al. (1997) und Frehner, Wasser et al. (2005) herangezogen. In diesen Publikationen erfolgt die Klassierung durch etwas weichere Kriterien, wie Hauptbaumart, beigemischt, vereinzelt vorkommend, etc.

In keiner der aufgenommenen Flächen konnte ein signifikanter Unterschied in der Baumartenzusammensetzung, wie sie in der Literatur dargestellt wird, festgestellt werden. Die Zusammensetzung und Verteilung der Bäume entsprechen dem erwarteten Schema, wie sie aus der Kartierung hervorging.

In der **Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“** wurden 48 Bäume aufgenommen: 26 Fichten (*picea abies),* 21 Waldföhren (*pinus sylvestris*) und 1 Wildkirsche (*prunus avium*). In der Abbildung 60 zeigt die Zusammensetzungen der einzelnen Aufnahmeflächen nach Baumart und Brusthöhendurchmesserklasse in Diagrammen auf. Vergleicht man diese Werte mit denjenigen aus der Kartierung von Frey (2005), Strukturtyp *4.1 Fichten-Föhren-Block-Carex-Typ*, ergibt sich eine hohe Übereinstimmung (Abbildung 15). In der Literatur wird der Anteil von Fichte mit 4 (Baumholz I), resp. 1 (Baumholz II) und von Waldföhren mit 2+ angegeben. Wildkirschen werden in der Literatur nicht explizit erwähnt, da es sich in der Aufnahmefläche aber nur um ein einzelnes Exemplar handelt, kann der „Ausreisser“ aus der Statistik vernachlässigt werden.

Die **Aufnahmefläche 2 „Goldau mitte“** befindet sich laut Kartierung im Strukturtyp *3.9 Föhren-Laubholz-Schilf-Feinerde-Typ*, wo in der Baumschicht vor allem die Waldföhre dominierend ist (3 für BH I, resp. 2+ für BH II) (Abbildung 15). Dazu kommen in der Strauch- und Unterschicht verschiedene Laubbaumarten wie Esche (*fraxinus excelsior*), Grünerle (*alnus viridis*) und Mehlbeere (*sorbus aria*) vor. In der Aufnahmefläche fiel vor allem die grosse Anzahl stehendes Totholz auf (13 Stämme von 38). Die Baumart konnte nicht bei allen toten Stämmen eruiert werden, es dürfte sich aber grösstenteils um Fichten und Waldföhren gehandelt haben. Der Grund, warum diese Bäume eingegangen sind, kann nur schwer ermittelt werden. Ein direkter Einfluss des Murgangs konnte fast ausgeschlossen werden, da keine Spuren darauf hindeuten, dass der Murgang auch nur ausläuferweise an dieser Stelle durchgeflossen ist. Eine artspezifische Unterscheidung nach Verträglichkeit ist kaum möglich, da beide dominierenden Baumarten vom Absterben betroffen sind. Es wird vermutet, dass der Buchdrucker (*yps typographus*) die Schäden an

[3] Die relevanten Strukturtypen aus der Kartierung von Frey (2005) sind in Anhang 3 angefügt.

den Fichten verursacht haben könnte. Sonnenbrände infolge frei werdendem Licht durch die Murgangschneise oder zu starke Beschattung durch andere Bäume könnten die Fichten und Föhren zusätzlich geschwächt haben. Ebenfalls ein möglicher Grund könnte eine zu starke Beschattung anderer Bäume vor dem Murgangereignis gewesen sein. Nebst dem Totholz dominierte die Waldföhre (oder war zumindest mitherrschend) in allen Durchmesserklassen, wie es der Typ 3.9 manifestiert. In der Unterschicht konnte die Esche kodominant aufwachsen, in der Oberschicht blieb sie indes aus. Andere Laubhölzer kamen auf der Fläche nicht vor. Einen kleinen Unterschied zur Kartierung stellte das Vorkommen der Fichte dar. Laut Frey (2005) kann die Fichte in der Strauchschicht ein Vorkommen der Stärke 2- aufweisen, sollte allerdings in der Oberschicht fehlen. In der Oberschicht der Aufnahmefläche tauchten dennoch 2 – 3 Fichten auf (Durchmesser 29 – 36 cm). Die Unterschiede zwischen den Aufnahmen und den Literaturangaben waren allerdings nicht markant und dürften nichts mit dem Murgangereignis zu tun haben, es sei denn, dass insofern auf ein Ausbleiben einer Baumart als Auswirkung spekuliert wird.

Aufnahmefläche 3 „Goldau oben“ wurde von Frey (2005) als *3.8 Gras-Feinerde-Föhrenwald* klassifiziert (Abbildung 15). Wie in der Typenbeschreibung angegeben, wuchsen auf der Aufnahmefläche in der Oberschicht fast ausnahmslos Waldföhren. 4 Fichten dicker als 25 cm BHD wurden gezählt, im Gegensatz zu 17 Waldföhren mit BHD >25 cm. Dieses Verhältnis verschob sich in der Dickungsstufe in Richtung der Fichte, Waldföhren und Fichten kommen etwa zu gleichen Teilen auf (Abbildung 60). Bis auf eine Hagebuche in der Dickungsstufe fehlten an diesem Standort Laubgehölze. Laut Literatur könnten in der Unterschicht vereinzelte Laubbäume eingestreut vorkommen. Stehendes Totholz betrug in dieser Fläche rund 8 %.

Wie die Kartierung aus Kapitel 3.1.4 ergeben hat, kann der Wald in **Aufnahmefläche 4 „Arth oben“** als Waldgesellschaft *18M Typischer Karbonat-Tannen-Buchenwald* oder *12a Typischer Bingelkraut-/Zahnwurz-Buchenwald* klassiert werden, da sich die Aufnahmefläche im Grenzgebiet zwischen der Ober- und Untermontanen Höhenstufe befindet. In dieser WG dominieren stammzahlmässig Tanne und Buche, dazu Bergahorn, Fichte, Bergulme, Esche, Vogelbeere; Pionierbaumarten (Frehner, Wasser et al. 2005). Bis auf Bergulme und Vogelbeere waren alle genannten Baumarten in der Aufnahmefläche zu finden, dazu noch Feldahorn (2) und Stechpalme (1). Je grösser die Durchmesser wurden, desto mehr überwogen die Buchen und Eschen. Es konnte auch hier kein Anzeichen dafür gefunden werden, dass aufgrund des Murgangereignisses eine Veränderung in der Baumartenzusammensetzung stattgefunden hat, oder momentan stattfindet.

Ähnliche Standortverhältnisse wie in Aufnahmefläche 4 weist die **Fläche 5 „Arth unten“** auf. Da sie allerdings eine Höhenstufe tiefer, in der untermontanen Stufe, gelegen ist, wird die WG als *12a Typischer Bingelkraut-/Zahnwurz-Buchenwald* bezeichnet. Laut Literatur herrscht Buche in dieser WG vor, Tanne. Ahorn und Esche können beigemischt sein (Frehner, Wasser et al. 2005). In der Tat war die Buche ab Baumholz I klar dominierend (Verhältnis 5/1), bis BH I bestimmte eher die Tanne das Bild (Abbildung 60).

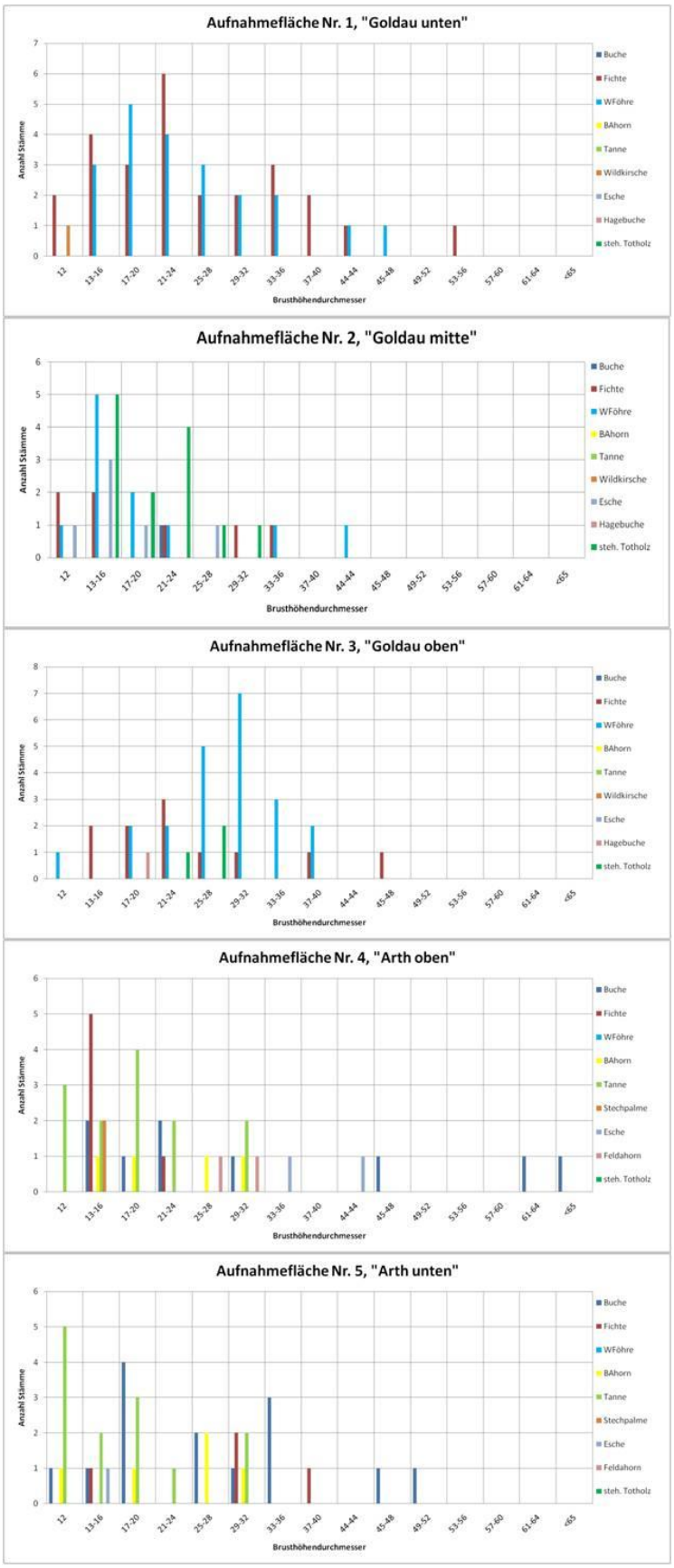


Abbildung 60: Diagramme der Aufnahmeflächen 1 – 5, von oben nach unten. Aufgetragen sind die Anzahl Stämme pro Brusthöhendurchmesserklasse der einzelnen Baumarten.

Nebst den Aufnahmeflächen, welche sich neben dem Fliessbett befanden, wurden auch die Bäume im Fliessbett untersucht, welche bei den Ereignissen vom August 2005 stehen geblieben sind. Dazu wurde die Fliessstrecke beider Murgänge (soweit als möglich) vom Ablagerungsgebiet bis zur Anrisszone begangen.

Im Gerinne blieben keine Bäume stehen, sofern sie nicht durch externe Faktoren ein wenig geschützt wurden. In beiden Fliessbetten konnte kein einziger frei stehender Baum aufgenommen werden, welcher den Murgang unversehrt überlebt hat. Die allergrösste Zahl der Stämme wurde geknickt oder umgedrückt (vergleiche Kapitel 5.2). Falls ein Stamm den Murgang stehend überstand, so ist er in den vergangenen fünf Jahren eingegangen. Gründe dafür könnten Verletzungen am Stamm oder Wurzel gewesen sein, sowie veränderte Bodenverhältnisse.



Abbildung 61: Aufnahme von der Luv-Seite gegen einen Felsblock des 1806er Bergsturzes hin. Der Fels befindet sich mitten in der Fliessstrecke des Murgangs „Arth“. Auf der Lee-Seite sind die stehen gebliebenen Bäume (hier Fichten und einzelne Waldföhren) gut zu erkennen, welche im Gegensatz zu den umliegenden Bäumen den Murgang praktisch unversehrt überlebt haben. (Fotoaufnahme vom 09. November 2010).

Es bestand für Bäume in der Fliessstrecke eine Überlebenschance, falls sie sich auf der Lee-Seite eines grossen Objekts befanden. Die Objekte, in diesem Falle Felsblöcke, herbei gebracht vom 1806er Bergsturz, schützten die Bäume auf der bergabgewandten Seite auf einer Fläche von ein paar Quadratmetern vor den Geschiebemassen (Abbildung 61). Insgesamt befanden sich 8 - 10 solcher massiven Steine im Fliessbett des Murgangs

Goldau (Abbildung 62). Da sich im Gerinne des Murgangs Arth kein vergleichbarer Bergsturz ereignete, fehlen in ihm schützende Objekte. Der Murgang umfloss den Felsen, hatte direkt hinter ihm aber nicht mehr die Energie, welche nötig gewesen wäre, um die Bäume ernsthaft zu schädigen. Grössere Steine fliessen in der Regel nach Aufprall an den Felsblock in der Falllinie weiter und treffen so gar nicht auf die noch stehenden Bäume (Strunk 2002). Die meisten der betroffenen Bäume sind auch heute noch vital (Abbildung 61). Es handelt sich hierbei vor allem um Fichten und wenige Waldföhren von geringer Durchmesserstärke. Allerdings kann daraus kein Rückschluss auf eine bessere Überlebenschance dieser beiden Baumarten bei einem Murgangereignis geschlossen werden, da sie ihr Fortbestehen einzig dem Standort und nicht ihrer Arteigenschaft zu verdanken haben. Wären an dieser Stelle andere Baumarten gestanden, hätten diese wahrscheinlich ebenfalls überlebt.

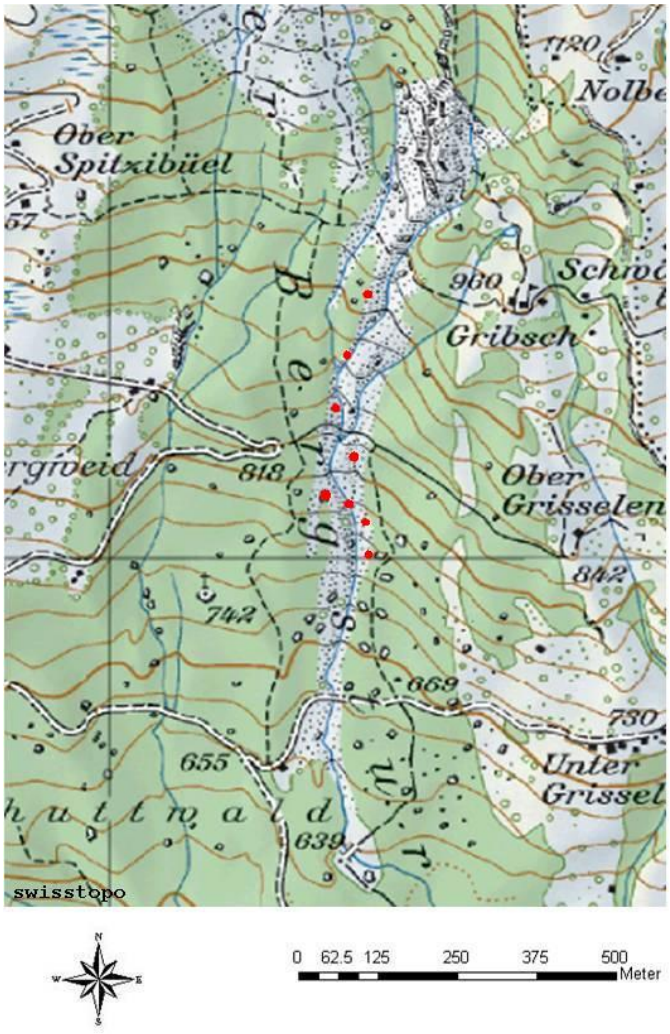


Abbildung 62: Topographische Karte der Anriss- und Transitzone des Murgangs Goldau. Rot markiert sind Felsblöcke, herrührend vom historischen Bergsturz von 1806, welche für die auf der Lee-Seite befindlichen Bäume wie ein Schild Schutz geboten haben (Kartengrundlage: PK25 © swisstopo, 5704 000 000).

6.2.1.2 Durchmesser

Die erhobenen Werte in den Aufnahmeflächen wurden untereinander (Fläche „Innen“ gegenüber „Aussen“) und mit den Kennzahlen aus den Bestandeskarten des Kantons Schwyz bzw. mit der Kartierung von Frey (2005) verglichen.

Es konnte, analog zu den Resultaten der Untersuchung über die Baumarten-zusammensetzung, keine Tendenz festgestellt werden, wonach dickere oder dünnere Bäume am Rand eines Murganges ein Ereignis besser überstehen. Eine Ausdünnungstendenz wurde nicht festgestellt, weder Richtung dickere Bäume, noch in die andere Richtung.

Wurden die durchschnittlichen Durchmesser auf Brusthöhe aus den Aufnahmeflächen 1 - 3 (Murgang „Goldau“) mit den Werten aus der Publikation von Frey (2005) verglichen, war der Durchschnitt der BHD in zwei von drei Flächen im Rahmen. In der Aufnahmefläche 2 lag der Durchschnitt tiefer als am typisierten Standort angegeben. Dies könnte in einem Zusammenhang mit dem vielen stehenden Totholz stehen. Diese Stämme hatten alle einen Durchmesser von 13 – 24 cm. Der Vermoderungsgrad deutet darauf hin, dass die Stämme bereits vor mehreren Jahren abgestorben sind. In der Zwischenzeit hätten die Bäume, wenn sie noch vital gewesen wären, einen merklichen Zuwachs im Durchmesser erreichen können. Dies würde den Durchschnitt des BHD wahrscheinlich auf einen Wert bringen, welcher demjenigen von Frey (2005) entspräche.

Die Durchmesser der aufgenommenen Bäume in den Flächen 4 und 5 sind nur bedingt mit den Werten aus der Bestandeskarte vergleichbar. Einerseits stammt die Bestandeskarte aus dem Jahre 2000. In der Zwischenzeit wurden in den Flächen Eingriffe vorgenommen (mündl. Mitteilung S. Weber, 04. November 2010), was den Durchschnitt der Durchmesser aller Bäume gesenkt hat. Zum Anderen stimmen die Aufnahmeverfahren der BK und der Feldaufnahmen möglicherweise nicht ganz überein. So wurden in den Aufnahmeflächen alle Bäume mit einem Durchmesser von >12 cm aufgenommen und daraus der Durchschnitt ermittelt. In der Aufnahme für die Bestandeskarte dürften wahrscheinlich nur Bäume mit einem überdurchschnittlichen Durchmesser (Bsp. h_{dom}) Eingang gefunden haben. Durch diese beiden Abweichungen können die höheren Werte für den Durchschnitt der Durchmesser in der Bestandeskarte erklärt werden. In der Tabelle 14 sind die Werte aus der Literatur mit den gemessenen Durchschnittsdurchmessern aufgeführt.

Tabelle 14: Die zu erwartenden durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser verglichen mit den gemessenen Durchmessern in den fünf Aufnahmeflächen.

Aufnahmefläche	Literatur [cm]	Gemessen [cm]
1 "Goldau unten"	25 - 45 *	25
2 "Goldau mitte"	25 - 35 *	23
3 "Goldau oben"	25 - 35 *	27
4 "Arth oben"	35 - 50 **	24
5 "Arth unten"	> 50 **	25

* (Frey 2005)
** BK Kt. Schwyz

Ebenfalls keinen Hinweis auf eine Tendenz lieferte der kleinflächigere Vergleich. Anstatt die Aufnahmefläche mit dem Standortstyp zu vergleichen, wurde die Aufnahmefläche selbst auf eine Tendenz hin untersucht, indem die Verteilungen der durchschnittlichen BHD in der inneren und der äusseren Flächenhälfte beurteilt wurden. Der „U-Test“ lieferte Aufschluss darüber, wie stark die Durchmesser in den beiden Flächen miteinander korrelieren.

In keiner der fünf Aufnahmeflächen konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der inneren und äusseren Hälfte hinsichtlich der Verteilung des Durchmessers der Bäume festgestellt werden. Auf dem Signifikanzniveau von α = 0.05 unterschritt kein P-Wert auch nur annähernd diese Signifikanz, sodass die Nullhypothese („Die Durchmesserverteilung in den beiden Flächen unterscheidet sich nicht voneinander“) verworfen hätte werden können. Der hohe P-Wert weist darauf hin, dass die beiden Flächen miteinander korrelieren (Tabelle 15). Dies bedeutet, dass in einer Aufnahmefläche die Bäume aller Durchmesserklassen homogen verteilt sind. Einen Effekt, dass der Murgang eine Tendenz zu einer Ausdünnung hin (je geringer der Abstand zum Rand des Murgangs, desto eher können starke (= grosse Durchmesser) Bäume stehen bleiben, oder umgekehrt) unterstützt, ist anhand der Ereignisse in „Arth“ und „Goldau“ somit nicht nachweisbar.

Tabelle 15: Der „U-Test“ (Mann-Whitney) angewendet auf die Teilflächen „Innen“ und „Aussen“ der fünf Aufnahmeflächen. Signifikanzniveau α = 0.05, P-Wert (1) = totale Korrelation, P-Wert (0) = keine Korrelation.

Aufnahmefläche	Stichprobengrösse N	P-Wert [-]
1 "Goldau unten"	30	0.68
2 "Goldau mitte"	30	0.62
3 "Goldau oben"	30	0.81
4 "Arth oben"	30	0.83
5 "Arth unten"	30	0.52

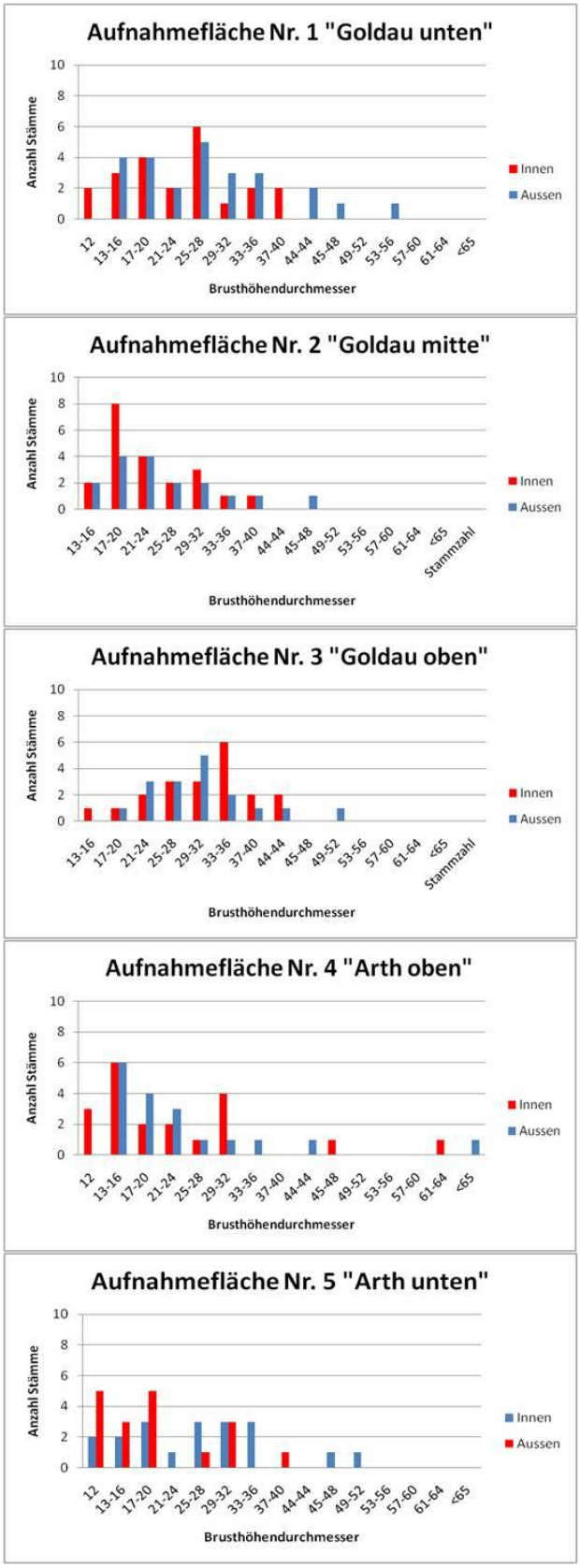


Abbildung 63: Diagramme der Aufnahmeflächen 1 – 5, von oben nach unten. Aufgetragen sind die Anzahl Stämme pro Brusthöhendurchmesserklasse in den Teilflächen „Innen“ und „Aussen“.

6.2.1.3 Untersuchung der Versagensmechanismen

Die verschiedenen Versagensarten sind im Kapitel 5.2.1 beschrieben. In dieser Untersuchung galt es die wahrscheinlichsten Versagensarten an den Bäumen herauszufinden, welche beim Durchfluss des Murgangs auftraten. Dazu wurde in den Aufnahmeflächen, sowie im Gerinne beider Murgänge (Transitgebiet) nach Spuren solcher Versagensmechanismen gesucht. Weiter wurde das Fotomaterial von D. Bollinger nach solchen Indizien ausgewertet.

In den Aufnahmeflächen konnten nur wenige Hinweise gefunden werden. Das Totholz aus den Flächen 2 und 3 wurde wahrscheinlich nicht durch den Murgang verursacht. Ausserdem wiesen sie kein Merkmal eines typischen Versagensmechanismus (Stamm-, Wurzelbruch, etc.) auf. Mehr Hinweise lieferten das Bachbett und dessen Ränder. Auf der Prozessfläche befand sich auch fünf Jahre nach dem Ereignis immer noch sehr viel Holz. Ein grosser Teil davon lag als zerkleinertes Stückholz, Astmaterial und Stammteilen vor. Diese Spuren konnten nicht zweifelsfrei einem Versagensmechanismus zugeordnet werden. Nebst dem Splitterholz fanden sich viele Wurzelteller, Wurzelteile und ganze Baumstämme mitsamt Wurzelwerk im Gerinne oder an den Rändern (Abbildung 64).



Abbildung 64: Fotos des Murgangs „Goldau“, aufgenommen kurz nach dem Ereignis (ausser Foto rechts unten, Aufnahmedatum 09. November 2010). Auf den Aufnahmen wird die Menge an mittransportiertem Holz ersichtlich, wobei der Anteil von Wurzeln und Wurzeltellern verhältnismässig hoch ist (Fotoaufnahmen von D. Bollinger, 23. August 2010, ausser Bild unten rechts, D. Hauser, 09. November 2010).

Die grossen Mengen an transportiertem Wurzelmaterial und ganzen ausgerissenen Baumstämmen könnten ein Hinweis auf Wurzelbruch oder –wurf als Versagens-mechanismus sein. Es erscheint unwahrscheinlich und physikalisch nicht schlüssig, dass die Bäume durch den Murgang zuerst einen Stamm- oder Stockbruch erleiden und die im

Boden verankerten Wurzeln erst anschliessend herausgerissen und mittransportiert werden. Der Lasthebel (= Grösse der Angriffsfläche der einwirkenden Kraft) wäre in einem solchen Fall weit kleiner, als wenn der Stamm noch mit dem Wurzelwerk intakt verbunden ist (der Lasthebel ist in diesem Falle grösser). An den Rändern und im Gerinne selber konnten keine Stirzel gefunden werden, welche auf einen Stamm-, bzw. Stockbruch hindeuten würden. Die während den Feldaufnahmen im November 2010 gefundenen Wurzeln und –bestandteile zeigten einen schwachen Zersetzungsgrad. Dies deutet darauf hin, dass sie nicht bereits vor den Ereignissen abgestorben sind, sondern wahrscheinlich erst durch die Murgänge geworfen und gebrochen worden sind.

Die Feldaufnahmen lieferten somit folgende Ergebnisse:

- An den Rändern der Murgangfliesswege fand keine Verschiebung bezüglich der Baumartenzusammensetzung statt. Es gab keine spezifische Baumart, welche den Murgängen besser standgehalten hat.
- An den Rändern der Murgangfliesswege fand kein Ausdünnungseffekt bezüglich der Durchmesserverteilung statt. Durchmesserstärkere Bäume konnten den Kräften der Murgangprozesse nicht besser wiederstehen als dünnere, oder umgekehrt.
- Die verhältnismässig grosse Anzahl an ausgerissenen oder gebrochenen Wurzeln und Wurzelbestandteilen, sowie ganz Bäume mitsamt dem Wurzelwerk, deuten auf Wurzelbruch oder -wurf als häufigster Versagensmechanismus bei der Interaktion Murgang – Baum hin.

6.2.2 Literaturrecherchen

Weiterführerende Untersuchungen durch Literaturrecherchen sollten Aufschluss darüber geben, welche Baumarten und Stammdurchmesser tendenziell geeignet sein könnten, einem Murgangereignis standzuhalten. In Fachliteratur wurde nach Hinweisen für die Resistenz gegenüber Wurzelbruch und –wurf ausgewählter Baumarten gesucht. Die untersuchten Baumarten richteten sich nach den in den Aufnahmeflächen vorgefundenen Waldgesellschaften, sowie nach den am häufigsten vorkommenden Baumarten in der Schweiz (Brändli 2010).

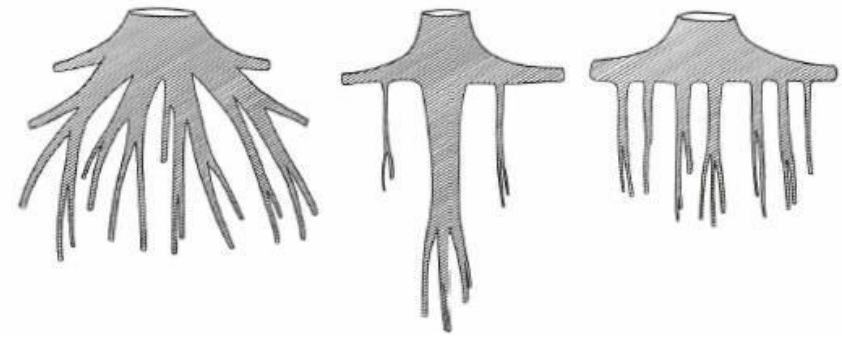


Abbildung 65: Schematische Darstellung der Wurzelsysteme, von links nach rechts: Herzwurzelsystem, Pfahlwurzelsystem, Flachwurzelsystem (Brückner, Bibelriether et al. 1968).

Eine Zusammenstellung der gefundenen Ergebnisse ist in Tabelle 16 dargestellt. Die in der Tabelle 16 erwähnten Wurzelsysteme werden in der Abbildung 65 bildlich erklärt und in Abbildung 66 für jede untersuchte Baumart skizziert wiedergegeben. Bei einem Flachwurzler breiten sich die meisten Wurzeln eher lateral, teilweise über weite Strecken aus, währendem die Hauptwurzel nicht sehr tief in den Boden eindringt. Umgekehrt verhält es sich mit Pfahlwurzelsystemen. Baumarten mit einem Herzwurzelsystem breiten sich sowohl in die Tiefe, wie auch in die Breite aus.

Tabelle 16: Auflistung der am häufigsten in der Schweiz vorkommenden Baumarten bezüglich Wurzelsystem, Durchwurzelungstiefe und Anfälligkeit auf Wurzelbruch, resp. Wurzelwurf.

Baumart	Lateinischer Name	Wurzelsystem*	Hauptdurchwurzelungstiefe [m]**	Wurzelwurf/Wurzelbruch***
Tanne	*abies alba*	Pfahl-, später Herzwurzel [1,3,4]	1.3 - 1.6 [1,2]	schwach [4,5]
Bergahorn	*acer pseudoplatanus*	Herz-Senkerwurzel [1,2]	0.8 - 1.5 [1]	standfest [1,4]
Hagebuche	*carpinus betulus*	Herzwurzel [1,2,4]	1.2 - 1.5 [2]	schwach [1]
Buche	*fagus sylvatica*	Herzwurzel [4]	1.2 - 1.8 [2]	standfest [4,5]
Esche	*fraxinus excelsior*	Senkerwurzel[2,4] (Pfahlwurzel [1,3])	0.2 - 0.3 [2], bis 1.0 - 1.4 [1,2]	standfest [4]
Lärche	*larix decidua*	Herzwurzel [1,2]	1.8 - 2.5 [1,2]	standfest [1,4]
Fichte	*picea abies*	Senkerwurzel, tellerförmig [2,3]	0.1 - 0.3 [2]	schwach - rel. schwach [1,2,3,4]
Waldföhre	*pinus sylvestris*	(plastische) Pfahlwurzel [1]	1.8 - 2.5 [2]	mässig [4]

* Reguläres, unter ungehemmten Wachstumsbedingungen ausgebildetes Wurzelsystem, ab Dickungsstufe

** Bezogen auf die Hauptwurzeln, ab Stufe Baumholz I

*** Nach Vanomsen (2006)

[1] (Roloff, Weisgerber et al. 2010)

[2] (Brückner, Bibelriether et al. 1968)

[3] (Amann 2002)

[4] (Waldbau 1995)

[5] (Bazzigher und Schmid 1969)

Nachfolgend werden die Wurzelsysteme der untersuchten Baumarten dargestellt (Abbildung 66).

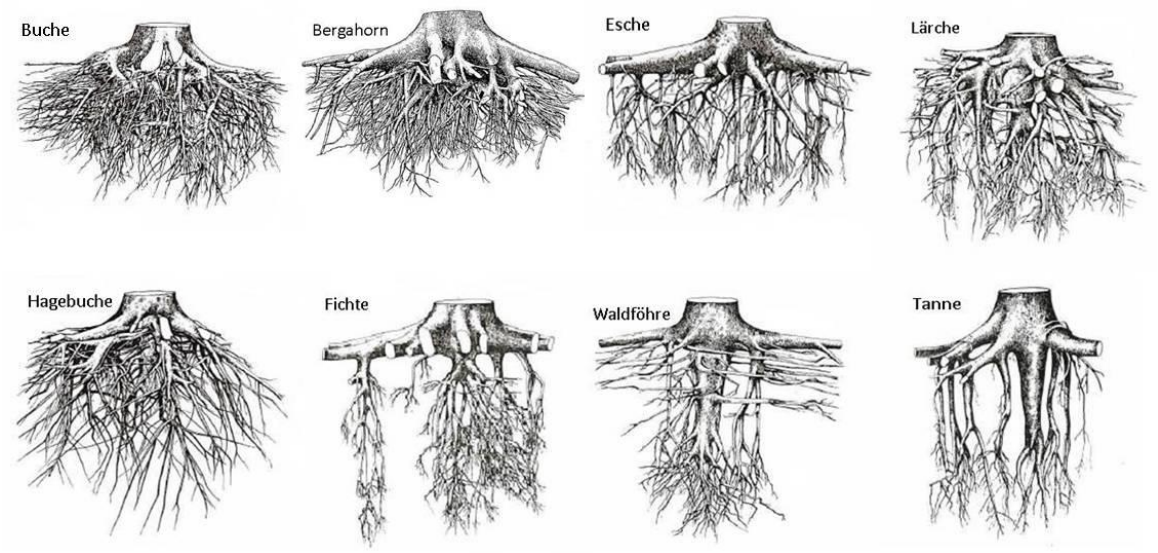


Abbildung 66: Skizzen der Wurzelsysteme aller untersuchten Baumarten (Brückner, Bibelriether et al. 1968).

In einer weiteren Studie hat Ammann (2006) Wurzelzugversuche an verschiedenen Baumarten untersucht. Bei einem Murgangereignis, welches durch bewaldetes Gebiet fliesst und auf Bäume trifft, entstehen an diesen durch das Aufprallen von Geschiebematerial an Bäumen Zugwirkungen auf den Stamm (Angriffspunkt). Diese Energie wird, sofern der Stamm nicht gebrochen wird, an die Verankerung im Boden weitergeleitet. Das Wurzelwerk erfährt somit eine Zugwirkung. Wie stark eine Baumart einer solchen Kraft entgegengehalten vermag, hat Ammann (2006) mittels Zugeversuchen analysiert. Die Resultate sind unten abgebildet (Tabelle 17).

Tabelle 17: Zugfestigkeit der Wurzeln ausgewählter Baumarten (nach Ammann 2006).

Baumart	Lateinischer Name	Zugfestigkeit [N/mm^2]	Wurzeldurchmesser [mm]
Grünerle	*alnus viridis*	20.42	2.03
Buche	*fagus sylvatica*	57.47	1.33
Lärche	*larix decidua*	66.14	1.68
Fichte	*picea abies*	38.94	1.78

Wie aus der Tabelle 17 hervorgeht, weist die Lärche die grösste Zugfestigkeit auf, gefolgt von der Buche. Mit beachtlichem Abstand folgen Fichte und Grünerle. Es gilt auch die

Durchmesser der Wurzeln zu beachten, so hat zum Beispiel die Buche fast die Zugfestigkeiten der Lärche aufgewiesen, obwohl der Durchmesser ihrer Wurzel ca. 20 % dünner war.

Aus den beiden Tabellen geht hervor, dass Laubgehölze widerstandsfähiger gegenüber Wurzelbruch und –wurf als Nadelhölzer sind. Ausnahmen sind die Hagebuche und Grünerle, welche zum Teil noch schwächer als Nadelgehölze auf Zugbelastungen entgegenhalten. Bei den untersuchten Nadelgehölzen reagiert die Lärche am stablisten, gefolgt von Waldföhre, Fichte und Tanne. Wobei einzig die Lärche mit den Zugfestigkeiten und Widerstandskräften der Laubbäume mithalten kann.

Tiri (2009) und andere zeigten in ihren Untersuchungen, dass der Durchmesser eines Baumes positiv mit seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber einwirkenden Kräften korreliert. Allerdings beziehen sich die meisten Publikationen auf (Nass-)Schneelawinen als Einwirkungskräfte. Das Verhalten von Fliessschneelawinen und Murgängen könnte aber ähnlich sein. Wie bei den oben aufgelisteten Resultaten wird auch bei Fliessschneelawinen bei Auftreffen auf einen Wald eher Wurzelbruch/ -wurf als Stammbruch erwartet (de Quervain 1978).

7 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Resultate in einem übergeordneten Rahmen diskutiert und mit den zu Beginn der Arbeit aufgestellten Fragestellungen kritisch verglichen. Die ermittelten Ergebnisse und Werte wurden teilweise auch direkt im Kapitel Resultate integriert diskutiert. Ereignisse

7.1 Ereignisse

In dieser Arbeit wurden Murgänge untersucht, bei welchen mindestens ein Teil der Transit- und/oder Ablagerungszone durch bewaldetes Gebiet geflossen ist. Dies ist bei beiden Murgangereignissen vom Sommer 2005 im Raum Arth-Goldau der Fall gewesen. Sowohl beim Murgang „Arth“, wie auch beim Murgang „Goldau“ befanden sich das Anrissgebiet und der grösste Teil der Transitstrecke im Wald. Einzig beim Murgang „Goldau“ gab es bei Kote 670 eine kleine unbewaldete Fläche.

Die beiden untersuchten Murgänge sind von ihren Eigenschaften her nicht problemlos als klassische Murgangereignisse einzuordnen. Zum Einen verliefen beide Fliessprozesse nicht in einem Bachbett, was für Murgangprozesse normalerweise der Fall ist (Costa 1984; Coussot und Meunier 1996; Iverson 1997), oder sie wurden durch die Gerinne nur unwesentlich beeinflusst (nach dieser Eigenschaft wurde ja gezielt gesucht). Eine andere Diskrepanz zu „paradebeispielhaften Murgängen“ ist das Anriss- und Fliessverhalten der zwei untersuchten Prozesse. Beim Ereignis „Arth“ verhielt sich der Anrissprozess eher wie derjenige einer Hangmure. Der grösste Teil des Geschiebematerials riss in einem bis zwei Prozessen gleichzeitig an und durchlief keinen „Wachstumsprozess“, bei welchem aus einem kleinen Auslöseereignis sich im Laufe des Prozesses immer mehr Material akkumuliert und so zu einem Murgang wächst (vergleiche Kapitel 4.1, sowie die Publikation von Coussot und Meunier (1996)). In der Transit- und Ablagerungszone entspricht der Murgang „Arth“ eher einem klassischen Murgang, mit typischen Merkmalen wie seitlichen Levées, wellenartigen Schüben und unsortierter Verteilung des Materials im Auslaufgebiet (Hunziker 2006). Nebst dem Anriss- ist auch der Fliessprozess des Murgangs „Goldau“ eher murgangatypisch. Die Fliessgeschwindigkeit ist, wie bereits beschrieben, tiefer als bei „normalen“ Ereignissen. Während in der Literatur Fliessgeschwindigkeiten von 1 – 20 m/s (Takahashi 1981; Coussot und Meunier 1996) angegeben werden, floss der Murgang „Goldau“ mit wenigen Metern pro Minute talwärts. Man kann in diesem Zusammenhang eher von *Kriechen* statt *Fliessen* sprechen. Die Ursachen sind wahrscheinlich vielfältig und hängen vermutlich mit der Wassersättigung des Geschiebematerials, mit der hohen Dichte des Materials, der Topographie und dessen Oberflächenstruktur zusammen. Das Transitgebiet ist nicht überaus steil, aber dürfte höhere Fliessgeschwindigkeiten erlauben. Die vielen Felsblöcke und die raue Oberflächenstruktur vom historischen Bergsturz von 1806 herrührend, könnten die Fliessgeschwindigkeit durch eine erhöhte Oberflächenreibung tief gehalten haben, allerdings den Murgang kaum so stark abgebremst haben, um die langsame Fortbewegung vollends erklären zu können. Des Weiteren fehlen dem Murgang „Goldau“ auch ein Gerinne und Levées an den Seitenrändern. Eine Fliessbreite von bis zu 80 m deutet nicht auf einen Murgang, sondern eher auf einen Rutschprozess hin (Coussot und Meunier 1996). Auch konnten keine Spuren von Erosion gefunden werden, was für Murgänge nicht die Norm darstellt.

7.2 Einfluss Reibungsparameter auf die Fliessgeschwindigkeit und Abflusshöhe

Die in mehreren Publikationen (Scheuner 2007; Bühler, Christen et al. 2010; Christen, Bartelt et al. 2010; Stricker 2010) aufgestellten Zusammenhänge zwischen den beiden Reibungsparametern μ und ξ und der maximalen Fliessgeschwindigkeit konnten bei Modellierungen beider Murgänge festgestellt werden (Abbildung 42):

- Je grösser der Wert für die turbulente Reibung ξ, desto höher die Fliessgeschwindigkeit
- Je grösser der Wert für die trockene Reibung μ, desto niedriger die Fliessgeschwindigkeit

Die Gleichung von Voellmy-Salm liefert also auch bei kleinen ξ- und grossen μ-Werten korrekte Resultate.

Die Vergleiche zwischen den maximalen Abflusshöhen und den beiden Reibungsparametern zeigen keine klaren Zusammenhänge auf. Das Verhalten ist diffus und es kann keine eindeutige Tendenz herausgelesen werden. An einzelnen Messstellen gab es zwar zum Teil in sich kongruente Resultate, aber über alle Messstationen beider Murgänge verglichen, widersprechen sich diese teilweise wieder (Abbildung 43). Die Gründe für dieses Verhalten könnten im Fehlen eines Gerinnes liegen, welches die Abflusshöhe eines Murganges durch ihre Begrenzungswirkung mit steuert. Möglicherweise hat auch die Abflusshöhe der Modellierungen selbst einen Einfluss, da die maximalen Abflusstiefen mit bis zu 6 m hoch sind und das Voellmy-Salm Modell Mühe hat, Murgänge in diesem Dimensionen korrekt wiedergeben zu können.

7.3 Modellkalibrierung

Die in dieser Arbeit durchgeführte Modellkalibrierung umfasste die beiden Reibungsparameter μ und ξ, die Anriss- und Erosionsgebiete, sowie die topographischen Veränderungen. Anders als beispielsweise in Stricker (2010) wurden nicht nur die Reibungsparameter untersucht. Dies um ein ganzheitlicheres Bild der Murgangmodellierungen der Ereignisse vom 2005 zu erhalten. Eine Modellkalibrierung vor allem der μ- und ξ–Parameter ist immer noch unentbehrlich, um für die Ereignisse spezifische und möglichst passende Reibungsparameter zu finden (Armento, Genevois et al. 2008; Pirulli und Sorbino 2008).

Die gefundenen μ und ξ - Werte für die besten 10 % („Goldau“), resp. 20 % („Arth“) der Modellierungen sind in Abbildung 47 und Abbildung 45 sichtbar. Wie in Abbildung 67 zu erkennen ist, befinden sich die Werte für die beiden Murgänge nicht vollumfänglich im Spektrum der „normalen“ Werte für Murgänge. Der Ansatz für die turbulente Reibung ξ befindet sich relativ tief, zwischen 10 - 100 m/s^2 für den Murgang „Arth“ und zwischen 10 – 50 m/s^2 für den Murgang „Goldau“. Diese tiefen Werte werden hauptsächlich durch die tiefen Fliessgeschwindigkeiten der beiden Murgänge bedingt. Bei höheren ξ-Werten fallen die Fliessgeschwindigkeiten um bis zu Zehner- („Arth“) oder gar Hunderterpotenzen („Goldau“) zu hoch aus. Die Bandbreite der Werte für die trockene Reibung μ korrespondiert ebenfalls nur teilweise mit den zusammengetragenen Werten von Scheuner (2007). Hingegen sind die μ-Werte vergleichbar mit jenen von Stricker (2010). Gründe für das vergleichsweise grosse μ wurden in den Resultaten bereits erwähnt. Vor allem die

Länge und Grösse der Ablagerungsfläche konnte durch die Variation der trockenen Reibung beeinflusst werden. Um ein frühes Stoppen der Murgänge (vor allem des Murgangs „Arth“) zu bewirken, musste das μ hoch angesetzt werden. Ansonsten flossen die Murgänge zu weit und das gesamte Ablagerungsgebiet wurde zu gross nachgebildet.

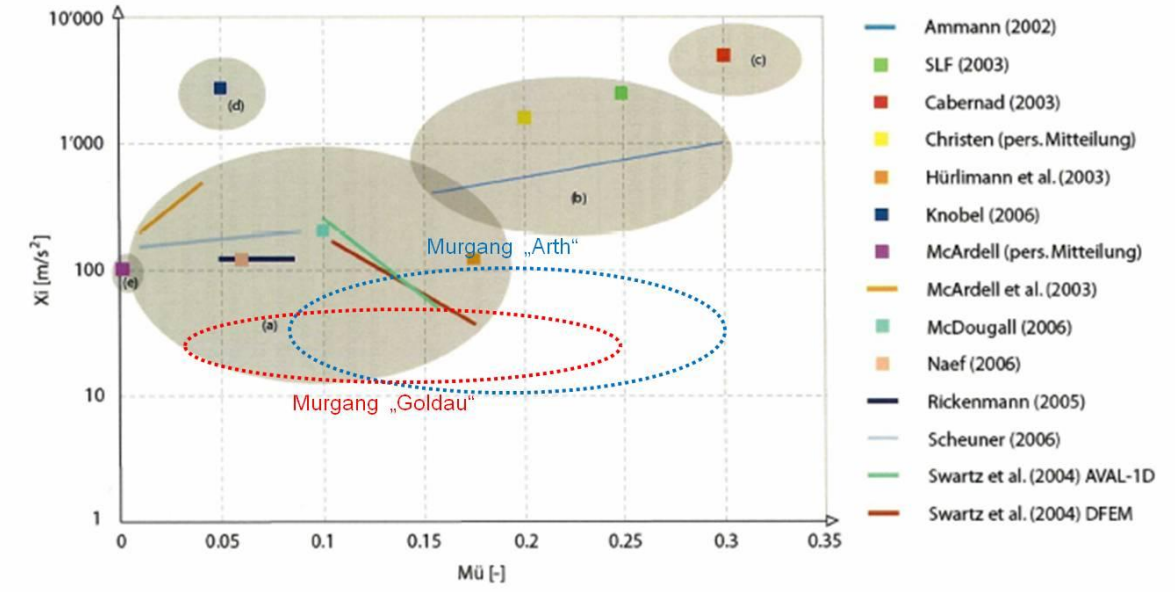


Abbildung 67: Abbildung 25, modifiziert. Eingetragen sind zusätzlich die Bandbreiten der modellierten Resultate von den Murgängen „Arth“ und „Goldau“ (aus Scheuner (2007), erweitert).

In der Regel verlaufen Murgänge wie vorher bereits angedeutet in mehreren Schüben. Aus diesem Grund ist es normalerweise nicht ganz simpel, Murgänge in RAMMS zu simulieren, da mit der verfügbaren Version noch kein Prozess mit mehreren wellenartigen Schüben simuliert werden kann. Üblicherweise wird dann das ganze Geschiebevolumen in einem Anrissprozess simuliert, oder das Volumen wird reduziert, um einen der mehreren Schüben modellieren zu können (z.B. Stricker 2010). Dadurch wird das Ereignis allerdings nicht mehr ganz wahrheitsgetreu nachgebildet. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Murgängen fällt dieses Problem weg, da nachgewiesenermassen bei beiden Ereignissen das Anrissvolumen in mehr oder weniger einem Prozess mobilisiert wurde und sich die Murgänge nicht aus mehreren Schüben gebildet haben. Aus diesem Grund waren die grossen Anrissvolumen, welche in RAMMS verwendet wurden, gerechtfertigt. Die Volumina entsprachen fast exakt denjenigen aus den Untersuchungsberichten. Wo nachweislich Erosionsprozesse stattgefunden haben, sollten diese auch in RAMMS so modelliert werden. Die Resultate der Modellierungen des Murgangs „Arth“ zeigen, dass die der Realität am ähnlichsten Ergebnisse erzielt werden, wenn die Erosionsprozesse mit einbezogen und möglichst genau nachgebildet werden. Wohingegen keine Erosion stattfand, macht es wenig Sinn, das Anrissvolumen zu verringern, im Gegensatz dazu aber Erosionsprozesse zu modellieren, um auf die gleichen Geschiebebilanzen zu kommen. Wie die Simulationen des Murgangs „Goldau“ zeigen, werden auf diese Weise nicht

bessere Resultate erreicht. Die Anriss- und Erosionseinstellungen haben einen grossen Einfluss auf den Fliessweg und die maximalen Abflusshöhen der Modellierung. Eine Schwierigkeit hinsichtlich der Ausscheidung von Anriss- und/oder Erosionsflächen besteht in der räumlichen Verteilung der Flächen, sowie in der Bestimmung der spezifischen Dichte des Anriss- bzw. Erosionsmaterials.

Einen direkten Einfluss auf den Fliessweg eines Murgangs hat eine Veränderung der Topographie. Indirekt werden die Abflusshöhe, Geschwindigkeit und die Grösse des Ablagerungsgebietes ebenfalls beeinflusst, sobald sich die Topographie ändert. Darum sollte wenn möglich auf Modifikationen der Höhenmodelle in RAMMS verzichtet werden, da sie die Ergebnisse nachhaltig beeinflussen, es sei denn, es gebe Grund zur Veranlassung dass eine Anpassung gerechtfertigt ist. Dies kann bei Verklausungen der Fall sein, welche in RAMMS nicht modelliert werden. Durch Erstellen von Dämmen kann eine Verklausung im Gerinne oder an einem Hindernis simuliert werden. Schwierigkeiten kann die Auflösung des Höhenmodells bereiten. Falls das Höhenmodell zu ungenau ist, droht die Gefahr, dass in RAMMS die Simulationen nicht den gleichen Fliessweg einschlagen, wie das in der Realität passieren würde, weil ein Gerinne oder Bachbett nicht genügend gut dargestellt wird. Dies war wahrscheinlich beim Murgang „Arth“ der Fall, als in RAMMS eine Geländerippe nicht der Realität entsprechend im DTM-AV modelliert wurde und deshalb ein Teil des Murgangs relativ einfach aus dem Fliessbett ausbrechen konnte (Ausbruch „Färnisbüel“).

Bei der Beurteilung der Modellkalibrierung müssen die beiden Murgänge differenziert betrachtet werden. Die Kalibrierung des Murgangs „Arth“ brachte genügend gute Resultate hervor, diejenige des Murgangs „Goldau“ nicht. Die Modellierungen des Ereignisses „Arth“ stimmten in ein paar eher kleineren Bereichen nicht mit dem reellen Murgang überein, aber bei Betrachtung der ganzen Simulation sind die qualitativen und quantitativen Resultate zufriedenstellend. Bei den Simulationen des Murgangs „Goldau“ hingegen konnte weder der Fliessweg noch die Fliessgeschwindigkeit genügend gut modelliert werden, was zu inakzeptablen Resultaten führte.

Das grösste Hindernis in der Modellkalibrierung war das Fehlen von Messstationen. Die Abflusshöhen und Fliessgeschwindigkeiten der Murgänge konnte nicht mit exakten Daten verglichen werden. Man behalf sich mit Zeugenaussagen, sowie stummen Zeugen, um die Modellresultate mit der Realität abgleichen zu können, aber so fielen die Vergleiche zwangsläufig etwas schwammig und qualitativ nicht sehr hochstehend aus. Der visuelle Vergleich (Fliessweg, Grösse Ablagerungsfläche) übernahm somit eine wichtige Rolle in den Gegenüberstellungen der Simulationen. Die fehlenden numerischen Vergleiche konnten damit zwar nicht kompensiert werden, aber durch die Mehrzahl an Vergleichsmöglichkeiten konnte die Qualität der Aussagen gesteigert werden.

7.4 Sensitivitätsanalyse

7.4.1 Variation Δμ für den Waldperimeter

Eine Erhöhung des Parameters für die trockene Reibung μ im Waldperimeter hat die gleichen Folgen wie bereits in der Diskussion der Modellkalibrierung beschrieben. Je grösser der Wert für das „Wald- μ“ gewählt wird, desto eher tendiert die Modellierung zu niedrigerer Fliessgeschwindigkeit und tieferen Abflusshöhen. Ein Muster in der Grösse der

Ablagerungsfläche der Murgänge und/oder deren Ausbrüche kann aus den in den Resultaten dargelegten Gründen nicht erkannt werden. Als Folgerung daraus kann geschlossen werden, dass ein höherer Wert für das μ im Waldperimeter bessere Resultate liefern sollte. Bis zu einem gewissen Punkt trifft dies auch zu. So erreicht die Modellierung des Murgangs „Arth“ mit einem Wert für das „Wald- μ“ von Δ+0.06 [-] objektiv ein besseres Resultat als die in der Kalibrierung gefundene „Best-Fit“-Kombination. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellierungen sind allerdings eher gering. Dies liegt möglicherweise an den kleinen Intervallschritten von Δ0.02 [-]. Bei grösseren Intervallen sind auch die Resultate dementsprechend unterschiedlicher. Die Ergebnisse aus den „Arth“-Modellierungen sind allerdings nicht auf die Modellierung des Murgangs „Goldau“ anwendbar. Die Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Goldau“ brachte keine eindeutigen Schlüsse zu Tage, geschweige denn eine Verbesserung der gefundenen besten Wertekombination aus der Kalibrierung. Um die Fliessgeschwindigkeit in die Nähe der Realität zu bringen, wären noch kleinere Werte für die turbulente Reibung ξ von Nöten gewesen, was bei einem Ausgangswert von 10 m/s^2 per se nicht möglich ist. Es ist auch nicht sicher, ob kleinere Werte für das ξ und grösserer Werte für das „Wald- μ“ die Resultate verbessert, da keine klare Tendenz für die Fliessgeschwindigkeit, Abflusshöhe und der Grösse der Ablagerungsfläche gefunden werden konnte (Abbildung 58 und Abbildung 59). Ein möglicher Grund könnte sein, dass der Voellmy-Salm-Ansatz Mühe hat, mit derart kleinen Werten für die turbulente Reibung zu Rechnen und korrekte Simulationen zu modellieren. Ein Indiz dafür könnten auch die nicht erklärbaren Resultate der Abflusshöhen und vor allem der Fliessgeschwindigkeiten an den verschiedenen Messstellen sein, welche in sich nicht kongruent sind.

Aus dieser Sicht muss die Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Goldau“ als unbrauchbar angesehen werden. Nicht weil sie die Resultate aus der Sensitivitätsanalyse des Murgangs „Arth“ nicht bestätigt oder widerlegt, sondern weil der Ansatz von Voellmy-Salm offensichtlich nicht in der Lage ist, die Merkmale des Murgangs „Goldau“ korrekt wiederzugeben. Die Sensitivitätsanalyse des Δμ für den Waldperimeter beim Murgang „Arth“ hat gezeigt, dass eine Erhöhung des Wertes für die trockene Reibung μ in einer Waldfläche um Δ0.06 [-] eine Verbesserung der Faktoren Fliessgeschwindigkeit, Abflusshöhe und Grösse des Ablagerungsgebietes bringen kann (im Gegensatz zu einem Ausgangswert für das „Wald- μ“ von Δ+0.02 [-]).

7.4.2 Variation des aktiv-passiven Fliessdruck Lambda λ

Aus der Sensitivitätsanalyse des aktiv-passiven Fliessdruckes am Beispiel „Arth“ wird ersichtlich, dass Modellierungen mit einem Wert von λ = 1.0 [-] im Gegensatz zu den Modellierungen mit einem λ = 2.5 [-] schmälere Fliesswege, kleinere Ablagerungsflächen und grössere Abflusstiefen simulieren. Die Fliessgeschwindigkeiten bleiben in etwa gleich. Auf den Murgang „Arth“ angewendet, bringt eine Verwendung des kleineren aktiv-passiven Fliessdruckes eine Verbesserung der Simulation in Bezug auf den Fliessweg und die Grösse der Ablagerungsfläche, jedoch eine Verminderung der Qualität des Resultates hinsichtlich der Abflusshöhen (Abbildung 54 und Tabelle 11). Da die Abflusshöhen beim Murgang „Arth“ nicht gemessen wurde, sollte diese negative Auswirkung mit Vorsicht behandelt und nicht überbewertet werden. Somit verbleiben überwiegend die positiven Effekte, eine qualitative Verbesserung der Modellierung kann mit einem λ von 1.0 [-] erwartet werden (Im Gegensatz zu einem Ausgangswert von λ = 2.5 [-]. Eine

Sensitivitätsanalyse für den aktiv-passiven Fliessdruck wurde beim Murgang „Goldau“ nicht durchgeführt, da bereits die Analyse des „Wald-μ“ gezeigt hat, dass keine aussagekräftigen Resultate zu erwarten gewesen wären. Die Gründe dafür sind oben beschrieben.

7.4.3 Spezifische Dichte des Erosionsmaterials

Eine Variation der Dichte des Erosionsmaterials hatte erst im unteren Teil der Transitstrecke und im Ablagerungsgebiet einen Einfluss auf die Simulation. Wie in der Abbildung 56 und der Tabelle 11 zu erkennen ist, sind die Unterschiede in den Simulationen von geringer Natur. Die Modellierung mit einer spezifischen Dichte von 1500 kg/m^3 zeigt ein etwas besseres Verhalten bezüglich der Grösse und Form des Ablagerungsgebietes und ein etwas Schlechteres bei den Abflusshöhen. Die 2200 kg/m^3-Simulation erbringt ein etwas schlechteres Resultat bei der Grösse und Form der Ablagerungsfläche, ansonsten ist sie vergleichbar mit der „Best-Fit“-Simulation. Aus den nahe beieinanderliegenden Resultaten kann geschlossen werden, dass eine Variation der spezifischen Dichte des erodierbaren Materials keine entscheidenden Veränderungen bei den Simulationen bewirkt, und der Einfluss verhältnismässig gering ist.

7.5 Diskussion der Untersuchungen bezüglich der Interaktion Murgang - Wald

In der Diskussion der in Kapitel 6.2 erzielten Resultate geht es primär darum abzuklären, inwiefern die Effekte aussagekräftig sind und ob das benutzte Verfahren gültig ist.

Die Resultate bezüglich des Versagensmechanismus und den daraus abgeleiteten prädestinierten Baumarten basierten einerseits auf den Feldaufnahmen und andererseits auf Literaturrecherchen. In der Methodenkritik (Kapitel 7.9) wird das Vorgehen inklusive Feldaufnahmen untersucht. In diesem Teil werden auch die Feldaufnahmen diskutiert. Die aus der Literaturrecherche erzielten Ergebnisse basierten partiell auf Untersuchungen, die im Zusammenhang mit Fliessschneelawinen durchgeführt wurden. Es stellt sich also die Frage, ob diese Ergebnisse auf ein Ereignis Murgang – Wald applizierbar sind. Verschiedene Publikationen (de Quervain 1978; Bartelt und Stöckli 2001) weisen darauf hin, dass das Verhalten einer Fliessschneelawine und eines Murgangs beim Durchfliessen eines Waldes ein Ähnliches sein könnte. Bei beiden Veröffentlichungen wird Wurzelbruch, resp. –wurf als primäre Versagensart definiert, was sich mit den erzielten Resultaten in dieser Arbeit deckt. Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von Interaktionen zwischen Fliessschneelawinen bzw. Murgängen und Wald (resp. einzelnen Bäumen) ist die Form der Schneelawine. Nassschneelawinen sind aufgrund ihres Fliessverhaltens und ihrer spezifischen Dichte eher vergleichbar mit einem Murgangprozess als Staublawinen (Bartelt und Stöckli 2001; Tiri 2009). Das genaue Ausmass der Vergleichbarkeit muss in nachfolgenden Studien untersucht werden.

Bei den Feldaufnahmen konnten keine Tendenzen weder hinsichtlich Baumart noch Durchmesser gefunden werden, die Baumartendurchmischung in den Aufnahmeflächen blieb auch nach dem Ereignis homogen und eine Ausdünnung Richtung dünnere oder dickere Bäume blieb aus. Ein Grund für das Ergebnis könnte das Fliessverhalten der Murgänge gewesen sein. Wie in Abbildung 37 gut zu erkennen ist, verläuft die Linie, bis wohin der Murgang seitlich vorstiess, ziemlich exakt. Die Vermutung liegt nahe, dass die Murgänge nicht, auch nicht kleinere Ausläufer, seitlich der Ränder in den Wald

vorgedrungen sind und dort Schäden angerichtet haben. Dadurch blieb der Wald ausserhalb des Fliessweges (und somit auch die Aufnahmeflächen) möglicherweise vom Einfluss des Murganges komplett verschont. Im Fliessweg hat der Wald offensichtlich keinen Einfluss auf die Murgangprozesse gehabt. Die Mischung aus der Mächtigkeit, der daraus folgenden Energie und der Erosion (beim Murgang „Arth“) der Murgänge minimierten die Chancen des Waldes, den Murgang schadlos zu überstehen. Durch die Tiefenerosion von der Dimension 2 -3 m, wurde der potenzielle Armierungseffekt der Bäume im Gerinne verhindert (Rickli 2001). Die meisten Baumarten durchwurzeln den Boden nicht tief genug um der Erosion entgegenwirken zu können (Tabelle 16). Durch die Eigenschaften der Murgänge „Arth“ und „Goldau“ konnte die Untersuchung keine stichhaltigen Gründe liefern, dass sich Baumart und Durchmesser auf die Resistenz gegenüber einem Murgangereignis auswirken.

Der Wald als ganze Einheit kann aber möglichweise einen Einfluss auf einen Murgangprozess haben. So berichteten Rickli, Graf et al. (2004), dass der Wald einen positiven Effekt auf Hangmuren ausüben kann, indem der Wald einen Teil der kinetischen Energie des Prozesses „absorbiert“. Bei grösseren Murgängen wie dies „Arth“ und vor allem „Goldau“ darstellen, kann dieser Effekt wahrscheinlich nicht wirken, aber bei kleineren Murgangereignissen könnte der Wald eine ähnliche Wirkung wie bei Hangmuren entfalten. Zudem wurde bei den beiden untersuchten Murgängen beobachtet, dass durch Bäume verursachte Verklausungen im Wald den Prozess erschweren oder gar daran hindern, weiterzufliessen (Ausbruch „Färnisbüel“ beim Murgang „Arth“, sowie der kleine Ausbruch kurz unterhalb der Anrisszone in den Wald beim Murgang „Goldau“). Im Transitgebiet kann ein Wald allerdings auch negative Auswirkungen haben. In einem Bachbett, welches in einem Waldperimeter liegt, kann sich tendenziell mehr Material ansammeln, als wenn sich keine Bäume seitlich oder im Gerinne befinden (Iverson, Reid et al. 1997). Zudem akkumuliert ein Murgang möglicherweise Material aus dem Wald (gestürzte Bäume, Stämme, Wurzelteller, etc.) beim Durchfliessen und kann dadurch noch weiter an Masse und Volumen gewinnen, ohne dabei Energieverlust zu erleiden (Bartelt und Stöckli 2001).

7.6 Messstandorte

Wie in Kapitel 5.1.5 beschrieben, wurden die Messstandorte nicht zufällig ausgewählt.

Bis auf den zweiten Messpunkt des Murgangs „Arth“, *Vor Austritt aus dem Wald (*Abbildung 36*)*, lieferten alle Messstationen zufriedenstellende Daten, welche mit der Realität verglichen werden konnten. Bei der Messstelle *Vor Austritt aus dem Wald* Vergleiche zwischen der modellierten Abflusshöhe und den Spuren im Gerinne zu ziehen, gestaltete sich als schwierig. Die Spuren im Gelände deuteten auf die maximale Abflusshöhe des Murgangs an dieser Stelle (Querschnitt durch das Bachbett) hin, die aufgenommenen Daten der Modellierung massen zwar ebenfalls die maximale Abflusshöhe, allerdings nur an jenem Punkt und nicht über die ganze Breite des Bachbettes. Bei den Modellierungen stellte sich heraus, dass die maximale Abflusshöhe an der Stelle wo sich der Messpunkt befand, sich nicht bei der Messstelle, sondern etwas nebenan im Gerinne befand. An der Messstation wurde folglich nicht die maximale Abflusshöhe über die ganze Breite des Murganges gemessen, was ein Vergleich mit den Spuren aus dem Bachbett erschwerte. Aus diesem Grund wurde den Resultaten bei der Messstation *Vor Austritt aus dem Wald* nur vermindert Beachtung geschenkt.

7.7 Grenzen des Modells RAMMS

Die Stärken und Schwächen des Simulationsprogramms RAMMS für Schneelawinen werden in verschiedenen Publikationen erwähnt (Christen, Bartelt et al. 2008; Tiri 2009; Bühler, Christen et al. 2010; Christen, Bühler et al. 2010; Christen, Kowalski et al. 2010). Für das Modul Murgänge gibt es noch nicht so viele Rückmeldungen (Scheuner 2007; Stadelmann 2008; Stricker 2010). Die genannten Stärken trafen auch auf diese Arbeit zu. Beim Murgang „Arth“ konnten plausible Werte für Fliessgeschwindigkeit, Grösse der Ablagerungsgebiete und Fliesswege erzielt werden. Anders als in Stricker (2010) erwähnt, konnten auch realistische Abflusshöhen modelliert werden. Probleme bereiteten dem Model insbesondere das Simulieren von Verklausungen und sehr tiefe Fliessgeschwindigkeiten. Beides konnte in RAMMS nur ungenügend wiedergegeben werden. Während Verklausungen durch pseudo-Dämme simuliert werden können, ist es kaum möglich einen Kriechprozess in RAMMS realitätsgetreu zu modellieren. Eine nötige Vereinfachung des Anrissprozesses ist ebenfalls eine Schwachstelle des Programms. Es ist noch nicht möglich, einen Murgang in mehreren Schüben zu simulieren. Eine Abhilfe dazu könnte die Weiterentwicklung des RAMMS-Moduls für Murgänge schaffen. Eine Verbesserung der Simulationen, insbesondere der Modellierung der Ablagerungsflächen, könnte in Zukunft das random kinetic energy Modell bringen, welches den Ansatz von Voellmy-Salm ersetzen würde. In geringem Masse ist auch die Bedienungsfreundlichkeit der Benutzerplattform von RAMMS noch verbesserungsfähig, zum Beispiel, falls die Messstationen oder Querprofile als solche abgespeichert und in einem neuen Projekt wieder geladen werden könnten. Zurzeit ist dies nur mit einer Neueingabe der Koordinaten möglich.

Eine Verbesserung des Modells bringt allerdings nur resultatmässig einen Nutzen, wenn auch die angenommenen Inputparameter in einem genügend grossen Masse zutreffen. *Das Modell ist nur so gut wie die getroffenen Annahmen stimmen.* Dazu zählt auch die Qualität der Karten/Orthophotos, vor allem aber der verwendeten Höhenmodelle.

Anforderungen an den Rechner

Da das Programm eine grosse Datenmenge verarbeiten muss, ist es von Vorteil, bis fast zwingend notwendig, dass der Rechner über eine grosse Arbeitsspeicherkapazität (RAM > 2 GB) und einen schnellen Prozessor (CPU >~ 1 GHz) verfügt. Andernfalls kann die Berechnung einer Simulation mehrere Stunden in Anspruch nehmen. Zudem sollte auf einem Speichermedium (Laufwerk) genügend Platz vorhanden sein, da eine entzippte Simulation mehrere Gigabytes Speicherplatz beansprucht.

7.8 Methodenkritik der Simulationen mit RAMMS

Zu Beginn der Arbeit stand eine umfassende Literaturrecherche an. Über das Programm RAMMS gibt es diverse Publikationen, welche das Programm und die Anwendungsweise verständlich erläutern (Christen, Bartelt et al. 2008; Bühler, Christen et al. 2010; Christen, Bartelt et al. 2010; Christen, Bühler et al. 2010; Christen, Kowalski et al. 2010). Insbesondere die Bedienungsanweisung von Christen, Bühler et al. (2010) dient als gute Einführung. Zum Verständnis von Murgängen ist im Kapitel 4.1.1 bereits eine umfangreiche Zusammenstellung von hilfreicher Literatur beschrieben. Zur Thematik der Interaktion von Murgängen und Wald konnte im Gegensatz dazu nur sehr wenig nützliche Literatur gefunden werden. Aus diesem Grund wurde in der Literaturarbeit zuerst versucht, eine Brücke zur Interaktion Murgang - Wald via dem Zusammenspiel von Fliessschneelawinen und Wald zu finden. Dieses Vorgehen ist problematisch, da die beiden Prozesse verschiedene Eigenschaften aufweisen und die Interaktion mit dem Wald deshalb wahrscheinlich nicht 1:1 übernommen werden kann. Bei langsam fliessenden Nassschneelawinen können möglicherweise einzelne Parallelen gezogen werden, was das Verhalten des Waldes, resp. Murganges/Lawine betrifft. Aufgrund dieser Vorgehensweise und Recherchen war es möglich, Hypothesen über die Interaktion von Murgang und Wald aufzustellen.

Die Feldaufnahmen wurden im Herbst und nicht im Winter durchgeführt, um das Gelände noch unverschneit vorzufinden. Nebst der einfacheren Zugänglichkeit waren so auch die Spuren im Bachbett besser sichtbar. Unter einer Schneedecke wäre es schwierig geworden, die Wurzelteller, Stirzel, etc. zu erkennen. Einen weiteren Vorteil der Aufnahmen im Herbst bildeten die noch hängenden Blätter an den Bäumen, welche im Herbst teilweise noch nicht abgefallen waren. Zwar ist es durchaus möglich, die Baumarten auch im Winter anhand ihrer Wuchsform und Borke (Rinde) einfach zu bestimmen, die noch hängenden Blätter vereinfachten die Bestimmung allerdings merklich.

Die Modellkalibrierung lehnte sich, wie bereits früher erwähnt, an die Publikation von Christen, Bartelt et al. (2010). Des Weiteren waren die Veröffentlichungen von Armento, Genevois et al. (2008) und Pirulli und Sorbino (2008) hilfreich. Da in einem Forschungsgebiet analysiert wurde, wo noch nicht viele verwendbare Werte existieren, bildete die Modellkalibrierung eine notwendige Grundlage für die anschliessenden Sensitivitätsanalysen. Durch die vielen Möglichkeiten, verschiedene Werte für die Inputparameter zu setzen, nahm die Kalibrierung viel Zeit in Anspruch. So wurde in dieser Arbeit für die Modellkalibrierung ein Total von über 230 Simulationen, über beide Murgänge verteilt, durchgeführt.

Die Sensitivitätsanalysen nahmen weniger Zeit in Anspruch. Sie wurden nur an einem Beispiel durchgeführt, weil die Modellkalibrierung für den Murgang „Goldau“ keine genügend guten Resultate hervorbrachte, welche als Ausgangspunkt hätte dienen können. Die Sensitivitätsanalysen lehnten sich an jene von Stricker (2010) und wurden zusammen mit Peter Bebi und Michaela Teich, beides Mitarbeiter am Schnee- und Lawinenforschungsinstitut SLF in Davos, entwickelt. Das primäre Augenmerk wurde dabei auf die Untersuchung des Parameters für die trockene Reibung μ eines Waldperimeters gelegt. Die Idee einer Untersuchung der anderen beiden Faktoren entwickelte sich im Laufe der Modellkalibrierung. Eine Verbesserung der Resultate bezüglich des „Wald-μ“ in den Sensitivitätsanalysen könnte vielleicht erreicht werden, falls das $\Delta\mu$ grösser gewählt

worden wäre. Dadurch wären die Einflüsse des Parameters möglicherweise akzentuierter in den Resultaten ausgefallen und hätten eine Diskussion vereinfacht.

7.9 Methodenkritik der Feldaufnahmen

In der Diskussion über die Versagensmechanismen und die Feldaufnahmen wurde deutlich, dass der Boden und dessen Eigenschaften eine zentrale Rolle in der Stabilität des Waldes und der Bäume im Einzelnen hat. Je vernässter und skelettreicher ein Boden ist, desto schwieriger wird es für Bäume, ihn zu durchwurzeln (Ott, Frehner et al. 1997). Auch die Erodierbarkeit eines Waldbodens hat einen Einfluss auf die Möglichkeit eines Waldes, einem Murgang widerstehen zu können. Durch das Weglassen dieses Untersuchungsgebietes in dieser Arbeit, wurde nicht das ganze mögliche Einflussspektrum abgedeckt und somit kann die Arbeit und dessen Ergebnisse keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Ein anderes Problem während der Feldaufnahmen war eine potentielle Verzerrung der Aufnahmeergebnisse. Auf der Suche nach Spuren für mögliche Versagensmechanismen konnte im Fliessbett nur die Oberfläche untersucht werden. Wie die Situation am Boden aussieht, ob und wie viele Wurzeln oder Stirzel (Wurzelwerke mit einem Teil des Stammes) unter der Oberfläche liegen, konnte nicht eruiert werden. Falls aufgrund ihrer Form oder anderen Eigenschaften die Wurzelteller eher im oberen Teil des Murgangs nach unten flossen und Stirzel eher am Grund, so könnte dies eine Verzerrung der Resultate bewirkt haben. Durch die spezifische Dichte von Holz und der Eigenschaft von Murgängen, dass grosse Geschiebestücke eher im oberen Teil des Murgangs transportiert werden, dürfte die Gefahr eines möglichen Bias sich jedoch in Grenzen gehalten haben.

Eine Grundsätzliche Diskussion muss auch über den Wald im Untersuchungsgebiet gehalten werden. Denn Wald ist nicht gleich Wald. Während der Wald rings um den Murgang „Arth“ einem „durchschnittlichen“ Wald der nördlichen Randalpen entsprechen könnte, befindet sich der Murgang „Goldau“ auf einem Blockschuttgebiet. Auf solchen Böden ist eine Verankerung und Durchwurzelung von Bäumen stark eingeschränkt. Die Stabilität des Waldes entspricht somit mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht derjenigen eines „Normalen“ in den nördlichen Randalpen.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im letzten Kapitel werden aus den erhaltenen Ergebnissen und den darüber geführten Diskussion Fazits gezogen und Ausblicke gemacht.

8.1 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit untersuchte die beiden Murgangereignisse vom Sommer 2005 in Arth-Goldau. Mit dem Programm RAMMS wurden die Murgänge „Arth“ und „Goldau“ so genau als möglich nachmodelliert. Durch eine Modellkalibrierung erfolgte schrittweise eine Annäherung an die reellen Gegebenheiten. Anhand von Sensitivitätsanalysen konnten einige Inputparameter für das Programm näher untersucht werden. In einem zweiten Teil durchleuchtete diese Studie die Wälder im Untersuchungsgebiet und versuchte daraus Beziehungen und Einflüsse des Waldes auf die beiden Murgänge und Murgangereignisse im Allgemeinen zu folgern.

Die Untersuchung der Murgänge „Arth“ und „Goldau“ zeigte murgangatypische Eigenschaften für die beiden Ereignisse auf. Das Verhalten beider Prozesse wies mindestens teilweise Züge von Hangmurenverhalten auf. Die Verhaltensweise der Anrissmechanismen kann nicht einem klassischen Anrisstyp zugeordnet werden, wie sie Haeberli, Rickenmann et al. (1991) vorschlagen. Das Fliessverhalten des Murgangs „Goldau“ muss durch die sehr niedrige Fliessgeschwindigkeit und –breite eher als *Kriechen* denn als *Fliessen* bezeichnet werden.

Die Modellkalibrierung brachte aufgrund der nicht alltäglichen Eigenschaften der Murgänge ausserordentliche Resultate hervor. Durch die niedrige Fliessgeschwindigkeit mussten tiefe Werte für die turbulente Reibung ξ gewählt werden, um realistische Simulationen zu erhalten. Im Gegensatz dazu war es notwendig, relativ hohe Werte für die trockene Reibung μ zu wählen, andernfalls gerieten die Ablagerungszonen zu gross. Beim Murgang „Arth“ konnte eine „Best-Fit“-Kombination eruiert werden, beim Murgang „Goldau“ nicht. Dies lässt darauf schliessen, dass das Programm RAMMS bei Prozessen mit aussergewöhnlichen Eigenschaften Mühe hat, diese korrekt nachzumodellieren. Eine weitere Erkenntnis der Modellkalibrierung ist, dass es beim Modul Murgang in RAMMS immer noch unerlässlich ist, eine Modellkalibrierung für die Reibungsparameter vorzunehmen. Verklausungen, welche in RAMMS nicht, oder nur ungenügend nachgebildet werden, können durch Modifikationen des Höhenmodells modelliert werden. Dazu werden Dämme als Geländeerhebungen oder Barrieren eingebaut. Die Kalibrierung hat dargestellt, dass der Murgang „Goldau“ in RAMMS nicht genügend realitätsnah simuliert werden konnte, sodass eine Sensitivitätsanalyse an diesem Murgang keinen Sinn gemacht hätte. Am Beispiel „Arth“ konnte hingegen aufgezeigt werden, dass auch bei Murgängen, welche durch bewaldetes Gebiet fliessen, die grundsätzlichen Eigenschaften und „Regeln“ in RAMMS gelten.

In der Sensitivitätsanalyse für das $\Delta\mu$ im Waldperimeter offenbarte sich, dass eine Erhöhung des Wertes für den trockenen Reibungskoeffizienten um $\Delta 0.06$ [-] geringfügig bessere Simulationen liefern kann, als bei dem Wert, welcher für die Interaktion Fliessschneelawinen – Wald publiziert ist ($\Delta\mu$ +0.02 [-]). Der Wert für die turbulente Reibung ξ muss auf alle Fälle für jeden untersuchten Murgang einzeln gewählt werden,

verändert sich im Waldperimeter wahrscheinlich jedoch kaum. Der Wald hat definitiv einen Einfluss auf das Fliessverhalten von Murgängen, was den Reibungsparameter μ betrifft. Eine Veränderung der spezifischen Dichte des Erosionsmaterials hat keine grosse Wirkung auf die untersuchten Faktoren Fliessgeschwindigkeit, Abflusshöhe, Fliessweg, Ausdehnung und Form des Ablagerungsgebietes. Eine Veränderung des aktiv-passiven Fliessdruckes λ hingegen verändert die Fliessrheologie beträchtlich. So wurden mit einem Wert von 1.0 [-] realistischere Simulationen erhalten, als mit dem Wert von 2.5 [-].

Das Programm RAMMS ermöglicht Murgänge so zu modellieren, wie sie in der Realität auch geschehen sind, oder geschehen könnten. Die Qualität der Resultate ist allerdings nur so gut wie die Güte der Inputparameter sind. Fehlen Messdaten, werden einzelne Ergebnisse unbrauchbar oder werden von qualitativ schlechter Natur ausfallen. So konnte bei beiden Murgängen die modellierten Abflusshöhen und Fliessgeschwindigkeiten teilweise nicht mit den wirklichen Gegebenheiten verglichen werden, da keine genauen Daten der Ereignisse vorhanden waren.

Die Feldaufnahmen haben gezeigt, dass weder die Baumart, noch der Durchmesser der Bäume einen Einfluss auf das Widerstandsvermögen gegenüber den Murgängen „Arth“ und „Goldau“ gehabt haben. Die Erosion und das überdurchschnittlich grosse Volumen der Murgänge marginalisierten den Effekt des Waldes. Untersuchungen bezüglich der Versagensmechanismen brachten primär Wurzelbruch und –wurf als Resultate hervor. Abstützend auf diesem Ergebnis kann als Schlussfolgerung gezogen werden, dass von den in der Schweiz am häufigsten vertretenen Baumarten Laubgehölze und Lärchen gegen diese Versagensart und somit gegen Murgänge vermutlich am besten geeignet sind. Der Einfluss des Bodens dürfte allerdings mindestens genauso wichtig sein, wie die Eigenschaften der Bäume, welche darauf wachsen.

8.2 Ausblick

Die Murgänge vom Sommer 2005 um Arth-Goldau wurden bereits eingehend untersucht (Hunziker 2006; Thuro, Rick et al. 2006; Zimmermann 2006; Terra Data 2007a; Terra Data 2007b). Ein weiterführendes Untersuchungsfeld wäre die Bildung von möglichen Zukunftsszenarien. Der Rossberg besteht nach wie vor aus instabil geschichteten Schichten und so ist es denkbar, dass auch in Zukunft Felsabbrüche stattfinden werden, welche unter Umständen zu Murgangprozessen führen können. Als Sofortmassnahmen nach den Ereignissen wurden beim Murgang „Goldau“ ungefähr bei der Messstelle *Bei Austritt aus dem Gerinne* mehrere Ablenkdämme (inkl. Sammelrechen oberhalb der Strasse) gebaut, welche einen Ausbruch eines neuerlichen Murgangs Richtung „Grosswiyer“ verhindern sollen. Dasselbe geschah beim Murgang „Arth“ nach Austritt aus dem Wald vor der Bahnunterführung. Zusätzlich wurde an jener Stelle noch ein Geschiebesammler mit einem Fassungsvermögen von ca. 5`000 m^3 erstellt (Thuro, Rick et al. 2006). Eine Szenarienbildung könnte bei Untersuchungen in RAMMS zu Tage bringen, ob diese Massnahmen auch eine Wirkung erzielen und wenn ja, welche.

Um die Ergebnisse aus den Sensitivitätsanalysen verifizieren zu können, sind Untersuchungen bezüglich der Reibungsparameter in einem Waldperimeter an weiteren Murgangereignissen durchzuführen. Durch eines oder mehrere Validierungsgebiete könnte überprüft werden, ob die in dieser Arbeit erhaltenen Resultate und die daraus gezogenen Schlüsse allgemeine, oder nur auf das Beispiel „Arth“ Gültigkeit besitzen. Ein entferntes

Ziel in RAMMS könnte sein, dass der Benutzer aus verschiedenen Kategorien von „Wald“ die für seine Modellierung am besten passende Waldklasse auswählen kann. Die Kategorien unterscheiden sich in den Reibungsparameter und würden auf verschiedenen Indikatoren (Waldtyp, Verjüngungszustand, Gesundheitszustand, etc.) basieren. Auf diese Weise könnte auf die Variabilität und Diversität der Wälder besser eingegangen werden („Wald ist nicht gleich Wald“).

Das Programm RAMMS wird, insbesondere für die Module Murgang und Steinschlag, laufend weiterentwickelt. Beim Murgang-Modul werden momentan, wie bereits in der Diskussion erwähnt, Untersuchungen mit einem Hydrographen als Inputparameter durchgeführt. In diesem Frühling (2011) wird das Modul Murgänge soweit entwickelt sein, dass es für die Öffentlichkeit verfügbar sein wird.

Im Gebiet der Interaktion zwischen Wald und Murgängen könnten Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses des Bodens auf die Widerstandskraft des Waldes möglicherweise weitere wertvolle Informationen liefern. Auch kurz- und langfristige Folgen von Murgangereignissen durch einen Wald sind noch unerforscht. Durch solche Studien könnte möglicherweise eruiert werden, welche Baumarten oder welche Art von Wald (Waldgesellschaft) am besten geeignet sind, effektiv eine Schutzwirkung gegenüber Murgängen auszuüben.

Literaturverzeichnis

Allen, S. K., D. Schneider, et al. (2009). "*First approaches towards modelling glacial hazards in the Mount Cook region of New Zealand's Southern Alps*." Natural Hazards and Earth System Sciences 9(2): 481-499.

Amann, G. (2002). *Bäume und Sträucher des Waldes*. Melsungen, Neumann-Neudamm.

Ammann, M. (2006). "*Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren*." Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL: 228.

Andres, N. (2010). "*Unsicherheiten von digitalen Geländemodellen und deren Auswirkungen auf die Berechnung von Gletscherseeausbrüchen mit RAMMS*." Geographisches Institut Master: 112.

Annen, A. (2007). *Wiederherstellung und Schutzmassnahmen nach den Unwettern 2005 - Untere Grisselen*. Lauerz, Annen Forstingenieurbüro: 14.

Armento, M., R. Genevois, et al. (2008). "*Comparison of numerical models of two debris flows in the Cortina d' Ampezzo area, Dolomites, Italy*." Landslides 5(1): 143-150.

Badoux, A., C. Graf, et al. (2009). "*A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance*." Natural Hazards 49(3): 517-539.

Bartelt, P., B. Salm, et al. (1999). "*Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining*." Journal of Glaciology 45(150): 242-254.

Bartelt, P. und V. Stöckli (2001). "*The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow*." Annals of Glaciology 32: 209-216.

Bazzigher, G. und P. Schmid (1969). "*Sturmschäden und Fäule*." Schweiz- Z. Forstwesen 120: 521-535.

Benda, L. (1990). "*The influence of Debris Flows on channels and valley floors in the oregon coast range, U.S.A.*" Earth, Surface And Landforms 15: 457-466.

Bouchut, F., E. D. Fernandez-Nieto, et al. (2008). "*On new erosion models of Savage-Hutter type for avalanches*." Acta Mechanica 199(1-4): 181-208.

Brändli, U.-B. R. (2010). *Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004 – 2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL*. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU.

Brückner, E., H. Bibelriether, et al. (1968). *Die Wurzeln der Waldbäume: Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa*. Hamburg, Paul Parey.

Bühler, Y., M. Christen, et al. (2010). "*RAMMS: Simulation und Visualisierung von Lawinen im dreidimensionalen alpinen Gelände*." Geomatik Schweiz 108: 410-413.

Büning, H. und G. Trenkler (1998). *Nichtparametrische statistische Methoden*. Berlin, De Gruyter.

Cesca, M. und V. D'Agostino (2008). "*Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. In: Monitoring, Simulation, Prevention and Remedation of Dense Flows li*." 60: 197-206.

Christen, M., P. Bartelt, et al. (2010). "*Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results*." Annals of Glaciology 51(54): 161-168.

Christen, M., P. Bartelt, et al. (2008). "*Calculation of Dense Snow Avalanches in Three-Dimensional Terrain with the Numerical Simulation Program RAMMS*." Proceedings of the International Snow Science Workshop: 709-716.

Christen, M., Y. Bühler, et al. (2010). *RAMMS 1.3.0, Rapid Mass Movements, user manual v1.01.* , Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.

Christen, M., J. Kowalski, et al. (2010). "*RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain*." Cold Regions Science and Technology 63(1-2): 1-14.

Costa, J. E. (1984). *Physical Geomorphology of Debris Flows.* . Berlin, Springer.

Coussot, P. und M. Meunier (1996). "*Recognition, classification and mechanical description of debris flows*." Earth-Science Reviews 40: 209-227.

de Quervain, M. (1978). *Wald und Lawinen. In: Proceeding of the IUFRO Seminar mountain Forests and Avalanches*, Schnee und Lawinenforschungsinstitut SLF, Davos.

Duc, P., U.-B. Brändli, et al. (2004). "*Der Schutzwald im zweiten Schweizerischen Landesforstinventar (LFI2)*." Forum für Wissen: 7-13.

Ellenberg, H. und F. Klötzli (1972). *Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz*, Schweizerische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Birmemsdorf.

Frehner, M., B. Wasser, et al. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion*. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

Frey, H.-U. (2005). *Waldreservat Goldauer Bergsturz: Kartierung der Strukturtypen und der Ertragsklassen*. Vättis: 24.

Gamma, P. (1999). "*dfwalk : Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*." Dissertation: 144.

Gruber, U. und P. Bartelt (2007). "*Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS*." Environmental Modelling & Software 22(10): 1472-1481.

Grundmann, A. (2006). "*200 Jahre Goldauer Bergsturz, aus www.goldauerbergsturz.ch, besucht am 22. Januar 2011*."

Haeberli, W. und F. Naef (1988). "*Murgänge im Hochgebirge, Ereignisse 1987 im Puschlav und Obergoms*." Die Alpen, Zeitschrift des schweizerischen Alpenclubs 64: 331-343.

Haeberli, W., D. Rickenmann, et al. (1991). "*Murgänge, Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen*." Mitteilung des Bundesamt für Wasserwirtschaft 4: 77-88.

Hantke, R. (2006). *Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25`000, Blatt 1151 Rigi (Atlasblatt 116). Karte und Erläuterungen*. Bern, Bundesamt für Landestopographie, swisstopo.

Hungr, O. (2005). "*Classification and terminology*." In: Debris-flow hazards and related phenomena. M. Jakob and O. Hungr. Chichester, Springer: 9-24.

Hungr, O., S. McDougall, et al. (2005). "*Entrainment of material by debris flows*." In: Debris-flow hazards and related phenomena. M. Jakob and O. Hungr. Chichester, Springer: 135-158.

Hunziker, G. (2006). *Murgangbeurteilung Rufiberg*. Bern, Geo7, Geowissenschaftliches Büro: 30.

Hurlimann, M., D. Rickenmann, et al. (2003). "*Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps*." Canadian Geotechnical Journal 40(1): 161-175.

Iverson, R. M. (1997). "*The physics of debris flows*." Reviews of Geophysics 35(3): 245-296.

Iverson, R. M. und R. P. Denlinger (2001). "*Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory*." Journal of Geophysical Research-Solid Earth 106(B1): 537-552.

Iverson, R. M., M. E. Reid, et al. (1997). "*Debris-flow mobilization from landslides*." Annual Review of Earth and Planetary Sciences 25: 85-138.

Jakob, M. und O. Hungr (2005). *Debris-flow hazards and related phenomena*, Berlin : Springer-Verlag.

Johnson, A. M. und J. D. Rhodine (1984). "*Debris Flow*." In: Slope Stability. John Wiley and Sons, New York. 225-234.

Keusen, H. R., D. Bollinger, et al. (1998). "*Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung*." Bulletin angewandte Geologie 3: 11-28.

Kirchhofer, W. (2000). *Klimaatlas der Schweiz*. M. Schweizerische Meteorologische Anstalt. Wabern, Bundesamt für Landestopographie, swisstopo.

Knobel, R. (2007). "*Modellierung von Murgängen und Eislawinen in Nordossetien mit Hilfe des RAMMS-Modells und systematischen Testens von Satellitenenbildern*." Geographisches Institut Diplom.

Körner, C. (1998). "*A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation*." Oecologia 115(4): 445-459.

Kowalski, J. (2008). "*Two-phase modeling of debris flows*." Dissertation: 135.

Labhart, T. P. (2009). *Geologie der Schweiz*. Bern, Ott

Lorente, A., S. Begueria, et al. (2003). "*Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees*." Natural Hazards and Earth System Sciences 3: 683-692.

Lüscher, P. (1999). "*Mitteilungen*." Arbeitsgruppe Richtwerte der Plattform Bodenschutz der bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz 9.

Mahrer, F. (1976). "*Abgrenzungsformen zur Erfassung der Waldfläche im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI)*." Berichte der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) 167.

Marazzi, S. (2005). *Atlante orografico delle Alpi. SOIUSA*. Scarmagno, Priuli & Verlucca.

MeteoSchweiz (2006). *Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz 211*. Zürich: 63.

MeteoSchweiz (2010). *Standardnormwerte 1961-1990: Niederschlagssumme*. Zürich, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz.

Middleton, G. V. und J. B. Southard (1977). "*Mechanics of Sediment Movements*." Society of Economic Paleontologists and Mineralogists 3: 240.

Naef, D., D. Rickenmann, et al. (2006). "*Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model*." Natural Hazards and Earth System Sciences 6(1): 155-165.

Ott, E., M. Frehner, et al. (1997). *Gebirgsnadelwälder: Praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern, Paul Haupt.

Pirulli, M. und G. Sorbino (2008). "*Assessing potential debris flow runout: a comparison of two simulation models*." Natural Hazards and Earth System Sciences 8(4): 961-971.

Rickenmann, D. (1995). "*Beurteilung von Murgängen*." Schweizer Ingenieur und Architekt 113: 4.

Rickenmann, D. (1996). *Murgänge: Prozess, Modellierung und Gefahrenbeurteilung*. Basel, Birkhäuser Verlag.

Rickenmann, D. (1999). "*Empirical Relationships for Debris Flows*." Natural Hazards 19(1): 47-77.

Rickenmann, D., M. Jakob, et al. (2005). "*Runout prediction methods. In Debris-flow Hazards and Related Phenomena*." 305-324.

Rickenmann, D., D. Laigle, et al. (2005). "*Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events*." Computational Geosciences 10(2): 241-264.

Rickenmann, D. und M. Zimmermann (1993). "*The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*." Geomorphology 8: 175-189.

Rickli, C. (2001). "*Vegetationswirkungen und Rutschungen - Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997*." 97.

Rickli, C., F. Graf, et al. (2004). "*Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs*." Forum für Wissen 2004: 27-34.

Roloff, A., H. Weisgerber, et al. (2010). *Bäume Mitteleuropas : von Aspe bis Zirbelkiefer: mit den Porträts aller Bäume des Jahres von 1989 bis 2010*. Weinheim, Weinheim : Wiley VCH.

Salm, B. (1993). *Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches*. Annals of Glaciology, Vol 18, 1993 - Proceedings of the Symposium on Snow and Snow-Related Problems. Cambridge, Int. Glaciological Society. 18: 221-226.

Schatzmann, M. und P. Vollmöller (2003). "*Computersimulierte Murgänge. Physikalische und numerische Simulation von Murgängen*." Tec21 129: 3.

Scheuner, T. (2007). "*Modellierung von Murgangereignissen mit RAMMS und Vergleich durch GIS-basiertes Fliessmodell*." Diplom: 105.

Schneider, D., P. Bartelt, et al. (2010). "*Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model*." Journal of Geophysical Research-Earth Surface 115.

Sosio, R., G. B. Crosta, et al. (2008). "*Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps)*." Engineering Geology 100(1-2): 11-26.

Speck, J. (1954). *Geröllstudien in der subalpinen Molasse am Zugersee und Versuch einer paläogeographischen Auswertung*. Zug, Eberhard Kalt-Zehnder.

Stadelmann, G. (2008). "*Modellierung der Waldentwicklung an der Rigi-Nordlehne zur Analyse der Schutzwirkung von Wald gegen Murgang*." Master of science: 79.

Stahel, W. A. (2002). *Statistische Datenanalyse - Eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Wiesbaden, Vieweg

Stricker, B. (2010). "*Murgänge im Torrente Riascio (TI): Ereignisanalyse, Auslösefaktoren und Simulation von Ereignissen mit RAMMS*." Glaziologie, Geomorphodynamik & Geochronologie Master of science: 104.

Strunk, H. (2002). "*Reconstructing debris flow frequency in the southern Alps back to AD 1500 using dendrogeomorphological analysis. In: International Association for hydrological Sciences*." 299-306.

Swartz, M., B. McArdell, et al. (2003). "*Interpretation of the August 2000 Schipfenbach debris flow event using numerical models*." Turbulenzen in der Geomorphologie; Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG) der SANW 184: 51-60.

Takahashi, T. (1981). "*Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster*." Journal of Natural Disaster Science 3: 57-89.

Takahashi, T. (1991). *Debris flow*, Rotterdam: Balkema.

Takahashi, T. (2007). *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*, London: Taylor & Francis.

Teich, M. und P. Bebi (2009). "*Evaluating the benefit of avalanche protection forest with GIS-based risk analyses-A case study in Switzerland*." Forest Ecology and Management 257(9): 1910-1919.

Terra Data (2007a). *Massenverschiebung Unwetter August 2005, Massenerhebung Murgang Gribsch Rossberg - Differenzenmodell*. Einsiedeln.

Terra Data (2007b). *Massenverschiebung Unwetter August 2005, Massenerhebung Murgang Gribsch Rossberg - Höhenkurvenplan*. Einsiedeln.

Thuro, K., C. Berner, et al. (2006). "*Der Bergsturz von Goldau 1806 - Versagensmechanismen in wechsellagernden Konglomeraten und Mergeln*." Veröffentlichungen der 15. Tagung Ingenieurgeologie: 6.

Thuro, K., B. Rick, et al. (2006). *Die Bergstürze am Rossberg und die Massenbewegunegen in Folge des Unwetters vom August 2005 - Ein Exkursionsführer*. Bulletin angewandter Geologie. 11/2: 11.

Tiri, R. (2009). "*Interaktionen zwischen verschiedenen Baumeigenschaften und Lawinen*." Umweltnaturwissenschaften Master of science: 80.

Tognacca, C. (1999). *Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen*, VAW, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Vanomsen, P. (2006). "*Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz*." Dissertation: 248.

Vogel, A. und R. Hantke (1988). "*Zur Geologie des Rigigebietes*." Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern 30: 25-50.

WaG *Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG) vom 04. Oktober 1991 (Stand am 18. Januar 2011)*.

Waldbau, P. f. (1995). *Mitteleuropäische Waldbaumarten - Artbeschreibung und Ökologie unter besonderer Berücksichtigung der Schweiz*. Zürich, ETH Zürich.

Walter, H. und H. Lieth (1967). *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena, Fischer.

WaV "*Bundesverordnung über den Wald (Waldverordnung, WaV), vom 30. November 1992 (Stand am 18. Januar 2011)*."

Weber, D. (2004). "*Untersuchungen zum Fliess- und Erosionsverhalten granularer Murgänge*." Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL: 348.

Zimmermann, M. (2006). *Murgang Rossberg - Gribsch*. Thun, NDR Natural Disaster Reduction Consulting: 3.

Zimmermann, M., P. Mani, et al. (1997). *Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz*. Zürich, vdf.

Anhangsübersicht

Anhang 1 Feldaufnahmen im Untersuchungsgebiet A-1
Anhang 1.1 Datenblätter Bestandesaufnahme A-1
Anhang 1.2 Planskizzen der Aufnahmeflächen A-7
Anhang 1.3 Fotodokumentationen der Aufnahmeflächen A-12
Anhang 2 Pläne Terra Data AG A-17
Anhang 2.1 Massenverschiebungsplan Murgang „Goldau“ A-17
Anhang 2.2 Massenverschiebungsplan Murgang „Goldau“ mit Orthophoto hinterlegt A-18
Anhang 2.3 Höhenkurvenplan Murgang „Goldau“ A-19
Anhang 3 Relevante Datenblätter aus der Kartierung von Frey (2005) A-20

Anhang 1 Feldaufnahmen im Untersuchungsgebiet

Anhang 1.1 Datenblätter Bestandesaufnahme

Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“

Durchmesser	Baumart	Buche	Fichte	WFöhre	BAhorn	Tanne	Wildkirsche	Esche	Hagebuche	steh. Totholz	Stammzahl	Grundfläche
BHD	Durchschnitt											[m^2/ha]
[cm]	[cm]											
12	12	0	2	0	0	0	1	0	0	0	3	0.03
13-16	14.5	0	4	3	0	0	0	0	0	0	7	0.12
17-20	18.5	0	3	5	0	0	0	0	0	0	8	0.21
21-24	22.5	0	6	4	0	0	0	0	0	0	10	0.40
25-28	26.5	0	2	3	0	0	0	0	0	0	5	0.28
29-32	30.5	0	2	2	0	0	0	0	0	0	4	0.29
33-36	34.5	0	3	2	0	0	0	0	0	0	5	0.47
37-40	38.5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.23
44-44	45.5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0.33
45-48	46.5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.17
49-52	50.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
53-56	54.5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.23
57-60	58.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
61-64	62.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<65	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Stammzahl		0	26	21	0	0	1	0	0	0	48	
Grundfläche		0			0	0		0	0	0		2.76

Aufnahmefläche 2 „Goldau mitte“

Durchmesser	Baumart	Buche	Fichte	WFöhre	BAhorn	Tanne	Wildkirsche	Esche	Hagebuche	steh. Totholz	Stammzahl	Grundfläche
BHD	Durchschnitt											[m^2/ha]
[cm]	[cm]											
12	12	0	2	1	0	0	0	1	0	0	4	0.05
13-16	14.5	0	2	5	0	0	0	3	0	5	15	0.25
17-20	18.5	0	0	2	0	0	0	1	0	2	5	0.13
21-24	22.5	1	1	1	0	0	0	0	0	4	7	0.28
25-28	26.5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0.11
29-32	30.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	0.15
33-36	34.5	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0.19
37-40	38.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
44-44	45.5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.16
45-48	46.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
49-52	50.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
53-56	54.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
57-60	58.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
61-64	62.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<65	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Stammzahl		1	7	11	0	0	0	6	0	13	38	
Grundfläche		0			0	0		0	0	0		1.31

Aufnahmefläche 3 „Goldau oben“

Durchmesser	Baumart	Buche	Fichte	WFöhre	BAhorn	Tanne	Wildkirsche	Esche	Hagebuche	steh. Totholz	Stammzahl	Grundfläche
BHD	Durchschnitt											[m^2/ha]
[cm]	[cm]											
12	12	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.01
13-16	14.5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0.03
17-20	18.5	0	2	2	0	0	0	0	1	0	5	0.13
21-24	22.5	0	3	2	0	0	0	0	0	1	6	0.24
25-28	26.5	0	1	5	0	0	0	0	0	2	8	0.44
29-32	30.5	0	1	7	0	0	0	0	0	0	8	0.58
33-36	34.5	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0.28
37-40	38.5	0	1	2	0	0	0	0	0	0	3	0.35
44-44	45.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
45-48	46.5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.17
49-52	50.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
53-56	54.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
57-60	58.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
61-64	62.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<65	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Stammzahl		0	11	22	0	0	0	0	1	3	37	
Grundfläche		0			0	0		0	0	0		2.24

Aufnahmefläche 4 „Arth oben“

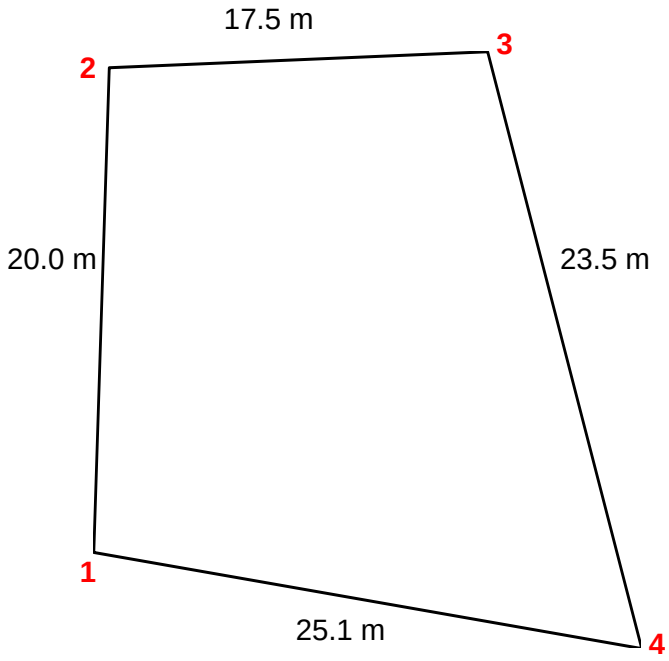
Durchmesser	Baumart	Buche	Fichte	WFöhre	BAhorn	Tanne	Stechpalme	Esche	Feldahorn	steh. Totholz	Stammzahl	Grundfläche
BHD	Durchschnitt											[m^2/ha]
[cm]	[cm]											
12	12	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0.03
13-16	14.5	2	5	0	1	2	2	0	0	0	12	0.20
17-20	18.5	1	0	0	1	4	0	0	0	0	6	0.16
21-24	22.5	2	1	0	0	2	0	0	0	0	5	0.20
25-28	26.5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0.11
29-32	30.5	1	0	0	1	2	0	0	1	0	5	0.37
33-36	34.5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.09
37-40	38.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
44-44	45.5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.16
45-48	46.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.17
49-52	50.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
53-56	54.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
57-60	58.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
61-64	62.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.31
<65	81	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.52
Stammzahl		9	6	0	4	13	2	2	2	0	38	
Grundfläche		0			0	0		0	0	0		2.31

Aufnahmefläche 5 „Arth unten“

Durchmesser	Baumart	Buche	Fichte	WFöhre	BAhorn	Tanne	Stechpalme	Esche	Feldahorn	steh. Totholz	Stammzahl	Grundfläche
BHD	Durchschnitt											[m^2/ha]
[cm]	[cm]											
12	12	1	0	0	1	5	0	0	0	0	7	0.08
13-16	14.5	1	1	0	0	2	0	1	0	0	5	0.08
17-20	18.5	4	0	0	1	3	0	0	0	0	8	0.21
21-24	22.5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.04
25-28	26.5	2	0	0	2	0	0	0	0	0	4	0.22
29-32	30.5	1	2	0	1	2	0	0	0	0	6	0.44
33-36	34.5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.28
37-40	38.5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.12
44-44	45.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
45-48	46.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.17
49-52	50.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.20
53-56	54.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
57-60	58.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
61-64	62.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
<65	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Stammzahl		14	4	0	5	13	0	1	0	0	37	
Grundfläche		0			0	0		0	0	0		1.84

Anhang 1.2 Planskizzen der Aufnahmeflächen

Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“



Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“

Lage im Gelände: Ausgehend vom Geschieberechen 39.5 m in Richtung 30° gelangt man zum Eckpunkt Nr. 1 (unten links) der Aufnahmefläche 1.

Flächeninhalt: ca. 456 m^2

Total aufgenommene Bäume: 48

Total Grundfläche: 2.76 m^2

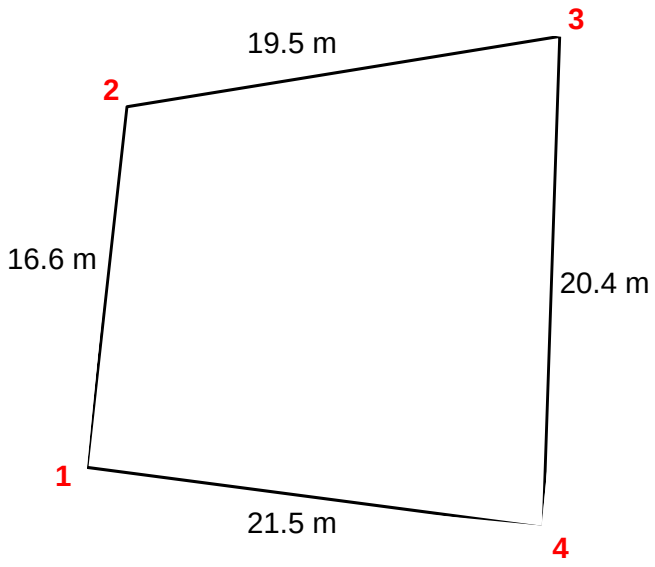
Grundfläche pro Hektare: 60.47 m^2

Stammzahl pro Hektare: 1053

Waldgesellschaft: *4.1 Fichten-Föhren-Block-Carex-Typ (Frey 2005)*

Besonderheiten: Viel Liguster, Brombeere und Himbeere in der Strauchschicht.

Aufnahmefläche 2 „Goldau mitte“



Aufnahmefläche 2 „Goldau mitte“

Lage im Gelände: Ausgehend vom Westende der „Brücke“, welche über das erste Bächlein im Murgangareal führt, 35 m Richtung 328°, führt zum unteren rechten Eckpunkt (Nr. 4) der Aufnahmefläche 2.

Flächeninhalt: ca. 378 m^2

Total aufgenommene Bäume: 38

Total Grundfläche: 1.31 m^2

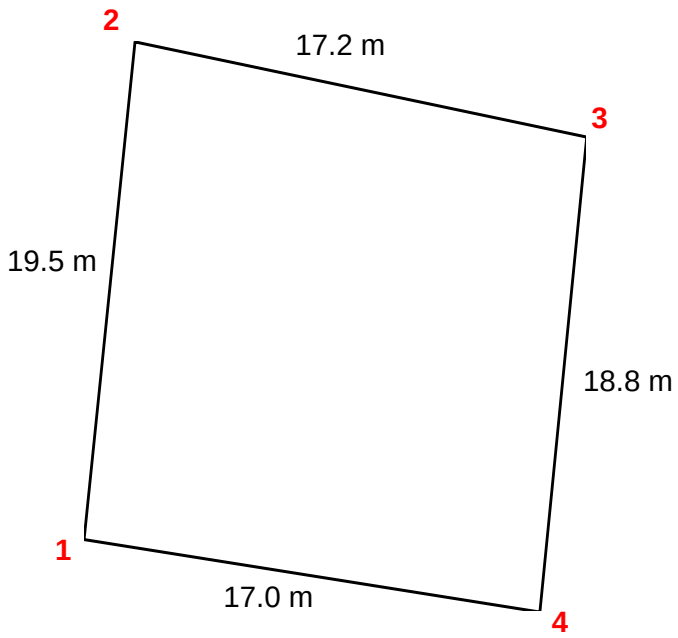
Stammzahl pro Hektare: 1005

Grundfläche pro Hektare: 34.58 m^2

Waldgesellschaft: *3.9 Föhren-Laubholz-Schilf-Feinerde-Typ (Frey 2005)*

Besonderheiten: Extrem viel stehendes Totholz. Herkunft: Murgang eher nein, Borkenkäfer, Schattenintoleranz?.

Aufnahmefläche 3 „Goldau oben“



Aufnahmefläche 3 „Goldau oben“

Lage im Gelände: Ausgehend massiven, unübersehbaren Felsblock, 7 m Richtung 295° führt zum rechten oberen Eckpunkt (Nr. 3) der Aufnahmefläche 3.

Flächeninhalt: ca. 328 m^2

Total aufgenommene Bäume: 37

Total Grundfläche: 2.24 m^2

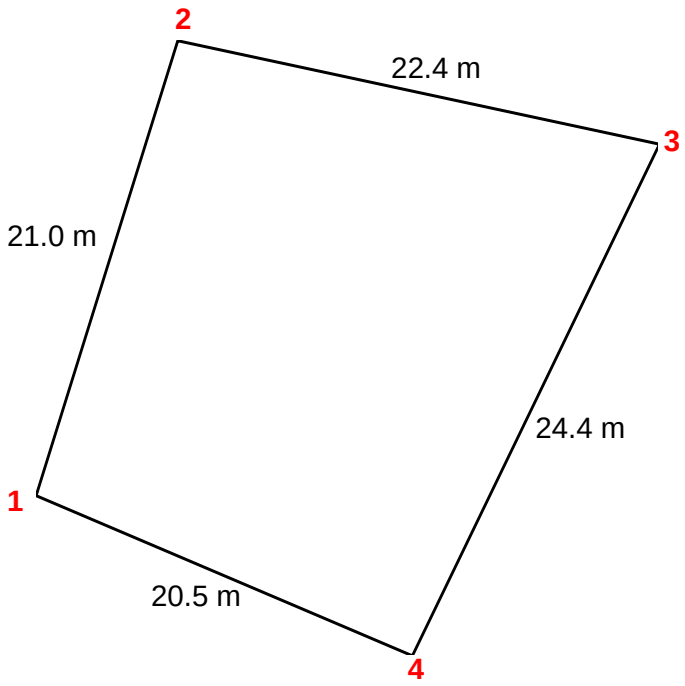
Grundfläche pro Hektare: 68.34 m^2

Stammzahl pro Hektare: 1128

Waldgesellschaft: *3.8 Gras-Feinerde-Föhrenwald (Frey 2005)*

Besonderheiten: Viele dicht stehende Fichten und Waldföhren, die meisten in Klasse „Stangenholz“ und „Baumholz 1“.

Aufnahmefläche 4 „Arth oben“



Aufnahmefläche 4 „Arth oben“

Lage im Gelände: Ausgehend wo der Weg auf der nördlichen Seite des Murgangbettes wieder in den Wald verläuft, ca. 5 m Richtung 230°, führt zum unteren rechten Eckpunkt (Nr. 4) der Aufnahmefläche.

Flächeninhalt: ca. 493 m^2

Total aufgenommene Bäume: 38

Total Grundfläche: 2.31 m^2

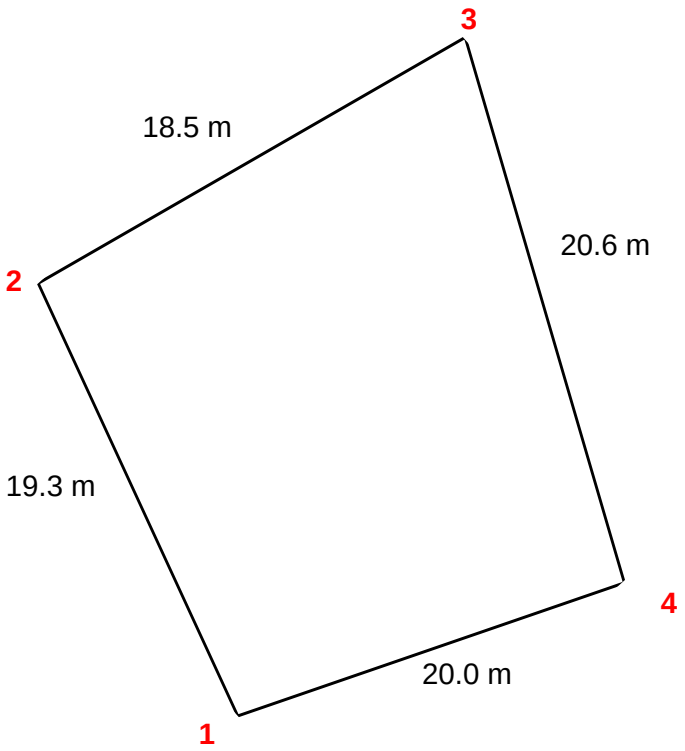
Grundfläche pro Hektare: 46.95 m^2

Stammzahl pro Hektare: 852

Waldgesellschaft: *18M, Typischer Karbonat-Tannen-Buchenwald (Ellenberg und Klötzli 1972)*

Besonderheiten: Viele Tannen, vor allem in Dickungs- und Stangenholzstufe. Einzelne Stechpalmen und Feldahorne.

Aufnahmefläche 5 „Arth unten“



Aufnahmefläche 5 „Arth unten“

Lage im Gelände: Ausgehend vom unteren Waldrand, wo der Murgang ins unbewaldete Gelände austritt, ca. 150 m dem Murgang bergwärts folgen. Anschliessend ungefähr 20 m in Richtung 135° laufen erreicht man den linken unteren Eckpunkt der Aufnahmefläche.

Flächeninhalt: ca. 384 m^2

Total aufgenommene Bäume: 37

Total Grundfläche: 1.84 m^2

Grundfläche pro Hektare: 47.96 m^2

Stammzahl pro Hektare: 964

Waldgesellschaft: *12a, Typischer Bingelkraut-/Zahnwurz-Buchenwald (Ellenberg und Klötzli 1972)*

Besonderheiten: Die allermeisten Bäume haben einen BHD im Stangenholz.

Anhang 1.3 Fotodokumentationen der Aufnahmeflächen

Aufnahmefläche 1 „Goldau unten“

Datum: 09. November 2010



Eckpunkt Nr. 1, flächeneinwärts



Eckpunkt Nr. 2, himmelwärts



Eckpunkt Nr. 2, flächeneinwärts

Aufnahmefläche 2 „Goldau mitte“

Datum: 09. November 2010

 Eckpunkt Nr. 1, flächeneinwärts	 Eckpunkt Nr. 4, flächeneinwärts

Aufnahmefläche 3 „Goldau oben“

Datum: 09. November 2010



Eckpunkt Nr. 3, flächeneinwärts



Eckpunkt Nr. 4, flächeneinwärts



Eckpunkt Nr. 2, flächeneinwärts

Aufnahmefläche 4 „Arth oben“

Datum: 09. November 2010

 Eckpunkt Nr. 4, flächeneinwärts	 Eckpunkt Nr. 1, flächeneinwärts

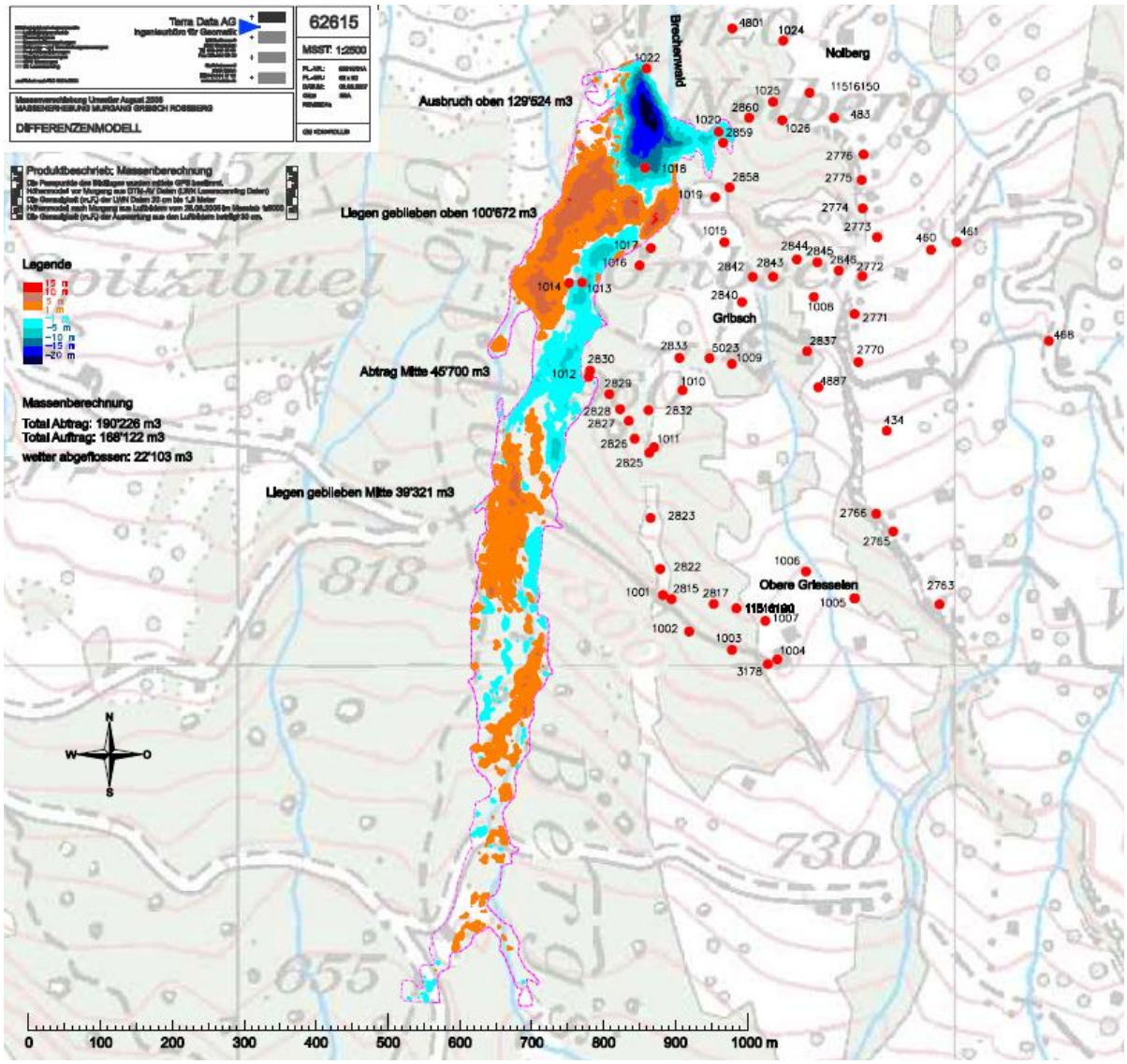
Aufnahmefläche 5 „Arth unten“

Datum: 09. November 2010

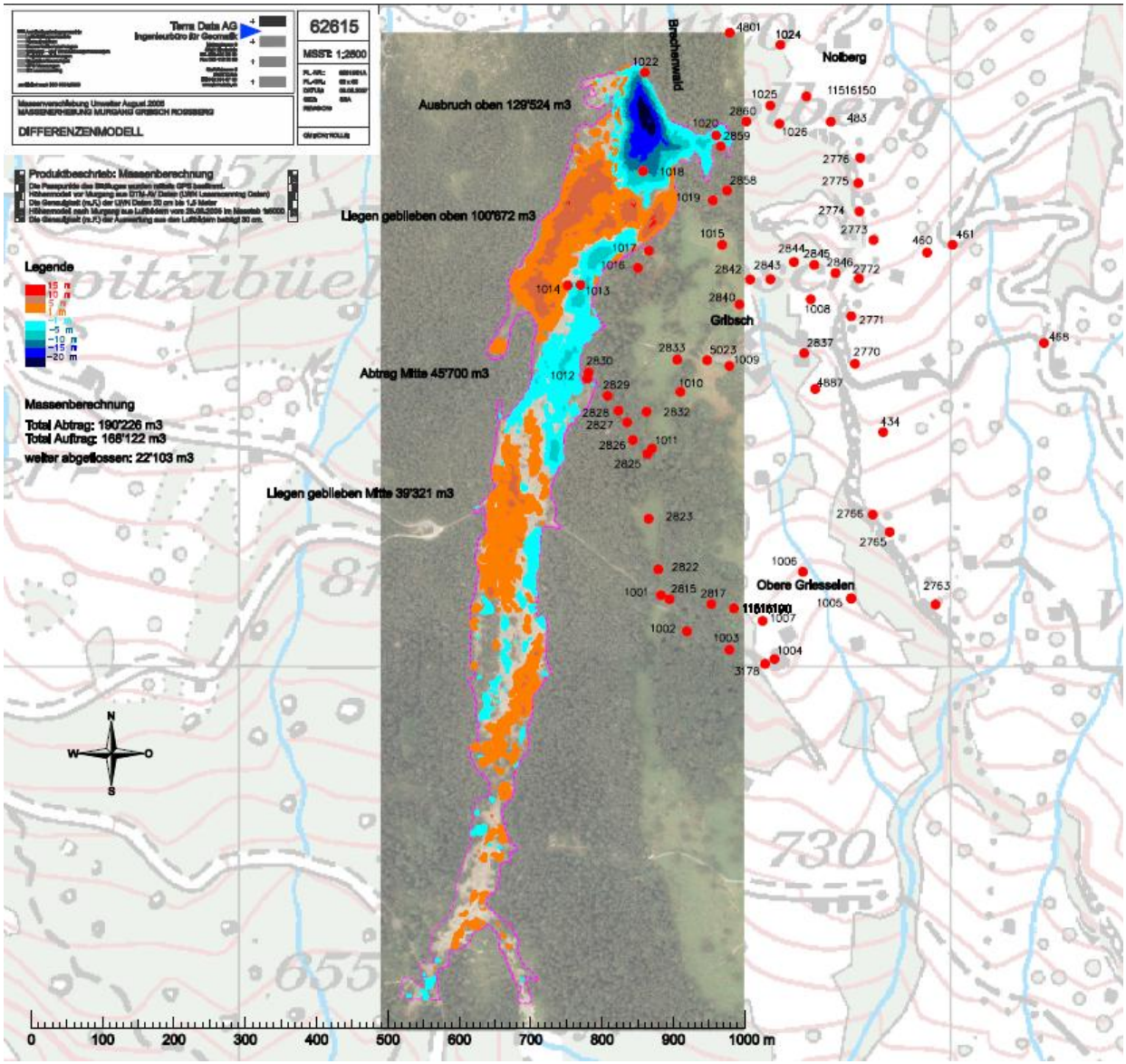
 Eckpunkt Nr. 1, flächeneinwärts	

Anhang 2 Pläne Terra Data AG

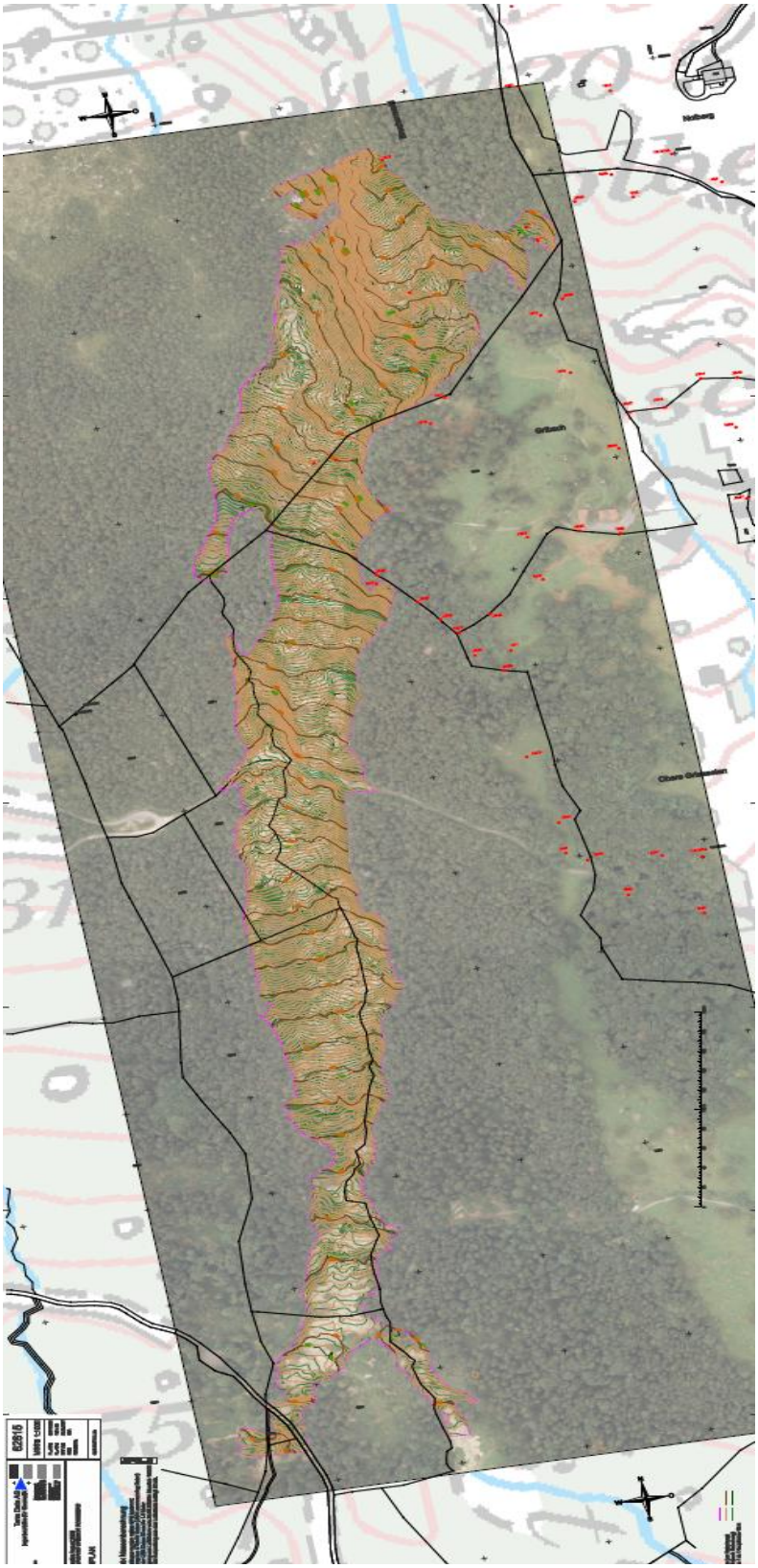
Anhang 2.1 Massenverschiebungsplan des Murgangs „Goldau“



Anhang 2.2 Massenverschiebungsplan des Murgangs „Goldau“ mit Orthophoto hinterlegt



Anhang 2.3 Höhenkurvenplan des Murgangs „Goldau“



Anhang 3 Relevante Datenblätter aus der Kartierung von Frey (2005)

Goldauer Bergsturz: Dokumentation der Stukturtypen

Typ: 3.8 Gras-Feinerde-Föhrenwald

Allgemeine Angaben:

Koordinaten: 685 173 / 213 673
Fläche: 20m Richtung: 365g
4m Richtung: 265g
Meereshöhe: 945m ü.M.
Hangneigung: 40%
Exposition: 170g
Aspekt: grasig
Schutt: Blöcke mit 1-2m Ø bedecken ca. 10% der Fläche. Die Blöcke sind ruhend und bemoost

Baumschicht:

Kronenschluss: Bl: 60%
Höhe mittel: Bl: 15-18m
Höhe maximal: -
Durchmesser auf 1.3m: Bl: 25-35cm

Pinus sylvestris	4

Strauchschicht:

Deckungsgrad: 5%
Höhe mittel: 1-2m
Höhe maximal: 4m

Fraxinus excelsior	+
Juniperus communis	1
Ligustrum vulgare	1
Lonicera xylosteum	+
Picea excelsa	1
Salix appendiculata	1
Sorbus aria	1
Viburnum lantana	1

Bodenvegetation:

Deckungsgrad Krautschicht: 85%
Höhe mittel: 30cm
Höhe maximal: 80cm
Deckungsgrad Bodenmoose: 35%

Acer pseudoplatanus	1
Brachypodium pinnatum	2+
Calamagrostis varia	3
Carex flacca	1
Carex montana	2-
Carex omithopoda	+
Cephalanthera longifolia	+
Cephalanthera rubra	+
Dactylorhiza maculata	+
Epipactis helleborine	1
Erica carnea	2-
Fraxinus excelsior	1
Galium cf mollugo	+
Goodyera repens	2m
Hieracium murorum	+
Ligustrum vulgare	+
Lonicera xylosteum	1
Molinia litoralis	2+
Picea excelsa	+
Platanthera sp	+
Polygala chamaebuxus	2+
Presanthes purpurea	r
Pyrola rotundifolia	2-
Quercus petrea	r
Rubus fruticosus	+
Solidago virgaurea	1
Succisa pratensis	+
Viburnum lantana	1

Bodenmoose:

Ctenidium molluscum	+
Eurhynchium striatum	1
Hylocomium splendens	2+
Hypnum cupressiforme	+
Pleurozium schreberi	1
Ptilium crist-castrensis	2-
Rhytidiadelphus triquetrus	1
Scleropodium purum	2-
Tortella tortuosa	+

Abbildungen:





Goldauer Bergsturz: Dokumentatioa der Stukturtypen

Typ: 3.9 Föhren-Laubholz-Schilf-Feinerde-Typ

Allgemeine Angaben:

Koordinaten: 685 185 / 213 025
Fläche: 20m Richtung: 002g
4m Richtung: 102g
Meereshöhe: 755m ü.M.
Hangneigung: 20%
Exposition: 200g
Aspekt: grasig
Schutt: keine Blöcke, kein Schutt

Baumschicht:

Kronenschluss: B1: 40% B2: 20%
Höhe mittel: B1: 10-15m B2: 5-10m
Höhe maximal: -
Durchmesser auf 1.3m: B1: 25-35cm

Pinus sylvestris B1	3
Pinus sylvestris B2	2+

Strauchschicht:

Deckungsgrad: 30%
Höhe mittel: 1-3m
Höhe maximal: -

Alnus incana	1
Fraxinus excelsior	+
Juglans regia	+
Juniperus communis	2+
Ligustrum vulgare	1
Picea excelsa	2-
Sorbus aria	2-
Viburnum lantana	1

Bodenvegetation:

Deckungsgrad Krautschicht: 90%
Höhe mittel: 50cm
Höhe maximal: 100cm
Deckungsgrad Bodenmoose: 10%

Acer pseudoplatanus	1
Alnus incana	+
Brachypodium pinnatum	2-
Calamagrostis varia	2-
Carex flacca	2m
Carex montana	2-
Epipactis helleborine	+
Equisetum maximum	2-
Erica carnea	2-
Frangula alnus	+
Fraxinus excelsior	2-
Gentiana asclepiadea	+
Goodyera repens	1
Hippocrepis comosa	+
Juniperus communis	1
Lathyrus pratensis	+
Ligustrum vulgare	1
Lotus corniculatus	+
Molinia litoralis	4
Phragmites communis	2-
Picea excelsa	+
Pluthantera sp	+
Polygala chamaebuxus	2-
Potentilla erecta	1
Quercus petrea	+
Sesleria caerulea	1
Sorbus aria	+
Succisa pratensis	1
Viburnum lantana	1

Bodenmoose:

Acrocladium cuspidatum	1
Eurhynchium striatum	2m
Hylocomium splendens	1
Rhytidiadelphus triquetrus	1
Scleropodium purum	2-
Tnuidium tamariscinum	1

Abbildungen:





Goldauer Bergsturz: Dokumentation der Stukturtypen

Typ: 4.1 Fichten-Föhren-Block-Carex-Typ

Allgemeine Angaben:

Koordinaten: 685 240 / 213 347
Fläche: 20m Richtung: 30g
4m Richtung: 330g
Meereshöhe: 870m ü.M.
Hangneigung: 30%
Exposition: 180g
Aspekt: blockig, moosig, stl. grasig
Schutt: Blöcke mit 3 m Ø bedekken ca. 80% der Fläche. Die Blöcke sind ruhend und bemoost

Baumschicht:

Kronenschluss: B1: 75% B2: 5%
Höhe mittel B1: 23m B2: 18m
Höhe maximal: 27m
Durchmesser auf 1.3m: B1: 25-45cm

Picea excelsa B1	4
Picea excelsa B1	1
Pinus sylvestris B1	2+

Strauchschicht:

Deckungsgrad: 10%
Höhe mittel: 1-3m
Höhe maximal: 5m

Acer pseudoplatanus	1
Crataegus monogyna	1
Fraxinus excelsior	1
Lonicera xylosteum	1
Picea excelsa	2-
Sorbus aria	1
Viburnum lantana	+

Bodenvegetation:

Deckungsgrad Krautschicht: 50%
Höhe mittel: 10cm
Höhe maximal: 20cm
Deckungsgrad Bodenmoose: 60%

Abies alba	+
Acer pseudoplatanus	1
Angelica sylvestris	+
Asplenium ruta muraria	+
Brachypodium pinnatum	2-
Calamagrostis varia	2+
Carduus defloratus	+
Carex flacca	2m
Carex montana	2+
Carex ornithopoda	1
Cephalanthera longifolia	+
Cephalanthera rubra	+
Corylus avellana	+
Epipactis helleborine	1
Erica carnea	2-
Fragaria vesca	+
Fraxinus excelsior	2m
Goodyera repens	2m
Hieracium murorum	2m
Hippocrepis comosa	+
Hypericum selago	1
Myosotis sparsiflora	+
Orthilia secunda	+
Picea excelsa	+
Polygala chamaebuxus	2+
Polypodium vulgare	+
Primanthes purpurea	+
Rubus fruticosus	+
Solidago virgaurea	1
Sorbus aucuparia	+
Valeriana tripteris	+
Viburnum lantana	1

Bodenmoose:

Ctenidium molluscum	3
Dicranum scoparium	1
Hylocomium splendens	1
Hypnum cupressiforme	2-
Isothecium myurum	1
Leucobryum glaucum	1
Mnium cuspidatum	1
Schreberia crispa	1
Thuidium tamariscinum	2m
Tortella tortuosa	1

Abbildungen:



