

Diplomarbeit

**[Inventur von flachgründigen Rutschungsprozessen und
Zusammenhänge zwischen spontanen Rutschungen und
Hangmuren]**

**Masterstudium Alpine Naturgefahren, Wildbach- und
Lawinenverbauung**

Sommersemester 2020



Universität für Bodenkultur Wien

vorgelegt von: Patrick Berner

Matrikelnummer: 01120235

Eingereicht bei: Johannes Hübl, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn.

Danksagung

Es ist an dieser Stelle angebracht, mich bei meinem Betreuer Dr. Johannes Hübl zu bedanken, welcher mich stets gut beraten hat und hilfsbereit zur Seite gestanden ist. Besonders bedanken möchte ich mich außerdem bei Christian Rickli von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL aus der Schweiz, welcher mir Daten zur Analyse zur Verfügung gestellt hat und immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Ein herzlicher Dank ergeht an meine Familie, welche mich nicht nur bei dieser Arbeit, sondern während meines gesamten Studiums immer unterstützt hat. Ohne diese Unterstützung wäre mein Studium und somit diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, im Juni 2020

Patrick Berner

Kurzfassung

Die Vorhersagemöglichkeiten für das Entstehen von flachgründigen Rutschungsprozessen, wo im Normalfall nur wenig Bodenmaterial verlagert wird, sind schwierig und herausfordernd. Flachgründige Rutschungsprozesse treten oft bei extremen Niederschlagsereignissen auf, weswegen der Zeitpunkt des Auftretens zwar nicht exakt, aber immerhin erahnt werden kann. Welche Hänge für flachgründige Rutschungsprozesse bei extremen Niederschlagsereignissen besonders gefährdet sind, ist komplex und deshalb besteht durch das sehr plötzliche und rasche Auftreten dieser Prozesse ein erhebliches Gefährdungspotential. Ein finales Ziel im Hinblick auf Forschungen im Bereich von flachgründigen Rutschungsprozessen wäre es Schwellenwerte und Schätzfunktionen aufzuzeigen, die ein besseres Vorhersagen dieser so plötzlich auftretenden Ereignisse ermöglichen, um damit das Risiko für den Menschen zu reduzieren. Diese Arbeit befasst sich mit flachgründigen Rutschungsprozessen, welche sich im Unwetterjahr 2005 vom 22.8 bis zum 23.8 in den Gemeinden Flühli, St. Antönien (Luzern) und Trub in der Schweiz ereigneten. Die in der Literatur verwendeten Begriffe wie flachgründige Rutschung, spontane Rutschung, flachgründige spontane Rutschung oder Hangmure sind oftmals unklar. In dieser Arbeit wurden diese Begriffe nach definierten Kriterien verwendet, wo flachgründige Rutschungen einen Oberbegriff für spontane Rutschungen und Hangmuren darstellen. Ziel dieser Arbeit ist einerseits eine Inventur und Datenauswertung von flachgründigen Rutschungen in diesen Gemeinden im Hinblick auf deren Rutschungsauslösung zu erarbeiten und andererseits eine Unterscheidung der flachgründigen Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure hinsichtlich des Einflusses verschiedener Parameter durchzuführen. Dabei war es notwendig eine geeignete Methodik zur Durchführung zu entwickeln. Hierbei konnte auf einen Datensatz der Eidgenössischen Forschungsanstalt (WSL) aus der Schweiz mit 758 flachgründigen Rutschungen zurückgegriffen werden. Da eine Vergleichbarkeit von bestimmten Parametern nur mit einem vollständigen Datensatz möglich war, musste dieser mit Hilfe definierter Kriterien komprimiert werden. Dieser Vorgang wurde so konzipiert, dass möglichst viele Rutschungsparameter beibehalten werden konnten. Dadurch konnte ein komprimierter vollständiger Datensatz mit 116 flachgründigen Rutschungen aus dem Unwetterjahr 2005 in den Gemeinden Flühli, St. Antönien (Luzern) und Trub aus der Schweiz entwickelt werden, mit dem verschiedenste statistische Analysen zur Vergleichbarkeit durchgeführt wurden. Zusätzlich stand ein unvollständiger Datensatz mit 758 flachgründigen Rutschungen zur Verfügung, welcher bei verschiedenen statistischen Analysen individuell aufbereitet wurde. Bei weiteren Untersuchungen wurden 116 flachgründige Rutschungen in

Institut für Alpine Naturgefahren, Sommersemester 2020

spontane Rutschungen und Hangmuren nach definierten Kriterien untergliedert. Dabei war das Ziel mögliche Unterschiede dieser sehr ähnlichen Prozessarten zu erforschen. Der Fokus aller Analysen wurde auf verschiedene Hang- und Rutschungsparameter gelegt. Die Ergebnisse zeigen etwa eine Häufung von flachgründigen Rutschungen im Freiland und höhere Neigungswerte im Wald auf. Außerdem ist das Volumen von flachgründigen Rutschungen im Wald deutlich höher als im Freiland. Die Geländeformen von flachgründigen Rutschungen bewegen sich mehrheitlich in Richtung eines geraden Längsprofils. In den Untersuchungsgebieten konnten größtenteils kleine flachgründige Rutschungen ($30 \text{ m}^3 - 230 \text{ m}^3$) festgestellt werden. Gegliedert in Prozessarten, sind spontane Rutschungen kürzer, aber dafür breiter als Hangmuren. Weitere Arbeiten sind notwendig, um dieses komplexe Thema noch besser zu verstehen und um zuverlässige Schätzfunktionen definieren zu können.

Abstract

Predicting the development of shallow landslides, where there is generally little ground material, is difficult and remains a challenge. Shallow landslides often occur after extreme precipitation events, which is why the timing of the event cannot be precisely predicted but can at least be estimated. Identifying which slopes are particularly susceptible to shallow landslides during extreme rainfall events is a complex process, which is why such a very sudden event is particularly dangerous. One of the goals of shallow landslide research is to identify threshold values which would allow a better prediction of such suddenly occurring events to reduce the risk to humans. This paper examines the shallow landslide processes which occurred in the severe weather year of 2005 from August 22nd until August 23rd in the communities Flühli, St. Antönien (Luzern), and Trub in Switzerland. The terminology used in the literature, such as shallow landslide, spontaneous landslide, shallow spontaneous landslide, or mud flow, are often not well defined. These terms were used according to defined criteria in this paper, where ‘shallow landslide’ is an overarching term for ‘spontaneous landslide’ and ‘mud flow’. The aim here was, on the one hand, to inventory shallow landslides in these communities regarding their trigger. On the other hand, this paper aims to differentiate the shallow landslide processes (shallow landslide and mud flow) in terms of the influence of different parameters. This required developing a suitable methodology. A dataset of the Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research (WSL) was used and contained 758 shallow landslide events. Since it was only possible to compare specific parameters with a complete dataset, the available dataset had to be condensed with defined criteria. This process was designed such that as many landslide parameters as possible could be retained. This resulted in a condensed and complete dataset with 116 shallow landslides from the severe weather year 2005 in the communities Flühli, St. Antönien (Luzern), and Trub in Switzerland. This dataset was used for different statistical comparative analyses. In addition, an incomplete dataset with 758 shallow landslides was available which was prepared separately for different statistical analyses. In additional analyses, 116 shallow landslides were identified as either spontaneous landslides or mud flows based on the defined criteria. The goal here was to identify possible differences between these very similar processes. The focus of all analyses was placed on different slope and landslide parameters. The results show an increased frequency of shallow landslides in open areas and steeper slope values in forests. In addition, the volumes of shallow landslides in forests were found to be much higher than in open areas. The terrain types of shallow landslides mostly exhibited a straight profile. Small shallow landslides (30 m³ – 230 m³)

could, for the most part, be identified in the examined communities. When organised into process types, spontaneous landslides were shorter, but wider than mud flows. Further research is necessary to better understand this complex topic and to define reliable estimation functions.

	VII
Inhaltsverzeichnis	
Danksagung	I
Eidesstattliche Erklärung	II
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Fragestellungen	1
1.3 Ziel und Ablauf der Arbeit	2
2 Geologische Grundlagen	3
2.1 Bildung von Gesteinen	3
2.1.1 Magmatische Gesteine	3
2.1.2 Sedimentgesteine	3
2.1.3 Metamorphe Gesteine	4
2.2 Bedeutung fels- und bodenmechanischer Eigenschaften	4
3 Massenbewegungen	5
3.1 Entstehung von Massenbewegungen	5
3.2 Kinematische Grundtypen von Massenbewegungen	6
3.2.1 Fallen, Stürzen	6
3.2.2 Gleiten	7
3.2.3 Kippen	8
3.2.4 Fließen	10
3.2.5 Driften	11
3.3 Unterteilung der kinematischen Grundtypen in Geschwindigkeitsklassen sowie deren Zerstörungspotential	13

	VIII
4 Rutschungen	14
4.1 <i>Erklärung verschiedener Rutschungsprozesse</i>	14
4.2 <i>Ursachen für die Entstehung von Rutschungen</i>	14
4.2.1 Geologische Voraussetzungen für Rutschungen	14
4.2.2 Bedeutung des Wassers bei Rutschungen	15
4.2.3 Änderungen in Höhe und Neigung eines Hanges	16
4.2.4 Rolle der Vegetation und anthropogene Beeinflussung	16
4.3 <i>Einteilung der Rutschungen</i>	17
4.4 <i>Die Form der Gleitfläche als Klassifikation</i>	18
4.5 <i>Besonderheiten von Rutschungen</i>	19
4.6 <i>Schutz vor Hangbewegungen</i>	20
4.6.1 Stabilisierung und Sicherung	20
4.6.2 Abgrenzung kritischer Gebiete	20
4.7 <i>Schadensvermeidung</i>	21
4.7.1 Gefährdung und Vorwarnzeiten	21
4.7.2 Warnung und Verbote	22
4.7.3 Monitoring	22
4.8 <i>Schutzmaßnahmen</i>	23
4.8.1 Stabilisierung	23
4.8.1.1 Drainage	23
4.8.1.2 Anpassung des Böschungsprofils an die geologischen Gegebenheiten	24
4.8.1.3 Reliefanpassung	24
4.8.1.4 Konstruktive Maßnahmen	24
5 Untersuchung flachgründiger Rutschungen	26
5.1 <i>Vorgehensweise</i>	26
5.2 <i>Ereignisdokumentation</i>	26
5.3 <i>Verwendete Begriffe in der Ereignisdokumentation</i>	27
6 Datenanalyse	28
6.1 <i>Komprimierter Datensatz</i>	28
6.2 <i>Überblick der Datensätze</i>	30
6.3 <i>Parameter des Datensatzes</i>	30

6.4	<i>Gliederung der Analyse</i>	IX 32
6.5	<i>Überblick über die drei Untersuchungsgemeinden</i>	34
6.5.1	<i>Flühli</i>	34
6.5.2	<i>Trub</i>	37
6.5.3	<i>St. Antönien</i>	39
6.6	<i>Starkniederschlagsereignis im August 2005 in der Schweiz</i>	41
6.7	<i>Überblick über die Abmessungen der flachgründigen Rutschungen</i>	42
7	Analyse Teil 1	43
7.1	<i>Neigung des Hanges (Rutschfläche)</i>	43
7.2	<i>Höhenlage und Exposition</i>	45
7.3	<i>Morphologietyp</i>	47
7.4	<i>Abmessungen der flachgründigen Rutschungen</i>	48
7.5	<i>Vegetationsart</i>	52
7.6	<i>Hydrologie</i>	53
7.7	<i>Hydrogeologische Verhältnisse</i>	55
7.8	<i>Anzeichen alter Rutschbewegungen</i>	56
7.9	<i>Bodenentwicklung</i>	57
7.10	<i>Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes</i>	57
7.11	<i>Makroporenarten</i>	58
7.12	<i>Lockergestein</i>	59
7.13	<i>Festgestein</i>	61
7.14	<i>Ort der Gleitfläche und Mechanismus</i>	62
7.15	<i>Auslaufstrecke</i>	64
8	Analyse Teil 2	69
8.1	<i>Anzahl der spontanen Rutschungen und Hangmuren in den Gemeinden</i>	69
8.2	<i>Neigung des Hanges (Rutschfläche)</i>	70
8.3	<i>Höhenlage und Exposition</i>	70
8.4	<i>Morphologietyp</i>	71
8.5	<i>Abmessungen der spontanen Rutschungen und Hangmuren</i>	71

8.6	<i>Vegetationsart</i>	X 73
8.7	<i>Hydrologie</i>	74
8.8	<i>Hydrogeologische Verhältnisse</i>	75
8.9	<i>Anzeichen alter Rutschbewegungen</i>	76
8.10	<i>Bodenentwicklung</i>	77
8.11	<i>Festgestein</i>	77
8.12	<i>Ort der Gleitfläche und Mechanismus</i>	78
8.13	<i>Auslaufstrecke</i>	79
9	Ergebnisse und Diskussion	85
9.1	<i>Anzahl der Rutschungen</i>	85
9.2	<i>Neigung eines Hanges (Rutschfläche)</i>	85
9.3	<i>Höhenlage und Exposition</i>	86
9.4	<i>Morphologietyp</i>	87
9.5	<i>Abmessungen der flachgründigen Rutschungen</i>	87
9.6	<i>Vegetationsart</i>	89
9.7	<i>Hydrologie</i>	89
9.8	<i>Hydrogeologie</i>	90
9.9	<i>Anzeichen alter Rutschbewegungen</i>	90
9.10	<i>Bodenentwicklung</i>	91
9.11	<i>Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes, Makroporenarten und Lockergestein</i>	91
9.12	<i>Festgestein</i>	93
9.13	<i>Ort der Gleitfläche und Mechanismus</i>	93
9.14	<i>Auslaufstrecke</i>	94
10	Zusammenfassung	98
	Literaturverzeichnis	XV
	Anhang	XVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des kinematischen Grundtyps Stürzen (Zangerl et al. 2008:13).....	7
Abbildung 2: Darstellung von verschiedenen Arten des Gleitens. Ergänzt nach Hudson & Harrison 1997. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:14).....	8
Abbildung 3: Rotation von Gesteinsblöcken auf einer potentiell basalen Abscherfläche (Zangerl et al. 2008:13).....	9
Abbildung 4: Kippender Block mit Änderung der Geschwindigkeitsvektoren und des Einfallswinkels aufgrund plastischer Deformation. (Zangerl et al. 2008:13).....	9
Abbildung 5: Übersichtliche Abbildung mit Fließen im Festgestein und Fließen im Lockergestein. (Zangerl et al. 2008:16).....	11
Abbildung 6: Veranschaulichung des Prozesses Driften mit kompetenten Felskörper auf inkompetenter Unterlage und der Entstehung von Zugrissen sowie der Auffüllung von Spalten mit Blockschutt. (Zangerl et al. 2008:17).....	12
Abbildung 7: Einteilung der Massenbewegungen in Geschwindigkeitsklassen nach Cruden & Varnes (1996) (zitiert nach Zangerl et al. 2008:18).....	13
Abbildung 8: Darstellung einer Translationsrutschung (oben) und einer Rotationsrutschung (unten) (Highland et al. 2008:11ff).....	19
Abbildung 9: Bewegungsverhalten von Rutschungen (räumlich – zeitlich) (Bollinger et al. 2008:2)	20
Abbildung 10: Beurteilungsräume der erfassten Daten (WSL/BAFU/AGN 2018:6).....	31
Abbildung 11: Übersichtskarte der Gemeinden in der Schweiz (eigene Darstellung).....	34
Abbildung 12: Flachgründige Rutschungen (rote Punktobjekte) im nördlichen Teil der Gemeinde Flühli (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 13: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) im Norden der Gemeinde Flühli (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 14: Flachgründige Rutschungen (rote Punktobjekte) in der Gemeinde Trub (eigene Darstellung).....	37
Abbildung 15: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) in der Gemeinde Trub (eigene Darstellung).....	38
Abbildung 16: Flachgründige Rutschungen (rote Punktobjekte) in der Gemeinde St. Antönien (eigene Darstellung).....	39
Abbildung 17: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) in der Gemeinde St. Antönien (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 18: Überblick über die verschiedenen Abmessungen einer flachgründigen Rutschung (WSL/BAFU/AGN 2018:4).....	42
Abbildung 19: Kastendiagramm der Neigungen (in Grad) in den Gemeinden (N=116).....	43
Abbildung 20: Diagramm mit Neigungsklassen (in Grad) aller flachgründigen Rutschungen (N=739).....	43

Abbildung 21: Anzahl flachgründige Rutschungen je Höhenlage (m) in den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub des komprimierten Datensatzes (N=116).....	45
Abbildung 22: Überblick über die verschiedenen Geländeformen (WSL/BAFU/AGN 2018:7).....	47
Abbildung 23: Anzahl der flachgründigen Rutschungen je Volumenklasse (m ³) in Flühli (N=42).....	50
Abbildung 24: Streudiagramm mit Volumen und Neigung (N=116).....	51
Abbildung 25: Streudiagramm mit Volumen und Neigung (N=684).....	51
Abbildung 26: Diagramm mit der Vegetationsart und der Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes (N=479).....	58
Abbildung 27: Anzahl der Auslaufstrecken (m) je definierter Klasse (N=116).....	65
Abbildung 28: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung (N=116).....	66
Abbildung 29: Streudiagramm mit Pauschalgefälle und Neigung (N=302)	66
Abbildung 30: Menge d. Wasserführung u. Auslaufstrecke (N=116).....	67
Abbildung 31: Hauptlithologie und Auslaufstrecke (N=116).....	67
Abbildung 32: Mechanismus und Auslaufstrecke (N=116).....	67
Abbildung 33: Lockergesteinskl. und Auslaufstrecke (N=245)	67
Abbildung 34: Kastendiagramm mit Prozessart und Neigung (N=116)	70
Abbildung 35: Diagramm mit Volumenklassen und deren Anzahl bei Hangmuren (N=73)	72
Abbildung 36: Diagramm mit Volumenklassen und deren Anzahl bei spontanen Rutschungen (N=43)	72
Abbildung 37: Hauptlithologie und Neigung bei Hangmuren (N=73).....	77
Abbildung 38: Hauptlithologie und Neigung bei spontanen Rutschungen (N=43).....	77
Abbildung 39: Diagramm mit Auslaufstreckenklassen und deren Anzahl bei spontanen Rutschungen (N=43).....	79
Abbildung 40: Diagramm mit Auslaufstreckenklassen und deren Anzahl bei Hangmuren (N=73)....	79
Abbildung 41: Diagramm mit Menge der Wasserführung und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73)	81
Abbildung 42: Diagramm mit Menge der Wasserführung und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43)	81
Abbildung 43: Diagramm mit Mechanismus und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73).....	82
Abbildung 44: Diagramm mit Mechanismus und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43)	82
Abbildung 45: Diagramm mit Hauptlithologie und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73)	83
Abbildung 46: Diagramm mit Hauptlithologie und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43).....	83
Abbildung 47: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung bei Hangmuren (N=73).....	84
Abbildung 48: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung bei spontanen Rutschungen (N=43)84	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Tabelle mit der Anzahl von flachgründigen Rutschungen der jeweiligen Gemeinde des nicht komprimierten Datensatzes (N=758)</i>	28
Tabelle 2: <i>Tabelle mit Anzahl von flachgründigen Rutschungen in den Gemeinden Flühli, St. Antonien und Trub (N=116)</i>	30
Tabelle 3: <i>Gemessene Niederschlagsmengen vom 18. bis 24.08.2005; Tagessummen 0540 – 0540 Uhr UTC Folgetag in mm. Quelle: MeteoSchweiz. IANETZ-Station, 2Tagessammler.</i>	41
Tabelle 4: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Hangneigung (in Grad) in den Gemeinden (N=116)</i>	44
Tabelle 5: <i>Tabelle mit Exposition (in Grad) und Anzahl an flachgründigen Rutschungen (N=692)... ..</i>	45
Tabelle 6: <i>Tabelle mit Anzahl der flachgr. Rutschungen in den Gemeinden (N=116)</i>	48
Tabelle 7: <i>Tabelle mit Anzahl der flachgr. Rutschungen (N=726)</i>	48
Tabelle 8: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Längen, Breiten, Anrissflächen, Anrissmächtigkeiten und Volumen des komprimierten Datensatzes (N=116).....</i>	49
Tabelle 9: <i>Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen je Vegetationsart in den Gemeinden (N=116).....</i>	52
Tabelle 10: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Neigung (Grad) nach Vegetationsart und Gemeinde (N=116).....</i>	52
Tabelle 11: <i>Tabelle der statistischen Werte von Vegetationsart und Volumen (m³) in den unterschiedlichen Gemeinden (N=116)</i>	53
Tabelle 12: <i>Tabelle mit den Parametern Hydrologie Einzugsgebiet und Hydrologie Standort mit Unterteilung der Vorkommen in Vegetationsart und in Gemeinden (N=116)</i>	54
Tabelle 13: <i>Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen mit vier aufsteigenden Bereichen des Parameters Wasserführung im Untergrund (N=116).....</i>	55
Tabelle 14: <i>Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen mit Anzeichen alter Rutschbewegungen in Aufgliederung in Vegetationsart und in Gemeinde (N=116)</i>	56
Tabelle 15: <i>Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen in den unterschiedlichen Entwicklungsarten der Böden je Vegetationstyp und Gemeinde (N=116).....</i>	57
Tabelle 16: <i>Tabelle mit den statistischen Werten der Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes (cm) der jeweiligen Vegetationsart (N=479).....</i>	58
Tabelle 17: <i>Tabelle mit Anzahl der Makroporenarten und deren Anzahl in Freiland oder Wald (N=502).....</i>	59
Tabelle 18: <i>Tabelle der festgestellten Lockergesteinsklassen (USCS Klassen) und deren Anzahl (N=530).....</i>	60
Tabelle 19: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Lockergesteinsklassen und Neigung (in Grad) (N=530).....</i>	61
Tabelle 20: <i>Tabelle mit statistischen Werten des Festgesteins und der Neigung (in Grad) der jeweiligen Gemeinde (N=116)</i>	61

Tabelle 21: <i>Tabelle mit Mechanismus und Ort der Gleitfläche je Vegetationsart in den verschiedenen Gemeinden (N=116)</i>	63
Tabelle 22: <i>Tabelle mit den statistischen Werten der Auslaufstrecken (in m) je Vegetationsart der drei Gemeinden (N=116)</i>	65
Tabelle 23: <i>Tabelle mit Gemeinden und der Anzahl an spontanen Rutschungen und Hangmuren (N=116)</i>	69
Tabelle 24: <i>Tabelle mit den statistischen Werten des Parameters Höhenlage (m) je Prozessart (N=116)</i>	70
Tabelle 25: <i>Tabelle mit den Prozessarten und deren Anzahl in der jeweiligen Exposition (N=116)</i> ..	71
Tabelle 26: <i>Tabelle mit der Anzahl der unterschiedlichen Morphologietypen je Prozessart (N=116)</i>	71
Tabelle 27: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Prozessarten mit Länge, Breite, Anrissfläche, Anrissmächtigkeit und Volumen (N=116)</i>	72
Tabelle 28: <i>Tabelle mit den Vegetationsarten je Prozessart (N=116)</i>	73
Tabelle 29: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Neigung (°) der jeweiligen Prozessart untergliedert in Vegetationsarten</i>	74
Tabelle 30: <i>Tabelle mit statistischen Werten des Volumens (m³) der jeweiligen Prozessarten unterteilt in Vegetationsart (N=116)</i>	74
Tabelle 31: <i>Tabelle mit den Parametern Hydrologie Einzugsgebiet und Hydrologie Standort je Prozessart und Vegetationsart (N=116)</i>	75
Tabelle 32: <i>Tabelle mit der Wasserführung in der Rutschung unterteilt in Prozessarten (N=116)</i>	76
Tabelle 33: <i>Tabelle mit Prozessart je Vegetationsart mit der Untergliederung in Anzeichen alter Rutschbewegungen (N=116)</i>	76
Tabelle 34: <i>Tabelle mit der Anzahl an Bodenentwicklungstypen je Prozessart und Vegetationstyp (N=116)</i>	77
Tabelle 35: <i>Tabelle mit Prozessart, Mechanismus und Ort der Gleitfläche je Vegetationstyp (N=116)</i>	79
Tabelle 36: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Auslaufstrecke (m) je Prozessart (N=116)</i>	80
Tabelle 37: <i>Tabelle mit statistischen Werten der Auslaufstrecke (m) je Prozessart und Vegetationsart (N=116)</i>	80

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Anregung zu der vorliegenden Arbeit und das zunehmende Interesse an Rutschungen geht auf die Universitätslehrveranstaltung „Gefahren durch Massenbewegungen – Rutschungen“ zurück, welche ich im Wintersemester 2018/2019 besuchte. Diese Lehrveranstaltung blieb mir in sehr positiver Erinnerung und veranlasste mich, mich immer mehr mit dem Thema Rutschungen zu beschäftigen. Durch das Lesen verschiedenster fachbezogener Literatur lernte ich diese interessante Thematik immer besser kennen und demzufolge war es für mich wichtig, eine Abschlussarbeit in diesem Themengebiet zu verfassen und mich im Detail mit verschiedenen Problemstellungen auseinanderzusetzen.

1.2 Fragestellungen

Die Schweiz war im August des Jahres 2005 von einem Hochwasser betroffen, welches aus wirtschaftlicher Sicht, das Naturereignis mit den größten verursachten Schäden der letzten 100 Jahre war. Große Teile der Alpennordseite waren von Hochwasser stark betroffen und forderte sechs Tote sowie Schäden in einem Ausmaß von etwa drei Milliarden Schweizer Franken. (Bara 2011:77)

Im Zeitraum vom 19. bis zum 23. August 2005 ereigneten sich heftige Starkniederschläge. Dabei kam es in den Voralpen und im nördlichen Schweizer Alpenraum zu einer Vielzahl von Hanginstabilitäten. Teilweise in Form von volumenmäßig größeren Rutschungen, aber mehrheitlich in Form von volumenmäßig kleineren flachgründigen Rutschungen. (Bollinger et al. 2009:135)

In dieser Arbeit sollen flachgründigen Rutschungen aus den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub aus Schweiz im Hinblick auf verschiedene Rutschungsparameter statistisch analysiert werden. Außerdem sollen Unterschiede und Zusammenhänge der Prozessarten spontane Rutschungen und Hangmuren erforscht werden.

In dieser Diplomarbeit sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Rutschungsparameter führen zu einer erhöhten Aktivität und zu einem vermehrten Aufkommen von flachgründigen Rutschungsprozessen?
- Welchen Einfluss hat der Wald auf das Vorkommen flachgründiger Rutschungsprozesse?

- Welche Auslaufstreckenlängen sind bei flachgründigen Rutschungsprozessen zu erwarten?
- Welche Rolle spielen Anzeichen alter Rutschbewegungen in Form von morphologischen Merkmalen bei flachgründigen Rutschungsprozessen?
- Welche Zusammenhänge und Unterschiede können zwischen den flachgründigen Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure bezüglich ihrer Rutschungsparameter festgestellt werden?

1.3 Ziel und Ablauf der Arbeit

Das primäre Ziel dieser Diplomarbeit ist einen weiteren Beitrag zum besseren Verständnis von flachgründigen Rutschungsprozessen zu leisten. Die in der Literatur oft nicht einheitliche Verwendung der Begriffe flachgründige Rutschung, spontane Rutschung, flachgründige spontane Rutschung oder Hangmure soll in dieser Diplomarbeit mit Klarheit verwendet werden. Der Begriff flachgründige Rutschungen wird in dieser Arbeit als Oberbegriff für spontane Rutschungen und Hangmuren verwendet. Demnach sind spontane Rutschungen und Hangmuren, welche in dieser Diplomarbeit analysiert wurden, flachgründige Rutschungsprozesse. Außerdem soll diese Diplomarbeit einen Beitrag zur Information und zur Bewusstseinsbildung von flachgründigen Rutschungen leisten.

Im allgemeinen Teil sollen mithilfe einer Literaturrecherche wichtige Grundlagen verdeutlicht werden, um ein besseres Prozessverständnis für Massenbewegungen, Rutschungen und schließlich flachgründige Rutschungen zu erlangen. Der praktische Teil ist in zwei Analyseteile gegliedert. Im Analyseteil 1 wurden wichtige Rutschungsparameter von 116 flachgründigen Rutschungen eines konsistenten Datensatzes nach definierten Kriterien statistisch analysiert. Sofern nötig und möglich, wurden weitere Parameter und Eintragungen des von der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL aus der Schweiz zur Verfügung gestellten, unvollständigen und nicht komprimierten Datensatzes mit 758 flachgründigen Rutschungen individuell aufbereitet und damit ergänzende Zusammenhänge erforscht. Im Analyseteil 2 wurden 116 flachgründige Rutschungen in die Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure nach definierten Kriterien unterteilt und statistisch analysiert. Danach wurden die Ergebnisse diskutiert und abschließend die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

2 Geologische Grundlagen

Der Erdkörper kennzeichnet sich durch einen schalenförmigen Aufbau. Hierbei ist für naturgefahrenrelevante und geotechnische Fragestellungen vor allem die äußere, dünne Schicht von Bedeutung. Diese wird als Erdkruste bezeichnet. Die Erdkruste ist in eine Granitschicht und in eine tiefere Basaltschicht unterteilt. (Kempfert et al. 2007:19)

2.1 Bildung von Gesteinen

Man unterscheidet bei der Entstehung von Gesteinen drei große Gruppen. Diese sind metamorphe Gesteine, magmatische Gesteine und Sedimente. (Kempfert et al. 2007:22)

2.1.1 Magmatische Gesteine

Diese Gesteine entstehen durch eine Gesteinsschmelze im Bereich der unteren Erdkruste. Dieser Bereich liegt etwa in 100 – 120 km Tiefe. Diese Gesteinsschmelze kann an Schwachstellen der Erdoberfläche austreten oder kommt gar nicht bis zur Erdoberfläche, was häufiger vorkommt. (Kempfert et al. 2007:22)

Man unterteilt magmatische Gesteine in folgende Gruppen nach Kempfert et al. (2007:22):

-Ganggesteine: das Magma erstarrt in Spalten der Erdkruste, es kann auch bis zur Erdoberfläche reichen;

-Ergussgesteine: beispielsweise Vulkanite, das Magma erstarrt schnell an der Erdoberfläche;

-Tiefengesteine: beispielsweise Plutonite, das Magma erstarrt langsam in der Erdkruste;

2.1.2 Sedimentgesteine

Gesteine an der Erdoberfläche sind ständiger Erosion ausgesetzt. Zum Beispiel durch Frost, Wasser, Wind, Organismen und Sonneneinstrahlung. Bei der chemischen Verwitterung wird im Gegensatz zur physikalischen Verwitterung die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine verändert. Physikalische Verwitterung ist etwa Gesteinssprengung durch Wurzeldruck von Pflanzen sowie Frostsprengung. Die Umsetzung von Anhydrit in Gips kann als Beispiel für die chemische Verwitterung betrachtet werden. Diese Verwitterungsprodukte werden durch Wasser, Wind, Meeresströmungen und Gletscher transportiert und abgelagert.

Während des Sedimenttransportes kann es zu weiterer Erosion kommen, beispielsweise durch Schleifprozesse beim Transport mit Wasser. (Kempfert et al. 2007:22)

Man unterteilt Sedimente in klastische, organogene und chemische Sedimente. Klastische Sedimente sind im Wesentlichen Lockergesteine. Diese werden entsprechend ihrer Korngröße in Tone, Schluffe, Sande, Kiese und Steine unterteilt. Danach, nach einer stattfindenden Verfestigung der Sedimente, können diese in Brekzien und Konglomerate gegliedert werden. Beispiele für klastische Sedimentgesteine sind Tonstein, Sandstein und Tuff. Chemische Sedimente werden durch Ausfällungsprodukte von Mineralen aus Wasser gebildet. Chemische Sedimentgesteine sind etwa Kalkstein, Gips, Dolomit und Steinsalz. Organische Sedimente bilden sich aus tierischen und pflanzlichen Überresten. Organogene Sedimentgesteine sind Braunkohle, Torf, Steinkohle, Erdgas, Erdöl, Rifffalke und Schillkalke. (Kempfert et al. 2007:23)

2.1.3 Metamorphe Gesteine

Diese Gesteine entstehen durch Temperatur- und Druckerhöhung, aufgrund von gebirgsbildenden Prozessen. Sie werden auch als Umwandlungsgesteine bezeichnet. Zu diesen gehören Kontaktmetamorphite und Regionalmetamorphite. Regionalmetamorphite sind beispielsweise Gneis und Phyllit. Kontaktmetamorphit ist zum Beispiel Hornfels.

(Kempfert et al. 2007:22f)

2.2 Bedeutung fels- und bodenmechanischer Eigenschaften

Grundsätzlich unterscheidet man Lockergestein und Festgestein. Es treten jedoch, aufgrund von immer wieder stattfindenden Verfestigungs- und Verwitterungsprozessen, eine Vielzahl von Kombinationen und Übergängen auf. Der Begriff „Boden“ bezeichnet alle lockergesteinsartig verwitterten Festgesteine sowie alle Lockergesteine. (Prinz et al. 2011:7)

Bei Festgesteinen bedarf es einer Differenzierung von Fels bzw. Gebirge und Gestein. Ein Gestein als einzelner Klufkörper ist in Bezug auf dessen Eigenschaften nicht mit einem Fels in einem Gebirgsverband zu vergleichen. Fels ist gekennzeichnet durch Inhomogenität und Richtungsabhängigkeit und besteht aus Trennflächenstrukturen. (Prinz et al. 2011:7)

3 Massenbewegungen

Massenbewegungen können schnell und abrupt oder schleichend und langsam stattfinden. Abrupte Massenbewegungen können beispielsweise spontane Rutschungen, Hangmuren, Einsturzphänomene, Steinschlag, Felssturz oder Bergsturz sein. Zu langsamen Massenbewegungen zählen etwa Prozesse wie kontinuierliche Rutschungen oder Hangkriechen. Egal ob schnell oder langsam, Massenbewegungen sind in ihrem Entstehen kompliziert und eine Vielzahl von Faktoren und Parametern spielen eine Rolle. Massenbewegungen sind also bruchlose bzw. bruchhafte, hangabwärts stattfindende Verlagerungen von Locker- oder Festgestein. Dabei ist der Einfluss der Schwerkraft von wesentlicher Bedeutung. (BRP et al. 1997:7)

3.1 Entstehung von Massenbewegungen

Massenbewegungen kennzeichnen sich in ihrer Entstehung und Entwicklung durch eine hohe Komplexität. Faktoren, wie etwa Geologie, Exposition und Relief spielen eine große Rolle. Schon beim Entstehen eines Gesteins wird die Disposition zu einer Instabilität, wenn sich dessen physikalische und chemische Eigenschaften entwickeln, bestimmt.

(BRP et al. 1997:7)

Durch das Ausschleifen der Täler während der Eiszeiten und dem folgenden Stabilitätsverlust durch das Schmelzen des Eises, blieben instabile Talflanken übrig. Entscheidend bei Massenbewegungen ist das Verhältnis von rückhaltenden und treibenden Kräften. Treten hierbei Veränderungen auf, kann sich das Kräftegleichgewicht ändern. Veränderungen in diesem Gleichgewicht können über einen längeren Zeitraum oder auch kurzfristig stattfinden. Auf längere Sicht gesehen können Änderungen des Grundwasserspiegels und Verwitterungsprozesse zu einer Instabilität eines Hanges führen. Kurzfristig können etwa Erdbeben oder die Erosion des Hangfußes durch ein Fließgewässer zur Destabilisierung eines Hanges führen. Wasser ist in Bezug auf Massenbewegungen grundsätzlich von großer Bedeutung. Ist Wasser gefroren, kann es zu einer Sprengwirkung kommen. Aber auch in flüssigem Zustand erzeugt Wasser hydrostatische Drücke, Strömungsdrücke oder Quelldrücke, welche für die Stabilität eines Hanges entscheidend sein können.

(BRP et al. 1997:7)

Oft kommt es zu spontanen Massenbewegungen infolge von gelegentlich, immer wieder vorkommenden heftigen oder andauernden Niederschlägen, möglicherweise auch in

Verbindung mit Schneeschmelze. Auch durch mehrere Frost- und Auftaukreisläufe kann es zu spontanen Massenbewegungen kommen. Anthropogene Einflüsse, wie ungesicherte Hanganschnitte, Sprengungen, ungeeignete Landnutzung, falscher Abbau von Rohstoffen, Erhöhung des Wasserspiegels im Hang oder Überlastung eines Hanges können das Eintreten von Massenbewegungen zusätzlich ermöglichen. Längerfristig kann es auch durch Denudation, Intensivnutzung, Überweidung, Entwaldung und fehlerhafte Waldpflege zu Instabilitäten eines Hanges kommen. (BRP et al. 1997:7)

3.2 Kinematische Grundtypen von Massenbewegungen

Massenbewegungen können in folgende fünf kinematische Grundtypen unterschieden werden. Oftmals handelt es sich hierbei um Kombinationen und Mischformen, weshalb eine exakte Abgrenzung erschwert wird. (Zangerl et al. 2008:12)

-Fallen

-Gleiten

-Kippen

-Fließen

-Driften

3.2.1 Fallen, Stürzen

Sturzprozesse können beispielsweise Felssturz, Bergsturz oder Stein- und Blockschlag sein. Diese Prozesse werden räumlich in Ablösegebiet, Transitstrecke und Ablagerungsgebiet untergliedert. Der Stein- und Blockschlag kennzeichnet sich durch eine geringe mechanische Interaktion zwischen den Sturzkomponenten. Beim Fels- und Bergsturz hingegen löst sich eine Gesteinsmasse ab, wo es durch mechanische Interaktion der Sturzkomponenten zu einer Zerkleinerung in Steine und Blöcke kommt. Felsstürze weisen ein Volumen von unter 1000000 m³ auf. Bergstürze weisen weitaus höhere Volumina und Reichweiten auf. (Zangerl et al. 2008:12)

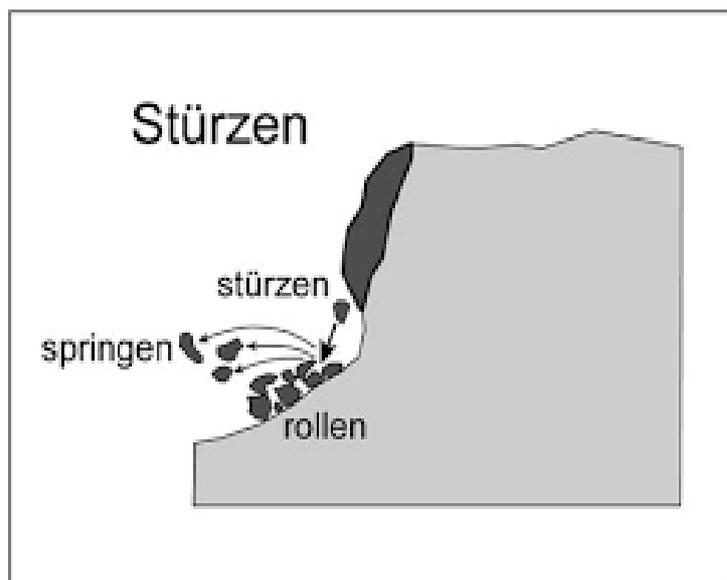


Abbildung 1: Darstellung des kinematischen Grundtyps Stürzen (Zangerl et al. 2008:13)

Sturzprozesse kennzeichnen sich durch keine oder geringe Scherbewegungen und entstehen dann, wenn sich lockeres oder festes Gestein ablöst. Dieses abgelöste Material rollt, springt oder stürzt abwärts. Andere Mechanismen, wie Kippen oder Gleiten, können Sturzprozesse zusätzlich herbeiführen. Die Bewegungsgeschwindigkeiten sind hoch, weshalb hohe Reichweiten erreicht werden können und schwerwiegende Zerstörungen möglich sind. (Zangerl et al. 2008:12)

3.2.2 Gleiten

Der kinematische Grundtyp Gleiten kennzeichnet sich durch eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Festgestein oder Lockergestein in Richtung einer oder auch mehreren Bewegungszonen. In diesen Bewegungszonen findet der Großteil der dort stattfindenden Hangverformungen statt. Im besten Fall bewegt sich die in Bewegung geratene Masse als Block, was in der Realität jedoch nur sehr selten passiert. Da die mechanischen Eigenschaften und Kluft- und Wasserdrücke im Bereich der Bewegungszonen variieren, kommt es zur Bildung von internen Deformationen der Masse. Dadurch entstehen Bereiche mit unterschiedlicher Bewegungsaktivität. Eine Gleitbewegung passiert nicht plötzlich, sondern ist das Ergebnis fortschreitender Bruchprozesse, welche ihren Ursprung in verschiedenen Schwächezonen haben. Bildet sich aus diesen verschiedenen Prozessen eine zusammenhängende Masse, kann man von einer Gleitung sprechen. Gleitungen haben das Potential, bei entsprechender Wassersättigung, in Fließprozesse überzugehen. Bei höherem Wasseranteil ist eine größere Reichweite des Prozesses zu erwarten. Generell bewegen sich die Reichweiten bei Gleitungen zwischen Metern bis Kilometern. Die Geschwindigkeiten

bewegen sich in Bereichen von einigen Millimetern pro Jahr bis zu mehreren 10er Metern pro Sekunde. Die Bandbreite ist also sehr groß. Grundsätzlich werden zwei Typen von Gleitungen unterschieden. Diese sind Translations- und Rotationsgleitungen.

(Zangerl et al. 2008:13ff)

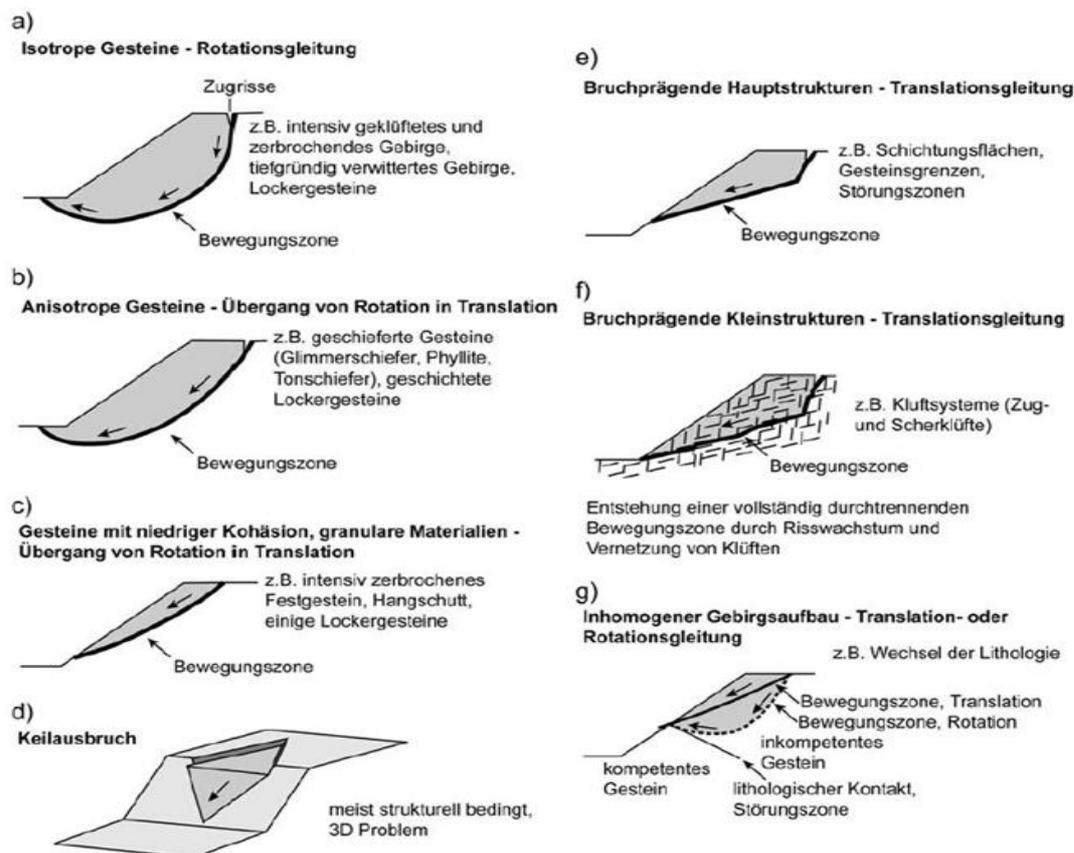


Abbildung 2: Darstellung von verschiedenen Arten des Gleitens. Ergänzt nach Hudson & Harrison 1997. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:14)

3.2.3 Kippen

Beim kinematischen Grundtyp Kippen kommt es zur Trennung von Locker- und Festgesteinspaketen durch Rotation aus einem Abhang. Der Rotationspunkt liegt dabei unterhalb des Massenschwerpunkts des kippenden Gesteins. Kippen kann auch zu anderen kinematischen Grundtypen, wie Stürzen oder Gleiten, führen. Hintergrund eines Kippvorganges sind mächtige Trennflächensysteme, welche sich parallel zum Hang befinden. Diese können beispielsweise Klüfte, Schieferungsflächen, Bankung oder lithologischer Lagenbau sein. Gesteinspakete haben demnach wegen ihres Eigengewichts eine hohe Biegebeanspruchung. Plastische Deformationen der unterliegenden Gesteine sowie Wasser- oder Eisdruck können ebenfalls zum Kippen eines Gesteinskörpers führen. Des Weiteren

finden zwischen den einzelnen Ablöseflächen Scherbewegungen statt. (Zangerl et al. 2008:12f)

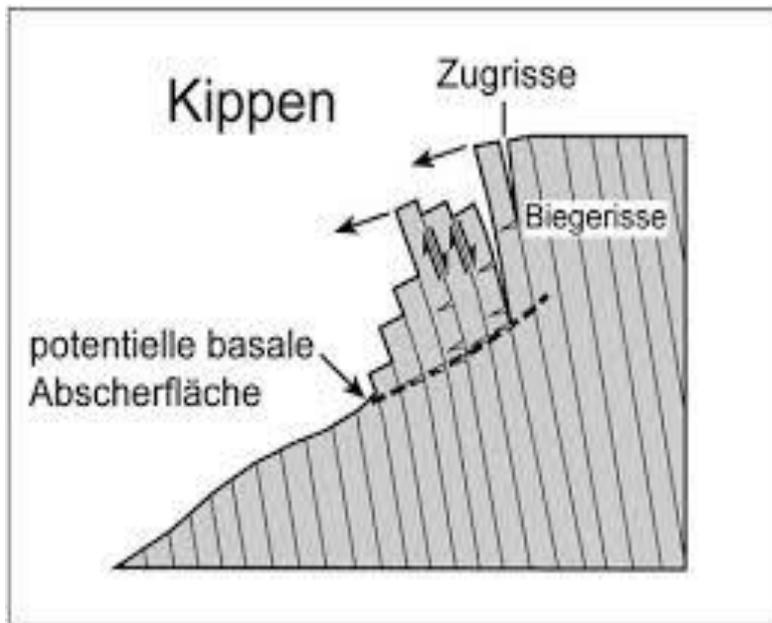


Abbildung 3: Rotation von Gesteinsblöcken auf einer potentiell basalen Abscherfläche (Zangerl et al. 2008:13)

Die Geschwindigkeit bei einem Rotationsvorgang eines Gesteinspakets reduziert sich mit der Tiefe. Außerdem kennzeichnet sich ein Rotationsvorgang durch immer steilere Bewegungsvektoren. Grundsätzlich unterscheidet man das Blockkippen und Biegekippen. (Zangerl et al. 2008:13)

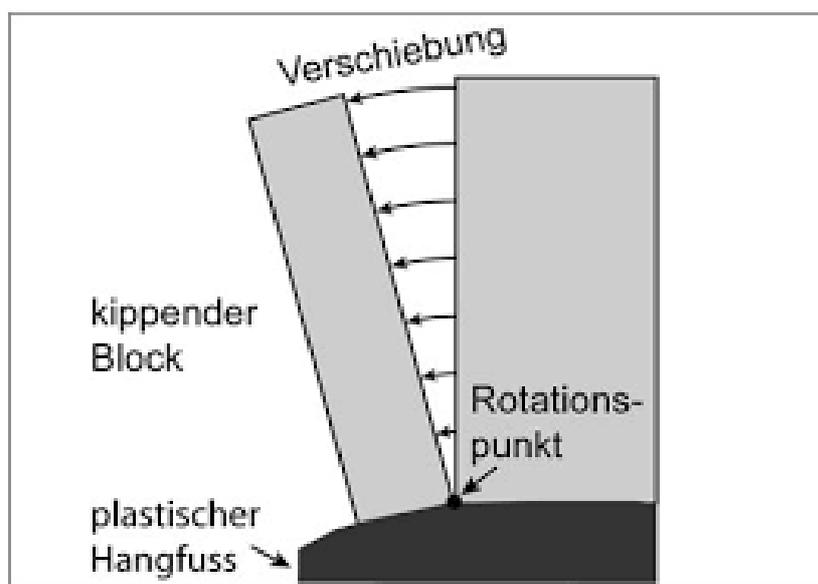


Abbildung 4: Kippender Block mit Änderung der Geschwindigkeitsvektoren und des Einfallswinkels aufgrund plastischer Deformation. (Zangerl et al. 2008:13)

3.2.4 Fließen

Beim Fließen wird eine große Bandbreite an verschiedenen Geschwindigkeitsmöglichkeiten abgedeckt. Diese reicht von sehr langsam, beispielsweise beim Prozess „Hangkriechen“, bis zu sehr schnell bei Murgängen. Es werden über 10 Größenordnungen, von $<10^{-7}$ bis $>10^3$ mm/s, abgedeckt. Der kinematische Grundtyp Fließen beinhaltet Prozesse, wo eine hohe Teilbeweglichkeit der Gesteinsmassen, stattfindet. In der Mehrzahl der auftretenden Fälle sind mögliche Gleitzonen gar nicht enthalten bzw. dicht aneinander geordnet und kurzlebig. (Zangerl et al. 2008:15)

Cruden & Varnes (1996) sind der Meinung, dass der Begriff Fließen für Festgesteine, wie auch für Lockergesteine, Anwendung findet. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:16)

Nach Hungr (1995) kennzeichnen sich feste Materialien durch basale Bewegungszonen mit Scherverformungen (rasche Felsgleitung) und Lockergesteine weisen typische Fließgeschwindigkeitsprofile (Mure) auf. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:16)

Nach Müller – Salzburg (1992) sind Begrifflichkeiten, wie Sandstrom, Erdstrom, Schuttstromfließen, Blockstrom, Solifluktion, Bodenkriechen, Hangschuttkriechen oder Hangkriechen, Fließprozesse im Lockergestein mit sehr geringer Geschwindigkeit. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:16)

Schnell fließende Hangmuren weisen ein sehr hohes Zerstörungspotential auf, da wegen ihrer hohen Geschwindigkeit, ein ausgedehntes Transitgebiet bzw. Ablagerungsgebiet entstehen kann. (Zangerl et al. 2008:16)

Eine Sackung beispielsweise bedeutet nach Poisel (1998), Stini (1941) und Zischinsky (1969) ein sehr langsames Fließen im Festgestein. (zitiert nach Zangerl et al. 2008:16f)

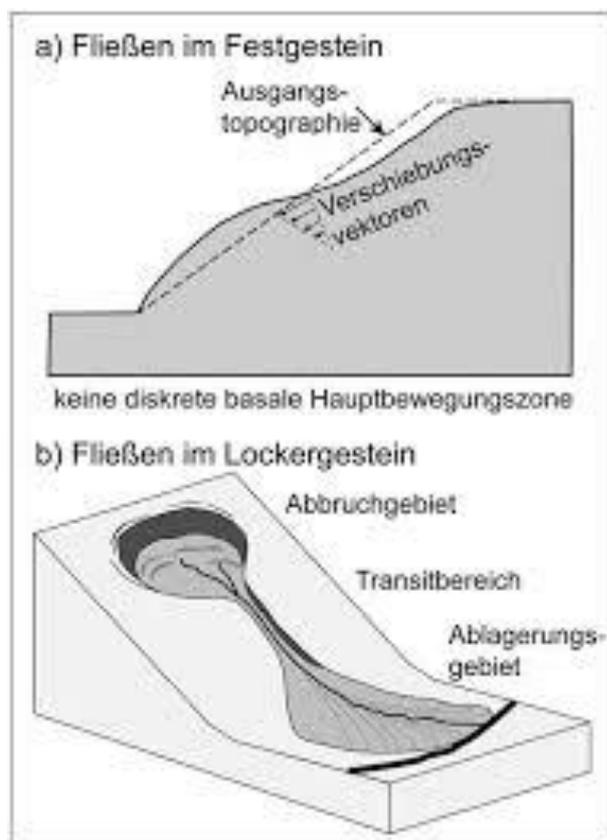


Abbildung 5: Übersichtliche Abbildung mit Fließen im Festgestein und Fließen im Lockergestein. (Zangerl et al. 2008:16)

Fließen im Festgestein charakterisiert sich durch niedrige Geschwindigkeiten. Weiter sind geringe Hangverformungen sowie das Fehlen einer verbundenen Bewegungszone erkennbar. Im Gegensatz dazu, sind beim Fließen im Lockergestein, höhere Geschwindigkeiten und größere Verformungen zu erwarten. Eine räumliche Einteilung in Anbruchgebiet, Transitgebiet und Ablagerungsgebiet ist möglich. (Zangerl et al. 2008:16)

Beim ideal, viskosen Fließprozess reduziert sich die Geschwindigkeit mit der Tiefe. (Zangerl et al. 2008:16)

3.2.5 Driften

Nach Poisel & Eppensteiner (1989) bildet sich beim kinematischen Grundtyp Driften keine Bruchfläche. Der Prozess ist durch plastische Verformungen bzw. Verflüssigungsprozesse des Bodens bestimmt. Grundsätzlich ist Driften eine laterale Dehnung bzw. Extension einer zusammenhaltenden Felsmasse oder Lockergestein. Dabei können auch Setzungen eine wesentliche Rolle spielen. Es kann beispielsweise eine Felsmasse, wegen stattfindender Setzungsmechanismen bzw. Dehnung- oder Extensionsmechanismen, entlang von Spalten,

brechen. In die Hohlräume bzw. Zwischenräume der Spalten gelangt plastisch verformtes Material von unten oder Schutt von oben, was den Prozess vorantreibt (Abbildung 6).

(zitiert nach Zangerl et al. 2008:17)

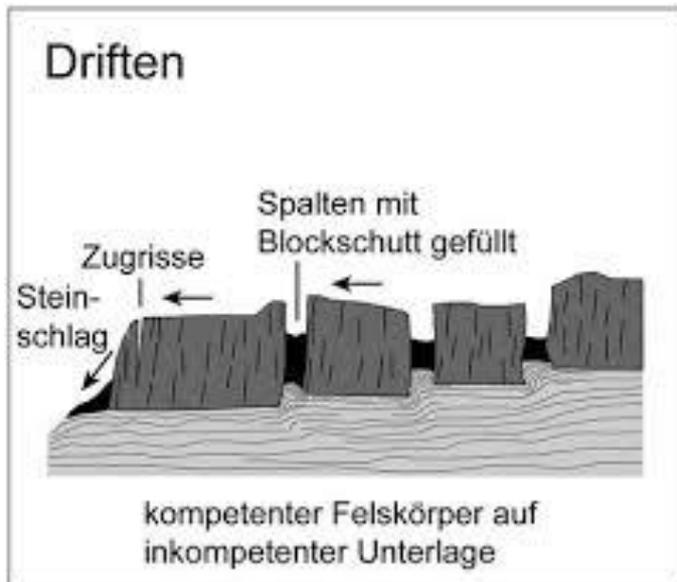


Abbildung 6: Veranschaulichung des Prozesses Driften mit kompetenten Felskörper auf inkompetenter Unterlage und der Entstehung von Zugrissen sowie der Auffüllung von Spalten mit Blockschutt. (Zangerl et al. 2008:17)

3.3 Unterteilung der kinematischen Grundtypen in Geschwindigkeitsklassen sowie deren Zerstörungspotential

Klasse	Beschreibung	Geschwindigkeit	Kinematik (Art der Bewegung)					Zerstörungspotential
			Fallen (Fall)	Kippen (Topple)	Gleiten (Slide)	Fließen (Flow)	Driften (Spread)	
7	extrem rasch (extremely rapid)	5×10^3 mm/s 5 m/s	■	■	■	■	■	sehr großes Zerstörungspotential, viele Tote, Evakuierung unmöglich, großer Sachschaden
6	sehr rasch (very rapid)	5×10^1 mm/s 3 m/min	■	■	■	■	■	großes Zerstörungspotential, einige Tote, Evakuierung teilweise möglich, großer Sachschaden
5	rasch (rapid)	5×10^{-1} mm/s 1.8 m/h	■	■	■	■	■	Zerstörungspotential vorhanden, keine Tote da Evakuierung möglich, großer Sachschaden
4	mäßig (moderate)	5×10^{-3} mm/s 158 m/a						Sachschaden an Gebäuden und Infrastruktur
3	langsam (slow)	5×10^{-5} mm/s 1.6 m/a						Sachschaden an Gebäuden und Infrastruktur, Sanierung je nach Hanggeschwindigkeit teilweise möglich
2	sehr langsam (very slow)	5×10^{-7} mm/s 16 mm/a						Differentielle Bewegungen führen zu Schäden an Bauwerken, manche Strukturen können durch Bewegung unbeeinflusst bleiben ohne Instrumentierung Bewegung nicht erkennbar, Bebauung mit Vorkehrungen möglich
1	extrem langsam (extremely slow)							

Abbildung 7: Einteilung der Massenbewegungen in Geschwindigkeitsklassen nach Cruden & Varnes (1996) (zitiert nach Zangerl et al. 2008:18)

4 Rutschungen

4.1 Erklärung verschiedener Rutschungsprozesse

Hangbewegungen kennzeichnen sich durch eine große Vielfaltigkeit. Der Ablauf einer Rutschung kann je nach Wassergehalt, Gesteinsbeschaffenheit und Untergrundstruktur sehr differenziert sein. Rutschungen können in mäßig bis steilen Gelände ausgelöst werden. Besonders im Bereich zwischen 10° und 40°. Man unterscheidet grundsätzlich Translations- und Rotationsrutschungen. In der Praxis ist eine exakte Unterscheidung jedoch nicht immer eindeutig, da es sich manchmal um Kombinationen der beiden Typen handelt. Damit es zu einer Rutschbewegung kommt, ist das Verhältnis zwischen den rückhaltenden und treibenden Kräften entscheidend. Liegt dieses Verhältnis im Bereich des kritischen Wertes (≤ 1), kommt es zu einer Rutschbewegung. Treibende Kräfte beispielsweise können sich aus mehreren Faktoren zusammensetzen. Hierbei ist etwa der Porenwasserdruck entscheidend. Eine Änderung der Scherfestigkeit erfolgt im Wesentlichen durch innere Einflüsse, wie etwa Verwitterung und durch eine Erhöhung des Wasserdruckes. Der Wasserdruck kann zum Beispiel durch Schneeschmelze, Gewitterregen oder Dauerregen erhöht werden. Aber auch anthropogene und natürliche Einflüsse, wie das Anschneiden des Hangfußes oder eine Überlastung eines Hanges, können zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit einer Auslösung von Hangbewegungen führen. (Krummenacher et al. 2009:1f)

4.2 Ursachen für die Entstehung von Rutschungen

4.2.1 Geologische Voraussetzungen für Rutschungen

Gesteine, wie etwa Sandsteine, Basalte, Kalksteine sowie Sande und Kiese auf tonig – mergeligen oder tonigen Untergrund bzw. in abwechselnder Schichtung miteinander, weisen eine hohe Wasserwegsamkeit auf und sind dadurch besonders anfällig gegenüber Rutschungen. Gleitbahnen und Abrissflächen können besonders im Bereich von Großklüften, Verwerfungen, Schieferungs- und Schichtflächen und weiteren geologisch relevanten Grenzflächen entstehen. (Prinz et al. 2011:366)

Nach Heym (2005) können auch tonig – schluffige Abfolgen erheblich anfällig gegenüber Rutschungen sein. Grund dafür sind niedrige Scherparameter, welche von der Tonmineralogie abhängig sind. (zitiert nach Prinz et al. 2011:366)

Tiefgründige Verwitterung oder Versturz- und Verkarstungsmassen können außerdem zu Instabilitäten von Hängen führen. (Prinz et al. 2011:366)

4.2.2 Bedeutung des Wassers bei Rutschungen

Meistens ist das Wasser, in Form von Niederschlägen bzw. Grundwasser, die zum Prozess führende Einflussgröße. Nachfolgend werden die gesonderten Parameter nach Prinz et al. (2011:367f) aufgelistet:

-Nassstellen

-Stauhorizonte

-Wasserverluste aus Behältern, Kanälen oder Leitungen (Stein 1988, zitiert nach Prinz et al. 2011:368)

-Überschwemmungen oder Stauhaltungen

-Grundwasserverhältnisse (Strömungsdruck und gespannte Grundwasserstockwerke)

-Niederschläge (extreme, auf kleinem Raum stattfindende Niederschlagsereignisse, Einsickerungsrate, regionale und zeitliche Verteilung)

Es besteht eine direkte zeitliche Verbindung zwischen der Häufung von Rutschprozessen und dem Niederschlag. (Rohn & Ruff 2005, zitiert nach Prinz et al. 2011:368)

Deswegen ist es entscheidend, dass bei der Abschätzung von Rutschprozessen fortwährend der Niederschlag bzw. die Niederschlagsmengen der vergangenen Monate berücksichtigt werden. Beispielsweise sind das Schmelzen einer Schneedecke durch dauerhafte Regenfälle sowie Starkregen nach Monaten mit großen Niederschlagsmengen, als außerordentlich risikobehaftete Situationen anzusehen, um einen Rutschprozess auszulösen.

(Prinz et al. 2011:368)

4.2.3 Änderungen in Höhe und Neigung eines Hanges

Änderungen eines Hanges im Bereich der Höhe und Neigung werden auch als morphologische Ursachen für die Entstehung von Rutschungen bezeichnet. Diese können nach Prinz et al. (2011:367) folgende Änderungen sein:

- Versteilung eines Hanges oder das Abgraben eines Hangfußes, beispielsweise bei der Errichtung von Verkehrsanlagen

- Beanspruchung eines Hanges, beispielsweise durch Objekte wie Gebäude und Dämme

- Auftrieb bei Einstau führt zu einer möglichen Entlastung des Hangfußes

- Hebungen

- durch Erosion auftretende Unterschneidung eines Ufers

Abgrabungen bewirken immer Änderungen im Hanggleichgewicht, welche sich auf die Höhe und Neigung eines Hanges bzw. einer Böschung durch ein Anwachsen kennzeichnen. Dazu werden verbleibende Schichten entlastet. Schubspannungen und Scherfestigkeiten können sich dadurch verändern. Es erfolgt eine Reduzierung der Scherfestigkeit durch die Entlastungswirkung und eine gleichzeitige Zunahme der Schubspannungen aufgrund des Anwachsens der Neigung. Diese Veränderungen im Hanggleichgewicht können zu einem Bruch führen, welcher bereits nach einigen Monaten bzw. auch nach Jahren stattfinden kann. (Prinz et al. 2011:367)

4.2.4 Rolle der Vegetation und anthropogene Beeinflussung

Anthropogene Beeinflussung durch verschiedene Baumaßnahmen führt zu einer Veränderung des Hanggleichgewichtes, weswegen beispielsweise der Aufstau von Grundwasser oder Oberflächenwasser durch unterschiedliche Stauanlagen als mögliche Faktoren für die Entstehung von Rutschungen zu berücksichtigen sind. Ebenfalls von Bedeutung sind etwaige Beschädigungen in Leitungen, welche zu einem Wasserausfluss führen können. Erschütterungen und stärkere Vibrationen spielen bei der Auslösung von Rutschungen eine untergeordnete Rolle. Bei mehreren Vibrationen kann es jedoch zu einer beschleunigenden Wirkung bei Kriechvorgängen kommen. (Prinz et al. 2011: 369)

Bei der Vegetation sind der Deckungsgrad und die Vegetationsarten zu beachten. Der Wasserverbrauch ist etwa bei Grünland und Laubbäumen unterschiedlich. Der Wasserverbrauch bei Grünland liegt bei 300 mm/a bis 400 mm/a. Jener der Laubbäume liegt bei 500 mm/a bis 800 mm/a. Hierbei ist der Vegetationszeitraum von April bis Mitte Oktober zu berücksichtigen. Vegetation ist generell ein stabilisierender Faktor. Deswegen wird beispielsweise durch Viehtritt und Überweidung Vegetation zerstört, weswegen ein Hang zusätzlich ohne Schutz verschiedenen Klimaeinflüssen ausgesetzt wird.

(Prinz et al. 2011:369)

Durch das Abholzen des Waldes eines Hanges wird die Hangstabilität reduziert. Dieses Abholzen führt zu Veränderungen des Wasserhaushaltes und kann Bodenerosion auslösen. (Bunza 1993, zitiert nach Prinz et al. 2011:369)

4.3 Einteilung der Rutschungen

Hangkriechen: Dieser Prozess kennzeichnet sich durch eine kontinuierliche und langsame Deformation in Fels oder Lockergestein. Diese Verformungen finden über sehr lange Zeiträume statt. Auf mehreren Kleinsttrennflächen kommt es hierbei zu anhaltenden, bruchlosen Deformationen. (Krummenacher et al. 2009:2)

Permanente Rutschungen: Hierbei erfolgt eine Bewegung hangabwärts, welche sich anhaltend und gleichmäßig über sehr lange Zeiträume erstreckt. Diese Zeiträume können Jahrhunderte oder Jahrtausende lang sein. In der Regel sind permanente Rutschungen tiefgründige Translations- oder Rotationsrutschungen. Sie bewegen sich längs entlang bestehender Gleitflächen. (Krummenacher et al. 2009:2)

Spontane Rutschungen: Diese Rutschungen gleiten plötzlich und sehr schnell ab (Abbildung 7, Klasse 6-7). Dabei kommt es bei Lockergesteinsmassen, aufgrund eines abrupten Verlustes der Scherfestigkeit unter Bildung einer Gleitfläche, zum raschen Abgleiten. Im Gegensatz zu den permanenten Rutschungen, sind spontane Rutschungen in der Regel flach- bis mittelgründige Translations- oder Rotationsrutschungen. Ist der Wassergehalt sehr hoch, kann sich daraus auch eine Hangmure entwickeln. Spontane Rutschungen werden manchmal als Sekundärrutschungen bezeichnet, da oftmals an einer übersteilen Stirn einer permanenten

Rutschung, spontane Rutschungen entstehen können. Spontane Rutschungen kennzeichnen sich außerdem durch die Entstehung immer neuer Gleitflächen. (Krummenacher et al. 2009:2)

Hangmuren: Die Entstehung von Hangmuren kennzeichnet sich durch gering durchlässige Quartärbildungen (tonige Moräne, Gehängelehm usw.). Es ist eine Fließrutschung, welche relativ schnell abfließt. Dabei ist die Hangmure ein Gemisch aus Wasser und Lockergestein. Ausgehend von Rotations- oder Translationsrutschungen, ist diese Fließrutschung eine Form der spontanen Rutschung. Dieses an der Oberfläche fließende Gemisch aus Wasser, Vegetation, Lockergestein und Boden, kann über eine große Distanz transportiert werden.

Das Volumen kann bis ca. 20000 m³ aufweisen. Hangmuren können nach starken und länger andauernden Niederschlägen, nach einer intensiven Schneeschmelze, bei hohem Wassergehalt im Boden oder bei Quellaustritten entstehen. Aufgrund des hohen Wassergehalts kommt es auch zu relativ hohen Prozessgeschwindigkeiten, welche 1 bis 10 m/s (Abbildung 7, Klasse 6-7) betragen können. Oftmals entwickeln sich Fließrutschungen an steilen Hängen mit über 20°. Sollte jedoch eine starke Wassersättigung des Bodens vorhanden sein, kann dieser Prozess auch bei geringeren Neigungen (gegen 20°) stattfinden.

(Krummenacher et al. 2009:2f)

4.4 Die Form der Gleitfläche als Klassifikation

Schaut man sich Rutschungen und im Speziellen Gleitflächen genauer an, lassen sich Rutschungen in Translations- und Rotationsrutschungen unterteilen. Liegt diese Gleitfläche bei 0 – 2 m unter Terrain, ist diese Rutschung flachgründig. Bei 2 – 10 m mittelgründig und bei mehr als 10 m tiefgründig. Translationsrutschungen kennzeichnen sich dadurch, dass Schichtpakete auf einer Schwächezone abgleiten. Diese Schwächezonen können beispielsweise Kluft- oder Bruchflächen, Schichtflächen und Schieferungsflächen sein. Im Gegensatz dazu ist die Gleitfläche bei der Rotationsrutschung kreisförmig. Hierbei kommt es zu einem vertikalen Einfallen in der Ausbruchsnische. (Krummenacher et al. 2009:3)

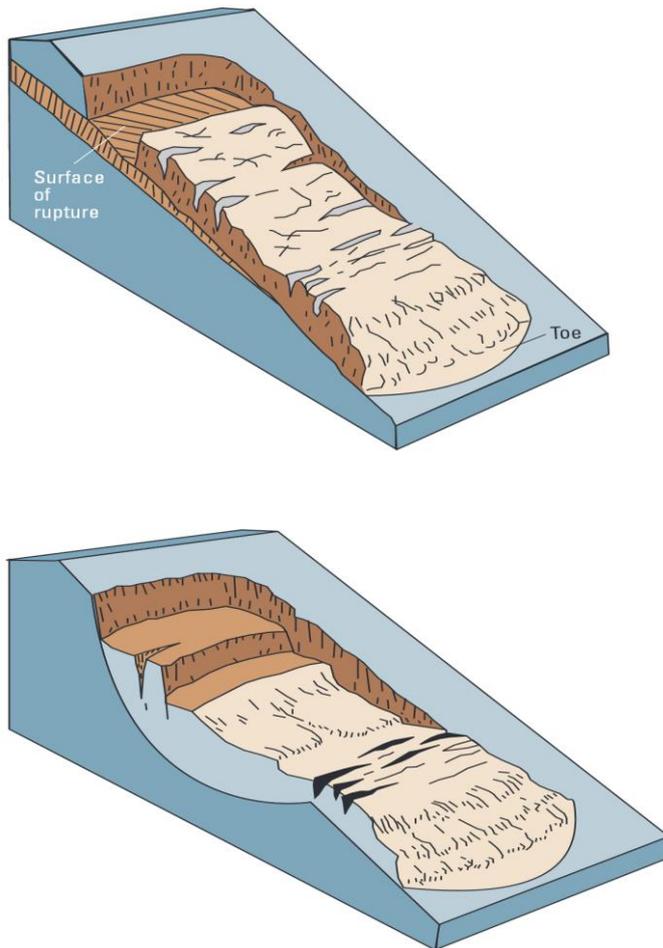


Abbildung 8: Darstellung einer Translationsrutschung (oben) und einer Rotationsrutschung (unten) (Highland et al. 2008:11ff)

4.5 Besonderheiten von Rutschungen

Rutschungen kennzeichnen sich durch eine Vielzahl verschiedener Rutschtypen und Mechanismen. Oftmals handelt es sich um Kombinationen davon. Die Bewegungen können sehr unterschiedlich sein und sich ändern. Dabei ist es bei Rutschungen besonders wichtig, die zeitlich und räumlich unterschiedlichen Bewegungen zu beachten. Die Bewegungen können lateral und vertikal abrupt oder sukzessive variieren. Um Maßnahmen zum Schutz vor Rutschungen setzen und verwirklichen zu können, ist es wesentlich, die verschiedenen Prozesse zu verstehen. Dabei ist vor allem bei tiefgründigen Rutschungen eine genauere Betrachtung, hinsichtlich der Realisierung baulich – technischer Maßnahmen, notwendig. Zum einen sind technische Schutzmaßnahmen bei sehr tiefgründigen Rutschungen (>30 m u. T.) aus finanziellen und wirtschaftlichen Gründen schwer realisierbar und zum anderen ist die Kontrollierbarkeit sehr tiefgründiger Rutschungen technisch anspruchsvoll.

(Bollinger et al. 2008:1f)

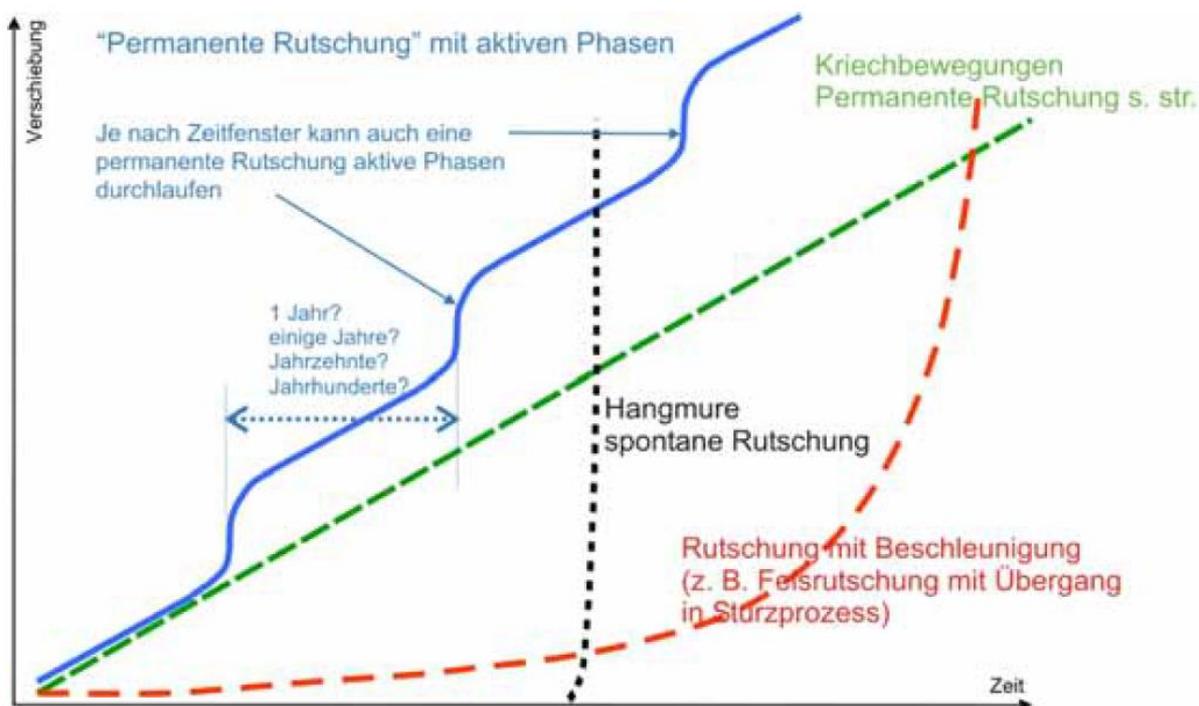


Abbildung 9: Bewegungsverhalten von Rutschungen (räumlich – zeitlich) (Bollinger et al. 2008:2)

4.6 Schutz vor Hangbewegungen

4.6.1 Stabilisierung und Sicherung

Man begegnet der Gefahr einer Hangbewegung entweder mit einer passiven oder aktiven Strategie. Aktives Entgegenwirken bedeutet den Hang zu stabilisieren. Passives Handeln hingegen bezieht sich auf die Vermeidung von Schäden. Welche Strategie bzw. ob eine Kombination der beiden Strategien zu wählen ist, hängt von einer ingenieurgeologischen Untersuchung des Hanges ab. Wird der Prozess und die Ursache der Hangbewegung analysiert, können Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen zum Schutz vor einer Hangbewegung entwickelt werden. (Genske 2014:375)

4.6.2 Abgrenzung kritischer Gebiete

Um eine Hangbewegung beurteilen zu können, ist es notwendig eine Kartierung und eine ingenieurgeologische Untersuchung durchzuführen. Danach wird, auf Grundlage einer Kartierung und ingenieurgeologischen Untersuchung, ein mechanisches Modell erstellt und das Kräftegleichgewicht des Hanges begutachtet. (Genske 2014:375)

Im Rahmen einer Vorauswertung werden verschiedene Kartenwerke untersucht. Dazu zählen beispielsweise hydrogeologische, geologische, topographische und historische Karten.

Parallel dazu findet eine Auswertung von Luftbildern und Satellitenaufnahmen statt. Dadurch lassen sich Anzeichen bereits stattgefundenener Hangbewegungen oder potentielle Rutschungsgebiete lokalisieren. Hinweise zu bereits stattgefundenen Hangbewegungen können beispielsweise Kippzonen, Stauchwälle oder Abrisskanten sein. Mögliche Problembereiche für zukünftige Rutschungen sind etwa Zugrisse, Steilhänge, Wuchsstörungen bei Bäumen und Vernässungszonen. (Genske 2014:375)

Bei der anschließenden ingenieurgeologischen Analyse werden verschiedene Aspekte des Hanges genau untersucht. Dies ermöglicht Aufschlüsse über die Verformbarkeit, die Festigkeit und den Aufbau des Untergrundes. (Genske 2014:375)

4.7 Schadensvermeidung

4.7.1 Gefährdung und Vorwarnzeiten

Bei Ereignissen, wie Sturzprozessen, Hangmuren oder Rutschungen, ist die Gefährdung von Mensch und Tier grundsätzlich hoch. Diese Ereignisse finden oft sehr plötzlich und rasch statt, weshalb Vorwarnzeiten eine besondere Bedeutung im Hinblick auf die Einschätzung der Gefährdungslage darstellen. (BRP et al. 1997:28)

Vorwarnungen bei Rutschungen sind, ausgenommen bei flachgründigen spontanen Rutschungsprozessen, eher lang. Deshalb können Notmaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung frühzeitig erledigt werden, ohne dass in der Regel Personen ernsthaft gefährdet sind. (BRP et al. 1997:28)

Bei Sturzprozessen hingegen ist die Vorwarnzeit kurz bzw. sehr kurz. Die Einleitung von Notfallmaßnahmen gestaltet sich hier, aufgrund der geringen Zeitkapazitäten, als schwierig. Bei Bergstürzen oder Felsstürzen ist dies jedoch anders. Diese Prozesse kündigen sich über Wochen oder zumindest Tage, durch eine Zunahme der Steinschlagaktivität, an. Bei einem vernünftigen Umgang mit dieser Erkenntnis, können Notfallmaßnahmen eingeleitet werden. Dabei können beispielsweise Überwachungssysteme und Frühwarnsysteme installiert werden und sollte es nötig werden, eine Evakuierung zum Schutz der Bevölkerung durchgeführt werden. (BRP et al. 1997:28)

Extrem schwierig ist es, bei Hangmuren Vorwarnungen zu treffen. Ist der Bodenaufbau, die Topografie und die Vegetation bekannt, ist es oft ein extremes Niederschlagsereignis,

welches zum Prozess einer Hangmure führt. Deswegen können diese Ereignisse oft nur erahnt werden. Da diese Vermutung und Ahnung in einem Zeitraum von einer halben Stunde bis mehreren Stunden vor einem Prozess stattfinden kann, besteht bei vernünftigem Verhalten die Möglichkeit, Notfallmaßnahmen einzuleiten. (BRP et al. 1997:28)

Modelle, mit denen Instabilitäten oder potentielle Bewegungsprozesse berechnet werden können, basieren auf Annahmen. Deshalb sind exakte Eingabeparameter von besonderer Bedeutung. Eine Modellberechnung bringt nur dann einen großen Nutzen, wenn die Annahmen realitätsnah und die erhobenen Daten schlüssig sind. Sollte dies nicht der Fall sein, können die Ergebnisse zwar konkret, aber nicht aussagekräftig und relevant sein. (BRP et al. 1997:28)

4.7.2 Warnung und Verbote

Um einen guten Schutz vor Hangbewegungen zu gewährleisten, ist es wichtig, neben der Gefahrenzonierung gefahrenrelevanter Hangbereiche, durch Hinweise im Gelände vor Gefahren zu warnen. Mittels Warnschilder kann auf Gefahren aufmerksam gemacht werden. Außerordentlich gefährliche Bereiche können mit einem Zaun gesichert werden bzw. kann das Betreten von gefährlichen Bereichen im Rahmen ordnungsrechtlicher Bestimmungen verboten werden. (Genske 2014:381)

Bei Murgängen kann man bereits im Entstehungsgebiet eine mögliche Gefahr erkennen. Beispielsweise durch den Einbau von Geophonen. Diese werden in regelmäßigen Abständen entlang eines möglichen Murgangpfades vergraben. Melden diese durch Erschütterungen ausgelöste Signale, kann ein Murgangalarm ausgelöst werden. (Genske 2014:382)

4.7.3 Monitoring

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten und Methoden einen potentiell gefährlichen Hang zu beobachten. Die Wahl der Methode hängt von der Art der zu erwartenden Hangbewegung ab. Es können auch Kombinationen von Methoden gewählt werden. Folgend eine Auswahl wichtiger Methoden des Monitorings nach Genske (2014:382):

-Überlagerung einer Zeitreihe von SAR – Satellitenbildern (Synthetic Aperture Radar)

-Dokumentation der Steinschlaghäufigkeiten, da sich Hangbewegungen oftmals durch eine Zunahme der Steinschlagaktivität ankündigen

-regelmäßige trigonometrische Vermessung von Festpunkten

-die Tiefe und die Geometrie der Hangbewegung mittels Inklinometern, Deflektometern und Extensometern bestimmen

-geoakustische Messungen, die Zunahme von akustischen Signalen weist auf eine Beschleunigung der Hangbewegung hin

-Satelliten- und Luftbilder

-Dokumentation der Häufigkeit von Murgängen

4.8 Schutzmaßnahmen

Um Schäden vor Massenbewegungen weitestgehend zu reduzieren, können vorbeugend Schutzmaßnahmen realisiert werden. Dabei kann die Wirkung der Massenbewegung abgedämpft werden oder Sturz- und Rutschmassen abgelenkt werden. Beispielsweise können Steinschlagnetze einen guten Schutz vor Steinschlagprozessen liefern. Auch die Sicherung einer Felsböschung ist mit Seilnetzen möglich, um das Herauslösen von Felskörpern aus der Böschung zu verhindern. Regelmäßige Wartungstätigkeiten, um ein Ansammeln von Sturzkörpern im Netz zu verhindern, sind hierbei unerlässlich. (Genske 2014:383)

Weitere Schutzmaßnahmen vor Massenbewegungen können beispielsweise Steinschlaggalerien, Netz – Barrieren zum Schutz vor Murgängen, verdichtete Sandbette als Dämpfungszone, Kanalisierungs- und Leitsysteme oder die gezielte Aufforstung von Schutzwäldern sein. Es können auch Kombinationen aus aktiven und passiven Schutzmaßnahmen realisiert werden. (Genske 2014:387)

4.8.1 Stabilisierung

4.8.1.1 Drainage

Eine Drainage, als aktive Stabilisierungsmaßnahme, bietet eine gute Möglichkeit um Bergwasser im oberen Hangbereich abzufangen bzw. durch Entwässerungsgräben im Hang

abzuleiten. Dadurch kann ein starker Wassereintrag in den Hang verhindert werden. Es ist jedoch wichtig regelmäßige Wartungsvorgänge durchzuführen, um die Funktionsfähigkeit der Drainage aufrechtzuerhalten. Dadurch kann das Zufrieren der Drainage im Winter oder der Aufstau von Wasser verhindert werden. (Genske 2014:388)

4.8.1.2 Anpassung des Böschungsprofils an die geologischen Gegebenheiten

Teure konstruktive Schutzmaßnahmen und deren Folgekosten durch Wartungsvorgänge lassen sich durch die Anpassung an die Geometrie einer Böschung an das vorhandene Trennflächengefüge gut ersetzen. Im Zuge dieser Anpassung werden bestimmte Gebirgspartien bzw. Böschungspartien gezielt abgebaut. Man kann beispielsweise die Böschungsneigung an die Neigung der vorhandenen Schichtflächen anpassen, um damit das kinematische Rutschen einer Böschung zu verhindern. (Genske 2014:388)

4.8.1.3 Reliefanpassung

Eine Reliefanpassung stellt eine weitere gute Möglichkeit dar, einen Hang zu stabilisieren. Dabei kann die Böschungsneigung abgeflacht, die Böschungskrone abgetragen und der Fußbereich eines Hanges aufgeschüttet werden. (Genske 2014:388)

4.8.1.4 Konstruktive Maßnahmen

Zu den hangstabilisierenden, konstruktiven Schutzmaßnahmen zählen Verankerungen, Vernagelungen sowie Stützbauwerke. Verankerungen und Vernagelungen werden oftmals in Verbindung mit Spritzbeton, welcher sehr günstig ist, eingesetzt. Zusätzlich wird eine derartige Hangstabilisierung mit einer Drainage gesichert, um das Auftreten von Kluftwasserdrücken hinter der Spritzbetonschicht zu vermeiden. (Genske 2014:391ff)

Pflanzen bieten eine ästhetische und ökologische Alternative, um die Stabilisierung einer Böschung ohne konventionelle, konstruktive Sicherungsmaßnahmen zu erreichen. Das Wurzelsystem von Pflanzen wirkt als Verankerung und reduziert die Erosion der Böschung. Die Vegetationsdecke nimmt Oberflächen- und Sickerwasser auf, welche Bergwasserdrücke hervorrufen könnten. Bei fachgerechter Ausführung bedarf es bereits nach wenigen Jahren keiner Pflege und Wartungsarbeiten. Beispiele des Lebendverbaus sind Hangrost, Buschlagenbau sowie die Holzgrünschwelle. (Genske 2014:393)

Stützbauwerke hingegen sind aufwendige Sicherungsmaßnahmen und verändern die Ästhetik eines Hanges deutlich. Man unterscheidet Stützwände, welche in den Boden eingespannt und

verankert werden und Stützbauwerke. Stützwände sind beispielsweise Bohrpfahlwände und Spundwände. Stützbauwerke hingegen stabilisieren eine Böschung durch ihr Eigengewicht. Dazu zählen Schwergewichtsmauern, Winkelstützmauern, Konstruktionen aus Bewehrter Erde und Steinsetzkästen. (Genske 2014:393)

5 Untersuchung flachgründiger Rutschungen

5.1 Vorgehensweise

Um die Forschungsfragen ausreichend beantworten zu können, wurde es notwendig an qualitativ gute Daten zu gelangen. Im Zuge dieser Überlegungen wurden die österreichische geologische Bundesanstalt, das österreichische Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft und die eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft aus der Schweiz (WSL) kontaktiert. Durch diese Recherchen wurde ich auf ein Projekt der WSL aufmerksam, welches eine Datenbank (BAFU – Projekt – Hangmurendatenbank) mit flachgründigen Rutschungen erstellte. Das Projekt wurde in sechs Jahren (2012-2018) fertiggestellt. Es werden laufend neue Ereignisdokumentationen von Experten der WSL hinzugefügt.

In der Datenbank befinden sich aktuell insgesamt 758 Ereignisdokumentationen von flachgründigen Rutschungen. Diese reichen vom Jahr 1997 bis zum Jahr 2019. Es werden für jedes Ereignis Parameter wie der Ort der Rutschung, die Ausmaße der Rutschung, Zeitinformationen, Geologie, Morphologie, Hydrologie, Vegetation, Rutschprozess, Bodenentwicklung, Lockergestein, Festgestein, Wasserführung im Untergrund, Niederschlag und Erhebungszeitpunkt erhoben und angegeben.

5.2 Ereignisdokumentation

Um eine standardisierte Ereignisdokumentation zu ermöglichen, wurde nach den Unwettern in den Jahren 1997, 2002 und 2005 in der Schweiz ein standardisiertes Aufnahmeformular entwickelt. Dieses wurde im Zuge des BAFU – Projektes „Hangmurendatenbank“ überarbeitet. Das im Anhang zu findende Aufnahmeformular ist die neueste Version. Es werden mit Hilfe dieses Aufnahmeformulars standardisiert Felddaten erfasst. (WSL/BAFU/AGN 2018:2)

Die in der Datenbank enthaltenen Daten haben den Zweck einer Ereignisdokumentation. Dies bietet die Möglichkeit, nach einer Analyse, ein besseres Prozessverständnis für spontane Rutschungen und Hangmuren zu entwickeln. (WSL/BAFU/AGN 2018:2)

Die Erhebung der verwendeten Daten erfolgte von Experten der WSL. Damit eine hohe Qualität der Daten erreicht werden kann, sind eine hohe Fachkompetenz in den Bereichen Geologie, Vegetation, Wald, Boden, Morphologie und Geotechnik erforderlich. Um die
Institut für Alpine Naturgefahren, Sommersemester 2020

Qualität der Daten zu beschreiben, werden die Daten mit einem MAO – Code ergänzt. (M= Messwert, A= Annahme, O= nicht bestimmbar) (WSL/BAFU/AGN 2018:3)

5.3 Verwendete Begriffe in der Ereignisdokumentation

Flachgründige Rutschungen: Rotations- oder Translationsrutschungen, welche 0 – 2 m unter Terrain liegen; dazu zählen spontane Rutschungen und Hangmuren

Spontane Rutschungen: Lockergesteinsmasse gleitet plötzlich und rasch aufgrund eines Verlustes der Scherfestigkeit ab; spontane Rutschungen kennzeichnen sich dadurch, dass sich immer eine neue Gleitfläche bildet (im Gegensatz zu permanenten Rutschungen); es kann der Fall eintreten, dass sich aus einer spontanen Rutschung eine Hangmure bildet (Mischform), wenn sich Bereiche der Rutschungsmasse verflüssigen (Kapitel 4.3) (WSL/BAFU/AGN 2018:2)

Hangmuren: plötzliches, schnelles und unkanalisiert abgehendes Gemisch aus Wasser und Lockergestein (oftmals handelt es sich hierbei nur um Boden und Vegetationsbedeckung); Ursachen können hydraulischer Grundbruch und der Verlust der Scherfestigkeit sein (Kapitel 4.3) (WSL/BAFU/AGN 2018:2)

6 Datenanalyse

Die Datenbank des BAFU – Projektes „Hangmurendatenbank“ enthält 758 Ereignisdokumentationen. Dieser Datensatz ist sehr umfangreich und unvollständig. Damit eine statistische Analyse durchgeführt werden kann, ist ein konsistenter Datensatz notwendig.

6.1 Komprimierter Datensatz

Damit ein konsistenter Datensatz erstellt werden konnte, wurden als wesentlich erachtete Parameter (Kapitel 6.3) nach definierten Kriterien ausgewählt. Nachfolgend werden die Kriterien, welche zur Selektion der Parameter herangezogen wurden, erklärt. In den nachfolgenden Analysen (Analyse Teil 1) wurden zusätzlich (sofern möglich) individuell aufbereitete Datensätze des ursprünglichen Datensatzes (758 Ereignisdokumentationen) zur Vergleichbarkeit erstellt. Im Analyse Teil 2 wurde nur mit dem konsistenten Datensatz gearbeitet.

Gemeinde	Anzahl
Sachseln	280
Trub	122
Flühli	90
St. Antönien	69
Rehetobel	44
Wald	39
Horrenbach-Buchen	38
Sumvitg	35
Trogen	23
Rüschegg	3
Schangnau	3
Sumiswald	3
Köniz	2
Oberegg	2
Vals	2
Reute (AR)	1
Wattenwil	1
Zürich	1
Gesamt	758

Tabelle 1: Tabelle mit der Anzahl von flachgründigen Rutschungen der jeweiligen Gemeinde des nicht komprimierten Datensatzes (N=758)

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, gibt es eine Vielzahl von Gemeinden, welche im Rahmen der Ereignisdokumentationen erfasst wurden. Des Weiteren wurden bei mehreren Parametern,

Daten nicht eingetragen und nicht erfasst. Bei der Erstellung des konsistenten Datensatzes wurden folgende Kriterien beachtet:

1. jene Parameter, welche eine Anzahl an Eintragungen unter 599 (Anzahl der Eintragungen des Parameters Menge der Wasserführung im Untergrund; dies ist jener Parameter, welcher die niedrigste Anzahl an Eintragungen der als wesentlich erachteten Parameter aufwies) aufweisen, wurden nicht berücksichtigt; hierbei sollte eine hohe Eintragungsdichte vorhanden sein, damit nicht zu viele Ereignisdokumentationen gelöscht werden müssen
2. besonders wichtige Parameter, wie Ausmaße einer flachgründigen Rutschung, Datum, Geologie, Morphologie, Vegetation, Bodenentwicklung, Wasserführung in der Rutschung, Niederschlag etc. mussten vorhanden sein; bei diesen war es jedoch so, dass diese Parameter meist deutlich über 599 Eintragungen vorzuweisen hatten
3. um die Zusammenhänge zwischen spontane Rutschungen und Hangmuren erforschen zu können, musste der Parameter Auslaufstrecke zwingend im konsistenten Datensatz vorhanden sein; dieser enthält jedoch nur 303 Eintragungen

Primäres Ziel bei der Erstellung eines komprimierten und vollständigen Datensatzes ist die Erhaltung möglichst vieler Prozessparameter, um eine ausreichend gute Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Nach Durchführung eines Selektionsprozesses unter Einhaltung der definierten Kriterien konnte ein konsistenter Datensatz mit 116 flachgründigen Rutschungen aus 3 Gemeinden aus dem Jahr 2005 vom 22.08. bis zum 23.08 erstellt werden. Um eine gute Differenzierbarkeit der Ergebnisse unter Berücksichtigung der jeweiligen relevanten lokalen Unterschiede der Gemeinden (Kapitel 6.5) zu erhalten, wurden die flachgründigen Rutschungsprozesse in den nachfolgenden Analysen jeweils in die Gemeinden, in denen sie stattgefunden haben, getrennt.

Die in der Software Microsoft Excel 2019 aufbereiteten Daten wurden vor allem mithilfe von Boxplot Diagrammen, Streudiagrammen, Kreuztabellen und Histogrammen analysiert. Die Wahl eines zur Auswertung für einen beliebigen Parameter herangezogenen Diagrammes orientierte sich am individuellen Potential zur besten Veranschaulichung des Informationsgehaltes der jeweiligen Daten. Dabei konnten Minimalwerte, Maximalwerte, Mittelwerte, Werte des 1. und 3. Quartils sowie relative und absolute Häufigkeiten ermittelt

werden. Ein zu den jeweiligen Auswertungen verfasster Analysetext soll zur besseren Vergleichbarkeit der Werte beitragen.

Gemeinde	Anzahl flachgründige Rutschungen
Flühli	42
St. Antönien	38
Trub	36
Gesamt	116

Tabelle 2: Tabelle mit Anzahl von flachgründigen Rutschungen in den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub (N=116)

6.2 Überblick der Datensätze

Um eine Datenauswertung von flachgründigen Rutschungen erstellen zu können, wurden verschiedenste Analysen mit Informationen des vollständigen komprimierten Datensatzes durchgeführt. Ergänzend dazu wurden Analysen des unvollständigen und umfangreichen Datensatzes durchgeführt. Jene Parameter, die in diesem Fall miteinander in Beziehung gebracht bzw. ausgewertet wurden, wurden individuell aufbereitet, damit eine Analyse möglich wurde. Sämtliche Analysen wurden mit der Software Microsoft Excel 2019 durchgeführt.

-komprimierter und vollständiger Datensatz von 116 Ereignisdokumentationen aus den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub aus dem Unwetterjahr 2005 (davon 112 flachgründige Rutschungen am 22.08.2005 (in allen Gemeinden) und 4 flachgründige Rutschungen (St. Antönien) am 23.08.2005)

-nicht komprimierter und unvollständiger Datensatz mit 758 Ereignisdokumentationen aus mehreren Gemeinden (Tabelle 1) aus den Jahren 1997 bis 2019

6.3 Parameter des Datensatzes

Die Beurteilung des Rutschhanges wird in 3 Beurteilungsräume untergliedert (Abbildung 10): (WSL/BAFU/AGN 2018:6)

- Raum 1: eigentliche Rutschfläche
- Raum 2: Beurteilung im Bereich des Anrisses der flachgründigen Rutschung (Fläche von ca. 30 x 50 m)
- Raum 3: Umfeld des Rutschhanges (Fläche von ca. 100 x 100 m)

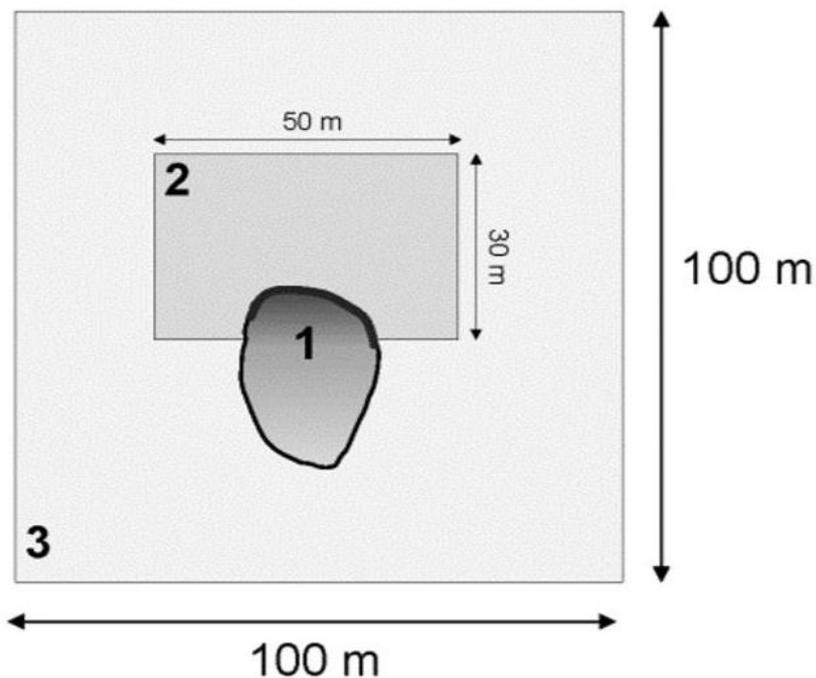


Abbildung 10: Beurteilungsräume der erfassten Daten (WSL/BAFU/AGN 2018:6)

Folgende Daten des komprimierten Datensatzes wurden erfasst:

Beurteilungsraum 1:

- Höhenlage, Exposition, Koordinaten (am oberen Anrissrand)
- Abmessungen der Rutschungen wie Länge, Breite, Anrissmächtigkeit, Anrissfläche, Neigung
- Durchführung eines Bodenprofils (Parameter Bodenentwicklung)
- Mechanismus der flachgründigen Rutschung, Wasserführung in der flachgründigen Rutschung, Hauptlithologie, Ort der Gleitfläche (beurteilt in der Rutschfläche)

Beurteilungsraum 2:

- Hydrologie: Hydrologie Standort, Hydrologie Einzugsgebiet
- Anzeichen alter Rutschbewegungen

Beurteilungsraum 3:

- Morphologietyp

-Vegetationsart (untergliedert in Freiland oder Wald)

Zusätzlich wurde für jedes Ereignis der Gemeindegemeinde, das Ereignisdatum, Lage der Geologie, die Auslaufstrecke, Niederschlagssumme und Dauer des Niederschlages erhoben. Außerdem wurden ein Längenprofil, eine Lageskizze und ein Bodenprofil erstellt sowie die flachgründige Rutschung fotografiert.

6.4 Gliederung der Analyse

Im ersten Teil der Analyse wurden alle Ereignisse als flachgründige Rutschungen erachtet. Hierbei erfolgte keine Untergliederung in spontane Rutschungen und Hangmuren. Im zweiten Teil der Analyse wurde eine Untergliederung in spontane Rutschungen und Hangmuren (Kapitel 5.3) durchgeführt. Folgende Kriterien wurden für die Identifizierung einer Hangmure oder spontanen Rutschung herangezogen. Dafür wurde jedes Ereignis individuell analysiert.

1. Kriterium: Auslaufstrecke

-die Auslaufstrecke $L_{\text{Ausl.}}$ ist mindestens doppelt so groß wie die Länge L_R der flachgründigen Rutschung (Tendenz Hangmure)

-die Auslaufstrecke $L_{\text{Ausl.}}$ ist nicht mindestens doppelt so groß wie die Länge L_R der flachgründigen Rutschung (Tendenz spontane Rutschung)

2. Kriterium: visuelle Begutachtung der Fotos der 116 Ereignisdokumentationen im Hinblick auf die Lockergesteinsmasse

-nicht kompakte Schollen bzw. „Inseln“ erkennbar (Tendenz Hangmure)

-überwiegend kompakte Schollen erkennbar (Tendenz spontane Rutschung)

-Lockergesteinsmasse überwiegend verflüssigt (Tendenz Hangmure)

-Lockergesteinsmasse nicht überwiegend verflüssigt (Tendenz spontane Rutschung)

3. Kriterium: Gesamteindruck unter Berücksichtigung der erhobenen Parameter

Nach Durchführung dieser Kriterien zur Identifizierung und Untergliederung in Hangmuren und spontane Rutschungen konnten 73 Hangmuren und 43 spontane Rutschungen identifiziert werden. Damit eine Hangmure als solche identifiziert wurde, mussten alle drei Kriterien die Tendenz Hangmure aufweisen. Es bleibt festzuhalten, dass die im 2. Ergebnisteil analysierten

Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure als Prozesstendenzen nach den genannten Kriterien zu verstehen sind. In der Praxis ist eine exakte Unterscheidung manchmal schwierig, da es sich nicht selten um Mischprozesse und Kombinationen beider definierter Prozessarten handelt.

6.5 Überblick über die drei Untersuchungsgemeinden

Die flachgründigen Rutschungen dieser Arbeit wurden in den Gemeinden Flühli, Trub und St. Antönien aufgenommen (Abbildung 11). Die Gemeinde St. Antönien fusionierte im Jahr 2016 mit der Gemeinde Luzein und nennt sich seither Luzein. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der Gemeindename St. Antönien verwendet, da die Daten der untersuchten flachgründigen Rutschungen aus dem Jahr 2005 stammen.

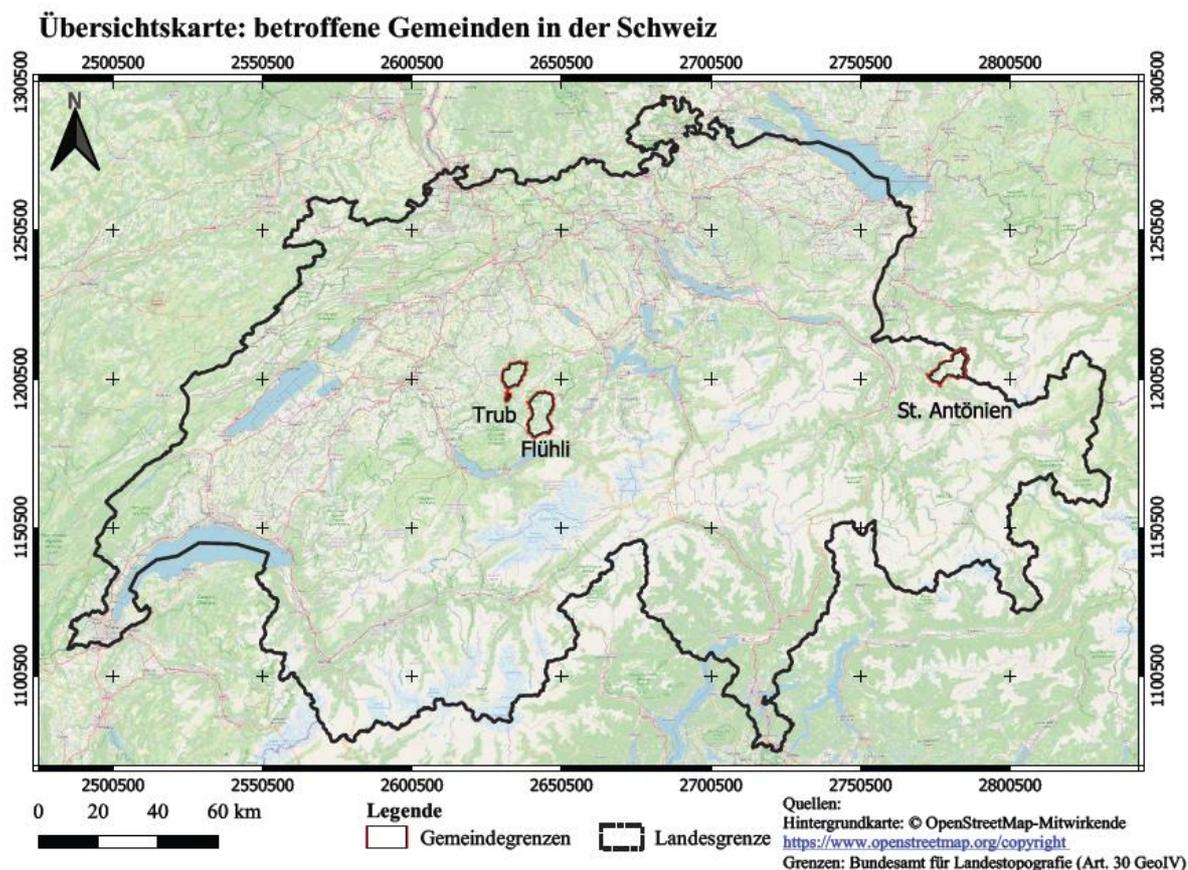


Abbildung 11: Übersichtskarte der Gemeinden in der Schweiz (eigene Darstellung)

6.5.1 Flühli

Die Gemeinde Flühli befindet sich im Kanton Luzern in der Schweiz und besitzt eine Gemeindefläche von etwa 108,17 km². Die untersuchten flachgründigen Rutschungen konzentrieren sich im nördlichen Teil der Gemeinde (Abbildung 12). Das untersuchte Gebiet in der Gemeinde Flühli hat eine Fläche von 4,26 km² (Abbildung 13).

Das Untersuchungsgebiet kennzeichnet sich durch westexponierte, ostexponierte und südostexponierte Flanken. Die westexponierte Flanke befindet sich im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, im Bereich des Brandchnubels (1413 m ü. M.). Die ostexponierten

Institut für Alpine Naturgefahren, Sommersemester 2020

bis südostexponierten Flanken befinden sich im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes, zwischen Beichlen (1770 m ü. M.) und Gsteig (1458 m ü. M.). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 832 m ü. M. bis auf 1722 m ü. M. (Rickli et al. 2008:6)

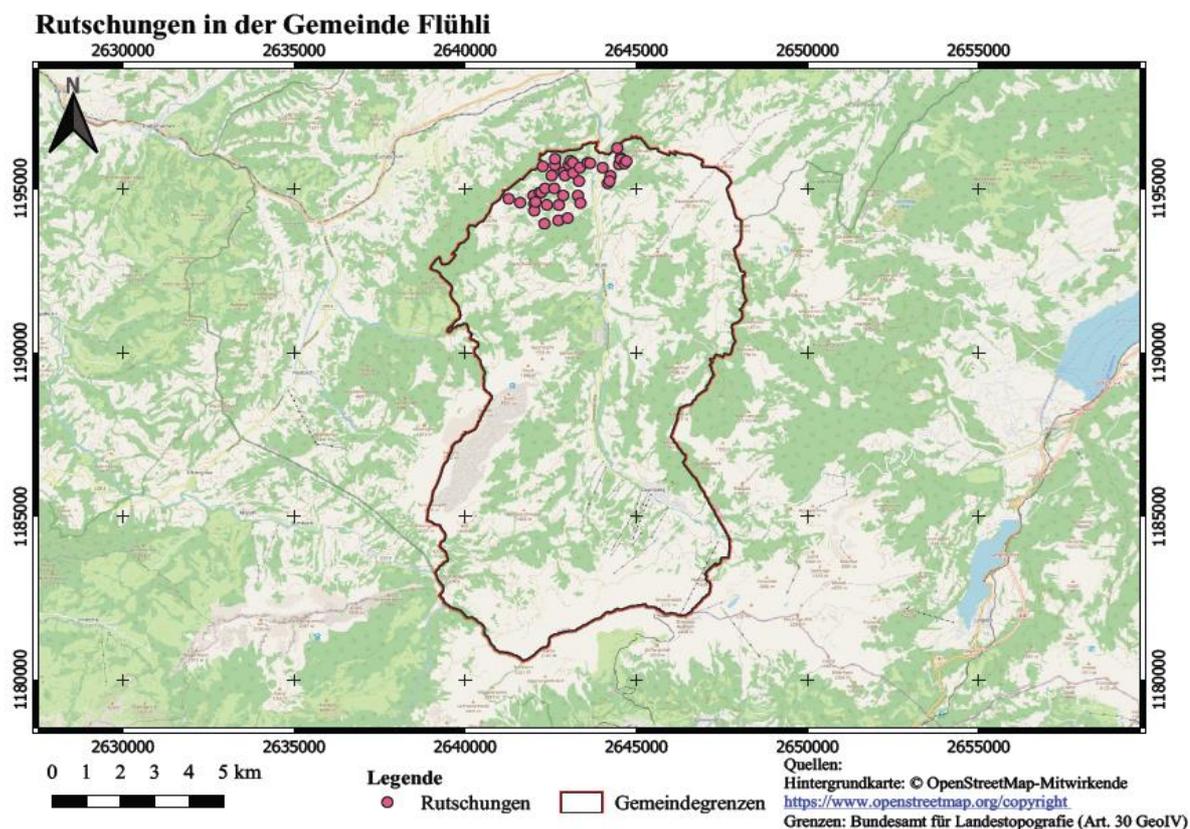


Abbildung 12: Flachgründige Rutschungen (rote Punktobjekte) im nördlichen Teil der Gemeinde Flühli (eigene Darstellung)

Ein wesentlicher Teil des Untersuchungsgebietes wird landwirtschaftlich, meistens in Form von Viehwirtschaft, genutzt. Etwa zwei Drittel des Untersuchungsgebietes sind Straßen, Siedlungen oder landwirtschaftlich genutzte Flächen. Das Untersuchungsgebiet ist nicht stark besiedelt. Vereinzelt trifft man auf Bauernhöfe. Waldflächen befinden sich oftmals in steileren Lagen und im Bereich von Runsen. Es kommen vor allem Fichtenbestände, außer im Bereich von Runsen und Bachläufen, vor. Hier kommen überwiegend Mischbestände vor. Häufig sind die Bestände geschlossen sowie gleichförmig und einschichtig aufgebaut. (Rickli et al. 2008:6f)

Die Gesteine des Untersuchungsgebietes in Flühli gehören überwiegend zur unteren Süßwassermolasse. Das Untersuchungsgebiet liegt am Alpennordrand im Gebiet der schief

gestellten und übergeschobenen Subalpinen Molasse. Dabei handelt es sich um Nagelfluh mit Mergel- und Sandsteinlagen. (Rickli et al. 2008:7)

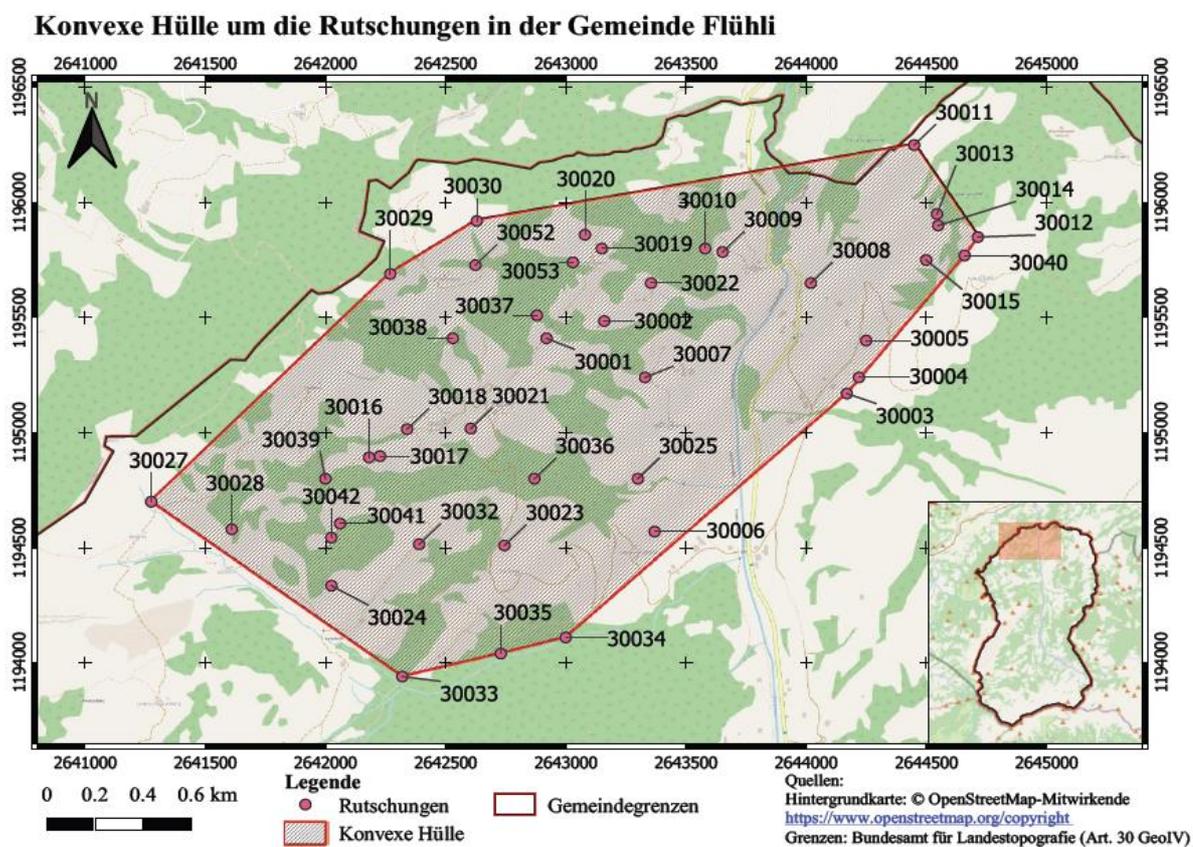


Abbildung 13: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) im Norden der Gemeinde Flühli (eigene Darstellung)

6.5.2 Trub

Die Gemeinde Trub befindet sich im Kanton Bern in der Schweiz und besitzt eine Gemeindefläche von 62 km². Die Fläche des Untersuchungsgebietes in der Gemeinde Trub beträgt 0,96 km² (Abbildung 14 und Abbildung 15).

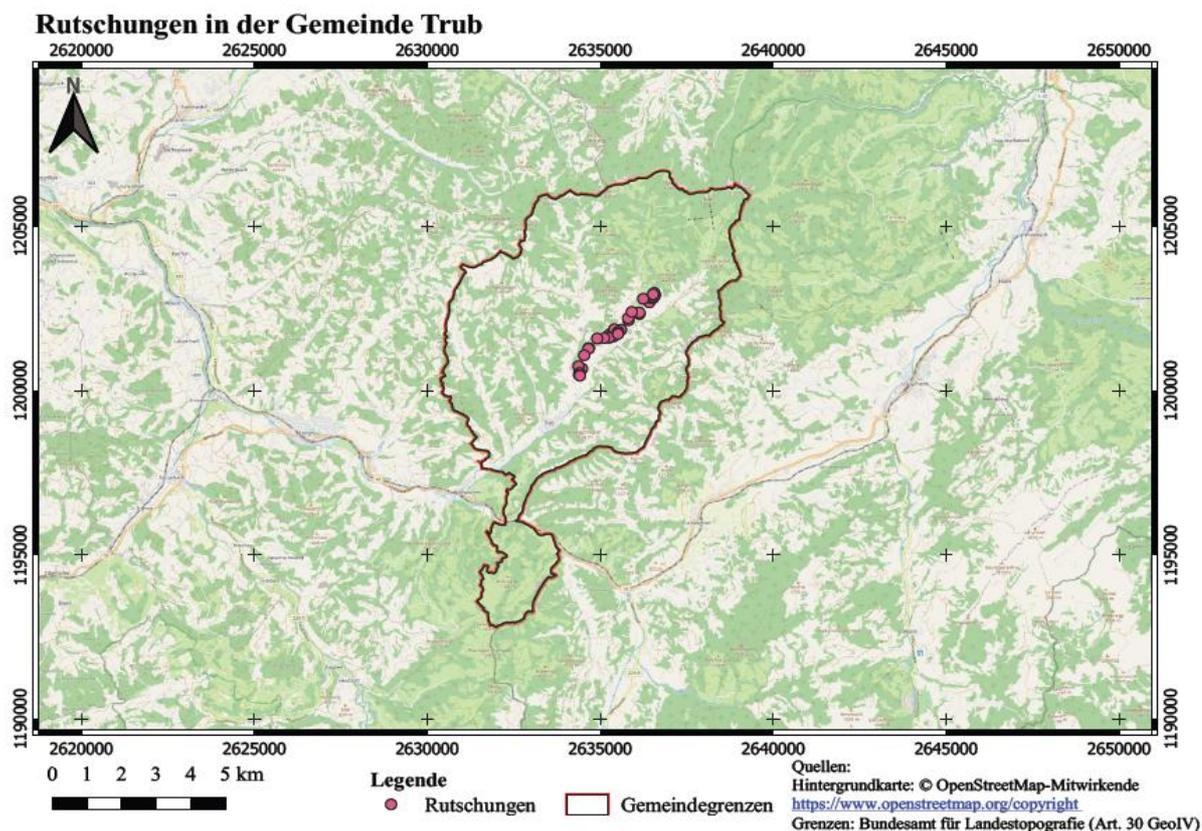


Abbildung 14: Flachgründige Rutschungen (rote Punktobjekte) in der Gemeinde Trub (eigene Darstellung)

Das Untersuchungsgebiet in Trub kennzeichnet sich durch den höchsten Punkt „Vordere Schwändiberg“ (1140 m ü. M.) und den tiefsten Punkt „Weiler Ried“ (822 m ü. M.). Außerdem ist das Untersuchungsgebiet wenig besiedelt. Die Freilandflächen befinden sich überwiegend in den niedrigeren Gebieten. Die Waldflächen befinden sich in den eher steileren Gebieten in den höher gelegenen Bereichen des Untersuchungsgebietes. Es herrschen Plenterstrukturen mit Fichte und Weißtanne vor. (Rickli et al. 2008:10)

Geologisch betrachtet befindet sich das Untersuchungsgebiet in den Napfschichten der Oberen Meeresmolasse. Es kommen vor allem Nagelfluhabfolgen, welche von siltigen/sandigen Abfolgen unterbrochen sind, vor. (Rickli et al. 2008:11)

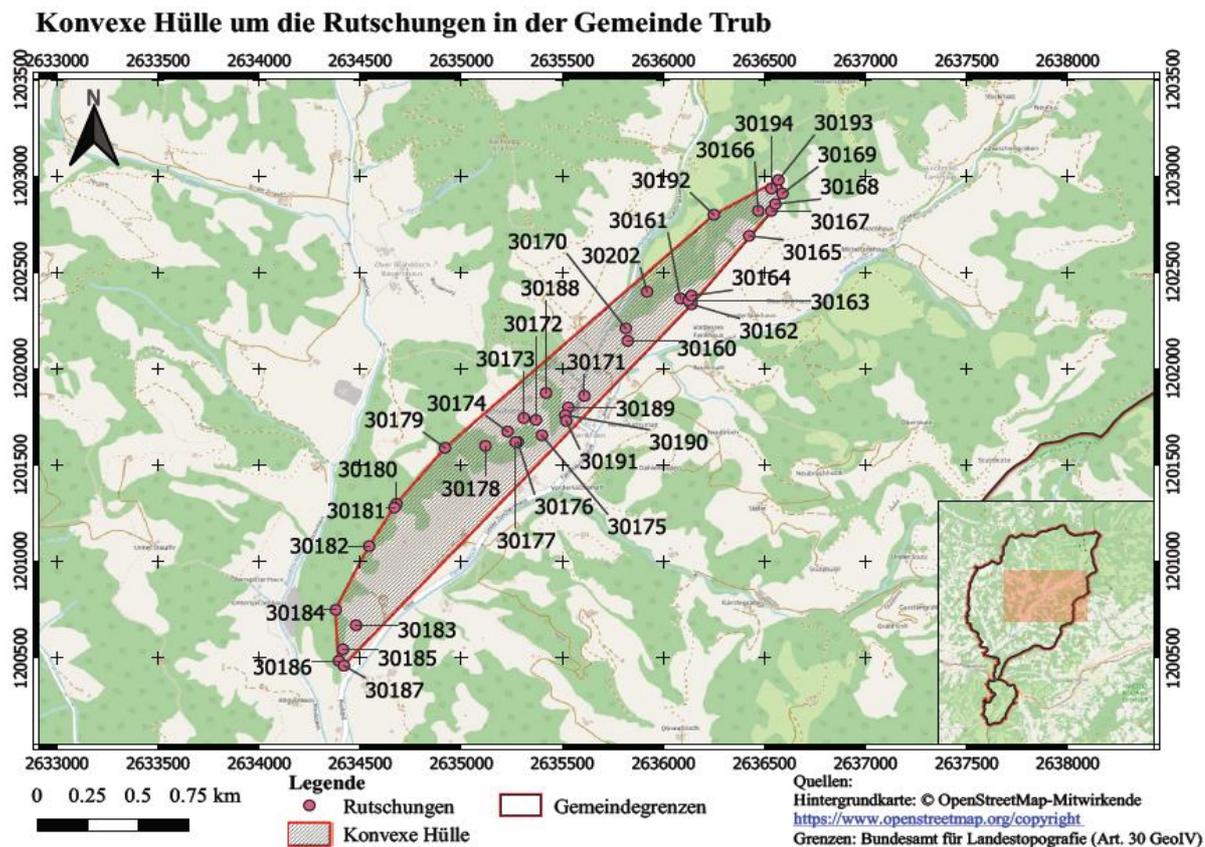


Abbildung 15: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) in der Gemeinde Trub (eigene Darstellung)

6.5.3 St. Antönien

Die Gemeinde St. Antönien befindet sich im Kanton Graubünden in der Schweiz und besitzt eine Gemeindefläche von 52,28 km². Die Gemeinden St. Antönien und Luzein wurden im Jahr 2016 zusammengelegt. Heute heißt die Gemeinde Luzein. In den durchgeführten Untersuchungen und Analysen wird jedoch der Gemeindefname St. Antönien verwendet. Das Untersuchungsgebiet der Gemeinde St. Antönien besitzt eine Fläche von 2,17 km² (Abbildung 16 und Abbildung 17).

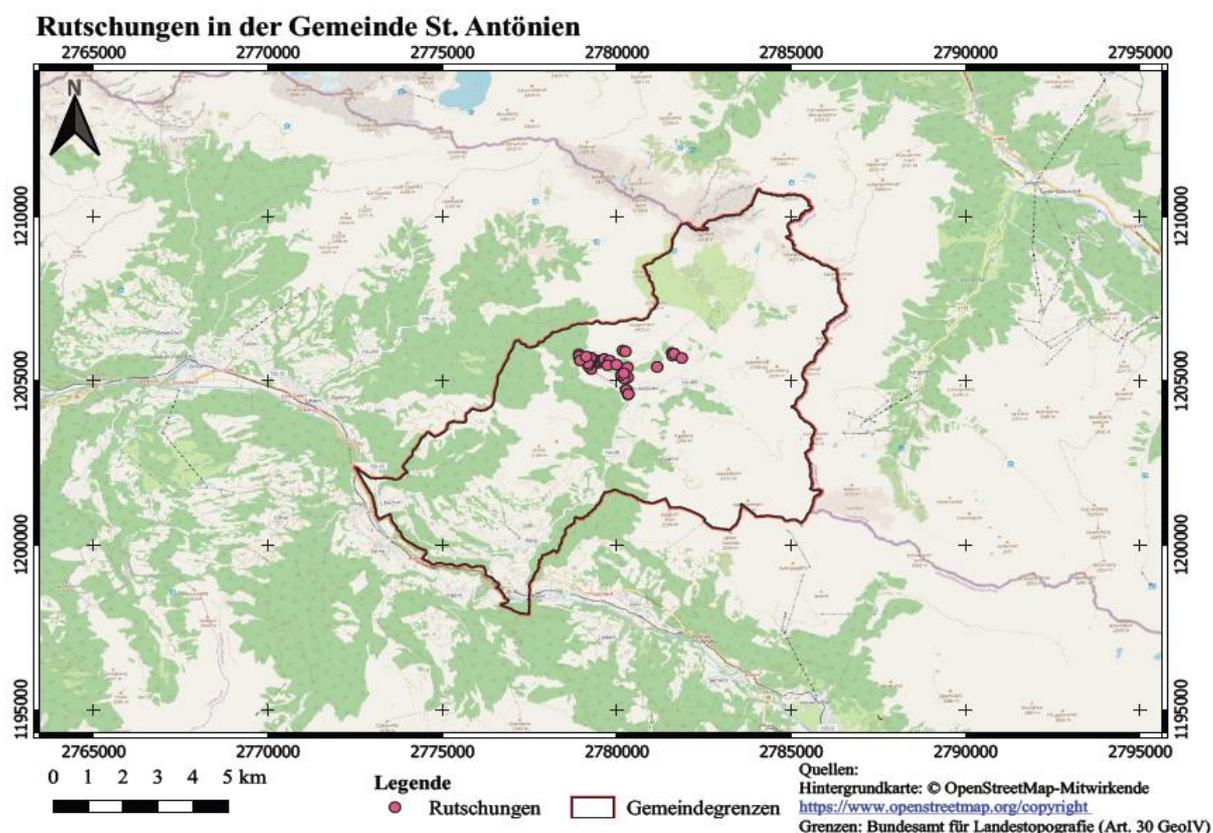


Abbildung 16: Flachgründige Rutschungen (rote Punktoobjekte) in der Gemeinde St. Antönien (eigene Darstellung)

Das Gebiet kennzeichnet sich durch Neigungsverhältnisse, welche im Bereich von 25° bis 40° liegen. Ausgenommen davon sind die etwas flacheren Talböden. Außerdem liegt das Gebiet auf einer Meereshöhe von 1380 m ü. M. am Schanielabach und reicht bis auf eine Höhe von 2413 m ü. M. beim Chüenihorn. Das Untersuchungsgebiet ist süd – bis südostexponiert und das Freiland des Untersuchungsgebietes setzt sich einerseits aus Siedlungen, Straßen und unproduktiven Flächen und andererseits aus landwirtschaftlichen Flächen zusammen. Auf diesen landwirtschaftlichen Flächen wird vor allem Viehwirtschaft betrieben. (Rickli et al. 2008:8)

Die Waldflächen des Untersuchungsgebietes in der Gemeinde St. Antönien befinden sich zwischen 1600 m und 2000 m Meereshöhe. Ehemals vorgenommene Aufforstungen findet man im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Vor allem in Bachtelen, Schlüecht und Püschchen. Starkholz ist eher im Westen des Untersuchungsgebietes anzutreffen. Hier im Bereich Leidwald, Rotwald und Hundmeder. Diese Bestände mit Starkholz, welche mehrheitlich aus Fichten bestehen, sind bis auf eine Meereshöhe von 1750 m einschichtig sowie geschlossen. In höhere Lagen sind die Bestände stufig und kennzeichnen sich durch Rottengefüge. (Rickli et al. 2008:9)

Geologisch betrachtet, liegt das Untersuchungsgebiet im Bereich des Prättigauer Flysch. (Rickli et al. 2008:9)

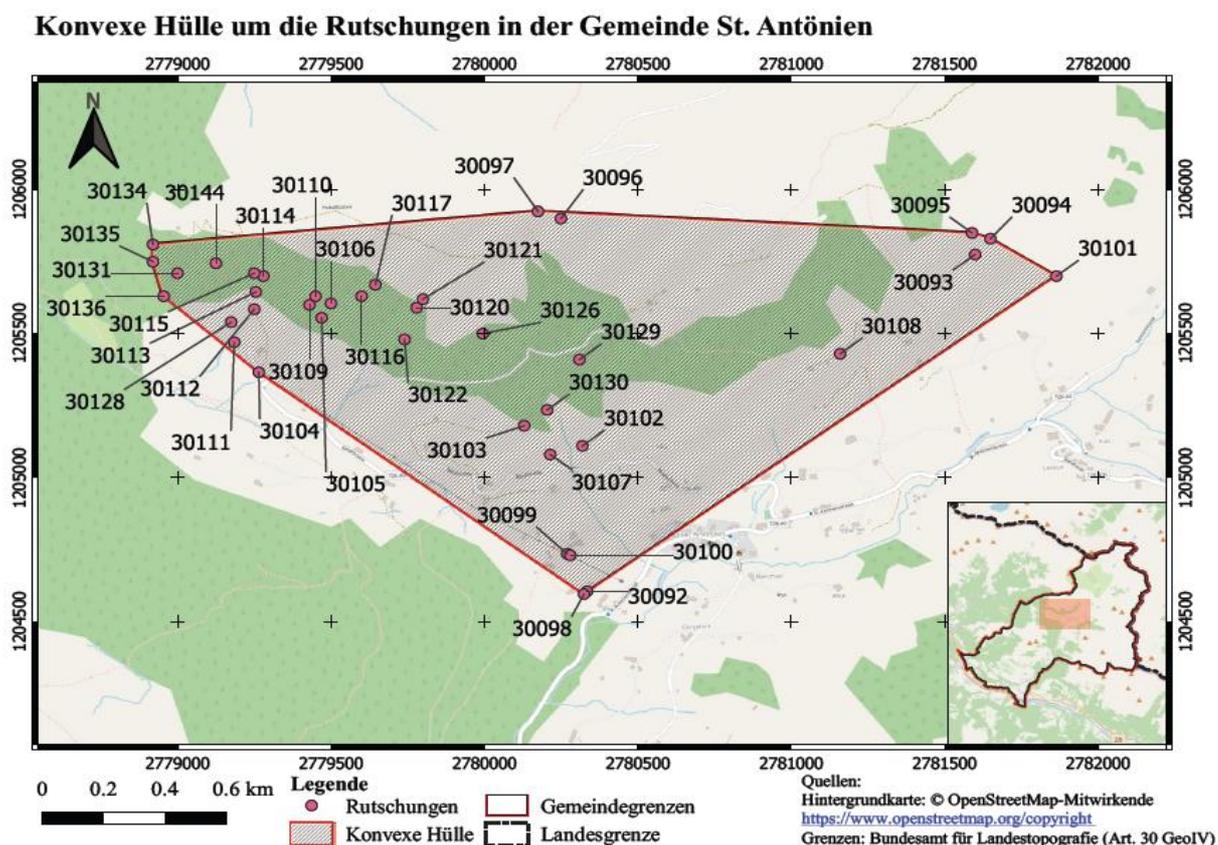


Abbildung 17: Untersuchtes Gebiet der entstandenen flachgründigen Rutschungen (rote Punktobjekte mit Beschriftung) in der Gemeinde St. Antönien (eigene Darstellung)

6.6 Starkniederschlagsereignis im August 2005 in der Schweiz

Die Unwetter dauerten insgesamt vom 18.-23. August 2005. Der Grund für das Zustandekommen des Starkniederschlags im August 2005 war ein Tiefdrucksystem, welches sich über einen längeren Zeitraum stabil südlich der Alpen befand. Dieses Tiefdrucksystem führte zu großflächigen und starken Niederschlägen im Bereich des Alpennordhangs von den Berner Alpen über die Zentralschweiz und Gebieten in Graubünden bis nach Bayern und Österreich. (Bezzola et al. 2007:19)

Dabei wurde durch das Tiefdruckgebiet, welches sich südlich der Alpen befand, eine feuchte und warme Luftmasse aus dem Mittelmeerraum über die Alpen transportiert. Nordöstlich eintretende Winde verursachten eine Zurückführung und eine Stauung dieser Luftmassen im Bereich des Alpennordhangs. Als sich diese feuchte und warme Luft aus dem Mittelmeerraum mit kühler Luft aus der Nordsee traf, kam es zu den starken Niederschlägen vom 21. – 23. August 2005. (Rickli et al. 2008:13)

Generell ist festzuhalten, dass in der ersten Hälfte des Monats August im Jahr 2005 mehrere Niederschlagsereignisse stattgefunden haben und somit die hydrologische Ausgangssituation der Böden dementsprechend beeinflusst wurde. Es konnte festgestellt werden, dass bereits bis zum 15. August 2005 in großen Gebieten der nördlichen Voralpen (Ostschweiz und Zentralschweiz) mehr als 75 % der im Durchschnitt sich ereignenden Regenmenge im August gefallen sind. Wenige Tage vor dem Starkniederschlagsereignis, am 14. – 15. August, konnten Niederschläge am zentralen Alpennordrand von 40 mm und mehr beobachtet werden. (Bezzola et al. 2007:19f)

Tag	Trub ¹ (Napf) (in mm)	Flühli ² (in mm)	St. Antönien ² (in mm)
18.08.2005	5,9	7,3	2,6
19.08.2005	21,5	28,7	23,5
20.08.2005	36,7	56,3	18,4
21.08.2005	126,7	57,2	13,4
22.08.2005	50,9	112,9	116,4
23.08.2005	0	1,6	10,4
18.08-23.08	241,7	264	184,7

Tabelle 3: Gemessene Niederschlagsmengen vom 18. bis 24.08.2005; Tagessummen 0540 – 0540 Uhr UTC Folgetag in mm. Quelle: MeteoSchweiz. 1ANETZ-Station, 2Tagessammler.

In Flühli und in St. Antönien wurden insgesamt 264 mm und 185 mm Niederschlag vom 18.08 – 23.08 von Tagessammlern der Meteo Schweiz gemessen, wovon am 22.08. in Flühli 112,9 mm und in St. Antönien 116,4 mm abgingen. (Rickli et al. 2008:14)

In Trub erfolgte die Niederschlagsmessung von einer sich auf dem Napf befindlichen ANETZ – Station der Meteo Schweiz (Distanz etwa 5 km), wobei am 21.08 der größte Anteil mit 126,7 mm gefallen ist. (Rickli et al. 2008:14)

6.7 Überblick über die Abmessungen der flachgründigen Rutschungen

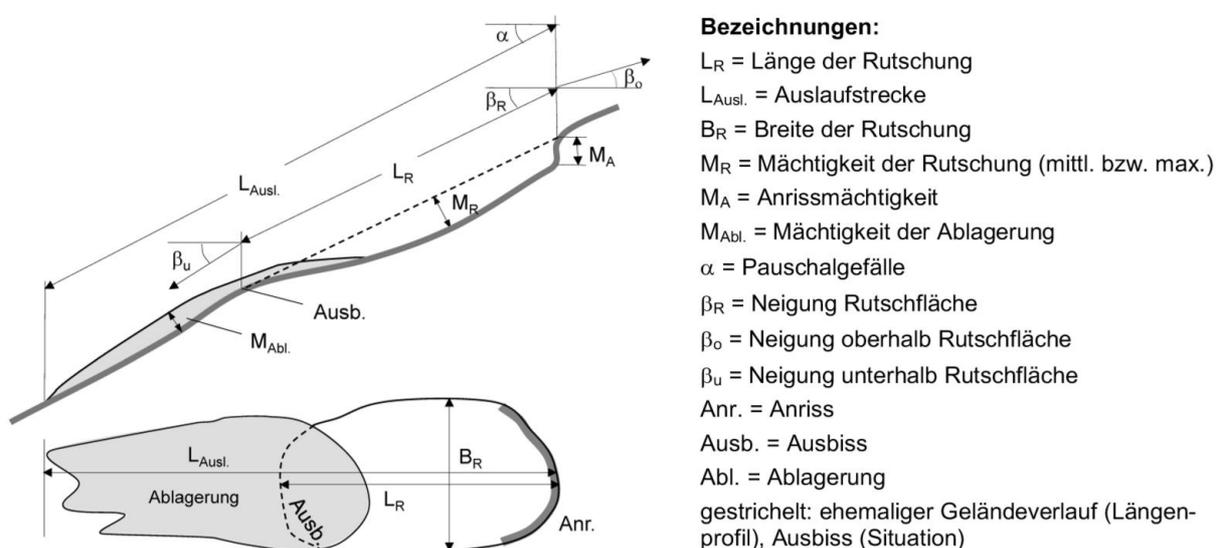


Abbildung 18: Überblick über die verschiedenen Abmessungen einer flachgründigen Rutschung (WSL/BAFU/AGN 2018:4)

Im Rahmen der Feldarbeiten zur Abmessung der flachgründigen Rutschungen wurde versucht eine Vielzahl von Parametern (Abbildung 18) aufzunehmen. Die gemessenen Werte wurden mit dem MAO – Code ergänzt. (WSL/BAFU/AGN 2018:4)

7 Analyse Teil 1

7.1 Neigung des Hanges (Rutschfläche)

Die Neigung der Hänge (β_R) (Abbildung 18) wurde einige Meter oberhalb des Anrisses bis einige Meter unterhalb des „Ausbisses“ gemessen. (WSL/BAFU/AGN 2018:5)

In Abbildung 19 wurde ein Kastendiagramm mit den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub erstellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Mittelwerte bei allen 3 Gemeinden ähnlich sind und nur gering voneinander abweichen. Die minimale Neigung beträgt 19° , gemessen in Flühli. Die maximale Neigung beträgt 45° . Diese wurde in der Gemeinde Trub gemessen. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, beträgt der Wert des oberen Quartils in der Gemeinde Trub $38,75^\circ$, welcher etwas erhöht gegenüber den Werten in der Gemeinde Flühli mit $34,25^\circ$ und der Gemeinde St. Antönien mit $34,5^\circ$ ist. Dies bedeutet, dass in der Gemeinde Trub 75% aller flachgründigen Rutschungen in einer Neigung bis $38,75^\circ$ stattgefunden haben. 25% aller flachgründigen Rutschungen in der Gemeinde Trub ereigneten sich in einer Hangneigung, welche größer als $38,75^\circ$ war.

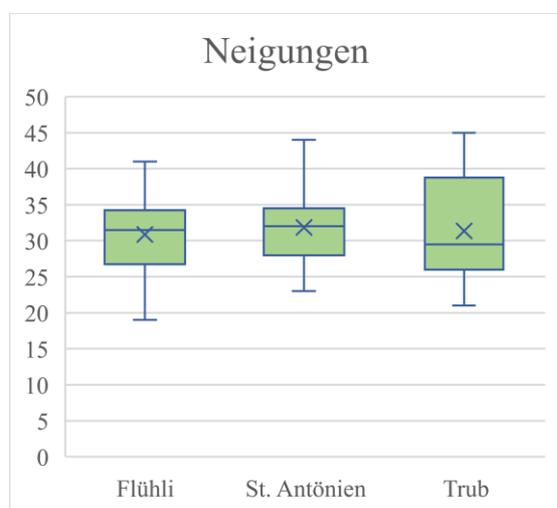


Abbildung 19: Kastendiagramm der Neigungen (in Grad) in den Gemeinden (N=116)

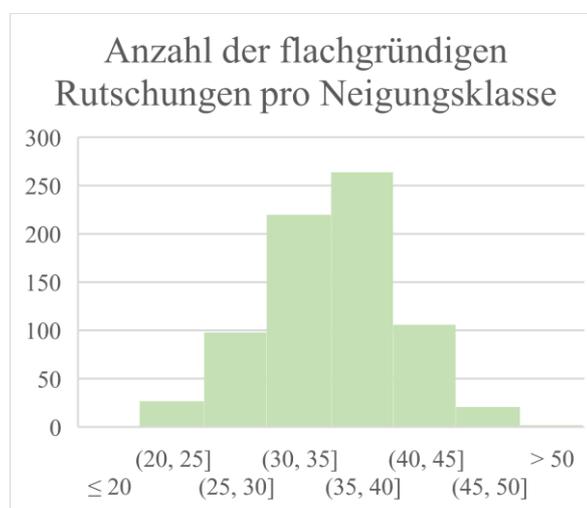


Abbildung 20: Diagramm mit Neigungsklassen (in Grad) aller flachgründigen Rutschungen (N=739)

Nach einer Analyse der Hangneigung aller vorhandenen Ereignisdokumentationen (Abbildung 20) ist zu erkennen, dass 264 flachgründige Rutschungen in einer Hangneigung von 35° bis 40° stattgefunden haben. 220 flachgründige Rutschungen fanden in einer Hangneigung von 30° bis 35° statt. Es fanden nur eine flachgründige Rutschung unter 20° und nur zwei flachgründige Rutschungen über 50° statt.

Der Mittelwert aller vorhandenen flachgründiger Rutschungen (N=739) liegt mit einem Wert von $35,73^\circ$ über den Mittelwerten der Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub. Die minimale Neigung liegt bei 19° und die maximale Neigung bei 54° . Der Wert der maximalen Neigung aller flachgründiger Rutschungen liegt somit über dem Wert der maximalen Neigung der Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub.

	min. Neig.	max. Neig.	Mittelwert	Median	unteres Quartil	oberes Quartil
Flühli	19	41	30,86	31,5	26,75	34,25
St. Antönien	23	44	31,84	32	28	34,5
Trub	21	45	31,33	29,5	26	38,75

Tabelle 4: Tabelle mit statistischen Werten der Hangneigung (in Grad) in den Gemeinden (N=116)

Der Parameter Hangneigung ist ein wichtiger Faktor, wenn es um Beurteilungen von Gefahrenpotentialen geht. Diesbezüglich sind vor allem die minimalen und maximalen Neigungen einer Gemeinde von Bedeutung. Die Unterschiede der Gemeinden sind hierbei jedoch gering (Tabelle 4).

7.2 Höhenlage und Exposition

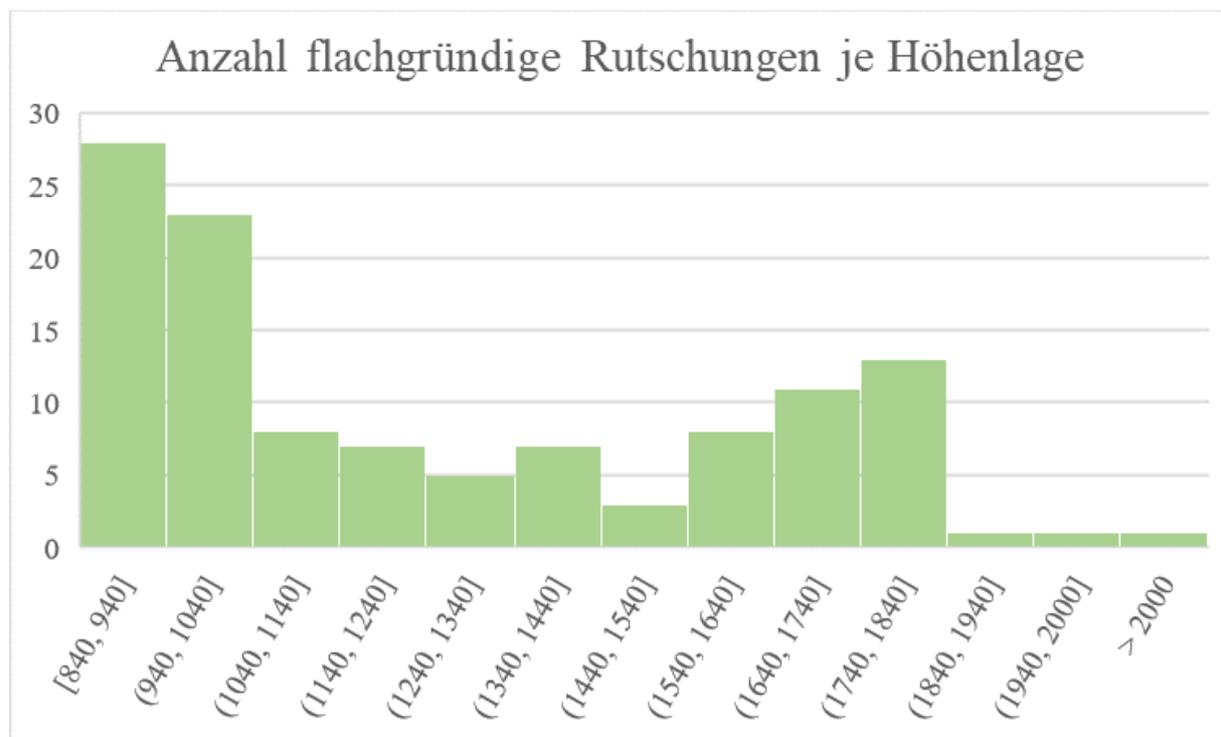


Abbildung 21: Anzahl flachgründige Rutschungen je Höhenlage (m) in den Gemeinden Flüeli, St. Antönien und Trub des komprimierten Datensatzes (N=116)

Beim Parameter Höhenlage einer flachgründigen Rutschung wurde für jedes Ereignis die Höhe über Meer bestimmt. Die Messung fand diesbezüglich am oberen Anrissrand statt.

(WSL/BAFU/AGN 2018:4)

Die Analyse des Parameters Höhenlage in den Gemeinden Flüeli, St. Antönien und Trub zeigt eine Häufung in einer Höhenlage von 840 m und 1040 m (Abbildung 21). Demnach fanden 43,97 % der Ereignisse in diesem Höhenlagenbereich statt. Ein leichter Anstieg der stattgefundenen Ereignisse ist auch im Höhenlagenbereich 1640 m bis 1840 m zu erkennen. Unter 840 m Höhe fand kein Ereignis statt. Über 2000 m Höhe fand nur ein Ereignis statt.

Exposition (Häufigkeiten)								
N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Total
54	82	53	117	108	91	64	123	692

Tabelle 5: Tabelle mit Exposition (in Grad) und Anzahl an flachgründigen Rutschungen (N=692)

Beim Parameter Exposition wurden die Hangrichtungen des nicht komprimierten Datensatzes herangezogen und individuell bearbeitet, um einen besseren Überblick zu bekommen. In den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub kommen einige Hangrichtungen fast gar nicht vor. Bei den Hauptrichtungen Nord, Ost, Süd und West wurden jeweils 10 Grad hinzu- und weggezählt. Das bedeutet, bei einem Nordhang wurden alle Werte erfasst, welche innerhalb von 350 Grad bis 10 Grad liegen. Bei einem Osthang beispielsweise mussten die Werte zwischen 80 Grad und 100 Grad liegen. Werte, welche zwischen den Hauptrichtungen lagen, wurden als NO, SO, SW oder NW Hänge klassifiziert.

Demnach kommen am meisten flachgründige Rutschungen in NW – Hängen vor. Auch bei den Hangrichtungen SO und S kommen vergleichsweise viele Rutschungen vor. Am wenigsten flachgründige Rutschungen ereigneten sich in den Hangrichtungen N und O. Generell ist der Einfluss der Hangrichtung auf erhöhte Rutschaktivität schwer zu beurteilen. Sicher ist, dass die Exposition des Hanges Einfluss auf verschiedene Standortfaktoren hat, wie zum Beispiel auf die Vegetation oder auf hydrogeologische Bedingungen. Klare Zusammenhänge in Bezug auf die Häufung von flachgründigen Rutschungen in verschiedenen Expositionen lassen sich nicht herstellen.

7.3 Morphologietyp

Damit die Morphologie des Geländes der stattgefundenen flachgründigen Rutschungen analysiert werden kann, wurde jeder Rutschung ein Morphologietyp zugeordnet. Die Beurteilung für den Parameter Morphologietyp fand im Beurteilungsraum 3 statt (Abbildung 10). Flachgründige Rutschungen, welche sich an Bruchkanten oder Geländekanten ereigneten, wurden dem Morphologietyp 6 (Abbildung 22) zugeordnet.

(WSL/BAFU/AGN 2018:7)

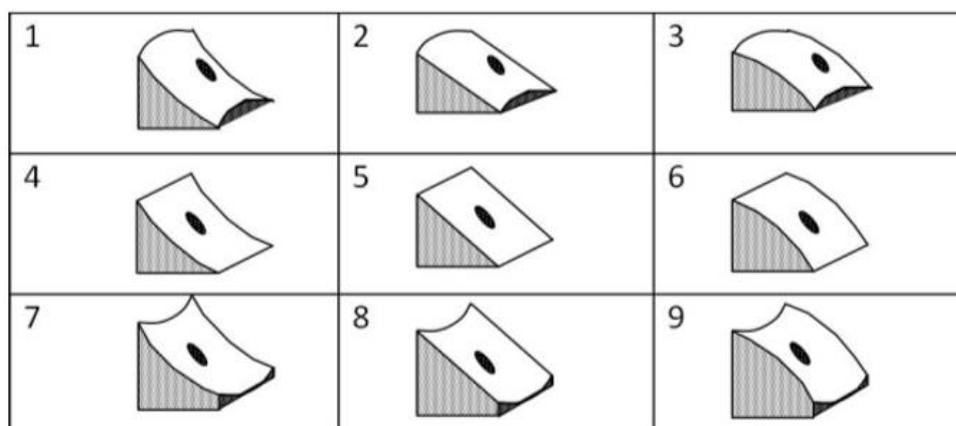


Abbildung 22: Überblick über die verschiedenen Geländeformen (WSL/BAFU/AGN 2018:7)

Die Ergebnisse des komprimierten Datensatzes zeigen, dass vergleichsweise oft flachgründige Rutschungen bei Typ 5 vorkamen. Es kamen 43,1 % aller Rutschungen in den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub bei Typ 5 vor (Abbildung 22). Keine Rutschungen kamen bei Typ 1 vor. Sehr wenige Rutschungen kamen bei Typ 4, Typ 7 und bei Typ 9 vor. Vergleicht man die Ergebnisse des komprimierten Datensatzes (Tabelle 6) mit denen des nicht komprimierten und individuell aufbereiteten Datensatzes (Tabelle 7) sind Tendenzen und Gemeinsamkeiten zu erkennen. Bei beiden Analysen kommen Typ 5, Typ 6 und Typ 8 vergleichsweise häufig vor.

	Flügli	St. Antönien	Trub	Total
Typ 1	–	–	–	–
Typ 2	5	3	1	9
Typ 3	5	5	–	10
Typ 4	2	1	2	5
Typ 5	15	13	22	50
Typ 6	2	9	8	19
Typ 7	2	1	1	4
Typ 8	11	6	1	18
Typ 9	–	–	1	1
Total	42	38	36	116

	Anzahl Morphologietyp
Typ 1	4
Typ 2	73
Typ 3	39
Typ 4	27
Typ 5	267
Typ 6	116
Typ 7	22
Typ 8	127
Typ 9	51
Total	726

Tabelle 6: Tabelle mit Anzahl der flachgr. Rutschungen in den Gemeinden (N=116)

Tabelle 7: Tabelle mit Anzahl der flachgr. Rutschungen (N=726)

7.4 Abmessungen der flachgründigen Rutschungen

Teil einer jeden Ereignisdokumentation war das Aufnehmen bestimmter Maße einer flachgründigen Rutschung (Abbildung 18). Dabei wurde die Länge, die Breite, die Anrissfläche, die Anrissmächtigkeit und das Volumen einer Rutschung bestimmt.

Bei der Länge der Rutschung L_R wurde die maximale Distanz zwischen dem Anriss und dem Ausbiss (Gleitflächenfront) gemessen. Die Breite einer jeden Rutschung B_R wird definiert als die längste Distanz zwischen den Flanken einer Rutschung (senkrecht zu L_R). (WSL/BAFU/AGN 2018:4)

Die Anrissmächtigkeit M_A wird als die Höhe des vertikalen Anrisses (lotrecht) im obersten Punkt (wo auch die Messung von L_R durchgeführt wird) einer Rutschung definiert. Die Anrissfläche wird mit der Länge L_R und mit der Breite B_R berechnet bzw. geschätzt. (WSL/BAFU/AGN 2018:5)

Der Parameter Volumen wurde auf Basis zweier Werte berechnet bzw. geschätzt. Diese Werte sind einerseits die Fläche der Rutschung (Länge und Breite der Rutschung) und andererseits die mittlere Mächtigkeit der Rutschung. Die mittlere Mächtigkeit wurde als mittlere Distanz zwischen ehemaliger Geländeoberfläche (senkrecht) und Gleitfläche gemessen. (WSL/BAFU/AGN 2018:5)

		Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Flühli	Länge (m)	8	64	24,16	20	15	30,25
	Breite (m)	8	35	14,75	12,75	11	16,58
	Anrissfläche (m ²)	42	1400	274,1	194	124,5	363,75
	Anrissmächtigkeit (m)	0,3	2	0,98	1	0,7	1,2
	Volumen (m ³)	30	2800	328,81	166,5	72	378,5
St.Antönien	Länge (m)	6,5	116	23,71	20	12,38	27,25
	Breite (m)	6	44	15,13	12,75	10,38	17
	Anrissfläche (m ²)	35	2600	322,47	210	109,5	297,75
	Anrissmächtigkeit (m)	0,4	1,4	0,88	0,8	0,6	1,1
	Volumen (m ³)	32	2260	256,37	126	85	192,5
Trub	Länge (m)	7	40	18,1	15,25	12	20,75
	Breite (m)	7,5	68	17,96	15	10	20,75
	Anrissfläche (m ²)	88	2016	283,53	154	88	334,5
	Anrissmächtigkeit (m)	0,3	1,6	0,76	0,8	0,6	0,9
	Volumen (m ³)	26	5443	330,5	111,5	57,25	290

Tabelle 8: Tabelle mit statistischen Werten der Längen, Breiten, Anrissflächen, Anrissmächtigkeiten und Volumen des komprimierten Datensatzes (N=116)

Bezüglich der Längen der flachgründigen Rutschungen sind die Mittelwerte der Gemeinden Flühli und St. Antönien ähnlich. Der Maximalwert der Längen der Rutschungen in St. Antönien liegt mit 116 m deutlich über den Maximalwerten der Gemeinden Flühli und Trub. Der Mittelwert der Längen der Rutschungen in Trub liegt unterhalb der Mittelwerte in den Gemeinden Flühli und St. Antönien. Die Längen der Rutschungen betreffend, sind in Trub vergleichsweise kürzere Rutschungen abgegangen.

Die Rutschungen in Trub weisen jedoch eine höhere Breite (Mittelwert) im Vergleich zu den Rutschungen in Flühli und St. Antönien auf. Auch der Maximalwert liegt in Trub deutlich über den beiden Maximalwerten in Flühli und St. Antönien.

Der höchste Mittelwert in Bezug auf die Anrissflächen konnte in St. Antönien festgestellt werden. Der höchste Maximalwert der Anrissflächen ist ebenfalls in St. Antönien und liegt mit einem Wert von 2600 m² deutlich über den Maximalwerten in Flühli und Trub.

Die Anrissmächtigkeiten sind in Flühli am Höchsten. Dort wurde auch der höchste Maximalwert von 2 m gemessen.

Das mit Abstand größte Volumen wurde in Trub berechnet. Der Maximalwert beträgt in Trub 5443 m³. Geringere Unterschiede sind aus den Mittelwerten zu erkennen. Die Mittelwerte in Trub und St. Antönien sind ähnlich. Der Mittelwert in Flühli weist einen etwas geringeren Wert auf.

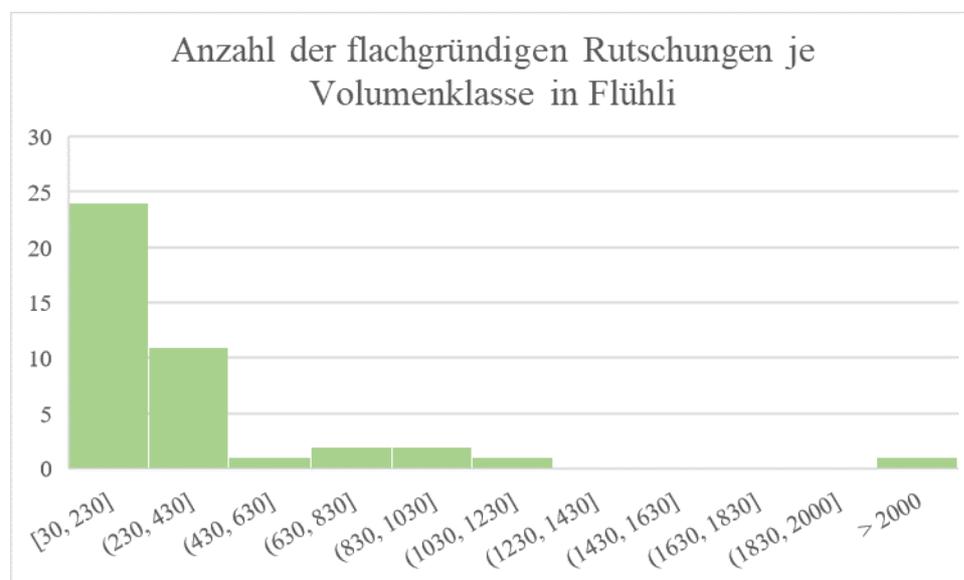


Abbildung 23: Anzahl der flachgründigen Rutschungen je Volumenklasse (m³) in Flühli (N=42)

Die Anzahl der flachgründigen Rutschungen ist besonders in der Volumenklasse 30 m³ bis 230 m³ hoch. In diesem Bereich liegen 57,14 % aller Rutschungen in Flühli. Auch die Analysen in St. Antönien und Trub zeigen eine hohe Anzahl an flachgründigen Rutschungen in der Volumenklasse 30 m³ bis 230 m³. In den nachfolgenden Volumenklassen nimmt in allen drei Gemeinden die Anzahl der flachgründigen Rutschungen ab.

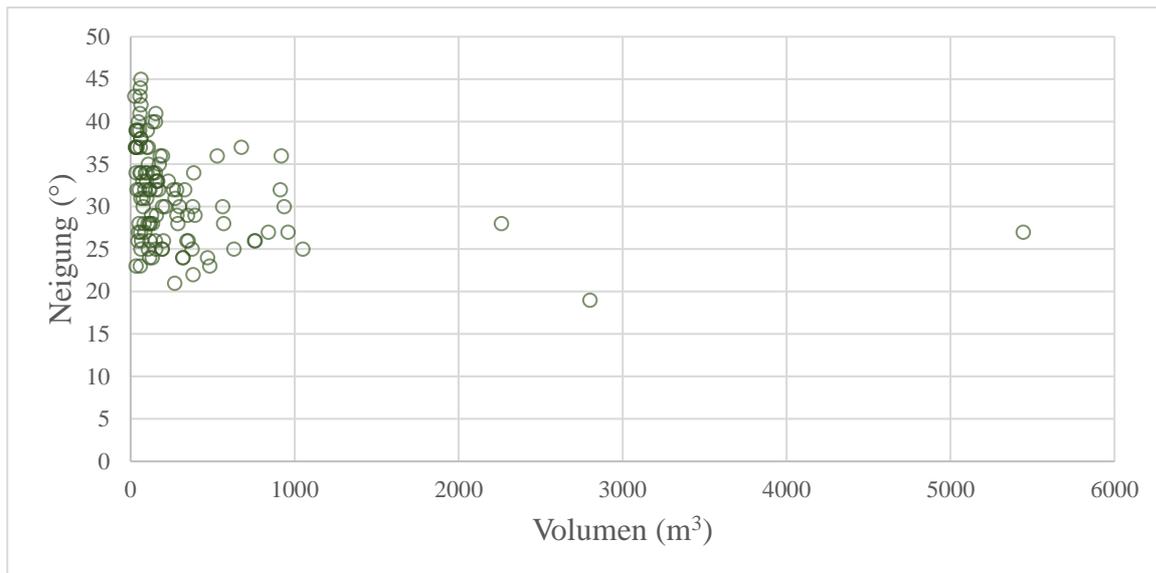


Abbildung 24: Streudiagramm mit Volumen und Neigung (N=116)

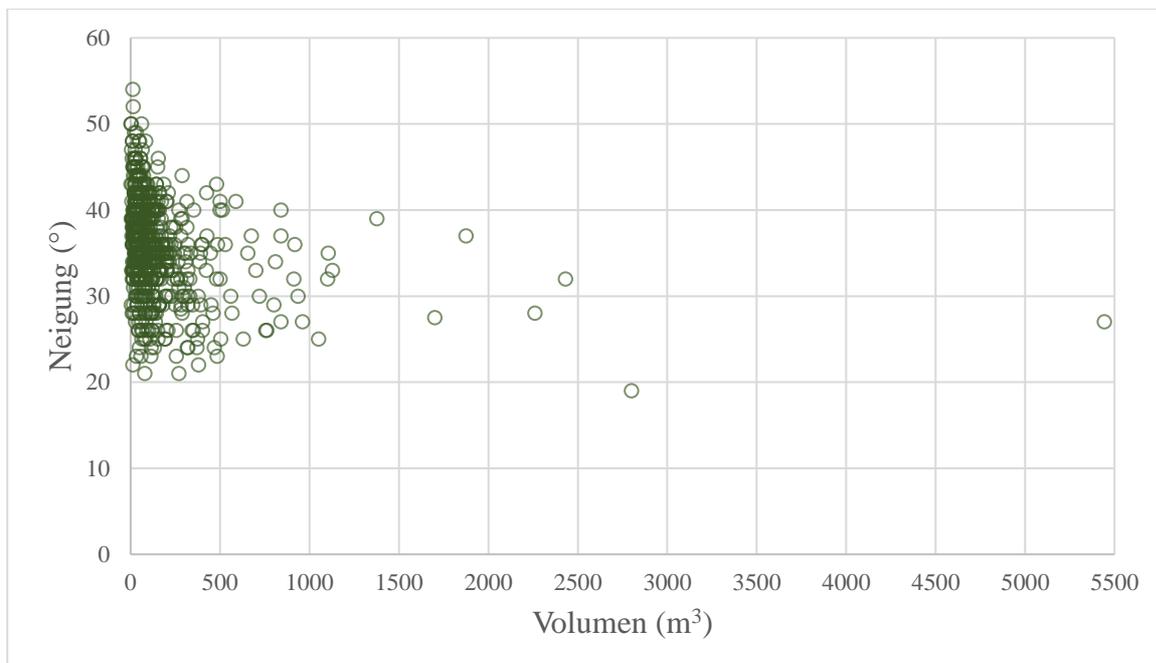


Abbildung 25: Streudiagramm mit Volumen und Neigung (N=684)

Mit Abbildung 24 und Abbildung 25 soll ein Zusammenhang zwischen Volumen und Neigung verdeutlicht werden. In Abbildung 24 wurde ein Streudiagramm mit den Parametern Volumen und Neigung des komprimierten Datensatzes erstellt. Es lässt sich einerseits die Tendenz erkennen, dass je höher die Neigung ist, flachgründige Rutschungen mit geringerem Volumen abgehen. Sinkt andererseits die Neigung, gehen flachgründige Rutschungen auch mit einem größeren Volumen ab. Diese Tendenz soll auch mit Abbildung 25 verdeutlicht werden. Hierbei wurden aus dem nicht komprimierten Datensatz, die Parameter Volumen und

Neigung individuell aufbereitet und analysiert. Die Tendenzen beider Abbildungen sind ähnlich.

7.5 Vegetationsart

Die Vegetationsart wird untergliedert in Wald bzw. Freiland. Flachgründige Rutschungen werden je nachdem, wo sie stattgefunden haben, entsprechend zugeordnet. Für die Zuordnung entscheidend ist die Lage des Anrisses. (WSL/BAFU/AGN 2018:8)

	Freiland	Wald	Total
Flühli	34	8	42
St. Antönien	22	16	38
Trub	21	15	36
Total	77	39	116

Tabelle 9: Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen je Vegetationsart in den Gemeinden (N=116)

In der Gemeinde Flühli sind vergleichsweise wenige flachgründige Rutschungen im Wald entstanden. Die Differenz zwischen im Freiland und im Wald entstandenen Rutschungen ist in den Gemeinden St. Antönien und Trub geringer (Tabelle 9). Insgesamt ist die Anzahl der im Freiland entstandenen Rutschungen aber deutlich höher.

		Min. Neig.	Max. Neig.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Flühli	Freiland	19	39	30,09	30	26	34
	Wald	26	41	34,13	34,5	28,25	39,5
St. Antönien	Freiland	23	44	30,86	30	27,5	34
	Wald	25	39	33,19	33,5	31,25	36
Trub	Freiland	21	39	27,62	27	24	30,5
	Wald	25	45	36,53	39	31	41

Tabelle 10: Tabelle mit statistischen Werten der Neigung (Grad) nach Vegetationsart und Gemeinde (N=116)

Die Ergebnisse der statistischen Neigungswerte je Vegetationsart zeigen einen Unterschied zwischen im Freiland stattfindenden und im Wald stattfindenden flachgründigen Rutschungen. Die Mittelwerte bei Rutschungen im Wald sind zum Teil (Trub) deutlich höher als jene im Freiland. Einzig der Maximalwert in St. Antönien im Wald ist geringer als jener im Freiland. Jedoch liegt der Mittelwert in St. Antönien im Wald höher als jener im Freiland.

Diese Ergebnisse zeigen einen Stabilitätseinfluss von Vegetation und Wald, wonach flachgründige Rutschungen im Wald eher in steileren Bereichen ausgelöst werden.

		Min. V.	Max. V.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Flühli	Freiland	30	2800	332,82	184,5	61,25	378,5
	Wald	60	960	311,75	155	138,5	483,5
St. Antönien	Freiland	32	2260	347,86	116	80,75	561,5
	Wald	39	210	130,56	142,5	86,75	177,5
Trub	Freiland	42	5443	462,33	118	72	318,5
	Wald	26	760	145,93	62	47	156

Tabelle 11: Tabelle der statistischen Werte von Vegetationsart und Volumen (m^3) in den unterschiedlichen Gemeinden (N=116)

Angesichts der Ergebnisse der Analyse der Volumina in untergliederte Vegetationsarten, lässt sich ein Zusammenhang zwischen Vegetationsart und Volumen erkennen. Die Volumina der flachgründigen Rutschungen im Wald sind kleiner als die Volumina der flachgründigen Rutschungen im Freiland. Im Freiland ereigneten sich die größten Rutschungen. Dies bestätigen die hohen maximalen Werte. Aber auch die minimalen Werte sind, wie in Flühli und St. Antönien, geringer als jene im Wald. Einzig in Trub ist der Minimalwert im Wald geringer als im Freiland. Die Mittelwerte sind im Freiland in Trub und St. Antönien deutlich höher als im Wald. Der Mittelwert in Flühli im Freiland weist nur eine leichte Erhöhung im Vergleich zum Mittelwert im Wald auf.

7.6 Hydrologie

Damit der Einfluss der Hydrologie auf flachgründige Rutschungen beurteilt werden kann, wurden die Parameter Hydrologie Einzugsgebiet und Hydrologie Standort analysiert. Da die Ereignisse des komprimierten Datensatzes am 22.08.2005 und am 23.08.2005 stattfanden, muss erwähnt werden, dass die Erhebungen Monate später stattgefunden haben. Die Beurteilungen der hydrologischen Verhältnisse müssen unter diesem Gesichtspunkt betrachtet werden.

Beim Parameter Hydrologie Einzugsgebiet wurden die Geländeformen, bezüglich ihrer Fähigkeit Oberflächenwasser ansammeln zu können, beurteilt. Diese wurden in Verlustlage

(Geländeformen 1-3 in Abbildung 22), in Eintragslage (Geländeformen 4-6 in Abbildung 22) und in markante Eintragslage (Geländeformen 7-9 in Abbildung 22) unterteilt. (WSL/BAFU/AGN 2018:7)

Der Parameter Hydrologie Standort beschreibt die aktuellen Feuchtebedingungen im Untergrund des Standortes, wo die Rutschung stattgefunden hat. Die aktuellen Feuchtebedingungen werden in „trocken“, „frisch/feucht“ und „nass“ untergliedert. Die Beurteilung (Beurteilungsraum 2) wurde anhand der vorherrschenden Vegetation (Zeigerpflanzen) durchgeführt. (WSL/BAFU/AGN 2018:8)

		Verlustlage	Eintragslage	markante Eintragslage	frisch/feucht	nass
Flühli	Freiland	7	21	6	28	6
	Wald	2	5	1	8	–
St. Antönien	Freiland	4	14	4	19	3
	Wald	1	15	–	13	3
Trub	Freiland	5	16	–	19	2
	Wald	–	14	1	15	–

Tabelle 12: Tabelle mit den Parametern Hydrologie Einzugsgebiet und Hydrologie Standort mit Unterteilung der Vorkommen in Vegetationsart und in Gemeinden (N=116)

Das Ergebnis der Analyse des Parameters Hydrologie Einzugsgebiet zeigt eine hohe Anzahl an flachgründigen Rutschungen in Eintragslage (Abbildung 22, Geländeformen 4-6). 73,28% aller flachgründigen Rutschungen des komprimierten Datensatzes fanden in Eintragslage statt. In Verlustlage und markanter Eintragslage fanden 16,38 % bzw. 10,34 % aller flachgründiger Rutschungen (N=116) statt. Unterteilt man die Ergebnisse des Parameters Hydrologie Einzugsgebiet in Freiland oder Wald, ist kein klares Bild zu erkennen. Einzig in Flühli fanden deutlich mehr Ereignisse in Eintragslage im Freiland als in Eintragslage im Wald statt.

Die aktuellen Feuchtebedingungen im Untergrund des Standortes weisen vor allem die Beurteilung „frisch/feucht“ auf. Die Beurteilung „nass“ wurde nur selten erhoben und die Beurteilung „trocken“ gar nicht. Außerdem wurde in allen drei Gemeinden im Freiland die Beurteilung „frisch/feucht“ öfter herangezogen, als im Wald.

7.7 Hydrogeologische Verhältnisse

Damit eine Analyse der hydrogeologischen Verhältnisse stattfinden konnte, wurde die Wasserführung in der flachgründigen Rutschung beurteilt. Diese Ergebnisse sind unter dem Gesichtspunkt einer zeitlichen Differenz, zwischen Zeitpunkt des stattfindenden Prozesses und Erhebungszeitpunkt, zu betrachten. Die Erhebungen fanden zum Teil einige Monate später statt. Man versuchte durch Beobachtungen in der Felderhebung die Folgeerscheinungen der aktuellen Niederschlagssituation auf die Beurteilung der Wasserführung in der Rutschung zu reduzieren. (WSL/BAFU/AGN 2018:16)

Die Beurteilung der Wasserführung in der Rutschung erfolgte anhand folgender Kriterien (Reihenfolge: Intensität steigend): (WSL/BAFU/AGN 2018:17)

- „keine“ (es gibt keine Anzeichen auf einen Zufluss von Hangwasser, die zu beurteilende Rutschfläche ist trocken bzw. regenfeucht)
- „Anzeichen“ (es sind Anzeichen, wie Algen zu erkennen, welche auf eine temporäre Wasserführung hinweisen, außerdem sind erodierte Rinnen klar zu erkennen)
- „wenig“ (die Rutschfläche kennzeichnet sich durch tropfende Wasseraustritte bzw. ist abschnittsweise feucht)
- „viel“ (es sind klare erodierte Rinnen zu erkennen, außerdem ist die Rutschfläche abschnittsweise nass und es kann fließendes Wasser beobachtet werden)

	keine	Anzeichen	wenig	viel	Total
Flühli	8	5	10	19	42
St. Antönien	4	12	5	17	38
Trub	15	8	6	7	36
Total	27	25	21	43	116

Tabelle 13: Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen mit vier aufsteigenden Bereichen des Parameters Wasserführung im Untergrund (N=116)

Die Ergebnisse (Tabelle 13) zeigen, dass in Flühli und St. Antönien vergleichsweise viele flachgründige Rutschungen bei der Wasserführung im Untergrund mit der Intensität „viel“ beurteilt wurden. In Flühli wurden 45,24 % und in St. Antönien 44,74 % aller in den

jeweiligen Gemeinden stattfindenden Rutschungen mit „viel“ beurteilt. In Trub hingegen wurden nur 19,44 % aller dort sich ereignenden Prozesse mit „viel“ beurteilt. In Trub wurden 41,66 % aller dort aufgenommenen Ereignisse mit der Intensität „keine“ beurteilt. Summiert man die jeweiligen Intensitätsklassen aller Gemeinden auf, wurde bei 37,07 % aller flachgründigen Rutschungen die Intensitätsklasse „viel“ eingetragen. Die Summen der restlichen Intensitätsklassen weichen nur gering voneinander ab.

7.8 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Bei der Beurteilung, ob Anzeichen alter Rutschbewegungen vorhanden waren, wurde (Beurteilungsraum 3) nach morphologischen Merkmalen gesucht. Diese sind zum Beispiel Rutschnischen, Rutschkuckeln, Säbelwuchs oder Anrissstellen. Wurden solche morphologischen Merkmale gefunden, folgte ein Eintrag mit „Ja“. Ansonsten wurde der Parameter Anzeichen alter Rutschbewegungen mit „Nein“ beurteilt.

(WSL/BAFU/AGN 2018:7)

		Ja	Nein	Total
Flühli	Freiland	30	4	34
	Wald	4	4	8
St. Antönien	Freiland	21	1	22
	Wald	14	2	16
Trub	Freiland	17	4	21
	Wald	9	6	15
Total		95	21	116

Tabelle 14: Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen mit Anzeichen alter Rutschbewegungen in Aufgliederung in Vegetationsart und in Gemeinde (N=116)

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass bei 81,90 % aller flachgründiger Rutschungen Anzeichen für alte Rutschbewegungen gefunden wurden. Begutachtet man alle Ergebnisse der Rutschungen im Freiland ist ebenfalls eine klare Tendenz zu erkennen. Die Ergebnisse aller Rutschungen im Wald sind weniger deutlich. In der Gemeinde St. Antönien wiesen jedoch von 16 Rutschungen im Wald, 14 Anzeichen alter Rutschbewegungen auf. In Trub und Flühli ist das Verhältnis ausgeglichener.

7.9 Bodenentwicklung

Um die Bodenentwicklung eines jeden Standortes beurteilen zu können, wurde bei jeder flachgründigen Rutschung am oberen Anrissrand ein Bodenprofil erstellt. Es wurde hierbei in „Rohboden“, „entwickelter Boden“ und „Nassboden“ unterschieden. Der Ort, wo das Bodenprofil erstellt wurde, wurde so gewählt, dass er möglichst die ganze Anrisslinie repräsentiert. Beim „Rohboden“ handelt es sich um die Bodentypen Regosol und Rendzina. Beim „entwickelten Boden“ um die Bodentypen Braunerde und Parabraunerde. „Nassböden“ sind von Hangwasser, Grundwasser oder Stauwasser beeinflusste Böden, welche entweder dauerhaft oder wiederkehrend nass oder gesättigt sind. (WSL/BAFU/AGN 2018:10)

		entwickelter Boden	Rohboden	Nassboden	Total
Flühli	Freiland	29	2	3	34
	Wald	7	1	–	8
St. Antönien	Freiland	18	3	1	22
	Wald	12	1	3	16
Trub	Freiland	18	3	–	21
	Wald	9	6	–	15
Total		93	16	7	116

Tabelle 15: Tabelle mit der Anzahl an flachgründigen Rutschungen in den unterschiedlichen Entwicklungsarten der Böden je Vegetationstyp und Gemeinde (N=116)

Eine Analyse der Böden zeigt, dass 80,17 % aller in den Gemeinden stattgefundenen flachgründigen Rutschungen auf entwickelten Böden ausgelöst wurden. Auffällig ist die niedrige Anzahl an Ereignissen auf Nassböden. Auch die Anzahl an Rutschungen auf Rohböden ist niedrig. Auf Nassböden ereigneten sich insgesamt nur 7 Rutschungen und auf Rohböden 16 Rutschungen. Begutachtet man die Ergebnisse gegliedert in Freiland oder Wald, ändern sich die Tendenzen kaum. Es ereigneten sich 84,42 % aller auf Freiland stattgefundenen Ereignisse auf entwickelten Böden. Im Wald ereigneten sich 71,79 % aller Ereignisse auf entwickelten Böden.

7.10 Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes

Bei der Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes wurde dessen Profiltiefe mit Wurzeln eines Durchmessers, welche ≥ 2 mm sind, gemessen. (WSL/BAFU/AGN 2018:12)

Es ist davon auszugehen, dass die Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes eine stabilisierende Wirkung auf flachgründige Rutschungen hat. Deshalb wurde die Mächtigkeit des

Hauptwurzelaumes je Vegetationsart analysiert. Das Ergebnis zeigt (Abbildung 26), dass im Wald die Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes größer ist, als im Freiland.

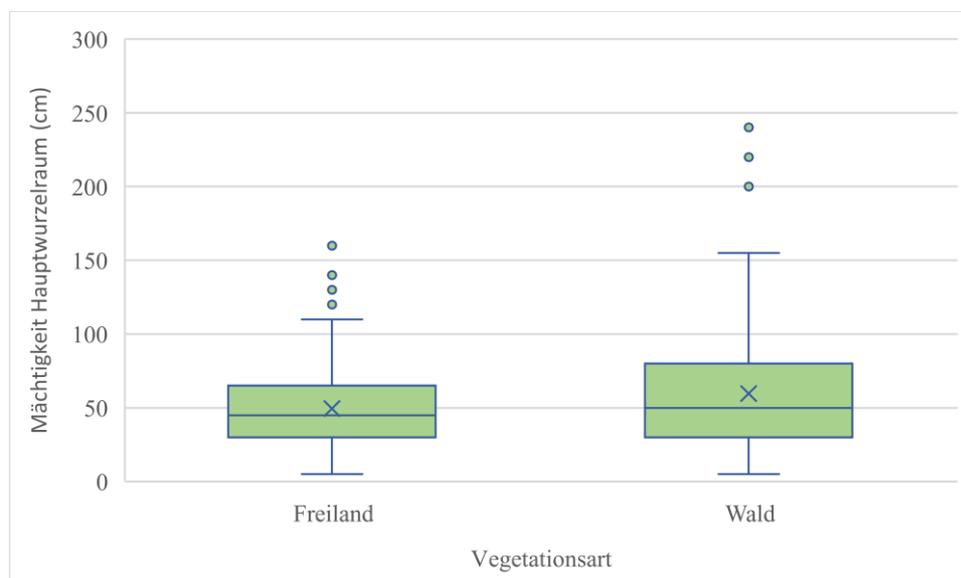


Abbildung 26: Diagramm mit der Vegetationsart und der Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes (N=479)

Die Ergebnisse (Tabelle 16) zeigen einen erhöhten Mittelwert der Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes bei flachgründigen Rutschungen im Wald. Dieser liegt mit 10,09 cm über dem Mittelwert im Freiland. Die minimalen Mächtigkeiten sind gleich. Im Wald liegt die maximale Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes bei 240 cm und befindet sich damit über der maximalen Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes im Freiland mit 160 cm.

	min. Mächtigkeit	max. Mächtigkeit	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Freiland (N=249)	5	160	49,51	45	30	65
Wald (N=230)	5	240	59,6	50	30	80

Tabelle 16: Tabelle mit den statistischen Werten der Mächtigkeit des Hauptwurzelaumes (cm) der jeweiligen Vegetationsart (N=479)

7.11 Makroporenarten

Die Makroporenarten werden in alte Wurzelkanäle, Wurmgänge, Mausgänge und Bodenrisse unterteilt. Zusätzlich wurde das Ausmaß der Makroporen mit den Unterscheidungen „keine“, „wenig“ und „viel“ beurteilt. Diese Informationen wurden im Bodenprofil, welches jeweils

am oberen Anriss der flachgründigen Rutschungen erstellt wurde, erhoben. (WSL/BAFU/AGN 2018:12)

Makroporen dienen als Wasserleiter von Niederschlagswasser und Oberflächenwasser in tiefergelegene Bodenschichten. Sie können durch ihre Wasserleiterfunktion zur Destabilisierung eines Hanges beitragen. Deshalb wurde eine Analyse der besonders relevanten Makroporenarten durchgeführt.

		alte Wurzelkanäle	Wurmgänge	Mausgänge	Bodenrisse	Total
Freiland	keine	57	1	–	–	58
	wenig	24	36	5	7	72
	viel	15	114	2	26	157
Wald	keine	16	5	–	–	21
	wenig	34	19	–	3	56
	viel	43	88	–	7	138
Total		189	263	7	43	502

Tabelle 17: Tabelle mit Anzahl der Makroporenarten und deren Anzahl in Freiland oder Wald (N=502)

Die Ergebnisse zeigen, dass insgesamt vor allem Wurmgänge festgestellt werden konnten. Auch alte Wurzelkanäle kommen vergleichsweise häufig vor. Die Makroporenart Bodenrisse konnte selten festgestellt werden. Mausgänge wurden sehr selten festgestellt.

Bezüglich der Unterscheidung in Freiland und Wald sind Unterschiede zu erkennen. Im Wald kommen Mausgänge im Gegensatz zum Freiland nicht vor. Bodenrisse kommen im Freiland bei 11,50 % und im Wald bei 4,65 % vor. Ähnlich sind hingegen die Werte bei den Wurmängen im Freiland und im Wald. Diese liegen bei 52,61 % und bei 52,09 %. Die Makroporenart der alten Wurzelkanäle liegt im Freiland bei 33,45 % und im Wald bei 43,26 %. Das Ausmaß der alten Wurzelkanäle betreffend, sind ebenfalls Unterschiede zu erkennen. Im Freiland sinkt die Anzahl mit zunehmendem Ausmaß. Im Wald steigt die Anzahl mit zunehmendem Ausmaß.

7.12 Lockergestein

Die Klassifikation des Lockermaterials erfolgte im Rahmen der Untersuchungen nach den Normen SN 670 005 und SN 670 004-1b. Dabei wurde versucht, das Material, welches zu

Institut für Alpine Naturgefahren, Sommersemester 2020

analysieren war, so tief wie möglich und in der Nähe der Bruchzone zu entnehmen. Das entnommen Lockermaterial wurde einer USCS (Unified Soil Classification System) – Klasse (nach SN 670 004-2b-NA) zugeordnet. (WSL/BAFU/AGN 2018:13ff)

Lockergesteinsklassen	Bezeichnung USCS	Anzahl
fein	siltiger Ton	57
	toniger Silt	134
	magerer Ton	1
	elastischer Silt	1
	Silt	3
	organischer Silt	36
grob	schlecht abgestufter Kies	2
	siltiger Kies	84
	toniger Kies	26
	siltiger bis toniger Kies	70
mittel	gut abgestufter Sand	7
	schlecht abgestufter Sand mit Silt	2
	siltiger Sand	100
	toniger Sand	5
	siltiger bis toniger Sand	2
Total		530

Tabelle 18: Tabelle der festgestellten Lockergesteinsklassen (USCS Klassen) und deren Anzahl (N=530)

Die Ergebnisse der Analyse des Materials in der Nähe der Bruchzone zeigt, dass in der Lockergesteinsklasse „fein“ der tonige Silt am häufigsten vorkommt. Bei 25,28 % aller flachgründigen Rutschungen konnte toniger Silt, als Material in der Bruchzone identifiziert werden. Bei der Lockergesteinsklasse „grob“ kommen siltiger Kies und siltiger bis toniger Kies am häufigsten vor. Diese liegen bei 15,85 % bzw. bei 13,21 % aller Rutschungen. Bei der Lockergesteinsklasse „mittel“ kommt vor allem siltiger Sand vor. Dieser liegt bei 18,87 % aller Rutschungen.

Lockergesteinsklassen	min. Neig.	max. Neig.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
fein	19	48	35,15	35	33	39
grob	21	47	35,87	37	33	40
mittel	23	49	33,78	34	30	37

Tabelle 19: Tabelle mit statistischen Werten der Lockergesteinsklassen und Neigung (in Grad) (N=530)

Eine Analyse der zusammengefassten festgestellten Lockergesteinsklassen mit den dort auftretenden Neignungsverhältnissen der flachgründigen Rutschungen (Tabelle 19), liefert kaum Unterschiede. Der minimale Neigungswert der Lockergesteinsklasse „mittel“ liegt etwas über dem Wert der Lockergesteinsklasse „fein“. Die Maximalneigungen sind ähnlich und kaum unterschiedlich. Der Mittelwert bei „mittel“ ist gegenüber den anderen beiden Lockergesteinsklassen etwas reduziert. Das 1. Quartil und das 3. Quartil der Lockergesteinsklassen „fein“ und „grob“ liegen jeweils mit ähnlichen Werten über jenen Werten der Lockergesteinsklasse „mittel“. Es fanden bei „mittel“ 50% aller dort stattgefundenen flachgründigen Rutschungen zwischen 30° und 37° statt. Diese Rutschungen sind an leicht niedrigeren Neigungen abgegangen.

7.13 Festgestein

Beim Parameter Festgestein wurde die Hauptlithologie eines jeden Standortes erhoben. (WSL/BAFU/AGN 2018:16)

		Min. Neig.	Max. Neig.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Flühli	Konglomerate	19	41	30,87	31,5	26	36
	Mergel	32	33	32,5	32,5	–	–
	Sandsteine	26	37	30,5	29,5	27,75	33,5
St. Antönien	schieferiger/mergeliger Kalk	23	44	31,84	32	28	34,5
Trub	Konglomerate	21	45	31,86	30	25	39
	Mergel	31	31	31	31	–	–
	Sandsteine	26	33	28,33	28	–	–

Tabelle 20: Tabelle mit statistischen Werten des Festgesteins und der Neigung (in Grad) der jeweiligen Gemeinde (N=116)

Bei den flachgründigen Rutschungen in Flühli und Trub konnten die Hauptlithologien Konglomerate, Mergel und Sandsteine festgestellt werden. In St. Antönien handelte es sich um schieferigen/mergeligen Kalk.

In Flühli konnten nur wenige flachgründige Rutschungen auf Mergel festgestellt werden. Ebenso wenige Ereignisse waren in Trub auf Mergel und Sandsteinen erhoben worden. Die

Minimalwerte und Maximalwerte der auf Konglomeraten stattgefundenen Rutschungen sind in Trub im Vergleich zu Flühli leicht erhöht. Auch der Mittelwert ist leicht erhöht. In St. Antönien weisen die Werte eine Ähnlichkeit zu den Werten in Trub auf Konglomeraten auf. Im Vergleich zu den in Flühli auf Konglomeraten stattgefundenen Ereignissen, sind die Werte leicht erhöht. Insgesamt lassen sich aus diesen Ergebnissen kaum Zusammenhänge bilden.

7.14 Ort der Gleitfläche und Mechanismus

Um den Ort der Gleitfläche einer flachgründigen Rutschung zu analysieren, wurde eine Unterscheidung in „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“, „im Lockergestein“, „am Übergang von Locker- zu Festgestein“ und „im Festgestein“ durchgeführt. Für diese Unterscheidung der jeweiligen flachgründigen Rutschung, wurde jeweils der größere Teil der oberen Hälfte einer Rutschfläche herangezogen und beurteilt. (WSL/BAFU/AGN 2018:9)

Der Mechanismus einer Rutschung wurde in Translationsrutschung und Rotationsrutschung untergliedert. Als Translationsrutschung wurde eine Rutschung beurteilt, wenn die Gleitfläche im Längenprofil in etwa eine Gerade darstellte. War die Gleitfläche im Längenprofil in etwa ellipsen- oder kreisförmig, wurde diese Rutschung als Rotationsrutschung klassifiziert. (WSL/BAFU/AGN 2018:9)

			Freiland	Wald
Flühli	Mechanismus	Translation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	11	4
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	21	4
	Mechanismus	Rotation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	1	–
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	1	–
St. Antönien	Mechanismus	Translation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	3	8
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	18	8
	Mechanismus	Rotation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	–	–
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	1	–
Trub	Mechanismus	Translation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	3	12
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	7	3
	Mechanismus	Rotation		
	Ort der Gleitfläche	im Lockergestein	2	–
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	9	–

Tabelle 21: Tabelle mit Mechanismus und Ort der Gleitfläche je Vegetationsart in den verschiedenen Gemeinden (N=116)

Der Ort der Gleitfläche war bei allen flachgründigen Rutschungen entweder „im Lockergestein“ oder „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“. „Im Festgestein“ oder „im Übergang von Locker- zu Festgestein“ konnte keine Gleitfläche festgestellt werden.

Es konnte festgestellt werden, dass insgesamt (in allen drei Gemeinden) vor allem Translationsrutschungen stattgefunden haben. Der Anteil der Rotationsrutschungen liegt bei 12,07 %. Diese traten ausschließlich im Freiland auf. Besonders in Trub konnten verhältnismäßig viele Rotationsrutschungen aufgenommen werden. Diese traten mehrheitlich „am Übergang von Oberboden zum Lockergestein“ auf. Bei den Translationsrutschungen im Freiland trat die Mehrzahl an Rutschungen „am Übergang von Oberboden zum Lockergestein“ auf. Bei Translationsrutschungen im Wald lässt sich diesbezüglich ein leichter Unterschied erkennen. In Trub im Wald treten diese vermehrt „im Lockergestein“ auf. In Flühli und St. Antönien im Wald sind die Werte zwischen „im Lockergestein“ und „im Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“ auftretenden Rutschungen gleich.

7.15 Auslaufstrecke

Die Auslaufstrecke einer flachgründigen Rutschung ist wichtig für die Gefahrenbeurteilung. Deswegen wurden die Auslaufstrecken der flachgründigen Rutschungen beurteilt und analysiert.

Bei der Auslaufstrecke $L_{\text{Ausl.}}$ wurde die schiefe Distanz vom Anriss einer flachgründigen Rutschung bis zum Punkt, an welchem das meiste Material der Rutschung abgelagert worden ist, gemessen. (WSL/BAFU/AGN 2018:10)

Beim Pauschalgefälle α wurde, vom Anriss einer flachgründigen Rutschung bis zum untersten Punkt der Hauptablagerung, die Neigung der Verbindungslinie gemessen. (WSL/BAFU/AGN 2018:10)

Folgende Kriterien zur Abgrenzung wurden für die Messung der Auslaufstrecke $L_{\text{Ausl.}}$ und dem Pauschalgefälle α berücksichtigt (Abbildung 18): (WSL/BAFU/AGN 2018:10)

- Höhe der Ablagerung > 10 cm, Breite der Ablagerung > 2 m, gröberes Material > 5 cm
- keine Beachtung, wenn nur Schlamm oder Erd-/Grasschollen zu sehen waren; keine Beachtung fanden nach den Aufräumarbeiten Baggerspuren
- war die Auslaufstrecke und Ablagerung nicht gänzlich zu sehen und gestört, wurde bis zur Störstelle (Gerinne, Mulde, Hindernis) oder Sichtgrenze (z.B. Geländekante) gemessen

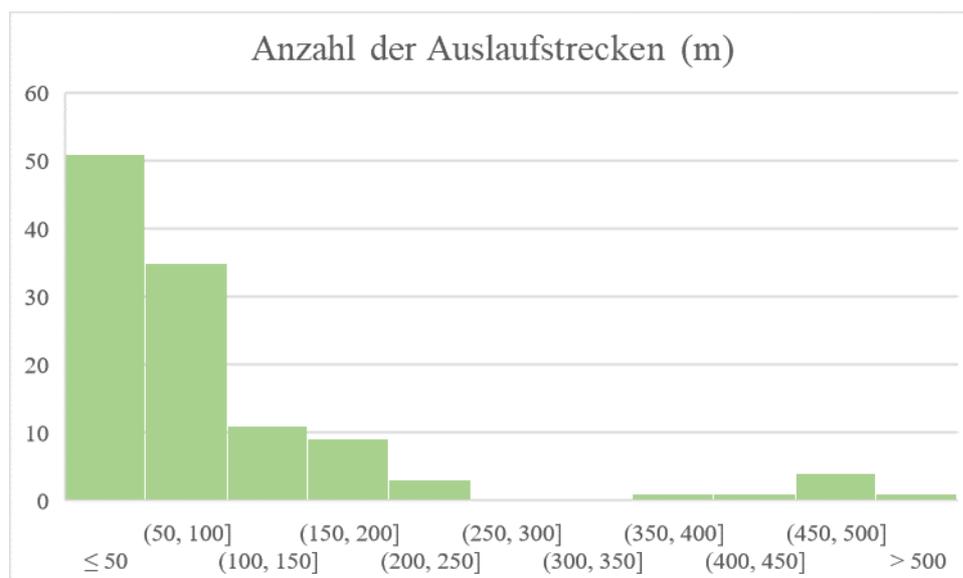


Abbildung 27: Anzahl der Auslaufstrecken (m) je definierter Klasse (N=116)

Eine Analyse der Anzahl der Auslaufstrecken zeigt, dass 43,97 % aller flachgründigen Rutschungen ≤ 50 m lang waren. Mit größer werdender Auslaufstrecke reduziert sich die Anzahl der Rutschungen. Einzig bei der Auslaufstreckenklasse 450 m – 500 m ist eine leichte Erhöhung zu erkennen.

		min. Auslaufstr.	max. Auslaufstr.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Flühli	Freiland	15	220	76,65	60,5	40,75	120
	Wald	27	140	57,13	43,5	30,75	77,5
St. Antönien	Freiland	15	520	172,86	91,5	45,25	252,5
	Wald	30	500	149,19	90	55,5	188,75
Trub	Freiland	12	90	39,48	36	17,5	56,5
	Wald	16	200	62,13	45	28	85

Tabelle 22: Tabelle mit den statistischen Werten der Auslaufstrecken (in m) je Vegetationsart der drei Gemeinden (N=116)

Die Ergebnisse (Tabelle 22) in Flühli und St. Antönien im Freiland weisen deutlich erhöhte Mittelwerte im Vergleich zum Wald auf. Außerdem sind die Maximalwerte in beiden Gemeinden im Freiland höher als im Wald. Die Minimalwerte sind in allen drei Gemeinden im Freiland niedriger als im Wald. In Trub lässt sich beim Mittelwert und beim Maximalwert

ein Unterschied im Vergleich zu den Gemeinden Flühli und St. Antönien erkennen. In Trub sind die Werte im Wald höher als im Freiland.

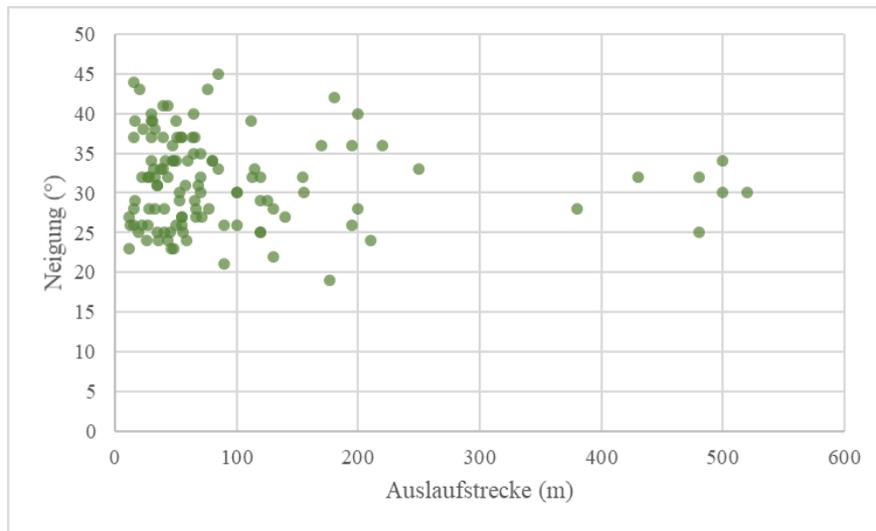


Abbildung 28: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung (N=116)

In Abbildung 28 wurde versucht einen Zusammenhang zwischen Auslaufstrecke und der Neigung eines Hanges zu finden. Das Ergebnis ist jedoch nicht eindeutig und Tendenzen schwer feststellbar. Ein leichter Trend ist eventuell erkennbar, dass mit zunehmender Auslaufstrecke die Neigung eher reduziert wird. Die sieben größten flachgründigen Rutschungen nach Auslaufstrecke fanden zwischen 25° und 35° statt. Eine durchgeführte Analyse zwischen Auslaufstrecke und Volumen liefert keine Tendenzen.

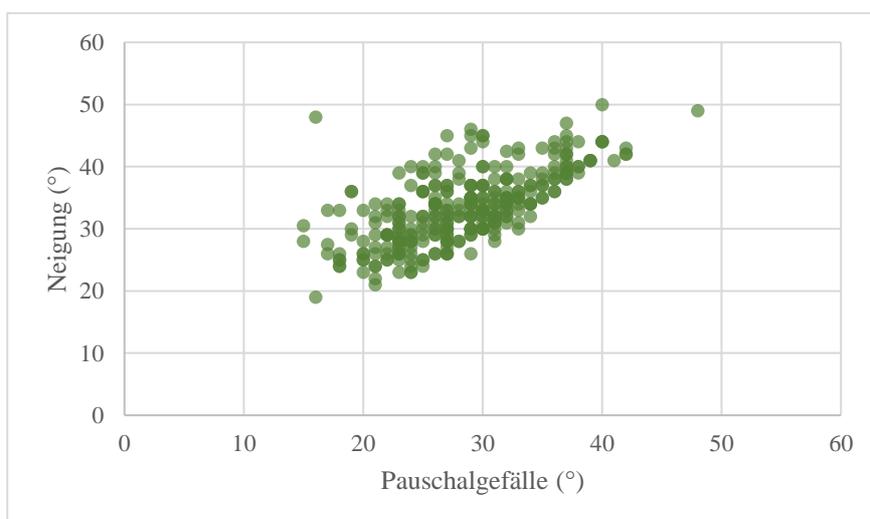


Abbildung 29: Streudiagramm mit Pauschalgefälle und Neigung (N=302)

Ein klarer Zusammenhang (Abbildung 29) lässt sich jedoch zwischen Pauschalgefälle (Abbildung 18) und Neigung erkennen. Mit zunehmender Neigung steigt auch das Pauschalgefälle.

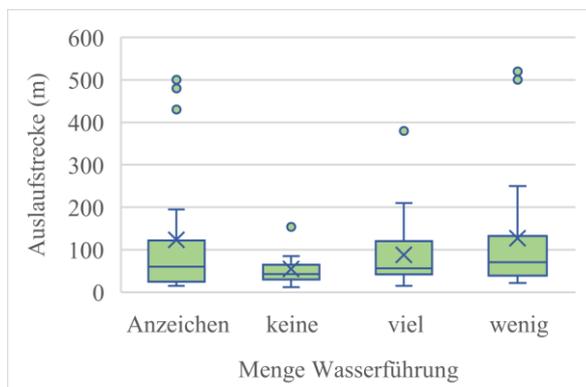


Abbildung 30: Menge d. Wasserführung u. Auslaufstrecke (N=116)

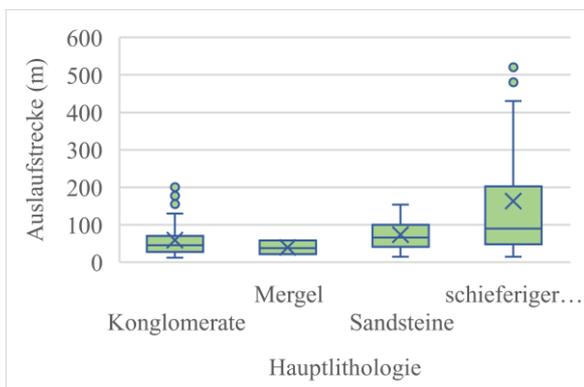


Abbildung 31: Hauptlithologie und Auslaufstrecke (N=116)

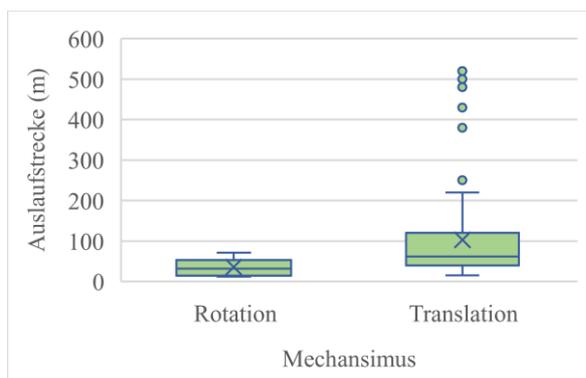


Abbildung 32: Mechanismus und Auslaufstrecke (N=116)

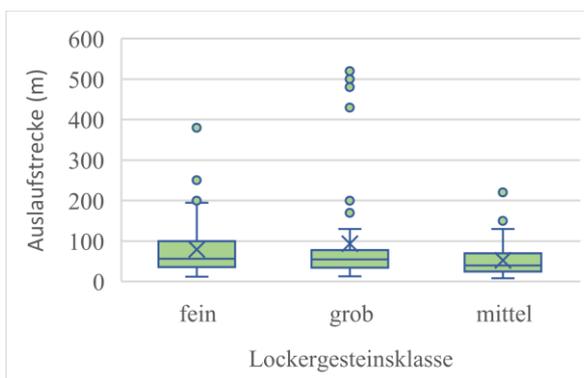


Abbildung 33: Lockergesteinskl. und Auslaufstrecke (N=245)

Die Ergebnisse (Abbildung 30) weisen bezüglich der Menge der Wasserführung bei „wenig“ den höchsten Mittelwert mit 127 m Auslaufstrecke auf. Dieser liegt auch bei „Anzeichen“ mit einem Wert von 123 m Auslaufstrecke deutlich über dem Mittelwert bei „viel“ mit 88 m Auslaufstrecke. Der Mittelwert bei „keine“ liegt erwartungsgemäß am niedrigsten mit einem Wert von 55 m Auslaufstrecke.

Die größten Auslaufstrecken wurden bei schieferigen/mergeligen Kalk als Hauptlithologie festgestellt (Abbildung 31). Hier liegt ein im Vergleich hoher Mittelwert von 163 m vor. Außerdem wurde dort auch die größte gemessene Auslaufstrecke von 520 m gemessen. Die Hauptlithologien Konglomerate und Sandsteine weisen einen Mittelwert von 60 m bzw. 74 m Auslaufstrecke auf. Bei der Hauptlithologie Mergel konnten nur wenige Ereignisse

festgestellt werden. Die Minimalwerte der Auslaufstrecken sind bei allen Hauptlithologien ähnlich.

In Abbildung 32 ist ein klares Bild zu erkennen. Die Auslaufstrecken bei Translationsrutschungen sind deutlich länger als bei Rotationsrutschungen. Die Mittelwerte liegen bei 103 m bzw. bei 35 m. Des Weiteren sind die längsten festgestellten flachgründigen Rutschungen ausschließlich Translationsrutschungen.

Bei der Lockergesteinsklasse „grob“ (Abbildung 33) konnte der größte Mittelwert mit 93 m Auslaufstrecke erhoben werden. Die Streubreite ist bei „grob“ etwas geringer als bei „fein“. Der Mittelwert bei „fein“ liegt unter dem Mittelwert von „grob“ bei 80 m Auslaufstrecke. Die vier längsten Rutschungen ereigneten sich in der Lockergesteinsklasse „grob“. Der Mittelwert bei „mittel“ liegt unter den anderen beiden Mittelwerten bei 52 m Auslaufstrecke. Die Minimalwerte aller drei Lockergesteinsklassen sind ähnlich.

8 Analyse Teil 2

Alle Annahmen (was ermittelt oder was gemessen wurde) sind analog zu Analyse Teil 1. Der Analyse Teil 2 wurde ausschließlich mit dem konsistenten Datensatz (116 flachgründige Rutschungsprozesse) durchgeführt. Die Einteilung in spontane Rutschungen und Hangmuren erfolgte anhand definierter Kriterien (Kapitel 6.4).

8.1 Anzahl der spontanen Rutschungen und Hangmuren in den Gemeinden

Nach einer Datenauswertung der flachgründigen Rutschungen (Analyse Teil 1) erfolgte eine Präzisierung der Prozesse in spontane Rutschungen und Hangmuren nach definierten Kriterien. Nach einer individuellen Bearbeitung der Rutschungen konnten 73 Hangmuren und 43 spontane Rutschungen festgestellt werden. In Flühli und Trub sind die jeweiligen Anteile ähnlich. In St. Antönien wurden vorwiegend Hangmuren festgestellt.

	spontane Rutschungen	Hangmuren	Total
Flühli	20	22	42
St. Antönien	4	34	38
Trub	19	17	36
Total	43	73	116

Tabelle 23: Tabelle mit Gemeinden und der Anzahl an spontanen Rutschungen und Hangmuren (N=116)

8.2 Neigung des Hanges (Rutschfläche)

Der Mittelwert bei den Hangmuren mit $32,14^\circ$ ist im Vergleich zum Mittelwert der spontanen Rutschungen mit $29,95^\circ$ leicht erhöht. Die Minimalwerte und Maximalwerte beider Prozessarten sind ähnlich und weisen kaum Unterschiede auf.

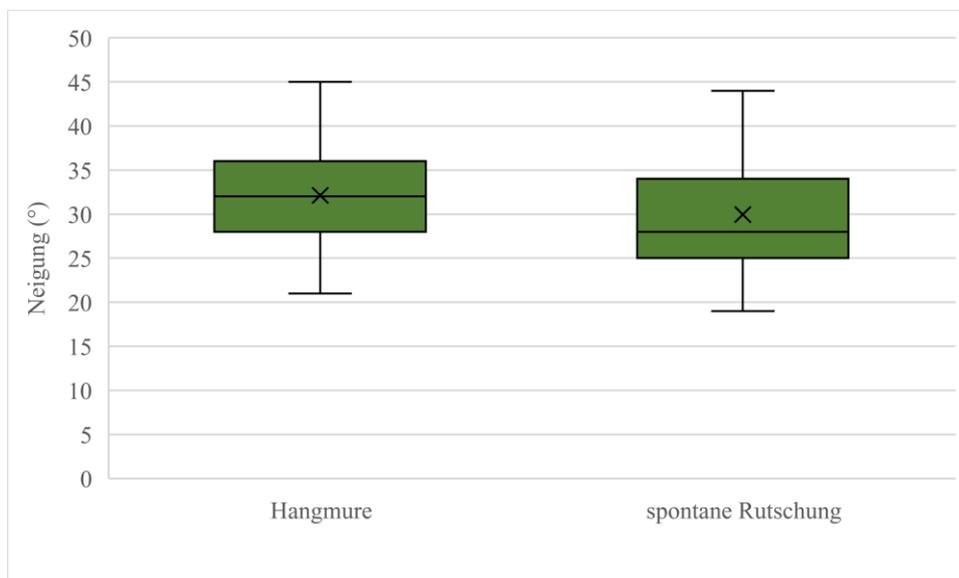


Abbildung 34: Kastendiagramm mit Prozessart und Neigung (N=116)

8.3 Höhenlage und Exposition

Hangmuren fanden auf vergleichsweise höheren Lagen statt. Der Mittelwert beträgt bei den Hangmuren 1361 m und bei den spontanen Rutschungen 1096 m. Auch der Minimalwert und Maximalwert liegt bei den Hangmuren etwas höher (Tabelle 24).

	min. Höhenlage	max. Höhenlage	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	840	1980	1095,7	990	920	1190
Hangmure	880	2015	1361,05	1340	985	1705

Tabelle 24: Tabelle mit den statistischen Werten des Parameters Höhenlage (m) je Prozessart (N=116)

Wie auch bei den Analysen in Teil 1 wurden die Eintragungen des Parameters Exposition des komprimierten Datensatzes individuell bearbeitet. Bei den Hauptrichtungen Nord, Ost, Süd und West wurden jeweils 10 Grad hinzu- und weggezählt. Eine Klassifizierung in NO, SO, SW oder NW erfolgte, wenn das jeweilige Ereignis einen Expositionswert zwischen den Hauptrichtungen hatte.

	N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Total
spontane Rutschung	–	2	6	18	7	2	4	4	43
Hangmure	–	4	8	22	11	22	5	1	73
Total	–	6	14	40	18	24	9	5	116

Tabelle 25: Tabelle mit den Prozessarten und deren Anzahl in der jeweiligen Exposition (N=116)

Bei den spontanen Rutschungen ereigneten sich 41,86 % in SO-Hanglage. Alle anderen Expositionslagen kommen vergleichsweise selten vor. Bei den Hangmuren ereigneten sich 30,14 % in SO-Hanglage und 30,14 % in SW-Hanglage. In S-Hanglage kamen 15,07 % und in O-Hanglage 10,96 % der Hangmuren vor. Die anderen Expositionslagen kommen selten vor (Tabelle 25).

8.4 Morphologietyp

Der größte Anteil der spontanen Rutschungen und Hangmuren ereignete sich bei Typ 5. Bei den spontanen Rutschungen fanden 41,86 % und bei den Hangmuren 43,84 % der jeweiligen Ereignisse bei Typ 5 statt. Bei den spontanen Rutschungen kamen Typ 1, Typ 3 und Typ 7 nicht vor. Bei den Hangmuren kamen Typ 1 und Typ 9 nicht vor. Typ 3 kommt bei den Hangmuren im Vergleich zu den spontanen Rutschungen vergleichsweise häufig vor (Tabelle 26).

	spontane Rutschung	Hangmure	Total
Typ 1	–	–	–
Typ 2	4	5	9
Typ 3	–	10	10
Typ 4	3	2	5
Typ 5	18	32	50
Typ 6	9	10	19
Typ 7	–	4	4
Typ 8	8	10	18
Typ 9	1	–	1
Total	43	73	116

Tabelle 26: Tabelle mit der Anzahl der unterschiedlichen Morphologietypen je Prozessart (N=116)

8.5 Abmessungen der spontanen Rutschungen und Hangmuren

Die abgemessenen Längen der Hangmuren sind im Mittel um etwa 2 m länger als jene der spontanen Rutschungen. Die spontanen Rutschungen weisen hingegen eine um etwa 2 m größere Breite im Mittelwert auf. Die Minimalwerte der Anrissflächen beider Prozessarten sind mit Werten von 42 m² bei den spontanen Rutschungen und 35 m² bei den Hangmuren ähnlich. Auch die Mittelwerte sind ähnlich. Die Maximalwerte zeigen jedoch größere

Unterschiede. Größere Unterschiede sind auch bei den Volumenen zu beobachten. Die Minimalwerte sind zwar ähnlich. Die Maximalwerte und die Mittelwerte weisen hingegen größere Unterschiede auf. Die Anrissmächtigkeiten sind bei den Hangmuren im Vergleich zu den spontanen Rutschungen leicht erhöht (Tabelle 27).

		Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	Länge (m)	6,5	64	20,84	16,5	11	25
	Breite (m)	8	68	17,13	15	11	19
	Anrissfläche (m ²)	42	2016	297,63	182	90	380
	Anrissmächtigkeit (m)	0,4	1,6	0,86	0,8	0,6	1
	Volumen (m ³)	26	5443	387,84	152	62	320
Hangmure	Länge (m)	8	116	22,89	20	13,75	27,5
	Breite (m)	6	44	15,12	13	10,5	17
	Anrissfläche (m ²)	35	2600	290,05	198	111	322,5
	Anrissmächtigkeit (m)	0,3	2	0,89	0,9	0,7	1
	Volumen (m ³)	30	2260	257,16	134	62,5	289,5

Tabelle 27: Tabelle mit statistischen Werten der Prozessarten mit Länge, Breite, Anrissfläche, Anrissmächtigkeit und Volumen (N=116)

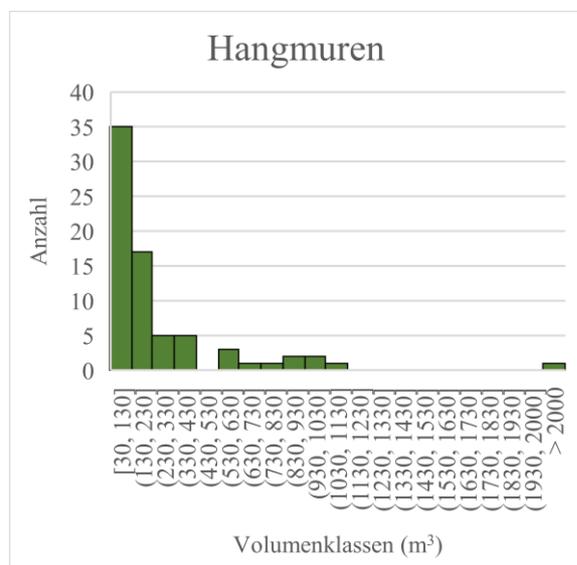


Abbildung 35: Diagramm mit Volumenklassen und deren Anzahl bei Hangmuren (N=73)

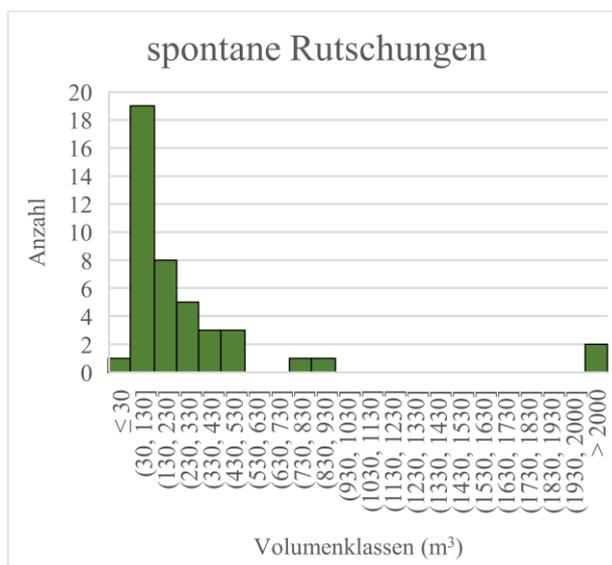


Abbildung 36: Diagramm mit Volumenklassen und deren Anzahl bei spontanen Rutschungen (N=43)

Die Intervalluntergrenze und Intervallobergrenze wurde bei den Hangmuren auf 30 m³ bzw. größer als 2000 m³ und bei den spontanen Rutschungen auf kleiner als 30 m³ und ebenfalls größer als 2000 m³ gelegt (Abbildung 35 und Abbildung 36).

Die Intervallbreite beträgt jeweils 100 m^3 . Bei beiden Prozessarten ist die Volumenklasse $30 \text{ m}^3 - 130 \text{ m}^3$ am Häufigsten vertreten. Bei den Hangmuren fanden 47,95 % und bei den spontanen Rutschungen 44,19 % in dieser Volumenklasse statt. Bei den nachfolgenden Volumenklassen ist bei beiden Prozessarten ein reduzierender Trend erkennbar. Bei den Hangmuren fanden in den Volumenklassen von 530 m^3 bis 1130 m^3 mehr Ereignisse als bei den spontanen Rutschungen statt. Die großen Unterschiede bei den Mittelwerten der Volumina der beiden Prozessarten dürfte auf die Maximalwerte zurückzuführen sein. Bei spontanen Rutschungen fanden mehr Ereignisse $>2000 \text{ m}^3$ als bei Hangmuren statt.

8.6 Vegetationsart

Eine Analyse der spontanen Rutschungen und Hangmuren zeigte, dass insgesamt 66,38 % aller Ereignisse im Freiland stattgefunden haben. Etwa ein Drittel, 33,62 % aller Ereignisse, fanden im Wald statt. Bei den spontanen Rutschungen fanden 76,74 % im Freiland und 23,26 % im Wald statt. Die Hangmuren fanden zu 60,27 % im Freiland und zu 39,73 % im Wald statt (Tabelle 28).

	Freiland	Wald	Total
spontane Rutschung	33	10	43
Hangmure	44	29	73
Total	77	39	116

Tabelle 28: Tabelle mit den Vegetationsarten je Prozessart (N=116)

Die Neigungen (Tabelle 29) bei den spontanen Rutschungen sind im Freiland im Vergleich zur Hangmure im Freiland etwas niedriger im Mittelwert. Der Minimalwert ist bei der Hangmure im Freiland höher, der Maximalwert etwas niedriger. Die Mittelwerte der spontanen Rutschungen und Hangmuren im Wald liegen bei $35,5^\circ$ bzw. $34,38^\circ$. Bei den Hangmuren im Wald liegt der Minimalwert niedriger, der Maximalwert hingegen höher.

		min. Neig.	max. Neig.	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	Freiland	19	44	28,27	27	24,5	31,5
	Wald	26	43	35,5	37	31,25	40,25
Hangmure	Freiland	21	42	30,66	30	28	34
	Wald	25	45	34,38	34	31	39

Tabelle 29: Tabelle mit statistischen Werten der Neigung (°) der jeweiligen Prozessart untergliedert in Vegetationsarten

Die Vergleiche der Volumina (Tabelle 30) zeigen einen höheren Mittelwert bei spontanen Rutschungen im Freiland im Vergleich zu Hangmuren im Freiland. Die Minimalwerte und Maximalwerte sind jeweils bei den spontanen Rutschungen höher. Im Wald ist der Mittelwert bei den spontanen Rutschungen höher. Der Minimalwert bzw. Maximalwert ist hingegen bei der Hangmure im Wald höher.

		min. Volumen	max. Volumen	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	Freiland	34	5443	448,39	120	61,5	350
	Wald	26	528	188	152	61,5	282,5
Hangmure	Freiland	30	2260	315,48	135,5	88,5	370,25
	Wald	31	960	168,69	102	57,5	175

Tabelle 30: Tabelle mit statistischen Werten des Volumens (m³) der jeweiligen Prozessarten unterteilt in Vegetationsart (N=116)

8.7 Hydrologie

Die Geländeform Eintragslage ist bei beiden Prozessarten das am häufigsten vorkommende Einzugsgebiet. Demnach kommen bei den spontanen Rutschungen 74,42 % und bei den Hangmuren 72,60 % aller Ereignisse in Eintragslage vor. Bei den spontanen Rutschungen kommen Ereignisse in Eintragslage mehrheitlich im Freiland (55,81 %) vor. Nur 18,6 % der spontanen Rutschungen kommen in Eintragslage im Wald vor.

In Verlustlage kommen 16,28 % und in markanter Eintragslage 9,3 % der spontanen Rutschungen vor. Im markanter Eintragslage kommen im Wald bei spontanen Rutschungen keine Ereignisse vor. Bei den Hangmuren hingegen ist das Verhältnis zwischen in Eintragslage im Freiland und im Wald vorkommenden Ereignissen ausgeglichen. In

Verlustlage kommen hierbei 16,44 % und in markanter Eintragslage 10,96 % vor. Mehrheitlich kommen diese Ereignisse im Freiland vor (Tabelle 31).

		Verlustlage	Eintragslage	markante Eintragslage	frisch/feucht	nass
spontane Rutschung	Freiland	5	24	4	27	6
	Wald	2	8	–	10	–
Hangmure	Freiland	11	27	6	39	5
	Wald	1	26	2	26	3

Tabelle 31: Tabelle mit den Parametern Hydrologie Einzugsgebiet und Hydrologie Standort je Prozessart und Vegetationsart (N=116)

Die aktuelle Feuchtebedingung „trocken“ kommt weder bei spontanen Rutschungen noch bei Hangmuren vor. Die Ergebnisse zeigen, dass bei beiden Prozessarten die aktuelle Feuchtebedingung „frisch/feucht“ häufig festgestellt werden konnte. Bei den spontanen Rutschungen 86,05 % und bei den Hangmuren 89,04 % aller Ereignisse. Bei beiden Prozessarten wurde dies öfter im Freiland festgestellt. Bei der aktuellen Feuchtebedingung „frisch/feucht“ konnten bei den spontanen Rutschungen 23,26 % und bei den Hangmuren 35,62 % der Ereignisse im Wald festgestellt werden. Die Bedingung „nass“ kommt bei beiden Prozessarten selten vor. Bei den spontanen Rutschungen zu 13,95 % und bei den Hangmuren zu 10,96 %, wobei bei den spontanen Rutschungen im Wald keine Ereignisse stattfanden. Bei den Hangmuren fanden bei der Feuchtebedingung „nass“ fünf Ereignisse im Freiland und drei Ereignisse im Wald statt (Tabelle 31).

8.8 Hydrogeologische Verhältnisse

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass 37,07 % aller Ereignisse mit „viel“ beurteilt wurden. Die Beurteilungen „keine“ wurde zu 23,28 %, „Anzeichen“ zu 21,55 % und „wenig“ zu 18,10 % festgestellt. Bezüglich der Untergliederung in Prozessarten wurde bei Hangmuren die Beurteilung „viel“ zu 39,73 % festgestellt. Die Beurteilungen „keine“ zu 21,92 %, „Anzeichen“ zu 19,18 % und „wenig“ zu 19,18 %. Unterschiedlich dazu sind die Ergebnisse bei den spontanen Rutschungen. Dabei konnten die Beurteilungen „viel“ zu 32,56 %, „keine“ zu 25,58 %, „Anzeichen“ zu 25,58 % und „wenig“ zu 16,28 % festgestellt werden. Nach den Ergebnissen kommt die Beurteilung „viel“ bei Hangmuren etwas häufiger als bei spontanen Rutschungen vor. Es lässt sich fließendes Wasser erkennen und die Rutschfläche ist abschnittsweise nass. Außerdem lassen sich bei diesen Ereignissen klar erodierte Rinnen

erkennen. Die Beurteilungen „keine“ und „Anzeichen“ kommen hingegen bei den spontanen Rutschungen häufiger vor. Die Beurteilung „wenig“ kommt bei Hangmuren mit 19,18 % etwas häufiger vor als bei spontanen Rutschungen mit 16,28 % (Tabelle 32).

	keine	Anzeichen	wenig	viel	Total
spontane Rutschung	11	11	7	14	43
Hangmure	16	14	14	29	73
Total	27	25	21	43	116

Tabelle 32: Tabelle mit der Wasserführung in der Rutschung unterteilt in Prozessarten (N=116)

8.9 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Insgesamt konnten bei 81,90 % aller Ereignisse Anzeichen alter Rutschbewegungen festgestellt werden. Von den im Freiland stattgefundenen Hangmuren konnten bei 93,18 % morphologische Merkmale entdeckt werden. Bei den spontanen Rutschungen im Freiland bei 81,82 %. Einen deutlichen Unterschied gibt es bei Hangmuren und spontanen Rutschungen im Wald. Bei Hangmuren wiesen 75,86 % und bei spontanen Rutschungen 50 % Anzeichen alter Rutschbewegungen auf (Tabelle 33).

		Ja	Nein	Total
spontane Rutschung	Freiland	27	6	33
	Wald	5	5	10
Hangmure	Freiland	41	3	44
	Wald	22	7	29
Total		95	21	116

Tabelle 33: Tabelle mit Prozessart je Vegetationsart mit der Untergliederung in Anzeichen alter Rutschbewegungen (N=116)

8.10 Bodenentwicklung

Oft vorkommend bei allen Ereignissen ist der Bodenentwicklungstyp „entwickelter Boden“. Bei den Hangmuren im Freiland kommt dieser zu 79,55 % vor. „Rohboden“ zu 13,64 % und „Nassboden“ zu 6,82 %. Bei den Hangmuren im Wald kommt „entwickelter Boden“ zu 72,41 % vor. „Rohboden“ zu 17,24 % und „Nassboden“ zu 10,35 %. Bei den spontanen Rutschungen im Freiland kommt „entwickelter Boden“ zu 90,91 %, „Rohboden“ zu 6,06 % und „Nassboden“ zu 3,03 % vor. Bei den spontanen Rutschungen im Wald konnte kein „Nassboden“ festgestellt werden. „Entwickelte Böden“ und „Rohböden“ kommen zu 70 % bzw. 30 % vor (Tabelle 34).

		entwickelter Boden	Rohboden	Nassboden	Total
spontane Rutschung	Freiland	30	2	1	33
	Wald	7	3	–	10
Hangmure	Freiland	35	6	3	44
	Wald	21	5	3	29
Total		93	16	7	116

Tabelle 34: Tabelle mit der Anzahl an Bodenentwicklungstypen je Prozessart und Vegetationstyp (N=116)

8.11 Festgestein

Hangmuren auf Konglomeraten weisen eine erhöhte Neigung im Mittelwert im Vergleich zu spontanen Rutschungen auf Konglomeraten auf (Abbildung 37 und Abbildung 38).

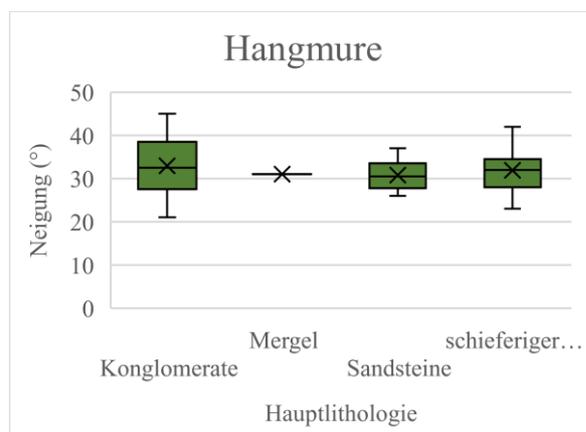


Abbildung 37: Hauptlithologie und Neigung bei Hangmuren (N=73)

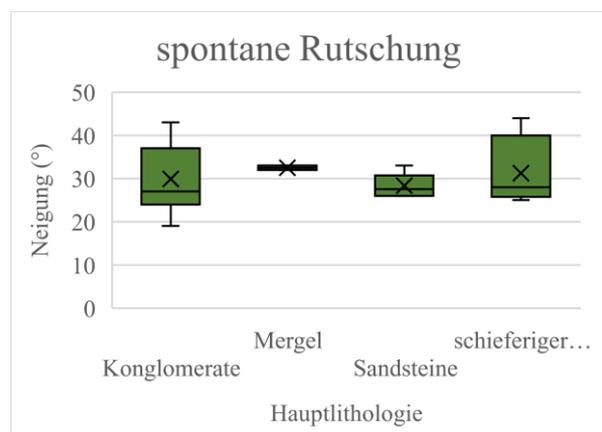


Abbildung 38: Hauptlithologie und Neigung bei spontanen Rutschungen (N=43)

Auch die Minimalwerte und Maximalwerte sind bei Hangmuren leicht erhöht. Mergel als Festgestein kommt bei beiden Prozessarten sehr selten vor, weshalb auf diese Werte nicht näher eingegangen wird. Auch Sandstein kommt selten vor. Spontane Rutschungen weisen auf Sandstein einen Mittelwert von $28,33^\circ$ auf. Hangmuren einen Mittelwert von $30,8^\circ$. Die Minimalwerte sind gleich. Der Maximalwert bei spontanen Rutschungen auf Sandstein beträgt 33° . Jener einer Hangmure auf Sandstein 37° . Der Mittelwert auf schieferigen/mergeligen Kalk ist bei beiden Prozessarten ähnlich und liegt bei Hangmuren bei $31,91^\circ$ und bei spontanen Rutschungen auf $31,25^\circ$. Die Minimalwerte liegen bei Hangmuren bei 23° und bei spontanen Rutschungen bei $25,75^\circ$. Die Maximalwerte liegen bei Hangmuren bei 42° und bei spontanen Rutschungen bei 44° .

8.12 Ort der Gleitfläche und Mechanismus

Bezüglich des Ortes der Gleitfläche konnten die Beurteilungen „am Übergang von Lockergestein zu Festgestein“ und „im Festgestein“ bei beiden Prozessarten nicht festgestellt werden. Rotationsrutschungen kommen insgesamt vergleichsweise selten und nur im Freiland vor. Bei den spontanen Rutschungen kamen Rotationsrutschungen im Freiland zu 30 % „im Lockergestein“ vor. 70 % ereigneten sich „am Übergang Oberboden/Lockergestein“. Bei den Hangmuren kamen Rotationsrutschungen im Freiland ausschließlich „am Übergang Oberboden/Lockergestein“ vor. Bei Translationsrutschungen im Freiland kommen bei Hangmuren 77,5 % „am Übergang Oberboden/Lockergestein“ vor. 22,5 % kommen „im Lockergestein“ vor. Bei spontanen Rutschungen als Translationsrutschung im Freiland ist das Verhältnis ausgeglichener. 65,22 % der spontanen Rutschungen ereigneten sich „am Übergang Oberboden/Lockergestein“. 34,78 % ereigneten sich „im Lockergestein“. Translationsrutschungen im Wald bei Hangmuren fanden zu 65,52 % „im Lockergestein“ und zu 34,48 % „am Übergang Oberboden/Lockergestein“ statt. Translationsrutschungen im Wald bei spontanen Rutschungen haben hingegen ein ausgeglichenes Verhältnis (Tabelle 35).

			Freiland	Wald
spontane Rutschung	Mechanismus	Translation		
	Ort der Gleifläche	im Lockergestein	8	5
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	15	5
	Mechanismus	Rotation		
	Ort der Gleifläche	im Lockergestein	3	–
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	7	–
Hangmure	Mechanismus	Translation		
	Ort der Gleifläche	im Lockergestein	9	19
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	31	10
	Mechanismus	Rotation		
	Ort der Gleifläche	im Lockergestein	–	–
		am Übergang Oberboden/Lockergestein	4	–

Tabelle 35: Tabelle mit Prozessart, Mechanismus und Ort der Gleifläche je Vegetationstyp (N=116)

8.13 Auslaufstrecke

Das Diagramm der spontanen Rutschungen (Abbildung 39) wurde mit einem Unterlaufintervall von kleiner gleich 15 m und einem Überlaufintervall von 180 m erstellt. Das Diagramm der Hangmuren (Abbildung 40) wurde mit einem Unterlaufintervall von 30 m und einem Überlaufintervall von 500 m erstellt. Die Intervallbreite beträgt bei beiden Darstellungen 15 m Auslaufstrecke.

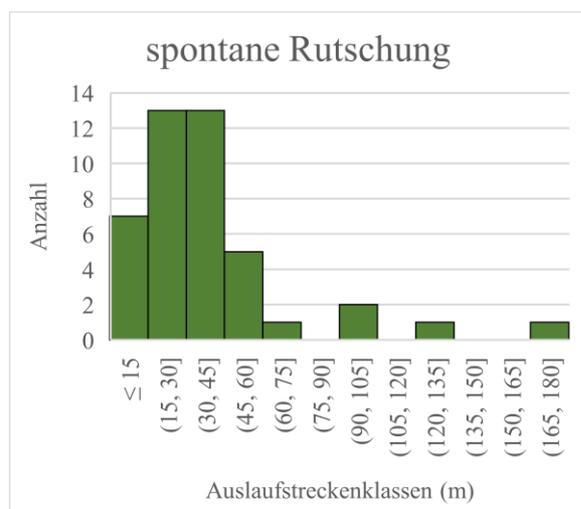


Abbildung 39: Diagramm mit Auslaufstreckenklassen und deren Anzahl bei spontanen Rutschungen (N=43)

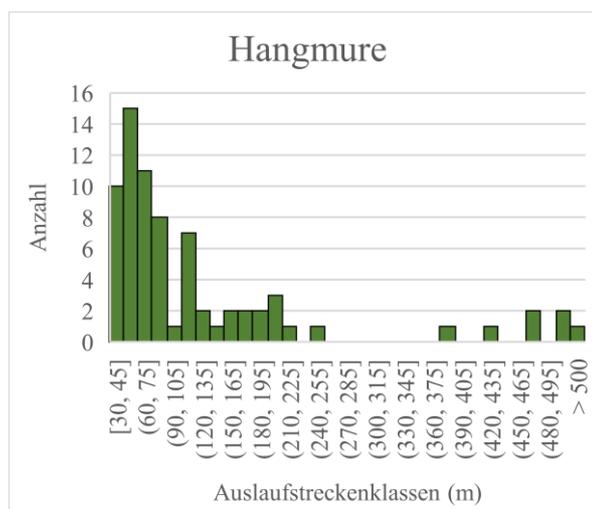


Abbildung 40: Diagramm mit Auslaufstreckenklassen und deren Anzahl bei Hangmuren (N=73)

Die Analysen zeigen, dass keine Hangmure eine Auslaufstrecke unter 30 m aufweist. Bei den spontanen Rutschungen ereigneten sich 20 spontane Rutschungen bis 30 m Auslaufstrecke. 60,47 % der spontanen Rutschungen ereigneten sich in den Auslaufstreckenklassen 15 m bis 45 m. In den nachfolgenden Auslaufstreckenklassen reduziert sich die Anzahl der spontanen Rutschungen. Bei den Hangmuren ereigneten sich 35,62 % in den Auslaufstreckenklassen 45 m bis 75 m Auslaufstrecke. In den nachfolgenden Auslaufstreckenklassen reduziert sich zwar die Anzahl der Hangmuren, die Anzahl an vorhandenen Auslaufstreckenklassen ist im Vergleich zu den spontanen Rutschungen jedoch deutlich größer. Die Auslaufstrecke der längsten Hangmure liegt über 500 m, jene der längsten spontanen Rutschung in der Auslaufstreckenklasse 165 m bis 180 m.

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	12	177	40,02	32	20	43
Hangmure	30	520	127,3	76	53	147

Tabelle 36: Tabelle mit statistischen Werten der Auslaufstrecke (m) je Prozessart (N=116)

Eine Analyse aller Auslaufstrecken je Prozessart zeigt deutliche Unterschiede (Tabelle 36). Der Mittelwert der spontanen Rutschungen liegt bei 40,02 m. Jener der Hangmuren bei 127,3 m. Ähnliche Unterschiede weisen auch die Minimalwerte und Maximalwerte auf. Die kürzeste gemessene Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen und Hangmuren liegt bei 12 m bzw. 30 m. Die Maximalwerte mit 177 m bei spontanen Rutschungen und 520 m bei Hangmuren zeigen ebenfalls deutliche Unterschiede auf.

		Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
spontane Rutschung	Freiland	12	177	42,48	33	17,5	44,5
	Wald	16	55	31,9	29	22,25	41,75
Hangmure	Freiland	33	520	132,64	68,5	53,25	154,75
	Wald	30	500	119,21	80	50,5	130

Tabelle 37: Tabelle mit statistischen Werten der Auslaufstrecke (m) je Prozessart und Vegetationsart (N=116)

Deutliche Unterschiede zwischen den Auslaufstrecken der spontanen Rutschungen und Hangmuren lassen sich auch in Untergliederung je Vegetationsart (Tabelle 37) feststellen.

Am längsten sind die Auslaufstrecken der Hangmuren im Freiland. Die kürzesten Auslaufstrecken ereigneten sich bei spontanen Rutschungen im Wald, obwohl erwähnt werden muss, dass der Minimalwert am niedrigsten bei spontanen Rutschungen im Freiland ist. Die Maximalwerte der spontanen Rutschungen je Vegetationsart weisen einen deutlich höheren Wert im Freiland auf.

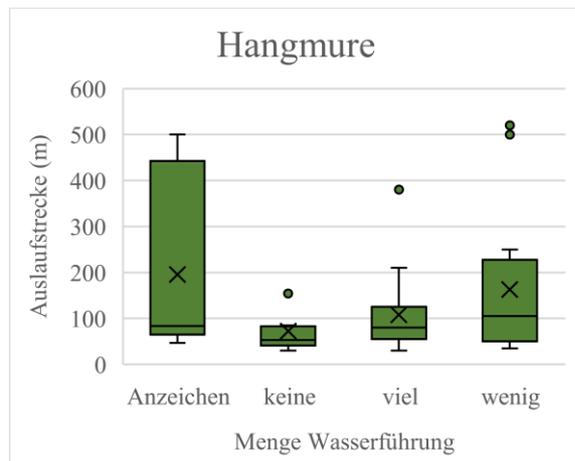


Abbildung 41: Diagramm mit Menge der Wasserführung und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73)

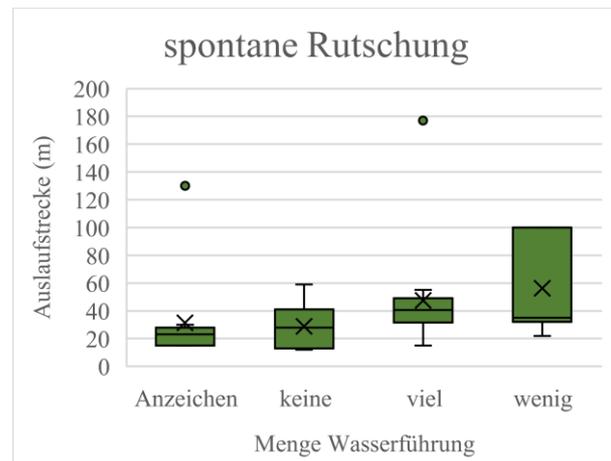


Abbildung 42: Diagramm mit Menge der Wasserführung und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43)

In Abbildung 41 und Abbildung 42 wurde die Menge der Wasserführung in der Rutschung und die Auslaufstrecke untersucht. Die Hangmuren weisen den größten Mittelwert mit 195,43 m bei der Beurteilung „Anzeichen“ auf. Der Minimalwert beträgt 47 m und der Maximalwert 500 m. 50 % der Hangmuren mit der Beurteilung „Anzeichen“ besitzen eine Auslaufstrecke zwischen 64,5 m und 442,5 m. Der zweitgrößte Mittelwert konnte bei der Beurteilung „wenig“ mit 162,64 m festgestellt werden. Bei der Beurteilung „wenig“ ereignete sich die längste Auslaufstrecke mit 520 m, obwohl 50 % der hierbei stattgefundenen Hangmuren zwischen 50 m und 227,5 m liegen. Die Beurteilung „viel“ liegt mit einem Mittelwert von 107,59 m deutlich unter den Mittelwerten mit der Beurteilung „Anzeichen“ oder mit der Beurteilung „wenig“. Die Streuung dieser Werte ist weniger groß, wie etwa bei der Beurteilung „Anzeichen“. 50 % der Werte liegen hierbei zwischen 55 m und 125 m Auslaufstrecke. Die kürzesten Auslaufstrecken ereigneten sich bei der Beurteilung „keine“ mit einem Mittelwert von 72,5 m Auslaufstrecke. Spontane Rutschungen zeigen ihren größten Mittelwert bei der Beurteilung „wenig“ mit einem Wert von 56,14 m Auslaufstrecke. Bei der Beurteilung „wenig“ lässt sich zwar der größte Minimalwert der spontanen Rutschungen mit einem Wert von 22 m Auslaufstrecke feststellen, jedoch liegt der größte Maximalwert bei der Beurteilung „viel“. Der zweithöchste Mittelwert lässt sich bei der Beurteilung „viel“ mit

einem Wert von 47,57 m feststellen. Hier hat die längste Auslaufstrecke einer spontanen Rutschung mit 177 m stattgefunden. Der Mittelwert bei der Beurteilung „Anzeichen“ liegt bei 31,27 m. Die zweitlängste gemessene Auslaufstrecke der spontanen Rutschungen mit 130 m fand hier statt. Wie auch bei den Hangmuren wurden die kürzesten Auslaufstrecken bei der Beurteilung „keine“ mit einem Mittelwert von 28,91 m Auslaufstrecke gemessen.

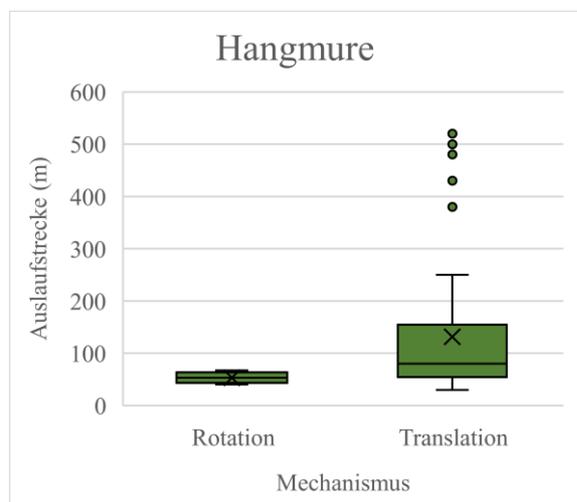


Abbildung 43: Diagramm mit Mechanismus und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73)

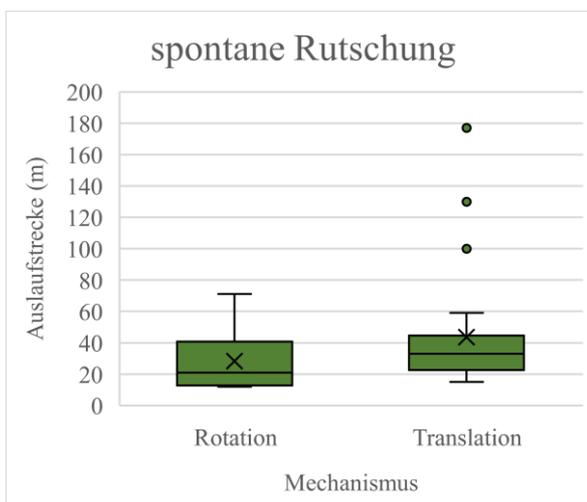


Abbildung 44: Diagramm mit Mechanismus und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43)

Die Auslaufstrecken bei Rotationsrutschungen sind bei beiden Prozessarten (Abbildung 43 und Abbildung 44) kürzer als bei Translationsrutschungen. Es konnten insgesamt 14 Rotationsrutschungen, 4 bei Hangmuren und 10 bei spontanen Rutschungen, festgestellt werden. Dieser Unterschied ist jedoch bei spontanen Rutschungen weniger deutlich, als bei Hangmuren. Hangmuren als Translationsrutschungen haben einen Mittelwert von 131,59 m Auslaufstrecke. Der Mittelwert der Rotationsrutschungen liegt hier deutlich darunter mit einem Wert von 53,25 m Auslaufstrecke. Außerdem sind die längsten Auslaufstrecken ausschließlich Translationsrutschungen. Bei den spontanen Rutschungen liegt der Mittelwert beim Mechanismus Translationsrutschungen bei 43,58 m Auslaufstrecke. Jener der Rotationsrutschungen liegt bei 28,3 m Auslaufstrecke. Die drei längsten Auslaufstrecken bei spontanen Rutschungen waren Translationsrutschungen.

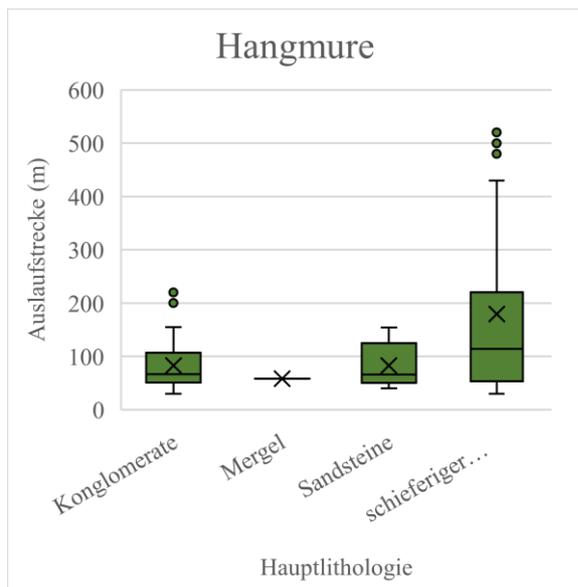


Abbildung 45: Diagramm mit Hauptlithologie und Auslaufstrecke bei Hangmuren (N=73)

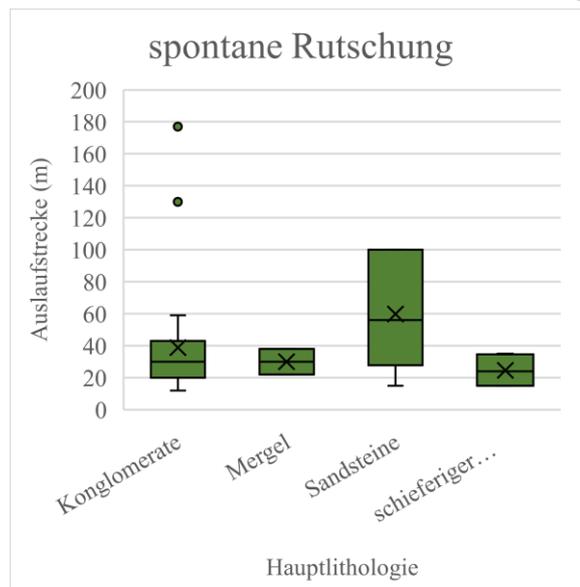


Abbildung 46: Diagramm mit Hauptlithologie und Auslaufstrecke bei spontanen Rutschungen (N=43)

Die längsten Auslaufstrecken der Hangmuren fanden auf schieferigen/mergeligen Kalk mit einem Mittelwert von 179,18 m Auslaufstrecke statt (Abbildung 45). Auf Konglomeraten fanden Hangmuren mit einem Mittelwert von 82,71 m Auslaufstrecke statt. Der Mittelwert von Hangmuren, welche sich auf Sandstein ereigneten, liegt bei 82,7 m Auslaufstrecke. Bei den spontanen Rutschungen liegt der größte Mittelwert mit 59,83 m Auslaufstrecke auf Sandstein (Abbildung 46). Die längsten gemessenen Auslaufstrecken ereigneten sich jedoch auf Konglomeraten. Auf schieferigen/mergeligen Kalk ereigneten sich die kürzesten Auslaufstrecken mit einem Mittelwert von 24,5 m Auslaufstrecke. Mergel kommt bei beiden Prozessarten vergleichsweise selten vor, weswegen auf Mergel nicht näher eingegangen wird.

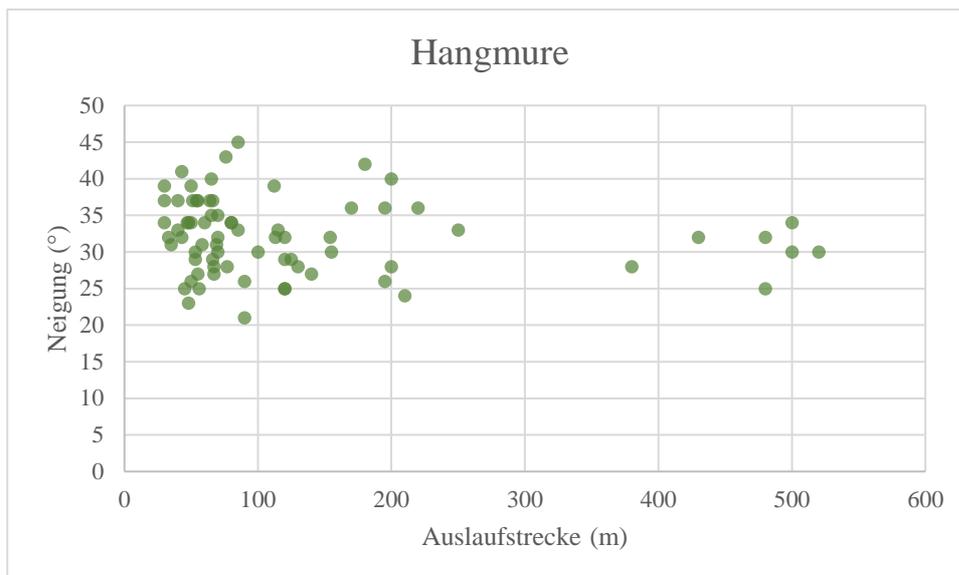


Abbildung 47: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung bei Hangmuren (N=73)

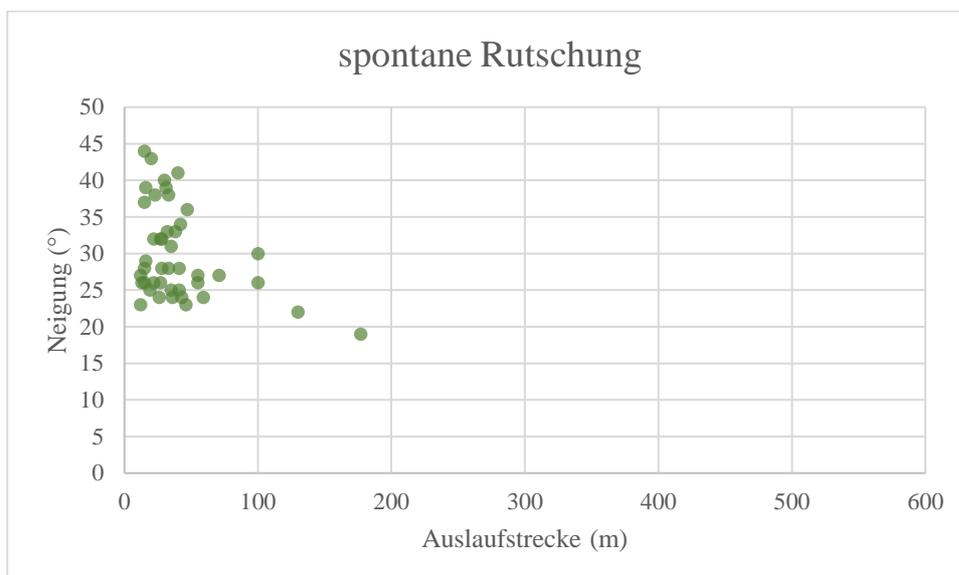


Abbildung 48: Streudiagramm mit Auslaufstrecke und Neigung bei spontanen Rutschungen (N=43)

Mit Abbildung 47 und Abbildung 48 sollen Unterschiede bezüglich der Prozessarten im Verhältnis der Neigung zur Auslaufstrecke untersucht werden. Bei den spontanen Rutschungen ist mit abnehmender Neigung ein Trend in Richtung längere Auslaufstrecken erkennbar. Die längste Auslaufstrecke mit 177 m ereignete sich an der niedrigsten Neigung mit 19° . Die vier längsten Auslaufstrecken ereigneten sich nicht über 30° . Dieser Trend ist bei Hangmuren weniger deutlich erkennbar. Die sieben längsten Auslaufstrecken ereigneten sich zwischen 25° und 34° . Sechs Hangmuren mit einer Auslaufstrecke von 170 m bis 250 m ereigneten sich auf einer Neigung von 33° bis 42° . Die Hangmure mit der größten Neigung von 45° weist einen vergleichsweise großen Auslaufstreckenwert von 85 m auf. Die spontane

Rutschung mit der größten Neigung von 44° weist eine im Vergleich zu anderen spontanen Rutschungen geringen Auslaufstreckenwert von 15 m auf.

9 Ergebnisse und Diskussion

9.1 Anzahl der Rutschungen

Aus einem nicht komprimierten unvollständigen Datensatz mit 758 Ereignissen aus verschiedenen Gebieten der Schweiz konnte ein komprimierter Datensatz mit 116 Ereignissen aus drei Gemeinden aus dem Unwetterjahr 2005 erstellt werden. In Flühli konnten 42 flachgründige Rutschungen, davon 22 Hangmuren und 20 spontane Rutschungen, in St. Antönien 38 flachgründige Rutschungen, davon 34 Hangmuren und 4 spontane Rutschungen und in Trub 36 flachgründige Rutschungen, davon 17 Hangmuren und 19 spontane Rutschungen, festgestellt werden. Die Anzahl der flachgründigen Rutschungen und definierten Prozessarten gibt keine Auskunft über die tatsächlich stattgefundenen Ereignisse in den Gemeinden im Unwetterjahr 2005. Durch die unvollständige Eintragungsdichte des nicht komprimierten Datensatzes war es wichtig, Parameter für die Möglichkeit einer Erstellung eines aussagekräftigen komprimierten Datensatzes weitestgehend zu erhalten. Die Möglichkeit eines aussagekräftigen komprimierten Datensatzes wäre bei Berücksichtigung aller in den drei Gemeinden aufgenommenen Ereignissen aus dem Unwetterjahr 2005 nicht zufriedenstellend realisierbar gewesen. Deshalb lassen die Ergebnisse keine Rückschlüsse auf die Prozessintensität einer Gemeinde zu.

9.2 Neigung eines Hanges (Rutschfläche)

Die Neigung eines Hanges, ist wenn es um die Beurteilung von Hangstabilitäten geht ein wichtiger Faktor. Die Unterschiede bezüglich der Mittelwerte in den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub sind gering und weisen kaum Differenzen auf. Die Minimalwerte und Maximalwerte sind in Flühli jedoch geringer als in den anderen beiden Gemeinden. Ein klarer Zusammenhang ist jedoch zwischen der Anzahl an flachgründigen Rutschungen und Neigungsklasse festzustellen. Eine Analyse von 739 Ereignissen zeigte, dass 35,72 % bei einer Hangneigung von 35° bis 40° und 29,77 % bei einer Hangneigung von 30° bis 35° stattgefunden haben. In diesen beiden Neigungsklassen haben sich mit Abstand die meisten flachgründigen Rutschungen ereignet. Außerdem hatten sich nur eine Rutschung unter 20° und zwei Rutschungen über 50° ereignet. Der anthropogene Einfluss konnte bei den Analysen nicht berücksichtigt werden. Die Dateneintragungen weisen jedoch, sofern eine Eintragung vorhanden, mehrheitlich keinen anthropogenen Einfluss auf. Es ist jedoch davon auszugehen,

dass ein Wassereintrag, beispielsweise von Straßen oberhalb eines Hanges oder von defekten Drainagen, einen wesentlichen Einfluss hat, sodass flachgründige Rutschungen auch auf niedrigerer Neigung in größerer Anzahl entstehen können.

Bezüglich der Trennung in die Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure konnten minimale Differenzen gefunden werden. Hangmuren weisen eine um etwa 2° höhere Neigung im Mittel als spontane Rutschungen auf. Die Streubreiten und Minimalwerte sowie Maximalwerte sind ähnlich.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine Häufung von Ereignissen in den Hangneigungsklassen 30° bis 35° und 35° bis 40° und eine Reduzierung der Ereignisse unter 30° und über 40°. Hangmuren weisen einen um etwa 2° höheren Mittelwert auf und werden nach der Datenauswertung dieser Arbeit tendenziell in etwas steilerem Gelände ausgelöst.

9.3 Höhenlage und Exposition

In den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub kamen die meisten flachgründigen Rutschungen in den Höhenlagenklassen 840 m – 940 m und 940 m – 1040 m vor. Danach folgt eine Reduzierung der Ereignisse mit einem leichten Anstieg der Ereignisse in den Höhenlagenklassen 1640 m – 1740 m und 1740 m – 1840 m. Hangmuren haben diesbezüglich die Tendenz in höheren Lagen als spontane Rutschungen vorzukommen. Der Mittelwert der spontanen Rutschungen beträgt 1095,7 m. Jener der Hangmuren 1361,05 m. Dieser Unterschied ist zu einem Großteil auf die Gemeinde St. Antönien zurückzuführen, wo viele Ereignisse (meistens Hangmuren) in höheren Lagen stattgefunden haben. Mit zunehmender Höhenlage ist zwar eine Änderung der Standorteigenschaften zu erwarten. Rückschlüsse auf vermehrte Prozessaktivität in unterschiedlichen Höhenlagen können hierbei aber nur schwer gezogen werden.

Ebenfalls kein klares Bild lassen die Expositionshäufigkeiten zu. Von 692 Ereignissen kamen am meisten flachgründige Rutschungen in NW – Hängen vor (17,77 %). Bei SO, S, SW und NO – Hängen konnte vermehrte Prozessaktivität festgestellt werden. Bei N, O und W – Hängen kamen am wenigsten Ereignisse vor. Auch bei Unterteilung in Prozessarten konnten wenige klare Tendenzen gefunden werden. Bei beiden Prozessarten kommen SO – Hänge am häufigsten vor. Einziger größerer Unterschied ist, dass bei spontanen Rutschungen vergleichsweise wenige Ereignisse in SW – Lage stattgefunden haben.

Es lässt sich festhalten, dass die Daten und Ergebnisse in Bezug auf Höhenlage und Exposition keine klaren Tendenzen liefern und eine Gefahrenbeurteilung auf Basis der Parameter Höhenlage und Exposition schwer möglich ist.

9.4 Morphologietyp

Eine Analyse des Morphologietyps in den Untersuchungsgemeinden Flühli, St. Antönien und Trub zeigt eine Häufung bei Typ 5. Hierbei fanden 43,10 % der flachgründigen Rutschungen statt. Bei einer Analyse von 726 Ereignissen trat ebenfalls eine Häufung bei Typ 5 (36,78 %) auf. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass flachgründige Rutschungen vergleichsweise oft auf eher geraden Längsprofilen ohne konkaver oder konvexer Wölbung auftreten. Weitere Häufungen in den Untersuchungsgemeinden sind bei Typ 6 (konvexe Wölbung in Querlinie) und Typ 8 (konkave Wölbung in Längslinie) zu erkennen. Diese Häufungen, wenn auch nicht so oft vorkommend wie Typ 5, konnten auch bei der Analyse mit 726 flachgründigen Rutschungen festgestellt werden.

Vergleicht man die Analysen Teil 1 und Teil 2 miteinander, ist eine Häufung bei beiden Prozessarten bei Typ 5 zu erkennen. Bei beiden Prozessarten kommt außerdem Typ 6 und Typ 8 häufig vor. Ein klarer Unterschied ist bei Typ 3 (konvexe Wölbung in Längslinie) zu erkennen. Dieser Typ kommt bei Hangmuren zu 13,70 % vor. Bei spontanen Rutschungen gar nicht.

Die Ergebnisse liefern einen Trend beim Entstehen von flachgründigen Rutschungen in Richtung eines geraden Längsprofils. Geländeformen mit konkaven oder konvexen Wölbungen kommen eher selten vor. Welche Bedeutung der Morphologietyp beim Einfluss auf das Entstehen einer flachgründigen Rutschung tatsächlich hat, ist dennoch schwierig zu beurteilen. In diesem Zusammenhang wären vertiefende Analysen in den Untersuchungsgemeinden mittels GIS notwendig.

9.5 Abmessungen der flachgründigen Rutschungen

Die längsten flachgründigen Rutschungen wurden in der Gemeinde Flühli gemessen, welche zu einem großen Teil im Freiland stattfanden. Der höchste gemessene Maximalwert liegt hingegen in St. Antönien. Dort liegt der Maximalwert bei 116 m Länge. In Trub waren die kürzesten Rutschungen zu beobachten. Dies dürfte vor allem daran liegen, dass in Trub vergleichsweise viele Rutschungen im Wald stattfanden. Die Messungen der Breiten ergaben

für Flühli den niedrigsten Mittelwert, obwohl dort die höchsten Werte bei den Längen gemessen wurden. Die höchsten Werte bei den Breiten wurden in Trub gemessen. Dies lässt vermuten, dass dort wo viele Rutschungen im Wald abgegangen sind, die Werte der Breitenmessungen eher höher sind. Auch der Mittelwert in St. Antönien liegt im Vergleich zum Mittelwert in Flühli etwas höher. In St. Antönien ereigneten sich, wie in Trub, vergleichsweise viele Rutschungen im Wald. Bei der Anrissfläche und bei den gemessenen Anrissmächtigkeiten sind wenige Unterschiede zu erkennen. Der höchste Wert der Anrissflächen konnte in St. Antönien festgestellt werden. Die Werte der Anrissmächtigkeiten sind in St. Antönien und Trub etwas niedriger als in Flühli. Die Gemeinden, in denen mehrere Rutschungen im Wald abgegangen sind, weisen etwas niedrigere Anrissmächtigkeiten im Vergleich zur Gemeinde Flühli auf, wo weniger Rutschungen im Wald abgegangen sind. Die Volumenwerte sind in Trub am höchsten (ähnlich wie in Flühli) und in St. Antönien am niedrigsten. Beim Mittelwert in Trub muss jedoch berücksichtigt werden, dass hier das volumenmäßig mit Abstand größte Ereignis (5443 m^3) stattgefunden hat, weswegen dieser Wert ähnlich gegenüber dem hohen Wert in Flühli (mehrheitlich Freiland) ist.

Größtenteils konnten in allen drei Untersuchungsgebieten kleinere flachgründige Rutschungen festgestellt werden, mit einer Häufung an Ereignissen in der Volumenklasse $30 \text{ m}^3 - 230 \text{ m}^3$ und einer Reduzierung der Ereignisse in den nachfolgenden Volumenklassen. In jeder der drei Untersuchungsgemeinden fand ein im Verhältnis und volumenmäßig großes Ereignis statt. In Flühli und St. Antönien jeweils Ereignisse mit über 2500 m^3 und in Trub sogar mit über 5400 m^3 . Außerdem konnten Anzeichen, wenngleich im Vorfeld auch deutlicher vermutet, zwischen Neigung und Volumen entdeckt werden, wonach mit zunehmender Neigung eher volumenmäßig kleinere Rutschungen und mit abnehmender Neigung volumenmäßig eher größere Rutschungen abgehen.

Die Analysen in Teil 2 zeigen die Tendenz, dass spontane Rutschungen zwar etwas kürzer, aber dafür etwas breiter als Hangmuren sind. Die Anrissflächen und Anrissmächtigkeiten beider Prozessarten sind ähnlich und weisen nur minimale Differenzen auf. Das Volumen hingegen ist im Mittel bei spontanen Rutschungen deutlich höher, wobei diesbezüglich auf das mit Abstand größte Ereignis (5443 m^3), welches als spontane Rutschung identifiziert wurde, verwiesen werden muss. Außerdem muss erwähnt werden, dass nach den Daten des komprimierten Datensatzes mehr spontane Rutschungen im Freiland als Hangmuren im Freiland stattgefunden haben. Nach einer Untersuchung in untergliederte Volumenklassen

konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden. Die am häufigsten vorkommende Volumenklasse ist bei beiden die Klasse $30 \text{ m}^3 - 130 \text{ m}^3$.

9.6 Vegetationsart

Die Ergebnisse zeigen eine Häufung von Ereignissen im Freiland in allen drei Gemeinden. Durch die Erstellung eines komprimierten Datensatzes konnten nicht alle in den Gemeinden im Unwetterjahr 2005 stattgefundenen Ereignisse berücksichtigt werden. Deshalb ist die Prozessaktivität je Vegetationsart in den Gemeinden nicht sicher. Von allen 116 Ereignissen sind jedoch 77 im Freiland entstanden. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit Trends in anderen themenverwandten Publikationen, wonach im Wald weniger flachgründige Rutschungen als im Freiland abgehen.

Die Tendenz einer stabilisierenden Wirkung des Waldes in Bezug auf flachgründige Rutschungen ist auch bei den Analysen mit Neigung und Volumen je Vegetationsart zu erkennen. In dieser Hinsicht weisen Neigungen im Wald um etwa 5° höhere Werte auf als im Freiland. Das mittlere Volumen aller flachgründigen Rutschungen im Freiland ist fast doppelt so groß wie im Wald.

Die Ergebnisse von Teil 2 weisen auf ein vermehrtes Aufkommen von Hangmuren im Wald im Vergleich zu spontanen Rutschungen hin. Mögliche Gründe dafür könnten das hohe Aufkommen von Hangmuren in St. Antönien sowie die generell höhere Anzahl an identifizierten Hangmuren sein. Im Wald sind die Neigungen bei Hangmuren niedriger als bei spontanen Rutschungen und im Freiland sind die Neigungen bei spontanen Rutschungen niedriger als bei Hangmuren. Die Werte des Volumens sind bei beiden Prozessarten im Freiland höher, wobei das Volumen im Freiland und im Wald bei spontanen Rutschungen höher ist als bei Hangmuren.

9.7 Hydrologie

Die mehrheitliche Anzahl an Ereignissen ereignete sich nicht in markanter Eintragslage oder Verlustlage, sondern in Eintragslage. Man kann davon ausgehen, dass demnach flachgründige Rutschungen nicht nur in Eintragslagen entstehen, in denen eine große, topographisch bedingte, Zufuhr von Oberflächenwasser oder unterirdischem Wasser stattfindet. Außerdem wurden die aktuellen Feuchtebedingungen überwiegend mit „frisch/feucht“ beurteilt. „Nasse“ Standorte kamen selten vor. „Trockene“ Standorte überhaupt nicht.

Die Analysen von Teil 2 weisen kaum Unterschiede zwischen spontanen Rutschungen und Hangmuren auf. Bei beiden Prozessarten konnten am meisten Ereignisse in Eintragslage und bei „frisch/feucht“ festgestellt werden. Wie auch bei den Analysen in Teil 1 muss bei den Analysen von Teil 2 der zeitliche Unterschied zwischen Ereignisdatum und Erhebungsdatum berücksichtigt werden. Die Erhebungen fanden zum Teil Monate nach den Ereignissen statt, weswegen die Ergebnisse der aktuellen Feuchtebedingungen unsicher sind. Die Möglichkeit einer Erhebung unmittelbar nach dem Abgehen von spontanen Rutschungen und Hangmuren ist jedoch schwer möglich.

9.8 Hydrogeologie

In Flühli und St. Antönien konnten vergleichsweise viele Ereignisse mit der Beurteilung „viel“ in Bezug auf die Wasserführung im Untergrund festgestellt werden. In diesen beiden Gemeinden, insbesondere in St. Antönien, kommen viele Hangmuren vor. In Trub, wo mehr spontanen Rutschungen als Hangmuren beobachtet wurden, ist die Anzahl der Ereignisse, welche mit „viel“ beurteilt wurden niedriger.

Die Analysen in Teil 2 bestätigen die Tendenz, dass dort wo die Wasserführung im Untergrund stärker war, mehrheitlich Hangmuren abgegangen sind. Der zeitliche Unterschied zwischen Ereignisdatum und Erhebungsdatum muss auch hier berücksichtigt werden und deshalb sind die Ergebnisse zu wenig sicher, um zuverlässige Rückschlüsse ziehen zu können.

9.9 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Bei den Analysen von Teil 1 weisen 81,90 % Anzeichen alter Rutschbewegungen auf, weshalb bei der Suche nach möglichen gefährdeten Hängen eine besondere Bedeutung an morphologischen Merkmalen, welche Anzeichen für frühere Rutschbewegungen aufweisen, beigemessen werden sollte. Im Wald kommt es zudem verhältnismäßig öfter vor, dass Rutschungen ohne Anzeichen alter Rutschbewegungen, vorkommen.

Ähnliche Ergebnisse können auch in Teil 2 beobachtet werden. Beide Prozessarten weisen mehrheitlich Anzeichen alter Rutschbewegungen auf. Einziger Unterschied ist ein ausgeglichenes Verhältnis (Ja/Nein) bei spontanen Rutschungen im Wald. Dieses Ergebnis ist schwer zu beurteilen und kann möglicherweise auf die im Verhältnis niedrige Anzahl an erhobenen spontanen Rutschungen im Wald zurückgeführt werden.

9.10 Bodenentwicklung

Die Ergebnisse der Analyse der unterschiedlichen Entwicklungsarten der Böden zeigt eine Häufung von flachgründigen Rutschungen in allen drei Gemeinden beim „entwickelten Boden“. Hierbei kommen 80,17 % aller in den Gemeinden stattgefundenen flachgründigen Rutschungen vor. Die Anzahl der flachgründigen Rutschungen auf „Rohböden“ und „Nassböden“ ist vergleichsweise niedrig. Auf „Rohböden“ kommen 13,79 % und auf „Nassböden“ nur 6,04 % vor. Dieses Ergebnis ist interessant, da bei nassen Böden am wenigsten flachgründige Rutschungen passierten. Dies bedeutet, dass bei einer Beurteilung von möglichen gefährdeten Hängen nicht nur nasse Gebiete für das Auslösen von flachgründigen Rutschungen relevant sind. Außerdem konnte in Bezug auf die Bodenentwicklungsart „entwickelter Boden“ eine unterschiedliche Anzahl der Häufungen im Freiland oder Wald festgestellt werden. Im Wald ereigneten sich 71,79 % und im Freiland 84,42 % aller flachgründigen Rutschungen auf „entwickelten Böden“. Keine Unterschiede bezüglich der Vorkommen im Freiland oder Wald liefert eine Analyse der Bodenentwicklungsarten „Rohboden“ und „Nassboden“.

Die Analysen von Teil 2 zeigen, wie bei den Analysen von Teil 1, ein mehrheitliches Vorkommen beider Prozessarten beim Bodenentwicklungstyp „entwickelter Boden“. Aus den Bodenentwicklungstypen „Rohboden“ und „Nassboden“ sind hinsichtlich der im Freiland oder Wald auftretenden spontanen Rutschungen oder Hangmuren keine Unterschiede zu erkennen. Ein Unterschied lässt sich jedoch beim „entwickelten Boden“ erkennen. Bei Hangmuren ereigneten sich 37,5 % der auf „entwickelten Böden“ stattgefundenen Ereignisse im Wald. Dieser Wert ist bei spontanen Rutschungen niedriger und liegt bei 23,33 %.

9.11 Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes, Makroporenarten und Lockergestein

Eine Analyse der Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes, der Makroporenarten und des Lockergesteins konnte nicht mit dem komprimierten Datensatz durchgeführt werden, da in Folge des Selektionsprozesses für einen vollständigen Datensatz diese Parameter aufgrund einer zu niedrigen Anzahl an Eintragungen nicht berücksichtigt werden konnten. Deshalb wurden die vorhandenen Eintragungen individuell aufbereitet, um mögliche Unterschiede feststellen zu können. Die Analysen von 479 flachgründigen Rutschungen zeigen einen höheren Mittelwert beim Parameter Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes im Wald im

Vergleich zum Freiland. Auswertungen des komprimierten Datensatzes zeigen die Tendenz eines reduzierten Vorkommens von Ereignissen im Wald. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass die höheren Mächtigkeiten des Hauptwurzelraumes im Wald zur besseren Stabilisierung der Hänge beitragen können.

Insgesamt erfolgte bei 502 von 758 flachgründigen Rutschungen eine Eintragung der Makroporenart im Aufnahmeformular. Bei der Auswertung von 502 flachgründigen Rutschungen im Hinblick auf deren Makroporenarten zeigt sich, dass vor allem Wurmgänge (52,39 %) und alte Wurzelkanäle (37,65 %) vorkommen, was bedeutet, dass potentiell zügig Niederschlagswasser in tiefergelegene Bodenschichten geleitet werden kann. Mausegänge und Bodenrisse als Makroporenart kommen nur selten vor. Bei den Wurmgängen zwischen Freiland und Wald sind nur geringe Unterschiede zu erkennen. Ein Unterschied konnte jedoch zwischen im Freiland und im Wald erhobenen alten Wurzelkanälen festgestellt werden. Im Wald wurde das Ausmaß der alten Wurzelkanäle verhältnismäßig oft mit „viel“ beurteilt. Im Freiland hingegen wurde das Ausmaß der alten Wurzelkanäle am öftesten mit „keine“ beurteilt. Diese Ergebnisse weisen einerseits auf ein vermehrtes Wurzelwachstum im Wald hin und zeigen andererseits die Möglichkeit auf, dass alte Wurzelkanäle später als Wasserleiter von Niederschlagswasser und Oberflächenwasser in tiefergelegene Bodenschichten dienen können.

Eine Analyse des Lockergesteins in der Nähe der Bruchzone von 530 flachgründigen Rutschungen zeigte, dass bei der Lockergesteinsklasse „fein“ mehrheitlich „toniger Silt“, bei der Lockergesteinsklasse „grob“ mehrheitlich „siltiger Kies“ sowie „siltiger bis toniger Kies“ und bei der Lockergesteinsklasse „mittel“ mehrheitlich „siltiger Sand“ festgestellt wurden. Insgesamt konnte oft die Lockergesteinsklasse „fein“ (43,77 %) festgestellt werden. Die Lockergesteinsklassen „grob“ und „mittel“ kommen zu 34,34 % bzw. zu 21,89 % vor. Eine Analyse des Zusammenhanges zwischen der Lockergesteinsklasse in der Nähe der Bruchzone und der Neigung des Hanges zeigt den niedrigsten Mittelwert bei der Lockergesteinsklasse „mittel“ mit einem Wert von 33,78 °. Demnach sind die Neigungen der Hänge bei mittelkörnigen Lockergesteinsmaterial im Vergleich flacher als bei grobkörnigen und feinkörnigen Lockergesteinsmaterial.

9.12 Festgestein

Die Ereignisse in der Gemeinde Flühli liegen im geologischen Bereich der subalpinen Molasse mit Konglomeraten, Sandsteinen und Mergel. Die Gemeinde St. Antönien befindet sich im geologischen Gebiet des Penninikum mit Bündnerschiefern. Die bei den flachgründigen Rutschungen im komprimierten Datensatz vorkommende Hauptlithologie ist schieferiger/mergeliger Kalk. Die untersuchten Ereignisse in Trub liegen in flachliegender mittelländischer Molasse mit Konglomeraten, Mergel und Sandsteinen.

Eine Untersuchung der Hauptlithologien in Bezug auf ihr Auftreten in unterschiedlichen Neigungsverhältnissen bringt kaum Tendenzen. Die Neigungen der untersuchten flachgründigen Rutschungen sind auf Konglomeraten in Trub am größten. Berechnet man jedoch den Mittelwert aller auf Konglomerat aufgetretenen Ereignisse, liegt dieser mit etwa $0,5^\circ$ unter dem Mittelwert der Ereignisse in St. Antönien, welche sich auf schieferigen/mergeligen Kalk ereigneten ($31,84^\circ$). Sandsteine weisen in Flühli einen Mittelwert von $30,5^\circ$ und in Trub einen Mittelwert von $28,33^\circ$ auf, weswegen flachgründige Rutschungen auf Sandsteinen tendenziell in flacheren Gebieten abgehen. Auf Mergel konnten nur 3 Ereignisse festgestellt werden, weswegen darauf nicht näher eingegangen wird.

Ein Vergleich der beiden Prozessarten in Bezug auf deren Neigungsverhältnisse je Hauptlithologie weist auf erhöhte Neigungswerte im Mittel bei Hangmuren hin. Die untersuchten Hangmuren haben im Vergleich zu spontanen Rutschungen auf Konglomeraten eine erhöhte Neigung um $2,99^\circ$. Hangmuren auf Sandsteinen bzw. schieferigen/mergeligen Kalk weisen erhöhte Mittelwerte um $2,47^\circ$ und $0,66^\circ$ auf. Auf Mergel wird, wie bei den Ergebnissen von Teil 1, nicht näher eingegangen.

9.13 Ort der Gleitfläche und Mechanismus

In allen drei Gemeinden kommen überwiegend Translationsrutschungen vor. Rotationsrutschungen konnten insgesamt seltener festgestellt werden. Einzig in Trub konnten verhältnismäßig viele Rotationsrutschungen ($30,56\%$) erhoben werden. Translationsrutschungen fanden mehrheitlich im Freiland, mit Ausnahme der Gemeinde Trub (mehrheitlich im Wald), statt. Rotationsrutschungen im Wald fanden nicht statt. Bezüglich der Beurteilung des Ortes der Gleitfläche wurde keine Gleitfläche „am Übergang von Locker- zu Festgestein“ und „im Festgestein“ protokolliert. Rotationsrutschungen, welche ausschließlich im Freiland stattfanden, sind mehrheitlich „am Übergang vom Oberboden zum

Lockergestein“ abgegangen. Bei den Translationsrutschungen ist ein ähnlicher Trend feststellbar. Bei den erhobenen Translationsrutschungen im Wald ist hingegen ein Trend bei der Beurteilung des Ortes der Gleitfläche in Richtung „im Lockergestein“ zu erkennen.

Bei den Ergebnissen von Teil 2 können leichte Unterschiede und Tendenzen festgestellt werden. Demnach kommen spontane Rutschungen (23,26 %) öfter als Hangmuren (5,48 %) als Rotationsrutschungen im Freiland vor. Dabei kommen beide Prozessarten mehrheitlich „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“ vor. Rotationsrutschungen im Wald kommen, wie auch bei den Ergebnissen von Teil 1, nicht vor. Hangmuren kommen verhältnismäßig öfter (94,52 %) als Translationsrutschung, im Vergleich zu spontanen Rutschungen (76,74 %), vor. Beiden Prozessarten gemein ist das überwiegende Vorkommen der Gleitfläche „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“ bei Translationsrutschungen im Freiland. Im Wald hingegen zeigen sich Unterschiede. Dabei ist das Verhältnis zwischen „im Lockergestein“ und „am Übergang zwischen Oberboden und Lockergestein“ auftretenden spontanen Rutschungen ausgeglichen. Bei Hangmuren kommen hingegen mehr Ereignisse „im Lockergestein“ (65, 52 %) vor. Bei beiden Prozessarten kommt, wie auch bei den Ergebnissen von Teil 1, „am Übergang von Locker zu Festgestein“ und „im Festgestein“ nicht vor.

9.14 Auslaufstrecke

Die Analysen von Teil 1 zeigen, dass knapp die Hälfte (43,97 %) aller flachgründigen Rutschungen eine Auslaufstrecke von ≤ 50 m besitzen und verhältnismäßig kurz sind. In die Auslaufstreckenklasse 50 m – 100 m fallen 30,17 % aller Ereignisse. Zwischen 100 m und 250 m fallen 19,83 % aller Ereignisse und flachgründige Rutschungen mit Auslaufstrecken > 250 m kommen nur zu 6,03 % vor. Daraus lässt sich ableiten, dass flachgründige Rutschungen vergleichsweise oft kurze Auslaufstrecken aufweisen und nur etwa jede fünfte flachgründige Rutschung eine Auslaufstrecke aufweist, welche größer als 100 m ist. Die Auslaufstrecken konnten aufgrund der niedrigen Eintragungsdichte im Aufnahmeformular bezüglich des Parameters bis wohin die Auslaufstrecke reicht, nicht in ungestörte Auslaufstrecken oder durch Störstellen gestoppte Auslaufstrecken unterteilt werden. Sofern eine Eintragung vorhanden, sind diese Auslaufstrecken mehrheitlich als ungestört zu erachten. Die Gemeinden Flühli und St. Antönien weisen im Freiland längere Auslaufstrecken als im Wald auf. In Trub hingegen weisen die Auslaufstrecken im Wald einen höheren Mittelwert als im Freiland auf. Insgesamt ist der Unterschied der Länge der Auslaufstrecken

zwischen Freiland oder Wald weniger deutlich als erwartet. Im Freiland liegt der Mittelwert aller flachgründigen Rutschungen bei 96,33 m und bei im Wald stattgefundenen flachgründigen Rutschungen etwas niedriger bei einem Mittelwert von 89,48 m. Die maximalen Auslaufstrecken im Freiland und Wald wurden in St. Antönien mit Werten von 520 m bzw. 500 m gemessen.

Keine Tendenzen liefert eine Untersuchung zwischen Volumen und Auslaufstrecke. Ein leichter Trend ist hingegen zwischen Neigung und Auslaufstrecke zu sehen. Dabei kann man erkennen, wenn auch nicht eindeutig, dass mit zunehmender Auslaufstrecke die Neigung eher reduziert wird. Ein klares Bild lässt jedoch eine Untersuchung mit 302 flachgründigen Rutschungen mit Neigung und Pauschalgefälle zu. Mit zunehmender Neigung steigt das Pauschalgefälle. Ebenfalls klar ist ein Zusammenhang zwischen Mechanismus und Auslaufstrecke. Die Auslaufstrecken der Translationsrutschungen sind länger als die Auslaufstrecken der Rotationsrutschungen. Die längsten Auslaufstrecken der Ereignisse des komprimierten Datensatzes konnten als Translationsrutschungen identifiziert werden. Die längsten Auslaufstrecken konnten bei einer Analyse mit der Menge der Wasserführung bei „wenig“ festgestellt werden. Die flachgründigen Rutschungen mit der Beurteilung „viel“ weisen niedrigere Auslaufstreckenwerte auf. Bezüglich der Hauptlithologie konnten die längsten Auslaufstrecken auf schieferigen/mergeligen Kalk in St. Antönien festgestellt werden.

Eine durchgeführte Analyse der Lockergesteinsklassen (fein, grob, mittel) mit 245 flachgründigen Rutschungen zeigt die längsten Auslaufstrecken auf „grobem“ Lockermaterial.

Die Analysen von Teil 2 bestätigen die Annahme von längeren Auslaufstrecken bei Hangmuren im Vergleich zu spontanen Rutschungen. Mehrheitlich liegen spontane Rutschungen in den Auslaufstreckenklassen 15 m – 30 m und 30 m – 45 m. Bei den Hangmuren liegen nur 7,3 % in der Auslaufstreckenklasse 30 m – 45 m und unter 30 m Auslaufstrecke ereigneten sich überhaupt keine Hangmuren. Am meisten Ereignisse ereigneten sich diesbezüglich in den Auslaufstreckenklassen 45 m – 60 m und 60 m – 75 m. Die Mittelwerte beider Prozessarten liefern ein klares Bild. Hangmuren haben demnach einen über drei Mal so hohen Auslaufstreckenmittelwert wie spontane Rutschungen. Außerdem sind die Minimalwerte und Maximalwerte bei Hangmuren deutlich höher.

Betrachtet man die Ergebnisse der beiden Prozessarten je Vegetationstyp lassen sich kaum Unterschiede erkennen. Bei beiden Prozessarten sind die Auslaufstrecken im Wald kürzer als im Freiland, weswegen der Einfluss des Waldes auf die Reduzierung der Auslaufstrecken bestätigt wird. Man könnte diesbezüglich annehmen, dass der Einfluss des Waldes auf die Reduzierung der Auslaufstrecken bei spontanen Rutschungen größer ist. Die Ergebnisse liefern hierbei keine Tendenzen.

Bei den Auswertungen des Parameters Wasserführung in der Rutschfläche konnten bei Hangmuren mit der Beurteilung „Anzeichen“ die längsten Auslaufstrecken festgestellt werden. Am häufigsten konnte bei beiden Prozessarten jedoch die Beurteilung „viel“ festgestellt werden. Bei spontanen Rutschungen sind die längsten Auslaufstrecken bei der Beurteilung „wenig“. Bei diesen Ergebnissen muss jedoch der zeitliche Unterschied zwischen Ereignisdatum und Erhebungsdatum berücksichtigt werden, welche zum Teil Monate nach den Ereignissen stattgefunden haben. Die Bodenwasserverhältnisse und Wetterverhältnisse können demnach nicht mit den Verhältnissen während des Unwetters verglichen werden und lassen somit kaum Rückschlüsse auf die tatsächliche Wasserführung im Untergrund während der Ereignisse zu.

Bei einer Analyse des Mechanismus bei Hangmuren und spontanen Rutschungen konnten bei beiden Prozessarten längere Auslaufstrecken bei Translationsrutschungen beobachtet werden. Der Unterschied der Auslaufstreckenlängen zwischen Translationsrutschungen und Rotationsrutschungen ist bei Hangmuren größer. Rotationsrutschungen kommen bei Hangmuren sehr selten vor. Bei spontanen Rutschungen vergleichsweise öfter.

Die längsten Auslaufstrecken in Bezug auf die Hauptlithologie konnten bei Hangmuren auf schieferigen / mergeligen Kalk und bei spontanen Rutschungen auf Sandstein erhoben werden. Bei Hangmuren kommen allerdings nur wenige Ereignisse auf Mergel und Sandstein vor. Bei spontanen Rutschungen kommen die Ereignisse größtenteils auf Konglomeraten vor, weswegen die Ergebnisse unsicher sind. Der aussagekräftigste Vergleich ist bei Hangmuren auf Konglomeraten und schieferigen / mergeligen Kalk möglich, da hierbei verhältnismäßig viele Hangmuren stattfanden. Dabei sind die Auslaufstrecken auf schieferigen / mergeligen Kalk deutlich länger als auf Konglomeraten.

Eine Analyse der Neigungen der Hänge und der Auslaufstrecken je Prozessart zeigt geringe Unterschiede. Bei spontanen Rutschungen ist mit abnehmender Neigung ein Trend in

Richtung längere Auslaufstrecken erkennbar. Dieser Trend ist hingegen bei Hangmuren weniger deutlich.

10 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit flachgründigen Rutschungsprozessen, welche sich im Unwetterjahr 2005 in den Gemeinden Flühli, St. Antönien (seit 2016 Luzein) und Trub ereigneten. Dazu zählen spontane Rutschungen und Hangmuren. Ziel dieser Arbeit ist einerseits eine Inventur und Datenauswertung von flachgründigen Rutschungen in diesen Gemeinden im Hinblick auf deren Rutschungsauslösung zu erarbeiten und andererseits eine Unterscheidung der Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure hinsichtlich des Einflusses verschiedener Auslösungsparameter durchzuführen.

Um die Forschungsfragen möglichst zufriedenstellend beantworten zu können, war es notwendig eine geeignete Methodik zur Durchführung zu entwickeln. Dabei konnte auf einen Datensatz der Eidgenössischen Forschungsanstalt (WSL) aus der Schweiz mit 758 Ereignissen von flachgründigen Rutschungen zurückgegriffen werden. Da eine Vergleichbarkeit von bestimmten Parametern nur mit einem vollständigen Datensatz möglich war, musste dieser mit Hilfe definierter Kriterien komprimiert werden. Dieser Vorgang wurde so konzipiert, dass möglichst viele Rutschungsparameter beibehalten werden konnten. Dadurch konnte ein komprimierter, vollständiger und konsistenter Datensatz mit 116 Ereignissen aus dem Unwetterjahr 2005 in den Gemeinden Flühli, St. Antönien und Trub aus der Schweiz entwickelt werden, mit dem verschiedenste Analysen zur Vergleichbarkeit durchgeführt wurden. Zusätzlich stand ein unvollständiger Datensatz mit 758 flachgründigen Rutschungen zur Verfügung, welcher bei verschiedenen Analysen individuell aufbereitet wurde (nur bei Analyse Teil 1). Bei weiteren Untersuchungen wurden diese 116 flachgründigen Rutschungen in spontane Rutschungen und Hangmuren nach definierten Kriterien (Analyse Teil 2) untergliedert. Dabei war das Ziel mögliche Unterschiede dieser ähnlichen Prozesse zu erforschen.

Die in der Software Microsoft Excel 2019 aufbereiteten Daten wurden vor allem mithilfe von Boxplot Diagrammen, Streudiagrammen, Kreuztabellen und Histogrammen analysiert.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse in den Gemeinden Flühli, St. Antönien (seit 2016 Luzein) und Trub aus dem Unwetterjahr 2005 und Unterschiede der Prozessarten spontane Rutschung und Hangmure systematisch zusammengefasst. Die Ergebnisse von Teil 1 beinhalten die Analysen aller flachgründigen Rutschungen. Dabei erfolgte keine Unterscheidung zwischen spontanen Rutschungen und Hangmuren. Bei den Ergebnissen von

Teil 2 wurde der Fokus auf eine Unterscheidung von spontanen Rutschungen und Hangmuren gelegt:

- Anzahl der Rutschungen: Untersuchung von 116 flachgründigen Rutschungen, davon 42 in Flühli, 38 in St. Antönien und 36 in Trub. In Flühli wurden 20 spontane Rutschungen und 22 Hangmuren, in St. Antönien 4 spontane Rutschungen und 34 Hangmuren und in Trub 19 spontane Rutschungen und 17 Hangmuren untersucht.
- Neigung des Hanges (Rutschfläche): In St. Antönien konnten die steilsten Hänge und in Flühli die flachsten Hänge beobachtet werden. Die Unterschiede sind in allen drei Gemeinden gering ($30,86^\circ$ bis $31,84^\circ$). Hangmuren kommen im Vergleich zu spontanen Rutschungen in um etwa 2° steileren Gebieten vor.
- Höhenlage und Exposition: In Flühli, St. Antönien und Trub kamen die meisten flachgründigen Rutschungen in den Höhenlagenklassen 840 m – 940 m und 940 m – 1040 m vor. Von 692 flachgründigen Rutschungen kamen am meisten Rutschungen in NW – Hängen vor (17,77 %). Bei SO, S, SW und NO – Hängen konnte vermehrte Prozessaktivität festgestellt werden. Bei N, O und W – Hängen kamen am wenigsten Ereignisse vor. Bei beiden Prozessarten kommen in den drei Untersuchungsgemeinden SO – Hänge am häufigsten vor. Einziger größerer Unterschied ist, dass bei spontanen Rutschungen vergleichsweise wenige Ereignisse in SW – Lage stattgefunden haben.
- Morphologietyp: Die Ergebnisse liefern einen Trend von flachgründigen Rutschungen in Richtung eines geraden Längsprofils. Geländeformen mit konkaven oder konvexen Wölbungen kommen eher selten vor.
- Abmessungen: Größtenteils konnten in allen drei Untersuchungsgebieten kleinere flachgründige Rutschungen festgestellt werden, mit einer Häufung von Ereignissen in der Volumenklasse 30 m^3 – 230 m^3 und einer Reduzierung der Ereignisse in den nachfolgenden Volumenklassen. Spontane Rutschungen sind etwas kürzer, aber dafür breiter als Hangmuren. Es haben mehr spontane Rutschungen im Freiland als Hangmuren im Freiland stattgefunden. Die am häufigsten vorkommende Volumenklasse ist bei beiden die Klasse 30 m^3 – 130 m^3 .

- Vegetationsart: Die Ergebnisse zeigen eine Häufung von flachgründigen Rutschungen im Freiland in allen drei Gemeinden. Die Tendenz einer stabilisierenden Wirkung des Waldes in Bezug auf flachgründige Rutschungen ist auch bei einer Analyse mit Neigung und Volumen je Vegetationsart zu erkennen. In dieser Hinsicht weisen Neigungen im Wald um etwa 5° höhere Werte auf als im Freiland. Das mittlere Volumen aller flachgründigen Rutschungen im Freiland ist fast doppelt so groß wie im Wald. Im Wald sind die Neigungen bei Hangmuren niedriger als bei spontanen Rutschungen und im Freiland sind die Neigungen bei spontanen Rutschungen niedriger als bei Hangmuren.
- Hydrologie: Die mehrheitliche Anzahl an flachgründigen Rutschungen ereignete sich nicht in markanter Eintragslage oder Verlustlage, sondern in Eintragslage. Die aktuellen Feuchtebedingungen wurden überwiegend mit „frisch/feucht“ beurteilt.
- Hydrogeologie: In Flühli und St. Antönien konnten vergleichsweise viele flachgründige Rutschungen mit der Beurteilung „viel“ in Bezug auf die Wasserführung im Untergrund festgestellt werden. In diesen beiden Gemeinden, insbesondere in St. Antönien, kommen viele Hangmuren vor. In Trub, wo mehr spontane Rutschungen als Hangmuren beobachtet wurden, ist die Anzahl der Ereignisse, welche mit „viel“ beurteilt wurden niedriger.
- Anzeichen alter Rutschbewegungen: Es weisen 81,90 % der flachgründigen Rutschungen Anzeichen alter Rutschbewegungen in Form von morphologischen Merkmalen auf.
- Bodenentwicklung: Die Ergebnisse der Analyse der unterschiedlichen Entwicklungsarten der Böden zeigt eine Häufung von flachgründigen Rutschungen in allen drei Gemeinden beim „entwickelten Boden“. Nassböden kommen eher selten vor. Bei Hangmuren ereigneten sich 37,5 % der auf „entwickelten Böden“ stattgefundenen Ereignisse im Wald. Dieser Wert liegt bei spontanen Rutschungen bei 23,33 %.

- Mächtigkeit des Hauptwurzelraums: Die Ergebnisse von 479 flachgründigen Rutschungen zeigen eine höhere Mächtigkeit des Hauptwurzelraumes im Wald als im Freiland.
- Makroporenart: Insgesamt erfolgte bei 502 von 758 flachgründigen Rutschungen eine Eintragung der Makroporenart im Aufnahmeformular. Bei der Auswertung von 502 flachgründigen Rutschungen im Hinblick auf deren Makroporenarten zeigt sich, dass vor allem Wurmgänge (52,39 %) und alte Wurzelkanäle (37,65 %) vorkommen.
- Lockergestein: Eine Analyse des Lockergesteins in der Nähe der Bruchzone von 530 flachgründigen Rutschungen zeigte, dass verhältnismäßig oft die Lockergesteinsklasse „fein“ (43,77 %) festgestellt wurde. Die Lockergesteinsklassen „grob“ und „mittel“ kommen zu 34,34 % bzw. zu 21,89 % vor. Die Neigungen der Hänge bei mittelkörnigen Lockergesteinsmaterial sind im Vergleich flacher als bei grobkörnigen und feinkörnigen Lockergesteinsmaterial.
- Festgestein: Die Neigungen der flachgründigen Rutschungen sind auf Konglomeraten in der Gemeinde Trub am größten. Berechnet man jedoch den Mittelwert aller auf Konglomerat in den Gemeinden Trub und Flühli aufgetretenen Ereignisse, liegt dieser mit etwa $0,5^\circ$ unter dem Mittelwert der Ereignisse in St. Antönien, welche sich auf schieferigen/mergeligen Kalk ereigneten ($31,84^\circ$). Ein Vergleich der beiden Prozessarten in Bezug auf deren Neigungsverhältnisse je Hauptlithologie weist bei allen erhobenen Hauptlithologien auf erhöhte Neigungswerte bei Hangmuren hin.
- Ort der Gleitfläche und Mechanismus: In allen drei Gemeinden kommen überwiegend Translationsrutschungen vor. Rotationsrutschungen, welche ausschließlich im Freiland stattfanden, sind mehrheitlich „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“ abgegangen. Bei den Translationsrutschungen ist ein ähnlicher Trend feststellbar. Bei den erhobenen Translationsrutschungen im Wald ist hingegen ein Trend bei der Beurteilung des Ortes der Gleitfläche in Richtung „im Lockergestein“ zu erkennen. Spontane Rutschungen (23,26 %) kommen öfter als Hangmuren (5,48 %) als Rotationsrutschungen im Freiland vor. Dabei kommen beide Prozessarten mehrheitlich „am Übergang vom Oberboden zum Lockergestein“ vor. Hangmuren kommen verhältnismäßig öfter (94,52 %) als Translationsrutschung, im Vergleich zu

spontanen Rutschungen (76,74 %), vor. Bei Hangmuren im Wald kommen hingegen mehr Ereignisse „im Lockergestein“ (65, 52 %) vor als bei spontanen Rutschungen im Wald.

- Auslaufstrecke: Knapp die Hälfte (43,97 %) aller flachgründigen Rutschungen in den drei Gemeinden besitzen eine Auslaufstrecke von ≤ 50 m und sind verhältnismäßig kurz. Flachgründige Rutschungen haben oft kurze Auslaufstrecken und nur etwa jede fünfte flachgründige Rutschung weist eine Auslaufstrecke auf, welche größer als 100 m ist. Insgesamt ist der Unterschied der Länge der Auslaufstrecken zwischen Freiland oder Wald weniger deutlich. Ein klares Bild lässt jedoch eine Untersuchung von 302 flachgründigen Rutschungen mit Neigung und Pauschalgefälle zu. Mit zunehmender Neigung steigt das Pauschalgefälle. Ebenfalls klar ist ein Zusammenhang zwischen Mechanismus und Auslaufstrecke. Die Auslaufstrecken der Translationsrutschungen sind länger als die Auslaufstrecken der Rotationsrutschungen. Hangmuren haben einen über drei Mal so hohen Auslaufstreckenmittelwert als spontane Rutschungen. Bei beiden Prozessarten sind die Auslaufstrecken im Wald kürzer als im Freiland. Der Unterschied der Auslaufstreckenlängen zwischen Translationsrutschungen und Rotationsrutschungen ist bei Hangmuren jedoch größer. Rotationsrutschungen kommen bei Hangmuren sehr selten vor. Bei spontanen Rutschungen hingegen öfter.

Literaturverzeichnis

- Bara, C. (2011): Resilienz und Verwundbarkeit in der Schweiz: Die Unwetter - Katastrophe von 2005, ETH Zürich.
- Bezzola G. R., Hegg C. (Ed.) (2007): Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. UmweltWissen Nr. 0707. 215 S.
- Bollinger, D., et al. (2008): Beurteilung der Wirkung von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung, Teil D: Rutschungen, Planat, Swiss Confederation.
- Bollinger, D., et al. (2009): Hochwasser August 2005 – Analyse der Hanginstabilitäten, Swiss Bull. angew. Geol., Vol. 14/1+2, 2009, S.135-151.
- Bundesamt für Raumplanung (BRP), et al. (1997): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Empfehlungen 1997, Bern.
- Bunza, G. (1993): Massenbewegungen in alpinen Wildbachgebieten und der menschliche Einfluß darauf. – Ber. 9. Nat. Tag. Ing.-Geol. Garmisch – Partenkirchen, 63-69.
- Cruden, D.M., et al. (1996): Landslide Types and Processes. –In: Turner, A. K. et al. (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation, 36-75, Washington.
- Genske, D. D. (2014): Ingenieurgeologie, Grundlagen und Anwendung, 2. Auflage, Springer Verlag, Nordhausen.
- Heym, T. (2005): Geotechnische Problemlösungen im Frankfurter Bändertön. -Veröffentl. 15. Tag. Ing.-Geol. Erlangen, 151-155 und Geotechnik, 28:2, 106-111.
- Highland, L., et al. (2008): The landslide handbook: a guide to understanding landslides, US Geological Survey Reston, VA, USA.

Hudson, J.A. et al. (1997): Engineering rock mechanics.-444p, Elsevier Science Ltd., UK.

Hungr, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. – Canadian Geotechnical Journal 32: 610-623.

Kempfert, H.G., et al. (2007): Bodenmechanik und Grundbau, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin.

Krummenacher, B., et al. (2009): Anwendung des Risikokonzepts: Prozess spontane Rutschung / Hangmuren, Teil B, Planat, Swiss Confederation.

Müller – Salzburg, L. (1992): Der Felsbau. Der Felsbau über Tage. – Bd.2, Teil A., 949 S., Enke Ferdinand, Stuttgart.

Poisel, R. (1998): Kippen, Sacken, Gleiten – Geomechanik von Felsbewegungen und Felsböschungen.- Felsbau 3: 135-140.

Poisel, R., Eppensteiner, W. (1989): Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems „Hart auf Weich“.- Felsbau 7(1): 16-20.

Prinz, H., Strauß, R. (2011): Ingenieurgeologie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Rickli, C., Kamm, S., Bucher, H., 2008: Flachgründige Rutschungen. Projektbericht Ereignisanalyse Hochwasser 2005 zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidg. Forschungsanstalt WSL Birmensdorf, 114 S.

Rohn, J. & Ruff, M. (2005): Hangrutschungen nach Starkniederschlägen im Schwarzwald.- Veröffentl. 15. Tag. Ing.- Geol. Erlangen, 297-302.

Stein, D. (1988): Undichte Kanalisationen – ein kommunales Problemfeld der Zukunft aus der Sicht des Gewässerschutzes.- ZAU, Zeitschrift. f. angewandte Umweltforschung, 1:1, 65-74.

Stini, J. (1941): Unsere Täler wachsen zu. – Geologie und Bauwesen, 13: 71-79.

WSL/BAFU/AGN (2018): Dokumentation von Hangmuren und spontanen Rutschungen, Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.

Zangerl, C., et al. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen, Innsbruck.

Zischinsky, U. (1969): Über Sackungen.- Rock Mechanics, 1:30-52.

Anhang

Aufnahmeformular Rutschungen und Hangmuren		WSL/BAFU/AGN 23.11.2018
<input type="checkbox"/> M = Messwert, A = Annahme, O = ohne Angabe; <input type="checkbox"/> Einfachauswahl (Liste): Angaben in Aufnahmeanleitung, <input type="checkbox"/> Mehrfachauswahl		
1. Grunddaten und Messungen		
1.1 Nummer: - - 3 - 1.2 Ort: Koord. y/x Anriss <input type="checkbox"/> /		
GPS: ± m; Lokalname: Gemeinde: Kanton:		
Land:; Höhe: <input type="checkbox"/> m ü. M.; Exposition: <input type="checkbox"/> ° 1.3 Ausmasse: Länge: <input type="checkbox"/> m; Breite: <input type="checkbox"/> m;		
Mächtigkeit (max.): <input type="checkbox"/> m; Mächt. (mittl.): <input type="checkbox"/> m; Anrissmächt.: <input type="checkbox"/> m; Anrissfläche: <input type="checkbox"/> m ² ;		
Volumen: <input type="checkbox"/> m ³ ; Ablag.mächt. (mittl.) <input type="checkbox"/> m; Ablag.mächt. (max.) <input type="checkbox"/> m; Ablag.fläche <input type="checkbox"/> m ² ;		
Neigung. Rutschfläche: <input type="checkbox"/> °; Neigung oberhalb.: <input type="checkbox"/> °; Neigung unterhalb.: <input type="checkbox"/> °;		
1.4 Zeitinformation Rutschbewegung: Datum: <input type="checkbox"/>; Zeitpunkt: <input type="checkbox"/>; Dauer: <input type="checkbox"/>		
1.5 Kartierung: GIS-Datei <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; Einzelereignis <input type="checkbox"/> Ereignisverbund <input type="checkbox"/>		
Darstellung von (Liste):		
1.6 Zusatzinfo: Art (Liste).....; Nummer:; Bem.:		
Art (Liste).....; Nummer:; Bem.:		
Art (Liste).....; Nummer:; Bem.:		
2. Beurteilung Rutschhang (Umfeld bzw. Raum 3 gemäss Abb. 3 in Anleitung)		
2.1 Lage Geologie/Tektonik (Liste):; Profil <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein;		
Bemerkungen:		
2.2 Morphologie:		
	Anzeichen alter Rutschbewegungen: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; <input type="checkbox"/> markant, <input type="checkbox"/> nicht deutlich; Beschreibung: rezent: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; Alter: <input type="checkbox"/> Jahre; Bem. Mikrorelief:	
2.3 Hydrologie: <input type="checkbox"/> Verlustlage, <input type="checkbox"/> Eintragslage, <input type="checkbox"/> markante Eintragslage;		
Wasserzutritte zum Rutschhang: <input type="checkbox"/> oberirdisch, <input type="checkbox"/> unterirdisch; <input type="checkbox"/> natürlich, <input type="checkbox"/> anthropogen		
Bemerkungen:		
Drainagen vorhanden: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; Art, Alter und Zustand Drainagen (gut, unklar, defekt):		
Quellfassungen/Leitungen innerhalb Anrissfläche vorhanden: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; im Einzugsgebiet vorhanden: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein; Art, Alter und Zustand Quellfassungen/Leitungen (gut, unklar, defekt):		
Hydrologie Standort: <input type="checkbox"/> trocken <input type="checkbox"/> frisch/feucht <input type="checkbox"/> nass; Nässezeiger Vegetation:		
Bemerkungen zum Standort:		
Verkarstungen Festgestein: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein;		
2.4 Vegetation und Nutzung: Vegetationsart: <input type="checkbox"/> Wald, <input type="checkbox"/> Freiland; Waldzustand (Code, Tab. 3) _____;		
Bem. Freiland: Bem. Wald:		
Nutzung Freiland: <input type="checkbox"/> Wiese, <input type="checkbox"/> Weide, <input type="checkbox"/> Brachland/Einwuchs;		
Nutzungsintensität Freiland: <input type="checkbox"/> vergänglich, <input type="checkbox"/> schwach, <input type="checkbox"/> normal/mässig, <input type="checkbox"/> stark/ausgeprägt;		
Nutzungswechsel: <input type="checkbox"/> ja, <input type="checkbox"/> nein, von: zu:		
mögliche Beeinflussung durch (vgl. Anleitung):		

3. Charakterisierung Rutschung (Raum 1, bzw. 2 für Auslauf gemäss Abb. 3 in Anleitung)

3.1 *Beschreibung Rutschung (Rutschprozess):* Anriss in permanentem Rutschgebiet: ja nein;

Art des Prozesses: spontane Rutschung, Hangmure; Aufnahme von: Erstrutsch, nachgerutschtes Material; Mechanismus: Rotation, Translation; Skizze: ja, nein;

Ort Gleitfläche (Liste):.....; Geschwindigkeit:m/s; B-Achse mitgeführte Blöcke:m,

Holzlänge:m, -durchmesser:cm; Pauschalgefälle:°; Auslaufstrecke:m;

bis (Liste):; Materialbilanz:%; in Gerinne:%

3.2 *Boden:* Bodenentwicklung: Rohboden entwickelter Boden Nassboden

Bodenhorizonte (Tab. 5,6): Bezeichnung:; Mächtigkeit: cm; Durchlässigkeit:

Makroporen: ja, nein; Ausmass: keine, wenig, viel; Art: Wurm-, Mausgänge, Wurzelkanäle, Spalten;

Ausmass: Art: bis cm

Ausmass: Art: bis cm

Ausmass: Art: bis cm

Hauptwurzelraum: cm; Bodenprofil: ja, nein

3.31 *Lockergestein über der Bruchzone (Tab. 7):*

genetische Einheit Art Mächtigkeit cm

genetische Einheit Art Mächtigkeit cm

genetische Einheit Art Mächtigkeit cm

Spezialfall / Bemerkung Lockergestein:

Feldklassifikation (Tab. 8, 9,10): USCS (Tab. 11):

Textur (Liste):; geotechnische Hinweise; Profilskizze

3.32 *Lockergestein unter der Bruchzone (Tab. 7):* Aufschluss: ja nein

genetische Einheit Art Mächtigkeit cm

Spezialfall / Bemerkung Lockergestein:

Feldklassifikation (Tab. 8, 9,10): USCS (Tab. 11):

Textur (Liste):; geotechnische Hinweise; Profilskizze

3.4 *Festgestein:* Aufschluss: ja nein; Wechsellagerung: ja nein; Fallwinkel:° Fallazimut:°

Hauptlithologie (Tab. 12): mit Zwischenlagen von (Tab.12 /Liste):

Sekundärlithologie (Tab. 12):

Textur (Liste): Struktur (Liste): Bemerkungen:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3.5 Wasserführung im Untergrund: keine, Anzeichen, wenig, viel;

Ort: <input type="checkbox"/> im Oberboden	Diskontinuitäten: <input type="checkbox"/> im Oberboden
<input type="checkbox"/> Übergang Lockergestein - Oberboden	<input type="checkbox"/> Übergang Lockergestein - Oberboden
<input type="checkbox"/> im Lockergestein	<input type="checkbox"/> im Lockergestein
<input type="checkbox"/> Übergang Lockergestein - Festgestein	<input type="checkbox"/> Übergang Lockergestein - Festgestein
<input type="checkbox"/> im Festgestein	<input type="checkbox"/> im Festgestein
Bem.:	Bem.:

Ursprung Wasserführung (Liste): Bem. Wasserführung.:

Hydromorphie (Liste):

3.6 Bestehende Schutzbauten (vor dem Ereignis):

Art (Liste) Alter: Jahre; Zustand: tauglich, beschädigt, untauglich

Art (Liste) Alter: Jahre; Zustand: tauglich, beschädigt, untauglich

Art (Liste) Alter: Jahre; Zustand: tauglich, beschädigt, untauglich

Bem.:

4. Schäden

4.1 Menschen / Tiere betroffen: ja, nein, keine Erhebung

Anzahl Personen: Tote; Verletzte; Evakuierte;

Anzahl Tiere: Tote; Verletzte; Evakuierte;

4.2 Sachwerte betroffen: ja, nein, keine Erhebung;

Anzahl Wohnhäuser: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl Industrie, Gewerbe, Hotel: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl landwirtschaftliche Ökonomiegebäude: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl öffentliche Gebäude und Infrastruktur: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl Kulturgüter: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl Schutzbauten: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl Masten: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl Campingplätze: zerstört; beschädigt; betroffen

Anzahl andere: zerstört; beschädigt; betroffen

Bemerkungen:

4.3 Verbindungen / Infrastruktur betroffen: ja, nein, keine Erhebung;

Laufmeter Nationalstrassen: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter Hauptstrassen: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter übrige Strassen: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter Bahnlinien: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter Transportanlagen: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter Leitungen: zerstört; beschädigt; betroffen

Laufmeter andere: zerstört; beschädigt; betroffen

Bemerkungen:

4.4 Wald / Landwirtschaft betroffen: ja, nein, keine Erhebung;

Bemerkungen:

4.5.1 Beschädigtes Objekt 1: Bezeichnung:

Art (Liste, Kap.4.2 bis 4.4):

Breite: m; Höhe: m; Breite Abfluss auf Objekthöhe: m; horiz. Anströmwinkel: °;

Fliesshöhe vor Objekt: m; Stauhöhe am Objekt: m; Hangneigung beim Objekt: °;

Ort des Schadens: Anriss-, Transit-, Ablagerungsbereich;

Schadenart (Liste):; beschädigtes Material (Liste):

Konstruktionsweise (Liste):

wichtigste Ursache: mitgeführte Blöcke, mitgeführtes Holz, Wasser-/Feststoffgemisch, Unterspülung,

Foto/Schadenskizze ja, nein; Bemerkungen:

4.5.2 Beschädigtes Objekt 2: Bezeichnung:

Art (Liste, Kap.4.2 bis 4.4):

Breite: m; Höhe: m; Breite Abfluss auf Objekthöhe: m; horiz. Anströmwinkel: °;

Fliesshöhe vor Objekt: m; Stauhöhe am Objekt: m; Hangneigung beim Objekt: °;

Ort des Schadens: Anriss-, Transit-, Ablagerungsbereich;

Schadenart (Liste):; beschädigtes Material (Liste):

Konstruktionsweise (Liste):

wichtigste Ursache: mitgeführte Blöcke, mitgeführtes Holz, Wasser-/Feststoffgemisch, Unterspülung,

Foto/Schadenskizze ja, nein; Bemerkungen:

4.6 Massnahmen: keine, teilweise verbaut, verbaut; Art (Liste):

Bemerkungen:

5. Meteorologie

5.1 Niederschlag: Niederschlagssumme: mm, Dauer: ; Beginn:

Art der Messung: offiziell, privat, Radar, andere; Bem.:

5.2 Witterung (Liste): Bemerkungen:

6. Förder- und Auslösefaktoren

Auslösung: grösste Bedeutung (Liste): zweitgrösste Bedeutung (Liste):

drittgrösste Bedeutung (Liste):; Prozessverkettung: im Verbund ja, nein

Bemerkungen:

7. Metadaten

7.1 Erhebung: an Ort und Stelle Luftbild, Orthofoto Rekonstruktion

Bemerkung Erhebungsart:

Erhebungsdatum:; Witterung (Liste): seit Tagen;

Erhebung durch:; Übernahme aus Datenbank: ursprüngliche Nummer:

7.2 Zusatzinformation: vorhandene Gefahrenbeurteilung: keine, Gefahrenhinweiskarte, Gefahrenkarte;

Ereignis liegt im Hinweisgebiet: ja nein; Ereignis liegt im Gefahrengebiet: ja, nein;

Datum Gefahrenkarte:; Gefahrenstufe:; Gefahrenindex:

Bemerkungen: