

Ereignisanalyse Hochwasser 2005

Teilprojekt

Flachgründige Rutschungen

Projektbericht



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Forschungsprojekt: "Flachgründige Rutschungen", Teilprojekt
der Ereignisanalyse Unwetter 2005, WSL/BAFU

Projektleitung: Christian Rickli,
Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Wildbäche,
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL,
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

Projektbericht vom Juli 2008 zuhanden des
Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Gefahrenprävention

Verfasser: Christian Rickli, Stefan Kamm, Hansueli Bucher

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4
1 Einleitung.....	5
1.1 <i>Rahmen</i>	5
1.2 <i>Auftrag und Ziele</i>	5
2 Grundlagen.....	6
2.1 <i>Beschreibung Untersuchungsgebiete</i>	6
2.2 <i>Niederschläge August 2005</i>	12
2.3 <i>Überblick Hangprozesse 2005</i>	15
2.4 <i>Frühere Ereignisse mit Hangprozessen</i>	16
2.5 <i>Begriffe</i>	17
3 Methoden	18
3.1 <i>Allgemeines</i>	18
3.2 <i>Wahl der Untersuchungsgebiete</i>	18
3.3 <i>Aufnahmen bei den Rutschungen</i>	19
3.4 <i>GIS/Luftbilder</i>	21
3.5 <i>Bodenanalysen - Bodenmechanik</i>	21
4 Ergebnisse.....	24
4.1 <i>Datengrundlage</i>	24
4.2 <i>Anzahl Rutschungen pro Fläche</i>	25
4.3 <i>Entstehungsort der Rutschungen</i>	25
4.4 <i>Abmessungen der Rutschungen</i>	31
4.5 <i>Geometrie der Rutschungen</i>	34
4.6 <i>Vegetation</i>	35
4.7 <i>Hydrologie</i>	42
4.8 <i>Anzeichen alter Rutschbewegungen</i>	43
4.9 <i>Geologie</i>	44
4.10 <i>Bodenanalysen und Hangstabilität</i>	49
4.11 <i>Böden</i>	52
4.12 <i>Rutsch- und Verlagerungsprozesse</i>	58
4.13 <i>Sekundäre Einflüsse auf die Auslösung</i>	64
4.14 <i>Rutschungen an Strassen und Wegen</i>	65
4.15 <i>Auslöse-Zeitpunkte und Niederschlags-Schwellenwerte</i>	65
5 Diskussion	74
5.1 <i>Allgemeines</i>	74
5.2 <i>Anzahl Rutschungen pro Fläche in den Untersuchungsgebieten</i>	74
5.3 <i>Topographie Entstehungsort</i>	75
5.4 <i>Abmessungen und Geometrie der Rutschungen</i>	77
5.5 <i>Vegetation</i>	78
5.6 <i>Hydrologie, Hydrogeologie und Hangwasser</i>	83
5.7 <i>Anzeichen alter Rutschbewegungen</i>	84
5.8 <i>Geologie</i>	85
5.9 <i>Bodenanalysen und Stabilitätsrechnungen</i>	87
5.10 <i>Bodeneigenschaften</i>	88
5.11 <i>Rutschmechanismen - Abfliessvorgang</i>	89
5.12 <i>Beeinflussung der Rutschauslösung</i>	91
5.13 <i>Niederschlags-Schwellenwerte</i>	91
5.14 <i>Offene Fragen – weiterführende Arbeiten</i>	92
6 Zusammenfassung.....	93
Literatur	96
Anhang	101

Vorwort

Bei extremen Niederschlagsereignissen sind verbreitet flachgründige Rutschprozesse und Hangmuren zu beobachten. Obwohl bei diesen Prozessen in der Regel nur wenige Hundert Kubikmeter Bodenmaterial verlagert werden, stellen sie durch ihr plötzliches Auftreten, die limitierten Prognosemöglichkeiten und den raschen Materialabfluss ein erhebliches Gefährdungspotential dar. Die Ereignisse vom August 2005 mit mehreren Tausend flachgründigen Rutschungen bieten Gelegenheit, die Kenntnisse in Bezug auf diesen Gefahrenprozess zu verbessern.

Anfangs September 2005 fanden erste Gespräche statt zu möglichen Untersuchungen der Eidg. Forschungsanstalt WSL betreffend flachgründigen Rutschungen im Rahmen einer umfassenden Ereignisanalyse des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Da absehbar war, dass insbesondere im Freiland viele Rutschflächen rasch verbaut würden, mussten die Felderhebungen unverzüglich in Angriff genommen werden. Mitte September waren die Untersuchungsgebiete in den drei durch die Unwetter stark betroffenen Regionen Entlebuch, Napf und Prättigau ausgewählt und die Erhebungsmethodik festgelegt. Anfangs Oktober 2005 erfolgten die ersten Datenerhebungen im Gelände. Bis Ende 2005 waren rund 90% der Erhebungen durchgeführt. Die restlichen Feldarbeiten folgten im April/Mai 2006.

Im vorliegenden Bericht sind die wichtigsten Daten sowie erste Auswertungen und entsprechende Interpretationen dargestellt. Aufgrund des vielfältigen Datenmaterials der Felderhebungen sind zu verschiedenen Aspekten weitere Auswertungen möglich.

Die Felderhebungen wurden im Team durch die Forstingenieure Hansueli Bucher und Stefan Kamm durchgeführt (beide damals WSL). H. Bucher war bereits bei den Untersuchungen der flachgründigen Rutschungen in den Regionen Napf und Appenzell 2002 beteiligt und garantier- te somit für optimale Vergleichbarkeit der Daten. Stefan Kamm wertete im Anschluss an die Felderhebungen die Daten aus, analysierte Bodenproben im Labor und verfasste erste Berichtsentwürfe. Albert Böll (WSL) trug mit Diskussionsbeiträgen Wesentliches zur vorliegenden Arbeit bei. Das Projekt wurde unterstützt durch das Bundesamt für Umwelt BAFU. Allen Mitwirkenden sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Christian Rickli

1 Einleitung

1.1 Rahmen

Zwischen dem 18. und 23. August 2005 fielen in weiten Teilen der Schweiz extreme Niederschläge. Es entstanden verbreitet Überschwemmungen Murgänge, Rutschungen und Hangmuren. Insgesamt sechs Todesopfer waren zu beklagen sowie Schäden in der Höhe von rund 3 Milliarden Franken. Hinsichtlich der Schäden ist das Ereignis innerhalb der letzten dreissig Jahre ohne Parallele (Bezzola und Hegg 2007). Aber auch die räumliche Ausdehnung war aussergewöhnlich, indem nahezu der gesamte Alpennordhang vom Kanton Waadt bis zum Kanton Graubünden betroffen war.

Der Bundesrat beauftragte das Bundesamt für Umwelt BAFU, die Schadenereignisse vom August 2005 zu untersuchen. Im Rahmen dieser Ereignisanalyse betraute das BAFU die Eidg. Forschungsanstalt WSL mit der Dokumentation und Analyse der oberflächennahen Rutschprozesse und Hangmuren. Der vorliegende Bericht gibt Auskunft über die ausgeführten Arbeiten im Zusammenhang mit den erwähnten Prozessen vom August 2005.

1.2 Auftrag und Ziele

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht in der Dokumentation der oberflächennahen Rutschprozesse 2005 in ausgewählten Gebieten sowie in der Analyse massgebender Einflussgrössen auf die Rutschauslösung und auf den Rutschprozess. Folgende Aspekte stehen im Vordergrund:

- Grundlagen und Kenntnisse zu den massgebenden Einflussgrössen auf die Rutschauslösung und zum Transportprozess von Rutschmaterial in steilen Hängen (Hangmuren) erarbeiten, verbessern und in die Praxis umsetzen
- an die im Zusammenhang mit früheren Unwetterereignissen (Napf und Appenzell 2002, Sachseln 1997) durchgeföhrten Untersuchungen zu flachgründigen Rutschprozessen anknüpfen
- ergänzende Analysen durchführen zur Modellierung von Hangmuren und zu Niederschlagsschwellenwerten für die Rutschauslösung
- Koordination mit den Teilprojekten zu den tiefgründigen Rutschprozessen sowie zur Relevanz von Bodenkarten in Bezug auf die Kartierung von Hangmuren

Grundlage für das Erreichen der Ziele waren umfangreiche Felderhebungen bei flachgründigen Rutschungen. Dabei sollten jeweils die geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnisse am Ort der Rutschungen untersucht und die Ereignisse kartiert werden. Für die Felderhebungen waren in den Regionen Entlebuch, Prättigau und Napf je ein Untersuchungsperimeter ausgewählt worden.

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse aus den Analysen der Felddaten der flachgründigen Rutschungen in den drei Untersuchungsperimetern dargestellt. Für die Arbeiten im Zusammenhang mit der Modellierung von Hangmuren sowie der Relevanz von Bodenkarten sei auf das Kapitel "Hanginstabilitäten" im zweiten Teil des Berichtes zur Ereignisanalyse 2005 des Bundesamtes für Umwelt BAFU verwiesen (BAFU in Vorber.).

2 Grundlagen

2.1 Beschreibung Untersuchungsgebiete

2.1.1 Entlebuch

Das Untersuchungsgebiet Entlebuch liegt auf dem Gebiet der Gemeinde Flühli im Kanton Luzern. Es umfasst eine Fläche von 5.1 km^2 , wovon 29% bzw. 1.5 km^2 bewaldet sind (Abb. 2.1). Das Gebiet erstreckt sich von 832 m ü.M. an der Waldemme bis im Maximum auf 1722 m ü.M. Der Perimeter weist zwei Hauptexpositionen auf: die westexponierte Flanke unterhalb des Brandchnubels (1413 m ü.M.) und der westliche Perimeterteil von der Waldemme bis zum Grat zwischen Gsteig (1458 m ü.M.) und Beichlen (1770 m ü.M.) mit den Hauptexpositionen Ost bis Südost.

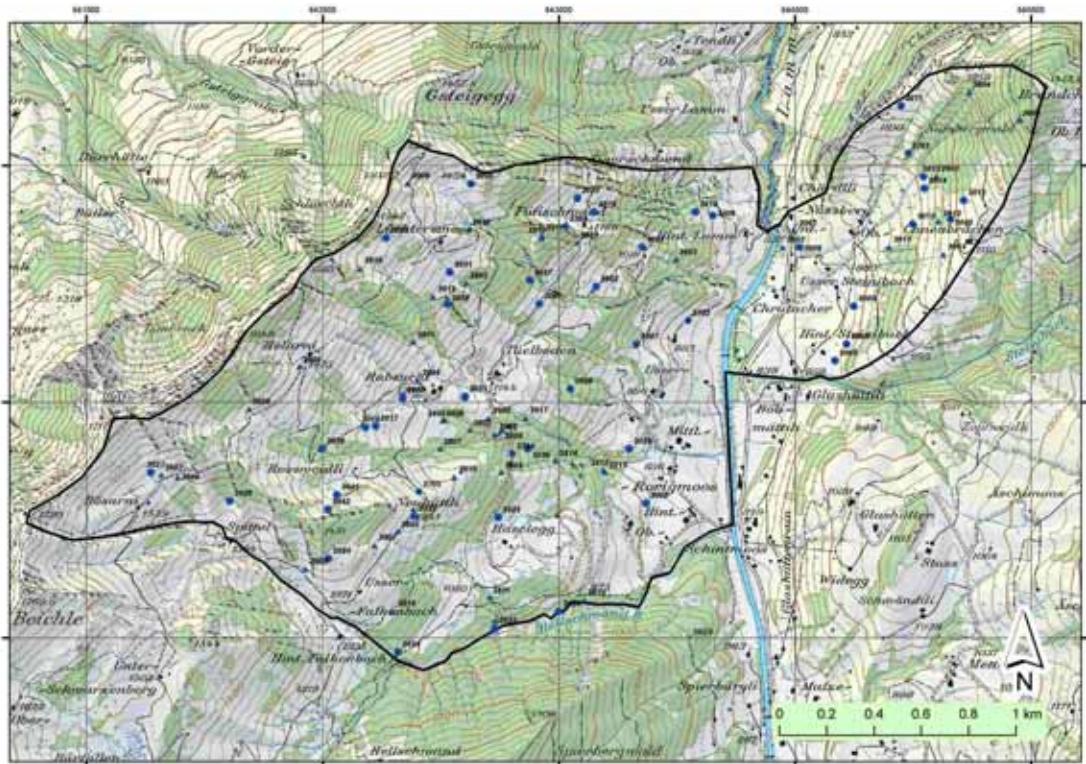


Abbildung 2.1: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes Entlebuch. Punkte: oberflächennahe Rutschungen vom August 2005. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA071687).

Vegetation, Besiedlung und Nutzung

Ungefähr zwei Drittel der Untersuchungsfläche sind landwirtschaftliche Nutzflächen, Siedlungen und Strassen. Auf den Landwirtschaftsflächen wird zumeist Viehwirtschaft betrieben. Dabei werden die flacheren Partien als Mähwiesen, die steileren und damit schwer zu bewirtschaftenden Flächen als Weiden genutzt. Das Gebiet ist hauptsächlich durch zerstreute Einzelhöfe besiedelt, wobei auf den Flusschotterterrassen entlang der Waldemme die Höfe näher beieinander liegen. Oberhalb von 1400 m ü. M. befinden sich einige Alpen wie Bösarni, Holarni und Lüchtersmoos, die nur im Sommer bewohnt sind.

Die Waldflächen sind über das ganze Gebiet zerstreut, befinden sich jedoch besonders oft entlang von Runsen und in steilen Lagen. Die Bestände sind grösstenteils geschlossen, vorratsreich und gleichförmig/einschichtig aufgebaut, was auf zurückhaltende Nutzung während der letzten

Jahre schliessen lässt. Entlang der Runsen und Bachläufe trifft man Mischbestände an, ansonsten herrschen reine Fichtenbestände vor.

Östlich der Waldemme befindet sich unterhalb des Brandchnubels ein Waldstück, das stark vom Borkenkäfer befallen ist. Obwohl die Fläche teilweise geräumt wurde, erweiterte sie sich in den letzten Jahren immer mehr und wies 2006 eine Fläche von zwei bis drei Hektaren auf. Eine weitere Schadenfläche durch Borkenkäfer befindet sich im westlichen Teil des Perimeters knapp unterhalb des Grates zwischen den Alpen Bösarni und Holarni. Diese Waldpartie ist weniger stark befallen als jene auf der Ostseite; sie hat eine Ausdehnung von etwa einer Hektare und wurde nicht geräumt.

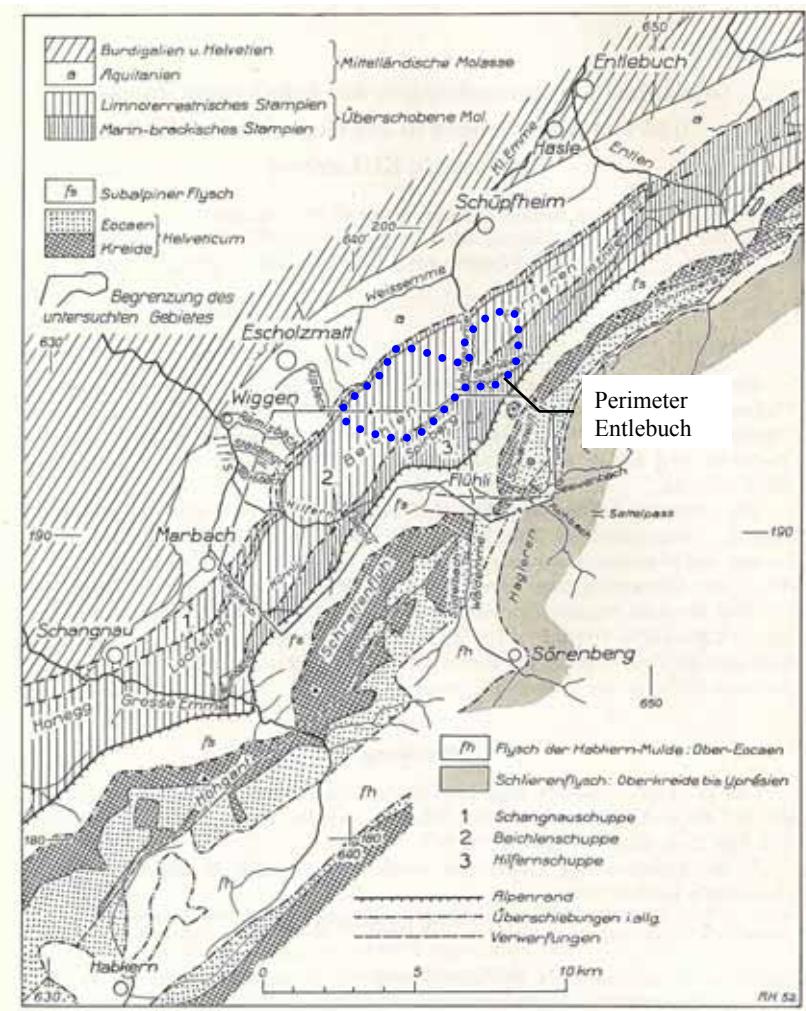


Abbildung 2.2: Tektonische Übersichtskarte des Alpenrandes zwischen Entlen und Grosser Emme (Holliger 1955).

Geologie

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der übergeschobenen und schief gestellten Subalpinen Molasse am Alpennordrand. Die Gesteine gehören hauptsächlich zur unteren Süßwassermolasse, d.h. zum Chattien bzw. zum limnoterrestrischen Stampien (Holliger 1955, Abb. 2.2, Tab. 2.1). Es handelt sich dabei um Nagelfluh mit Sandstein- und Mergellagen. Die Schichten fallen mit rund 40° nach Südosten ein (Abb. 2.3). Gemäss geotechnischer Karte der Schweiz 1:200'000 (Schw. Geotechn. Kommission 1964) herrschen Konglomerate vor, welche mittelstark verfestigt und stets begleitet von Sandstein- und Mergellagen sind (Molassenagelfluh). Im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes kommt stellenweise mergelreichere Molassenagelfluh vor, d.h. Mergel mit Einlagerungen von starker verfestigten Sandsteinen und vereinzelt Konglomeraten. In den tieferen und südlichen Lagen des Perimeters westlich der Waldemme ist

Bergsturzmaterial zu finden. Ansonsten besteht das Lockergestein hauptsächlich aus Gehänge- schutt, auf den Talböden aus Alluvium. In mittleren Lagen des Teiles westlich der Waldemme sind Moränenablagerungen des Waldemme-Gletschers (Würm) zu finden (Schlunegger 2006).



Abbildung 2.3: Geologische Schichtfolge im Perimeter. Aufschluss im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes auf 1330 m ü.M.).

2.1.2 Prättigau

Das Untersuchungsgebiet Prättigau befindet sich auf dem Gebiet der Gemeinde St. Antönien GR. Die Gesamtfläche des Perimeters beträgt 4.7 km². Davon sind nur gerade ungefähr 16% bewaldet (Abb. 2.4) wobei allerdings ein erheblicher Anteil des Untersuchungsgebietes oberhalb der Waldgrenze liegt. Das Gebiet erstreckt sich von 1380 m ü.M. am Schanielabach bis auf eine Höhe von 2413 m ü.M. beim Chüenihorn und ist süd- bis südost-exponiert. Die Neigungs- verhältnisse sind über weite Teile gleichmässig und liegen abgesehen von den flacheren Talbö- den im Bereich von 25 bis 40°.

Vegetation, Besiedlung und Nutzung

Das Freiland setzt sich aus landwirtschaftlichen Flächen, Siedlungen/Strassen und unprodukti- ven Flächen zusammen. St. Antönien weist die für ein Walserdorf typische Streusiedlungsstruk- tur auf. Auf den Landwirtschaftsflächen wird zumeist Viehwirtschaft betrieben. Regelmässiges Mähen ist nur im Bereich des Talbodens möglich. Die steilen Hänge werden meist bis auf eine Höhe von rund 1800 m ü.M. beweidet. In früheren Zeiten wurden die trockenen Wiesen teilwei- se bewässert. Dabei leitete ein System aus ausgebohrten Holzstämmen - sogenannte Teuchel - Wasser aus dem Carschinasee in die zu bewässernden Gebiete. Zuoberst am Chüenihorn neh- men Lawinenverbauungen grössere Flächen ein. Die drohende Gefahr der Lawinen lässt sich auch durch die Tatsache erahnen, dass die Häuser auf der bergseitigen Stirnseite praktisch aus- nahmslos über einen Schutz gegen Lawinen verfügen (Ebenhöch, Spaltkeil).

Die Waldfächen befinden sich in Höhenlagen zwischen 1600 und 2000 m ü.M. Bestände mit Starkholz findet man nur im westlichen Teil des Perimeters (Rotwald, Hundmeder und Leidwald). Die Wälder im östlichen Teil (Schlüecht, Bachtelen und Püschen) sind ehemalige Aufforstungen. Nur im Bereich Bachtelen hat sich auch etwas Naturverjüngung eingestellt. Das Gebiet Hundmeder war früher eine Mähwiese ("Hund" = länglicher Steinhaufen als Grenzmarkierung). Der Rotwald ist bis heute beweidet. Starke Trittschäden sind weit verbreitet, insbesondere an vernässten Stellen. Die Starkholzbestände bestehen zum überwiegenden Teil aus Fichten. Bis auf etwa 1750 m ü.M. sind sie einschichtig und geschlossen. Darüber sind die Bestände stufig und weisen Rottengefüge auf. Die stellenweise hohen Vorräte (z.B. im Leidwald) sind ein Zeichen dafür, dass in den letzten Jahrzehnten nur wenig eingegriffen wurde. Die meisten Aufforstungsflächen mit hauptsächlich Fichte und etwas Lärche wurden in den 70er-Jahren angelegt.

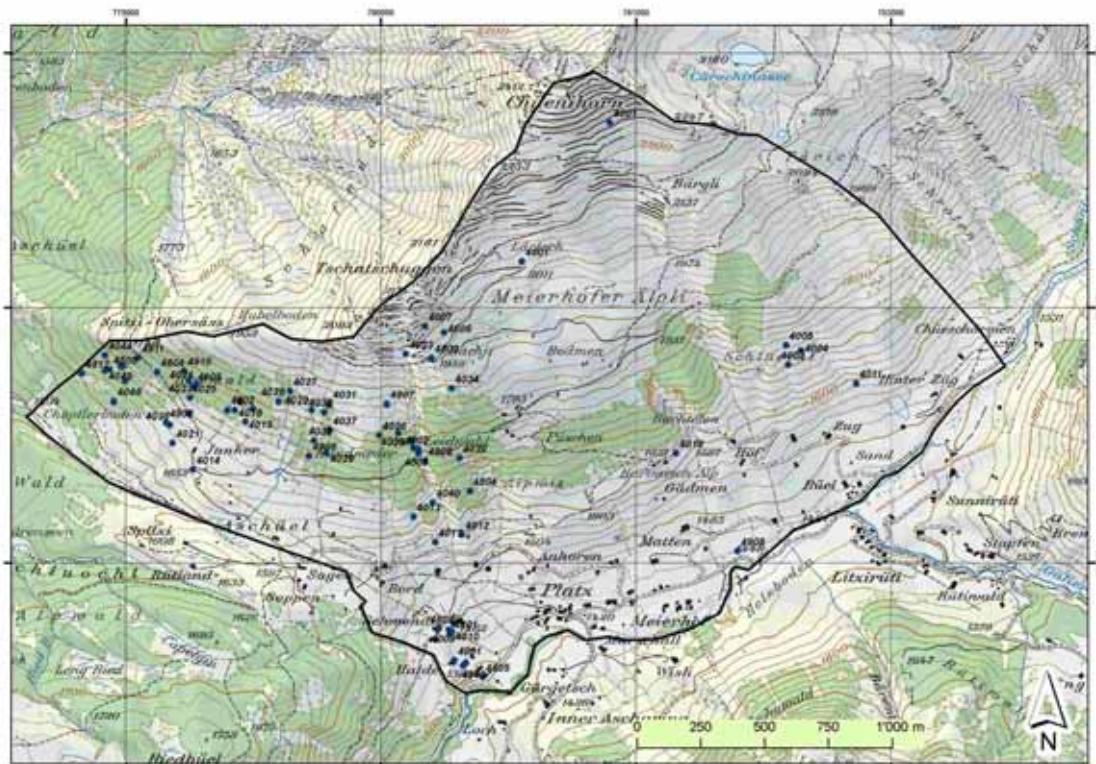


Abbildung 2.4: Untersuchungsgebiet Prättigau. Punkte: oberflächennahe Rutschungen vom August 2005. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA071687).

Geologie

Oberhalb von 1800 bis 2000 m ü.M. kommt gemäss Geologischer Karte 1:500'000 (Schweiz. Geol. Kommission 1980) im Untersuchungsgebiet der Prättigauer Flysch vor. Nach Nannny (1948) ist die östliche Perimeterhälfte zur Gyrenspitz-Serie (Campanien - tieferes Maestrichtien: Sandkalke, Kalkbrekzien, Flyschkalke mit dünnen Lagen von Mergelschiefern) und die westliche Hälfte der Fadura-Serie (Unteres Senonien, Flyschkalke, kieselig-sandige Kalke, mit Lagen von mergelig-tonigen Schiefern) zuzuordnen (Abb. 2.5). Die Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000 (Schweiz. Geotechn. Kommission 1963) weist für das fragliche Gebiet geschieferte Sandkalke bis Kieselkalke mit Lagen von Mergelschiefern bis Kalkphylliten aus. Der Fels ist hauptsächlich in den höheren Lagen durch eine Schicht von Gehängeschutt überdeckt. In den mittleren bis tieferen Lagen herrscht Moränenmaterial vor. Im westlichsten Teil des Perimeters (Junker) sind Anzeichen von mittelgründigen Rutschbewegungen zu finden.

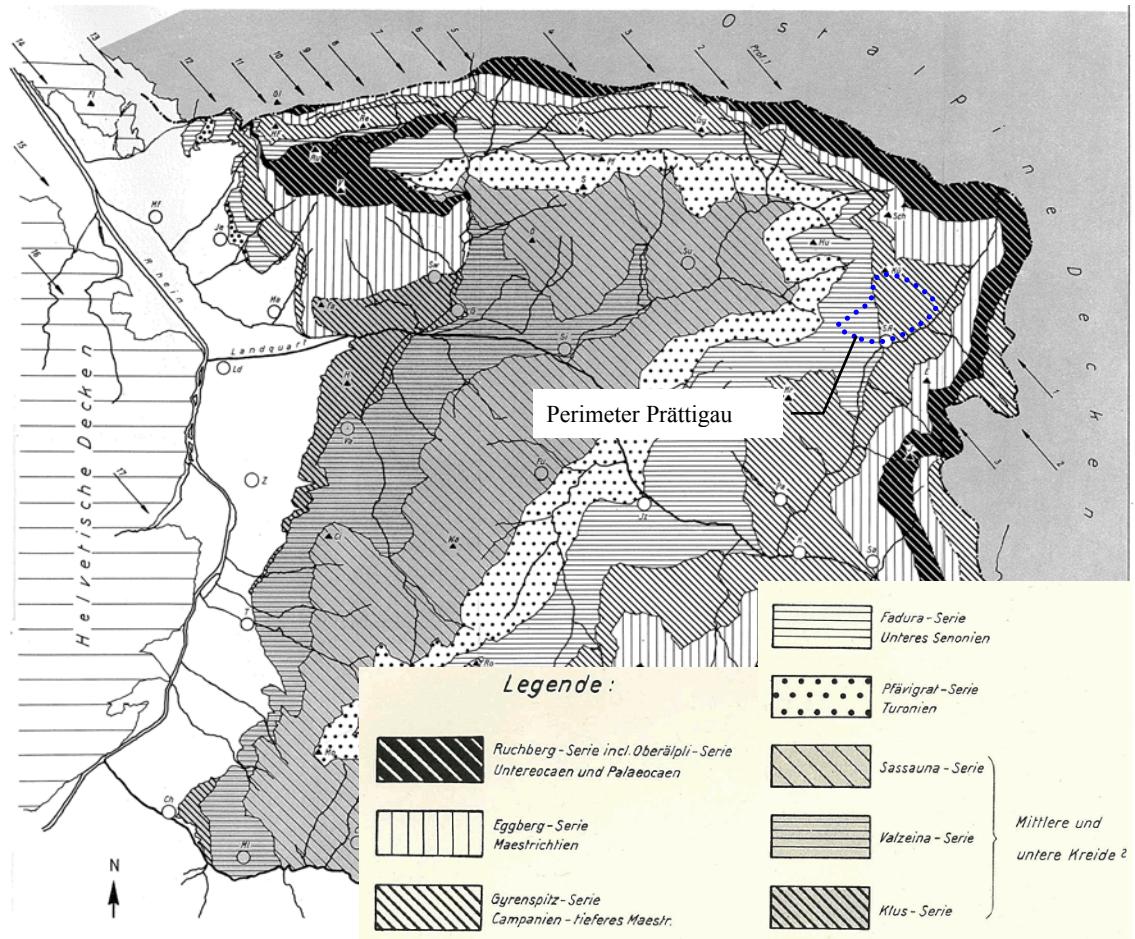


Abbildung 2.5: Geologische Übersichtskarte des Prättigaus (Nanny 1948).

2.1.3 Napf

Das Untersuchungsgebiet Napf liegt in der Gemeinde Trub, Kanton Bern. Es weist eine Fläche von rund 1.6 km² auf, und der Waldanteil beträgt 29% (Abb. 2.6). Den tiefsten Punkt bildet der Weiler "Ried" mit 822 m ü.M., den höchsten der "Vordere Schwändiberg" mit rund 1140 m ü.M. Der Wald stockt typischerweise in den steilen Gebieten der höheren Lagen. Das Freiland und die Siedlungen finden sich hauptsächlich auf den weniger stark geneigten, tiefer gelegenen Flächen.

Vegetation, Besiedlung und Nutzung

Das Untersuchungsgebiet ist durch zerstreut gelegene Einzelhöfe besiedelt, welche sich an sonniger Lage, meist leicht erhöht auf den Flussterrassen, aber grundsätzlich im flachen Talboden befinden. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen sind in den flacheren Partien beider Talseiten zu finden. Die steileren Lagen entlang der Berg Rücken sind grösstenteils bewaldet. Waldbesitzer sind meistens die Landwirte der darunter liegenden Freilandflächen.

Der durchschnittliche Vorrat der intakten Bestände des Reviers Trub ist mit rund 570 m³/ha einer der höchsten europaweit. Dies obwohl in den meisten Beständen regelmässig eingegriffen wird. Die vielen Privatwaldbesitzer entnehmen mit den alljährlichen Plenterdurchforstungen jedoch nur sehr kleine Mengen, meistens für den Eigenbedarf. Im Hinblick auf ein gutes Plentergleichgewicht mit ausreichend Verjüngung sind die Wälder zu starkholzreich und zu dunkel. Im Revier Trub findet man typische Plenterstrukturen mit Weisstanne und Fichte. Das starke Vorkommen der Weisstanne bewirkt, dass sich bisher nur wenig Schäden durch Borkenkäfer eingestellt haben. Durch den Sturm Lothar am 26. Dezember 1999 sind im Wald des Untersuchungsgebietes zahlreiche Flächen- und Streuschäden entstanden. Kleinere Schadenflächen

waren bereits durch den Sturm "Vivian" 1990 entstanden, weitere durch ein Ereignis im Jahr 2000 (vgl. Tab. A5 im Anhang).

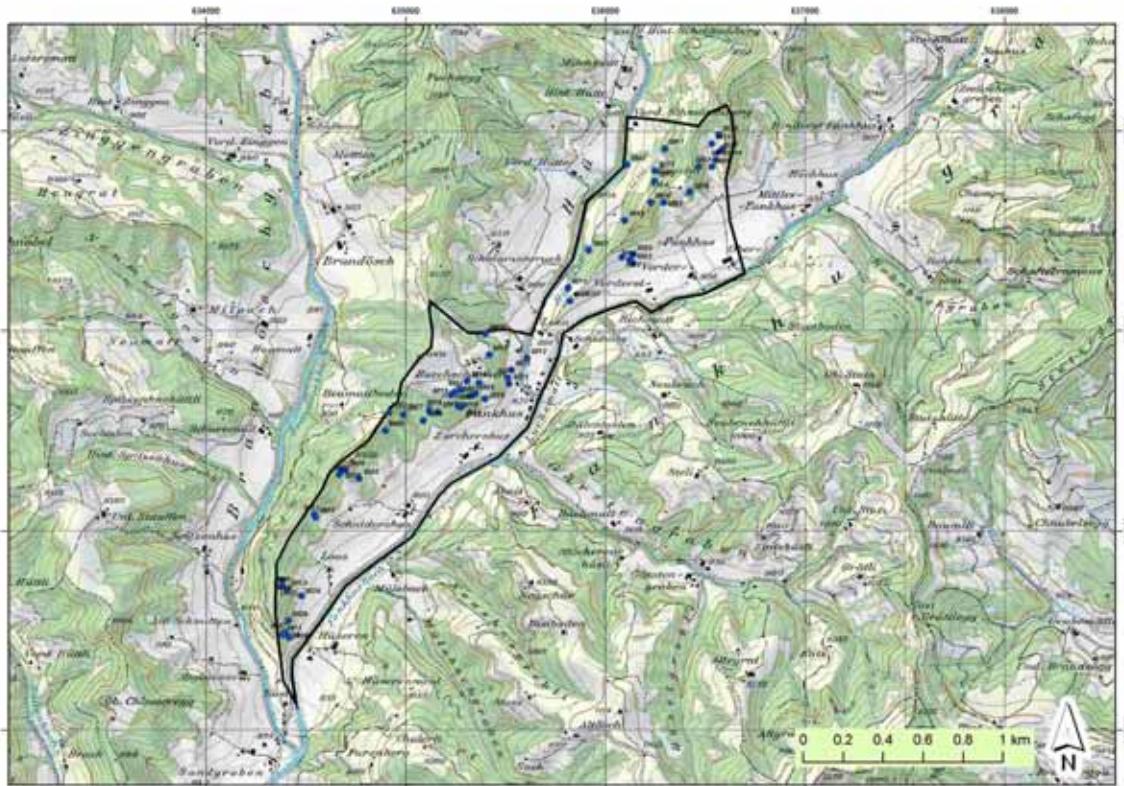


Abbildung 2.6: Untersuchungsgebiet Napf. Punkte: oberflächennahe Rutschungen vom August 2005. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA071687).

Geologie

Gemäss der Geologischen Generalkarte der Schweiz 1:200'000 (Geol. Komm. der schw. naturforsch. Gesellschaft 1943) herrschen im Untersuchungsgebiet die Napfschichten der Oberen Meeressolasse (Helvetien, Tab. 2.1) vor. Am Ostrand des Perimeters kommt in den höheren Lagen die Obere Süsswassermolasse (Tortonien) vor.

Die Schichten sind nur wenig geneigt und fallen mit 4 bis 8° gegen NW bis N ein. Es dominieren konglomeratische Abfolgen (Nagelfluh), welche von sandig/siltigen Abfolgen unterbrochen sind. Bei der Nagelfluh handelt es sich um die so genannt polygene oder bunte Nagelfluh, welche im Gegensatz zur Kalknagelfluh, die aus kalkigen Sedimentgerölle besteht, mindestens 10% Gerölle kristalliner Herkunft enthält.

Im Untersuchungsgebiet kommen keine Gletscherablagerungen vor. Die Lockergesteinsdecke besteht hauptsächlich aus Verwitterungsmaterial der Molasse, welches in den steilen Lagen bereits mehrfach umgelagert wurde (Gehängeschutt, in wenigen Fällen Gehängelehm). Die Talböden bestehen aus Alluvium.

Tabelle 2.1: Schichtfolge der Molasse, mit den wichtigsten Nagelfluhfächern und ihren Gerölle (nach Labhart 1992).

Klassische Unterteilung	Alter (Mio. Jahre)	internationale Unterteilung		wichtigste Nagelfluhfächer	alpines Liefergebiet der Gerölle
Obere Süßwassermolasse	5 10 15 16.3	Tortonien Serravallien Langhien	"Tortonien" oberer Teil: "Helvetien" Burdigalien	Bodensee Pfänder Hörnli Napf (oberer Teil)	Penninische Decken
Obere Meeressmolasse				Hörnli Napf (mittlerer Teil)	Helvetische Decken Penninische Decken (mit Ophiolithen)
Untere Süßwassermolasse		Aquitaniens		Gäbris Kronberg Höhrohne Napf (unterer Teil)	Ostalpine Kristallindecken (Err-Bernina)
Untere Meeressmolasse		Chattien		Speer Rigi Thunersee Pélerin	Ostalpine Sedimentdecken Simmendecke
	30 36	Rupélien	Stampien	keine Nagelfluhfächer	

2.2 Niederschläge August 2005

2.2.1 Allgemeines - Niederschlagsmessung

In der Schweiz bestehen folgende Messsysteme und Quellen für Niederschlagsdaten (www.meteoschweiz.ch; ergänzt):

- ANETZ-Messstationen der MeteoSchweiz: 70 Stationen, welche mit automatischen Messgeräten ausgerüstet sind. Die gefallenen Regenmengen werden in 10-Minuten Intervallen gemessen und in Echtzeit übermittelt.
- Tagessammler der MeteoSchweiz: 370 Stationen, Messung manuell. Die Daten stehen als 24-Stunden Niederschlagssummen (jeweils von 05:40 – 05:40 UTC Folgetag) mit einigen Tagen Verzögerung zur Verfügung.
- IMIS-Stationen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung SLF: 42 Stationen oberhalb 2000 m ü.M., tägliche Niederschlagssummen.
- Radarbilder (MeteoSchweiz, LAPETH) ergeben gute Genauigkeiten für grössere Gebiete. Beim Erfassen von kleinräumigen Unterschieden hat das Radar aber oft Probleme, da die Niederschläge im 'Schatten' von Gebirgen nicht gemessen werden können.
- Niederschlagsmessungen von Privaten: Vor allem Landwirte messen oftmals die Regenmengen für den Eigengebrauch. Solche Messungen ergeben einen relativ genauen Wert für einen bestimmten Punkt. Die Zuverlässigkeit der Werte ist jedoch nicht in jedem Fall gewährleistet.

Die Art der Niederschlagsdaten, welche für Auswertungen in Frage kommen, ist entsprechend dem Verwendungszweck und den Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung zu wählen. Beispielsweise sind für Analysen im Zusammenhang mit Schwellenwerten für Rutschungsauslösung nur Radardaten oder Daten der ANETZ-Stationen mit hoher zeitlicher Auflösung sinnvoll.

2.2.2 Vorbedingungen

Schon vor dem Unwetterereignis fielen in weiten Teilen der Schweiz erhebliche Niederschläge. Bereits bis Mitte August waren ungefähr 75% der gesamten üblichen Augustmengen gefallen. Der insgesamt nasse Monatsanfang und die ergiebigen Niederschläge am 14. und 15. August haben die hydrologische Ausgangslage im Boden und in den Flüssen mitgeprägt (Bezzola und Hegg 2007). Die gesättigten Böden vermochten die zusätzlichen Regenmengen kaum mehr aufzunehmen. Zusammen mit einer Schneefallgrenze, die auf über 3000 Metern lag und damit eine Zwischenspeicherung der Niederschläge in Form von Schnee verhinderte, und den grossen Niederschlagsmengen waren die Voraussetzungen für ein Hochwasserereignis gegeben. In den westlichen Landesteilen intensivierten sich die Niederschläge ab dem 19. August. In der Ostschweiz trat das Ereignis mit einer zeitlichen Verzögerung von rund 24 Stunden ein.

2.2.3 Niederschläge vom 21.-23. August

Verantwortlich für die starken Niederschläge mit den verheerenden Folgen war ein stabiles Tiefdrucksystem südlich der Alpen, das feuchte Luftmassen an den Alpennordrand führte (Bezzola und Hegg 2007, MeteoSchweiz 2006). Das Tiefdruckgebiet hatte sich aus dem Raum Frankreich zum Golf von Genua ausgedehnt und war dann von dort weiter über die östlichen Alpen nach Norden gezogen - eine meteorologische Entwicklung, welche zwischen einer sogenannten Vb- und einer Vd-Lage angesiedelt werden kann: Durch das Tief südlich der Alpen wurden feuchtwarme Luftmassen aus dem Mittelmeerraum über die Alpen verfrachtet und mit nordöstlichen Winden zum Alpennordhang zurückgeführt und dort gestaut. Das zusätzliche Zusammentreffen mit kühler Luft, welche auf der Rückseite des Tiefs von der Nordsee herangeführt wurde, löste die anhaltenden Niederschläge vom 21. bis 23. August aus.

Das eigentliche Hauptereignis setzte am 21. ein und dauerte bis zum 23.08.2005. Der Niederschlags-Schwerpunkt verlagerte sich dabei allmählich vom Bernbiet zu den östlichen Alpen hin. Während in der Region Berner Oberland bis Zentralschweiz die grössten Niederschläge am 21. fielen, lag am 22.08.2005 der Schwerpunkt weiter östlich, wobei auch die Ostschweiz betroffen war. Am 23. war nur noch der äusserste Osten, insbesondere das Prättigau betroffen (Abb. 2.7). Bemerkenswert ist, dass sich an dieses extreme Niederschlagsereignis nahtlos ein weiteres meteorologisches Extremereignis anschloss, und zwar in der Form einer monatelangen Trockenheit.

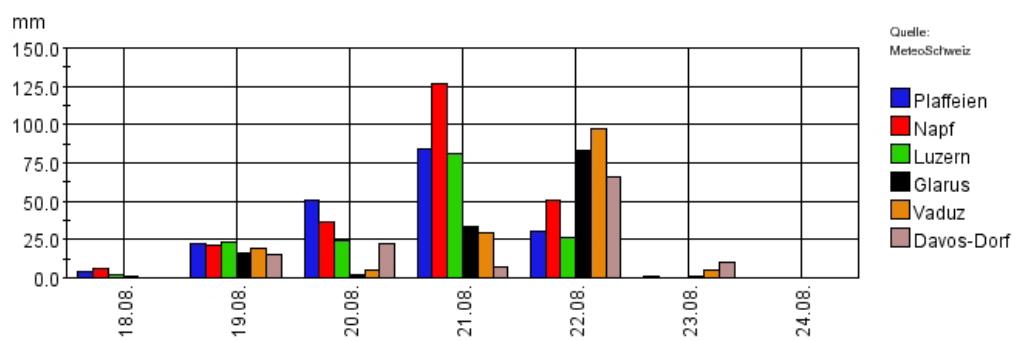


Abbildung 2.7: Gemessene Niederschlagsmengen vom 18. bis 24.08.2005 (ANETZ-Stationen; Tagessumme 0540 – 0540 Uhr UTC Folgetag in mm). Die westlichen Stationen registrierten am 20. und 21. August grössere Regenmengen als die östlichen Stationen; am 22. und 23. August war es umgekehrt.

Niederschläge im Perimeter Entlebuch

Die dem Untersuchungsgebiet Entlebuch am nächsten gelegenen ANETZ-Stationen befinden sich auf dem Napf (Distanz: 9 km) und auf dem Pilatus (Distanz: 20 km). Auf dem Napf wurden im Verlauf des gesamten Ereignisses vom 18. bis 23. August insgesamt 236 mm und auf dem Pilatus 180 mm Regen gemessen (Tab. 2.2). Am intensivsten waren die Niederschläge am 21.

und 22. August. Das für die Felderhebungen ausgewählte Untersuchungsgebiet liegt zwischen den beiden Tagessammeln von Eschholzmatt und Flühli (ca. 5 bzw. 2 km Entfernung). In Flühli wurden in der Periode 18.-23.08. insgesamt 264 mm, in Eschholzmatt in der gleichen Periode 269 mm gemessen. Für die Periode vom 21. bis 22.08. wurden sowohl in Flühli (170 mm) und in Eschholzmatt (172 mm) Werte gemessen, welche die grössten bisher gemessenen Werte in beiden Stationen deutlich übertrafen. Die Messung eines Ortsansässigen in Flühli ergab für 36 Stunden (21.08., 20:00 Uhr bis 23.08.2005, 08:00 Uhr) eine Niederschlagsmenge von 203 mm.

Beobachtung vor Ort: Projektmitarbeiter Hansueli Bucher erlebte am Sonntag 21.08.05 um 17:00 Uhr in Wolhusen/LU ein starkes Anschwellen der Kleinen Emme mit. Neben kleineren Rüfen, die verschiedene Strassen überführten, war in der Emme auch der Transport von Schwemmholz (bis zu fünf ganze Bäume pro Minute) zu beobachten. Diese intensive Niederschlagsphase hat bis in die Morgenstunden des Montags (22.08.) angehalten. Tagsüber waren die Niederschläge etwas weniger heftig. Am Montagabend nahm die Intensität wieder zu und blieb bis am Dienstagmorgen (23.08.) ca. 8:00 Uhr auf hohem Niveau.

Niederschläge im Perimeter Prättigau

Der Untersuchungsperimeter Prättigau liegt zwischen den ANETZ-Stationen Davos (Distanz: 19 km) und Vaduz (Distanz: 29 km). Im Verlauf des gesamten Ereignisses vom 18.08. bis 23.08. wurden in Vaduz 155 mm und in Davos 118 mm gemessen (Tab. 2.2). Diese Werte weichen erheblich von den lokal ermittelten Niederschlagssummen ab. Für die Periode vom 18. bis 23.08. wurden im Tagessammler St. Antönien 185 mm registriert, wovon allein am 22. August eine Summe von 116 mm. Die Messung in einer Privatstation ergab vom 22.08. abends bis 23.08. abends eine Regenmenge von 116 mm in 24 Stunden (mündl. Mitteilung H. Flütsch, 2005).

Tabelle 2.2: Gemessene Niederschlagsmengen vom 18. bis 24.08.2005; Tagessummen 0540 – 0540 Uhr UTC Folgetag in mm. Quelle: MeteoSchweiz. ¹ ANETZ-Station, ² Tagessammler

Tag	Napf ¹ (mm)	Pilatus ¹ (mm)	Glarus ¹ (mm)	Vaduz ¹ (mm)	Davos ¹ (mm)	Eschholzmatt ² (mm)	Flühli ² (mm)	St. Antönien ² (mm)
18.	5.9	7.8	0.9	0.0	0.0	13.8	7.3	2.6
19.	21.5	16.6	16.6	19.0	14.9	16.3	28.7	23.5
20.	36.7	47.9	2.4	4.6	22.6	67.1	56.3	18.4
21.	126.7	67.1	33.4	28.9	7.2	101.7	57.2	13.4
22.	50.9	40.1	83.3	97.0	62.6	69.7	112.9	116.4
23.	0.0	0.0	0.9	5.0	10.4	0.1	1.6	10.4
18.-23.	241.7	179.5	137.5	154.5	117.7	268.7	264.0	184.7

Niederschläge im Perimeter

Der Untersuchungsperimeter Napf befindet sich in unmittelbarer Nähe zur ANETZ-Station Napf (Distanz: 5 km). Die dort gemessenen Niederschläge können als repräsentativ für das Untersuchungsgebiet erachtet werden. In der Periode vom 18. bis 23.08. wurden insgesamt 241 mm registriert, wobei am 21. und 22. mit 127 bzw. 51 mm in 24 Stunden der Hauptanteil des gesamten Niederschlags fiel (Tab. 2.2). In der Privatstation Brachhüsli, Trub wurde in der fraglichen Niederschlagsperiode 259 mm gemessen (mündl. Mitt. L. Irmann 2005). Insbesondere die Niederschläge vom 21. bis 23.08. mit 177 mm in 48 Stunden entsprechen einem Extremereignis, das gemäss Statistik weniger als ein Mal pro 300 Jahre vorkommt (Abb. 2.8). Dem gegenüber weisen die Werte für Zeitperioden unter 10 Stunden relativ geringe Jährlichkeiten auf. Dies erklärt den Umstand, dass nur wenige Wildbäche (steile Gewässer bis ca. 10 km² Einzugsgebietsfläche) gefährliche Hochwasser führten. Fragen im Zusammenhang mit Niederschlags-Schwellenwerten für die Auslösung von Hanginstabilitäten werden in Kapitel 4.15 betrachtet.

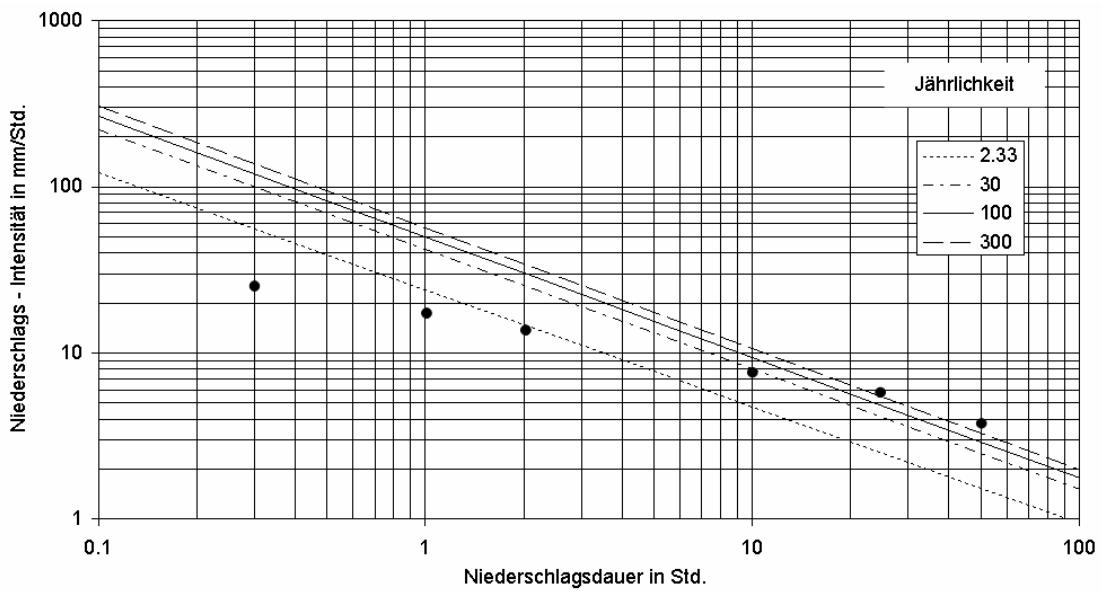


Abbildung 2.8: Niederschlags-Intensitätsdiagramm der ANETZ-Station Napf mit Angabe der Wiederkehrperiode. Als Punkte eingezeichnete Werte für das Niederschlagsereignis vom August 2005 (erstellt nach Geiger et al. 1991).

2.3 Überblick Hanginstabilitäten 2005

Die extremen Niederschläge vom 20. bis 23. August 2005 führten zur Auslösung von über 5000 Rutschprozessen in der Schweiz. Die durch Rutschungen und Hangmuren verursachten Schäden betrugen knapp 100 Mio. Franken (Bezzola und Hegg 2007). Die Schäden waren über den gesamten Voralpen- und nördlichen Alpenraum verteilt, mit Schwerpunkt Zentralschweiz (Abb. 2.9). Der überwiegende Anteil der Hangprozesse sind flachgründige Rutschungen mit Volumina im Bereich von wenigen 100 bis 1000 m³.

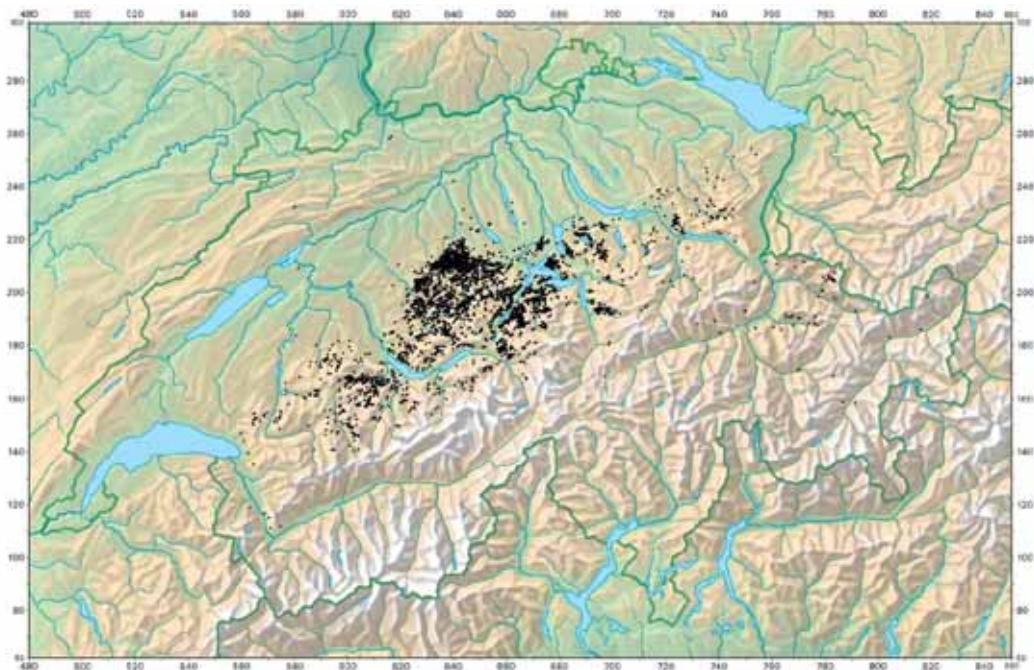


Abbildung 2.9: Hanginstabilitäten (schwarze Punkte) des Unwetters vom August 2005, gemäss Angaben der Kantone. Kartengrundlage: ©swisstopo.

2.4 Frühere Ereignisse mit Hanginstabilitäten

Unwetterereignisse mit zahlreichen Hanginstabilitäten sind keine Einzelerscheinungen. Darauf weisen die nachfolgenden Ausführungen zu bekannten Ereignissen in unseren Untersuchungsgebieten, in der gesamten Schweiz sowie im benachbarten Ausland hin. Auch in Zukunft ist immer wieder mit derartigen Prozessen und entsprechenden Schäden zu rechnen.

2.4.1 Untersuchungsgebiete Ereignisanalyse 2005

In allen drei Untersuchungsgebieten (Entlebuch, Prättigau und Napf) sind schon früher Rutschungen aufgetreten. Das unterstreichen Aussagen der Lokalbevölkerung sowie die entsprechenden typischen Geländeformen, welche bei den Erhebungen in den Untersuchungsgebieten häufig beobachtet werden konnten (vgl. Kap. 4.8).

Für den Perimeter Napf ist beispielsweise bekannt, dass 1953 ein Unwetter diverse Naturgefahrenprozesse auslöste. Das letzte grössere Schadenereignis mit einer grossen Anzahl oberflächennaher Rutschungen fand jedoch in der Nacht vom 15. auf den 16. Juli 2002 statt (Rickli und Bucher 2003). Die Schäden durch Hochwasser, Rutschprozesse und Murgänge gingen damals in den zweistelligen Millionenbereich. Die Ereignisse 2002 und 2005 unterscheiden sich in Bezug auf die Niederschläge: Die Hauptphase der Niederschläge war 2002 mit 2.5 bis 3 Stunden wesentlich kürzer als 2005. Dafür waren die Niederschläge intensiver. Besonders interessant ist der Vergleich zwischen den Perimetern Napf 2002 (Rickli und Bucher 2003) und Napf 2005 (im vorliegenden Bericht), welche nur rund drei Kilometer voneinander entfernt sind.

2.4.2 Gesamte Schweiz

In der Schweiz kommt es immer wieder zu Rutschprozessen infolge heftiger Niederschläge. Dadurch entstehen jeweils hohe Sachschäden – in einigen Fällen sind auch Todesopfer zu beklagen (Schmid et al. 2004). Nachfolgend sind einige Ereignisse der letzten Jahre aufgeführt, bei denen sich in der Schweiz verbreitet flachgründige Rutschprozesse ereigneten:

- 1977: Schächental UR (VAW, EAFV 1988)
- 1984: Melchtal, Alptal und Gersau (von Wyl 1987, Zeller und Röthlisberger 1985)
- 1987: Obergoms, Urserental, Bedretto und Rigi-Nordlehne (Jahn 1991, Kienholz et al. 1988, Zeller und Röthlisberger 1988)
- 1990: Moléson, Gantrisch und Ybrig (Weber 1991, Röthlisberger 1991)
- 1997: Sachseln (BWW 1998)
- 1999: Verschiedene Regionen der Schweiz (AGN 2000)
- 2002: Regionen Napf am 15. und 16. Juli, Appenzell am 30. August und 1. September (Rickli und Bucher 2003) sowie Region Surselva am 16. November (Wilhelm 2003, Krauer 2004)
- 2003: Kanton Zug (7./8. Juni)
- 2005: weite Teile des Alpen- und Alpenrandgebietes vom 20. bis 23.8 August (Bezzola und Hegg 2007)
- 2007: Verschiedene Regionen Voralpen und Zentralschweiz (Hilker et al. 2008.)

2.4.3 Nachbarländer

Aus den Berggebieten unserer Nachbarländer sind verschiedene Schadenereignisse durch oberflächennahe Rutschungen dokumentiert. Beispielhaft erwähnt seien folgende Ereignisse:

- Österreich: Kärnten 1966 und 1975 (Moser 1980), Mittleres Inntal 1985 (Moser und Schoger 1989), Vorarlberg 1999 (Andreics et al. 2002) und 2005 (Markart et al. 2007)
- Slowenien 1989 (Fazarinc und Mikos 1992)
- Italien: Veltlin 1983 und 1987 (Polloni et al. 1991), Piemont 1994 (Aleotti et al. 1996) und in der Region Aosta 2000 (Luino 2005)

2.5 Begriffe

Nachfolgend wird die Bedeutung einiger Begriffe umschrieben, wie sie im vorliegenden Bericht verwendet werden:

- Rutschung: hangabwärts gerichtete, paketweise Bewegung von Locker- und Festgestein entlang einer Gleitfläche. Der Begriff wird verwendet unabhängig vom Prozess, der zur initialen Bewegung führt (z.B. Scherbruch, hydraulischer Grundbruch). Oft gleichbedeutend verwendet wie Hanginstabilität oder Hangprozess.
- Hangmure: Verlagerungsprozess von Rutschungsmaterial, welches meist stark mit Wasser durchmischt und unter zunehmender interner Deformation über grössere Strecken hangabwärts transportiert wird.
- Erosion: Abtrag von Bodenmaterial "Korn für Korn".
- Hangprozesse: Massenbewegungen (im vorliegenden Bericht ohne Steinschlag und Oberflächenerosion); d.h. flach-, mittel- und tiefgründige Rutschungen sowie Hangmuren.
- Flachgründig: Rutschungen mit maximalen Tiefen bis 2.0 m (gemäss BRP/BWW/BUWAL 1997).
- Disposition: Faktorkombination aus Topographie (Hangneigung), Bodeneigenschaften, Hydrologie, Vegetation etc. welche die Tendenz eines Standortes zu Rutschprozessen beschreibt. Unterbegriffe: Grunddisposition, variable Disposition.

3 Methoden

3.1 Allgemeines

Für die Erhebungen und Auswertungen wurden bei der Untersuchung der Ereignisse 2005 ähnliche Methoden angewendet wie bei den WSL-Untersuchungen der flachgründigen Rutschungen von Sachseln 1997 (Rickli 2001) und in den Gebieten Napf und Appenzell 2002 (Rickli und Bucher 2003). Dadurch sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit jenen früherer Arbeiten in der Schweiz gut vergleichbar. Die Methodik umfasst jeweils die folgenden Aspekte:

- Definition eines Untersuchungsperimeters
- Erfassung und Dokumentation aller oberflächennahen Rutschprozesse innerhalb des Untersuchungsperimeters mit einem Volumen von mindestens 30 m³ im Feld

Nach einem Ereignis werden in der Regel viele Rutschungsflächen sehr rasch instand gestellt - insbesondere jene ausserhalb des Waldes und in der Nähe von Siedlungen und Infrastrukturlagern. Bei diesen verbauten Flächen kann ein Teil der wichtigen Parameter nicht mehr erhoben werden. Zudem werden - bedingt durch die Witterung - die Spuren der Prozesse immer undeutlicher und dadurch wird die Rekonstruktion des Prozessablaufes erschwert. Aus diesen Gründen mussten die Feldaufnahmen jeweils so schnell als möglich in Angriff genommen werden.

Nachdem feststand, in welchen Regionen die Untersuchungen durchgeführt werden sollten, mussten die genauen Untersuchungsperimeter abgegrenzt werden. Eine grobe Abschätzung des Zeitbudgets ergab, dass vor Einbruch des Winters maximal rund 100 Rutschungen im Feld dokumentiert werden konnten. Deshalb wurden die Perimeter so abgegrenzt, dass jeweils pro ausgewähltes Gebiet (Entlebuch, Prättigau, Napf) ungefähr je 30 bis 40 Rutschungen vorkamen. Innerhalb der Perimeter wurden dann alle Rutschungen, welche gewisse Kriterien erfüllten (vgl. Kapitel 3.3.2), im Feld untersucht und dokumentiert. Damit alle Rutschungen innerhalb der Perimeter in der zur Verfügung stehenden Zeit erfasst werden konnten, mussten die Perimetergrenzen im Verlauf der Feldaufnahmen teilweise angepasst werden.

Ein Formular sowie eine entsprechende Anleitung (vgl. Anhang) garantierten die einheitliche Ansprache und Messung der zahlreichen Parameter. Dabei konnte auf frühere WSL-Arbeiten zu flachgründigen Rutschungen abgestützt werden. Die Felddaten wurden in einer Access-Datenbank abgelegt und mit Excel oder S-Plus ausgewertet und dargestellt. Zudem wurden eine Fotodokumentation erstellt sowie Bodenproben entnommen und im Labor analysiert. Verschiedene Grundlagen zu den Untersuchungsgebieten wurden in ArcGIS bearbeitet: Flächenbestimmungen Wald und Freiland, Analysen zur Topographie wie Höhenlage, Exposition und Neigungen etc.

3.2 Wahl der Untersuchungsgebiete

Für die Untersuchung wurden Perimeter in den Gebieten Napf, Entlebuch und Prättigau ausgewählt (Abb. 3.1). An die Untersuchungsgebiete wurden verschiedene Anforderungen gestellt:

- Lage innerhalb Haupt-Schadengebiet; verbreitet flachgründige Rutschungen
- Instandstellung: möglichst wenig Rutschungen bereits verbaut
- Erweiterung und Ergänzung zu früheren Untersuchungen hinsichtlich Geologie

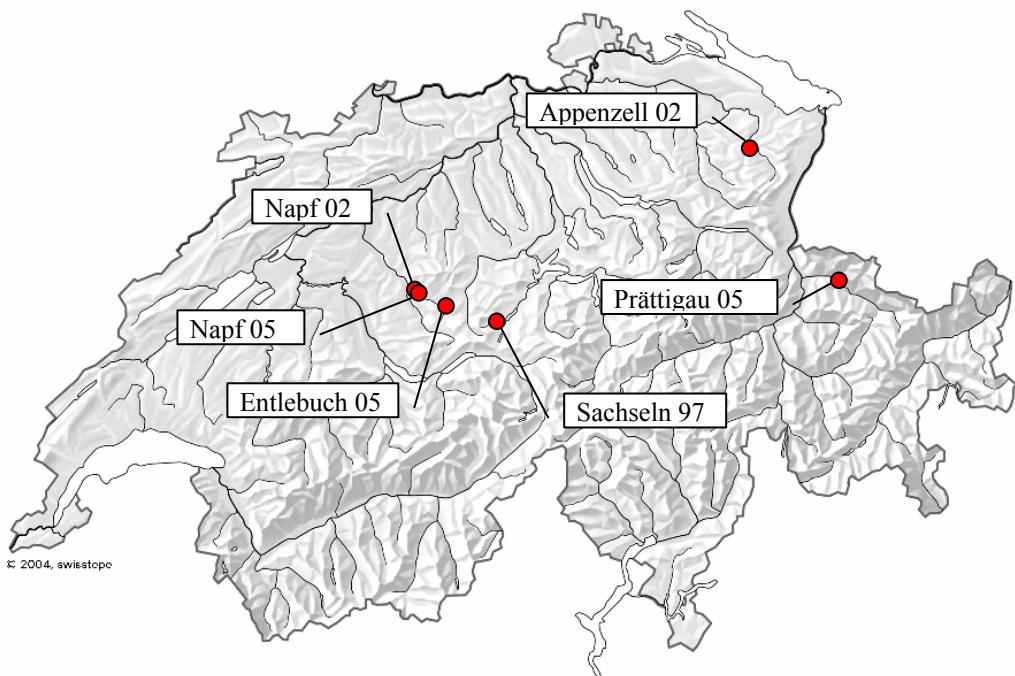


Abbildung 3.1: Lage der drei Untersuchungsperimeter "Napf", "Entlebuch" und "Prättigau" der Unwetter 2005 sowie die Lage der Untersuchungsgebiete früherer WSL-Projekte "Sachseln" (Unwetter von 1997), "Napf" und "Appenzell" (Unwetter von 2002).

3.3 Aufnahmen bei den Rutschungen

3.3.1 Allgemeines

Die Vorbereitungen der Felderhebungen und die Auswahl der Untersuchungsgebiete erfolgten im September 2005. Die Arbeiten im Feld wurden anfangs Oktober aufgenommen und dauerten bis zum Einwintern Mitte Dezember. Einzelne abschliessende Erhebungen folgten im Frühjahr 2006. Die Rutschungen wurden nach den in Kapitel 3.3.2 festgelegten Kriterien ausgewählt und dokumentiert. Damit wirklich alle Rutschungen innerhalb des Perimeters erfasst werden konnten, mussten insbesondere die Waldstücke systematisch und vollumfänglich zu Fuss abgesucht werden, was einen erheblichen Zeitaufwand bedeutete.

Das Aufnahmeprozedere ist aus den nachfolgenden Ausführungen sowie aus dem Aufnahmeformular und der dazugehörenden Anleitung ersichtlich (beide im Anhang). Beurteilt wurden die Rutschungsfläche und das umliegende Gelände (Abb. 3.2) sowie die Auslaufstrecke. Jede Rutschung wurde zudem mit diversen Fotos und Skizzen dokumentiert. Folgende Geräte kamen zum Einsatz:

- Neigungen: Clisimeter, Suunto
- Höhenlage: Höhenmeter Thommen, GPS Garmin 90 und eTrex-Summit
- Exposition: Bussole Meridian
- Distanzmessung: Laser Distanzmesser Leica DISTO classic⁵a, Messband
- Lagekoordinaten: GPS Garmin 90 und Garmin eTrex-Summit

3.3.2 Bedingungen für die Dokumentation einer Rutschung

Im Zusammenhang mit den wichtigsten Fragestellungen dieses Projektes sind Rutschungen interessant, die 1) eine minimale Grösse und entsprechendes Gefahrenpotential aufweisen sowie

2) die nicht durch klar erkennbare Einflüsse wie zum Beispiel durch Hangfusserosion ausgelöst wurden. Als minimale Grösse für eine vollständige Erfassung der Daten wurde ein Volumen von 30 m³ festgelegt. Bei kleineren Rutschungen wurde nur ein Teil der Parameter erfasst.

Verzichtet wurde auf die Untersuchung der in Einzelfällen vorkommenden mittel- oder tiefgründigen Rutschungen. Ebenfalls nicht beurteilt wurden murgangähnliche Prozesse in Rinnen und Runsen. Es wurden zudem nur Rutschungen vollständig beurteilt, die nicht durch klar ersichtliche Ursachen wie beispielsweise Gerinneerosion ausgelöst worden waren. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen der WSL wurden Rutschungen, welche im Bereich von Strassenböschungen ausgelöst worden waren, jedoch möglichst vollständig dokumentiert.

Grund für die Einführung von Ausschlusskriterien ist die Tatsache, dass in der zur Verfügung stehenden Zeit nur eine begrenzte Anzahl Rutschungen im Feld dokumentiert werden konnte und deshalb eine Fokussierung hinsichtlich der wichtigsten Projektfragen notwendig war. Die Kriterien und Bedingungen für die Dokumentation der Rutschungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Rutschungen, ausgelöst durch die Niederschlagsereignisse vom August 2005
- Rutschungen innerhalb der definierten Untersuchungsgebiete
- flachgründige Rutschungen (mittlere Mächtigkeit ≤ 2.0 m)
- minimales Volumen: 30 m³
- nicht ausgelöst durch klar erkennbare Ursachen wie Gerinneerosion, jedoch inklusive Rutschungen im Bereich von Strassenböschungen

3.3.3 Erfasste Daten

Zur eigentlichen Rutschfläche (Beurteilungsraum 1 gemäss Abb. 3.2) wurden die folgenden Grunddaten und Messungen erhoben:

- am oberen Anrissrand: Koordinaten, Exposition, Höhenlage
- in bzw. ausgehend von der Rutschfläche: Neigung in, oberhalb und unterhalb der Rutschfläche, Abmessungen der Rutschung (Länge, Breite, Mächtigkeit, Anrisshöhe)
- Dokumentation allenfalls bereits ausgeführter Massnahmen
- in einem Bodenprofil am oberen Anrissrand: Bodenentwicklung, Horizontabfolge, Durchlässigkeit, Makroporen (Art und Quantität), Hauptwurzelraum, Lockergesteinsklassifikation
- in der Rutschfläche: Festgestein (Art, Fallwinkel und –azimut), Wasserführung, Rutschmechanismus, Materialbilanz, Ort der Gleitfläche

Für den Rutschhang unmittelbar über dem oberen Anrissrand der Rutschung (Beurteilungsraum 2 gemäss Abb. 3.2) wurden folgende Parameter erhoben:

- Hydrologische Standorteigenschaften
- alte Rutsch- oder Kriechbewegungen (Anzeichen)
- mögliche Beeinflussungen der Rutschungsauslösung

Auf einer Fläche von ungefähr 100 x 100 m in der Umgebung der Rutschung (Beurteilungsraum 3 gemäss Abb. 3.2) wurden folgende Parameter erhoben:

- Geomorphologie
- Vegetation (Wald, Freiland)
- Nutzung bzw. Bestandescode

Zudem wurden jeweils die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle der Hangmuren vermessen. Für die Rutschungen wurde eine Lageskizze und ein Längenprofil angefertigt sowie das Bodenprofil und die Rutschung im Überblick fotografiert.

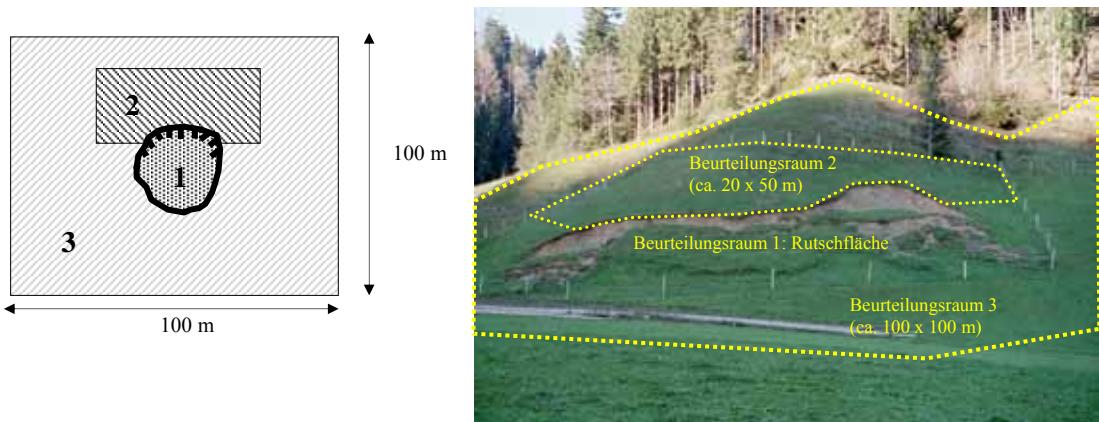


Abbildung 3.2: Drei unterschiedliche Beurteilungsräume. Beurteilungsraum 1 (eigentliche Rutschfläche); Beurteilungsraum 2 (Fläche von ca. 20 x 50 m unmittelbar oberhalb des Anrißrandes); Beurteilungsraum 3 (Fläche von ca. 100 x 100 m in der Umgebung der Rutschung).

3.4 GIS/Luftbilder

Für die untersuchten Gebiete standen keine offiziellen Luftbilder zur Verfügung, welche den Zustand unmittelbar nach den Ereignissen dokumentiert hätten. Im Zusammenhang mit der Auswahl möglicher Perimeter wurde über den Regionen Napf und Entlebuch ein privater Erkundungsflug durchgeführt. Verschiedene geographische Daten wurden in ArcGIS 9.2 bearbeitet und ausgewertet. Dazu gehören vor allem auch Grundlagen des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo:

- Swissimage (digitales Orthophoto)
- Vector 25 (vektorisierte Landeskarten 1:25000)
- Pixelkarten 1:25'000 (gescannte Landeskarten 1:25'000)
- DTM-AV/DOM-AV: digitales Gelände- und Oberflächenmodell

3.5 Bodenanalysen - Bodenmechanik

3.5.1 Probenentnahme

Insgesamt 16 Bodenproben wurden entnommen: im Gebiet Prättigau bei sieben Rutschungen, im Gebiet Napf bei fünf Rutschungen und bei vier Rutschungen im Gebiet Entlebuch. Die Proben stammen jeweils aus einem Bodenprofil am oberen Anrißrand der entsprechenden Rutschung und zwar aus der Zone unmittelbar über oder aus dem Bruchhorizont resp. der Gleitflächer. Mit den Bodenuntersuchungen sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Vielfalt der vorkommenden Lockergesteinsböden erfassen
- Bodenkennwerten für bodenmechanische Analysen ermitteln

In jedem Untersuchungsgebiet wurden die Bodenproben nach Möglichkeit einerseits bei Rutschungen mit ähnlichen Neigungen jedoch unterschiedlichen Böden und andererseits bei Rutschungen mit ähnlichen Böden und unterschiedlichen Neigungen entnommen.

3.5.2 Analyse

Die Proben wogen im feuchten Zustand zwischen 16 und 35 kg. Im Labor wurde der Wassergehalt bestimmt und eine Korngrößenanalyse durchgeführt. Diese erfolgte im Bereich von 63 bis 10 mm Korndurchmesser mittels Trockensiebung, im Bereich von 10 bis 0.125 mm mittels Nasssiebung und im Bereich kleiner als 0.06 mm mittels Aräometer-Methode. Zudem wurden die Fließ- und Ausrollgrenzen bestimmt. Die Klassifikation der Böden erfolgte nach SN670 008a (VSS 1997) mit der Korngrößenverteilung und den Konsistenzgrenzen als Eingangsgrößen. Darauf basierend können anhand der Schweizer Norm SN 670010b (VSS 1999) verschiedene Kennwerte der Böden abgeschätzt werden - beispielsweise der Scherwinkel ϕ' , das Feuchtraumgewicht γ und der Wassergehalt w .

Der Scherwinkel ϕ' kann zudem auch aufgrund des Verlaufes der Kornverteilungskurve nach der Methode von Dhawan abgeschätzt werden (in Lang et al., 1996):

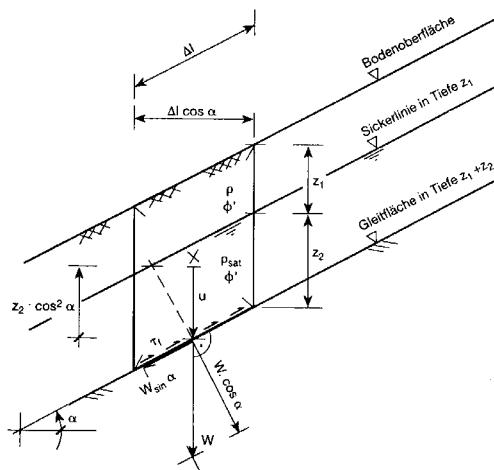
$$\phi' = A + B + C + D \quad (1)$$

mit $A = 1/7$ Anteil Körner (Gewichts-%) < 0.002 mm, $B = 1/5$ Anteil Körner (Gew.-%) 0.002 mm bis 0.01mm, $C = 1/3$ Anteil Körner (Gew.-%) 0.01 mm bis 0.2 mm, $D = 1/2.5$ Anteil Körner (Gew.-%) > 0.2 mm. Zusätzlich können bei dieser Methode die Form der Korngrößenverteilungskurve, die Kornform sowie die Lagerungsdichte mittels Korrekturfaktoren (nach Brinch Hansen) berücksichtigt werden. Im Bestreben, den analysierten Bodenproben einen möglichst realitätsnahen Scherwinkel ϕ' zuzuordnen, wurden sowohl die Werte aus der VSS-Norm wie auch jene nach der Methode von Dhawan nach folgendem Gewichtungsverfahren einbezogen (Rickli et al. 2003):

$$\phi' = \frac{1}{3} (2\phi'_{Dhawan} + \phi'_{Norm}) \quad (2)$$

3.5.3 Berechnung der Hangstabilität

Im Rahmen des Projektes wurden Überlegungen und Analysen zur Hangstabilität durchgeführt. Eine einfache Methode bezüglich Stabilitätsberechnungen ist das Modell der unendlich langen Böschung in einem kohäsionslosen Bodenmaterial (Abb. 3.3).



Δl	Länge des Bodenkörpers
α	Böschungswinkel
ϕ'	Scherwinkel des Bodenmaterials
γ	Feuchtraumgewicht
γ_{sat}	spez. Gew. des gesättigten Bodens
γ'	Gewicht unter Auftrieb
$z_{1,2}$	Tiefe
τ_f	Scherfestigkeit
τ	Schubspannung
W	Gewicht
u	Porenwasserspannung

Abbildung 3.3: Modell "unendlich lange Böschung" (nach Böll 1997).

Der Sicherheitsgrad F gegen Abgleiten berechnet sich zu:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{(z_1\gamma + z_2\gamma')\tan \phi'}{(z_1\gamma + z_2\gamma_{sat}')\tan \alpha} \quad (3)$$

Die Parameterdefinitionen finden sich in Abb. 3.1. Nach Böll (1997) übt die Sickerlinie einen sehr grossen Einfluss auf die Stabilität eines Hanges aus. Dies zeigen die beiden Grenzfälle:

1) keine Sickerlinie: aus $z_1 = 0$ ergibt sich $F = \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$ (4)

2) Sickerlinie identisch mit Bodenoberfläche: aus $z_2 = 0$ ergibt sich $F = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$ (5)

Falls gilt $F = 1.0$, ist die Böschung rechnerisch gerade noch im Gleichgewicht. Für den Fall ohne Sickerlinie gilt dann für den Böschungswinkel $\alpha = \phi'$. In kohäsionslosem Bodenmaterial kann demnach der Böschungswinkel nie grösser sein als der Scherwinkel ϕ' .

Für die Berechnung der Hangstabilität bei den Rutschungen sind Angaben über die Dichte des feuchten Bodens γ , des gesättigten Bodens γ_{sat} und des Bodens unter Auftrieb γ' erforderlich. Ausgehend vom Feuchtraumgewicht γ und dem Wassergehalt kann das Trockenraumgewicht γ_d , und damit das Nassraumgewicht (gesättigt) γ_{sat} des Bodenmaterials berechnet werden (Formeln 6, 7):

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad \text{und} \quad \gamma_{sat} = \gamma_d \left(1 + \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) \quad (6, 7)$$

wobei γ_w = spezifische Gewicht des Wassers (1.0 t/m^3) und γ_s = spezifisches Gewicht der festen Bodensubstanz (2.7 t/m^3).

4 Ergebnisse

4.1 Datengrundlage

Im Rahmen der Untersuchung zu den flachgründigen Rutschungen 2005 wurden in allen drei Untersuchungsgebieten zusammen insgesamt 217 Rutschungen im Gelände aufgesucht und dokumentiert (Tab. 4.1). Davon umfassen 152 Rutschungen ein Volumen von mehr als 30 m^3 und 65 Rutschungen ein Volumen von weniger als 30 m^3 . Von den grossen Rutschungen wurden insgesamt 19 massgeblich durch Strasseneinflüsse oder Gerinneerosion ausgelöst. Für die verschiedenen Auswertungen stehen folgende Daten zur Verfügung:

- Vollständige Datensätze zu 133 Rutschungen ($\geq 30 \text{ m}^3$ und nicht durch Gerinne oder Strassen ausgelöst) für Auswertungen zu massgebenden Einflussgrössen auf die Rutschungsauslösung. Davon waren 4 Rutschungen zum Zeitpunkt der Erhebungen bereits verbaut (d.h. bei einigen wenigen Parametern war die Beurteilung nicht mehr möglich).
- Zu Rutschungen, welche durch Strasseneinflüsse ausgelöst worden waren ($N=14$), wurden vollständige Datensätze erstellt, wobei bei den bereits verbauten Rutschungen zwangsläufig einige Parameter nicht erhoben werden konnten.
- Bei den übrigen Rutschungen ($< 30 \text{ m}^3$ und Auslösung durch Gerinneprozesse) wurde nur eine reduzierte Aufnahme durchgeführt (Lokalisierung, Skizze, Volumenschätzung, Foto, Angaben zum Auslauf).

Für Vergleichszwecke stehen die Daten früherer Untersuchungen zur Verfügung: Sachseln 1997 mit 256 Rutschungen (Rickli 2001), Napf 2002 mit 52 Rutschungen und Appenzell 2002 mit 81 Rutschungen (Rickli und Bucher 2003).

Tabelle 4.1: Im Rahmen der Felderhebungen dokumentierte Rutschungen ($N= 217$) in den verschiedenen Untersuchungsperimetern. Vollständige Datenerhebung erfolgte bei Rutschungen mit Volumen $\geq 30 \text{ m}^3$ und ohne Auslösung infolge Strasseneinflüssen oder Gerinneerosion ($N=133$). Als Ursache für diese Rutschungen ohne klare Ursache wird "Disposition des Hanges" angegeben. Werte in Klammern: zum Zeitpunkt der Erhebungen bereits verbaute Rutschungen. Aufnahmekriterien in Kapitel 3.3.2.

Perimeter	Ursache Auslösung	$\geq 30 \text{ m}^3$	$< 30 \text{ m}^3$	Total
Entlebuch 2005	Disposition des Hanges	47 (4)	13 (0)	60 (4)
	Strasse	10 (7)	6 (0)	16 (7)
	Gerinneerosion	4 (0)	10 (0)	14 (0)
	Total	61 (11)	29 (0)	90 (11)
Prättigau 2005	Disposition des Hanges	50 (0)	12 (0)	62 (0)
	Strasse	4 (3)	1 (1)	5 (4)
	Gerinneerosion	1 (0)	1 (0)	2 (0)
	Total	55 (3)	14 (1)	69 (4)
Napf 2005	Disposition des Hanges	36 (0)	18 (0)	54 (0)
	Strasse	0	3 (0)	3 (0)
	Gerinneerosion	0	1 (0)	1 (0)
	Total	36 (0)	22 (0)	58 (0)
Alle Peri- meter 2005	Disposition des Hanges	133 (4)	43 (0)	176 (4)
	Strasse	14 (10)	10 (1)	24 (11)
	Gerinneerosion	5 (0)	12 (0)	17 (0)
	Total	152 (14)	65 (1)	217 (15)

4.2 Anzahl Rutschungen pro Fläche

Die Anzahl beobachteter Rutschungen pro Flächeneinheit zeigt auf, wie stark eine bestimmte Region von flachgründigen Rutschprozessen betroffen war. Bei den nachfolgenden Ausführungen sind nur Rutschungen mit einem Volumen von mehr als 30 m^3 berücksichtigt sowie solche, die nicht durch Strasseneinflüsse oder Gerinneerosion ausgelöst wurden.

In den Untersuchungsgebieten Prättigau 05 und Entlebuch 05 wurden 9.3 bzw. 10.6 Rutschungen pro km^2 beobachtet. Im Perimeter Napf 05 war die Aktivität mit 22.4 Rutschungen pro km^2 deutlich grösser (Tab. 4.2). Werden diese Zahlen mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen der WSL verglichen, ergibt sich folgendes Bild: die grösste Dichte wurde beim Ereignis Sachseln 1997 mit 31 Rutschungen pro km^2 beobachtet. Die zweitgrösste Aktivität wurde im Napfgebiet festgestellt, wobei die Werte von 2002 und 2005 ähnlich hoch sind (20.6 bzw. 22.4 Rutschungen pro km^2). Die kleinsten Rutschaktivitäten fand man in den Gebieten Prättigau 05 (10.6 Rutschungen pro km^2), Entlebuch 2005 (9.3 Rutschungen pro km^2) und Appenzell 02 (8 Rutschungen pro km^2). Angaben zu den Rutschaktivitäten in Wald und Freiland finden sich in der Tabelle 4.7.

Grössere Aussagekraft ergibt sich, wenn die Anzahl Rutschungen nicht auf die gesamte Perimeterfläche, sondern nur auf die Fläche bezogen wird, wo Rutschungen entstehen können. Diesbezüglich wurde ein Neigungsbereich von 20 bis 50° als rutschungsrelevant definiert. Wird in jedem Perimeter nur die Fläche in diesem Neigungsbereich berücksichtigt, ergibt sich folgendes Bild: geringes Vorkommen mit 13 bis 15 Rutschungen pro km^2 in den Perimetern Entlebuch 05 und Prättigau 05, mässige Aktivität mit 25 Rutschungen pro km^2 im Perimeter Appenzell 02 und schliesslich hohe Aktivität in den Perimetern Napf 05, Napf 02 und Sachseln 97 mit 31 bis 49 Rutschungen pro km^2 . Besonders zu erwähnen ist, dass in der Region Napf im Jahr 2005 eine höhere Prozessaktivität als 2002 statt fand. Abbildung A4 im Anhang zeigt die Neigungsverhältnisse in den verschiedenen Untersuchungsperimetern.

*Tabelle 4.2: Angaben zum Vorkommen von Rutschungen pro Fläche in den verschiedenen Untersuchungsperimetern. Auswertung für den gesamten Perimeter sowie für Perimeterflächen mit Neigungen von 20 bis 50° . *Sachseln 1997: die Aufnahmegrenze lag ursprünglich bei 20 m^3 , hier sind jedoch ebenfalls nur Rutschungen mit $Volumen \geq 30 \text{ m}^3$ berücksichtigt.*

Untersuchungsgebiet und Schadensjahr	Gesamte Perimeterfläche			nur Flächen im Perimeter mit Neigungen zwischen 20 und 50°		
	Fläche (km^2)	Rutschungen	Rutschungen pro km^2	Fläche (km^2)	Flächenanteil (%)	Rutschungen pro km^2
Entlebuch 2005	5.1	47	9.3	3.6	72	12.9
Prättigau 2005	4.7	50	10.6	3.4	73	14.7
Napf 2005	1.6	36	22.4	0.7	46	48.6
Napf 2002	2.5	51	20.6	1.6	66	31.3
Appenzell 2002	10.2	82	8.0	3.3	33	24.6
Sachseln 1997 *	8.2	256*	31.1	7.3	88	35.3

4.3 Entstehungsort der Rutschungen

4.3.1 Exposition

Bei den Rutschungen wurde jeweils die Ausrichtung des Hanges (Exposition) festgehalten. Um den Einfluss der Exposition auf die Rutschaktivität zu untersuchen, wurden in ArcGIS für jedes Untersuchungsgebiet die Flächen in den verschiedenen Expositionen berechnet. Diese Flächen wurden in Bezug zur Anzahl der in den jeweiligen Expositionen entstandenen Rutschungen gesetzt (Abb. 4.1).

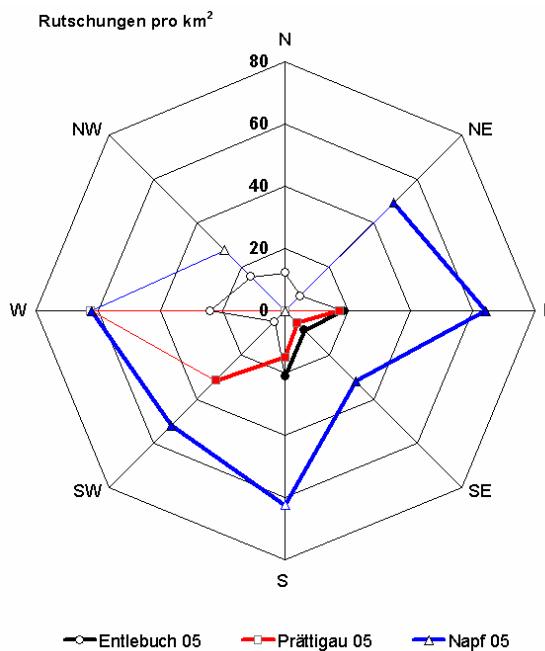


Abbildung 4.1: Anzahl Rutschungen pro Fläche (km^2) in Abhängigkeit der Exposition sowie für Flächen mit Hangneigungen von 20 bis 50° in den Untersuchungsperimetern 2005. Aufgrund ungünstiger Flächenverteilung in den betreffenden Perimetern ergeben sich für einzelne Expositionen keine sinnvollen Resultate (dünne Linien und weiße Punktsymbole). Datensatz: $N=133$.

Insgesamt wurde in den Expositionen NW, N und NE vergleichsweise geringere Rutschaktivitäten beobachtet. Dies liegt jedoch insbesondere auch daran, dass generell nur kleine Flächenanteile der Perimeter in diesen Ausrichtungen vorkommen. Deshalb sind nur für einzelne der Expositionsklassen in Abb. 4.1 vergleichende Betrachtungen in Bezug auf die Rutschaktivität sinnvoll. Um dem Problem der kleinen Flächenanteile zu begegnen, wurde die Anzahl Kategorien auf vier Hauptausrichtungen reduziert:

- Nord: NW, N, NE
- Ost: NE, E, SE
- Süd: SE, S, SW
- West: SW, W, NW

Gemäss dieser Auswertung sind Nordhänge am schwächsten betroffen. Allerdings kommen diese im Gebiet Prättigau praktisch nicht vor (Tab. 4.3). Westliche Ausrichtungen sind in allen Perimetern am stärksten betroffen. Die Unterschiede sind jedoch nicht überall deutlich und zudem existieren auch weniger Flächen in dieser Exposition als in Ausrichtung Ost und Süd. Insgesamt kann aus den vorliegenden Resultaten kein klares Bild zur Anfälligkeit bestimmter Expositionen auf erhöhte Rutschungsaktivität abgeleitet werden.

Tabelle 4.3: Einfluss der Exposition auf die Auslösung von Rutschungen: Rutschungen pro km^2 für Flächen mit Hangneigungen von 20 bis 50° in den verschiedenen Expositionen der Untersuchungsgebiete 2005 (N = Anzahl Rutschungen).

Exposition	Entlebuch 05			Prättigau 05			Napf 05		
	km^2	N	N/km^2	km^2	N	N/km^2	km^2	N	N/km^2
N	0.44	4	9.1	0.01	0	0.0	0.1	3	29.7
E	2.61	29	11.1	1.23	8	6.5	0.4	18	45.6
S	2.21	23	10.4	3.24	45	13.9	0.4	18	44.4
W	0.56	9	16.2	0.49	17	34.4	0.2	10	47.5

4.3.2 Höhenlage

Bei jeder Rutschung wurde am oberen Anrissrand die Höhe über Meer bestimmt. In ArcGis konnte für die drei Perimeter für Gebiete mit Neigungen von 20 bis 50° d.h. "rutschfähiger" Neigungsbereich, zudem die Flächen pro Höhenstufe ermittelt werden. Dies ermöglichte, die Anzahl Rutschungen pro Fläche in den verschiedenen Höhenstufen zu bestimmen (Abb. 4.2).

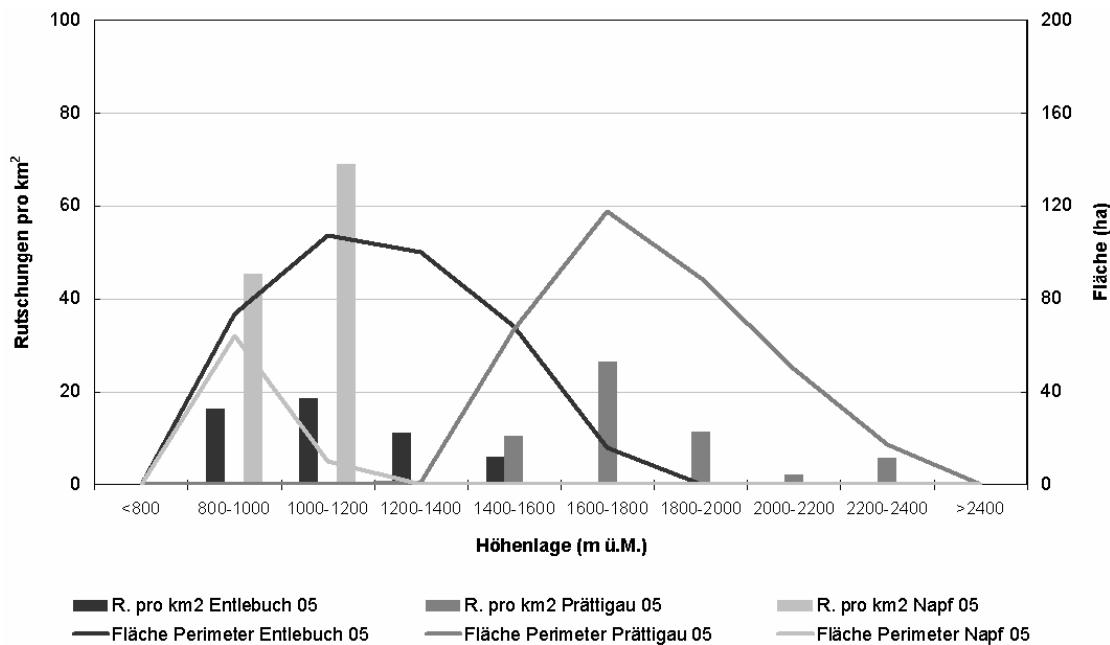


Abbildung 4.2: Anzahl Rutschungen pro km^2 in Flächen mit Neigungen von 20 bis 50° und pro Höhenstufe in den verschiedenen Untersuchungsperimeter der Ereignisse 2005 ($N=133$).

Allgemein sind in den mittleren - im Perimeter Entlebuch auch in den tieferen - Lagen der Untersuchungsgebiete am meisten Rutschungen pro Fläche zu verzeichnen. Der starken Prozessaktivität in den höheren Lagen des Gebietes Napf ist keine grosse Bedeutung beizumessen, da sich nur kleine Flächen in diesen Lagen befinden.

4.3.3 Hangneigung

Die Neigung wurde zwischen dem oberen Anrissrand der Rutschung und dem Ausbiss der Gleitfläche gemessen (Abb. 4.3). Es handelt sich also um die durchschnittliche Neigung des ursprünglichen Terrainverlaufes im Bereich des abgerutschten Bodenmaterials. Nachfolgend sind die Daten zu den Hangneigungen bei den Rutschungen in verschiedenen Abbildungen dargestellt. Dabei sind mehrheitlich auch die Ergebnisse früherer Untersuchungen (Ereignisse 1997 und 2002) beigefügt.

Die Rutschungen der Ereignisse 2005 fanden zur Hauptsache in einem Bereich von 20 bis 45° statt (Abb. 4.3). Die flachste Rutschung wurde im Untersuchungsgebiet Entlebuch bei einer Neigung von 19°, die steilste bei 45° im Perimeter Napf beobachtet. Die Neigungswerte sind für die Gebiete Entlebuch und Prättigau normal verteilt, wobei der Schwerpunkt der Rutschungen im Prättigau bei höheren Neigungen liegt als im Gebiet Entlebuch. Die Verteilung der Neigungen im Gebiet Napf weist im Ansatz zwei Gipfel auf.

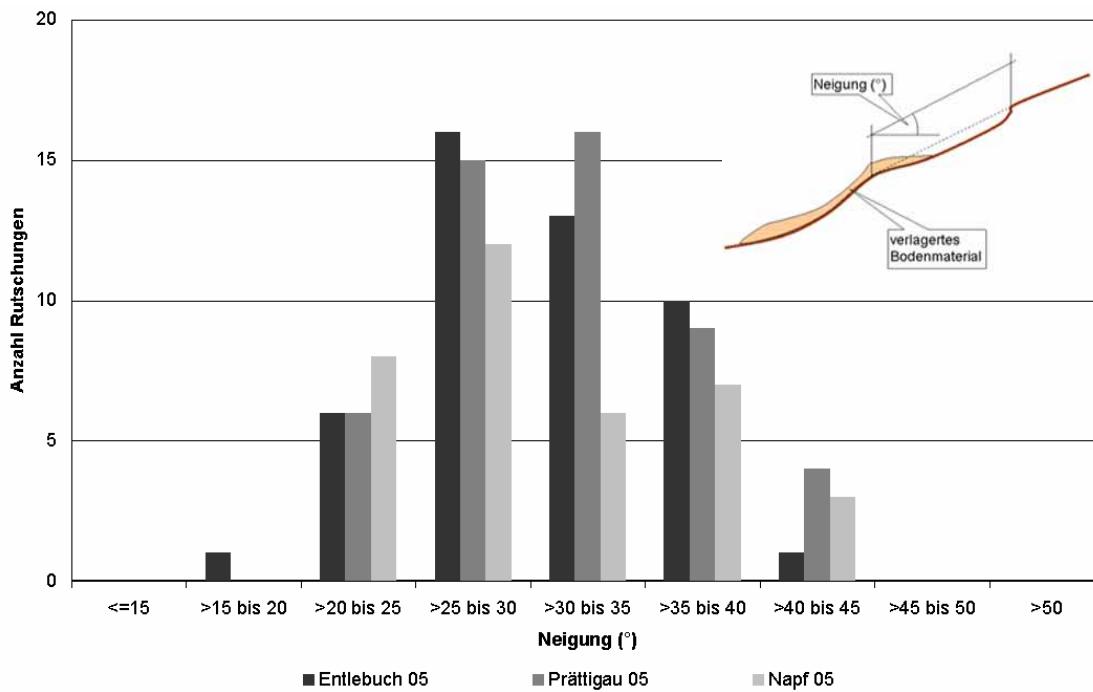


Abbildung 4.3: Anzahl Rutschungen pro Neigungsklasse in den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005.

In Abb. 4.4 sind die Anteile der Rutschungen pro Neigungsklasse aufgeführt. Die Rutschungen 2005 fanden bei ungefähr vergleichbaren Neigungsverhältnissen statt. Allerdings weist die Kurve für das Gebiet Napf 05 im Bereich 20 bis 25° etwas mehr und im mittleren Bereich von 30 bis 35° etwas weniger Werte auf als in den beiden anderen Gebieten 2005. Im Vergleich dazu fanden die Rutschungen der früheren Ereignisse (1997 und 2002) in einem deutlich schmäleren Neigungsband statt; die Rutschungen der Ereignisse Napf 02 und Sachseln 97 zusätzlich bei höheren Neigungen. Hervorzuheben ist im Weiteren der klare Unterschied bezüglich der Werteverteilung zwischen den Rutschungen Napf 2002 und Napf 2005.

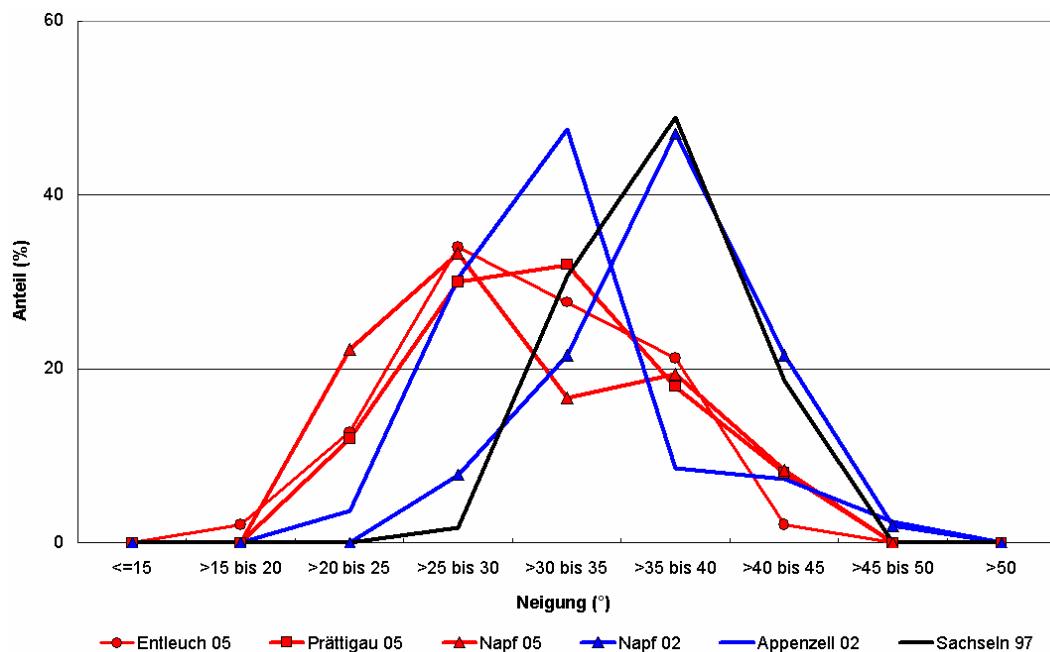


Abbildung 4.4: Anteil Rutschungen pro Neigungsklasse in den verschiedenen bisher untersuchten Gebieten.

Die erwähnten Aspekte sind auch aus den Kistendiagrammen in Abb. 4.5 ersichtlich: vergleichsweise höherer Neigungsbereich der Rutschungen aus den Untersuchungsgebieten Napf 02 und Sachseln 97, grössere Wertestreuungen in den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 05.

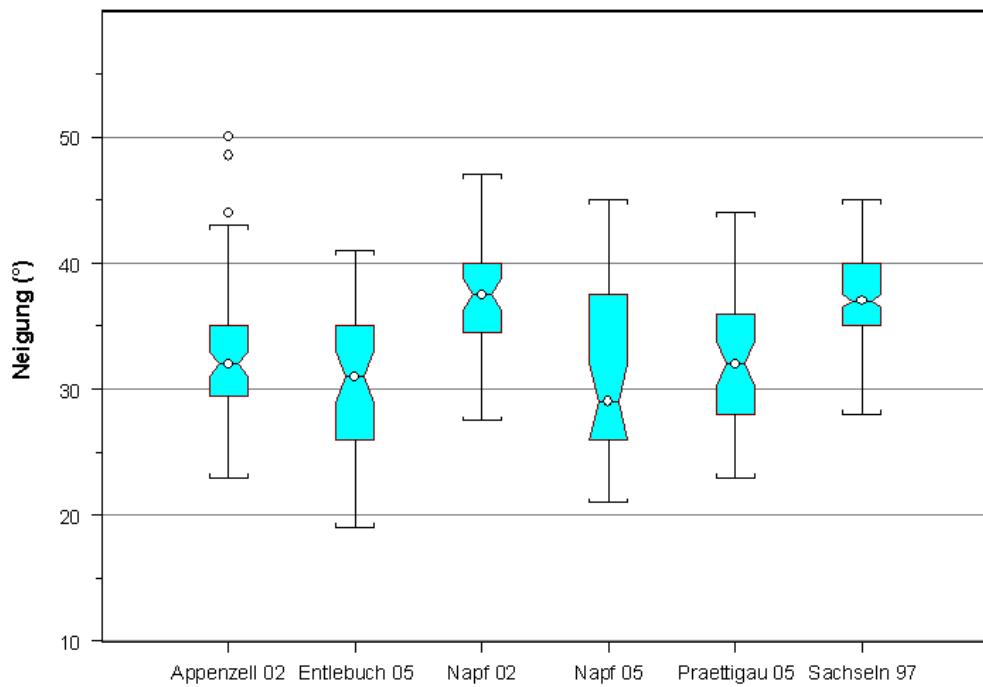


Abbildung 4.5: Streuungsdiagramme der Neigungen bei den Rutschungen in den untersuchten Gebieten.

Mit dem Geländemodell dtm-av (© swisstopo) wurde in ArcGIS für alle Untersuchungsgebiete die Flächenanteile pro Neigungsklasse ermittelt. Damit konnte für die verschiedenen Hangneigungsklassen jeweils die Anzahl Rutschungen pro km^2 berechnet werden. Dieser Wert kann als Hinweis auf den Einfluss der Hangneigung auf das Entstehen von flachgründigen Rutschungen betrachtet werden.

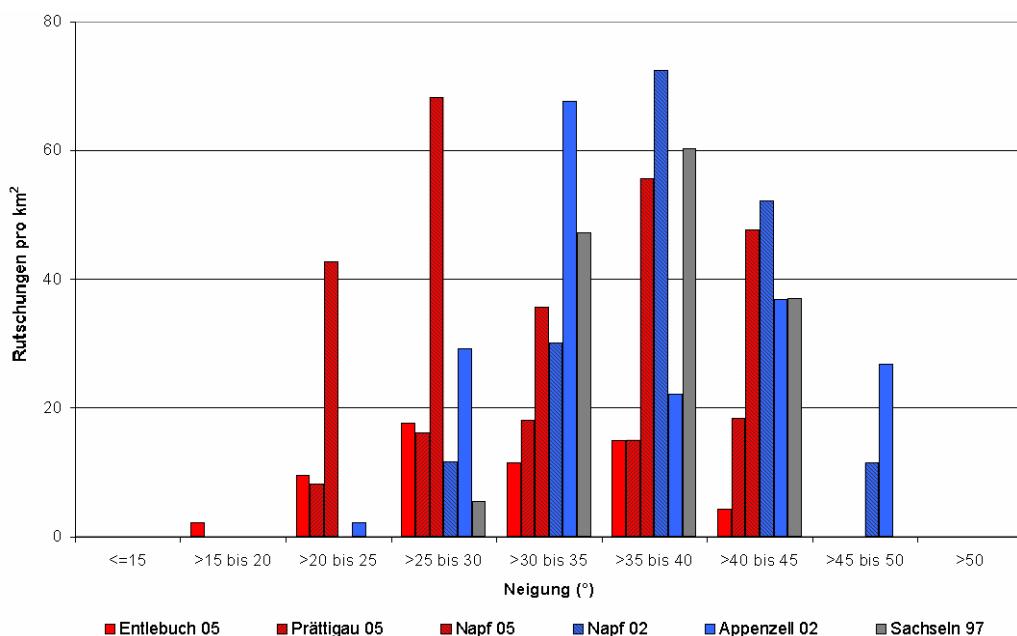


Abbildung 4.6: Anzahl Rutschungen pro km^2 und pro Hangneigungsklasse in den verschiedenen bisher untersuchten Gebieten (rot: Ereignisse 2005, blau: Ereignisse 2002, grau: Sachseln 1997).

In allen Untersuchungsgebieten ist im Neigungsbereich von 25 bis 45° die Rutschungsaktivität am grössten. Zudem sind in dieser Darstellung auch die generellen Unterschiede zwischen den Perimetern ersichtlich, wie sie bereits in Tabelle 4.2 dargestellt sind: viele Rutschungen pro Flächeneinheit im Gebiet Napf 05, eher wenig Rutschungen in den Gebieten Entlebuch und Prättigau 05. Allgemein weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Neigung ein wichtiger Faktor für die Auslösung von Rutschungen ist.

Bei Gefahrenbeurteilungen und Gefahrenkartierungen sind Informationen zu den Extremwerten der Neigungen wichtig - insbesondere zu den flachsten, in einem Gebiet gemessenen Neigungen. Die Minimalneigungen der Untersuchungsperimeter Entlebuch 05, Prättigau 05, Napf 05 und Appenzell 02 liegen bei 19 bis 23° (Tab. 4.4). In den Perimetern Napf 02 und Sachseln 97 wurden Rutschungen erst ab Neigungen von 27, resp. 28° beobachtet. Ein Anteil von 90% aller Rutschungen entstand im Gebiet Napf 05 bei Neigungen von mehr als 24°. Am anderen Ende der Skala liegt das Gebiet Sachseln, in dem dieser Wert bei 34° liegt. Auch bei diesen Betrachtungen zeigt sich, dass bei den Ereignissen 05 im Vergleich zu den Ereignissen 97 und 02 vermehrt auch flachere Gebiete betroffen waren.

Tabelle 4.4: Geringste beobachtete Neigung bei den Rutschungen sowie Neigung, welche von 90%, resp. 80 % der Rutschungen überschritten wurde. Zusätzlich sind jeweils die Neigungen Mittelwert minus einfache Standardabweichung gemäss Kriterium AGN (2004) angegeben.

Untersuchungsgebiete	flachste beobachtete Neigung (°)	90% aller Rutschungen in Neigungen grösser als°	80% aller Rutschungen in Neigungen grösser als°	Mittelwert \bar{x} minus Standardabweichung σ (°)
Entlebuch 05	19	25	26	26
Prättigau 05	23	25	28	27
Napf 05	21	24	25	24
Napf 02	27	31	34	33
Appenzell 02	23	28	29	28
Sachseln 97	28	34	35	34

4.3.4 Geländeform

Die Geländeform wurde im Bereich der Rutschung auf einer Fläche von etwa 50 mal 50 m bis 100 mal 100 m um die Anrisszone beurteilt (Abbildung 3.2). Sie wurde entsprechend der Wölbung (konkav, flach, konvex) in horizontaler Ausdehnung sowie in der Hangfalllinie in insgesamt neun Formtypen eingeteilt.

Die Resultate zeigen mindestens auf den ersten Blick ein uneinheitliches Bild. Bei den Untersuchungsgebieten 2005 traten am meisten Rutschungen in der sowohl bezüglich Längen- als auch Querprofil flachen Geländeform 5 auf (Abb. 4.7). An zweiter Stelle kommt im Prättigau 05 und im Napf 05 die Geländeform 6, im Entlebuch 05 die Form 8 vor. Auch die Untersuchungen der Ereignisse der Jahre 2002 und 1997 zeigen keine einheitlichen Ergebnisse: während in Sachseln 97 hauptsächlich die Geländeform 5 betroffen war, fanden die Rutschungen der Gebiete Napf 02 und Appenzell 02 zu unterschiedlichen Anteilen jeweils in den Formen 6, 8 und 9 statt.

Allen Untersuchungsgebieten gemeinsam ist die Tatsache, dass die Geländeformen 1, 4 und 7 selten bis nie vorkamen. Aussagen zum Einfluss der Geländeform auf die Rutschungsaktivität sind schwierig, da das flächenhafte Vorkommen der verschiedenen Geländeformen in den Untersuchungsgebieten nicht bekannt ist.

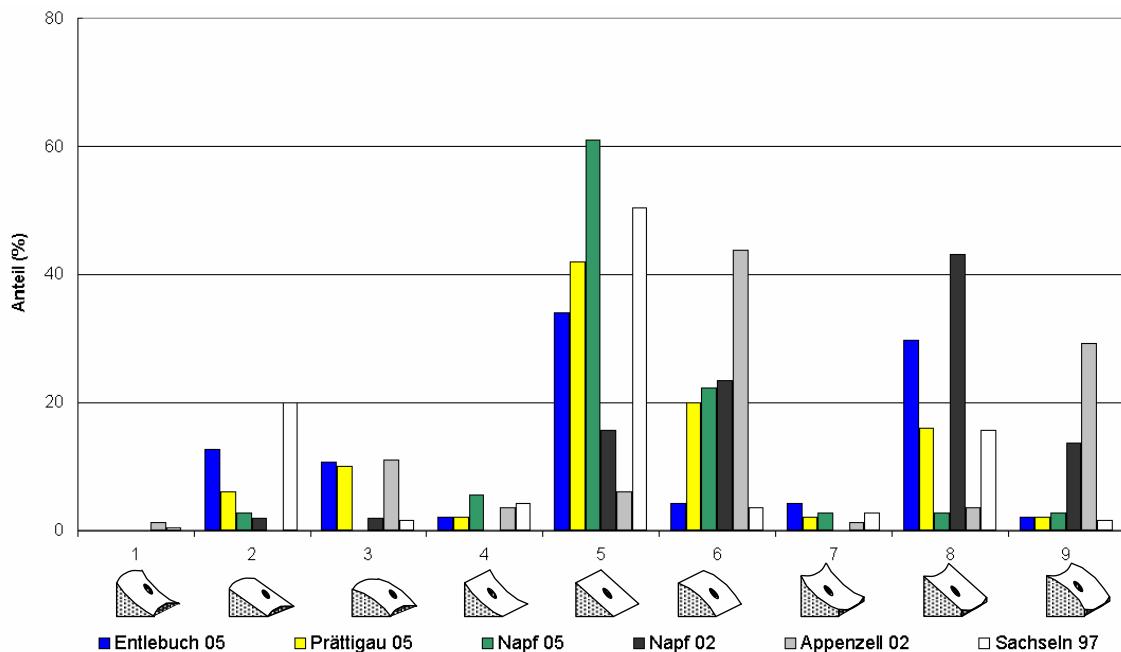


Abbildung 4.7: Anteil Rutschungen in den verschiedenen Geländeformen pro Untersuchungsgebiet.

4.4 Abmessungen der Rutschungen

Bei jeder Rutschung wurden jeweils die maximale Länge, Breite und Mächtigkeit der abgerutschten Fläche gemessen. Die Fläche der Rutschung wurde mittels Multiplikation einer der Rutschform entsprechenden mittleren Länge und Breite ermittelt. Multipliziert mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit ergab sich eine Schätzung für das abgerutschte Volumen. Durch abfließende Rutschmassen erodiertes Bodenmaterial unterhalb der Gleitfläche wurde nicht dem Rutschvolumen zugerechnet.

In Tabelle 4.5 sind die Werte für die Abmessungen der Rutschungen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten zusammenfasst. Es ist zu bemerken, dass durch die Einführung einer unteren Grenze für die Aufnahme der Rutschungen (Volumen grösser als 30 m^3) die Werte nicht normal, sondern schief verteilt sind (vgl. auch Abb. 4.9). Aus diesem Grund ist für die Beschreibung der Daten weniger der Mittelwert als vielmehr der Median zu berücksichtigen.

Allen Messungen gemeinsam ist die grosse Streubreite der Werte. Die Längen der Rutschungen variieren von 4.5 bis 116 m, die Breiten von 5.7 bis 68 m, die Mächtigkeiten von 0.3 bis 4.0 m, die Flächen von 35 bis 2600 m^2 und die Volumina von 30 bis 5443 m^3 . Gemäss Definition haben flachgründige Rutschungen eine mittlere Mächtigkeit von $\leq 2.0 \text{ m}$ (BRP, BWW, BUWAL 1997). Ausnahmsweise wurden einige, wenige Rutschungen erfasst, die mehr als 2.0 m Mächtigkeit haben. Diese grossen Rutschungen sind jedoch von der Auslösung (spontan) und dem Ablauf des Prozesses her betrachtet mit den übrigen Rutschungen vergleichbar.

Tabelle 4.5: Abmessungen der Rutschungen der drei Untersuchungsgebiete der Unwetter 2005 sowie der Rutschungen früherer Untersuchungen. Für die Länge, Breite und Mächtigkeit sind jeweils die maximalen Abmessungen pro Rutschung angegeben.

		Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Entlebuch (N=47)	Länge (m)	8.0	64.0	24.5	20.0	15.6	30.3
	Breite (m)	8.0	35.0	14.4	12.5	10.8	16.5
	Mächtigkeit (m)	0.6	3.5	1.5	1.3	1.0	1.8
	Fläche (m ²)	42	1400	275	198	126	367
	Volumen (m ³)	30	2800	331	158	86	378
Prättigau (N=50)	Länge (m)	6.5	116.0	25.8	22.5	13.6	31.0
	Breite (m)	6.0	44.0	15.5	13.5	10.1	18.0
	Mächtigkeit (m)	0.6	2.5	1.2	1.2	0.9	1.5
	Fläche (m ²)	35	2600	351	225	118	342
	Volumen (m ³)	32	2260	286	135	90	209
Napf 05 (N=36)	Länge (m)	7.0	41.0	18.1	15.3	12.0	20.3
	Breite (m)	7.5	68	18.1	15.0	10.8	20.3
	Mächtigkeit (m)	0.5	4	1.1	1	0.8	1.1
	Fläche (m ²)	52	2016	285	154	94	332
	Volumen (m ³)	31	5443	333	116	60	276
Napf 02 (N=51)	Länge (m)	7.5	40.0	17.8	17.0	13.5	21.8
	Breite (m)	6.5	36.5	14.1	12.0	10.0	16.0
	Mächtigkeit (m)	0.3	1.8	0.8	0.8	0.6	0.9
	Fläche (m ²)	54	750	184	160	112	223
	Volumen (m ³)	30	330	80	62	45	98
Appenzell 02 (N=82)	Länge (m)	4.5	71.0	19.5	16.3	12.5	24.4
	Breite (m)	6.0	62.0	16.0	13.8	10.0	16.8
	Mächtigkeit (m)	0.5	2.2	1.1	1.0	0.8	1.2
	Fläche (m ²)	45	1200	218	139	100	260
	Volumen (m ³)	32	1100	148	80	50	170
Sachsen 97 (N=256)	Länge (m)	6.0	105.0	21.1	18.8	13.7	21.2
	Breite (m)	5.7	49.0	14.1	12.7	9.9	16.0
	Mächtigkeit (m)	0.3	3.5	1.1	1.1	0.9	1.3
	Fläche (m ²)	50	1350	214	162	106	243
	Volumen (m ³)	30	2500	154	98	53	160

In Bezug auf die Abmessungen können allgemein nur wenig gesicherte Differenzen zwischen den Werteverteilungen der verschiedenen Untersuchungsperimeter festgestellt werden (Abb. 4.8):

- Breite: im Untersuchungsgebiet Napf 05 wurden vergleichsweise etwas breitere Rutschungen festgestellt.
- Länge, Fläche (nicht in Abb. 4.8) und Mächtigkeit: in den Gebieten Entlebuch und Prättigau wurden vergleichsweise grössere Werte und auch grössere Streuungen beobachtet. Napf 05: sehr flachgründige Rutschungen. Prättigau: bezüglich Fläche grössere Rutschungen.
- Volumen: für die Rutschungen der Gebiete Entlebuch, Prättigau und teilweise auch Napf 05 - also für die Ereignisse 2005 - wurden höhere Volumina pro Rutschung sowie auch eine grössere Wertestreuung als für die Rutschungen der Ereignisse 2002 und 1997 beobachtet.

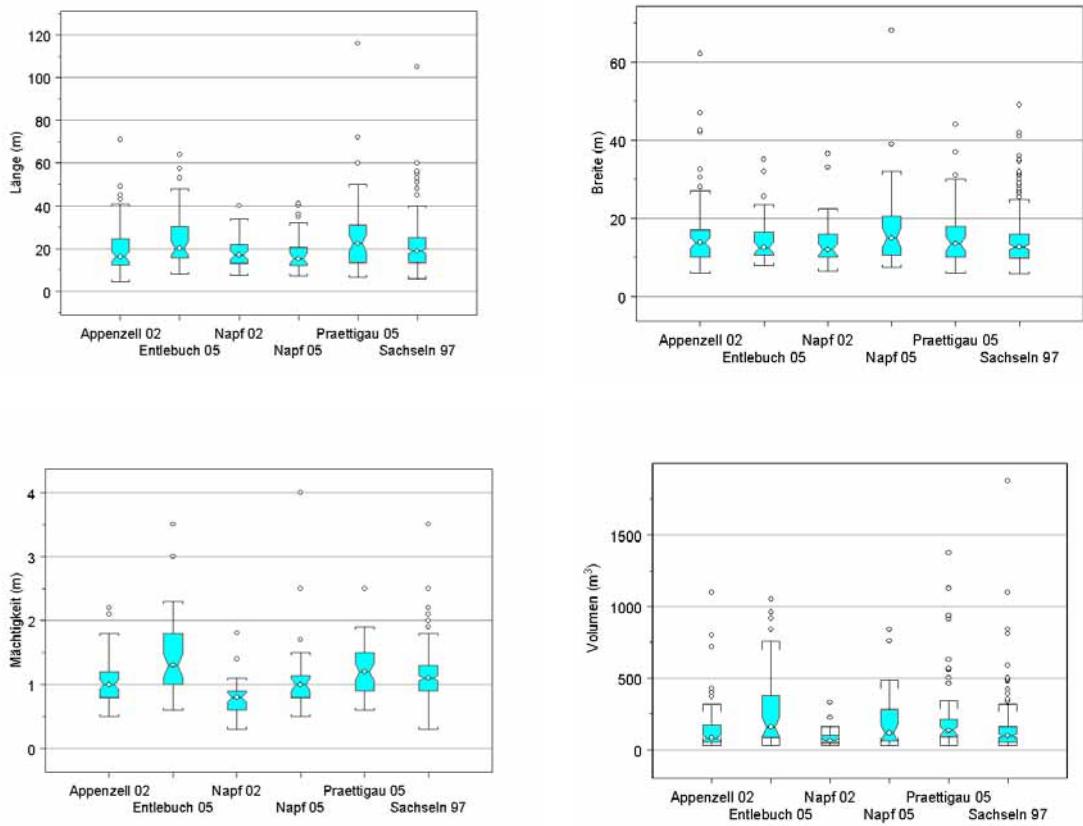


Abbildung 4.8: Streudiagramme der Ausmasse der Rutschungen der verschiedenen Untersuchungsgebiete. Oben links: maximale Länge (m), oben rechts: maximale Breite (m), unten links: maximale Mächtigkeit (m), unten rechts: geschätztes Volumen (m^3).

Die Anzahl Rutschungen pro Volumenklasse nimmt mit zunehmendem Volumen ab (Abb. 4.9 links). Rund zwei Drittel der Rutschungen von 2005 waren kleiner als $200 m^3$. Der Volumenanteil dieser Rutschungen bis $200 m^3$ am Gesamtvolumen von rund $41'000 m^3$ beträgt jedoch nur 20%. Abb. 4.9. rechts zeigt die unterschiedlichen Volumenverteilungen in den verschiedenen Untersuchungsperimetern als Frequenz-Magnitude-Darstellung. Auch diese Darstellung zeigt den Umstand auf, dass sich 2005 mehr Rutschungen mit grösseren Volumen ereigneten.

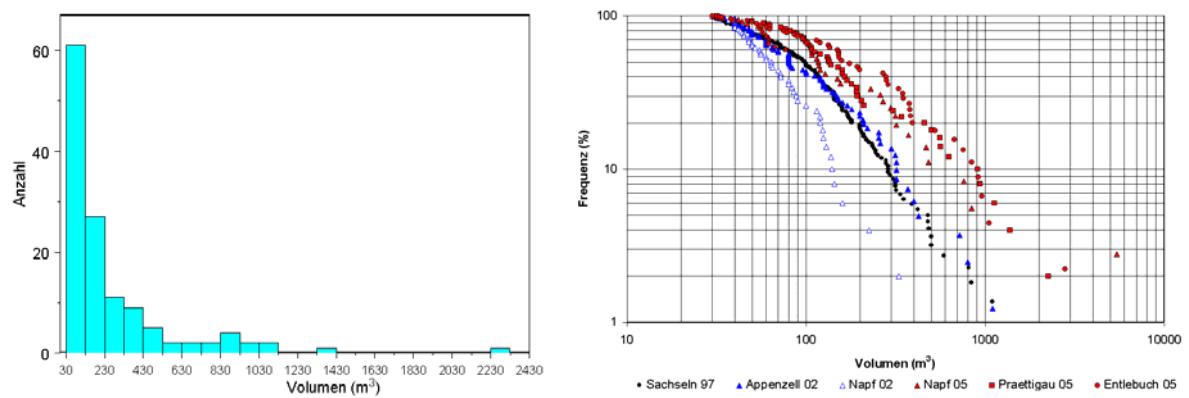


Abbildung 4.9: Volumenverteilung der Rutschungen. Linke Graphik: Vorkommen von Rutschungen 2005 (Entlebuch, Prättigau und Napf 05, n=133) pro Volumenklasse; rechte Graphik: Verteilung Frequenz-Magnitude (Volumen) in den sechs Untersuchungsperimetern.

Es scheint nahe liegend, dass in steileren Lagen eher kleinere Rutschungen entstehen. Dies ist auch aus den vorliegenden Daten ersichtlich (Abb. 4.10). Der Zusammenhang ist jedoch deutlich weniger stark als erwartet. Zu erkennen ist insbesondere die Tendenz, dass die maximalen Neigungen bei zunehmendem Volumen abnehmen. Für die Längen, Breiten und Mächtigkeiten sind analoge Tendenzen der Rutschungen zu sehen.

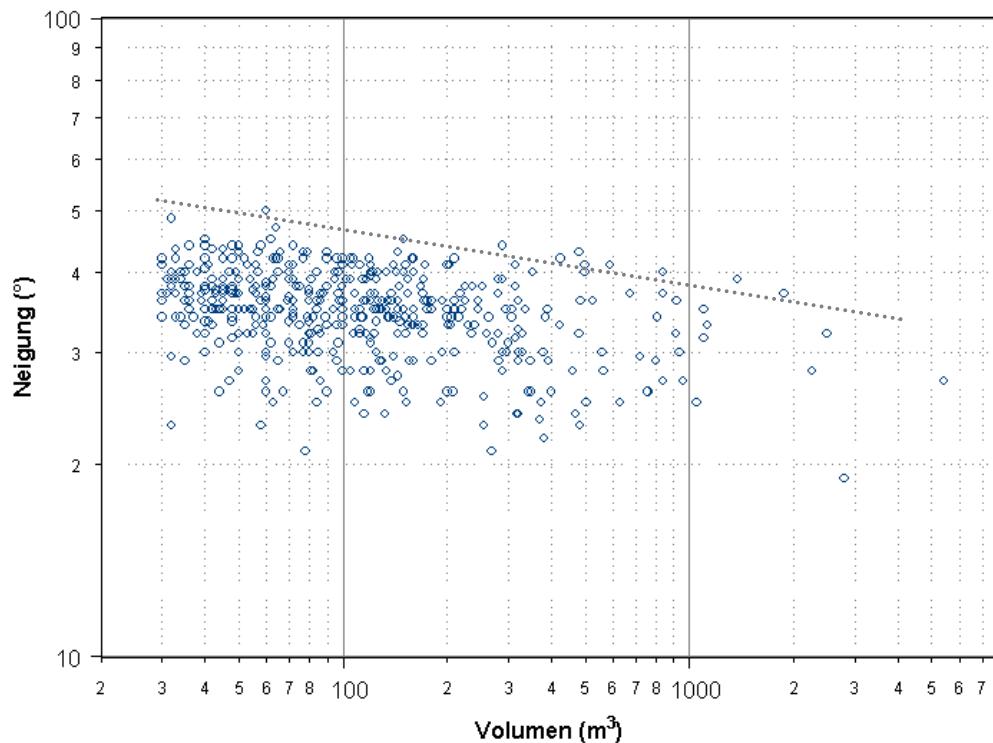


Abbildung 4.10: Volumen der Rutschungen in Abhängigkeit der Hangneigung ($N=522$) in doppelt logarithmischer Darstellung.

4.5 Geometrie der Rutschungen

Basierend auf den Ausmassen können verschiedene geometrische Aspekte der Rutschkörper berechnet werden. In Bezug auf die Form der Rutschfläche wurde das Verhältnis von Länge zu Breite bestimmt und jede Rutschung wurde den Kategorien "lang", "mittel" und "breit" zugeordnet. Weiter wurden im Zusammenhang mit der Tiefe der Gleitfläche das Verhältnis zwischen Mächtigkeit M des Rutschkörpers und der Länge L berechnet und die Rutschungen den Kategorien "tief", "mittel" und "flach" zugeordnet.

Insgesamt wurden mehr lange und mittlere und nur sehr wenig breite Rutschungen beobachtet (Tab. 4.6). In den Gebieten Appenzell und Napf 05 sind im Verhältnis mehr breite Rutschungen dokumentiert. In den Gebieten Entlebuch 05, Prättigau 05 und Sachseln 97 überwiegen die langen, in den Gebieten Napf 02, Napf 05 und Appenzell 02 die mittleren Rutschformen. Interessant fällt der Vergleich der beiden Perimeter der Region Napf aus: 2005 entstanden mehr breite und weniger lange Rutschungen als 5 Jahre zuvor.

In allen Untersuchungsgebieten wurden Rutschungen mit mittlerer Gründigkeit am häufigsten beobachtet. Flache und tiefe Rutschungen sind etwa gleich stark vertreten. Im Gebiet Napf 05 wurden verhältnismässig mehr tiefgründige Rutschungen und im Gebiet Napf 02 mehr flachgründige beobachtet.

Tabelle 4.6: Anzahl und Anteil Rutschungen in den verschiedenen Geometrie-Kategorien pro Untersuchungsperimeter. L = Länge, B = Breite, M = Mächtigkeit. Bei einigen Rutschungen konnten keine Angaben zur Mächtigkeit erhoben werden (verbaute Rutschungen): zwei Rutschungen im Perimeter Entlebuch 05, eine im Perimeter Napf 02, eine im Perimeter Appenzell 02 und 36 im Perimeter Sachseln 97.

	Form			Gründigkeit		
	"lang" L/B \geq 1.4	"mittel" 0.7 < L/B < 1.4	"breit" L/B \leq 0.7	"tief" M/L > 0.08	"mittel" 0.08 < M/L < 0.04	"flach" M/L < 0.04
Entlebuch 05 (N=47/45)	27 (57%)	20 (43%)	0 (0%)	9 (20%)	30 (67%)	6 (13%)
Prättigau 05 (N=50)	29 (58%)	18 (36%)	3 (6%)	13 (26%)	20 (40%)	17 (34%)
Napf 05 (N=36)	6 (17%)	22 (61%)	8 (22%)	11 (31%)	19 (53%)	6 (16%)
Napf 02 (N=51/50)	19 (37%)	28 (55%)	4 (8%)	6 (12%)	24 (48%)	20 (40%)
Appenzell 02 (N=82/81)	32 (39%)	38 (46%)	12 (15%)	23 (28%)	38 (47%)	20 (25%)
Sachseln 97 (N=256/220)	131 (51%)	108 (42%)	17 (7%)	43 (20%)	120 (55%)	57 (26%)
Total (N=522/482)	244 (47%)	234 (45%)	44 (8%)	105 (22%)	251 (52%)	126 (26%)

4.6 Vegetation

4.6.1 Wald und Freiland

Für jede Rutschung wurde festgehalten, ob sie im Wald oder im Freiland entstanden war. Im Bereich des Waldrandes war die Zuordnung zum Teil schwierig. Entscheidend war jedoch die Lage des oberen Anrissrandes. Besonders schwierig war der Entscheid im Untersuchungsgebiet Prättigau, da dort grosse, einwachsende Flächen mit unregelmässigen und aufgelösten Waldrändern vorkommen. Bei der Auswertung und Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass mit dem Wechsel von Wald zu Nichtwald oder auch mit einem Wechsel der Nutzung im Freiland oft auch Änderungen hinsichtlich anderer Standortsfaktoren (z.B. Neigung) einhergehen.

Nachfolgend werden die Vegetationsklassen Wald und Freiland hinsichtlich folgender Aspekte einander gegenüber gestellt:

- Anzahl Rutschungen pro Quadratkilometer
- Neigungsverhältnisse bei den Rutschungen
- Abmessungen

Im Rahmen des Projektes sollte unter anderem auch der Einfluss der Vegetation, d.h. beispielsweise des Waldes auf die Auslösung von Rutschungen untersucht werden. Als Mass für diesen Einfluss dient bei den nachfolgenden Auswertungen die Anzahl Rutschungen pro Fläche im Wald bzw. im Freiland. Sinnvollerweise werden dabei nur jene Flächen innerhalb der Perimeter berücksichtigt, auf denen von der Neigung her Rutschungen entstehen können, d.h. Flächen mit Neigungen von 20 bis 50°.

Zunächst ist festzustellen, dass Rutschungen sowohl im Wald wie auch im Nichtwald stattfinden. Abgesehen vom Perimeter Prättigau 05 entstanden jedoch in allen Untersuchungsgebieten im Nichtwald mehr Rutschungen pro km² als im Wald - in den Gebieten Entlebuch 05 und Napf 05 sogar um nahezu das Doppelte (Abb. 4.11). Mögliche Gründe für die ausserordentlich vielen Hangprozesse im Wald des Perimeters Prättigau 05 sind ungünstige geologische Verhältnisse sowie schlechter Waldzustand (starke Beweidung, viele Lücken, vgl. Kap. 4.6.3). Auch im Ge-

bietet Napf 05 ist der Zustand des Waldes, namentlich die zahlreichen Sturmschadenflächen, bei der Interpretation zu berücksichtigen.

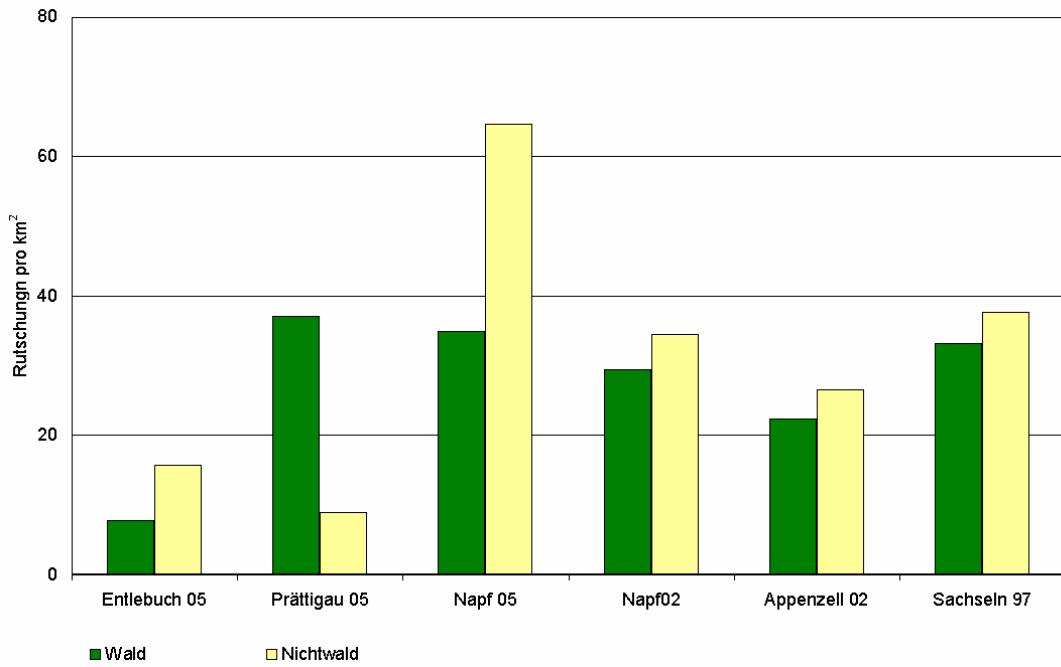


Abbildung 4.11: Anzahl Rutschungen pro km^2 im Wald und im Freiland der verschiedenen Untersuchungsgebiete. Bei der Berechnung wurden nur Flächen mit Neigungen von 20 bis 50° einbezogen, d.h. "rutschfähig" gemäss Kap. 4.3.3.

Die bewaldeten Gebiete sind im Durchschnitt steiler als die Flächen im Freiland. Gemäss Auswertungen über alle bisher untersuchten Perimeter sind im Wald ungefähr 75% der Fläche steiler als 20° und im Freiland nur 40 % (Abb. 4.12 links).

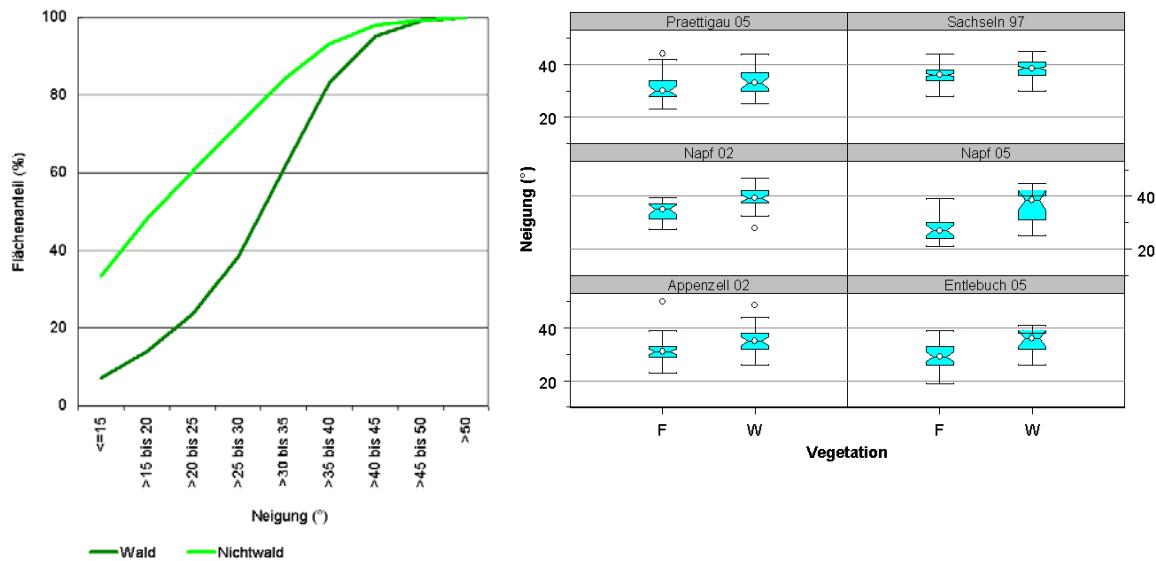


Abbildung 4.12: Linke Graphik: Summationskurve der Neigungen im Wald und im Freiland für alle sechs Perimeter 1997 bis 2005. Rechte Graphik: Kistendiagramme der Neigungswerte bei den Wald- bzw. Freilandrutschungen für verschiedene Untersuchungsperimeter (W = Wald, F = Freiland).

Eine weitere Auswertung zu den Neigungen bei den Rutschungen zeigt, dass in allen Perimetern die Neigungen bei den Waldrutschungen um 2 bis 5° steiler sind als bei den Freilandrutschungen.

gen (Abb. 4.12 rechts). In fünf Perimetern ist diese Differenz signifikant (p-Wert < 0.05, Wilcoxon Rangsummentest), im Perimeter Prättigau knapp nicht (Rickli und Graf, in Vorber.).

In allen Perimetern kann beobachtet werden, dass sich die flachsten dokumentierten Rutschungen jeweils im Freiland ereigneten (Tab. 4.7). Die Neigungen, welche von 90 % bzw. 80% aller Rutschungen in den verschiedenen Perimetern überschritten wurde, sind im Wald jeweils um 2 bis 6° steiler als im Freiland.

Tabelle 4.7: Angaben zum Wald- und Nichtwaldareal der verschiedenen Untersuchungsperimeter sowie zu den dort entstandenen Rutschungen: Anzahl Rutschungen, Gesamtfläche Untersuchungsperimeter, Fläche im Neigungsbereich von 20 bis 50°, geringste beobachtete Neigung sowie Neigung, welche bei 90 bzw. 80% der Rutschungen überschritten wurde (d.h. 90 bzw. 80% aller Rutschungen sind steiler als der angegebene Wert). N = Anzahl Rutschungen.

Untersuchungsperimeter	Wald						Nichtwald					
	N	Fläche (km ²)	Fläche 20-50° (km ²)	min. Neigung (°)	Neig. 90%	Neig. 80%	N	Fläche (km ²)	Fläche 20-50° (km ²)	min. Neigung (°)	Neig. 90%	Neig. 80%
Entlebuch 05	10	1.46	1.29	26	27	32	37	3.60	2.34	19	25	26
Prättigau 05	26	0.76	0.70	25	28	29	24	3.95	2.7	23	25	28
Napf 05	14	0.47	0.40	25	26	31	22	1.14	0.34	21	23	24
Napf 02	30	1.21	1.02	28	35	37	21	1.26	0.61	27	30	31
Appenzell 02	34	2.29	1.52	26	30	32	48	7.93	1.81	23	26	28
Sachsels 97	126	4.13	3.80	30	35	36	130	4.07	3.45	28	32	34

Hinsichtlich der Ausmasse wie Länge, Breite, Mächtigkeit, Fläche und Volumen sind generell nur geringe und zum Teil je nach Perimeter unterschiedliche Differenzen zwischen Wald- und Freilandrutschungen festzustellen. In den Gebieten Napf 02, Napf 05 und Appenzell umfassen die Freilandrutschungen mehr Volumen als Waldrutschungen (signifikant auf 5%-Niveau, Abb. 4.13). In den Gebieten Prättigau und Entlebuch ist kein Unterschied festzustellen und im Gebiet Sachsels sind die Rutschungen im Wald signifikant grösser.

Im Freiland sind die Streuungen der Werte oftmals grösser, da sich dort viele der ganz grossen Rutschungen befinden. Der Perimeter Sachsels bildet diesbezüglich eine Ausnahme. Bezüglich der Mächtigkeit sind keine Unterschiede zwischen Wald- und Freilandrutschungen festzustellen mit Ausnahme, dass Waldrutschungen im Prättigau flachgründiger und in Sachsels tiefgründiger sind. Bei allen übrigen Ausmassen sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

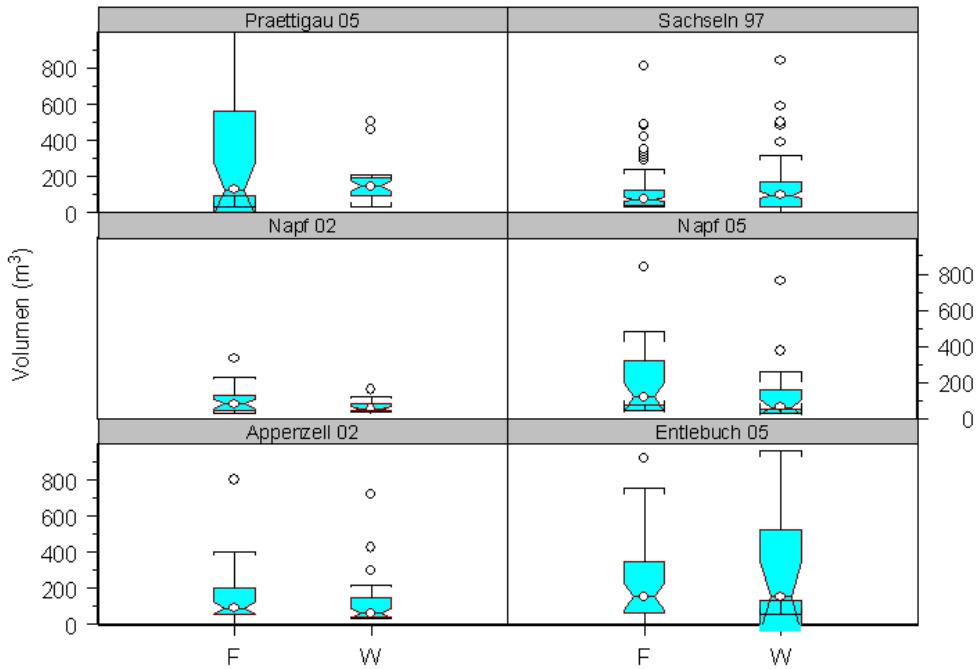


Abbildung 4.13: Volumen von Wald- und Nichtwaldrutschungen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten. W = Wald, F = Freiland.

4.6.2 Nutzung Freiland

Im Freiland wurde unterschieden zwischen (i) Wiesen, welche zumindest periodisch gemäht werden, (ii) mehrheitlich beweideten Flächen und (iii) Freiland-Flächen, welche im Begriff sind, zu Wald einzuwachsen. Von den 83 Rutschungen im Freiland der drei Untersuchungsgebiete von 2005 liegen 63 in Weiden und 17 in Mähwiesen (Tab. 4.8). Drei Flächen wurden seit einiger Zeit nicht mehr landwirtschaftlich genutzt und sind im Begriff einzuwachsen. Die Untersuchungen der Ereignisse in den Gebieten Napf und Appenzell von 2002 zeigten ähnliche Resultate. Die Werte für den Perimeter Sachseln sind nicht aufgeführt, da damals andere Nutzungskategorien verwendet wurden und die Zahlen somit nicht mit jenen späterer Erhebungen vergleichbar sind.

Tabelle 4.8: Nutzungsarten sowie Mittelwerte der Hangneigungen bei den Rutschungen im Freiland. Für Sachseln 1997 keine entsprechenden Daten vorhanden.

	Weide			Wiese			Einwuchs		
	Anzahl	%	Neigung°	Anzahl	%	Neigung°	Anzahl	%	Neigung°
Entlebuch 2005	34	92	29°	3	8	28°	0	0	-
Prättigau 2005	17	71	31°	4	17	32°	3	12	34°
Napf 2005	12	55	27°	10	45	28°	0	0	-
Napf 2002	20	95	34°	0	0	-	1	5	38°
Appenzell 2002	38	79	32°	7	15	30°	3	6	28°

Weder in Bezug auf die Ausmasse noch in Bezug auf die Neigungsverhältnisse konnten signifikante Unterschiede zwischen den Rutschungen in den verschiedenen Nutzungsarten festgestellt werden. Zu gross sind die Streuungen und zu einseitig sind die Rutschungen verteilt. Oft wurden auf Weiden deutliche Spuren der Beweidung beobachtet: in Hanglagen häufig Trittbermen, auf feuchten und vernässten Böden Trittsiegel oder -löcher.

Die Tatsache, dass im Anrißbereich der Rutschungen Weideflächen gegenüber Mähwiesen deutlich dominieren, ist ein Hinweis darauf, dass im Freiland die steileren Gebiete, d.h. dort wo

am ehesten Rutschungen entstehen können, in der Regel extensiv genutzt werden (Abb. 4.14). Der Einfluss der Nutzung auf das Vorkommen von Rutschungen lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht quantifizieren, da keine Angaben über die Flächenausdehnung der verschiedenen Nutzungsformen in Form von Nutzungskarten bestehen.



Abbildung 4.14: Rutschung in der Region Entlebuch, welche im August 2005 im steilen, beweideten Gebiet entstanden waren. Oft sind Nutzungsänderungen durch Standortsverhältnisse (insbesondere Neigungen) bedingt.

4.6.3 Informationen zum Wald

Im Gegensatz zum Freiland wurde bei Rutschungen im Wald nicht die aktuelle Nutzung der Waldflächen beurteilt, sondern verschiedene Aspekte des Waldzustandes. Nachfolgend werden (i) Informationen dargestellt zu den Bestandescharakteristika in der unmittelbaren Umgebung der Wald-Rutschungen sowie (ii) allgemeine Beobachtungen wiedergegeben zum Wald in den Untersuchungsgebieten.

Bestandescharakteristika

Bei jeder Waldrutschung wurde eine einfache Bestandesbeschreibung durchgeführt und dabei die Bestandesstruktur (vertikaler Aufbau des Bestandes), die Entwicklungsstufe (Bestandesalter, resp.- Klassierung aufgrund des Stammdurchmessers), die Baumartenmischung sowie der Deckungsgrad (Kronen-Projektionsfläche in % der Gesamtfläche) erfasst. Die Bestandesbeschreibung erlaubt grobe Rückschlüsse auf die frühere Nutzung und Bewirtschaftung des Waldes. Es erfolgte jedoch keine quantitative Auswertung von Bestandescharakteristika (z.B. anhand von Bestandeskarten), da die entsprechenden Unterlagen nicht für alle Perimeter in der gleichen Art zur Verfügung stehen. Deshalb kann leider auch keine Aussage gemacht werden, ob und wie sich bestimmte Bestandescharakteristika auf das Vorkommen der flachgründigen Rutschungen ausgewirkt haben. Nachfolgend sind aus Tabelle 4.9 einige Ergebnisse der Bestandesbeurteilungen bei den Rutschungen zusammengefasst:

- Bestandesstruktur: Während im Perimeter Entlebuch hauptsächlich ein- und mehrschichtige Bestände vorherrschen, sind im Perimeter Prättigau vor allem stufige und im Perimeter Napf einschichtige und stufige Bestände stark vertreten. Hinweise: 1) im höher gelegenen Perimeter Prättigau herrschen natürlicherweise aufgrund der Höhenlage eher stufige Bestände vor; 2) die Plenterbewirtschaftung im Perimeter Napf fördert stufige Strukturen.
- Entwicklungsstufen: Im Perimeter Entlebuch wurden bei den Rutschungen viele Bestände in den Stufen Baumholz 2 und 3 festgestellt, in den Perimetern Prättigau und Napf kommen alle Stufen vor.
- Baumartenmischung: Im Perimeter Prättigau ist das Nadelholz besonders stark vertreten, was jedoch aufgrund der Höhenlage des Perimeters nicht erstaunt. Insgesamt sind in allen Perimetern bei den Rutschungen nur sehr wenige Laubholzbestände beobachtet worden.
- Kronenschluss: In den Perimetern Napf und Prättigau wurden die Bestände bei 40 bis 50% der Rutschungen als lückig oder aufgelöst beurteilt, im Perimeter Entlebuch nur bei 11%. Dieses Resultat dürfte im Gebiet Napf teilweise durch Streuwürfe (Lothar) und im Gebiet Prättigau durch die Gebirgswaldstruktur begründet sein (Abb. 4.15).

*Tabelle 4.9: Bestandescharakteristika bei den Wald-Rutschungen 2005. Beurteilt wurden die Bestandesparameter Bestandesstruktur, Entwicklungsstufe, Baumartenmischung und Deckungsgrad. * BHD = Brusthöhendurchmesser; a) eine Rutschung im Entlebuch ohne Angaben.*

		Anzahl Rutschungen (Prozent) pro Perimeter			
		Entlebuch a)	Prättigau	Napf	Total
Bestandesstruktur	unbestockte Flächen	1 (11%)	0	0	1 (2%)
	einschichtige Bestände	3 (33%)	10 (38%)	7 (50%)	20 (41%)
	mehrschichtige Bestände	4 (44%)	0	1 (7%)	5 (10%)
	stufige Bestände	1 (11%)	16 (62%)	6 (43%)	23 (47%)
Entwicklungsstufe	unbestockte Flächen	1 (11%)	0	0	1 (2%)
	Jungwuchs/Dickung	0	5 (19%)	2 (14%)	7 (14%)
	Stangenholz	0	5 (19%)	0	5 (10%)
	Baumholz I (BHD* 30-40 cm)	0	2 (8%)	1 (7%)	3 (6%)
	Baumholz II (BHD* 40-50cm)	4 (44%)	3 (12%)	2 (14%)	9 (18%)
	Baumholz III (BHD* > 50 cm)	3 (33%)	2 (8%)	5 (36%)	10 (20%)
	stufige Bestände	1 (11%)	9 (35%)	4 (29%)	14 (29%)
Baumartenmischung	unbestockte Flächen	1 (11%)	0	0	1 (2%)
	> 80% Nadelholz	4 (44%)	20 (77%)	7 (50%)	31 (63%)
	Mischbestand	4 (44%)	3 (12%)	5 (36%)	12 (24%)
	>80% Laubholz	0	3 (12%)	2 (14%)	5 (10%)
Kronenschluss	unbestockt bzw. Jungwuchs	1 (11%)	0	0	1 (2%)
	gedrängt (Deckungsgrad 90%)	2 (22%)	2 (8%)	0	4 (8%)
	normal (Deckungsgrad 80%)	3 (33%)	5 (19%)	2 (14%)	10 (20%)
	locker (Deckungsgrad 60%)	2 (22%)	8 (31%)	5 (36%)	15 (31%)
	lückig Deckungsgrad 40%)	1 (11%)	9 (35%)	4 (29%)	14 (29%)
	aufgelöst (Deckungsgrad 20%)	0	2 (8%)	3 (21%)	5 (10%)
Total		9 (100%)	26 (100%)	14 (100%)	49 (100%)

Allgemeine Beobachtungen und Informationen zum Wald in den Untersuchungsgebieten
 Entlebuch: Die Waldfläche ist stark zerstückelt. In den vorratsreichen Beständen wurde in den letzten Jahren vielerorts nur mässig eingegriffen. Auch hier herrscht vor allem die Fichte vor.

Entlang der zahlreichen Runsen trifft man häufig Mischbestände an. Es existieren einige Schadenflächen durch Borkenkäfer als Folge des Sturmes Lothar.



Abbildung 4.15: Rutschung in einer Waldlücke mit Spuren der Beweidung. Die Bestockung ist stufig und rottenförmig aufgebaut. Perimeter Prättigau, ca. 1800 m ü.M.

Prättigau: Der Wald im Perimeter Prättigau ist geprägt durch die Höhenlage und das Klima. An der Waldgrenze ist das Bestandesgefüge grösstenteils rottenförmig. Einen beachtlichen Teil des Waldes machen Aufforstungsflächen aus. In den meist reinen Fichtenbeständen wurde seit jeher nur schwach eingegriffen. Die vordringlichste Aufgabe des Waldes besteht in der Abwehr von Naturgefahren (Lawinen, Rutschungen usw.).

Tabelle 4.10: Bemerkungen zu den Waldrutschungen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten.

Perimeter	Anzahl Wald-Rutschungen	Bemerkungen
Entlebuch 05	10	davon 3 Rutschungen in Schadenflächen (Borkenkäfer)
Prättigau 05	26	davon 13 Rutschungen mit Anzeichen von z.T. starker Beweidung
Napf 05	14	davon 10 Rutschungen in Windwurfflächen

Napf: Das Waldbild ist geprägt durch die Plenterbewirtschaftung. Die Bestände sind meist stufig und vorratsreich; Linde und Fichte dominieren. Auffallend viele Anbruchstellen von Rutschungen befinden sich in Sturmflächen. Um diese Beobachtung zu quantifizieren wurden die Sturmschadenflächen kartiert und die Anzahl Rutschungen pro Flächeneinheit berechnet (Tab. 4.11). Tatsächlich lässt sich in diesen Flächen eine starke Konzentration von flachgründigen Rutschungen nachweisen. Nach Abzug der Sturmflächen und der dazugehörigen Rutschungen entstanden im Wald nur noch 10 Rutschungen pro km^2 gegenüber von 30 Rutschungen pro km^2 in der gesamten Waldfläche.

Tabelle 4.11: Untersuchungsperimeter Napf 2005: Anzahl Rutschungen pro km^2 im Freiland, Wald sowie in Windwurf-Schadenflächen. * zusammengesetzt aus 0.01 km^2 Totalschadenflächen und 0.05 km^2 Teilschadenflächen.

Napf 2005	Anzahl Rutschungen	Fläche (km^2)	Rutschungen pro km^2
Freiland	22	1.1	20
Wald	4	0.4	10
Sturmflächen	10	0.06 *	167
Gesamt	36	1.6	23

4.7 Hydrologie

4.7.1 Oberflächenhydrologie

Oftmals werden vernässte Standorte als besonders rutschungsempfindlich taxiert. Um diese Annahme zu überprüfen, erfolgte auf einer Fläche von ungefähr 20 mal 50 m über dem Anrissrand der Rutschung eine Beurteilung der hydrologischen Standortseigenschaften. Die Standorte wurden aufgrund der Vegetation (Zeigerpflanzen) sowie aufgrund der aktuellen Feuchtebedingungen in die zwei sehr groben Kategorien "frisch/feucht" und "vernässt" eingeteilt. Es ist zu bemerken, dass die Ansprache der hydrologischen Verhältnisse jeweils ein bis maximal vier Monate nach dem Unwetterereignis erfolgte.

Die meisten Rutschungen wurden als frisch/feucht beurteilt. In den verschiedenen Perimetern wurden bis maximal 15% der Rutschungen auf vernässten Standorten ausgelöst (Tab. 4.12). Dem entsprechend kamen auch nur an wenigen Orten Nässe-Zeigerpflanzen im Bereich des Anrisses vor. Dabei handelte es sich grösstenteils um Schachtelhalme und Binsen. Im Freiland sind vernässte Standorte etwas häufiger als im Wald.

Tabelle 4.12: Hydrologische Verhältnisse bei den Rutschungen. Fehlende Angaben (-): Bei der Untersuchung Sachseln wurden keine Angaben zu Nässezeigern und dem Einzugsgebiet erhoben und in den Gebieten Napf 02 und Appenzell 02 sind keine Angaben zum Einzugsgebiet verfügbar.

		Entlebuch 05	Prättigau 05	Napf 05	Napf 02	Appenzell 02	Sachseln 97
Standort	frisch/feucht	40 (85%)	44 (88%)	34 (94%)	45 (88%)	82 (100%)	247 (96%)
	nass	7 (15%)	6 (12%)	2 (6%)	6 (12%)	0 (0%)	9 (4%)
Nässe-zeiger	nein	38 (81%)	37 (74%)	10 (28%)	45 (88%)	82 (100%)	-
	ja	9 (19%)	13 (26%)	26 (72%)	6 (12%)	0 (0%)	-
Ein-zugsge-biet	Verlustlage	10 (21%)	6 (12%)	5 (14%)	-	-	-
	Eintragslage	29 (62%)	37 (74%)	30 (83%)	-	-	-
	markante Eintragslage	8 (17%)	7 (14%)	1 (3%)	-	-	-

Im Weiteren wurde für die Ereignisse 2005 abgeschätzt, ob beim Rutschungsstandort besonders viel Oberflächenwasser zusammenfliessen konnte. Dies geschah aufgrund der Geländeform, bzw. anhand der Abschätzung der Grösse des potentiellen Einzugsgebietes oberhalb des Anrisses. Gemäss den vorliegenden Ergebnissen liegt der grösste Teil der Rutschungen (d.h. ca. 60 bis 80%) jeweils in Eintragslagen. Markante Eintragslagen waren ungefähr gleich häufig anzutreffen wie Verlustlagen.

4.7.2 Hydrogeologie und Hangwasser

Die hydrogeologischen Verhältnisse bzw. die Wasserführung in der Rutschfläche wurden mit einer zeitlichen Verzögerung von einem bis vier Monaten beurteilt und geben deshalb nicht direkt Hinweise auf die Wasserführung während der Unwetter. Zudem ist sie durch die aktuelle

Witterung beeinflusst. Die Wasserführung wurde ursprünglich in die vier Kategorien "keine", "keine, jedoch Merkmale sichtbar", "wenig" und "viel" eingeteilt, wobei für die folgende Auswertung die Kategorien "keine" und "keine, jedoch Merkmale sichtbar" zusammengefasst sind.

Zwischen den Perimetern bestehen erhebliche Unterschiede in Bezug auf die Wasserführung, insbesondere was den Anteil Rutschungen mit grosser Wasserführung betrifft. Dieser beträgt für die Perimeter Entlebuch und Prättigau ungefähr 50%, für die übrigen Gebiete 13 bis 26% (Abb. 4.16). Damit weisen die Rutschflächen der Rutschungen 2005 mit Ausnahme des Perimeters Napf 05 eine grössere Wasserführung auf als jene früherer Ereignisse, wobei zu bemerken ist, dass das Napfgebiet erst Anfang Dezember (nach langer Trockenheit) bearbeitet wurde.

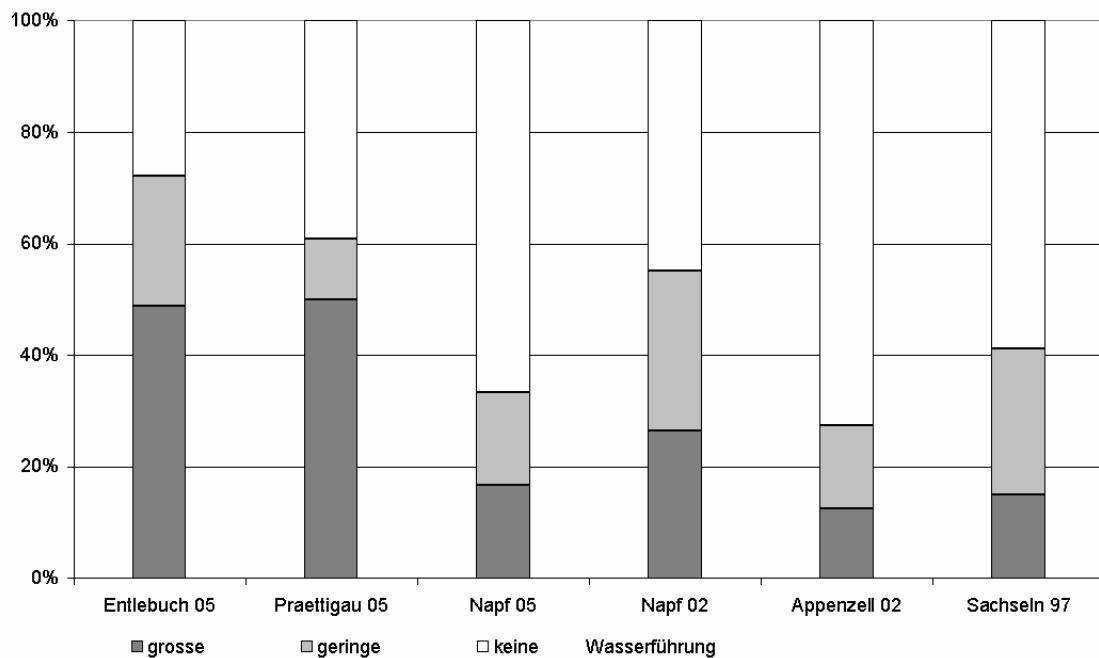


Abbildung 4.16: Wasserführung in den Rutschflächen.

4.8 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Im Bereich der Anrisszone wurde bei jeder Rutschung nach Hinweisen auf frühere Rutschbewegungen und Hanginstabilitäten gesucht. Dazu gehören primär Geländeformen wie Rutschmulden und Rutschbuckel sowie auch rezente, gut erkennbare Anrisse/Ablagerungen von Bewegungen, welche sich in den Jahren vor dem Sommer 2005 ereignet hatten. Weitere Anzeichen sind in Einzelfällen an den Gehölzen erkennbar (Säbelwuchs, Schiefstand) oder im Bodenprofil (z.B. überlagerte Humus-Horizonte, eingelagertes Holz). Säbelwuchs und Schiefstand sind teilweise weniger als Hinweise auf spontane, sondern mehr auf kontinuierliche Prozesse zu interpretieren. Im Weiteren wurde unterschieden zwischen klar erkennbaren, gesicherten Anzeichen oder vermuteten Spuren früherer Bewegungen. Rezente Spuren, welche nicht älter als etwa 10 bis 20 Jahre alt sind, wurden separat erfasst (diese Angaben wurden nur bei Rutschungen 2005 erhoben).

In allen Untersuchungsgebieten wurden bei der Mehrzahl der Rutschungen Anzeichen früherer Rutschbewegungen festgestellt (Abb. 4.17): für die Ereignisse 2005 und 1997 bei ungefähr 70 bis 85%, für die Ereignisse 2002 sogar bei 100% der Rutschungen. Die Anzeichen waren dabei mehrheitlich markant und wurden als gesicherte Hinweise auf frühere Aktivität interpretiert. Im Gebiet Entlebuch 05 wurden 3, in den Gebieten Prättigau 05 und Napf 05 je 13 rezente Anrisse in der Umgebung beobachtet.

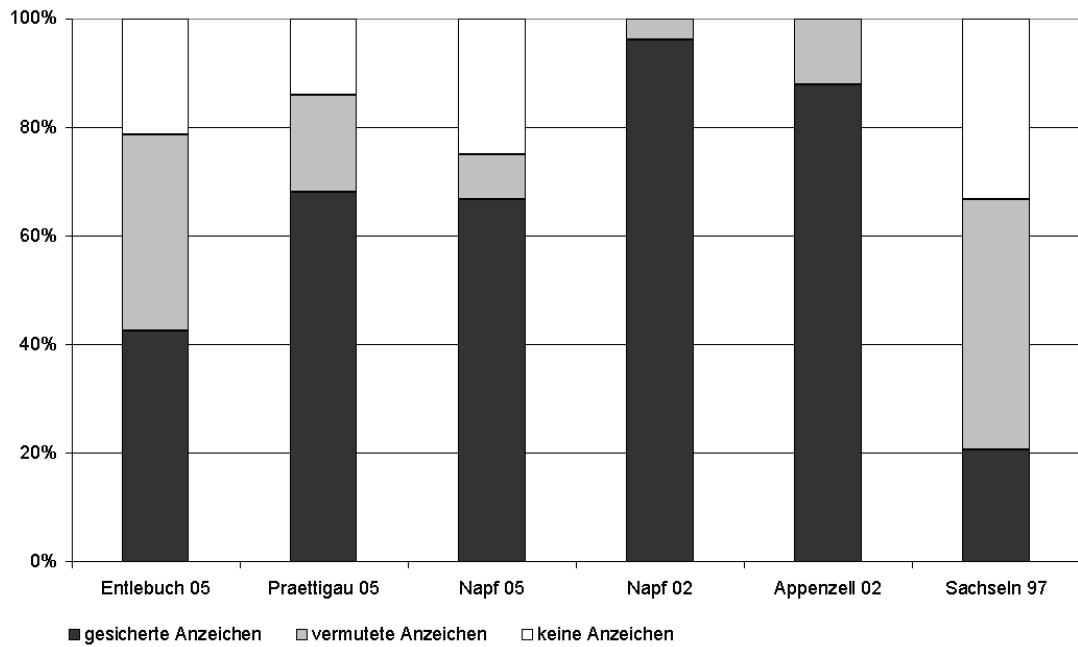


Abbildung 4.17: Anzeichen und Hinweise auf frühere Hanginstabilitäten in der Umgebung der Rutschungen.

Die häufigsten Indizien für frühere Rutschbewegungen waren in allen Perimetern Geländeformen wie Nischen und Buckel (Tab. 4.13). Dies war bei insgesamt 191 von 266 Rutschungen (72%) der Ereignisse 2005 und 2002 der Fall. Vereinzelt wurden weitere Anzeichen wie z.B. alte Anrisse, Hangverbauungen oder Säbelwuchs im Bestand festgestellt. Von aussen (z.B. im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung) nicht sichtbar sind Anzeichen früherer Bewegungen im Boden: überdeckte Horizonte oder Holz im Boden.

Tabelle 4.13: Anzeichen früherer Rutschbewegungen in der näheren Umgebung der aktuellen Rutschungen. Für die Untersuchung Sachseln 1997 stehen keine vergleichbaren Angaben zur Verfügung. ¹ durch Rutschmaterial von oberhalb überdeckter Bodenhorizont (meist Humushorizont) im Bodenprofil.

Art der Anzeichen	Entlebuch 2005	Prättigau 2005	Napf 2005	Napf 2002	Appenzell 2002	Total
ohne Anzeichen	10	7	9	0	0	26
Nischen/Buckel	27	30	16	39	79	191
alte Anrisse	2	5	7	11	1	26
Säbelwuchs	4	2	-	1	2	9
Holz in Rutschung	3	-	-	-	-	3
überdeckter Bodenhorizont ¹	-	4	2	-	-	6
alte Verbauungen	-	2	2	-	-	4
andere	1	-	-	-	-	1
Total	47	50	36	51	82	266

4.9 Geologie

4.9.1 Festgestein

Wo das Festgestein in der Rutschfläche aufgeschlossen war, wurde es den in Tabelle 4.14 aufgeführten Gesteinen zugeordnet. Bei ungefähr der Hälfte der Rutschungen von 2005 und bei etwa 80% der Rutschungen von 2002 war das Festgestein aufgeschlossen und demzufolge eine Zuordnung möglich.

Es ist nahe liegend, dass das Vorkommen der verschiedenen Gesteine die entsprechenden geologischen Verhältnisse in den Untersuchungsperimetern (vgl. Kap. 2.1) widerspiegelt. Die Perimeter Napf 05 und Napf 02 liegen unweit voneinander in der flachliegenden, mittelländische Molasse. Nagelfluh und Wechsellagerungen mit Nagelfluh, Sandstein und Mergel herrschen vor. Im Gebiet Napf 02 kommen vergleichsweise häufiger Wechsellagerungen mit Nagelfluh und Mergel sowie Wechsellagerungen mit Nagelfluh und Sandstein vor. Die Perimeter Entlebuch 05 und Appenzell 02 liegen ebenfalls in der Molasse, welche dort jedoch schief gestellt ist. Während im Gebiet Entlebuch ungefähr die gleichen Gesteine wie im Gebiet Napf vorkommen, fehlt im Gebiet Appenzell die Nagelfluh vollständig. Sandstein macht dort den grössten Anteil aus. Er kommt zu einem kleineren Anteil auch in Wechsellagerung mit Mergel vor. Der Perimeter Prättigau 05 unterscheidet sich von den anderen Untersuchungsgebieten deutlich, indem dort der Prättigau-Flysch vorkommt und in den Rutschungen teilweise auch aufgeschlossen ist. Die Gesteine sind dort Sandkalke bis Kieselkalke (teilweise geschiefer) mit Lagen von Mergelschiefern (Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000).

Tabelle 4.14: Festgestein in den Rutschflächen der Untersuchungsperimeter 2002 und 2005, ohne Sachseln 97. Die Angaben von Sachseln sind nicht aufgeführt, da es sich um eine deutlich andere Geologie handelt. N = Anzahl Rutschungen.

Festgestein	Entlebuch 05		Prättigau 05		Napf 05		Napf 02		Appenzell 02	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Nagelfluh (N)	6	13	0	0	9	25	15	29	0	0
Sandstein (S)	3	6	0	0	2	6	2	4	37	45
Mergel (M)	2	4	0	0	1	3	0	0	9	11
Flysch (F)	0	0	23	46	0	0	0	0	0	0
Wechsllagerung N-M	0	0	0	0	2	6	8	16	0	0
Wechsllagerung N-S	3	6	0	0	2	6	10	20	0	0
Wechsllag. N-S-M	1	2	0	0	0	0	3	6	0	0
Wechsllagerung S-M	7	15	0	0	5	14	2	4	19	23
nicht aufgeschlossen	21	45	24	48	15	42	11	21	17	21
keine Angabe	4	9	3	6	0	0	0	0	0	0
Total	47	100	50	100	36	100	51	100	82	100

Es stellt sich nun die Frage, ob sich die Eigenschaften des Festgesteins auf bestimmte Merkmale der Rutschungen auswirken. Um dies zu untersuchen, wurden die vorkommenden Gesteine in folgende Klassen zusammengefasst:

- "kalk": ± massive Kalkgesteine (kommen praktisch nur in Sachseln vor)
- "tsm": Ton-/Siltsteine, Mergel sowie Wechsllagerungen mit Ton-, Siltstein und Mergel
- "kongl": Konglomerate: Nagelfluh, Sandsteine

Die Klassierung basiert auf der Hypothese, dass aus feinkörnigen Ausgangsgesteinen Verwitterungsprodukte mit geringer Festigkeit entstehen. Abb. 4.18 zeigt den Zusammenhang zwischen den Gesteinsklassen und den vorherrschenden Hangneigungen auf. Die Ergebnisse sind wenig aussagekräftig. In vier von sechs Perimetern entstanden die Rutschungen auf Konglomeraten in vergleichsweise steileren Gebieten (Ausnahme: Entlebuch). Im Perimeter Sachseln liegen die Rutschungen im Kalk in steileren Gebieten als die Rutschungen mit feinkörnigen Ausgangsgesteinen.

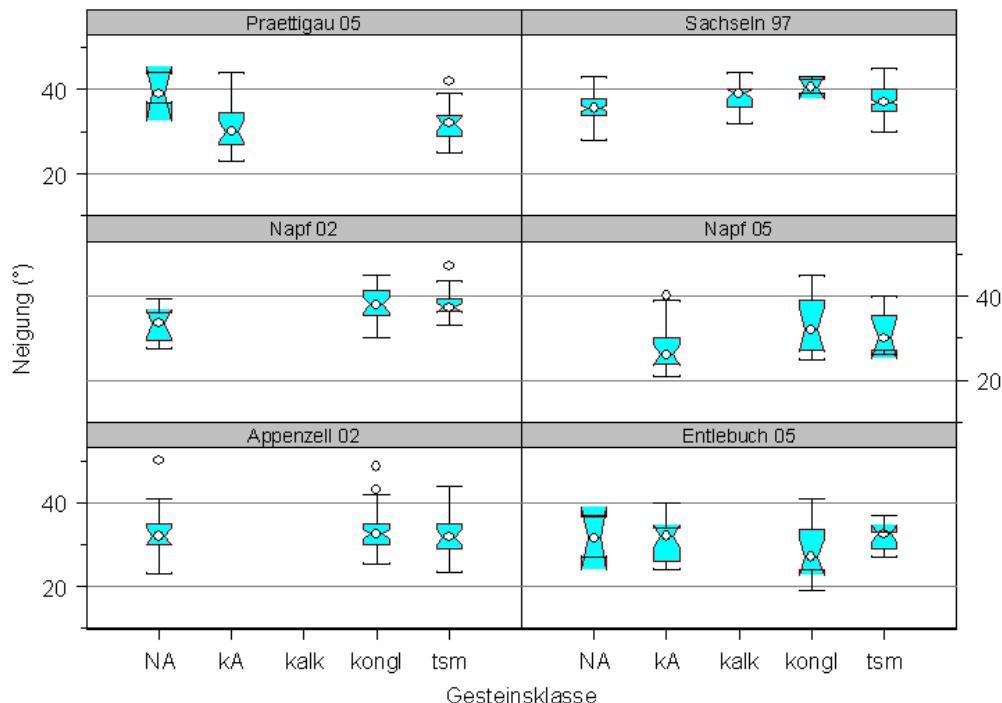


Abbildung 4.18: Kistendiagramme für die Neigungen bei den Rutschungen in den verschiedenen Gesteinsklassen. NA = nicht aufgeschlossen, kA = keine Angaben zur Geologie, kalk = Kalke, kongl = Konglomerate Nagelfluh, Sandsteine, tsm = Ton-/Siltsteine, Mergel sowie Wechsellagerungen mit Ton-, Siltstein und Mergel. Kategorien mit zu geringen Stichprobenumfang für vergleichende Betrachtungen: Prättigau NA; Sachseln kongl; Entlebuch NA.

Wo es möglich war, wurden im Feld Fallwinkel und -azimut der Gesteinsschichten festgehalten. Im Perimeter Entlebuch fallen die Schichten im Mittel mit 36° nach Südosten ein (Tab. 4.15). Da sich dieses Untersuchungsgebiet aus zwei entgegen gesetzten Flanken zusammensetzt, sind die Schichten in einem Teil des Perimeters ungefähr hangparallel und im anderen senkrecht zum Hang. Im Perimeter Prättigau ist das Fallazimut für die meisten Rutschungen nach Nordosten und damit eher senkrecht zum Hang ausgerichtet. Der Fallwinkel liegt in einem ähnlichen Bereich wie im Entlebuch. Im Napfgebiet sind die Ergebnisse unsicher, da lediglich bei drei Rutschungen gemessen werden konnte. Allgemein, ist zu bemerken, dass die Standardabweichungen und damit die Unsicherheiten für alle Perimeter sehr gross sind.

Tabelle 4.15: Mittelwert und Standardabweichung für Fallazimut und den Fallwinkel der Gesteinsschichten in den drei Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005.

	Entlebuch (N=17)	Prättigau (N=20)	Napf 05 (N=3)
Mittelwert Fallazimut ($^\circ$)	136	52	127
Standardabweichung Fallazimut ($^\circ$)	46	31	15
Mittelwert Fallwinkel ($^\circ$)	36	37	18
Standardabweichung Fallwinkel ($^\circ$)	11	12	16

4.9.2 Lockergestein

Bei jeder Rutschung wurde das vorherrschende Lockergestein in die Klassen Gehängeschutt, -lehm, Moräne und Bachablagerung eingeteilt und eine Feldklassifikation gemäss SN 670 005a vorgenommen. Das entsprechende Probematerial wurde dabei jeweils am oberen Anrissrand aus dem Bereich der Bruchzone entnommen. Basierend auf der Feldklassifikation wurde das Material einer Bodenklasse gemäss USCS zugeordnet (VSS 1997 und Anleitung im Anhang).

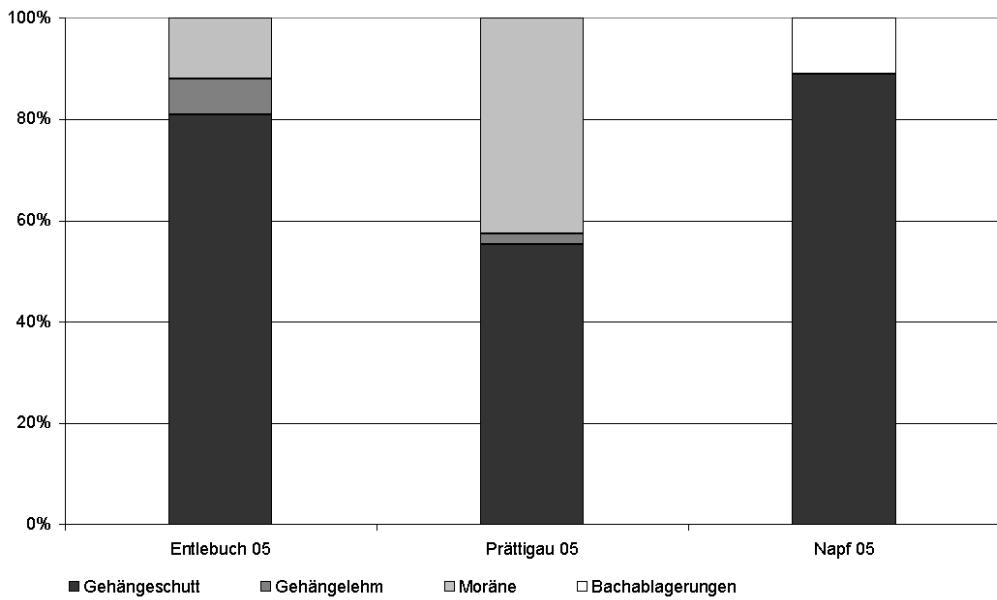


Abbildung 4.19: Lockergesteinsarten in den drei Untersuchungsgebieten der Unwetter 2005.

Die häufigste Lockergesteinsart war in allen Perimetern der Gehängeschutt/-lehm (Abb. 4.19). Im Prättigau machte der Moränenanteil fast die Hälfte, im Entlebuch nur etwa 10% aus. Im Napfgebiet fehlen Gehängelehm und Moräne vollständig; in einigen wenigen Rutschungen fanden sich hingegen Ablagerungen eines alten Bachlaufs.

Tabelle 4.16: Vorkommen der verschiedenen Lockergesteine in den Untersuchungsgebieten (Anzahl Rutschungen).

		Entlebuch 05	Prättigau 05	Napf 05	Napf 02	Appenzell 02	Sachslen 97
keine Angaben		4	3	0	5	2	31
"feinkörnig"	OL	0	0	0	0	0	28
	ML	0	0	0	0	0	1
	CL	8	12	8	4	11	19
	CL-ML	12	11	2	6	8	93
"mittelkörnig"	SC	2	0	0	1	1	0
	SM	4	1	4	14	52	0
	SP	0	0	0	1	6	0
	SW	0	0	1	0	0	0
"grobkörnig"	GC	1	11	1	0	1	7
	GC-GM	0	0	0	0	0	64
	GM	16	11	19	20	1	13
	GP	0	1	1	0	0	0
Total		47	50	36	51	82	256

Bei den Rutschungen im Entlebuch und im Prättigau sind ungefähr die Hälfte der Böden als feinkörnig beurteilt worden (toniger Silt CL, siltiger Ton CL-ML, Tab. 4.16). Im Perimeter Napf machen die feinkörnigen Böden nur etwa einen Dritteln aus. Bei den grobkörnigen Böden der Perimeter der Ereignisse 2005 überwiegen mit Ausnahme des Perimeters Prättigau die siltigen Kiese (GM) klar. Die Perimeter Napf 05 und Napf 02 unterscheiden sich durch den hohen Anteil siltige Sande (SM) im Perimeter 02. Aufgrund des Fehlens von Nagelfluh und des Vorkommens von Sandsteinen kommen im Perimeter Appenzell keine Kiese (siltiger Kies GM, toniger Kies GC) sondern siltige Sande (SM) vor. Die Verhältnisse in Sachseln weichen davon ab, indem dort grössere Anteile von siltigem Ton (CL-ML), siltigem bis tonigem Kies (GC-GM) und organischem Ton (OL) vorkommen.

Für die folgenden Auswertungen werden die verschiedenen vorkommenden Lockergesteine bei den Rutschungen der Untersuchungsgebiete in Gruppen zusammengefasst:

- feinkörnige (siltige/tonige) Lockergesteine: CL, CL-ML
- mittelkörnige (sandige) Lockergesteine: SC, SM, SW/SP
- grobkörnige (kiesige) Lockergesteine: GC, GM, GP

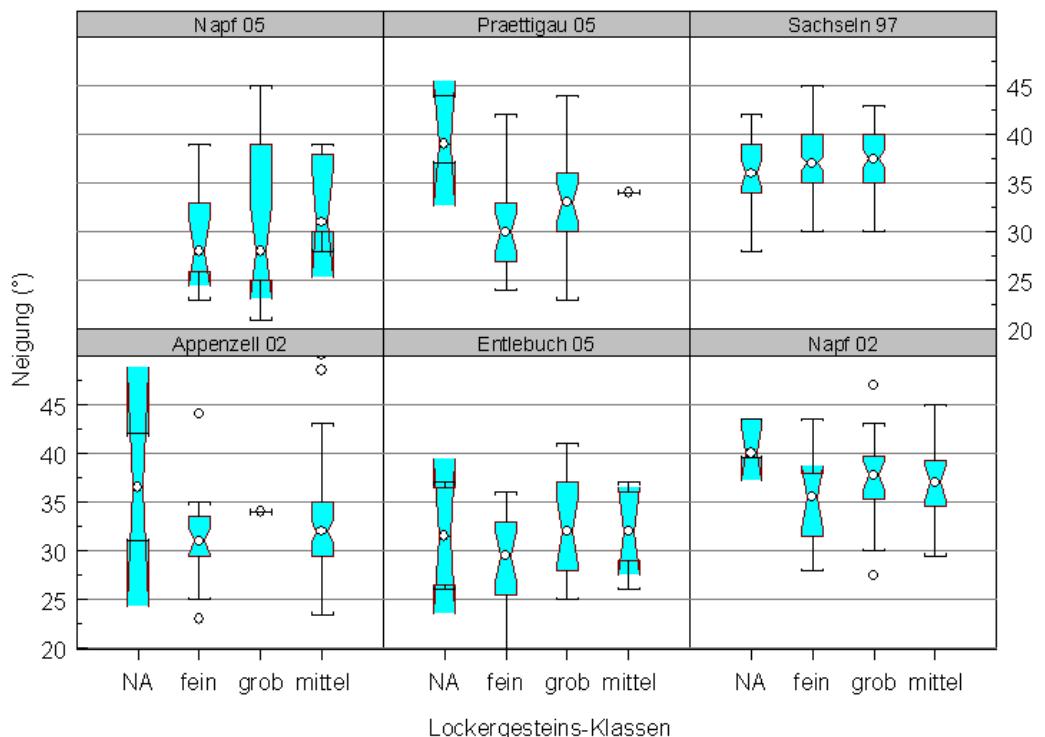


Abbildung 4.20: Kistendiagramme für die Neigungen bei den Rutschungen in den verschiedenen Lockergesteins-Klassen.

Rutschungen auf feinkörnigen Böden weisen in der Regel geringere Neigungen auf als Rutschungen in mittel- bis grobkörnigen Böden (Abb. 4.20). Zwischen mittel- und grobkörnigen Böden sind keine systematischen Unterschiede festzustellen. Für den Perimeter Sachseln zeigen sich ebenfalls keine Unterschiede zwischen fein- und grobkörnigen Böden. Anhand der vorliegenden Daten sind keine weiteren Unterschiede (z.B. bezüglich Volumen) zwischen Rutschungen in verschiedenem Bodenmaterial zu beobachten.

Zusätzlich zu den Untersuchungen in den drei Perimetern wurde über das gesamte Schadensgebiet der Schweiz eine Analyse zum Einfluss des geologischen Substrates auf das Vorkommen von Rutschungen durchgeführt (Rickli et al. in Vorber.). Dazu wurde der Auslöseort aller bekannten flach-, mittel- oder tiefgründigen Hangprozesse der Unwetter 2005 mit der geotechnischen Karte der Schweiz einerseits und mit der räumlichen Verteilung der gefallenen Niederschlagssumme während des Hauptereignisses andererseits überlagert. Bei vergleichbarem Niederschlag wurde für Gebiete mit Molasse als geologischem Untergrund besonders viele Rutschungen pro Flächeneinheit beobachtet (Abb. 4.21). Dem gegenüber waren Rutschungen in Gebieten mit kristallinem Untergrund selten. Die Ergebnisse zeigen grobe Tendenzen, wie sich die Geologie auf die Disposition in Bezug auf Hangprozesse auswirkt. Allerdings muss auch auf Probleme bei dieser Auswertung hingewiesen werden – besonders im Zusammenhang mit der Genauigkeit der Lokalisierung der Rutschungen im Feld sowie mit dem ungünstigen Detaillierungsgrad der Geotechnischen Karte 1:200'000.

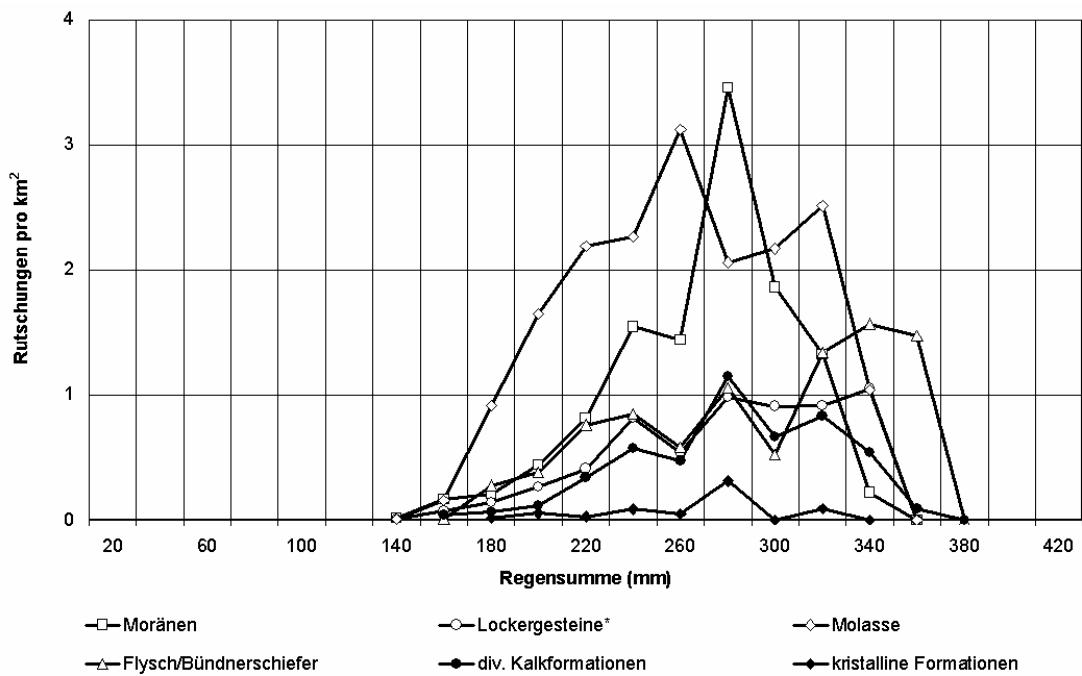


Abbildung 4.21: Zusammenhang zwischen der Geologie und dem Vorkommen von Rutschungen in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Niederschlagssumme. Grundlagen: vereinfachte geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000 (© BFS GEOSTAT / BUWAL), Niederschlagssumme vom 18.08.2005 um 06:00 Uhr UTC bis 23.08.2005 um 06:00 Uhr, Prozessdaten: Angaben der Kantone (StorMe) und WSL. *Lockergesteine: Gehängeschutt, Bachabgerungen, Schotter. Grund für die Abnahme der Rutschungshäufigkeit jeweils in Flächen ab einer Summe von ca. 340 mm: nur sehr kleine Flächen wurden mit diesen extremen Niederschlägen beaufschlagt.

4.10 Bodenanalysen und Hangstabilität

Bei insgesamt 16 Rutschungen wurden aus dem Bereich der Bruchzone Lockergesteinsproben entnommen und im Labor analysiert. Die Entnahme erfolgte mit dem Ziel, die Bandbreite der vorkommenden Lockergesteine bei den Rutschungen der drei Untersuchungsperimeter zu erfassen. Ein weiteres Ziel bestand darin, das Bodenmaterial zu klassieren und - darauf basierend - verschiedene Bodenkennwerte abzuschätzen, welche als Eingangsgrössen für einfache bodenmechanische Überlegungen, Sensitivitätsanalysen und Grenzwertbetrachtungen dienen. Zu diesem Zweck wurden in jedem Perimeter sowohl bei eher flachen als auch bei steilen Rutschungen Proben entnommen, und zwar jeweils von Rutschungen in feinkörnigen und grobkörnigen Böden.

4.10.1 Korngrössenanalyse und Klassifikation der Lockergesteine

Die Korngrössenverteilung der Bodenproben wurde mittels Trocken- und Nasssiebung (Korn-durchmesser grösser als 0.125 mm) sowie der Schlämmanalyse des Feinmaterials ermittelt. Entsprechend der Zielsetzung bei der Probe-Entnahme (für flache und steile Gebiete je sowohl feinkörnige als auch grobkörnige Böden) variiert die Korngrössenverteilung der analysierten Lockergesteine in weiten Bereichen (Abb. 4.22).

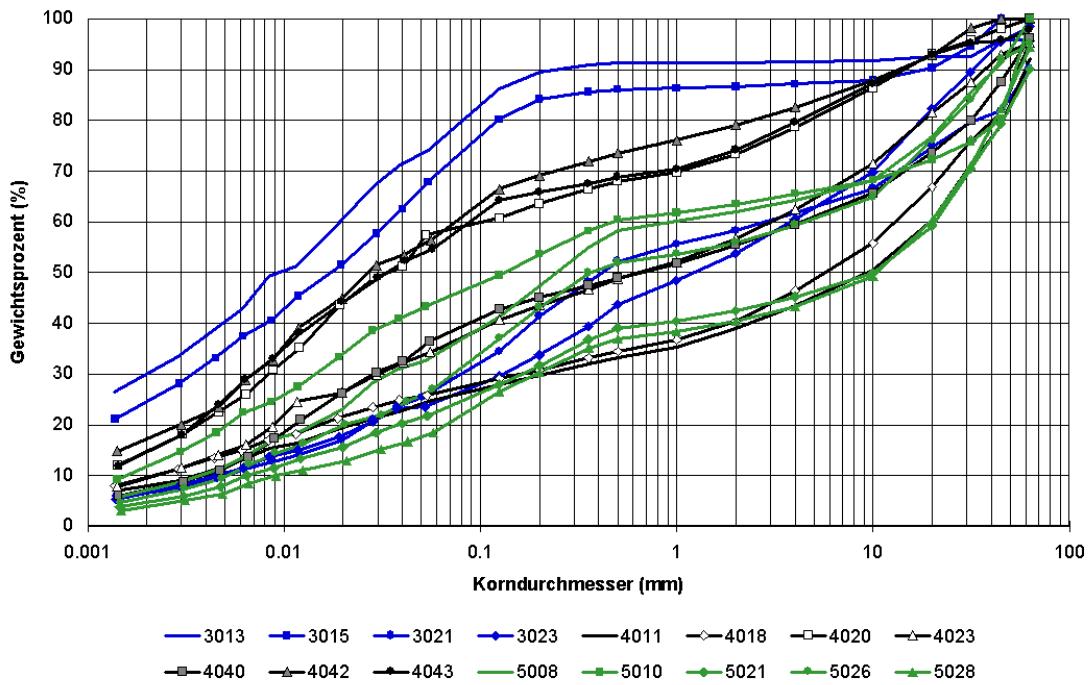


Abbildung 4.22: Korngrößenanalyse von Lockergesteinsproben aus den Untersuchungsgebieten Entlebuch (Nr. 30xx), Prättigau (Nr. 40xx) und Napf Nr. 50xx). Fraktionsgrenzen: Ton: < 0,002 mm, Silt: 0,002 bis 0,06 mm, Sand: 0,06 bis 2,0 mm, Kies: 2 bis 60 mm, Steine und Blöcke: > 60 mm.

Basierend auf der Korngrößenverteilung und auf den im Labor ermittelten Konsistenzgrenzen konnte das Bodenmaterial klassiert werden (Tab. 4.17). Die Klassierung erlaubt eine Abschätzung verschiedener Bodenkennwerte, beispielsweise für den Scherwinkel ϕ' , das Feuchtraumgewicht γ und die Kohäsion c' . Die Böden wurden mehrheitlich als tonige oder siltige Kiese klassiert; drei Böden sind als Silte und zwei Böden als Tone zu bezeichnen.

Tabelle 4.17: Angaben zu den untersuchten Böden: Entnahmetiefe der Bodenproben, Wassergehalt bei Probenentnahme w_{nat} . Ergebnisse Laboranalysen: Konsistenzgrenzen (Fliessgrenze w_L , Ausrollgrenze w_P), und Plastizitätsindex I_p . Klassifikation nach USCS gemäss SN670 008a sowie entsprechende Gruppennahmen.

	Probe	Tiefe (cm)	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_p (%)	USCS	Gruppennamen
Entlebuch	3013	50-70	43.3	37.4	20.8	16.6	CM	magerer Ton mit Sand
	3015	60-80	33.8	35.9	22.2	13.7	CM	sandiger magerer Ton
	3021	50-70	25.5	23.6	20.5	3.1	GM	siltiger Kies mit Sand
	3023	40-60	20.6	31.5	20.0	11.5	GC	toniger Kies mit Sand
Prättigau	4011	90	11.4	31.9	23.0	8.9	GC	toniger Kies mit Sand
	4018	100	10.6	30.8	21.7	9.1	GC	toniger Kies mit Sand
	4020	120	38.2	43.2	30.0	13.2	ML	kiesiger Silt mit Sand
	4023	70	17.7	33.1	24.0	9.1	GC	toniger Kies mit Sand
	4040	200	16.1	30.5	23.0	7.5	GC	toniger Kies mit Sand
	4042	40	35.0	39.1	28.0	11.1	ML	sandiger Silt mit Kies
	4043	60	23.1	51.3	39.5	11.8	MH	kiesiger elastischer Silt mit Sand
Napf 05	5008	60-80	18.5	29.4	23.0	6.4	GM	siltiger Kies mit Sand
	5010	60-80	23.4	39.6	28.0	11.6	GM	siltiger Kies mit Sand
	5021	70-90	13.4	30.4	20.0	10.4	GC	toniger Kies mit Sand
	5026	20-40	19.2	29.4	21.8	7.6	GC	toniger Kies mit Sand
	5028	180	11.6	31.9	22.2	9.7	GC	toniger Kies mit Sand

Auch aus der Klassierung ist ersichtlich, dass in den untersuchten Gebieten sehr unterschiedliche Böden mit entsprechend unterschiedlichen Bodeneigenschaften von flachgründigen Rutschprozessen betroffen waren. Die aufgrund der Klassifikation ermittelten Bodenkennwerte sowie weitere Angaben zu den Böden und den Rutschungsstandorten finden sich in Tab. A11 im Anhang. Dort ist ersichtlich, dass die Scherwinkel ϕ'_{norm} , welche aus der Klassierung und SN670010b abgeleitet wurden, jeweils um bis maximal 5° unter jenen basierend auf der Kornverteilungskurve ϕ'_{Dhawan} (nach Dhawan, ohne Korrekturfaktoren) liegen.

4.10.2 Analyse der Hangstabilität

Mit Hilfe der bodenmechanischen Kennziffern und der in Kap. 3.5 dargestellten Grundlagen können gewisse Überlegungen angestellt und fallweise Berechnungen durchgeführt werden. Die aus den Werten der Norm SN 670010b (VSS 1999) und der Kornverteilung gemäss Formel 2 in Kapitel 3.5 hergeleiteten Scherwinkel ϕ' der entnommenen Böden variieren zwischen 25 und 35° (Tab. 4.18). Die Neigungen bei den Rutschungen - wie auch allgemein in den Untersuchungsgebieten - liegen in vielen Fällen über diesen Werten. Nach dem Modell der unendlich langen Böschung würde sich für den Fall ohne Sickerlinie, d.h. bereits bei trockenen Witterungsverhältnissen Instabilität ergeben. Da die entsprechenden Hänge jedoch erst im Verlauf der intensiven Niederschläge vom August 2005 ins Rutschen gerieten, kann das Modell in dieser Form nicht zutreffen. Anpassungen hinsichtlich folgender Aspekte können in Betracht gezogen werden:

- Scherwinkel ϕ' : 1) Gemäss den Korrekturen von Brinch-Hansen (in Lang und Huder 1996) ist bei hoher Lagerungsdichte der Scherwinkel um bis zu 6° zu erhöhen. 2) Die Vegetation kann als stabilisierender Faktor einbezogen werden, indem die so genannte virtuelle Dichte erhöht wird (Böll und Graf 2001). Dieser Effekt wird am besten ebenfalls durch eine Erhöhung des Scherwinkels berücksichtigt, welche nach Böll et al. (in Vorber.) bis ungefähr 5° betragen kann.
- Kohäsion c' : im Modell der unendlich langen Böschung wird die Scherfestigkeit τ_f um die materialabhängige Kohäsion c' erhöht (Werte aus SN 670010b, VSS 1997).

Ziel der Anpassungen ist es, die Stabilitätsverhältnisse der entsprechenden Standorte möglichst wirklichkeitsnah abzubilden. Dies setzt voraus, dass die Hänge bei normalen Sättigungsverhältnissen stabil sind und frühestens ab einer Zusatzbelastung mit Niederschlag rechnerisch instabil werden. Zudem muss - da es ja im Verlauf der Unwetter 2005 zu einer Rutschung kam - spätestens bei voller Aufsättigung Instabilität eintreten. Der Sicherheitsgrad F soll somit für ein Profil ohne Sickerlinie grösser als ungefähr 1.0 sein, bei profilmfassender Sättigung jedoch kleiner. Dabei wird in den unten dargestellten Berechnungen als Stabilitätsschwelle ein Bereich von $0.9 \leq F \leq 1.1$ eingesetzt. Im Rahmen einer einfachen Sensitivitätsanalyse wurde jeweils ein Sicherheitsgrad für ungesättigte Verhältnisse $F_{\text{ungesättigt}}$ und ein Sicherheitsgrad für gesättigte Verhältnisse $F_{\text{gesättigt}}$ berechnet. Verschiedene Fälle werden im Folgenden untersucht:

- a) Modellanwendung ohne Anpassungen
- b) Einfluss der Vegetation: Erhöhung des Scherwinkels ϕ' in allen Profilen um 5°
- c) Einsetzen einer materialabhängigen Kohäsion entsprechend der Klassierung der Böden und SN 670010b (VSS 1997, Tab. A11)
- d) Einfluss der Lagerungsdichte: Erhöhung des Scherwinkels ϕ' um 3° . Diese Erhöhung wird nur bei Rutschungen in steilen Lagen ($\geq 35^\circ$) eingesetzt, da in flacheren Gebieten im Gegensatz zu Steilhängen von umgelagertem, lockeren Bodenmaterial ausgegangen werden kann.

Tabelle 4.18: Bodenmechanische Berechnungen für die Rutschungsstandorte mit Probenentnahme. Berechnungen an einheitlichem Bodenprofil mit einer Mächtigkeit von 1.0 m und für verschiedene Annahmen: a) ohne Anpassungen, b) mit Berücksichtigung der Vegetationswirkung ($\phi' + 5^\circ$), c) mit Berücksichtigung einer materialspezifischen Kohäsion c' und d) mit Berücksichtigung erhöhter Lagerungsdichte bei Neigungen $\geq 35^\circ$. Farbig hinterlegt: Fälle, welche nicht der Realität entsprechen können ($F_{\text{unges}} < 0.9$ oder $F_{\text{ges}} > 1.1$).

Probe	Neigung (°)	USCS	ϕ'_{gew} (°)	a) ohne Anpassungen		b) mit Einfluss Vegetation		c) Einfluss Kohäsion		d) Einfluss Lagerungsdichte	
				F_{unges}	F_{ges}	F_{unges}	F_{ges}	F_{unges}	F_{ges}	F_{unges}	F_{ges}
3013	26	CM	25	0.96	0.48	1.18	0.60	1.76	1.30	0.96	0.48
3015	35	CM	26	0.70	0.35	0.86	0.43	1.26	0.92	0.79	0.40
3021	25	GM	35	1.50	0.86	1.80	1.03	1.50	0.86	1.50	0.86
3023	39	GC	34	0.83	0.47	1.00	0.57	1.91	1.55	0.93	0.53
4011	37	GC	34	0.90	0.51	1.08	0.61	2.05	1.66	1.00	0.57
4018	42	GC	34	0.75	0.42	0.90	0.51	1.72	1.39	0.83	0.47
4020	37	ML	30	0.77	0.32	0.93	0.39	1.68	1.19	0.86	0.42
4023	25	GC	33	1.39	0.79	1.68	0.95	3.26	2.65	1.39	0.79
4040	39	GC	33	0.80	0.45	0.97	0.55	1.88	1.53	0.90	0.51
4042	27	ML	30	1.13	0.56	1.37	0.68	2.49	1.75	1.13	0.56
4043	33	MH	28	0.82	0.31	1.00	0.38	1.76	1.26	0.82	0.31
5008	24	GM	34	1.52	0.87	1.82	1.05	1.52	0.87	1.52	0.87
5010	29	GM	33	1.17	0.67	1.46	0.84	1.17	0.67	1.17	0.67
5021	45	GC	34	0.67	0.38	0.81	0.46	1.54	1.26	0.75	0.43
5026	39	GC	34	0.83	0.47	1.00	0.57	1.91	1.55	0.93	0.53
5028	27	GC	34	1.32	0.75	1.59	0.90	3.03	2.46	1.32	0.75

Die farbige Zellenhinterlegung in Tab. 4.18 zeigt jene Fälle auf, die nicht der Realität entsprechen können; d.h. $F_{\text{ungesättigt}} \leq 0.9$ oder $F_{\text{gesättigt}} \geq 1.1$. Bei der Anwendung des Modells ohne Anpassungen trifft dies in 8 von 16 Fällen zu, indem sich jeweils bereits bei trockenen Verhältnissen eine zu geringe Stabilität ergibt. Wird die Vegetationswirkung ($\phi' + 5^\circ$) eingesetzt, berechnet sich nur noch in 2 von 16 Fällen eine zu geringe Stabilität. Bei Berücksichtigung der in Steilhängen oft erhöhten Lagerungsdichte ($\phi' + 3^\circ$) ergibt sich gegenüber der Berechnung ohne Korrekturen nur eine unwesentliche Verbesserung. Wird die Kohäsion eingesetzt, ergeben sich bei trockenen Verhältnissen allgemein sehr stabile Bedingungen. Allerdings bleiben in vielen Fällen die Hänge nun auch bei voller Aufsättigung stabil, was nicht zutreffen kann. Dabei ist jedoch zu diskutieren, ob oder in welchem Mass eine Berücksichtigung der Kohäsion bei voller Aufsättigung des Bodenprofils überhaupt sinnvoll ist. Insgesamt zeigen die Berechnungen, dass durch die Berücksichtigung der Vegetationswirkung im Scherwinkel bereits eine deutliche bessere Abbildung der Realität erreicht werden kann. In Tab. A12 im Anhang sind weitere Ergebnisse zu verschiedenen bodenmechanischen Analysen aufgezeigt.

4.11 Böden

Am oberen Anrissrand der Rutschungen wurden jeweils in einem Profil verschiedene Aspekte der Böden beurteilt. Dazu gehören die Bodenentwicklung, Durchlässigkeit, Durchwurzelung sowie die Makroporen. Leider sind für die untersuchten Gebiete keine detaillierten Bodenkarten verfügbar, aus denen die regionale Verbreitung von Bodeneigenschaften abgeleitet werden könnte. Der Einfluss von Bodeneigenschaften auf das Vorkommen von Rutschungen kann deshalb nur gutachtlich abgeschätzt werden.

4.11.1 Bodenentwicklung

Die Böden bei den Rutschungen wurden einer der drei Entwicklungsstufen "Rohböden", "entwickelte Böden" und "Nassböden" zugeordnet. Rohböden zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Profil keinen Verwitterungshorizont aufweisen und der Humushorizont direkt auf dem Ausgangsmaterial liegt. Als Rohboden wurden auch jene Böden klassiert, die nur einen schwach ausgeprägten Verwitterungshorizont (beginnende Verbraunung) aufweisen oder wo eine klare Trennung zwischen Verwitterungshorizont und Ausgangsgestein nicht möglich war. Bei den entwickelten Böden kann ein mehr oder weniger deutlicher Verwitterungshorizont festgestellt werden. Nassböden sind beeinflusst durch Stau- oder Hangwasser und weisen deutliche, permanent durch Wasser beeinflusste Horizonte mit entsprechenden Vernässungsmerkmalen wie Rostflecken, Fahl-Rotfärbungen und Reduktionsfarben auf (z.B. Frehner et al. 2005).

In den Gebieten Entlebuch 05, Napf 05 und Appenzell 02 sind die entwickelten Böden am stärksten vertreten (Tab. 4.19). Im Gebiet Napf 02 kommen gleich viel entwickelte Böden wie Rohböden vor und im Perimeter Sachseln 97 sind die Rohböden deutlich in der Überzahl. Möglicherweise führten etwas unterschiedliche Ansprachekriterien zu diesem markanten Unterschied (vor allem zwischen den Ergebnissen Sachseln und den übrigen Perimetern). Allen Untersuchungen gemeinsam ist jedoch die Tatsache, dass auf Nassböden nur in einzelnen Fällen Rutschungen ausgelöst wurden.

Tabelle 4.19: Entwicklung der Böden bei den Rutschungen; Anzahl Rutschungen.

	Entlebuch 2005	Prättigau 2005	Napf 2005	Napf 2002	Appenzell 2002	Sachseln 1997
Rohboden	3	4	9	22	12	163
entwickelter Boden	36	39	27	22	68	37
Nassboden	3	4	0	7	2	24
keine Angaben	4	3	0	0	0	32
Gesamt	47	50	36	51	82	256

4.11.2 Makroporen

Makroporen sind massgeblich beteiligt am raschen Eindringen von Niederschlags- und Oberflächenwasser in tiefere Bodenschichten. In einem Bodenprofil am oberen Anrissrand jeder Rutschung wurden jeweils das Vorkommen und das Ausmass der folgenden Makroporen beurteilt: Wurmgänge, Wurzelkanäle, Risse/Spalten und Mausgänge. Zudem wurde das Ausmass und die maximale Tiefe der jeweiligen Makroporen im Bodenprofil festgehalten.

Gemäss Beobachtungen im Feld sind Wurmgänge in vertikaler Richtung häufig ausgewaschen. Wurzelkanäle reichen oftmals sehr tief und führen dadurch Wasser in tiefere Bodenhorizonte. Sie entstehen durch das Verfaulen von abgestorbenen Wurzeln und in zahlreichen Fällen wurde beobachtet, dass die Wurzelrinde noch vorhanden, das Wurzelholz jedoch vollständig abgebaut war (Abb. 4.23). Dadurch wirken diese Strukturen wie Rohrleitungen. Brüche im Bodengefüge sind direkt sichtbar als feine Risse und Spalten oder an blockigen bis plattigen Strukturen im Profil. Allerdings war es jeweils schwierig zu beurteilen, ob die Risse und Spalten bereits vor dem Ereignis vorhanden waren, oder ob das Bodengefüge durch die Rutschbewegungen aufgelockert worden war. Die Ergebnisse zu Spalten und Rissen werden deshalb im Folgenden nicht aufgeführt und kommentiert. Mausgänge reichen in der Regel weniger tief als die bereits genannten Makroporen, stellen jedoch ein grosses Potential hinsichtlich Wasserführung dar.



Abbildung 4.23: Makroporen: abgestorbene und vermodernde Wurzeln bilden vordefinierte Fliesswege mit grosser Wasser-Leitfähigkeit.

Zu den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2002 und 2005 sind vergleichbare Angaben zu Makroporen verfügbar, welche im Folgenden dargestellt und besprochen werden. Im überwiegenden Teil der Profile wurde mindestens eine Art von Makroporen festgestellt; d.h. über alle Perimeter gesehen sind in weniger als 10 % der Bodenprofile keine Makroporen zu beobachten (Tab. 4.20). Wurmgänge sind mit Abstand die häufigste Makroporen-Art und kommen in zahlreichen Profilen in grossem Ausmass vor, besonders häufig in den Perimetern Entlebuch 05, Napf 05 und Appenzell 02. Wurzelkanäle sind seltener, kommen jedoch immerhin noch in ungefähr der Hälfte der Profile vor. Nur gerade bei etwa 10% der Rutschungen konnten hingegen Mauslöcher beobachtet werden.

Zwischen Wald- und Nichtwaldrutschungen sind einige Unterschiede zu beobachten: Wurzelkanäle wurden im Wald bei 67% der Rutschungen und im Nichtwald bei 27% beobachtet, Wurmgänge im Wald bei 89% und Nichtwald bei 97%, Mauslöcher im Wald bei 4% und im Nichtwald bei 24%. Diese Werte stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Untersuchungsperimeter 2002 überein.

Tabelle 4.20: Vorkommen und Ausmass der verschiedenen Makroporen-Arten am oberen Anrissrand der Rutschungen 2002 und 2005.

	Bemerkungen	Menge	Wurmgänge	Wurzelkanäle	Mauslöcher
Entlebuch 05	4 Profile ohne Makroporen; bei 41 bzw. 42 von 47 Rutschungen Angaben zu Makroporen	keine	0	27	36
		wenige	19	10	3
		viele	23	4	3
Prättigau 05	5 Profile ohne Makroporen; bei 46 von 50 Rutschungen Angaben zu Makroporen	keine	6	24	38
		wenige	33	6	6
		viele	6	16	2
Napf 05	0 Profile ohne Makroporen; bei 36 von 36 Rutschungen Angaben zu Makroporen	keine	1	21	29
		wenige	15	10	1
		viele	20	5	6
Napf 02	6 Profile ohne Makroporen; bei 41 von 51 Rutschungen Angaben zu Makroporen	keine	21	16	41
		wenige	15	19	0
		viele	5	6	0
Appenzell 02	6 Profile ohne Makroporen; bei 75 bzw. 76 von 81 Rutschungen Angaben zu Makroporen	keine	22	44	66
		wenige	21	13	9
		viele	32	19	1

Es stellt sich die Frage, ob an einem bestimmten Standort Infiltrationswasser im Verlauf eines Niederschlagsereignisses durch die lokal vorkommenden Makroporen bis in die Tiefe eines potentiellen Bruchhorizontes transportiert werden kann. Zu diesem Zweck wurde bei jeder Rutschung die maximale Tiefe einer bestimmten Art Makroporen in Relation gesetzt zur Tiefe der Gleitfläche. Da die Tiefe der effektiven Gleitfläche nicht exakt bestimmt werden kann, wurde bei dieser Analyse eine Zone von plus minus je 20 cm um die gemessene Anrisstiefe als Bruchzone definiert. Man kann davon ausgehen, dass Makroporen, welche nicht bis in diese Zone reichen, weniger zur Aufsättigung der kritischen Bodenhorizonte beitragen.

In Tab. 4.21 sind die Ergebnisse der Untersuchungsgebiete 2005 zusammengefasst. Wo Wurmgänge vorkommen, reichen sie in 49% der Rutschungen bis in die Bruchzone (Gleitfläche \pm 20 cm) oder tiefer. Bei Wurzelkanälen ist dies sogar in 77% der Fall und bei Mausgängen nur in 5%. Häufig reicht nur eine Makroporenart wirklich tief (meistens Wurmgänge oder Wurzelkanäle). Bei den Erhebungen 2002 waren gegenüber jenen von 2005 Wurmgänge noch vermehrt bis in tieferen Schichten beobachtet worden, ansonsten waren die Ergebnisse etwa vergleichbar. Bei den Untersuchungen der Ereignisse von Sachseln wurden keine derartigen Auswertungen gemacht.

Tabelle 4.21: Maximale Tiefe der verschiedenen Makroporen im Bodenprofil in Relation zur Tiefe der Gleitschicht im Anriss. Die Ergebnisse der Perimeter 2005 sind insgesamt als Summe dargestellt. N= Anzahl Rutschungen.

	Makroporen beobachtet bis in eine Tiefe von...	Wurmgänge		Wurzelkanäle		Mausgänge	
		N	%	N	%	N	%
	Gleitflächentiefe minus > 20 cm	60	51	12	23	19	95
"Bruchzone"	Gleitflächentiefe minus 0 - 20 cm	36	31	22	43	1	5
	Gleitflächentiefe	11	9	6	12	0	0
	Gleitflächentiefe plus 0 - 20 cm	8	7	6	12	0	0
	Gleitflächentiefe plus > 20 cm	3	2	5	10	0	0
	Total	118	100	51	100	20	100

4.11.3 Durchwurzelung

Man kann davon ausgehen, dass dicke und verholzte Wurzeln besonders stark zur Stabilität gegenüber oberflächennahen Rutschungen beitragen. In diesem Zusammenhang wurde die Mächtigkeit des so genannten Hauptwurzelraumes bei den Rutschungen beurteilt, welcher durch die Tiefe im Bodenprofil definiert ist, welche von Wurzeln mit einem Durchmesser von mindestens 2 mm erreicht wird (Abb. 4.24). Nicht erfasst wurde jedoch die Intensität der Durchwurzelung.



Abbildung 4.24: Unterschiede in der Durchwurzelung: Freilandboden (links) und Waldboden (rechts).

In etwa 70% der Bodenprofile der Perimeter 02 und 05 wurden lebende Wurzeln von mehr als 2 mm Durchmesser gefunden (Tab. 4.22). Diese so genannten Haupt-Wurzeln kommen in den Böden bei den Waldrutschungen erheblich häufiger vor als im Freiland, d.h. im Wald bei 95% der Rutschungen und im Freiland bei 53%. Es fällt auf, dass bei den Freilandrutschungen 2002 weniger Hauptwurzeln beobachtet wurden als bei den Freilandrutschungen 2005, wobei der Grund dafür nicht klar ist.

In den Freilandböden handelte es sich bei den Wurzeln mit mehr als 2 mm Durchmesser vor allem um Wurzeln von Kräutern wie Löwenzahn oder Wegerich; vereinzelt auch um Wurzeln von Sträuchern (Hundsrose) und Solitärbäumen (Ahorn, Birken, Weisserlen). Im Waldrandbereich oder auf einwachsenden Freiflächen kamen auch Wurzeln von Waldrandbäumen und -sträuchern vor. Die Erhebungen zum Wurzelraum der Studie Sachseln sind mit jenen späterer Erhebungen nicht vergleichbar und sind deshalb in Tab. 4.22 nicht aufgeführt.

Tabelle 4.22: Anzahl Rutschungen mit Vorkommen von Wurzeln mit mehr als 2 mm Durchmesser im Bodenprofilen, differenziert nach Wald (=W) und Freiland (=F).

	Entlebuch 05		Prättigau 05		Napf 05		Napf 02		Appenzell 02	
	W	F	W	F	W	F	W	F	W	F
ohne Wurzeln > 2mm	0	10	1	2	0	5	3	17	1	36
mit Wurzeln > 2mm	9	24	22	22	14	17	26	4	33	12
keine Angabe	1	3	3	0	0	0	1	0	0	0
Total	10	37	26	24	14	22	30	21	34	48

Der Hauptwurzelraum reicht bei den Rutschungen von drei Untersuchungsgebieten im Wald tiefer als im Freiland (Prättigau 05, Napf 05 und Entlebuch 05), bei zwei Untersuchungsgebieten ungefähr gleich tief (Sachsels 97 und Appenzell 02) und im Gebiet Napf 02 weniger tief (Abb. 4.25).

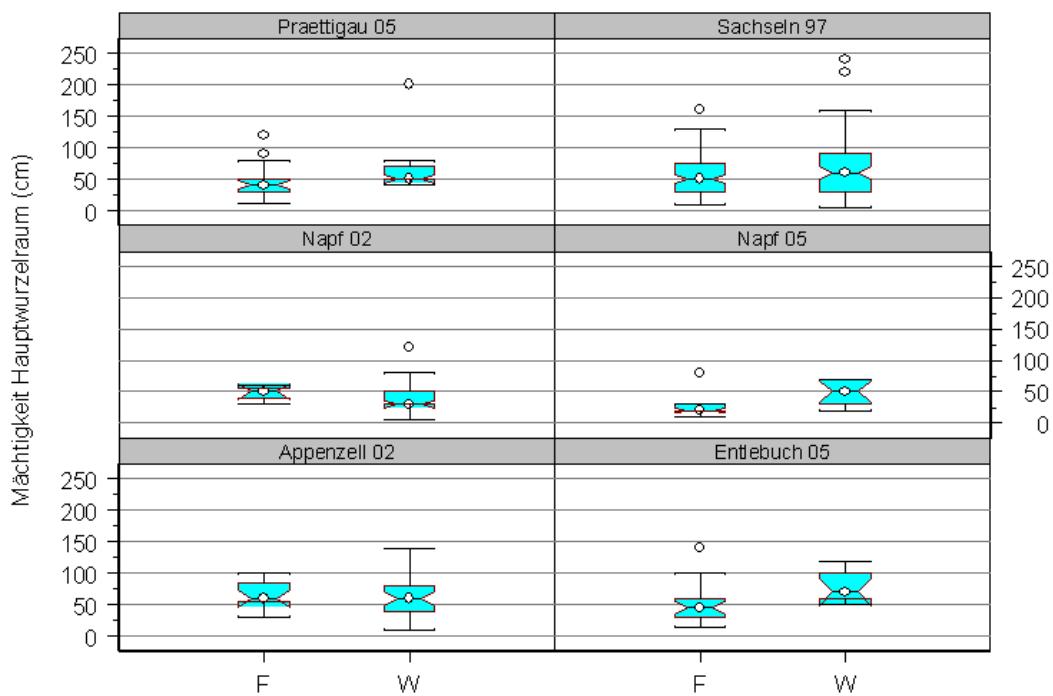


Abbildung 4.25: Hauptwurzelraum bei Wald- und Freilandrutschungen (W = Wald, F = Freiland) der verschiedenen Untersuchungsgebiete.

4.11.4 Durchlässigkeit

Für jeden Bodenhorizont der Profile bei den Rutschungen wurde im Feld anhand von bestimmten Merkmalen die Durchlässigkeit beurteilt und in die folgenden Kategorien eingeteilt: übermäßig durchlässig, normal durchlässig, leicht gehemmt, stark gehemmt sowie undurchlässig. Mittels Summenbildung der jeweiligen Mächtigkeiten der übermäßig durchlässigen, normal durchlässigen und leicht gehemmt durchlässigen Bodenhorizonte wurde die Mächtigkeit der Bodenschicht bestimmt, in die bei Regen das Wasser relativ leicht infiltrieren kann. Diese Mächtigkeit beträgt in den meisten Fällen ungefähr 40 bis 90 cm (Abb. 4.26). Die Werteverteilungen sind in allen Perimetern ungefähr ähnlich, wobei im Perimeter Prättigau die durchlässigen Schichten etwas mächtiger sind. Zwischen Wald- und Freilandrutschungen sind keine Differenzen festzustellen.

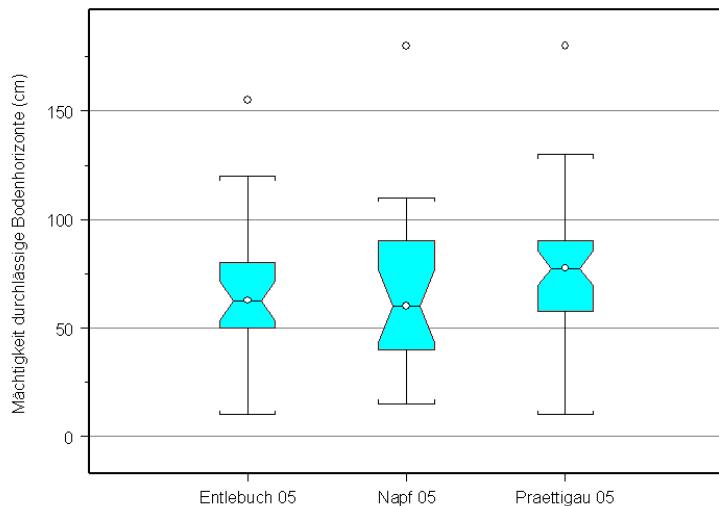


Abbildung 4.26: Mächtigkeit der durchlässigen Bodenschichten in den Untersuchungsgebieten der Unwetter 2005.

In den Untersuchungsgebieten Prättigau 05 und Napf 05 bildet in den meisten Fällen das Ausgangsgestein die Stauschicht (Tab. 4.23). Im Gebiet Entlebuch 05 war dies nur in 5 von 47 Profilen der Fall. Im Entlebuch 05 und Napf 05 wurden in je etwas weniger als der Hälfte der Profile keine Stauhorizonte festgestellt; im Prättigau 05 wiesen fast alle Profile eine Stauschicht auf.

Tabelle 4.23: Vorkommen von Stauhorizonten in den Bodenprofilen bei den Rutschungen der Ereignisse 2005. Stauhorizonte sind Bodenschichten mit geringer Durchlässigkeit: d.h. Durchlässigkeit stark gehemmt oder undurchlässig.

	verdichtete B-Horizonte	Ausgangsgestein (C)	Gleyhorizonte (Go, Gr)	Pseudogley-Horizonte (Sd, Sw)	Total Stauhorizonte	keine Angaben	keine Stauhorizonte	Gesamttotal
Entlebuch 05	7	5	4	10	26	4	17	47
Prättigau 05	2	27	2	13	44	3	3	50
Napf 05	2	18	0	2	22	0	14	36

4.12 Rutsch- und Verlagerungsprozesse

4.12.1 Bewegungsart, Ort der Gleitfläche

Oft wird zwischen translationsförmiger und rotationsförmiger Bewegung unterschieden (Abb. 4.27). Die Erfahrung im Feld zeigt, dass diese Unterscheidung bei flachgründigen Rutschungen oft schwierig ist und oft Mischformen mit rotationsförmigem Anriss und Übergang in eine translationsförmige Rutschbewegung beobachtet werden. Die meisten dieser Mischformen wurden den Translationsrutschungen zugeordnet. Sehr oft ging die Rutschbewegung infolge starker Sättigung des Bodenmaterials in eine murgangähnliche Fliessbewegung über (Hangmure).



Abbildung 4.27: Rotationsrutschung (links) mit muschelförmigem Anriss sowie Translationsrutschung (rechts) mit hangparalleler Gleitfläche.

Bei ungefähr drei Vierteln der Rutschungen wurde die Bewegungsform als translationsförmig beurteilt (Tab. 4.24). Der Bruchhorizont verlief dabei mehrheitlich entlang der Felsoberfläche. Ein Verlauf innerhalb des Festgestein wurde nur in einzelnen wenigen Fällen beobachtet.

Tabelle 4.24: Bewegungsart der Rutschung und Ort der Gleitfläche. Anzahl Rutschungen; NA = keine Angaben verfügbar.

Untersuchungsgebiet	Bewegungsart	Ort der Gleitfläche				Total
		Fels	Grenze	Lockergestein	NA	
Entlebuch 05	NA				4	4
	Rotation		1	1		2
	Translation		13	28		41
	Total		14	29	4	47
Prättigau 05	NA				3	3
	Rotation			1		1
	Translation	1	16	29		46
	Total	1	16	30	3	50
Napf 05	Rotation		2	10		12
	Translation		14	10		24
	Total		16	20		36
Napf 02	NA			1	1	2
	Rotation			3		3
	Translation		39	7		46
	Total		39	11	1	51
Appenzell 02	NA			1	1	2
	Rotation		4	5		9
	Translation	1	56	14		71
	Total	1	60	20	1	82
Sachsen 97	NA				35	35
	Rotation	2	3	90	1	96
	Translation	13	91	21		125
	Total	15	94	111	36	256
Alle Perimeter	NA	0	0	2	44	46
	Rotation	2	10	110	1	123
	Translation	15	229	109	0	353
	Total	17	239	221	45	522

In den Perimetern Entlebuch 05, Prättigau 05, Napf 02 und Appenzell 02 waren nur Einzelfälle mit rotationsförmiger Bewegung festgestellt worden. Dem gegenüber waren es im Perimeter Napf 05 immerhin ungefähr ein Drittel und bei der Erhebung Sachseln 97 annähernd die Hälfte. In den Untersuchungsgebieten Entlebuch 05 und Prättigau 05 verlief der Bruchhorizont vorwiegend innerhalb des Lockergesteines und in den Untersuchungsgebieten Napf 05 und Sachseln 97 je zu etwa gleichen Teilen im Lockergestein und an der Grenze zwischen Locker- und Festgestein. In den Untersuchungsgebieten Napf 02 und Appenzell 02 fanden die Rutschungen überwiegend an der Grenze zum Festgestein statt.

4.12.2 Mobilisierung Rutschmasse

Wie bereits erwähnt, floss oftmals ein grosser Teil des Rutschmaterials aufgrund der grossen Hangneigungen und der grossen Wassersättigung des Bodenmaterials als Hangmure ab. Bei jeder Rutschung wurde eine Abschätzung durchgeführt, zu welchen Anteilen das Bodenmaterial hangabwärts verlagert wurde, respektive im Bereich der Gleitfläche verblieb. Unter dem Begriff "Materialbilanz" wird im Folgenden der Anteil der Rutschmasse verstanden, der sich noch immer in der Rutschfläche befindet, also nur um wenige Meter verlagert wurde.

Insgesamt war die Mobilisierung von Rutschmaterial beträchtlich. Vor allem in den Perimetern Prättigau 05, Entlebuch 05, Napf 02 und Sachseln 97 sind bei jeweils etwa 80% der Rutschungen nur noch bis zu 20 % des Rutschungsmaterials im Bereich der Gleitfläche zurückgeblieben (Abb. 4.28). Bei den Rutschungen in den Perimetern Appenzell 02 und insbesondere Napf 05 war die Mobilisierung des Materials jedoch deutlich weniger ausgeprägt.

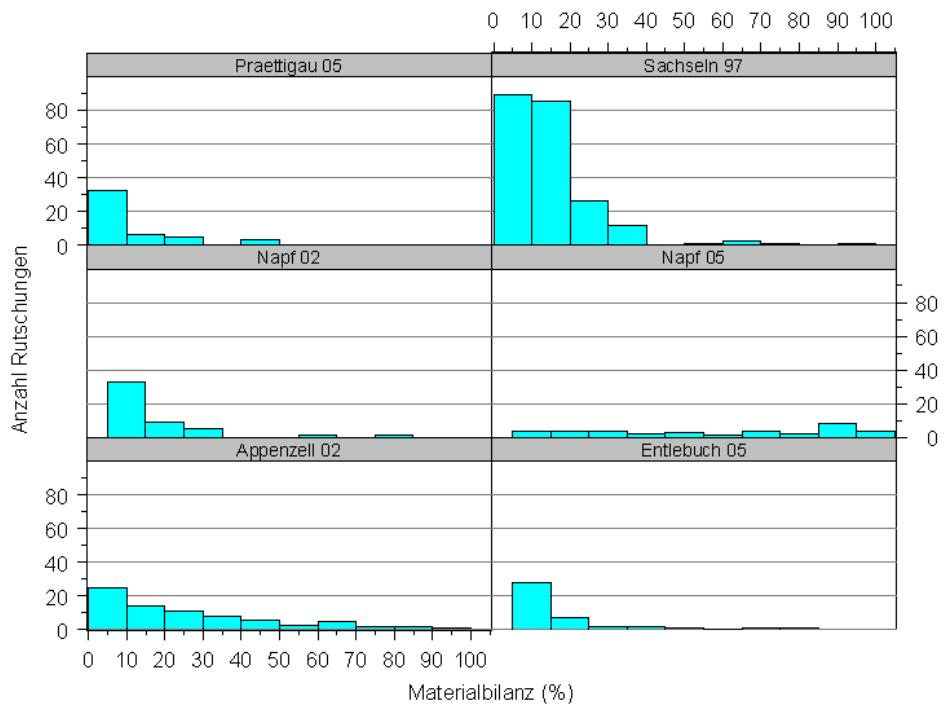


Abbildung 4.28: Materialbilanz bei den Rutschungen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten. Materialbilanz: Anteil des Rutschmaterials, der sich noch in Kontakt mit der Rutschfläche befindet.

Es zeigte sich, dass Rutschungen mit grosser Verlagerung im Mittel in steileren Gebieten losgebrochen sind. Anders formuliert: Rutschungen mit geringer Material-Mobilisierung wurden eher in flacheren Gebieten gefunden und kamen in sehr steilen Gebieten kaum vor (Abb. 4.29). Dieser Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Materialbilanz ist wider Erwarten jedoch nur sehr schwach. Weitere Einflussgrössen wie die Geländeform, Vegetation, Wasserführung oder Art des Lockergesteins üben gemäss den verfügbaren Daten keinen Einfluss auf

die Materialbilanz aus. Demgegenüber lässt sich zeigen, dass bei Rotationsrutschungen in der Regel mehr Material im Bereich der Gleitfläche zurückbleibt als bei Translationsrutschungen. Weiter zeigt sich, dass bei grösser werdender Material-Mobilisierung die Auslaufstrecke zunimmt.

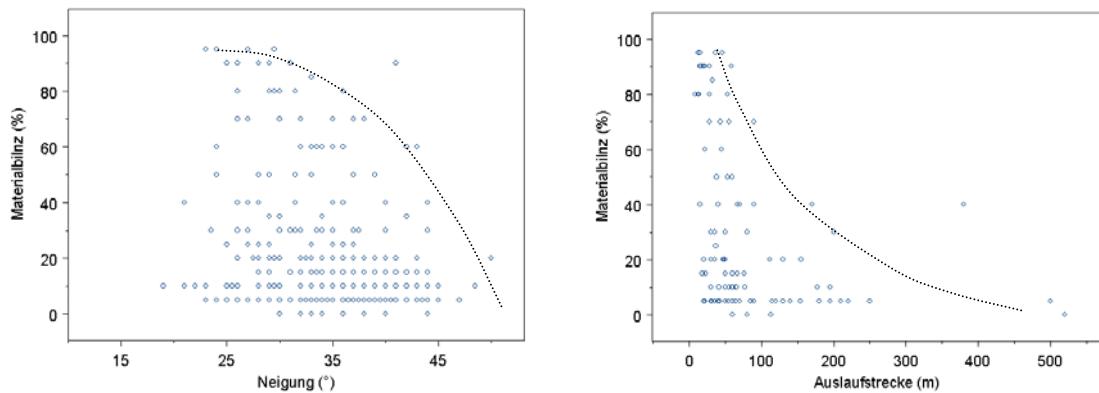


Abbildung 4.29: Linke Graphik: Zusammenhang zwischen der Neigung bei den Rutschungen und der Materialbilanz ($N=467$). Rechte Graphik: Zusammenhang zwischen der Auslaufstrecke und der Materialbilanz ($N = 113$).

4.12.3 Transit und Ablagerung

Bei Gefahrenkartierungen ist nicht nur der Entstehungsort relevant, sondern auch der Bereich, der durch die Hangmuren abfliessenden Rutschmassen gefährdet ist. In diesem Zusammenhang wurden jeweils die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle der Hangmuren erfasst. Auslaufstrecke: schiefe Distanz zwischen dem oberen Anrissrand der Rutschung und dem Ort, wo der grösste Teil der Rutschmasse abgelagert wurde. Pauschalgefälle: Neigung zwischen dem oberen Anrissrand und dem unteren Rand des Ablagerungsgebietes (Abb. 4.30).

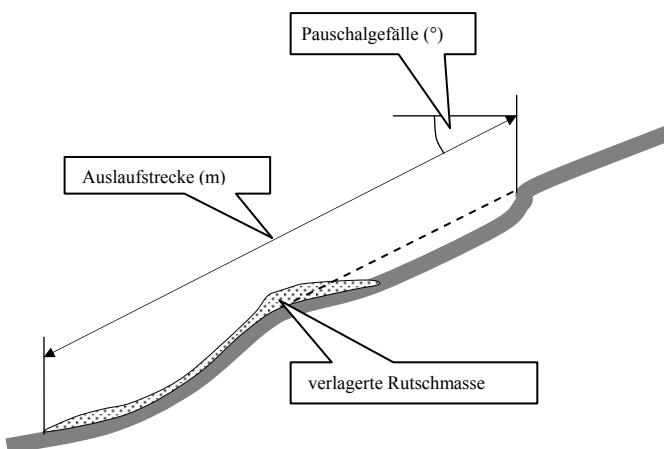


Abbildung 4.30: Schematische Darstellung: Auslaufstrecke und Pauschalgefälle.

Die konsequente Erfassung dieser Parameter war mit viel Aufwand verbunden, da die Auslaufstrecken der Hangmuren zum Teil sehr lang und zudem oft schlecht überblickbar waren. Entsprechende Werte waren bereits für die Ereignisse 2002 ermittelt worden, hingegen fehlen sie für die Ereignisse von Sachsen. Die Hangmuren haben sich bei weitem nicht in allen Fällen ungestört abgelagert und die Auslaufstrecken waren nicht immer vollständig einsehbar. Die Art und Weise der Ablagerung bzw. die Einsichtbarkeit der Auslaufstrecke wurde in folgende Kategorien eingeteilt:

- Ablagerung ungestört in Flachstrecke
- Ablagerung unterhalb Geländekante bzw. Sichtgrenze oder in Gerinne
- Ablagerung in markanter Mulde
- Ablagerung an Hindernis (anthropogen: Strasse, Haus, etc.; natürlich: Wald, Stein, etc.)
- keine Angaben

Tabelle 4.25: Art der Ablagerung des Materials der Hangmuren der Ereignisse 2002 und 2005. Für Sachseln 97 sind keine entsprechenden Angaben verfügbar.

Gebiet/Art Ablagerung	Flachstrecke, ungestörte Ablagerung	Geländekante, Gerinne, Sichtgrenze	Ablagerung in Mulde	Ablagerung an Hindernis	keine Angaben	Total
Entlebuch 05	19	23	1	2	2	47
Prättigau 05	24	13	1	4	8	50
Napf 05	31	2	2	1		36
Napf 02	12	33	5	1		51
Appenzell 02	23	52		3	4	82
Total (%)	109 (41%)	123 (46%)	9 (3%)	11 (4%)	14 (5%)	266 (100%)

Für insgesamt 252 Rutschungen stehen Daten zum Auslauf zur Verfügung (Tab. 4.25). Nachfolgend sind nur jene 109 Hangmuren ausgewertet, deren Ablagerung ungestört war und deren Auslaufstrecke vollständig vermessen werden können. Die Auslaufstrecken liegen grösstenteils im Bereich bis zu 100 m (Abb. 4.31), wobei jedoch im Perimeter Prättigau 05 zwei Hangmuren über 500 m lang ausliefen. Das Pauschalgefälle beträgt in den meisten Fällen zwischen 20 und 35°. Das kleinste Pauschalgefälle wurde mit 16° im Untersuchungsgebiet Entlebuch gefunden.

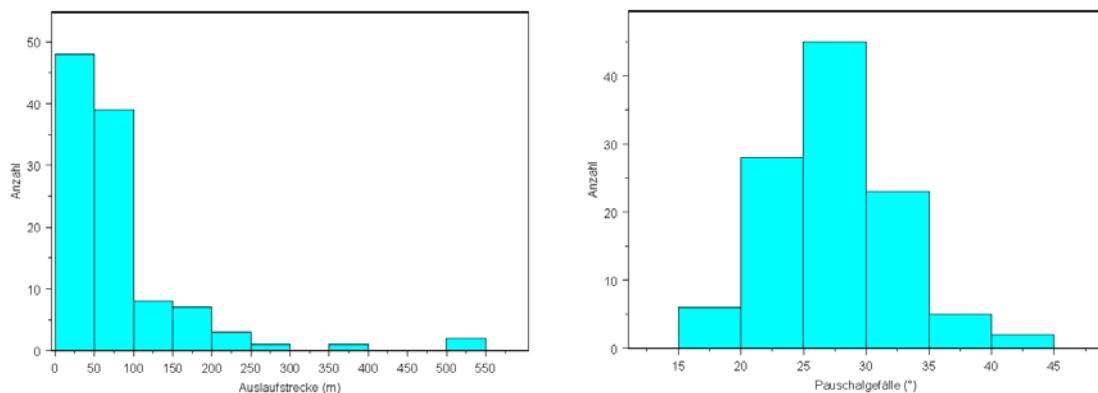


Abbildung 4.31: Auslaufstrecke (links) und Pauschalgefälle (rechts) für die Rutschungen der Untersuchungsgebiete 2005 und 2002 wo die Ablagerung vollständig einsichtbar und nicht gestört durch Hindernisse war ($N = 109$).

Die Auslaufstrecken waren in den Untersuchungsgebieten Entlebuch 05 und besonders Prättigau 05 länger als in den übrigen Untersuchungsgebieten (Abb. 4.32). Der Perimeter Napf 2005 unterscheidet sich von Napf 2002 durch eine leicht grösitere Streuung. Besonders flache Pauschalgefälle wurden im Gebiet Entlebuch 05 gemessen und besonders steile im Gebiet Napf 02. 80% der gemessenen Pauschalgefälle sind Perimeter Entlebuch mindestens 20°, im Prättigau 25°, im Napf 05 24°, im Napf 02 30° und im Gebiet Appenzell 02 21°.

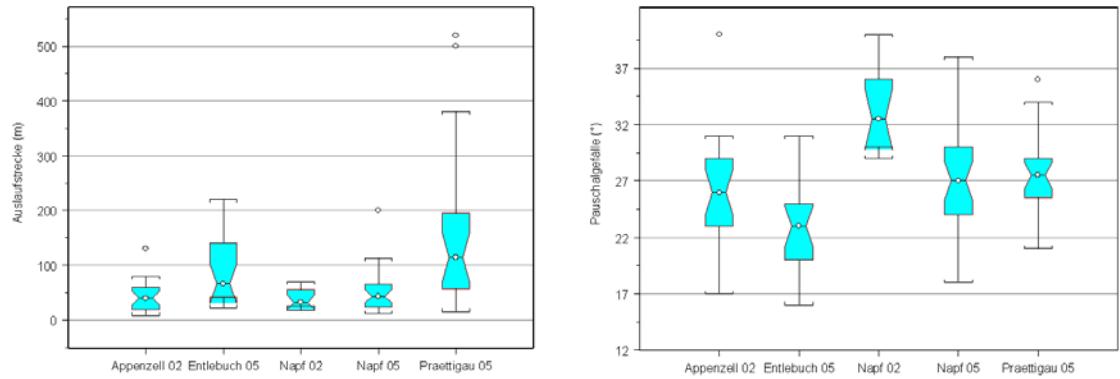


Abbildung 4.32: Auslaufstrecke (links) und Pauschalgefälle (rechts) pro Perimeter für Rutschungen, bei denen die Ablagerung vollständig einsehbar und nicht gestört durch Hindernisse war ($N = 109$).

Für Gefahrenbeurteilungen und -kartierungen ist es wichtig zu wissen, ob und durch welche Einflussgrößen die Auslaufstrecke bzw. das Pauschalgefälle beeinflusst wird. Die bisher durchgeführten Auswertungen zeigen leider insgesamt nur wenig gesicherte und klare Zusammenhänge und Tendenzen. Einen einigermaßen klaren Zusammenhang lässt sich zwischen Hangneigung und Pauschalgefälle herleiten: mit zunehmender Hangneigung bei den Rutschungen nimmt das Pauschalgefälle zwischen dem oberen Anrißrand der Rutschung und dem unteren Ende der Ablagerung zu (Abb. 4.33). Zwischen dem Volumen und dem Pauschalgefälle ist nur ein schwacher Zusammenhang erkennbar: bei zunehmenden Neigungen werden die maximalen beobachteten Rutschungsvolumen kleiner. Zwischen der Auslaufstrecke und der Neigung bzw. dem Volumen sowie weiteren Variablen sind keine Trends zu sehen.

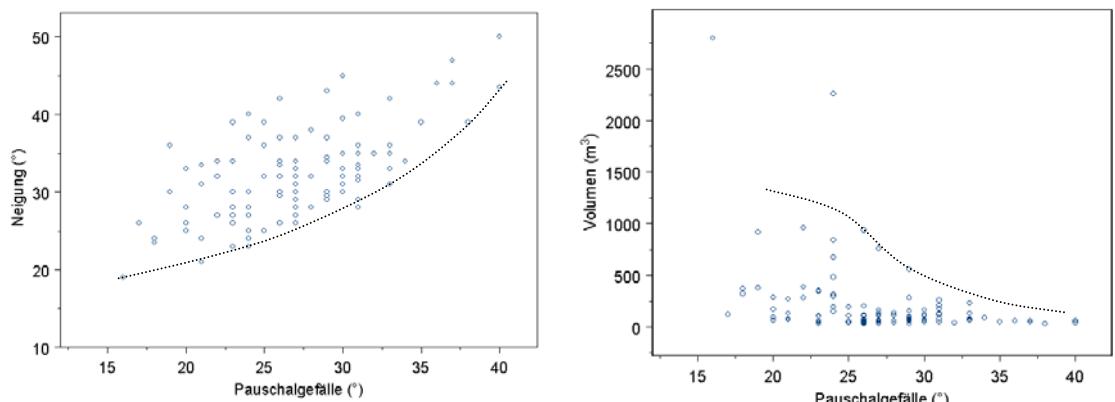


Abbildung 4.33: Linke Graphik: Zusammenhang zwischen der Hangneigung bei den Rutschungen und dem Pauschalgefälle. Rechte Graphik: Zusammenhang zwischen dem Rutschvolumen und dem Pauschalgefälle. Jeweils für Rutschungen mit einsehbarer und ungestörter Auslaufstrecke ($N = 109$).

Die Pauschalgefälle von Rutschungen mit viel Wasser in der Gleitfläche (vgl. Kapitel 4.7.2) sind tiefer im Vergleich zu den anderen Rutschungen (Abb. 4.34). Die Auslaufstrecken von Rutschungen in mittelkörnigem (sandigem) Lockergestein sind kürzer als jene der anderen Rutschungen. Weitere Zusammenhänge zum Einfluss auf das Pauschalgefälle oder die Auslaufstrecke konnten bis anhin nicht gefunden werden.

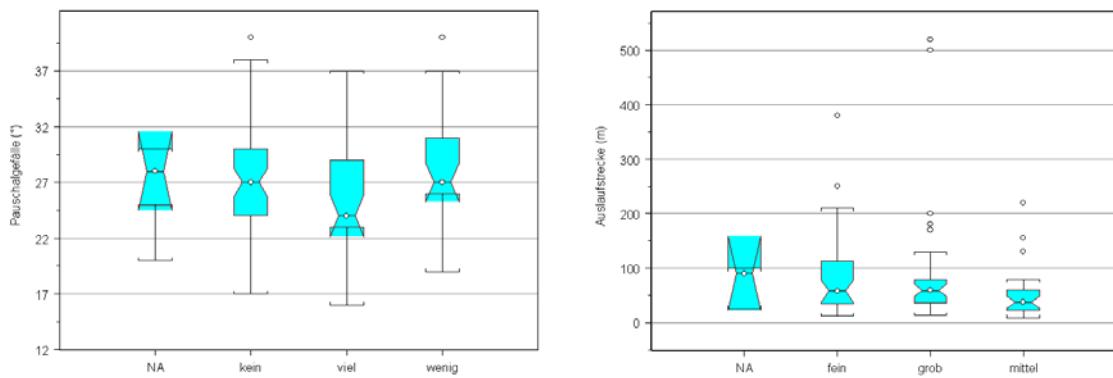


Abbildung 4.34: Linke Graphik: Pauschalgefälle in Abhängigkeit der Wasserführung. Rechte Graphik: Auslaufstrecke in Abhängigkeit von der Art des Lockergesteines. N = 109.

4.13 Sekundäre Einflüsse auf die Auslösung

Neben den extremen Niederschlägen und den lokalen Standortsbedingungen der betroffenen Hänge (Disposition durch Topographie, Bodeneigenschaften, Vegetation etc.) wirkten sich bei verschiedenen Rutschungen vermutlich weitere Faktoren negativ auf die Stabilität aus und trugen zur Auslösung der Rutschung bei. Sofern sie relevant erschienen, wurden sie bei den Rutschungen im Feld erfasst. Rutschungen mit eindeutigen Ursachen wie beispielsweise Hangfusserosion in Gerinnenähe oder zu steile Strassenböschungen sind in der nachfolgenden Datenzusammenstellung nicht enthalten.

Bei der Hälfte der Rutschungen konnte keine zusätzliche Beeinflussung festgestellt werden bzw. die Ursache der Rutschungsauslösung liegt ausschliesslich in der Disposition des betroffenen Hanges und dem Niederschlag (Tab. 4.26). Bei 31% der Rutschungen wurden natürliche sekundäre Einflüsse beobachtet und bei 19% anthropogene Einflüsse. Die häufigsten natürlichen Einflüsse sind die Naturgefahrenprozesse. Dies sind im Perimeter Napf vor allem zahlreiche Rutschungen in Windwurfflächen und im Perimeter Prättigau vor allem Rutschungen, welche durch oberhalb aufgetretene Rutschungen beeinflusst sind. In diesem Untersuchungsgebiet (und nur dort) wurden überdies häufig „alte Rutschablagerungen“ als Ursache angegeben. „Extreme Geländeformen“ machen insgesamt nur 5% der Rutschungen aus.

Bei den anthropogenen Einflüssen werden „Aufschüttungen/Ablagerungen“ und „Leitungen (Wassereintrag)“ mit 8 bzw. 6% am häufigsten als sekundäre Einflüsse für die Auslösung von Rutschungen genannt. Im Perimeter Entlebuch ist der Anteil der anthropogen beeinflussten Rutschungen verhältnismässig hoch.

Tabelle 4.26: Sekundäre Einflüsse auf die Auslösung der Rutschungen in den Untersuchungsgebieten 2005.

	Entlebuch 05	Prättigau 05	Napf 05	Gesamt
ohne erkennbaren zusätzlichen Einfluss	31	22	14	67 (50%)
natürliche Einflüsse	alte Rutschablagerung	11	1	12 (9%)
	extreme Geländeform	2	3	7 (5%)
	Naturgefahrenprozesse	8	13	22 (17%)
anthropogene Einflüsse	Aufschüttungen/Ablagerung	3	1	11 (8%)
	Leitungen (Wassereintrag)	1	2	8 (6%)
	Nutzungswechsel	2	2	5 (4%)
	Strassenwasser	0	0	1 (1%)
Total	47	50	36	133 (100%)

Im Rahmen der Erhebungen nach den Ereignissen 2002 wurden ebenfalls teilweise sekundäre Einflüsse erfasst, jedoch nicht systematisch. Anthropogene Einflüsse wurden damals seltener genannt als 2005: nur bei insgesamt ungefähr 5% der Rutschungen (Einfluss durch Wege und Straßen sowie Wasserleitungen). Bei etwa 25% wurden natürliche Einflüsse erwähnt, und zwar vor allem Sturmschaden-Flächen (ca. 15%), oberhalb liegende Rutschungen und Naturgefahrenprozesse (je ca. 5%).

4.14 Rutschungen an Strassen und Wegen

Nach Unwetterereignissen werden oft Rutschungen entlang von Straßen und Wegen beobachtet. Mögliche nachteilige Auswirkungen der Erschliessungen bestehen darin, dass (i) die künstlichen Böschungen zu steil ausgebildet wurden, (ii) dass das Strassenwasser unsorgfältig in den unterliegenden Hang abgeleitet wird, (iii) dass Strassendurchlässe versagen mit der Folge, dass das Bachwasser entlang der Strasse fliesst und irgendwo konzentriert in den Hang eingeleitet wird und (iv) dass Bodenmaterial von anderen Rutschungen auf der Strasse abgelagert und dadurch Strassenwasser konzentriert in den Hang eingeleitet wird.

Bei den früheren Untersuchungen der Unwetter 1997 und 2002 waren die Rutschungen an Straßen nicht erfasst worden. In den Perimetern 2005 wurden sie nun vollständig dokumentiert. In den verschiedenen Perimetern 2005 wurden zwischen 5 und 18% aller Rutschungen (sowohl kleiner als auch grösser als 30 m^3), unmittelbar entlang von Straßen ausgelöst (Tab. 4.27). Dies ergibt etwa 0.3 bis 0.7 Rutschungen pro Kilometer Strassen- und Wegnetz. Im Perimeter Entlebuch entstanden deutlich mehr Rutschungen an Straßen und Wegen als in den beiden anderen Perimetern.

*Tabelle 4.27: Auslösung von Rutschungen an Straßen und Wegen in den drei Perimeter der Ereignisse 2005. *inkl. Bewirtschaftungs- und Maschinenwege, jedoch ohne Fusswege, ermittelt anhand vector25 (©swisstopo); ** Anteil Strassenrutschungen (sowohl kleiner als auch grösser 30 m^3) an allen Rutschungen.*

Perimeter 2005	Fläche Perimeter (km^2)	Strassen und Wege* (km)	Erschliessungsdichte (km/km^2)	Strassenrutschungen		Anteil ** (%)	Rutschungen pro km
				> 30 m^3	< 30 m^3		
Entlebuch	5.1	22.4	4.4	10	6	18	0.71
Prättigau	4.7	14.4	3.1	4	1	7	0.35
Napf	1.6	8.3	5.1	0	3	5	0.36

4.15 Auslöse-Zeitpunkte und Niederschlags-Schwellenwerte

4.15.1 Allgemeines

Zur Verminderung von Gefahren und Risiken durch flachgründige Rutschungen und Hangmuren ist nicht nur die örtliche Prognose (Gefahrenkartierung) sondern auch die zeitliche Prognose (Warnung) von erheblicher Bedeutung. Als Grundlage für die Warnung vor flachgründigen Rutschungen und Hangmuren dienen Angaben zu Niederschlagssummen und -intensitäten, welche zur Auslösung der Hanginstabilitäten führen. Zu diesem Zweck wurde die lokale Bevölkerung in den drei Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005 zu Auslöse-Zeitpunkten und zum Ablauf der Rutschungen befragt. Für die Auswertungen zu den Niederschlags-Schwellenwerten dienten die Niederschlagsdaten von MeteoSchweiz (Rotach et al. 2007, www.meteoschweiz.admin.ch). Dabei wurden die Niederschlagssummen bis zur Auslösung ermittelt aufgrund 1) dem Pluviometer-Datensatz für die Tage vor der Auslösung und 2) dem Radardatensatz für die verbleibenden Stunden am Tag der Auslösung. Zum Vergleich wurden Messwerte von Messstationen (Tagessammler/ANETZ) konsultiert.

In Tabelle 4.28 sind die Auslöse-Zeitpunkte für jene Rutschungen in den drei Untersuchungsperimetern aufgeführt, bei denen die entsprechenden Angaben eruiert werden konnten. Zusätzlich ist jeweils die Regensumme bis zum Auslösezeitpunkt angegeben.

Tabelle 4.28: Anfangs- und Endzeit einiger Rutschbewegungen in den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005. Regensummen ausgehend vom 18.08.05, 06:00 UTC bis zum Auslösezeitpunkt, ermittelt aufgrund Zusammensetzung der gegitterten täglichen (Pluviometer) Niederschlagssummen für die Tage vor der Auslösung und der stündlichen (Radar) Niederschlagswerte für den Tag der Auslösung. R = Rutschung

Perimeter	Rutschung	Beginn der Rutschbewegung (Tag, Zeit)	Regensumme bis zum Beginn der Bewegung (mm)	Ende der Rutschbewegung (Tag, Zeit)
Entlebuch	Nr. 3001	22., 06:30	194	22., 06:30
	Nr. 3701	21., ca. 24:00	176	22., ca. 08:00
	2 R. beim Steinibach	22., 09:30	200	22., 11:00
	1 R. beim Hinter Lamm	21., 22:30	155	
	1 R. beim Nussbergwald	22., 09:30	200	22., 10:30
	7 R. in der Nacht (belegt)	21., ca. 23:00	161	22., ca. 07:00
	2 R. in der Nacht (belegt)	22., ca. 24:00	282	23., ca. 06:00
Prättigau	Nr. 4015, 4019, 4902, 4025	23., 00:00 - 06:00	137	
	Nr. 4013	23., ca. 04:00	150	23., 11:00
	Nr. 4003-4005	22., 23:30	113	
	einige R. (Schwendi, Junker)	22., 24:00	120	23., 07:00
Napf	Nr. 5002-5005, 5025	22., 08:00	179	22., 08:00
	Nr. 5014	22., 10:00	185	22., 12:00
	Nr. 5027	21., 24:00	151	21., 24:00
	Nr. 5028	22., 08:00	179	22., 14:00
	Nr. 5030	22., Morgen	179	22., Morgen
	Nr. 5031	22., Morgen	179	22., Morgen
	3 R. in der Nacht (belegt)	21., ca. 24:00	151	22., ca. 07:30

4.15.2 Auslösung und Ablauf Rutschungen Entlebuch

Gemäss Aussagen der Lokalbevölkerung begann die Rutschaktivität im Entlebuch am späten Sonntagabend (21.08.2005) mit der Bildung von AnrisSEN und dauerte bis etwa Dienstagvormittag (23.08.2005) an. Dabei gab es offenbar zwei Hauptphasen: von Sonntag spät abends bis am Montagvormittag und von Montagabend bis Dienstagmorgen. Von den Rutschungen in der Umgebung der Lüchtersmatt ist beispielsweise bekannt, dass sie in der Nacht vom Sonntag auf den Montag entstanden sind.

Über die Geschwindigkeit der Rutschprozesse existieren nur wenige Hinweise. Die Rutschung Nr. 3701 in der Füfischwand ist gemäss Beobachtungen Ortsansässiger langsam, d.h. weniger als im Schritttempo abgeflossen und eine Rutschung im Nussbergwald offenbar innerhalb einer halben bis einer ganzen Stunde. Ansonsten lassen sich nur Vermutungen anstellen. Viele Abflussspuren im Perimeter Entlebuch deuten darauf hin, dass im Vergleich zu den Rutschungen im Perimeter Prättigau eher weniger Wasser beim Rutschprozess beteiligt war, was auf eher langsameres Abfliessen hindeuten würde. Allgemein ist jedoch eine grosse Spanne verschiedener Abfliessgeschwindigkeiten wahrscheinlich.

Die Auslösung der ersten Rutschungen ereignete sich gemäss Abbildung 4.35 nach einer Niederschlagssumme von ungefähr 130 bis 150 mm und bei stündlichen Regenmengen von etwa 5 bis 15 mm. Für die Berechnung der Niederschlagssumme wird für die Tage vor der Auslösung die Niederschlagssumme der Tagessammler und für den Tag der Auslösung die Summe der stündlichen Radarwerte verwendet.

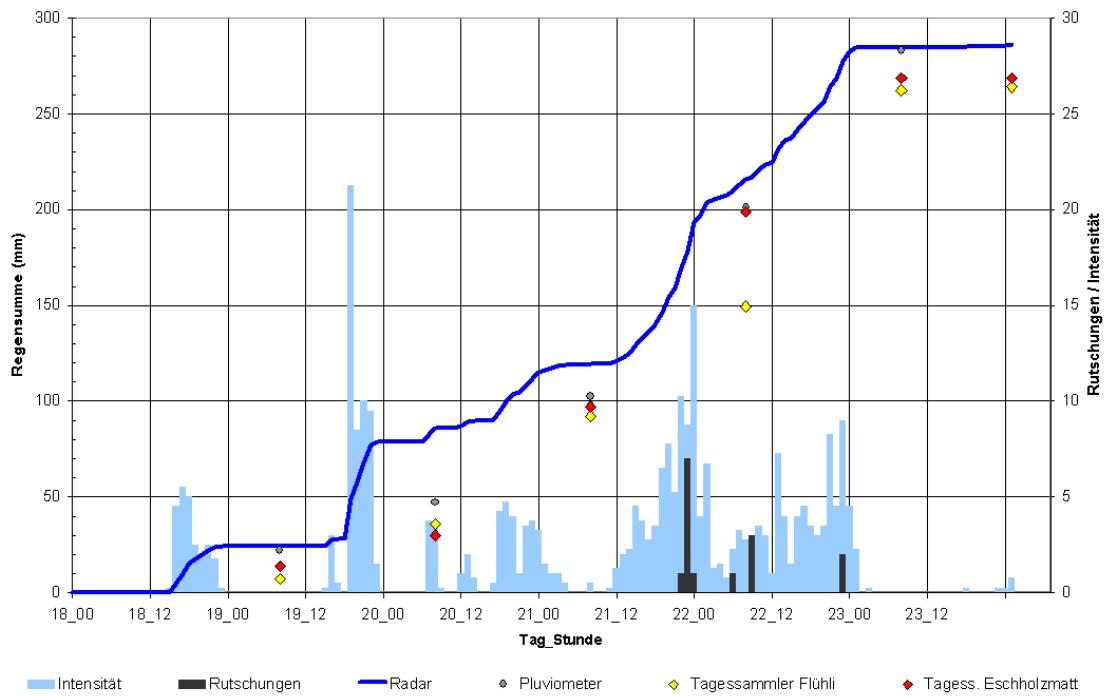


Abbildung 4.35: Niederschlagsverlauf und Stundensummen (Regenintensität) ab dem 18.08.05 sowie ausgelöste Rutschungen mit bekannter Auslösezeit im Perimeter Entlebuch. Massgebende Niederschlagssumme: Werte der Tagessammler, Radar-Summenkurve als Interpolationshilfe zwischen den Werten der Tagessammler.

4.15.3 Rutschauslösung Perimeter Prättigau

Im Perimeter Prättigau begann die Auslösung von Rutschungen kurz vor Mitternacht vom Montag (22.08.05) auf den Dienstag (23.08.05) und dauerte bis etwa Dienstag Mittag (Tab. 4.28, Abb. 4.36). Die Zeitphase mit Rutschauslösungen war damit wesentlich kürzer als im Perimeter Entlebuch. Im Gebiet „Junker“, einem der „Hot Spots“ im Perimeter Prättigau mit besonders konzentrierten Rutschungen, müssen laut Ortsansässigen die meisten Rutschungen zwischen Mitternacht und Dienstag Morgen um 06:00 Uhr entstanden sein. Von der Rutschung Nr. 4013 unterhalb des „Hundmeders“ ist bekannt, dass sie nur sehr langsam abgeflossen ist, d.h. mit weniger als Schritttempo. Der Beginn der Rutschbewegung muss in den frühen Morgenstunden des Dienstags gewesen sein. Etwa um 11:00 Uhr kam die Rutschmasse zum Stillstand. Die Abfluss-spuren und die langen Auslaufstrecken der meisten anderen Rutschungen sind Hinweise auf eine grosse Wassersättigung der Rutschmassen. Zum Teil enthielten die Rutschmassen selber sehr viel Wasser, zum Teil gelangten die Rutschungen während ihres Abflusses jedoch auch in wasserführende Rinnen. Gut belegt sind die drei Rutschungen im „Schlüecht“. Zwei dieser Rutschungen sind zwischen 23:00 und 24:00 Uhr am Montag Abend (22.08.2005) in Form von Hangmuren über sehr weite Strecken mit hoher Geschwindigkeit niedergegangen und trafen dabei auch ein Haus im „Zug“.

Die Auslösung der ersten Rutschungen ereignete sich gemäss Abbildung 4.36 nach einer Niederschlagssumme von ungefähr 120 bis 130 mm und bei stündlichen Regenmengen von etwa 5 bis 15 mm.

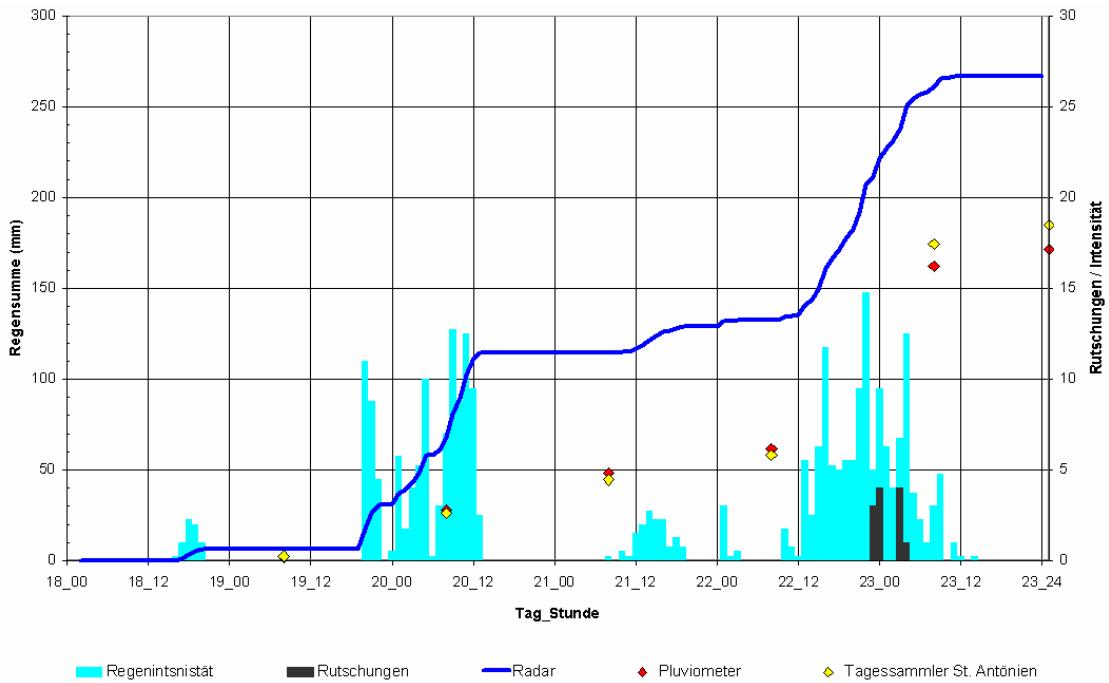


Abbildung 4.36: Niederschlagsverlauf und Stundensummen (Regenintensität) ab dem 18.08.05 sowie ausgelöste Rutschungen mit bekannter Auslösezeit im Perimeter Prättigau. Massgebende Niederschlagssumme: Werte der Tagessammler, Radar-Summenkurve als Interpolationshilfe zwischen den Werten der Tagessammler.

4.15.4 Rutschauslösung Perimeter Napf

Ähnlich wie im Perimeter Entlebuch muss die Rutschaktivität im Untersuchungsgebiet Napf 05 etwa von Mitternacht (Sonntag 21.08 auf Montag 22.08.) bis in den Montag Nachmittag gedauert haben (Tab. 4.28, Abb. 4.37). Die aktive Phase war somit etwa gleich lang wie im Prättigau, fand aber einen Tag früher statt. Die Rutschung Nr. 5028 floss nur sehr langsam ab, d.h. weniger schnell als im Schrittempo. Mancherorts konnte offenbar auch beobachtet werden, dass sich der Hang zuerst etwas aufwölbte und die Rutschmasse dann mit einem Knall in hohem Tempo abfuhr (z.B. Nr. 5002 bis 5005). An einigen Orten hat sich die Rutschmasse nur um wenige Meter verlagert (z.B. Nr. 5030 und 5031). Teilweise wurde beobachtet, dass Rutschungen stückweise abgingen, d.h. die Rutschfläche vergrösserte sich schrittweise gegen oben (Nr. 5014, 5028). Die Geschwindigkeiten der Rutschabgänge scheinen also auch im Napfgebiet sehr variabel, tendenziell aber eher langsam gewesen zu sein.

Die Auslösung der ersten Rutschungen ereignete sich gemäss Abbildung 4.37 nach einer Niederschlagssumme von ungefähr 120 bis 140 mm und bei stündlichen Regenmengen von etwa 5 bis 10 mm.

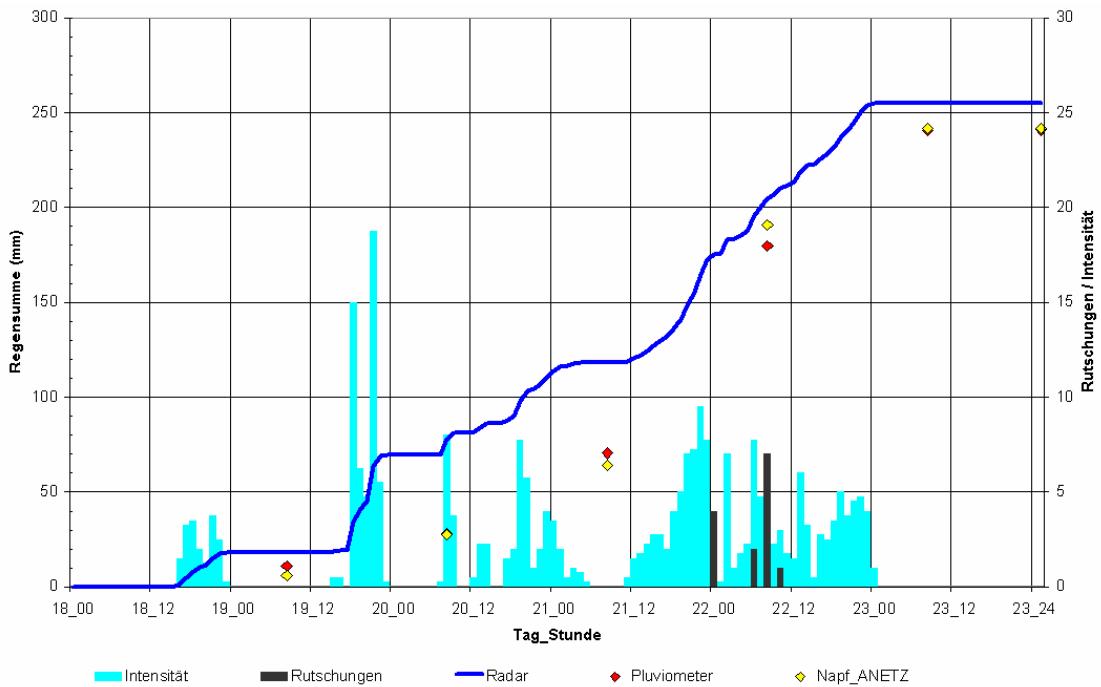


Abbildung 4.37: Niederschlagsverlauf und Stundensummen (Regenintensität) ab dem 18.08.05 sowie ausgelöste Rutschungen mit bekannter Auslösezeit im Perimeter Napf. Massgebende Niederschlagssumme: Werte der Tagessammler, Radar-Summenkurve als Interpolationshilfe zwischen den Werten der Tagessammler.

4.15.5 Schwellenwerte: Auswertungen weiterer Daten

Vorbemerkung: dieses Kapitel stimmt in wesentlichen Teilen überein mit Inhalten aus dem Kapitel "Hanginstabilitäten" des Berichtes Ereignisanalyse Unwetter 2005, Teil 2 (Rickli et al. in Vorber.).

Nicht nur die örtliche Prognose von Rutschungen (Gefahrenkartierung) ist problematisch, sondern auch die zeitliche (Warnung). Ab welcher Niederschlagssumme und -intensität sind Hangprozesse zu erwarten? Um diese Frage zu bearbeiten wurden alle verfügbaren Angaben zu Auslöse-Zeitpunkten von Hangprozessen zusammengetragen. Für die insgesamt 195 Rutschungen mit bekanntem Auslösezeitpunkt wurden sodann die Niederschlagssummen bis zur Prozess-Auslösung am Ort der betreffenden Rutschung ermittelt.

Vereinzelt traten offenbar bereits ab ungefähr 60 mm Regen erste Hangprozesse auf (Abb. 4.38), wobei dieser tiefe Wert als eher unsicher beurteilt wird. Mehrere Rutschungen traten ab 100 mm auf. Die grosse Mehrheit der Prozesse wurde jedoch erst durch Regensummen von mehr als 160 mm ausgelöst. Die Daten wurden zudem auch hinsichtlich der Grösse der Rutschungen und der Geologie ausgewertet, wobei die entsprechenden Resultate jedoch aufgrund der schmalen Datenlage mit Vorsicht zu interpretieren sind:

- kleinere Rutschungen ($< 200 \text{ m}^3$) wurden ab geringeren Regensummen ausgelöst als grössere Rutschungen
- Die Regensumme bis zur Auslösung zeigt eine gewisse Abhängigkeit von der Geologie: Rutschungen in Flysch/Bündnerschiefer entstanden bei den geringsten Regenmengen, gefolgt von Rutschungen in Molasse und schliesslich in Kalkformationen.

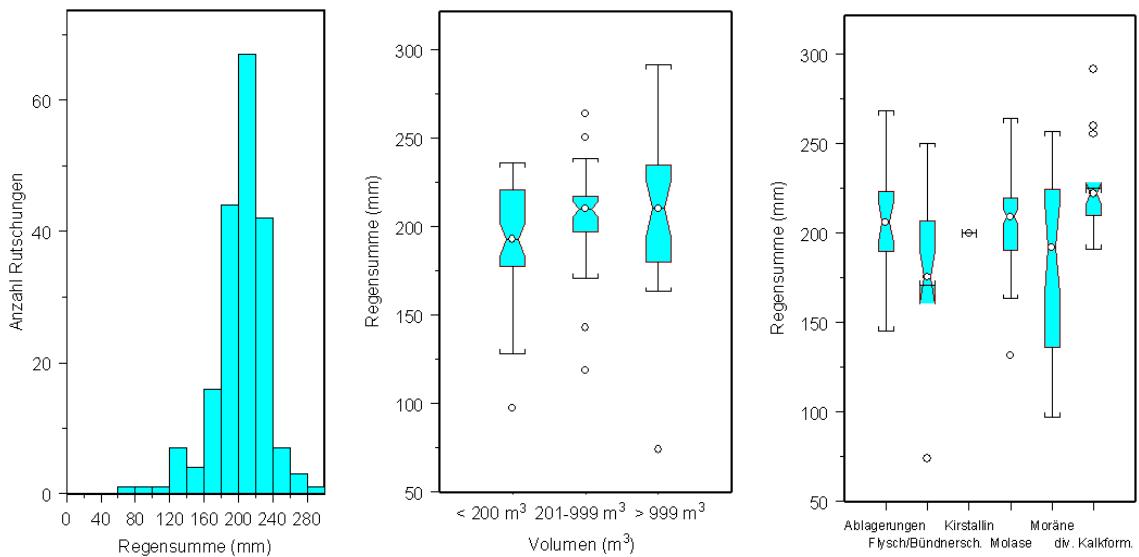


Abbildung 4.38: Regensumme ab 18.08.05, 06:00 Uhr UTC bis zum Auslösezeitpunkt der Hangprozesse (links), Auslöse-Regensumme pro Volumenklasse (Mitte), Auslösesezumme pro Geotechnik-Klasse (rechts); Anzahl Rutschungen mit entsprechenden Angaben $N = 195$.

Für die Auslösung von flachgründigen Rutschungen und Hangmuren ist - neben der Regenmenge - auch die Intensität der Niederschläge relevant. Deshalb wurde versucht, für die Ereignisse 2005 massgebende Niederschlagsintensitäten für die Auslösung der Hangprozesse zu ermitteln. Eine erste Analyse wurde auf die Messwerte von ausgewählten ANETZ-Stationen abgestützt, welche ja jeweils im Ereignisfall sofort und ohne Nachbearbeitung verfügbar sind (Nowcasting). Dabei wurde folgendes Vorgehen gewählt: 1) Erstellen von Niederschlags-Ganglinien bei ausgewählten Messstationen, 2) Ermittlung der Auslösezeitpunkte von Hangprozessen im Umkreis von 20 km um die entsprechenden Messstationen. In Abb. 4.39 sind als Beispiel die Werte für die Messstation Luzern dargestellt. Bis zur Auslösung der ersten Rutschungen in der Region fiel ab dem 18.08.2005 eine Regenmenge von 106 mm und die Niederschlagsintensität betrug zum Zeitpunkt der ersten Rutschung 10 mm in einer Stunde. Entsprechende Darstellungen für andere Stationen finden sich im Anhang in Abb. A3.

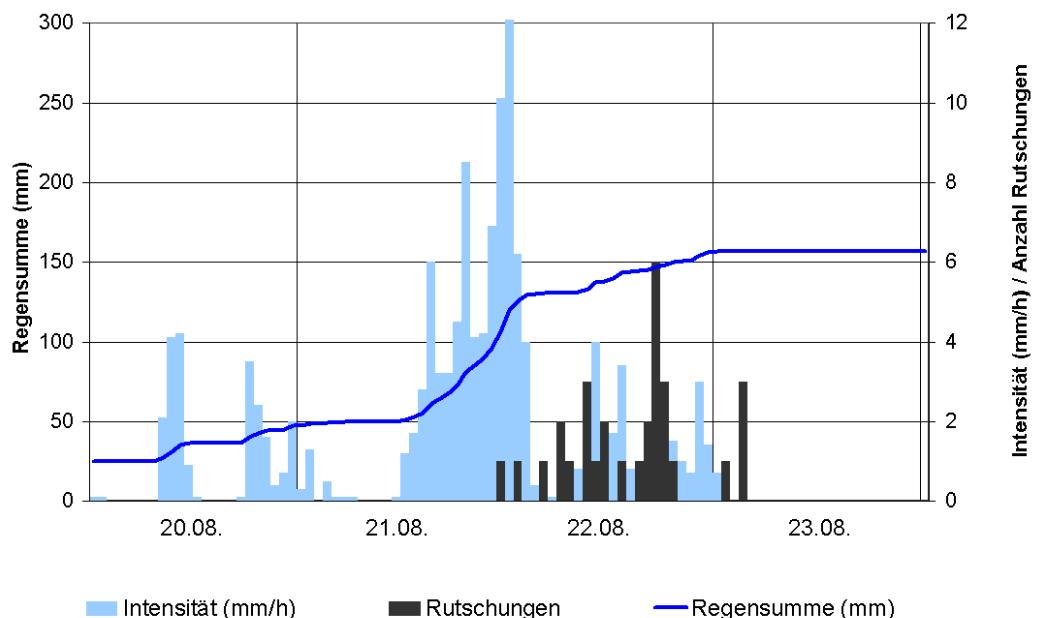


Abbildung 4.39: Niederschlagsverlauf und Stundensummen (Intensität, mm/h) ab dem 18.08.05, 06:00 Uhr UTC für die ANETZ-Station Luzern. Zudem: ausgelöste Hangprozesse im Umkreis von 20 km um die Messstation.

Die in Tab. 4.29 aufgezeigte Spannweite der ermittelten Schwellenwerte bezüglich Niederschlagsintensität und -summe für die verschiedenen Gebiete ist erheblich. Die Regensummen ab dem 18.08. bis zur Auslösung der ersten Prozesse betragen zwischen 63 und 143 mm. Für den Zeitpunkt der ersten Auslösung wurden Regenintensitäten von 3.6 bis 12.6 mm pro Stunde ermittelt. Die Gründe für die grossen Unterschiede der Resultate dieser Auswertung sind noch nicht im Detail identifiziert. Sie dürften jedoch einerseits in der Disposition der entsprechenden Standorte bzw. den lokalen Gegebenheiten, aber auch in der angewendeten Methode liegen, da der Niederschlagsverlauf an der Messstation von jenem am Ort der Rutschung abweichen kann. Weitere Arbeiten hinsichtlich der Ermittlung von Schwellenwerten für die Warnung vor Rutschungen sind erforderlich.

Tabelle 4.29: Massgebende Niederschlagssummen und -intensitäten für Hangprozesse mit bekanntem Auslösezeitpunkt im Umkreis von 20 km um ausgewählte ANETZ-Stationen. ¹ Niederschlagssumme vom 18.08., 06:00 Uhr UTC bis zum Auslösezeitpunkt der ersten Rutschung; ² 1h-Niederschlagsintensität zum Auslösezeitpunkt, ³ mittlere Niederschlagsintensität in den 3 h vor dem Auslösezeitpunkt, ⁴ mittlere Niederschlagsintensität ab Einsetzen der intensiven Niederschläge bis zum Auslösezeitpunkt sowie massgebende Niederschlagsdauer.

ANETZ-Station	Anzahl Hangprozesse	Niederschlagssumme ¹ (mm)	Niederschlagsintensität 1 h ² (mm/h)	Niederschlagsintensität 3 h ³ (mm/h)	Niederschlagsintensität ⁴ (mm/h) / Dauer (h)
Adelboden	15	71.6	4.0	4.0	2.8 / 12
Interlaken	14	70.9	3.6	4.6	3.6 / 9
Napf	110	143.7	12.6	11.9	6.5 / 12
Luzern	30	106.4	10.1	7.1	4.7 / 12
Engelberg	6	85.5	4.0	3.8	3.7 / 15
Glarus	11	63.1	3.6	1.4	1.5 / 23

Neben den Daten von ANEZ-Stationen wurden in einem zweiten Schritt auch nachbearbeitete Niederschlagsdaten von MeteoSchweiz ausgewertet. Dabei wurde der lokal für die jeweiligen Hangprozesse massgebende Niederschlagsverlauf zusammengesetzt aus dem Pluviometer-Datensatz (Tageswerte, für die Tage vor der Rutschungsauslösung) und dem Radar-Datensatz (Stundenwerte, für den Tag der Auslösung).

In Abb. 4.40 ist für die Hangprozesse 2005 sowie für weitere ausgewählte Ereignisse jeweils die Niederschlagsdauer gegen die entsprechende mittlere Niederschlagsintensität aufgetragen. Dabei ist zu bemerken, dass die Werte für die ANETZ-Stationen und für die WSL-Perimeter auf individuell, in Abhängigkeit des Niederschlagsverlaufes festgelegten Anfangs- und Endzeiten der massgebenden Niederschlagsperiode basieren. Sie weisen deshalb eher kürzere Niederschlagsdauern auf als die Werte für das gesamte Schadengebiet der Unwetter 2005 (195 Prozesse). Letztere basieren auf einer einheitlichen Anfangszeit (20.08.2005, 06:00 Uhr UTC), wobei das eigentliche Einsetzen der intensiven Niederschläge teilweise erst mehrere Stunden später erfolgte. In der Graphik sind diesen Werten zudem verschiedene Linien für kritische Werte der Auslösung (Guzzetti et al. 2007) gegenübergestellt. Die Werte der Rutschungen 2005 korrespondieren mehrheitlich schlecht mit diesen Linien und liegen oftmals auch darunter. Im Weiteren sind die grossen Streuungen zu erwähnen.

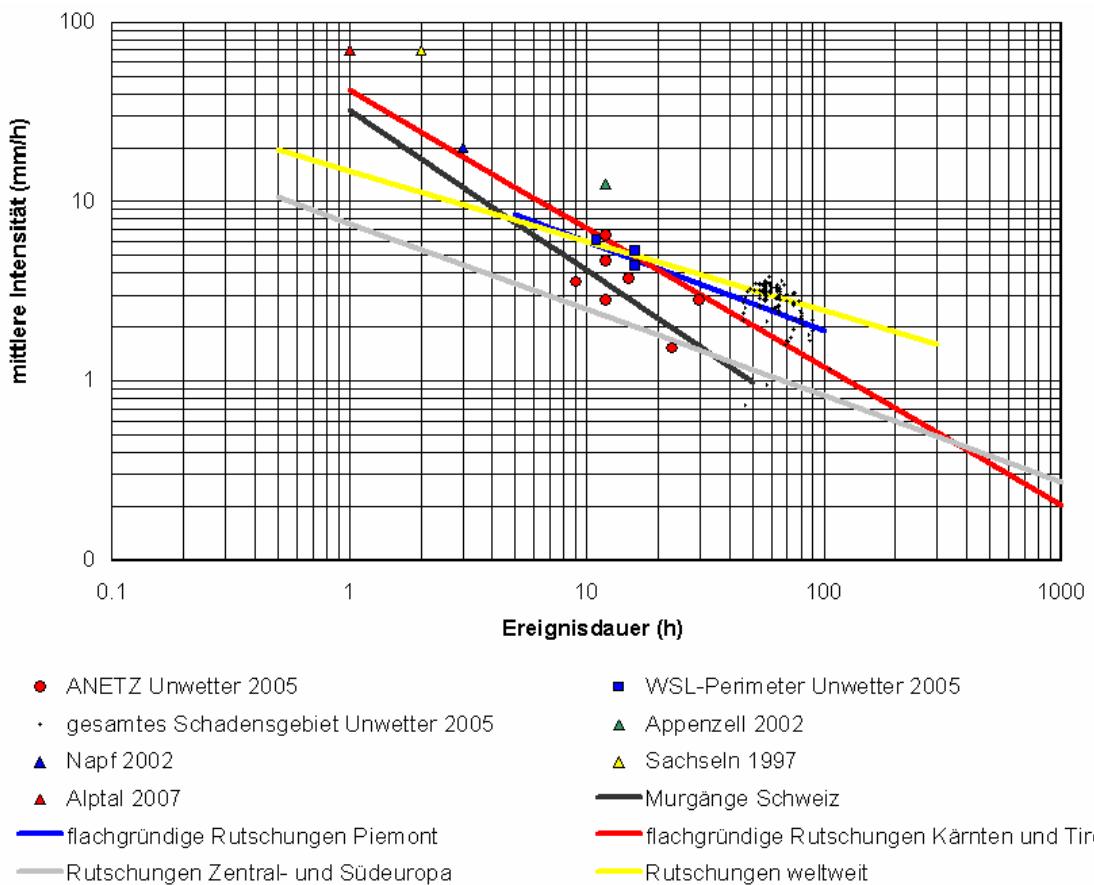


Abbildung 4.40: Mittlere Niederschlagsintensität in Abhängigkeit der Ereignisdauer ermittelt für die Auslösung von Rutschungen 2005. Auswertungen basierend auf Messwerten ausgewählter ANETZ-Stationen, auf nachbearbeiteten Niederschlagsdaten für Rutschungen sowohl in den WSL-Perimetern 2005 und für das gesamte Schadengebiet Unwetter 2005. Zum Vergleich: ausgewählte Ereignisse der letzten Jahre mit zahlreichen Rutschungen in der Schweiz. Zusätzlich eingetragen sind Linien kritischer Schwellenwerte für die Prozessauslösung, ermittelt für verschiedene Gebiete und Prozesse (nach Guzzetti et al. 2007).

Abb. 4.41 stellt die Ergebnisse einer weiteren Auswertung mit nachbearbeiteten Niederschlagsdaten von MeteoSchweiz dar, und zwar den Zusammenhang zwischen der Niederschlagssumme bis zum Auslösezeitpunkt und die Niederschlagsintensität zum Zeitpunkt der Prozessauslösung. Die Niederschlagsbedingungen, bei denen Rutschungen auftraten, sind zudem mit einer gutachtlich eingezeichneten Umgrenzungslinie von jenen Bedingungen abgegrenzt, bei denen noch keine Rutschungen auftraten. Offenbar wurden bei den Unwettern 2005 Hangprozesse ab minimalen Regensummen von etwas mehr als 30 mm und mittlere Intensitäten (über die gesamte relevante Ereignisdauer) von mehr als 2 bis 3 mm pro Stunde ausgelöst. Weiter wiesen die Ergebnisse darauf hin, dass die erforderliche Regenintensität mit zunehmender Regensumme abnimmt.

Derzeit ist es aufgrund der verfügbaren Daten nicht sinnvoll, Schwellenwerte für die Auslösung von Rutschungen bei Starkniederschlägen anzugeben, welche für die Warnung vor Hangprozessen im Verlauf von Unwetterereignissen verwendet werden können. Dazu sind weitere Anstrengungen notwendig. Die Auswertungen der Ereignisse 2005 können jedoch als erste Anhaltspunkte dienen. Neben der Erhebung von zuverlässigen Daten zu Auslöse-Zeitpunkten bei künftigen Ereignissen und zu den entsprechenden Niederschlagsverläufen besteht ein wichtiger Punkt auch in der Definition nachvollziehbarer Kriterien zur Abgrenzung der massgebenden Niederschlagsperiode.

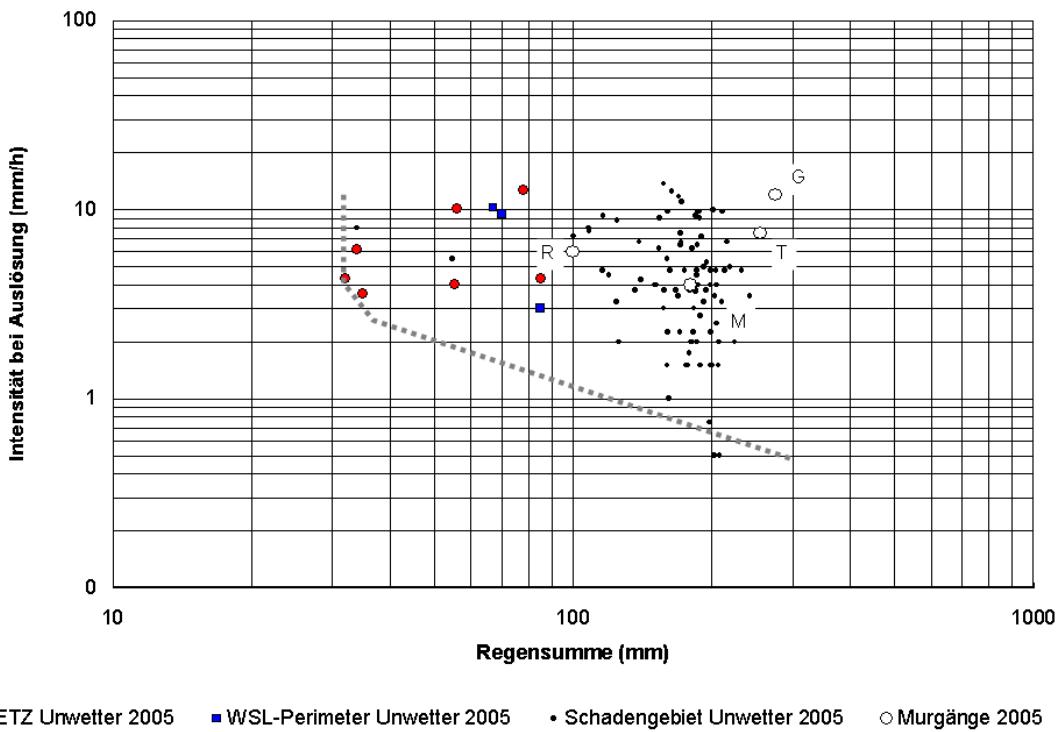


Abbildung 4.41: Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität (mm/h) zum Auslöse-Zeitpunkt und der Niederschlagssumme (mm) bis zur Auslösung von Rutschungen der Unwetter 2005: Auswertungen für Rutschungen im Umkreis von 20 km um ausgewählte ANETZ-Stationen. Die Auswertungen basieren auf nachbearbeiteten Niederschlagsdaten für Rutschungen in den WSL-Perimetern 2005 und für das gesamte Schadengebiet Unwetter 2005. Zudem sind Werte eingetragen für Murgänge 2005 im Berner Oberland: R=Rotlau, T=Trachtbach, G=Glyssibach, M=Milibach (geo7 2008). Gestrichelte Linie: gutachtliche Abgrenzung von Niederschlagsbedingungen (Kombinationen von Regensumme und Intensität), welche im August 2005 zu Hangprozessen führten.

Die Niederschläge früherer Ereignisse zum Vergleich:

- Unwetter von Sachseln am 15.08.1997: 150 mm in 2 Stunden; Aktivität in Gebieten mit Regensummen ab ca. 80-100 mm
- Unwetter in der Region Napf vom 15. auf den 16.07.2002: 50-60 mm in 3 Stunden, 70-80 mm in 24 Stunden, Vorregen: 108 mm in den 8 Tagen vor dem Ereignis
- Unwetter in der Region Appenzell vom 31.08. auf den 1.09.2002: bis zu 150 mm in 12 Stunden, Tagesniederschlag: bis zu 171 mm, nur wenig Vorregen

5 Diskussion

5.1 Allgemeines

Eines der Ziele der vorliegenden Untersuchung war, die Erfahrungen und Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen zu flachgründigen Rutschungen der WSL (Ereignisse 1997 in Sachseln und 2002 in den Gebieten Napf und Appenzell) möglichst weitreichend zu ergänzen und zu erweitern. Mit der Auswahl der Perimeter Entlebuch, Prättigau und Napf konnten neue Erkenntnisse erwartet werden - einerseits hinsichtlich der Geologie (neu: je ein Perimeter im Prättigau-Flysch und in der subalpine Molasse) und andererseits hinsichtlich der auslösenden Niederschläge (die Rutschungen in den nahe beieinander liegenden Perimetern Napf 02 und Napf 05 wurden durch unterschiedliche Niederschlagsverläufe ausgelöst).

Die Anzahl nach einem einheitlichen Vorgehen erfasster Datensätze konnte mit den neuen Felderhebungen um 34% erhöht werden. Neu sind insgesamt 522 einheitliche Datensätze zu flachgründigen Rutschungen aus sechs Untersuchungsperimetern verfügbar.

Die Resultate der Erhebungen 2005 werden nach Möglichkeit mit jenen der früheren Erhebungen der WSL verglichen. Damit soll analysiert werden, in wiefern gewisse Tendenzen und Zusammenhänge, welche sich aus den Daten eines Untersuchungsgebietes ergeben, auch auf die anderen Untersuchungsgebiete zutreffen. Bereits an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse jeweils nicht in allen Untersuchungsgebieten konsistent sind und dass es für eine ausgewogene Interpretation wichtig ist, Daten aus verschiedenen Gebieten zur Verfügung zu haben. Zum Teil werden die Ergebnisse auch mit Angaben aus der Literatur verglichen. Dabei besteht jedoch die Schwierigkeit, dass die Mess- und Beurteilungskriterien unter Umständen nicht mit jenen der WSL-Studien übereinstimmen.

5.2 Anzahl Rutschungen pro Fläche in den Untersuchungsgebieten

Die Anzahl Rutschungen pro Fläche zeigt auf, wie stark die entsprechende Fläche von Rutschprozessen betroffen war. Damit können sowohl die verschiedenen Untersuchungsgebiete untereinander als auch Flächen mit verschiedenen Standorteigenschaften innerhalb der Perimeter hinsichtlich der Prozessaktivität verglichen werden. Daraus lassen sich Hinweise auf die Bedeutung von regionalen und lokalen Dispositionsfaktoren ableiten.

Hinsichtlich der Prozessaktivität auf steilen Flächen (20 bis 50°) bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten: 10 bis 15 Rutschungen pro km^2 in den Gebieten Entlebuch 05 und Prättigau 05, 20 bis 35 Rutschungen pro km^2 in den Gebieten Appenzell 02, Napf 02 und Sachseln 97, knapp 50 Rutschungen pro km^2 im Gebiet Napf 05.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Sachseln 1997 und Napf/Appenzell 2002 liessen seinerzeit vermuten, dass die Topographie massgeblich die Prozessintensität lenkt. Dem widersprechen nun die Werte der Rutschungen 2005: Der Perimeter Napf 05 weist die grösste Prozessintensität auf, ist jedoch insgesamt flacher als der Perimeter Entlebuch 05, welcher die geringste Intensität aufweist. Auch die geologischen Verhältnisse oder die Niederschläge können die beobachtete Intensitätsunterschiede nicht erklären: die beiden Untersuchungsgebiete Napf 02 und Napf 05 liegen in vergleichbaren geologischen Verhältnissen, weisen jedoch unterschiedliche Prozessintensitäten auf. Im Weiteren zeigen die Perimeter Napf 05 und Entlebuch 05 trotz ähnlichen Niederschlagswerten unterschiedliche Prozessintensitäten.

Ein möglicher Grund für die extrem hohe Prozessintensität im Gebiet Napf 05 (auch im Vergleich zu Napf 02) sind die zahlreichen Sturmschadenflächen nach Lothar 1999 im Wald (vgl. Kap. 5.5.3). Für bestimmte Unterschiede in der Rutschaktivität kann als Ursache allenfalls die Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung diskutiert werden: Im Gebiet Napf 05 sind grosse Teile des Perimeters schnell und leicht erreichbar, was sich in einer intensiven Nutzung aus-

wirkt. In den Perimetern Prättigau 05 und Entlebuch 05 (geringere Prozessintensität als Napf 05) existieren einige schwer zugängliche Gebiete, welche ausschliesslich beweidet werden. Dem widerspricht die geringe Prozess-Intensität im gut erschlossenen Gebiet Appenzell 02.

Insgesamt sind die Differenzen zwischen den Prozessintensitäten in den Untersuchungsperimetern schwierig interpretierbar und letztlich auch nicht zu stark zu bewerten. Denn die Resultate hängen ja auch von der jeweiligen Abgrenzung der Untersuchungsperimeter ab, welche zu einem gewissen Mass zufällig ist.

5.3 Topographie Entstehungsort

5.3.1 Exposition und Höhenlage

Die Ausrichtung des Hanges beeinflusst einerseits die Vegetation und die Wassersättigung der Böden, andererseits aber auch die Ausrichtung der Schichten zum Hang (hangparallel, senkrecht zum Hang) und damit die hydrogeologischen Verhältnisse. Moser (1980), Jakob (2000) und Ruff (2005) beobachteten etwas mehr Rutschungen in S bzw. SE-Expositionen und begründen dies mit dem Einfluss auf die Bodenhydrologie bzw. mit der Ausrichtung der geologischen Schichten. Andreccs et al. (2002) stellten Rutschungen verstärkt in den Ausrichtungen Nord und Süd fest. Aus der Untersuchung der Ereignisse 2005 in der Schweiz resultieren allerdings – wie bereits auch schon aus den Untersuchungen der Ereignisse 2002 und 1997 – keine klaren Hinweise darauf, dass gewisse Hangausrichtungen stärker von Rutschungen betroffen wären bzw. dass sich die Exposition auf die Hangstabilität auswirkt und dieser Faktor relevant für die Gefahrenkartierung wäre.

Die Höhenlage per se wirkt sich nicht auf die Hangstabilität aus. Mit zunehmender Höhe über Meer sind jedoch Änderungen gewisser Standortsfaktoren (z.B. Vegetation, Lockergesteins-eigenschaften, Mächtigkeit Lockergesteinsauflage) verbunden, die sich möglicherweise auf die Stabilität auswirken können. Gemäss den Daten der Rutschungen 2005 sind die mittleren und teilweise auch tieferen Lagen der Perimeter etwas stärker von Hangprozessen betroffen. Gemäss der Ereignisanalyse Kanton Nidwalden 2005 (Oeko-B AG, Niederer+Pozzi Umwelt AG 2006) traten in höheren Lagen des Kantons weniger (flach- und mittelgründige) Rutschungen auf. Als Gründe dafür werden die unterschiedlichen Voraussetzungen bezüglich der Bodenbeschaffenheit oder die grosse Bedeutung der unterirdischen Wasserwege für die Rutschungsauslösung angeführt. Die Ergebnisse der Rutschungen 2002 sind in dieser Hinsicht widersprüchlich und in Sachseln (Unwetter 1997) wurden wiederum mehr Rutschungen pro Flächeneinheit in mittleren Lagen festgestellt. Dieses Resultat war jedoch seinerzeit mit der in dieser Höhenlage besonders hohen Niederschlagsintensität begründet worden.

Die vorliegenden Daten lassen insgesamt keine eindeutigen Schlüsse zu. Die Faktoren Exposition und Höhenlage können derzeit nicht als Kriterium für die Beurteilung der Gefahr von flachgründigen, spontanen Rutschungen verwendet werden.

5.3.2 Hangneigung

Die Hangneigung bei den Rutschungen muss an einer einheitlichen und (für Stabilitätsanalysen) möglichst repräsentativen Stelle gemessen werden. Bei den Erhebungen der WSL wird die lokale Neigung des ehemaligen Terrainverlaufes am Ort der Rutschung als repräsentativ erachtet. Deshalb wird die Neigung vom oberen Anrissrand bis zur Ausbisslinie auf Höhe des ehemaligen Terrains gemessen. Oft ist in Publikationen zu flachgründigen Rutschungen nicht klar deklariert, von wo bis wo die Neigung gemessen wurde. Falls Daten verschiedener Autoren gemeinsam ausgewertet werden, ist dies bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Aus bodenmechanischen Überlegungen ist die Hangneigung ein zentraler Einflussfaktor auf die Hangstabilität. Dies wird durch die Ergebnisse sowohl der früheren als auch der aktuellen Un-

tersuchungen der WSL bestätigt: in allen Perimetern ist jeweils ein klarer Zusammenhang zwischen der Neigung und der Häufigkeit der Rutschungen festzustellen. Die Rutschungen vom August 2005 entstanden in den untersuchten Perimetern bei Neigungen von 19 bis 45°. Dabei weist der grösste Teil (85%) Neigungen von 24 bis 40° auf. Die verschiedenen Studien der WSL wie anderer Autoren (z.B. Moser und Schoger 1989, Markart et al. 2007, Andreecs et al. 2002, Avanzi 2004, Polloni 1996, Jakob 2000) ergaben grundsätzlich ähnliche Werteverteilungen: erste Rutschungen ab Neigungen von ungefähr 20°, Mittelwert im Bereich von 30 bis 40°, bei Neigungen über 45° markante Abnahme der Rutschungshäufigkeit. Die Tatsache, dass in der Regel nur wenige Rutschungen in sehr steilen Lagen vorkommen, wird mehrheitlich auf die dort meist geringmächtige Lockergesteinsdecke zurückgeführt (z.B. Moser 1997).

Abgesehen von der Übereinstimmung im generellen Wertebereich existieren zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Studien dennoch einige Unterschiede. Beispielsweise sind bei den WSL-Perimetern 05 die Werte über einen weiteren Bereich verteilt und es kamen Rutschungen in flacheren Gebieten vor als in den Perimetern Napf 02, Appenzell 02 und Sachseln 97. Als Gründe für diese Unterschiede sind primär die Faktoren Disposition (Geologie, Hydrologie) und Topographie (Neigungsverhältnisse) zu nennen. Dass unterschiedliche Werteverteilungen jedoch nicht nur durch diese Faktoren zustande kommen können, zeigen die deutlich unterschiedlichen Ergebnisse aus den Perimetern Napf 02 (steiler) und Napf 05 (flacher), obwohl sie in sehr ähnlichen geologischen und topographischen Verhältnissen liegen. Hier dürften die unterschiedlichen Niederschlagsereignisse (2002: ca. 60 mm in 3 Stunden; 2005: ca. 250 mm in 3 Tagen) zu den erwähnten Differenzen geführt haben, sofern man davon ausgeht, dass bei lange anhaltenden Niederschlägen auch zunehmend in flacheren Gebieten Rutschungen auftreten.

In allen sechs bisher von der WSL untersuchten Gebieten sind Waldrutschungen an vergleichsweise steileren Hängen entstanden als Freilandrutschungen. Dieser Unterschied ist in fünf von sechs Perimetern signifikant (Rickli und Graf, in Vorbereitung). Ähnliche Resultate sind beispielsweise in Moser und Schoger (1989), Fazarinc und Mikos (1992) und Andreecs et al. (2002) dargestellt. Für die WSL-Studien konnte zudem gezeigt werden, dass auch die Minimalwerte der Neigungen im Freiland jeweils um 2 bis 3 Grad tiefer liegen als im Wald. Diese Ergebnisse können einerseits damit erklärt werden, dass der Wald in vielen Regionen allgemein auf steilem Gebiet stockt. Andererseits weisen sie auch auf die stabilisierende Wirkung des Waldes und insbesondere der Baumwurzeln hin.

Die Ergebnisse zu den Neigungen bei den Rutschungen zeigen für die verschiedenen Gebiete auf, in welchen Hanglagen bei extremen Niederschlägen spontane flachgründige Rutschungen vorkommen. Streuungsparameter der Werteverteilungen wie zum Beispiel die beschriebenen 80 oder 90%- Werte oder auch die von der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN vorgeschlagenen Werte, welche aus dem Mittelwert der beobachteten Neigungen minus der Standardabweichung ermittelt werden (AGN 2004), helfen, die gefährdeten Gebiete einer spezifischen Region grob abzugrenzen. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen scheint es dabei auch gerechtfertigt zu sein, für Wald- und Freiland unterschiedliche Verteilungen und damit unterschiedliche Grenzwerte anzunehmen. Allerdings ist zu bemerken, dass diese Betrachtungsweise nur für unbeeinflusste Rutschungen gilt. An Strassenböschungen, bei konzentrierten Wassereinleitungen, defekten Drainageleitungen, grossen Auflasten und bei Gerinneerosion muss auch bei geringeren Neigungen mit Hangbewegungen gerechnet werden.

5.3.3 Geländeform

Die Zusammenstellung der betroffenen Geländeformen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten lässt nur wenig allgemein gültige Schlüsse zu. Die Rutschungen der Ereignisse 2005, 2002 und 1997 traten jeweils in unterschiedlichen Geländeformen bevorzugt auf: in vier der sechs Perimeter vor allem im flächigen Gelände ohne Wölbung sowie in je einem Perimeter an Terrassenkanten und in Rinneformen. Allen Perimetern gemeinsam ist jedoch, dass in den Geländeformen mit konkavem Längenprofil kaum Rutschungen zu beobachten waren.

Aus der Literatur sind in diesem Zusammenhang verschiedene, zum Teil auch widersprüchliche Erfahrungen bekannt. Zum Beispiel stellen Aleotti (1996) und Moser (1980) fest, dass Muldenlagen und Terrassenkanten besonders stark gefährdet sind. Reneau und Dietrich (1987) weisen anhand von Unwetterereignissen in Kalifornien auf die Bedeutung von Muldenlagen hinsichtlich der Auslösung von flachgründigen Rutschungen und Murgängen hin. Gemäss Jakob (2000) sind Hänge mit konkavem oder gerade Längenprofilverlauf tendenziell stärker von Rutschungen betroffen. Muldenlagen werden oft als besonders anfällig auf Rutschprozesse taxiert, mit der Begründung, dass sich dort im Verlauf eines Extremereignisses am ehesten der Boden aufsättigt und gefährliche Porenwasserdrücke entstehen können. In verschiedenen weiteren Gebieten mit intensiven, flachgründigen Hangprozessen während Unwetterereignissen konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der Position der Instabilitäten und verschiedenen Geländeformen oder auch der Distanz zu einer Krete (als Hinweis auf die Einzugsgebietsgrösse) erkannt werden (Sidle et al. 1985). Auch weitere Inventare im benachbarten Ausland (Andreics et al. 2003, Markart et al. 2007, Avanzi et al. 2004, Moser und Schoger 1989) zeigen, dass die meisten Rutschungen nicht in Hohlformen sondern eher im Mittelhang bzw. in Geländeformen ohne erhebliche Wölbung auftraten. In verschiedenen Gebieten kamen jedoch auch vermehrt Rutschungen an Terrassenkanten vor.

Die Ergebnisse verschiedener Studien sind schwierig miteinander zu vergleichen, da jeweils nur wenig über die angewendeten Kriterien für die Einteilung in die unterschiedlichen Geländeformen bekannt ist. Um den Einfluss der Geländeform besser quantifizieren zu können, wären zudem vertiefte topographische Analysen in GIS erforderlich, welche Aussagen zum flächenmässigen Vorkommen der verschiedenen Geländeformen in den Untersuchungsgebieten erlauben würden. Mit den neu zur Verfügung stehenden präzisen LIDAR - Höhenmodellen (dtm-av, ©swisstopo) sind die diesbezüglichen Möglichkeiten erheblich verbessert worden.

Die Ergebnisse sind zu wenig sicher, als dass sie bei Gefahrenbeurteilungen im grösseren Stil angewendet werden könnten. Die Aussagen beschränken sich derzeit darauf, dass in Geländeformen mit konkavem Längenprofil nur äusserst selten flachgründige Rutschungen beobachtet werden können. Weitere Analysen mit Hilfe präziser Höhenmodelle könnten unter Umständen in dieser Hinsicht Fortschritte erzielen.

5.4 Abmessungen und Geometrie der Rutschungen

Bei den dokumentierten Hangprozessen in den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005 handelt es sich grösstenteils um kleine Rutschungen. Rund 75% der Rutschungen weisen ein Volumen von weniger als 300 m³ auf. Dass bei extremen Niederschlägen jeweils viele kleine und wenig grosse Rutschungen entstehen, zeigte sich bereits während der Unwetter 2002 und 1997 in der Schweiz. Analoge Erfahrungen wurden sowohl im benachbarten Ausland (z.B. Andreics et al. 2002) als auch in Übersee (Dai und Lee 2001, Malamud et al. 2004) gemacht.

Gemäss der Klassifikation in BRP, BWW, BUWAL (1997) fallen die Prozesse in die Kategorie der flachgründigen Rutschungen (mittlere Mächtigkeit ≤ 2.0 m). In Bezug auf die Intensität der Gefahrenprozesse, welche sich in der entsprechenden Empfehlung nach der mittleren Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht richtet, werden die untersuchten Rutschungen den Kategorien schwache (in Ausnahmefällen mittlere) Intensität zugeordnet. Wie bereits im Bericht zum Projekt Napf/Appenzell 2002 erwähnt, sind diese Definitionen zu überprüfen.

Die Ergebnisse aus den Perimetern zeigen übereinstimmend, dass bei Extremereignissen jeweils viele kleine und nur wenig grosse Hanginstabilitäten entstehen. Davon abgesehen sind zwischen den Untersuchungsgebieten aber auch gewisse Differenzen zu sehen. Die Rutschungsvolumina (sowohl der Median als auch die Streuung) lagen für die Perimeter 2005 insgesamt in einem höheren Bereich als für die Perimeter 2002 und 1997. Entsprechende Unterschiede sind auch bezüglich der einzelnen Abmessungen Länge, Breite und Mächtigkeit ersichtlich. Die Ursache dafür kann anhand der vorliegenden Daten nicht abschliessend eruiert werden. Für die in vergleichbaren topographischen und geologischen Verhältnissen liegenden Perimeter Napf 05 und

Napf 02 kommt jedoch insbesondere der unterschiedliche Ereignisniederschlag als Ursache in Frage (2002: ca. 60 mm in 3 Stunden; 2005: ca. 250 mm in 3 Tagen).

Oft wird vermutet, dass mit zunehmender Hangneigung die Abmessungen der Rutschungen kleiner werden. Ein derartiger Zusammenhang lässt sich anhand der Daten zwar im Ansatz erkennen, ist jedoch nur sehr schwach bzw. statistisch nicht signifikant. Einzig die sehr grossen Rutschungen werden in steilen Lagen über 40° eher seltener. Für die Gefahrenkartierung lässt sich dieser Aspekt jedoch nicht systematisch nutzen.

In den verschiedenen Untersuchungsgebieten wurde teilweise eine etwas unterschiedliche Geometrie der Rutschungen festgestellt: in den Gebieten Napf 05 und Appenzell 02 waren mehr breite Rutschungen und im Prättigau 05 und Napf 02 mehr flache Rutschungen zu beobachten. Als Einflussgrössen kommen die Geländeform für das Längen-/Breitenverhältnis und die Mächtigkeit der Lockergesteinsauflage für das Längen-/Tiefenverhältnis in Frage. Für die Gefahrenkartierung ist jedoch die Geometrie von untergeordneter Bedeutung. Die Zusammenhänge zwischen Vegetation und verschiedenen weiteren Standortsfaktoren auf die Abmessungen werden in den entsprechenden nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

5.5 Vegetation

Der Einfluss der Vegetation auf die Hangstabilität stand als Fragestellung beim vorliegenden Projekt nicht im Vordergrund. Trotzdem werden nachfolgend einige qualitative Angaben zu diesem Aspekt gemacht und die bei den Rutschungen vorgefundene Vegetation beschrieben.

5.5.1 Wald – Freiland

Zwischen Wald und Freiland sind in Bezug auf das Vorkommen und die Art der Rutschungen folgende Unterschiede festzustellen:

- In fünf von sechs untersuchten Perimetern ereigneten sich im Wald weniger Rutschungen pro Flächeneinheit als im Freiland. Der Perimeter Prättigau 05 bildet eine Ausnahme.
- In allen Perimetern ereigneten sich die Waldrutschungen in steileren Gebieten als die Freilandrutschungen. Weiter sind die flachsten Rutschungen pro Perimeter jeweils im Freiland entstanden. Dazu folgende Bemerkung: Allgemein ist das Gelände im Wald jeweils steiler als im Freiland; insbesondere weil die landwirtschaftliche Nutzung in steilen Lagen schwieriger ist und es sich nicht lohnte, diese Gebiete urbar zu machen. Aus den vorangehenden Ausführungen geht hervor, dass steilere (und eben oft bewaldete) Hänge grundsätzlich anfälliger auf Rutschungen sind.
- Zwischen den Standorten der Wald- und Freilandrutschungen sind in Hinsicht auf die geomorphologischen oder hydrologischen Verhältnisse kaum Unterschiede festgestellt worden.
- Bezuglich der Ausmasse existieren nur geringe Differenzen: betrachtet man alle Datensätze aus den verschiedenen Perimetern zusammen, sind Waldrutschungen etwas kleiner als Freilandrutschungen. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Flachgründige Rutschungen brechen nicht nur im Freiland an sondern auch im Wald. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass im Wald in der Regel weniger Rutschungen entstehen, obwohl er mehrheitlich in steileren und damit ungünstigeren Lagen stockt. Dies kann der stabilisierenden Wirkung des Waldes zugeschrieben werden. Verschiedene Inventare und Studien aus dem benachbarten Ausland, bei denen im Wald ebenfalls weniger Hanginstabilitäten festgestellt wurden, bestätigen diesen Sachverhalt (Moser 1980, Moser und Schoger 1989, Fazarinc and Mikos 1992, Markart et al. 2007). Die Ergebnisse erlauben jedoch keine Aussage über die Bedeutung der verschiedenen möglichen Waldwirkungen wie (1) Armierung der oberen Bodenho-

rizonte durch Baumwurzeln, (2) Durchdringung bzw. "Vernagelung" der Bruchzone mit Wurzeln, (3) Wirkung auf die physikalischen Bodeneigenschaften wie Durchlässigkeit, Dichte etc. und (4) günstige Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes.

Warum im Perimeter Prättigau derart viele Rutschungen im Wald entstanden sind, ist nicht klar. Einerseits weisen die vielen Waldlücken sowie die starke Beweidung auf einen schlechten Waldzustand und damit möglicherweise eingeschränkte stabilisierende Wurzelwirkung hin. Andererseits dürfte jedoch ein weiterer Grund auch in den speziellen geologischen Verhältnissen dieses Gebietes liegen, die sich wahrscheinlich ungünstig auf die Hangstabilität ausgewirkt haben. Der Felsuntergrund besteht im Perimeter Prättigau vorwiegend aus tonig-schieferigen Gesteinen, welche durch Moränenmaterial und Hangschutt unterschiedlicher Mächtigkeit und Durchlässigkeit überlagert werden. Oberhalb des Gebietes mit den häufigen Rutschungen sind die Gesteine des Felsuntergrundes besser durchlässig. Es ist davon auszugehen, dass das Wasser aus diesem Gebiet in normalen Wetterperioden mehrheitlich nicht in das unterhalb liegende, von Rutschungen stark betroffene Waldareal sickert. Während der Starkniederschläge vom August 2005 fand jedoch vermutlich infolge Anstieg des Bergwasserspiegels ein Überlauf des Wassers aus diesem System statt, was zu den zahlreichen Rutschungen im Wald des Prättigau-Perimeters geführt hat (AGN 2008, Rickli et al. 2008).

Ein zusätzlicher Effekt der Bestockung besteht im Einfluss auf den Transit und die Ablagerung von Hangmuren: während den Feldaufnahmen konnte mehrfach beobachtet werden, dass die Bestockung den Rückhalt von Bodenmaterial förderte (Abb. 5.1).



Abbildung 5.1: Wirkung des Waldes in der Auslaufstrecke von Hangmuren: durch eine dichte Bestockung kann ein erheblicher Teil des Bodenmaterials zurückgehalten werden.

5.5.2 Nutzung Freiland

Die Art und Intensität der Nutzung im Freiland beeinflusst die Pflanzenzusammensetzung, die Infiltrationsbedingungen für Regenwasser sowie die Bodeneigenschaften. Deshalb wird oft

vermutet, dass die landwirtschaftliche Nutzung auch einen Einfluss auf das Vorkommen von Rutschungen ausübt. Bei den Rutschungen im Freiland wurde deshalb die Nutzung beurteilt und in drei Kategorien eingeteilt: Wiese, Weide und einwachsende Flächen. Drei Viertel der untersuchten Rutschungen befanden sich in vorwiegend beweideten Flächen. In Bezug auf die Ausmasse (Volumen, Fläche, Mächtigkeit), die Neigungsverhältnisse und weitere Standortsbedingungen (Hydrologie etc.) konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Wald- und Freilandrutschungen festgestellt werden.

In steilen Lagen bilden sich bei intensiver Beweidung und entsprechendem Untergrund sogenannte Trittbermen (Abb. 5.2). Man kann davon ausgehen, dass die Verletzungen der Grasnarbe sowie die Mikrotopographie den Wassereintritt in den Boden erleichtern. Eine starke Beweidung bewirkt zudem oberflächliche Bodenverdichtung und verändert durch die Trittbelaustung, den Naturdünger und das Fressverhalten die Pflanzenzusammensetzung. Ob bzw. wie stark sich diese Effekte negativ auf die Hangstabilität auswirken, ist bis anhin unklar. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass sich intensive Beweidung auf die Oberflächenerosion auswirken, jedoch ist wenig bekannt über die Auswirkungen auf flachgründige Rutschungen.



Abbildung 5.2: Waldlücke mit zeitweiser Beweidung: stehendes Wasser in einer Trittberme.

Um den Einfluss der Beweidung auf die Hangstabilität quantifizieren zu können, müssten die Flächenanteile der unterschiedlichen Nutzungsarten aus landwirtschaftlichen Nutzungskarten bekannt sein, was für die Untersuchungsgebiete der Unwetter 2002 und 2005 nicht der Fall war. Bei der Untersuchung der Ereignisse von Sachseln 1997 konnte eine solche Nutzungskarte erstellt werden. Die entsprechenden Auswertungen zeigten, dass intensiv genutzte und beweidete Alpweiden etwas stärker von Rutschungen betroffen waren als extensiv genutzte (Rickli 2001). Allerdings sind die Resultate aufgrund der schmalen Datenlage eher als unsicher einzustufen. Nach von Wyl (1987) wird durch eine extensivere Bewirtschaftung eine standortsgemäße Vegetation mit vielfältiger und tiefgründiger Durchwurzelung erreicht, welche die Hangstabilität fördert. Untersuchungen im Urserental zeigen, dass die Rutschungen mit der Änderung der Be-

wirtschaftungsform zugenommen haben (Alewell et al., in Vorber.). Krummenacher (2007) fand im Rahmen einer Spezialuntersuchung im Perimeter Entlebuch 05 Hinweise, dass sich Nutzungsaufgabe mit Gehölzaufkommen tendenziell stabilisierend auf die Hänge bezüglich oberflächennaher Rutschungen auswirkt. Krauer (2004) konnte für die Ereignisse in der Surselva 2002 keine klaren Hinweise zum Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung auf das Vorkommen von flachgründigen Rutschungen herleiten. Als Grund wurden die spärlichen Informationen zur Nutzung sowie die Korrelation zwischen Hangneigung und Bewirtschaftung genannt.

5.5.3 Zustand Wald

Bei den Rutschungen im Wald wurde jeweils eine einfache Bestandesbeschreibung durchgeführt. Da flächendeckende Angaben zum Wald derzeit noch nicht zur Verfügung stehen, sind quantitative Aussagen zum Einfluss bestimmter Bestandescharakteristika auf die Hangstabilität nicht möglich. Weiterführende Arbeiten sind in diesem Zusammenhang vorgesehen und die erhobenen Felddaten sind die Grundlage dafür. Gewisse qualitative Angaben zu Wald bei den Rutschungen sind dennoch möglich.

Durch die zahlreichen Rutschungen im Wald des Perimeters Prättigau stellt sich unter anderem die Frage nach dem Einfluss des Waldzustandes auf das Vorkommen von Rutschungen. Vor allem in den rotenförmig strukturierten und meist beweideten Altbeständen (z.B. Rotwald) und in den einwachsenden Flächen war die Rutschungsaktivität sehr hoch. Dort ist gemäss gutachtlichen Beobachtungen der Deckungsgrad verhältnismässig klein. In den geschlossenen Altbeständen (z.B. Leidwald) war die Rutschaktivität wesentlich geringer. Beurteilungen vor Ort ergaben, dass bei mehr als 40% der Rutschungen die Bestockung lückig oder sogar aufgelöst ist. Dieser geringe Deckungsgrad lässt sich einerseits auf die zahlreichen einwachsenden Waldflächen (insbesondere an der Waldgrenze) und andererseits auf die Rottenstruktur vieler Altholzbestände zurückführen. Möglicherweise verhindert auch die fortwährende Beweidung weiter Teile des Waldes ein Aufkommen von Verjüngung in den Waldlücken.



Abbildung 5.3: Rutschung in einer Windwurffläche im Gebiet Napf.

Aufgrund der vielen Waldlücken und allgemein lockeren Bestockung wird in Teilen des Waldes im Perimeter Prättigau eine eingeschränkte stabilisierende Wurzelwirkung vermutet. Bei einem geringen Deckungsgrad kann man davon ausgehen, dass auch die Armierung durch Baumwurzeln reduziert ist. Im Rahmen einer quantitativen Analyse stellte Temperli (2007) fest, dass viele Rutschungen im Perimeter Prättigau in der unmittelbaren Nähe von Waldlücken entstanden waren. Bemerkenswert ist weiterhin, dass praktisch der ganze Rotwald, der eine extreme Dichte an Rutschungen aufweist, bis heute intensiv beweidet wird. Dem gegenüber ist die Aktivität in den unbeweideten Beständen (z.B. Leidwald) deutlich tiefer.

Im Wald des Perimeters Napf 05 existieren einige Sturmschadenflächen, welche namentlich durch den Sturm Lothar sowie auch durch spätere Ereignisse wie beispielsweise im Jahr 2000 entstanden waren. Auf diesen Schadenflächen wurden auffallend viele Rutschungen beobachtet (Abb. 5.3). Die Auswertungen für den Perimeter Napf 05 zeigen, dass die Rutschaktivität in den Windwurfflächen deutlich höher ist als in den übrigen Flächen. Dies ist ein weiterer Hinweis auf die Bedeutung des Waldzustandes hinsichtlich der Hangstabilität. Allerdings kommen auf Windwurf-Flächen nicht nur die fehlende Bodenverstärkung durch Baumwurzeln oder der regulierende Einfluss auf den Wasserhaushalt im Boden als Gründe für das Entstehen der Rutschungen in Frage sondern auch die Verletzung der Bodenoberfläche: Rutschungen entstanden in diesem Perimeter sehr oft im Bereich von ausgedrehten Wurzelstöcken, wo das Wasser besonders leicht in den Boden infiltrieren konnte.



Abbildung 5.4: Rutschungen in Wald-Schadenflächen im Grosstal, SZ, ausgelöst durch die Unwetter vom 20.06.07 (Bild: Ammann Ingenieurbüro, Eschenbach).

Die Untersuchung der Unwetter von Sachseln (Rickli et al. 2002) ergab Hinweise auf die Bedeutung des Waldzustandes im Zusammenhang mit flachgründigen Rutschungen. Insbesondere das Vorkommen von Lücken und Schadenflächen förderte damals offenbar das Vorkommen von Hanginstabilitäten erheblich. Dass auf Schadenflächen vermehrt mit flachgründigen Rutschungen zu rechnen ist, bestätigen auch aktuelle, nicht quantitativ abgestützte Beobachtungen wie zum Beispiel jene vom Grosstal SZ, wo im Juni 2007 sehr viele Rutschungen in Schaden-

flächen entstanden waren (Abb. 5.4). Der dargestellte Einfluss des Waldzustandes auf die Hangstabilität stimmt zudem mit Beobachtungen von Schmidt et al. (2001) und Markart et al. (2007) überein. Als weiterer Hinweis sollen die Ergebnisse von Jakob (2000) erwähnt werden, wonach in British Columbia in Kahlschlagflächen im Vergleich zur angrenzenden Bestockung im Schnitt deutlich mehr Rutschungen pro Fläche entstanden waren. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass – wo es nötig ist – mit waldbaulichen Pflegemassnahmen das Risiko von Schadenflächen reduziert und damit ein wesentlicher Beitrag zur Förderung der Stabilität gegenüber oberflächennahen Rutschungen geleistet werden kann.

5.6 Hydrologie, Hydrogeologie und Hangwasser

Nur wenig Rutschungen entstanden im Verlauf der Ereignisse vom August 2005 auf vernässten Standorten, d.h. auf Flächen, auf denen Zeigerpflanzen auf nasse bzw. staunasse Böden hinweisen. Dies stimmt mit den Untersuchungen der Ereignisse von 1997 (Sachseln) und 2002 (Gebiete Napf und Appenzell) überein. Damit erweist sich die Vernässung bei der Erstellung von Gefahrenkarten nicht als taugliches Kriterium, da auch auf nicht vernässten Standorten mit Rutschungen zu rechnen ist. Vernässte Standorte sind jedoch besonders kritisch zu beurteilen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Reneau und Dietrich (1987) wurden gemäss den Erhebungen im Feld oberhalb der Rutschungen nur selten markante Eintragslagen festgestellt. D.h. die Einzugsgebiete, welche in den Anrissbereich entwässern sind in der Regel klein und nicht besonders ausgeprägt. Rutschungen wurden also bei Weitem nicht nur dort ausgelöst, wo die topographischen Bedingungen zu einer Konzentration von viel ober- und unterirdischem Wasser führen.

Trotz der durchwegs trockenen Witterung während der Felderhebungen sowie auch insgesamt nach dem Ereignis wurde in den Rutschflächen der Perimeter Entlebuch 05 und Prättigau 05 eine erstaunlich grosse Wasserführung beobachtet: in ungefähr der Hälfte der Rutschflächen tropfendes oder sogar fliessendes Wasser. Dem gegenüber war die Wasserführung im Perimeter Napf 05 deutlich geringer und lag etwa im Bereich der Perimeter der Ereignisse 02 und 97. Dies könnte allenfalls damit zusammenhängen, dass die Felderhebungen im diesem Perimeter am Ende der langen Trockenperiode im Herbst 2005 stattfanden. Im Übrigen besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der grossen Wasserführung und den langen Auslaufstrecken in den Perimetern Entlebuch 05 und Prättigau 05.

Die Wasserführung auf der Gleitfläche wurde zum Teil mit grossem zeitlichen Abstand (d.h. bis zu vier Monaten nach den Unwetterereignissen) beurteilt. Die Witterungs- und Bodenwasser-verhältnisse entsprachen also nicht jenen während des Unwetters. Die Beurteilung der Wasserführung im Rahmen der Felderhebungen kann nur bedingt Rückschlüsse auf die Wasserführung während Extremereignissen liefern. Diesbezüglich ideal wäre eine Aufnahme unmittelbar nach einem Ereignis, was jedoch nur selten möglich ist. Die Beurteilung der Wasserführung in der Rutschfläche gibt einen Hinweis darüber, wie stark der Boden bereits unter "normalen" Bedingungen mit strömendem Wasser alimentiert ist.

Obwohl die Ergebnisse nicht konsistent sind, scheint die Wasserführung der Rutschungen aus dem Jahr 2005 im Vergleich zu jenen früherer Ereignisse eher grösser zu sein. Ein Grund dafür könnten die Niederschlagsverhältnisse sein. Im Gegensatz zu den Ereignissen 2002 und 1997 fiel insgesamt wesentlich mehr Regen, und es handelte sich um einen lang anhaltenden, mehrtägigen Niederschlag, bei dem laterale Sickerströmungen vermehrt auftreten können. Das verbreitete Vorkommen von Makroporen in den Böden zeigt, dass schnelle und umfangreiche Wasserflüsse im Boden grundsätzlich möglich sind.

Hydrogeologie und Hangwasser sind zwar grundlegende Faktoren für die Prozessauslösung, jedoch im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung schwierig anzuwenden. Einerseits, weil in den zu beurteilenden Gebieten in der Regel zu wenig Aufschlüsse zur Beurteilung der Hangwasserverhältnisse bestehen und eine Beurteilung "von aussen" bei einer Begehung nur sehr schwierig ist.

Andererseits zeigen die Resultate, dass auch auf vielen Standorten Hanginstabilitäten stattfanden, bei denen im Verlauf der Feldaufnahmen (d.h. unter "normalen" Bedingungen bzw. nicht während Extremniederschlägen) keine Anzeichen für erhöhte Wasserführung beobachtet wurden. Wo jedoch Hinweise auf erhöhte Hangwasserführung gefunden werden, sind diese Standorte bei der Gefahrenbeurteilung besonders gut zu untersuchen.

Im Bezug auf die extremen Wasserdrücke im Boden wurden in den verschiedenen Gebieten Beobachtungen gemacht, welche zwar wissenschaftlich nicht auswertbar sind, jedoch trotzdem Hinweise zum Prozessablauf geben können. Beispielsweise sind im Perimeter Napf 05 auffallend viele Rutschungen in Kretenlagen entstanden. In einigen dieser Rutschflächen wurde kurz nach der Auslösung mit hohem Druck aus Felsspalten austretendes Wasser beobachtet. Inwiefern dies mit einem hohen, von unten alimentierten Bergwasserspiegel erklärt werden kann, ist zu diskutieren. Ähnliche Beobachtungen wurden während dem Ereignis im Perimeter Prättigau gemacht. So berichten Ortsansässige, von fontänenartigen Wasseraustritten aus den Hängen. Aus dem Perimeter Entlebuch sind keine derartigen Beobachtungen bekannt. Extreme Wasserdrücke in Verbindung mit der Auslösung von flach- oder mittelgründigen Rutschungen wurden jedoch auch in anderen Regionen beobachtet, so z.B. im Kanton Obwalden (Berwert-Lopes 2006).

5.7 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Geländeformen wie Rutschschnischen und buckelförmige Ablagerungen, rezente Anrisszonen, überschobene Horizonte im Bodenprofil oder auch die Vegetation (Säbelwuchs, Schiefstand) weisen auf alte Rutsch- und Kriechbewegungen hin. Im Gegensatz zum Wald werden im Freiland Rutschungen zum Teil rasch wieder verbaut, so dass Anzeichen wie Rutschschnischen und – buckel im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung dort nicht mehr leicht erkennbar sind. Informationen Ortsansässiger zu früheren Ereignissen sind in jedem Fall eine wichtige Grundlage.

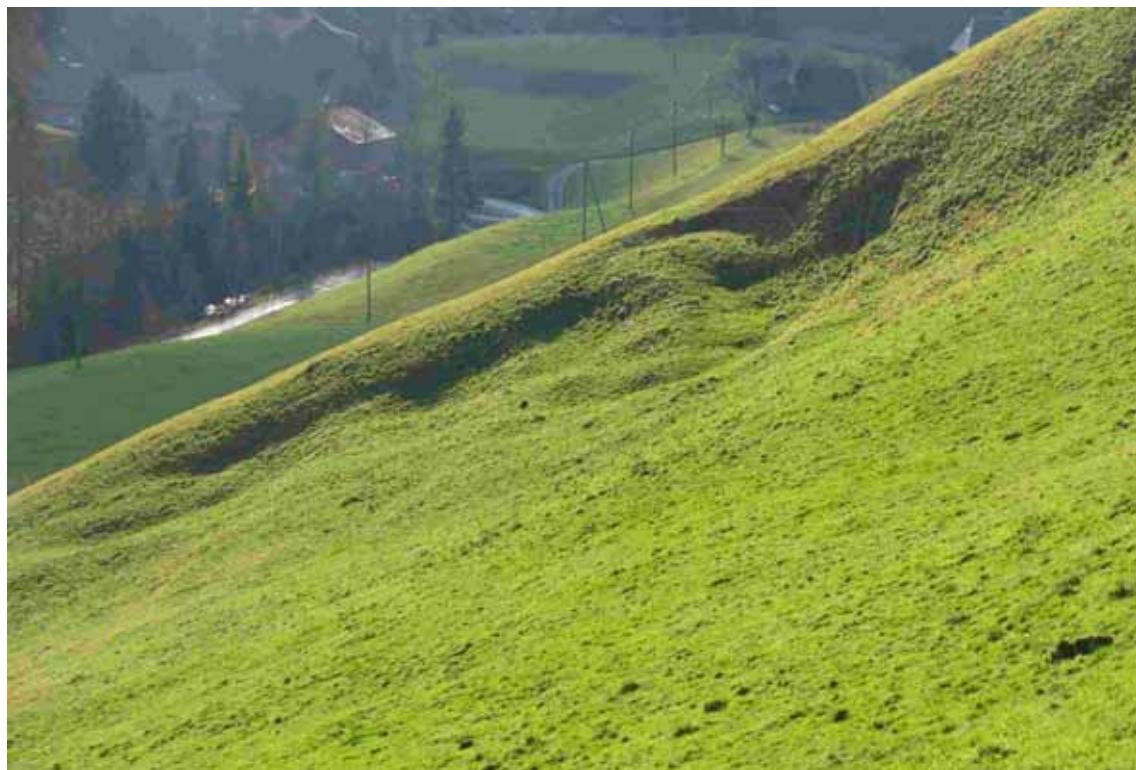


Abbildung 5.5: Nischen und Buckel: deutliche Anzeichen früherer Rutschbewegungen.

Die Untersuchungen der Ereignisse 05 zeigten beim grössten Teil der Rutschungen Anzeichen früherer Hangbewegungen. Mehrheitlich wurden sie als markant beurteilt. Bei einem Viertel der Rutschungen 05 fanden sich auch rezente Rutschbewegungen, d.h. die nicht älter als etwa 15 Jahre sind. Die weitaus häufigsten Merkmale waren Geländeformen wie alte Anbruchnischen und Ablagerungsbuckel (zwei Drittel der Fälle). Die Ergebnisse stimmen mehrheitlich mit jenen früherer Untersuchungen (Sachseln 1997 und Napf/Appenzell 2002) überein und weisen auf eine grosse Bedeutung der Berücksichtigung von Anzeichen alter Rutschbewegungen bei der Beurteilung und Erkennung potentiell gefährlicher Gebiete hin.

5.8 Geologie

5.8.1 Festgestein

Das Untersuchungsgebiet Napf 05 liegt in der Oberen Süsswassermolasse mit den vorherrschenden Gesteinen Nagelfluh, Sandstein, Mergel und den entsprechenden Wechsellagerungen. Der Perimeter Entlebuch 05 liegt in der Unteren Süsswassermolasse mit Sandsteinen, Mergeln, Nagelfluh und entsprechenden Wechsellagerungen. Die Geologie des Perimeters 05 Prättigau wird vom Prättigauer Flysch bzw. Bündner Schiefer mit Sand- und Kieselkalken in Wechsellaagerung mit Mergelschiefern bestimmt. Die früheren WSL-Untersuchungsgebiete liegen in der Unteren Süsswassermolasse (Appenzell 02), in der Oberen Süsswassermolasse (Napf 02; wie Napf 05) und in den Helvetischen Decken mit Kalken, Mergel, etc. (Sachseln 97).

Für die Untersuchungsgebiete der Ereignisse 05 und 02 liegen leider keine detaillierten geologischen oder geotechnischen Kartierungen vor, aus der die Flächenanteile der vorkommenden Gesteine hervorgehen. Deshalb konnte der Quotient aus Anzahl Rutschungen mit bestimmtem Festgestein pro Flächenanteil dieses Festgesteins im Untersuchungsperimeter, der auf den Einfluss der Gesteine auf die Hangstabilität hinweist, nicht berechnet werden. Für das Untersuchungsgebiet Sachseln besteht hingegen eine geologische Karte 1:50'000. Besonders hohe Rutschaktivität wurde dort in den Gebieten mit Amdenermergel und Drusbergschichten festgestellt. Zudem wurde beobachtet, dass bei diesen mergeligen Gesteinen oftmals eine Verwitterungsschicht entsteht, die ungünstige geotechnische Eigenschaften aufweist.

Bei der Untersuchung der Ereignisse 2002 waren Rutschungen auf Nagelfluh in steileren Gebieten entstanden als die Rutschungen auf anderem Untergrund. Dies wurde dahingehend interpretiert, dass Standorte mit Nagelfluh als Gesteinsunterlage tendenziell stabiler sind als Standorte mit beispielsweise Mergel und Sandstein. Bei den Rutschungen von 2005 ist dieser Zusammenhang nicht mehr zu sehen. Aus bodenmechanischer Sicht kann postuliert werden, dass Verwitterungsprodukte aus Gesteinen mit tonig/siltigen/sandigen Komponenten (z.B. Wechsellagerungen Mergel mit Sandstein) besonders kritisch bezüglich Hangstabilität sind. Entsprechende Auswertungen zeigen, dass in mehreren Perimetern tatsächlich die Neigungen bei den Rutschungen mit mergeligen Gesteinen etwas tiefer sind. Die Unterschiede sind jedoch nur sehr gering. In geologischen Einheiten, welche aus Wechsellagerungen bestehen, kann im Allgemeinen nur mit erheblichem Aufwand bestimmt werden, wo und in welchem Mass die eher günstigen Nagelfluhschichten anstehen bzw. wo sich die ungünstigen Mergel- und Sandsteinschichten befinden. Die örtliche Variabilität der Gesteine auf engstem Raum stellt deshalb in Bezug auf die Gefahrenbeurteilung und -kartierung ein wesentliches Problem dar.

Da im Untersuchungsgebiet Entlebuch zwei entgegen gesetzte Flanken vorkommen, konnte unter anderem auch der Einfluss des Schichtverlaufs des Festgesteins untersucht werden (Schichten senkrecht zum Hang bzw. hangparallel). Für die beiden Flanken ergaben sich allerdings fast dieselbe Rutschaktivitäten und somit kann für dieses Gebiet ein Einfluss des Schichtverlaufs auf die Rutschgefährdung nicht nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu waren während der Unwetter von Sachseln 1997 in Gebieten mit hangparalleler Schichtung etwas mehr Rutschungen entstanden.

Allgemein zeigen die Resultate aus den untersuchten Perimetern zur Geologie nur wenig klare Möglichkeiten auf, wie geologische Grundlagen im Rahmen der Kartierung von flachgründigen Rutschungen besser einbezogen werden können. Die Auswertungen zum gesamten Schadengebiet der Schweiz lassen nur einige grobe Hinweise zu: bei vergleichbarem Niederschlag sind in Gebieten mit Molasse als geologischem Untergrund besonders viele Rutschungen pro Flächen-einheit und in Gebieten mit kristallinem Untergrund nur sehr wenige Rutschungen beobachtet worden.

5.8.2 Lockergestein

Als Lockergesteine kommen in den Untersuchungsgebieten der Ereignisse 2005 insbesondere Gehängeschutt/-lehm, Moräne und Bachablagerungen vor. In allen Gebieten wurde bei den Rutschungen am häufigsten Gehängeschutt/-lehm gefunden. Daneben entstanden im Perimeter Entlebuch 05 einige wenige Rutschungen in Moräne und im Perimeter Napf 05 in Bachablagerungen. Im Untersuchungsgebiet Prättigau 05 entstanden immerhin rund zwei Fünftel der Rutschungen in Moräne. Wie beim Festgestein kann der Einfluss der Lockergesteinseigenschaften auf die oberflächennahen Rutschprozesse nicht quantifiziert werden, da die räumliche Verteilung der verschiedenen Lockergesteine in den Untersuchungsgebieten nicht oder nicht ausreichend exakt kartiert ist. Dies ist auch bei den früheren Untersuchungen zu flachgründigen Rutschungen der WSL der Fall.

Im Rahmen der Profilansprache am oberen Anrissrand wurde das Lockergestein nach USCS klassiert und darauf basierend eine Einteilung in die drei Klassen feinkörnig (tonig-siltig), mittelkörnig (sandig) und grobkörnig (kiesig) vorgenommen. Im Entlebuch dominiert bei den Rutschungen feinkörniges, im Prättigau fein- und grobkörniges und im Napf grobkörniges Material. Bei den Untersuchungen von 2002 waren besonders die mittelkörnigen Böden stark vertreten und im Perimeter Sachseln die fein- und grobkörnigen. Die Neigungsverhältnisse sind bei den Rutschungen mit feinkörnigen Böden vergleichsweise flacher als bei den übrigen Rutschungen. Dies weist darauf hin, dass die Körnung des Lockergesteins sich auf die Hangstabilität auswirkt, indem in Gebieten mit feinkörnigem Lockergestein Rutschungen bei tieferen Neigungen zu erwarten sind.



Abbildung 5.6: Bodenprofil mit grobkörnigem Lockergestein (links) und mit feinkörnigem Lockergestein auf Bodenhorizont mit zusätzlich eingeschränkter Durchlässigkeit (rechts).

Aufgrund von bodenmechanischen Überlegungen ist davon auszugehen, dass die geologischen Verhältnisse bzw. die Eigenschaften der Locker- und Festgesteine einen entscheidenden Einfluss auf die Hangstabilität im Fall von oberflächennahen Rutschungen ausüben. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen diesen Zusammenhang nur teilweise. Es ist nahe liegend, dass – wo Kenntnisse über die Locker- und Festgesteine zur Verfügung stehen – diese bei einer Gefahrenbeurteilung einzubeziehen sind. Allerdings sind in den meisten Fällen die entsprechenden Grundlagen nicht in ausreichendem Detaillierungsgrad vorhanden.

5.9 Bodenanalysen und Stabilitätsrechnungen

Bei insgesamt 16 Rutschungen wurde jeweils eine Lockergesteinsprobe aus dem Bereich des Bruchhorizontes bzw. der Gleitfläche entnommen. Die Analyse der Proben im Labor ermöglichte eine Klassifikation der Lockergesteine und damit auch die Herleitung wichtiger Bodenkennwerte, welche zur Durchführung einfacher bodenmechanischer Modellbetrachtungen dienten.

Die ermittelten Kornverteilungen decken einen sehr weiten Bereich ab, wie dies bereits auch bei den Untersuchungen der Ereignisse 2002 und 1997 der Fall war. Im Vergleich dazu erweitern Moser und Hohensinn (1983) die Spannweite der Kornverteilungen bei flachgründigen Rutschungen in Richtung grobkörnige Böden, und Meisina und Scarabelli (2007) in Richtung feinkörnige Böden. Für die Böden aus den drei WSL-Untersuchungsgebieten 2005 wurden basierend auf den Kornverteilungskurven sowie der Klassierung der Böden Scherwinkel von 25 bis 36° abgeleitet. Obschon bei der Probenentnahme bewusst Extremfälle ausgewählt worden waren, zeigen diese Ergebnisse dennoch, dass in den Untersuchungsgebieten flachgründige Rutschungen in sehr unterschiedlichen Böden mit entsprechend unterschiedlichen Bodeneigenschaften entstehen können.

In Übereinstimmung mit den früheren WSL-Untersuchungen weisen die vorliegenden Ergebnisse auch auf erhebliche Schwierigkeiten bei der Anwendung des Modells der unendlich langen Böschung hin. Dies zeigt sich beispielsweise daran, dass nach den Berechnungen der grösste Teil der Hänge bei den Rutschungen fälschlicherweise bereits ohne zusätzliche Infiltration von Regenwasser instabil wäre. Indem eine Wirkung der Vegetation mittels Scherwinkelerhöhung eingeführt wird, können etwas realistischere Ergebnisse erzielt werden. Zudem wurden Berechnungen unter Berücksichtigung einer erhöhten Lagerungsdichte (in Steillagen zu erwarten) sowie der materialabhängigen Kohäsion durchgeführt. Bei entsprechender Wahl der Eingangsparameter kann dabei für alle betrachteten Rutschungen für trockene Verhältnisse Stabilität berechnet werden. Allerdings ergeben sich dann Probleme, indem bei voller Aufsättigung verschiedene dieser Hänge nicht ins Rutschen geraten. Letztlich bleiben viele Fragen in Bezug auf die bodenmechanischen Berechnungen offen. Dies weist auch darauf hin, dass Kartierungsmethoden und -modelle, welche stark auf die Bodenmechanik abstützen, mit Erfahrungswerten aus Unwetterereignissen (Bereiche von Neigungen bei den Rutschungen etc.) zu ergänzen sind, damit bessere Resultate erzielt werden können.

Mit den vorliegenden Daten (Ergebnisse Bodenanalysen, Beobachtungen bei den Rutschungen) sind jedoch die wichtigsten Grundlagen für eingehendere Analysen und Berechnungen vorhanden. Zu untersuchen sind in Zukunft unter anderem die folgenden Aspekte:

- Einfluss der Vegetation (Wald/Freiland) bei den Anwendung von bodenmechanischen Modellen
- massgebende Prozesse bei der Auslösung der Rutschbewegung: Gleiten, hydraulischer Grundbruch, "Hangwasserexplosion" etc.
- Bodenmaterial: Repräsentativität des entnommenen Probematerials sowohl in vertikaler Hinsicht für den Profilaufbau als auch in hangparalleler Hinsicht für die Bruchzone

5.10 Bodeneigenschaften

Bei den Rutschungen wurden jeweils verschiedene Aspekte der Böden beurteilt: die Bodenentwicklung, die Wasser-Durchlässigkeit, die Makroporen sowie die Durchwurzelung. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, hinsichtlich Hangstabilität relevante Bodeneigenschaften bzw. Kombinationen derselben zu identifizieren. Da keine detaillierten Bodenkarten zur Verfügung stehen, kann der Einfluss der verschiedenen Bodeneigenschaften auf das Rutschgeschehen nur gutachtlich abgeschätzt werden. Presler und Zürrer (in Vorber.) geben jedoch erste Hinweise zum Potential von Bodenkarten im Zusammenhang mit der Gefahr von flachgründigen Rutschungen. Weiter erscheint es sinnvoll, in einer künftigen Untersuchung das Potential von Standortskarten im Wald hinsichtlich Gefahrenkartierung abzuklären.

Bodenentwicklung: Die Ergebnisse aus den verschiedenen WSL-Untersuchungsperimetern hinsichtlich der Bodenentwicklung sind nicht konsistent. Während in einigen Perimeter mehr entwickelte Böden betroffen waren, war dies bei anderen Perimetern umgekehrt. Da Rutschungen jedoch sowohl in Rohböden als auch in entwickelten Böden vorkommen, wird dieser Aspekt für Gefahrenbeurteilungen insgesamt als ungeeignet beurteilt. Allen Untersuchungen gemeinsam ist, dass bei den Rutschungen nur in wenigen Fällen starker Hang- oder Stauwassereinfluss beobachtet wurde. Eine Kartierung der vernässten Gebiete ist deshalb nicht ausreichend, um damit gefährdete Gebiete von ungefährdeten abzugrenzen.

Makroporen: Im überwiegenden Teil der Böden der Untersuchungsgebiete 2002 und 2005 wurden Makroporen wie Wurmgänge, Wurzelkanäle und Mauslöcher festgestellt (für Sachseln 97 bestehen keine vergleichbaren Daten). Damit ist eine schnelle Infiltration von Regenwasser an den meisten Orten möglich und auch die Voraussetzung für schnelle Aufsättigung der Böden gegeben. Dies zeigt sich beispielsweise auch daran, dass zahlreiche Hinweise auf starken Wasserfluss in den Makroporen gefunden wurden – beispielsweise ausgewaschene Wurmlöcher und Wurzelkanäle. Nicht alle Arten von Makroporen reichen bis in die gleichen Tiefen und sind in Bezug auf die Durchfeuchtung und Ausbildung der Bruchzone im Boden gleich bedeutend. Während in den Untersuchungsgebieten 05 Wurzelkanäle in den meisten Fällen bis in den Bereich des Bruchhorizontes beobachtet wurden, war dies bei den Wurmgängen nur ungefähr in der Hälfte der Bodenprofile der Fall. Mauslöcher wurden nur in den obersten Bodenschichten beobachtet. In den Untersuchungsgebieten 2002 ergaben sich ähnliche Resultate. Allerdings waren damals insgesamt mehr Makroporen protokolliert worden, welche bis in den Bruchhorizont reichten. Zum Untersuchungsgebiet Sachseln sind dazu keine Daten ausgewertet worden.

Leider können anhand der vorliegenden Daten keine Aussagen zum Einfluss der Niederschlagsdauer und -intensität auf die Sättigung bzw. Entleerung der Böden und damit zur Bedeutung der Makroporen auf die Auslösung der Rutschungen gemacht werden. Zudem ist über die transportierten Wassermengen im Boden sowie über die Transportgeschwindigkeiten und damit letztlich über die Bedeutung der unterschiedlichen Makroporenarten leider nicht viel bekannt.

Durchwurzelung: Wie zu erwarten, sind die Böden bei den Waldrutschungen intensiver mit Hauptwurzeln (Durchmesser mindestens 2 mm) durchwurzelt als bei den Freilandrutschungen. Zudem ist der durchwurzelte Raum im Wald in den meisten Untersuchungsperimetern mächtiger als im Freiland. Dieses Resultat ist ein Hinweis auf eine positive, stabilisierende Wirkung der Waldvegetation. Allerdings ist in vielen Fällen die Mächtigkeit des Wurzelraumes geringer als die Tiefe der Gleitschicht, d.h. die Wurzeln durchdringen die Gleitfläche mehrheitlich nicht. Diesbezüglich ist jedoch auf die Bedeutung der lateralen Wurzelwirkung (Verstärkung im Anriß und in den seitlichen Bruchflächen) sowie auf die Verbindung von lockeren, oberflächennahen Bodenschichten mit tieferen, dichteren und stabileren Bodenschichten durch Wurzeln hinzuweisen.

Durchlässigkeit: Die Böden - insbesondere die obersten Bodenhorizonte - sind gemäß den Felderhebungen im Allgemeinen gut wasserdurchlässig. Damit kann davon ausgegangen werden, dass auch aus dieser Sicht das Niederschlagswasser gut in die obersten Bodenschichten infiltrieren konnte. Vielfach ist jedoch im Profil von der Bodenoberfläche bis zur Gleitfläche eine kontinuierliche, manchmal auch sprunghafte Abnahme der Durchlässigkeit festzustellen. Die Mächt-

tigkeit der durchlässigen Bodenhorizonte beträgt in den Perimetern 05 in der Regel zwischen etwa 0.5 und 1.0 m. Spätestens im Übergang vom Lockergestein zum Festgestein ist in den meisten Fällen mit einem markanten Rückgang der Durchlässigkeit und damit bei intensiven Niederschlägen mit einem Wasserstau zu rechnen. Im Zusammenhang mit Gefahrenbeurteilungen sind gut durchlässige Böden auf stark gehemmt durchlässigen bis undurchlässigen Ausgangsmaterialien als kritisch zu beurteilen.

5.11 Rutschmechanismen - Abfliessvorgang

5.11.1 Rutschmechanismus – Ort der Gleitfläche

Der weitaus grösste Teil der Rutschungen wurde als Translationsrutschung (vorwiegend hangparallele Bewegung) beurteilt. Diese verliefen in den Perimetern Entlebuch 05 und Prättigau 05 mehrheitlich innerhalb des Lockergesteins, in den übrigen Perimetern jedoch überwiegend an der Grenze zwischen Lockergestein und Felsoberfläche. In den Perimetern Napf 05 und Sachseln 97 wurden jedoch auch erstaunlich viele Rutschungen mit rotationsförmiger Bewegung beobachtet, welche in sehr vielen Fällen innerhalb des Lockergesteines verliefen. Man kann davon ausgehen, dass weniger die Bodeneigenschaften wie zum Beispiel der Feinanteil über die Art der Bewegung entscheiden als vielmehr die Hanggeometrie und die Mächtigkeit der Lockergesteinsauflage. Die Bewegungsform (Translation bzw. Rotation) ist im Zusammenhang mit Gefahrenbeurteilungen wesentlich weniger von Bedeutung als beispielsweise die Fragen, welcher Anteil der Rutschmasse murgangförmig abfliest und wie lang die Fliessstrecke ist.

5.11.2 Materialverlagerung

Für die Gefahrenbeurteilung und –kartierung ist es wichtig zu wissen, wieviel Material aus dem Bereich der Gleitfläche verlagert wird und als Hangmure abfliest. In der Mehrzahl der Untersuchungsgebiete verblieb beim grössten Teil der Rutschungen weniger als etwa ein Drittel des Bodenmaterials in Verbindung mit der Gleitfläche, d.h. ein erheblicher Teil floss als Hangmure ab. Dieser Sachverhalt wurde auch im Napf/Appenzell (2002) und in Sachseln (1997) festgestellt. Das Untersuchungsgebiet Napf 05 ist diesbezüglich ein Spezialfall, indem dort auch zahlreiche Rutschungen mit geringer Materialverlagerung beobachtet wurden. Welche Faktoren das Ausmass der Materialverlagerung bestimmen, muss im Rahmen von weiteren Auswertungen untersucht werden. Bisher zeigen sich wider Erwarten - falls überhaupt - nur schwache Zusammenhänge zwischen verschiedenen Faktoren und der Materialbilanz. Zum Beispiel sind auch hinsichtlich der Hangneigung und der Lockergesteinseigenschaften keine klaren Trends ersichtlich. Ebenfalls unklar ist, inwiefern die Niederschlagsmenge und –summe und damit das Ausmass der Wassersättigung des Bodenmaterials die Materialverlagerung beeinflusste.

5.11.3 Auslaufstrecke und Pauschalgefälle

Neben der Lokalisierung rutschgefährdeter Gebiete ist für die Gefahrenkartierung auch die Frage von Bedeutung, bis in welche Distanz zum Entstehungsort die Rutschmassen abfliessen und dort Leben und Sachwerte gefährden können. Werden alle verfügbaren Daten (Ereignisse 2005 und 2002, ungestörte und vollständig einsehbare Auslaufstrecken) zusammen ausgewertet, ergibt sich eine grosse Bandbreite sowohl bezüglich Auslaufstrecken (bis über ungefähr 500 m) als auch hinsichtlich Pauschalgefälle (16 bis 40°). Allerdings betragen die Auslaufstrecken in den meisten Fällen weniger als 100 m und die Pauschalgefälle sind meistens grösser als 20°. Die Hangmuren in den Gebieten Entlebuch und Prättigau 05 sind vergleichsweise weiter ausgelaufen und im Gebiet Entlebuch 05 sind die flachsten, im Gebiet Napf 02 die steilsten Pauschalgefälle beobachtet worden.

Verschiedene Hypothesen hinsichtlich des Einflusses hydrologischer Faktoren (Ereignis, Vorrägen usw.) oder typischer Standortseigenschaften (z.B. Bodenbeschaffenheit) auf Transit und Ablagerung von Hangmuren wurden überprüft, liessen sich jedoch anhand der vorliegenden Daten nicht bestätigen. Einen schwachen Einfluss scheint das Volumen sowie die Neigung im Anrissgebiet auf den Ablauf der Hangmuren auszuüben: flachere Pauschalgefälle bei tieferen Neigungen und bei grösseren Volumina. Ebenso sind Rutschungen, die an der Grenze zwischen Locker- und Festgestein abgeglitten sind, offenbar etwas weiter ausgelaufen. Weitere Analysen sind notwendig. Wichtige Erkenntnisse sind von der Entwicklung und Verbesserung von Modellen für die Simulation von Hangmuren wie beispielsweise RAMMS (McArdell et al. 2008) zu erwarten.



Abbildung 5.7: Hangmuren im Untersuchungsgebiet Prättigau.

Beobachtungen: Verschiedene Hangmuren - insbesondere auch im Perimeter Prättigau (Abb. 5.7) - flossen in kleine Bachrinnen und erreichten durch die topographische Konzentration weite Auslaufstrecken. Bei stark strukturierter Topographie kann davon ausgegangen werden, dass die Auslaufstrecken zwar länger werden, die Gefahr jedoch dank der klareren Fliesswege besser beurteilbar ist. Zu den Geschwindigkeiten der Rutschbewegungen lassen sich aufgrund der wenigen Angaben nur beschränkt Aussagen machen. Für den Perimeter Prättigau wird vermutet, dass die Geschwindigkeiten der Rutschungsbewegungen innerhalb kleiner Gebiete zum Teil erheblich variieren. Belegt sind einige Rutschungen, die weniger als Schritttempo aufwiesen. Aufgrund der Abflussspuren, der tiefen Pauschalgefälle und der grossen Auslaufstrecken wird aber angenommen, dass einige Rutschungen mit grosser Geschwindigkeit zu Tal geflossen sind.

5.12 Beeinflussung der Rutschauslösung

Vollständige Datensätze wurden nur von Rutschungen erhoben und in die Auswertungen einbezogen, die nicht durch klar erkennbare Ursachen wie Strassen oder Gerinneerosion ausgelöst worden waren. Bei ungefähr einem Fünftel dieser Rutschungen war jedoch eine Beeinflussung der lokalen Situation durch den Menschen beobachtet worden, welche zwar nicht hauptsächlich verantwortlich für die Auslösung gewesen war, aber dennoch mithalf, den Hang zu destabilisieren.

Oft wird der Strassenbau für zahlreiche Hanginstabilitäten verantwortlich gemacht. In den Perimetern 2005 wurden zwischen 5% und maximal einem Fünftel der Rutschungen massgeblich durch Strassen beeinflusst. Bezogen auf die Erschliessungsdichte ergeben sich Werte zwischen etwa 0.3 und 0.7 Rutschungen pro Kilometer Strassen und Wege. Beim Bau von Strassen müssen in Hanglagen oft steile Böschungen realisiert werden, welche aus nahe liegenden Gründen besonders stark gefährdet sind. Diesem Aspekt kann beim Neubau von Strassen und Wegen mit einer geschickten Linienführung bzw. der Geländeanpassung zu einem gewissen Grad Rechnung getragen werden. Wichtig sind aber auch andere Punkte, wie zum Beispiel die sorgfältige Ableitung des Strassenwassers.



Abbildung 5.8: Mit Holzkisten verbaute Rutschungen an Strassenböschungen (Perimeter Entlebuch).

5.13 Niederschlags-Schwellenwerte

Derzeit und auch in naher Zukunft ist eine punktgenaue Kartierung der Gefahr durch flachgründige Rutschungen nicht möglich. Eine bestimmte Gefährdung kann nur für grössere Gebiete ausgewiesen werden. Wo sich innerhalb der bezeichneten Gebiete eine Rutschung löst, kann auch in naher Zukunft nicht genau vorausgesagt werden. Zudem ist auch schwierig zu prognostizieren, wie weit die Hangmuren fliessen. Dazu trägt beispielsweise auch die Tatsache bei, dass die Bindung von Hangmuren an die Topographie im Gegensatz zu den Wildbächen oder Lawinen weniger stark ist. Aufgrund der eingeschränkten Prognosemöglichkeiten kommt der Warnung besondere Bedeutung zu.

Für die WSL-Perimeter der Unwetterereignisse 05 wurden deshalb Niederschlagssummen und -intensitäten ermittelt, ab welchen es zu ersten Rutschungen kam. Für einen Zeitpunkt ab dem 18.08.05 betrugen die Niederschlagssummen bis zur Auslösung der ersten Rutschungen ungefähr 120 bis 140 mm und die Niederschlagsintensität zum Auslösezeitpunkt (Regensumme in der Stunde der Auslösung) betrug jeweils 5 mm pro Stunde oder mehr. Ähnliche Auswertungen wurden im Weiteren über die gesamte Schweiz gemacht (verbreitet Hangprozesse ab ca. 160 mm Regensumme) sowie für Gebiete in der unmittelbaren Umgebung von ANETZ-Messstationen (verbreitet Hangprozesse ab ca. 100 mm Regensumme).

Bei diesen Auswertungen bestehen gewisse Unsicherheiten. Die Resultate sind beispielsweise stark abhängig von der ausgewerteten relevanten Niederschlagsperiode: soll die Summe über die 10 Stunden oder 10 Tage bis zum Ereignis betrachtet werden? Zudem bestehen zwischen verschiedenen Niederschlagsdaten (Messstationen, gegitterte Pluviometer- und Radardatensätze) teilweise markante Unterschiede. Nicht zuletzt sind auch die gemeldeten Zeitpunkte der Rutschungen unsicher. Zwar konnten anhand der Unwetter 05 erste Erfahrungen zu Niederschlags-Schwellenwerten gesammelt werden. Insgesamt sind jedoch weitere Anstrengungen erforderlich. Diese betreffen einerseits die Methodik (z.B. Definition relevante Niederschlagsperiode), andererseits aber auch die Daten (für Nowcasting geeignete Niederschlagsdaten, Erfassung der genauen Zeitpunkte von Prozessauslösungen anlässlich künftiger Unwetterereignisse).

5.14 Offene Fragen – weiterführende Arbeiten

Im Zusammenhang mit der Entstehung von flachgründigen Rutschungen und dem Ablauf von Hangmuren bestehen zahlreiche offene Fragen und entsprechend sind verschiedene Forschungsaktivitäten im Gang. Beispielhaft erwähnt sei das Projekt Triggering of Rapid Mass Movements in Steep Terrain TRAMM im Rahmen des Kompetenzzentrums Umwelt CCES der ETH (<http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/tramm/>). Bezogen auf die Arbeiten am Projekt "Flachgründige Rutschungen" im Rahmen der Ereignisanalyse der Unwetter 2005 ergaben sich verschiedene Fragen, welche bis anhin noch nicht oder zu wenig bearbeitet werden konnten und die für die Beurteilung und Kartierung von flachgründigen Rutschungen relevant sind:

- Anwendung von bestehenden Kartierungsmodellen und –methoden auf die untersuchten WSL-Perimeter zur Überprüfung und Verbesserung der Prognosequalität
- Einfluss Geländeform/Geomorphologie: mit hoch aufgelösten LIDAR-Gelände-modellen bestehen die Möglichkeiten, das Vorkommen der verschiedenen Geländedeformen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten zu quantifizieren
- Niederschlags-Schwellenwerte: Definition der massgebenden Niederschlagsdauer bzw. -periode bei flachgründigen Rutschungen, weitergehende Auswertung bestehender Daten, Datensicherung/Erfassung bei zukünftigen Ereignissen
- Bodenmechanik: weitere Analysen anhand der Bodenkennwerte und den Rutschungsdaten; Einbezug der Vegetationswirkungen in Berechnungsmodelle
- Bedeutung der Niederschlagscharakteristika (Intensität, Dauer) und der Makroporen auf die Auslösung der Rutschungen
- Weiterentwicklung von Modellen für die Simulation von Transit und Ablagerung von Hangmuren
- Potential Bodenkarten und Wald-Standortskarten hinsichtlich der Beurteilung der Gefahr von flachgründigen Rutschungen
- Einfluss Waldzustand auf Hangstabilität: Weiterentwicklung der Methodik zur Zustandskartierung (Walldücken) mittels LIDAR-Daten
- Einfluss Makroporen auf das Sättigungsverhalten der Böden im Verlauf bzw. vor Unwetterereignissen (Auffüllen, Entleeren des Porenraumes)
- Einflussfaktoren auf die Mobilisierung der Rutschmassen

6 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchung zu den flachgründigen Rutschprozessen anlässlich der Unwetter vom August 2005 bestand darin, die Prozesse zu dokumentieren und Erkenntnisse hinsichtlich Gefahrenkartierung und Warnung zu erarbeiten. In den von den Unwettern betroffenen Gebieten wurden Untersuchungsperimeter abgegrenzt; je ein Perimeter in den Gebieten Entlebuch, Prättigau und Napf. Alle flachgründigen Rutschungen innerhalb dieser Perimeter wurden erfasst und nach einheitlichen Kriterien dokumentiert. Die Resultate des vorliegenden Projektes sollten möglichst einfach mit jenen aus dem Projekt zu den oberflächennahen Rutschungen anlässlich der Unwetter 2002 in den Gebieten Napf und Appenzell (Rickli und Bucher 2003) sowie der Unwetter 1997 in Sachseln (Rickli 2001) vergleichbar sein. Deshalb wurden die Aufnahmekriterien dieser früheren Studien weitgehend übernommen. Ergänzend dazu wurden bei der aktuellen Studie Daten (i) zu den Auslaufstrecken der Hangmuren, (ii) zu Rutschungen entlang von Strassen und (iii) zu den Auslösezeitpunkten der Hangprozesse erfasst. In separaten Studien wurden Aspekte der Modellierung von Hangmuren und die Relevanz von Bodenkarten als Grundlage für die Beurteilung der Gefahr durch flachgründige Rutschungen untersucht.

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse aus der Untersuchung der flachgründigen Rutschungen anlässlich der Unwetter vom August 2005 zusammengefasst und den Ergebnissen früherer WSL-Untersuchungen gegenüber gestellt:

- In den drei Untersuchungsperimetern 2005 wurden insgesamt 217 Rutschungen aufgefunden. Davon sind 133 Rutschungen grösser als 30 m^3 sowie nicht durch Strassen oder Gerinne ausgelöst. Diese stellen den Datensatz für Auswertungen bezüglich möglicher Einflussfaktoren auf die Rutschungsauslösung dar. Von früheren Untersuchungen existieren Daten von drei weiteren Perimetern; es sind dies Napf 02 (N=51) und Appenzell 02 (N=82), Sachseln 97 (N=256). Insgesamt in allen Perimetern 522 Datensätze.
- Intensität der Prozesse: Bezogen auf steile Gebiete mit Neigungen zwischen 20° und 50° ereigneten sich in den Perimetern von 2005 zwischen 13 und 49 Rutschungen pro km^2 . Im Vergleich zu den Ergebnissen 2002 und 1997 war die Rutschaktivität im Perimeter Napf 05 intensiver, in den Perimetern Prättigau 05 und Entlebuch 05 weniger intensiv.
- Neigungen: Bei den Rutschungen 2005 wurden Neigungen von 20 bis 45° gemessen. Im Vergleich zu den Rutschungen früherer Untersuchungen ergab sich eine breitere Verteilung der Werte, insbesondere entstanden mehr Rutschungen in flacheren Gebieten.
- Ausmasse: In allen Untersuchungsperimetern wurden jeweils viele kleine und wenig grosse Rutschungen vorgefunden. Die Rutschungen wiesen in den Perimetern 2005 im Vergleich zu den früheren Erhebungen grössere Rutschungsvolumina auf und die Streuungen der Werte waren breiter. Eine mögliche Ursache besteht in den vergleichsweise hohen Niederschlagsmengen über eine längere Zeittdauer. In sehr steilen Gebieten kommen grosse Rutschungen kaum vor. Darüber hinaus werden die Ausmasse offenbar nur wenig durch die lokalen Verhältnisse beeinflusst.
- Geländeform: Die Resultate sind in den verschiedenen Untersuchungsgebieten nicht einheitlich. Gemeinsam ist jedoch, dass besonders viele Rutschungen in Geländeformen ohne wesentliche Wölbung vorkommen, sowie an Versteilungen/Terrassenkanten und in Rinnenformen mit geradem oder konkavem Längenprofil. Zudem wurden jeweils kaum Rutschungen in Geländeformen mit konkavem Längenprofil beobachtet. Muldenformen sind also nicht besonders stark betroffen.
- Unterschied zwischen Wald und Nichtwald: Im Wald entstanden jeweils weniger Rutschungen pro Fläche als im Nichtwald. Eine Ausnahme stellt der Perimeter Prättigau dar (Zustand des Waldes?). Die Neigungen sind bei Waldrutschungen allgemein grösser als bei Freilandrutschungen und die Volumina sind bei Waldrutschungen mehrheitlich

kleiner als bei Freilandrutschungen (Ausnahmen: Sachseln und teilweise auch Prättigau).

- Hydrologie: Allen Untersuchungsperimetern gemeinsam ist die Tatsache, dass nur wenige Rutschungen auf vernässten Standorten ausgelöst wurden. Der Aspekt Vernässung scheint somit hinsichtlich Gefahrenkartierung von flachgründigen Rutschungen kein taugliches Kriterium zu sein, da auch auf nicht vernässten Standorten mit Rutschungen zu rechnen ist. Vernässte Standorte sind jedoch besonders kritisch zu beurteilen.
- Anzeichen früherer Rutschungsaktivität: In der näheren Umgebung der meisten Rutschungen waren Anzeichen früherer Rutschungsaktivität wie beispielsweise Nischen und Buckel zu erkennen. Bei den Untersuchungen der Ereignisse 2002 waren Rutschungen in diesen Geländeformen noch häufiger, in Sachseln jedoch etwas weniger häufig. Insgesamt ist dieser Aspekt wichtig bezüglich Gefahrenbeurteilung und -kartierung.
- Locker- und Festgestein: Es ergaben sich insgesamt nur wenige Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss der Art des Locker- und Festgesteins auf die Auslösung von flachgründigen Rutschungen. Bei Rutschungen, welche in feinkörnigen Lockergesteinen ausgelöst wurden, sind die Hangneigungen im Mittel etwas kleiner als bei Rutschungen in mittel- und grobkörnigen Lockergesteinen. Die Palette verschiedener Bodenmaterialien ist auch innerhalb der verschiedenen Perimeter erheblich.
- Boden: In der grossen Mehrheit aller Bodenprofile am oberen Anrissrand der Rutschungen wurden Makroporen beobachtet. Am meisten kamen Wurmgänge vor gefolgt von Wurzelkanälen. Mauslöcher waren nur selten zu sehen. Im Wald kamen im Vergleich zum Freiland mehr Wurzelkanäle und weniger Mauslöcher vor. Die Böden sind im Allgemeinen zumindest in den oberen Bodenhorizonten gut wasser durchlässig. Die Mächtigkeit der wasser durchlässigen Profilschichten beträgt ungefähr 50 bis 80 cm; im Prättigau tiefer als im Entlebuch. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Niederschlagswasser im Verlauf der Unwetter in den meisten Fällen leicht in die obersten Bodenschichten infiltrieren konnte. Dickere Wurzeln mit Durchmesser grösser als ungefähr 2.0 mm reichen in den meisten Fällen bis in Tiefen von 25 bis 75 cm. Im Wald reichen sie in der Regel tiefer als im Nichtwald.
- Materialbilanz: Beim grössten Teil aller Rutschungen wurde eine grosse Materialverlagerung aus dem Bereich der Gleitfläche beobachtet. Eine Ausnahme bildet diesbezüglich der Perimeter Napf 05: dort kam es bei bedeutend mehr Rutschungen nur zu einer geringen Mobilisierung. Abgesehen davon, dass in steileren Hängen mehr Material mobilisiert wird, lassen sich anhand der vorliegenden Daten keine Einflussgrössen auf die Mobilisierung eruieren.
- Auslaufstrecke und Pauschalgefälle: Bei 80% der Rutschungen wurden Auslaufstrecken bis 100 m und Pauschalgefälle zwischen 20 und 35° gemessen. Es konnten leider aus den vorliegenden Daten nur wenige Erkenntnisse bezüglich massgebenden Einflussgrössen auf den Auslauf und die Ablagerung der Hangmuren abgeleitet werden.
- Anthropogener Einfluss: Bei etwa einem Fünftel der Rutschungen 2005 wurde bei den Rutschungen anthropogene Einflüsse wie Drainagen oder Terrainveränderungen beobachtet, welche zwar nicht hauptverantwortlich für die Hanginstabilität waren, jedoch mitgeholfen haben, den Hang zu destabilisieren. In den drei Untersuchungsgebieten 05 wurden zudem zwischen 5 und 20 % der Rutschungen hauptverantwortlich durch Strassen und Wege ausgelöst.
- Niederschlagsschwellenwerte: Der exakte Zeitpunkt der Rutschauslösung ist nur bei wenigen Rutschungen bekannt und hinsichtlich des Niederschlagsverlaufes bestehen oft Unsicherheiten. Dennoch zeigen erste Auswertungen, dass ab einer Niederschlagssumme von ungefähr 100 mm in wenigen (zwei bis drei) Tagen verbreitet mit Rutschungen und Hangmuren zu rechnen ist. Bei Ereignissen kürzerer Dauer (wenige Stunden) kön-

nen - bei entsprechend hoher Niederschlagsintensität - bereits ab Regensummen von 30 bis 50 mm Hanginstabilitäten auftreten.

Literatur

- AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren), 2000: Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Bull. angew. Geol., 5: 3-152.
- AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren), 2004: Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. Entwurf vom 24. März 2004. <http://www.sfig-gsg.ch> (unter "Arbeitsgruppen, AGN..., 14.03.08)
- AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren), 2008: Hochwasser August 2005 – Analyse der Hanginstabilitäten, 14 S.
- Aleotti, P., Baldelli, P., Polloni, G., 1996: Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro basin (Italy). Proc. Int. Symp. Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Vol. 1: 435-446.
- Aleweli, C., Meusburger, K., Brodbeck, M., Konz, M., in Vorber.: Effects of land use and climate change on soil degradation: first results of the case study in the Urseren Valley (Kanton Uri, Switzerland). Forest Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland.
- Andrecs, P.; Markart, G.; Lang, E.; Hagen, K.; Kohl, B.; Bauer, W., 2002: Untersuchung der Rutschungsprozesse vom Mai 1999 im Laternsertal (Vorarlberg). Berichte Bundesamt und Forschungszentrum für Wald 127: 55-87.
- Avanzi, G.D.; Giannecchini, R.; Puccinelli, A., 2004: The influence of geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). Engineering Geology 73: 215-228.
- Berwert-Lpes, J., 2006: Unwetter 22./23.08.2005: Ereignisdokumentation – Bericht, Amt für Wald und Raumentwicklung OW, 106 S. + Anhang.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (Ed.), 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Böll, A., 1997: Wildbach- und Hangverbau. Ber. Eidg. Forschungsanst. Wald Schnee Landsch. 343: 123 S.
- Böll, A., Burri, K., Graf, F., in Vorber.: Hang- und Böschungsstabilisierung. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
- Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten – Empfehlung. 42 S.
- BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft), 1998: Ereignisdokumentation Sachseln - Unwetter vom 15. August 1997. Studienbericht Nr. 8 / 1998, 48 S. + Anhang.
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2001: Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. Engineering Geology 59: 253-266.
- Fazarinc, R., Mikos, M., 1992: Feststoffmobilisierung als Folge der extremen Niederschläge in Slowenien. Proc. Int. Symp. Interpraevent 1992, Bern, Vol. 1: 377-388.
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Bundesamt für Umwelt BAFU (ehem. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL).
- Geiger, H., Zeller, J., Röthlisberger, G., 1991: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes, Bd.7. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- geo7, 2008: Unwetter August 2008: Lokale lösungsorientierte Ereignisanalysen, 56 S.

- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2007: Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Doi: 10.1007/ss00703-007-0262-7
- Hilker, N., Badoux, A., Hegg, C., 2008.: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. *wasser energie luft* 100/2: 115-123.
- Hobi, P., 2006: Augusthochwasser 2005 – Abschätzen der Schadensereignisse mit Niederschlagsprognosen. Semesterarbeit Dep. Umweltwissenschaften ETH-Zürich. 39 S. (unveröff.).
- Holliger, 1955: Geologische Untersuchungen der subalpinen Molasse und des Alpenrandes in der Gegend von Flühli (Entlebuch, LU). Inauguraldissertation Philosophisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Uni Basel.
- Jahn, J., 1991: Ursachenanalyse Hochwasser, Teilprojekt Oberflächenerosion. In: Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4: 67-70.
- Jakob, M., 2000: The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena* 38: 279-390.
- Kienholz, H., Kläy, M., Mani, P., 1988: Naturgefahren an der Rigi-Nordlehne. *Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft Luzern*, 30: 309-321.
- Krauer, B., 2004: Analyse rutschungsrelevanter Standortsparameter in ausgewählten Einzugsgebieten der Surselva. Diplomarbeit Umweltwissenschaften, Studiengang Forstwissenschaften ETHZ.
- Krummenacher, J., 2007: Einfluss von Nutzungsaufgabe und Gehölzpflanzen im Freiland auf die Hangstabilität – eine Fallstudie aus dem Entlebuch. Diplomarbeit Umweltnaturwissenschaften ETHZ.
- Labhart, T., 1992: Geologie der Schweiz. 2., überarbeitete Auflage. Ott Verlag + Druck AG, Thun. 211 S.
- Lang, H.J., Huder, J., Amann, P., 1996: Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Boden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. 320 S.
- Luino, F., 2005: Sequence of instability processes triggered by heavy rainfall in the northern Italy. *Geomorphology* 66: 13-39.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004: Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 687-711.
- Markart, G.; Perzl, F.; Kohl, B.; Luzian, R., Kleemayr, K.; Ess, B.; Mayerl, J., 2007: 22nd and 23rd august 2005 – Analysis of flooding events and mass movements in selected communities of Vorarlberg. BFW-Dokumentation 5/2007, 45 pp.
- McArdell, B.W., Cesca, M., Rickli, C., 2008: Runout modelling of hillslope debris flows and small superficial landslides. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-07723.
- Meisina, C., Scarabelli, S., 2007: A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology* 87: 207-223.
- MeteoSchweiz (Hrsg.), 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005. Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 211. 63 S.
- MeteoSchweiz: Messnetze der MeteoSchweiz. <http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/services/datenportal/messnetze.html>
- Moser, M., 1980: Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. *Proc. Int. Symp. Interpraevent* 1980, Bad Ischl, Vol. 1: 121-148.

- Moser, M., 1997: Zur Prognose von Massenbewegungen. *Eclogae geol. Helv.* 90:120 381-391.
- Moser, M., Hohensinn, F., 1983: Geotechnical aspects of soil slips in alpine Regions. *Engineering Geology* 19: 185-211.
- Moser, M., Schoger, H., 1989: Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 53/110: 1-22.
- Nänni, P., 1948: Zur Geologie der Prättigauschiefer zwischen Rhätikon und Plessur. *Inaugural-Dissertation Universität Zürich*, 128 S.
- Oeko-B AG, Niederer+Pozzi Umwelt AG, 2006: Ereigniskataster Nidwalden Unwetter August 2005. 92. S. + Anh.
- Polloni, G., Ceriani, C., Lauzi, S., Padovan, N., Crosta, G., 1991: Rainfall and soil slipping events in Valtellina. *Proc. 6th Int. Symp. on Landslides* 1, 183-188.
- Polloni, G.; Aleotti, P.; Baldelli, P.; Nosetto, A., 1996: Heavy rain triggered landslides in the Alba area during November 1994 flooding event in the Piemonte Region (Italy). *Proc. 7th Int. Symposium on Landslides*, Senneset (Ed.), Balkema. 1955-1960.
- Presler, J., Zürrer, M., in Vorber. Potential von Bodenkarten bei der Prognose von flachgründigen Rutschungen. *Bericht Ereignisanalyse Hochwasser 2005*.
- Raetzo H., Rickli C., 2007: Rutschungen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Reneau, S.L., Dietrich, W.E., 1987: The importance of hollows in debris flow studies; examples from Marin County, California. *Geological Society of America, Review in Engineering Geology*, Vol. 7: 165-180.
- Rickli, C. (Red.), 2001: Vegetationswirkungen und Rutschungen - Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Birmensdorf, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 97 S.
- Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W., Lüscher, P., 2002: Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. *Schweiz. Z. Forstwes.* 153/11: 437-445.
- Rickli, C. und Bucher, H.U., 2003: Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG. 96 S.
- Rickli C.. Graf, F., in Vorber.: Effects of forest on shallow landslides in Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*, Birmensdorf, Switzerland.
- Rickli, C., Raetzo, H., McArdell, B., Presler, J., in Vorber.: Hangprozesse. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
- Rotach, M., Appenzeller, C., Bader, S., Frei, C., Germann, U., Liniger, M., Zbinden, P., 2007: Meteorologie. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0707. 215 S.
- Ruff, M., 2005: GIS-gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich). Diss. Fakultät Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH); <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2005/46/>
- Röthlisberger, G., 1991: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. "wasser, energie, luft", 83 3/4: 65-70.

- Schlunegger, F., 2006: Geologie und Geomorphologie des Entlebuchs – eine kleine Landschaftsgeschichte (http://www.geo.unibe.ch/presse/Brattig_06b.pdf, Mai 2008)
- Schmid, F., Fraefel, M., Hegg, C., 2004: Unwetterschäden in der Schweiz 1972 – 2002: Verteilung, Ursachen, Entwicklung. *wasser energie luft* 96, 1/2: 21-28.
- Schmidt, K.M.; Roering, J.J.; Stock, J.D.; Dietrich, W.E.; Montgomery, D.R.; Schaub, T., 2001: The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Can. Geotech. J.* 38: 995-1024.
- Sidle, R.C.; Pearce, A.J.; O'Loughlin, C.L., 1985: Hillslope stability and land use. *American Geophysical Union. Water Resources Monograph* 11, 140 pp.
- Temperli, R., 2006: Analyse der Rutschaktivität in Waldflächen in Bezug auf deren Zustand und Nutzung – Fallstudie in St. Antönien GR. Diplomarbeit Studiengang Umweltingenieurwesen Hochschule Wädenswil (unveröff.).
- VAW/EAFV, 1988: Folgen der Waldschäden auf die Gebirgsgewässer der Schweiz. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH (VAW) und Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV). 109 S.
- Wegmüller, A., 2003: Wetterwarnungen vor und nach einem Ereignis – Erfahrungen einer Einsatzorganisation. Zusammenfassung Referat FAN-Forum 2003, 7 S.
- von Wyl, B., 1987: Beitrag naturnaher Nutzungsformen zur Stabilisierung von Ökosystemen im Berggebiet, insbesondere zur Verhinderung von Bodenerosion. *Schweiz. Landw. Forschung*, 26 (4): 405-464.
- Zeller, J., Röthlisberger, G., 1985: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1984. *wasser energie luft* 77, 3/4: 65-70.
- Zeller, J., Röthlisberger, G., 1988: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. *wasser energie luft* 80, 1/2: 29-42.
- Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA), 1993: Hydrologie Truebtal - Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern. 103 S.
- Weber, B., 1991: Analyse des glissements, estimations des dangers et proposition d'assainissements sur certaines surfaces de la région du Moléson, canton de Fribourg. Diplomarbeit an der Professur Forstliches Ingenieurwesen der ETH (unveröff.).
- Wilhelm, C., 2003: Unwetter 2002 – Ein Überblick. *Bündner Wald* 3: 5-9.

Normen

- VSS, 1995: Geologische Terminologie der Lockergesteine. Schweizer Norm SN 670 009. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS, 3 S.
- VSS, 1997: Identifikation der Lockergesteine – Feldmethode. Schweizer Norm SN 670 005a. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS, 6S.
- VSS, 1997: Identifikation der Lockergesteine – Labormethode mit Klassifikation nach USCS. Schweizer Norm SN 670 008a. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS, 16S.
- VSS, 1999: Bodenkennziffern. Schweizer Norm SN 670 010b. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS, 13S.

Geologische und Geotechnische Karten

Geologische Kommission der schweiz. naturforschenden Gesellschaft 1942: Geologische Generalkarte der Schweiz, Blatt 2: Basel - Bern

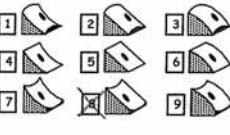
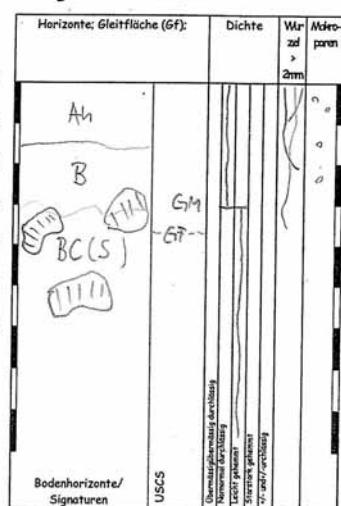
Schweizerische Geologische Kommission 1980: Geologische Karte der Schweiz 1:500'000.

Schweizerische Geotechnische Kommission 1964: Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000; Blatt 1, Neuchâtel - Bern - Basel.

Schweizerische Geotechnische Kommission 1963: Geotechnische Karte der Schweiz 1:200'000; Blatt 2: Luzern - Zürich - St. Gallen - Chur.

Anhang

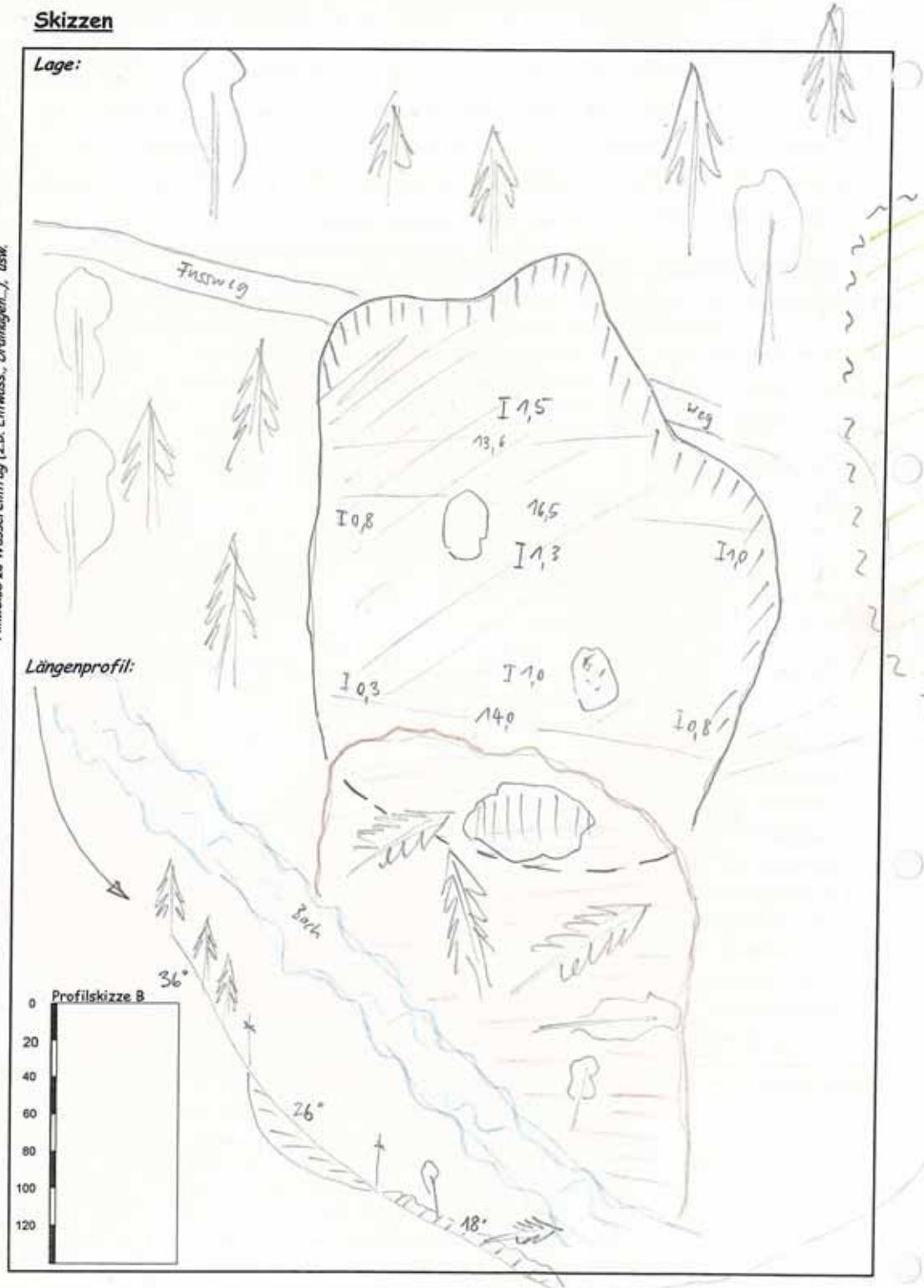
Aufnahmeformular

Aufnahmeformular Rutschungen		© WSL / 30.09.05										
1. Grunddaten und Messungen												
1.1 Nr. 3033 1.2 Koord. 642'320 / 103'940 1.3 Lokalname: Hinten Falkenbach 1.4 Expos.: 170° 1.5 Höhe: 1120 m ü.M. 1.6 Neig. Rutschfl.: 26° ; oberh.: 36° ; unterh.: 18° 1.7 Länge: 30,2 m 1.8 Breite: 16,5 m 1.9 Mächtigkeit: 1,5 m 1.10 Anrisshöhe: 0,6 m 1.11 Fläche: 28 m * 14 m = 390 m ² 1.12 Volumen: 390 m ² * 0,9 m = 350 m ³ 1.13 Massnahmen: <input checked="" type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> verbaut <input type="checkbox"/> teilweise verbaut												
2. Beurteilung Rutschhang (ohne aktuelle Rutschfläche)												
2.1 Hydrologie: <input checked="" type="checkbox"/> frisch/feucht <input type="checkbox"/> nass Nässezeiger [~] Einzugsgebiet: <input checked="" type="checkbox"/> Verlustlage <input type="checkbox"/> Eintragslage <input type="checkbox"/> markante Eintragslage 2.2 Geomorphologie-Typ:  2.3 Anzeichen alter Rutschbewegungen: <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> markant <input type="checkbox"/> nicht deutlich rezent: <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja; Alter: 2.4 Vegetation: <input checked="" type="checkbox"/> Wald <input type="checkbox"/> Freiland; Nutzung: 2.5 Nutzung Intensität Zustand <input checked="" type="checkbox"/> normal /mässig 2421 <input type="checkbox"/> stark /ausgeprägt												
2.6 Mögliche Beeinflussung durch: Fußweg (vgl. Katalog in Anleitung)												
3. Beurteilung Rutschfläche, Profil, Mechanismus												
3.1 Boden- <input type="checkbox"/> Rohboden Entwicklung: <input checked="" type="checkbox"/> entwickelter Boden <input type="checkbox"/> Nassboden Makroporen: <input type="checkbox"/> nein <input checked="" type="checkbox"/> ja (Wurm-, Maus-, Wurzelg., Spalten...) Wurm: Wurmgr.: bis 50 cm cm												
3.2 Hauptwurzelraum: 70 cm 3.3 Lockergestein: Art: Gehängeschliff / Moräne Feldklass: siltiger kies mit: viel Sand + Blöcken												
3.4 Festgestein: <input checked="" type="checkbox"/> nicht aufgeschl. Fallwinkel: ° Fallazimut: ° 3.5 Wasserführung: <input type="checkbox"/> keine <input type="checkbox"/> Anzeichen <input type="checkbox"/> wenig <input checked="" type="checkbox"/> viel												
3.6 Rutschmechanismus: <input checked="" type="checkbox"/> trans. <input type="checkbox"/> rotat. 3.7 Materialbilanz: 10 %												
3.8 Auslaufstrecke: 55,0 m } bis: Flachstrecke (Grenzlinie) 3.9 Pauschalgefälle: 23 °												
3.10 Ort der Gleitfläche: LG												
Massgebendes Profil A 												
Bemerkungen (Ursachen, besondere Beobachtungen, evtl. Zeitpunkt Auslösung): Gelände oberhalb z.T. sehr flachgründig (anscheinend MF) → Einfluss auf Infiltration?												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fotonn.</th> <th>Sujet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2621</td> <td>Überblick v. aude</td> </tr> <tr> <td>2622</td> <td>Profil</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>			Fotonn.	Sujet	2621	Überblick v. aude	2622	Profil				
Fotonn.	Sujet											
2621	Überblick v. aude											
2622	Profil											

Skizzen

Lageskizze: Form und Ausdehnung Areal, Auslasslinie, Abflussbereich, anstehender Fels und Wasserzuflüsse Rutschfläche, verbleibende Rutschmasse, Ort des Profils, Hinweise zu Wassereintrag (z.B. Entwass., Drainingen, J. usw.)

Längenprofil-Skizze: ursprünglicher Raumverlauf, Bruchfläche, Felsvorkommen, Lage Rutschmaterial, Neigungen und Distanzen, Vegetationswechsel, Rutschmateriat, Neigungen und Distanzen, Vegetationswechsel...



Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular

Allgemeines

Alle Rutschungen innerhalb der Perimeter „Entlebuch“, „Trub“ und „St. Antonien“ werden nach einheitlichem Vorgehen im Feld beurteilt. Die Kriterien für die Aufnahme von Rutschungen sind folgende:

- minimales Volumen ($\geq 30\text{m}^3$)
- nicht im unmittelbaren Einflussbereich von Strassen (tal- oder bergseitige Böschung)
- nicht durch Gerinneprozesse (Hangfusserosion von Wildbächen, alte Gerinne) ausgelöst
- nur flachgründige Rutschungen (mittlere Mächtigkeit $< 2.0\text{ m}$)

Bei verbauten Rutschungen werden alle Daten nach Möglichkeit aufgenommen, auch wenn sie teilweise rekonstruiert werden müssen. Die Angaben bei verbauten Rutschungen besitzen somit eine insbesondere in Bezug auf einige Aspekte in Punkt 2 des Aufnahmeformulares eingeschränkte Genauigkeit. Rutschungen im Einflussbereich von Strassen, Rutschungen mit weniger als 30 m^3 Rutschmasse, sowie Rutschungen, welche durch Gerinneprozesse ausgelöst wurden, werden kartiert und nur deren Grunddaten (Abschn. 1) und Daten zum Rutschhang (Abschn. 2) erhoben. Von jeder Rutschung wird mindestens ein Foto von Anrissbereich gemacht.

Angaben zu den einzelnen Punkten (Nummerierung gemäss Aufnahmeformular)

1 Grunddaten und Messungen

- 1.1 Nummer: 4-stellige Nummer Typ 1001, 1002, etc. Erste Ziffer für Perimeter (1 = Appenzell 2002, 2 = Napf 2002, 3= Entlebuch 2005, 4= Prättigau 2005, 5= Napf 2005); zweite Ziffer für Rutschungsart nach Tab. A8; folgende Ziffern für die laufende Nummerierung der Rutschungen.
- 1.2 Koordinaten: Erhebung mit GPS (Rundung auf 5 m); falls kein Empfang im Feld: als Punkt in LK einzeichnen und Koordinaten herauslesen.
- 1.3 Lokalname: aus Landeskarte; zur schnellen Orientierung (kann nachträglich im Büro eingetragen werden).
- 1.4 Exposition: Hangrichtung; mit dem Kompass, auf 10° genau (360° Skala).
- 1.5 Höhe über Meer: aus der Landeskarte ermittelt und mittels Höhenmesser verifiziert. Messung am oberen Anrissrand.
- 1.6 Neigung: lokale Hangneigung im Bereich der Rutschung, gemessen zwischen einigen Metern oberhalb des Anrisses und einigen Metern unterhalb des „Ausbisses“. Die Winkelangaben beziehen sich auf die 360° Skala. Zusätzlich werden die Neigungen im Bereich von ca. je 10-30 m oberhalb des Anrisses und unterhalb der Gleitflächenfront angegeben.
- 1.7 - 1.9 Die Vermessung der Rutschungen erfolgt gemäss Abbildung A.1, wobei im Bereich der Gleitfläche liegen gebliebenes Rutschmaterial nicht berücksichtigt wird. Bei Länge, Breite und Mächtigkeit werden die maximalen Werte eingetragen.
Länge: längste (schiefe) Distanz in der Falllinie zwischen Anriss und Gleitflächenfront.
Breite: längste Distanz zwischen den Flanken der Rutschung, senkrecht zur Länge.
Mächtigkeit: längste Distanz zwischen Gleitfläche und ehemaliger Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur ehemaligen Geländeoberfläche.

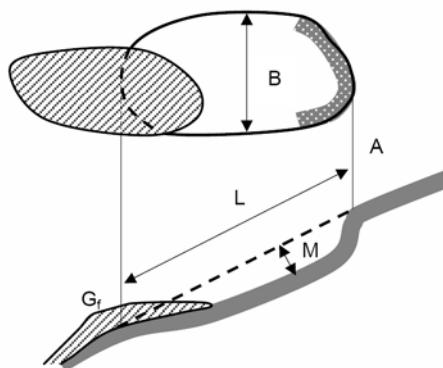


Abbildung A1: Vermessung der Rutschungen

L = max. Länge
 B = max. Breite
 M = max. Mächtigkeit
 A = Anriss
 G_f = Gleitflächenfront/Ausbiss
gestrichelt: ehem. Geländeoberfläche

- 1.10 Die Anrisshöhe gibt die Höhe des senkrechten Rutschabisses im Bereich des obersten Punktes einer Rutschung an; gemessen in der Regel, wo die Längenmessung durchgeführt wird (d.h. nicht Maximalwert). Diese Grösse dient zusammen mit den Neigungsmessungen dem Zeichnen eines möglichst realitätsnahen Längenprofiles. Bei klassischen Rotationsrutschungen ist die Angabe einer Anrisshöhe bisweilen nicht möglich.
- 1.11/12 Für die Berechnung/Schätzung der Fläche und des Volumens werden mittlere Werte für Länge, Breite und Mächtigkeit eingesetzt.
- 1.13 Massnahmen: Angaben zu den seit dem Ereignis ausgeführten Massnahmen in der Rutschfläche. In Frage kommen: keine, Materialumlagerungen, technische Massnahmen, ingenieurbiologische Massnahmen usw.

2 Beurteilung Rutschhang

Die unter Punkt 2 gemachten Angaben beziehen sich auf den Rutschhang, d.h. die Umgebung der Rutschung. Drei verschiedene Beurteilungsräume kommen zur Anwendung (Abb. A2).

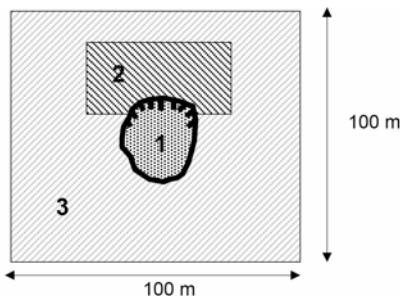
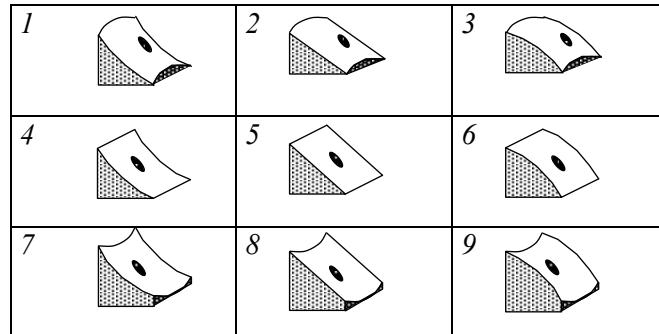


Abbildung A2: Beurteilungsräume bei den Rutschungen.
Raum 1: Fläche von ca. 100 x 100 m mit dem Rutschanschiss im Zentrum, Raum 2: Fläche von ca. 20 x 50 m im Bereich des Rutschanschisses; Raum 3: Rutschfläche.

- 2.1 Die Beurteilung der hydrologischen Standortseigenschaften erfolgt aufgrund der Vegetation sowie der aktuellen Feuchtebedingungen. Kategorien: a) frisch/feucht, b) vernässt (punktuell, bzw. dauernd). Kriterien: Zeigerpflanzen. Beurteilung im Raum 2, Abb. A2. Einzugsgebiet: Verlustlage (deutliche Kuppen-, Rippenlage); Eintragslage; markante Eintragslage (deutliche Rinnen-, Muldenlage). Beurteilung nur oberhalb Anriss.
- 2.2 Geomorphologie: Der Standort wird einem Typ in Tabelle A1 zugeordnet. Angaben zum Mirkorelief (z.B. Viehritte) können in den Bemerkungen gemacht werden, wobei sich das Mikrorelief auf Geländemerkmale im Bereich 0.5 bis 1.0 m bezieht. Beurteilung im Raum 3. Bei kleineren Rutschungen: Reduktion auf Quadrat mit Seitenlänge der 2- bis 3-fachen Breite der Rutschung.

Tabelle A1: Codierung der verschiedenen Geländeformen.



- 2.3 Anzeichen alter Rutsch- oder Kriechbewegungen werden aufgrund von morphologischen Merkmalen wie Rutschschnischen und –buckel, Anrissstellen, Säbelwuchs bei Bäumen etc. beurteilt. Rezent: < ca. 10 Jahre (nicht vollständig überwachsen), jedoch nicht aus Ereignis 2005. Markant: z.B. eindeutig identifizierbare und klar abgrenzbare Rutschschnischen und –buckel. Beurteilung im Raum 1, Abb. A2.
- 2.4 Vegetation: Zuordnung zu den Kategorien Wald und Freiland. Massgebend ist die Lage des Anrisses. Freiland: Angabe der vorherrschenden Nutzung (Weide, Wiese, Einwuchs). Beurteilung im Raum 2, Abb. A2.
- 2.5 Intensität der Nutzung / Zustand: Im Wald wird eine grobe Bestandesbeschreibung mittels Bestandestypen durchgeführt (Tab. A2). Allenfalls zusätzliche Hinweise z.B. zur Stabilität/Vitalität. Bei Rutschungen im Freiland werden Angaben zur Intensität der Nutzung (hauptsächlich hinsichtlich Verdichtung) gemacht. Normale bzw. mäßige Intensität: z.B. nur schwach ausgeprägte Trittböschungen; starke bzw. ausgeprägte Intensität: ausgeprägte Trittböschungen. Beurteilung im Raum 2, Abb. A2.

Tabelle A2: Informationen des Bestandestypen.

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	einschichtig	x1xx	Jungwuchs / Dickung
2xxx	mehrschichtig	x2xx	Stangenholz
3xxx	stufig	x3xx	Baumholz I (BHD 20-35)
		x4xx	Baumholz II (BHD 35-50)
		x5xx	Baumholz III BHD >50)
		x6xx	stufiger Bestand
Mischung		Deckungsgrad (DG)	
xx0c	unbestockt	xxx0	unbestockt
xx1x	> 80% Nadelholz	xxx1	gedrängt (DG90%)
xx2x	Mischbestand	xxx2	normal (DG80%)
xx3x	> 80% Laubholz	xxx3	locker (DG60%)
		xxx4	lückig (DG40%)
		xxx5	aufgelöst (DG20%)

- 2.6 Mögliche Beeinflussung: Katalog der Beeinflussungskriterien: Leitungen (Wasserleitung, Entwässerung), Aufschüttungen/Ablagerungen, Vegetationswechsel (von Wald zu Freiland bzw. umgekehrt), Geländeform, Bodenaufbau (Lockergestein, Durchlässigkeit). In Bemerkungsfeld evtl. erklären.

3 Beurteilung Rutschfläche, Profil, Mechanismus

Beurteilung im Raum 3, Abb. A2

3.1 Boden: Profilansprache am oberen Anrissrand der Rutschung. Der Ort des Profils soll repräsentativ sein für die gesamte Anrisslinie (d.h. nicht unbedingt höchster Punkt). Es erfolgt nur eine sehr pauschale Ansprache der Entwicklung des Bodens und der Durchlässigkeit der verschiedenen Bodenhorizonte: Die Beurteilung der Bodenentwicklung orientiert sich an den Angaben in Tab. A3, wobei nur unterschieden wird zwischen "Rohböden" (Codes 0-4), "entwickelten Böden" (Codes 5-7) und "Nassböden". Die Beurteilung der Durchlässigkeit wird aufgrund der Angaben in Tab. A4 vorgenommen.

Makroporen: Angabe Quantität, Art und Tiefe. Typen: Wurmgänge, Mausgänge, alte Wurzelkanäle, Bodenrisse. Ausmass: keine, wenig, viel (Vorstellung minimal für "viel": Wurmgänge: > ca. 1-2 pro dm², Mausgänge: > ca. 0.5 pro m²).

Tabelle A3: Kategorien der Bodenentwicklung (Codes 1-7). Im Rahmen der Vorliegenden Untersuchungen nur differenziert nach Rohböden (Codes 0 - 4), entwickelten Böden (Codes 5 - 7) und Nassböden.

Code	typische Horizontfolge	Charakteristika	Bodentyp (bei normaler Durchlässigkeit)	
0	stark gestörter Bodenaufbau			
1	Ah,ca-C	mit Kalkmull (kalkfrei in Taschen)	Rendzina	typische Ausprägung
2	Ah-C	Kalkgrenze zwischen 0 und 20 cm	Rendzina	
3	Ah-AC-C	Kalkgrenze zwischen 20 und 80 cm, flach- bis mittelgründig	Regosol	z.T. entstanden aus "Misch-gestein", d.h. Ausgangsmaterial mit geringem Karbonatanteil
4	Ah-A-AC-C	eher tiefgründig	Regosol	
5		mit beginnender Verbraunung	Braunerde	schwach ausgeprägt
6		mit deutlicher Verbraunung	Braunerde	
7		mit Tonverlagerung	Parabraunerde	

3.2 Hauptwurzelraum: ungefähre Profiltiefe mit Wurzeln eines Durchmessers \geq 2 mm im Bereich des Bodenprofils. Eintrag in die Skizze.

3.3 Lockergestein: Beurteilung im Bereich der Gleitfläche bzw. möglichst tief. Für die geologische Interpretation wurden folgende Klassen verwendet: Humus, Gehängelehm, Gehängeschutt, Moräne.

Die Feldklassifikation des Lockergesteines erfolgt nach SN 670 005 (Tab. A5 und A6). Beurteilung in der Nähe der Gleitfläche bzw. möglichst tief. Sind verschiedene Schichten/Horizonte vorhanden, so können diese in der Skizze eingetragen werden.

Tabelle A4: Kategorien der Wasserdurchlässigkeit (Codes 1-5).

Code	Bezeichnung	Beschreibung	Kriterien / Bodenmerkmale	ges. k-Wert (cm/Tag)
5	übermäßig durchlässig	im ganzen Profil sandreich	Feinerdecode 1, 2 oder 3	> 1000
4	normal durchlässig	keine Vernässungsmerkmale		100 bis 1000
3	leicht gehemmt	schwach wechselfeucht	z.B. (S), (Sw), (Go)	10 bis 100
2	stark gehemmt	Stauwassereinfluss, wechselfeucht	z.B. S, Sw, Go	1 bis 10
1	+/- undurchlässig	starker Stauwassereinfluss, reduziert	z.B. Sd, Gr	< 1

3.4 Festgestein: Zuordnung zu den in den Untersuchungsgebieten vorkommenden Gesteinen: Nagelfluh, Sandstein, Mergel, Flysch etc. und entsprechende Wechsellagerungen. Die Neigung der Gesteinsschichten wird mit Fallwinkel ($^{\circ}$) und Fallazimut ($^{\circ}$) angegeben.

Tabelle A5: Geotechnische Bezeichnung der grob- und mittelkörnigen Lockergesteine nach SN 670 005.

Bestimmende Eigenschaften als Beiwort	Hauptbestandteil als Hauptwort	Nebengemenge als beigeordnetes Hauptwort	Restliche Gemeneteile als 2. beigeordnetes Hauptwort, evtl. zu präzisieren.
sauberer siltiger toniger	Kies —	mit wenig (3-15%) reichlich (16-30%) viel (31-49%)	Blöcken und mit Steinen org. Beimengungen Torf
sauberer siltiger toniger	Sand —	mit wenig (3-15%) reichlich (16-30%) viel (31-49%)	Blöcken und mit Steinen org. Beimengungen Torf

Tabelle A6: Geotechnische Bezeichnung der feinkörnigen Lockergesteine nach SN 670 005.

Charakteristisches Merkmal als Beiwort	Hauptbestandteil als Hauptwort	Plastizitätseigenschaften beschreiben	Nebengemenge als beigeordnetes Hauptwort
toniger ——	Silt	ohne kleiner mittlerer hoher	Blöcken wenig Steinen reichlich viel org. Beimengungen Torf
siltiger ——	Ton	Plastizität	

Tabelle A.7: Zuordnung von USCS-Bezeichnungen zu den Bezeichnungen nach Feldklassifikation.

Bezeichnung Feldklassifikation	Bezeichnung USCS
sauberer Kies	GW / GP
siltiger Kies	GM
toniger Kies	GC
sauberer Sand	SW / SC
siltiger Sand	SM
toniger Sand	SC
toniger Silt	CL
siltiger Ton	CL-ML

3.5 Die Wasserführung ist in erheblichem Ausmass vom Niederschlag der vorangegangenen Tage und Wochen abhängig. Im Feld wird versucht, diese Einflüsse zu eliminieren. Folgende Kriterien werden für die Beurteilung des Ausmasses der Wasserführung verwendet:

"keine": die Rutschfläche ist trocken oder nur regenfeucht und es gibt keinerlei Hinweise auf Hangwasserzufluss.

"Anzeichen": keine, jedoch Merkmale erkennbar für temporäre Wasserführung (Algen, erodierte Rinnen) sind eindeutig zu erkennen.

"wenig": die Rutschfläche ist stellenweise feucht, tropfende Wasseraustritte oder deren Anzeichen (Algen, erodierte Rinnen) sind vorhanden.

„viel“: die Rutschfläche ist stellenweise nass und fliessendes Wasser wird beobachtet. Zudem sind je nach Gesteinsunterlage deutlich erodierte Rinnen vorhanden.

- 3.6 Rutschmechanismus: Rotationsrutschung: Gleitfläche hauptsächlich kreis- oder ellipsenförmig. Translationsrutschung: Gleitfläche im Längenprofil hauptsächlich eine Gerade. Zusätzlich: Angaben zur Gleitfläche.
- 3.7 Materialbilanz: Schätzung der in der Gleitfläche verbliebenen Masse in %.
- 3.8 Auslaufstrecke: Messung oder Schätzung der schiefen Distanz vom Anriss zum unteren Ende der Ablagerung. Hinweise zur Abgrenzung: Breite > 2 m, Ablagerungshöhe > 10 cm, auch gröberes Material > 5 cm abgelagert bzw. nicht nur Schlamm, Erd-/Grasschollen, Baggersspuren nach Aufräumen. Falls nicht die gesamte Auslaufstrecke einsehbar oder die Ablagerung gestört ist: Messung/Schätzung bis Sichtgrenze (Geländekante) oder Störstelle (Hindernis /Mulde /Gerinne). Angabe jeweils bis wohin die Messung gilt: Flachstrecke (ungestört, vollständig einsehbar), Hindernis, Mulde, Gerinne.
- 3.9 Pauschalgefälle: Messung der Neigung der Verbindungsline vom Anriss bis zum unteren Ende der Ablagerung (Ausnahmen wie unter Punkt 3.8).
- 3.10 Ort der Gleitfläche: Beurteilung, ob sich die Gleitfläche im Lockergestein, an der Grenze zwischen Festgestein und Lockergestein oder im aufgelockerten Festgestein befindet. Die Angabe trifft jeweils für den grösseren Teil der oberen Hälfte der Rutschfläche zu. Zudem wird das Gestein unmittelbar oberhalb der Gleitfläche nach USCS klassifiziert und die Gleitschicht (Gf) mit Signatur im Bodenprofil angegeben.

Tabelle A.8: Häufigste Ursachen von Rutschungen und Kriterien für die Aufnahme.

Kategorie/Ursachen	Kriterien	Erhebungen
gültige Aufnahme	mindestens 30 m ³ Rutschmasse, Anriss- und Ausbisslinien klar erkennbar.	Vollaufnahme gemäss Aufnahmeprotokoll.
andere Ursachen	meist erosionsähnliche Prozesse; in extrem steilen Flanken häufig ausgelöst durch Stockwürfe oder Materialabfluss oberhalb liegender Rutschungen.	Teilaufnahme: Koordinaten oder Karteneintrag, Skizzen, Photos, z.T. auch Höhenlage und Exposition.
ausgelöst durch Straßen	Anriss oder Ausbiss liegt in künstlicher berg- oder talseitiger Böschung einer Strasse, eines Wald- oder Flurweges oder eines Platzes.	Teilaufnahme: Koordinaten, Photos, z.T. Skizzen.
verbaute Rutschung	Rutschung ist ganz oder teilweise verbaut, Anriss und/oder Gleitfläche ist nicht mehr sichtbar.	Aufnahme möglichst aller Parameter. Geschätzt: Mächtigkeiten. Meist fehlend: Ort der Gleitfläche, Wasserführung, Rutschmechanismus.
ausgelöst durch Gerinneprozesse	Rutschung ausgelöst oder massgeblich beeinflusst durch Gerinneprozesse, murgangähnliche Prozesse, Hangfusserosion entlang von permanenten oder periodischen Gerinnen (z.T. fliessender Übergang in den obersten Gerinneabschnitten).	Teilaufnahme: Koordinaten, z.T. Grobskizze, Photos Bemerkung: diese Art der Rutschung ist entlang der Gerinne so zahlreich, dass sie nur exemplarisch oder in Zweifelsfällen aufgenommen wurden.
zu kleine Rutschungen	Rutschmasse ist kleiner als 30 m ³ und somit geringeres Gefahrenpotential.	Teilaufnahme: Koordinaten, Messung oder Schätzung der Ausmasse, Photos.

Ergänzende Resultate

Tabelle A9: Abmessungen der Wald- und Freilandrutschungen in den drei Untersuchungsgebieten 2005.

		Rutschungen 2005					
		Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	1. Quartil	3. Quartil
Wald	max. Länge (m)	8.0	50.0	22.2	20.0	14.3	29.0
	max. Breite (m)	6.0	30.5	14.1	14.0	9.5	17.9
	max. Mächtigkeit (m)	0.6	3.5	1.2	1.1	0.9	1.3
	Anrisshöhe (m)	0.3	2.0	0.8	0.8	0.6	1.0
	Fläche (m ²)	35	900	251	225	110	315
	Volumen (m ³)	31	1377	217	134	62	193
Freiland	Länge (m)	6.5	116.0	24.0	18.3	12.9	28.9
	Breite (m)	7.5	68.0	17.1	13.5	11.0	18.8
	Mächtigkeit (m)	0.5	4.0	1.4	1.2	0.9	1.6
	Anrisshöhe (m)	0.3	2.0	0.9	0.9	0.7	1.1
	Fläche (m ²)	42	2600	348	192	119	379
	Volumen (m ³)	32	5443	388	143	87	370
Gesamt	Länge (m)	6.5	116.0	23.4	20.0	13.8	29.3
	Breite (m)	6.0	68.0	16.1	13.5	10.5	18.0
	Mächtigkeit (m)	0.5	4.0	1.3	1.2	0.9	1.5
	Anrisshöhe (m)	0.3	2.0	0.9	0.9	0.7	1.0
	Fläche (m ²)	35	2600	314	200	115	347
	Volumen (m ³)	31	5443	327	136	77	320

Tabelle A10: Hangneigungen bei den Rutschungen 2005 in den Untersuchungsgebieten Entlebuch, Prättigau und Napf sowie zum Vergleich bei den Rutschungen von 2002.

		N	Min. (°)	Max. (°)	Mittel (°)	Median (°)	1. Quartil (°)	3. Quartil (°)	Std.abw. (°)
Alle drei Perimeter 2005	Wald	43	25	45	34.2	34.0	30.0	39.0	5.4
	Freiland	80	19	44	29.5	29.0	26.0	33.0	5.0
	Gesamt	123	19	45	31.1	31.0	27.0	35.0	5.6
Entlebuch 2005	Wald	3	27	37	33.3	36.0	31.5	36.5	4.5
	Freiland	34	19	39	29.5	29.5	26.0	33.0	4.8
	Gesamt	37	19	39	29.8	30.0	26.0	34.0	4.8
Prättigau 2005	Wald	26	25	44	33.3	33.0	30.0	36.8	4.9
	Freiland	24	23	44	31.1	30.0	28.0	34.0	5.3
	Gesamt	50	23	44	32.3	32.0	28.0	35.8	5.2
Napf 2005	Wald	14	25	45	36.1	38.5	31.3	40.0	6.1
	Freiland	22	21	39	27.6	27.0	24.3	29.8	4.2
	Gesamt	36	21	45	30.9	29.0	26.0	37.3	6.5
Beide Perimeter 2002	Wald	64	26	49	37.4	37.5	33.9	41.3	4.9
	Freiland	69	23	50	32.0	31.5	29.0	34.0	4.3
	Gesamt	133	23	50	34.6	34.0	31.0	38.0	5.3
Appenzell 2002	Wald	34	26	49	35.5	35.0	32.0	38.0	5.0
	Freiland	48	23	50	31.0	31.0	29.0	33.0	4.3
	Gesamt	82	23	50	32.9	32.0	29.6	35.0	5.1
Napf 2002	Wald	30	28	47	39.4	39.3	37.5	42.0	4.0
	Freiland	21	28	40	34.4	35.0	31.5	37.0	3.3
	Gesamt	51	28	47	37.4	37.5	34.8	40.0	4.4

Tabelle A11: Angaben zu den untersuchten Böden und den Rutschungsstandorten: Neigungen und Vegetation (W = Wald, F = Freiland) bei den Entnahmestandorten, USCS-Klassifikation, Wassergehalt w und Reibungswinkel ϕ'_{norm} gemäss SN670010b, ϕ'_{Dhawan} nach Dhawan basierend auf der Form der Kornverteilungskurve sowie ϕ'_{gew} gewichtet nach Formel 2 (Kap. 3.5). Weitere Kennwerte γ , γ_{sat} und c' nach SN670010b.

	Probe	Neigung (°)	Vegetation	USCS	w (%)	ϕ'_{norm} (°)	ϕ'_{Dhawan} (°)	ϕ'_{gew} (°)	γ (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	c' (kN/m²)
Entelbuch	3013	26	F	CM	25.5	25	25	25	20.3	20.2	8
	3015	35	F	CM	25.5	25	27	26	20.3	20.2	8
	3021	25	F	GM	8.9	35	35	35	23.4	23.5	0
	3023	39	F	GC	11.4	33	35	34	23.0	23.0	20
Prättigau	4011	37	F	GC	11.4	31	35	34	23.0	23.0	20
	4018	42	F	GC	11.4	31	35	34	23.0	23.0	20
	4020	37	W	ML	51.8	29	31	30	17.4	19.7	12
	4023	25	F	GC	8.4	31	34	33	23.0	23.0	20
	4040	39	F	GC	8.9	31	34	33	23.0	23.0	20
	4042	27	W	ML	51.8	29	30	30	17.4	19.7	12
	4043	33	W	MH	64.8	25	30	28	16.2	16.2	10
Napf	5008	24	F	GM	8.9	35	34	34	23.4	23.5	0
	5010	29	F	GM	8.9	35	32	33	23.4	23.5	0
	5021	45	W	GC	8.4	31	36	34	23.0	23.0	20
	5026	39	W	GC	11.4	31	35	34	23.0	23.0	20
	5028	27	F	GC	11.4	31	36	34	23.0	23.0	20

Tabelle A12: Angaben zu den untersuchten Böden (Neigung beim Entnahmestandort, USCS-Klassifikation, Scherwinkel ϕ'_{gew}) sowie verschiedene Stabilitätsberechnungen: a) Einbezug der Vegetation ($\phi' + 5^\circ$) und der Lagerungsdichte ($\phi' + 3^\circ$ falls Hangneigung $\geq 35^\circ$); b) Einbezug der Vegetation und Kohäsion c' ; c) Einbezug der Vegetation, Kohäsion und Lagerungsdichte; d) Berechnungen auf Basis Modell ohne Anpassungen: erforderlicher Scherwinkel ϕ'_{erf} für $F_{unges} \geq 0.9$, erforderliche Kohäsion c'_{erf} für $F_{unges} \geq 0.9$ sowie kritische Hangneigung α_{krit} bei profilumfassender Sättigung. Den Berechnungen zugrunde gelegt ist jeweils eine Tiefe der Gleitfläche in 1.0 m. Berechnungen a) bis c): es wird je ein Sicherheitsgrad F_{unges} für ungesättigte Verhältnisse sowie für gesättigte Verhältnisse F_{ges} berechnet.

				a) Vegetation und Dichte		b) Vegetation und Kohäsion		c) Vegetation, Dichte, Kohäsion		d) Berechnungen auf Basis Modell ohne Anpassung		
Probe	Neigung ($^\circ$)	USCS	ϕ'_{gew} ($^\circ$)	F_{unges}	F_{ges}	F_{unges}	F_{ges}	F_{unges}	F_{ges}	ϕ'_{erf} für $F_{unges} \geq 0.9$ ($^\circ$)	c'_{erf} für $F_{unges} \geq 0.9$ (kN/m^2)	α_{krit} ($^\circ$)
3013	26	CM	25	1.18	0.60	1.99	0.60	1.99	0.60	25	0	13
3015	35	CM	26	0.96	0.48	1.42	0.43	1.53	0.48	32	3	14
3021	25	GM	35	1.80	1.03	1.80	1.03	1.80	1.03	23	0	22
3023	39	GC	34	1.11	0.62	2.07	0.57	2.19	0.62	36	2	21
4011	37	GC	34	1.20	0.68	1.76	0.61	1.83	0.68	34	0	21
4018	42	GC	34	1.00	0.57	1.87	0.51	1.97	0.57	39	3	21
4020	37	ML	30	1.04	0.51	1.84	0.39	1.95	0.51	34	2	16
4023	25	GC	33	1.68	0.95	3.42	0.95	1.68	0.95	23	0	21
4040	39	GC	33	1.07	0.61	2.04	0.55	2.15	0.61	36	2	21
4042	27	ML	30	1.37	0.68	2.73	0.68	2.73	0.68	25	0	16
4043	33	MH	28	1.00	0.38	1.95	0.38	1.95	0.38	30	1	12
5008	24	GM	34	1.82	1.05	1.82	1.05	1.82	1.05	22	0	22
5010	29	GM	33	1.46	0.84	1.46	0.84	1.46	0.84	27	0	22
5021	45	GC	34	0.90	0.51	1.68	0.46	1.77	0.51	42	6	21
5026	39	GC	34	0.93	0.53	2.07	0.57	2.19	0.53	36	2	21
5028	27	GC	34	1.59	0.90	3.30	0.90	3.30	0.90	25	0	21

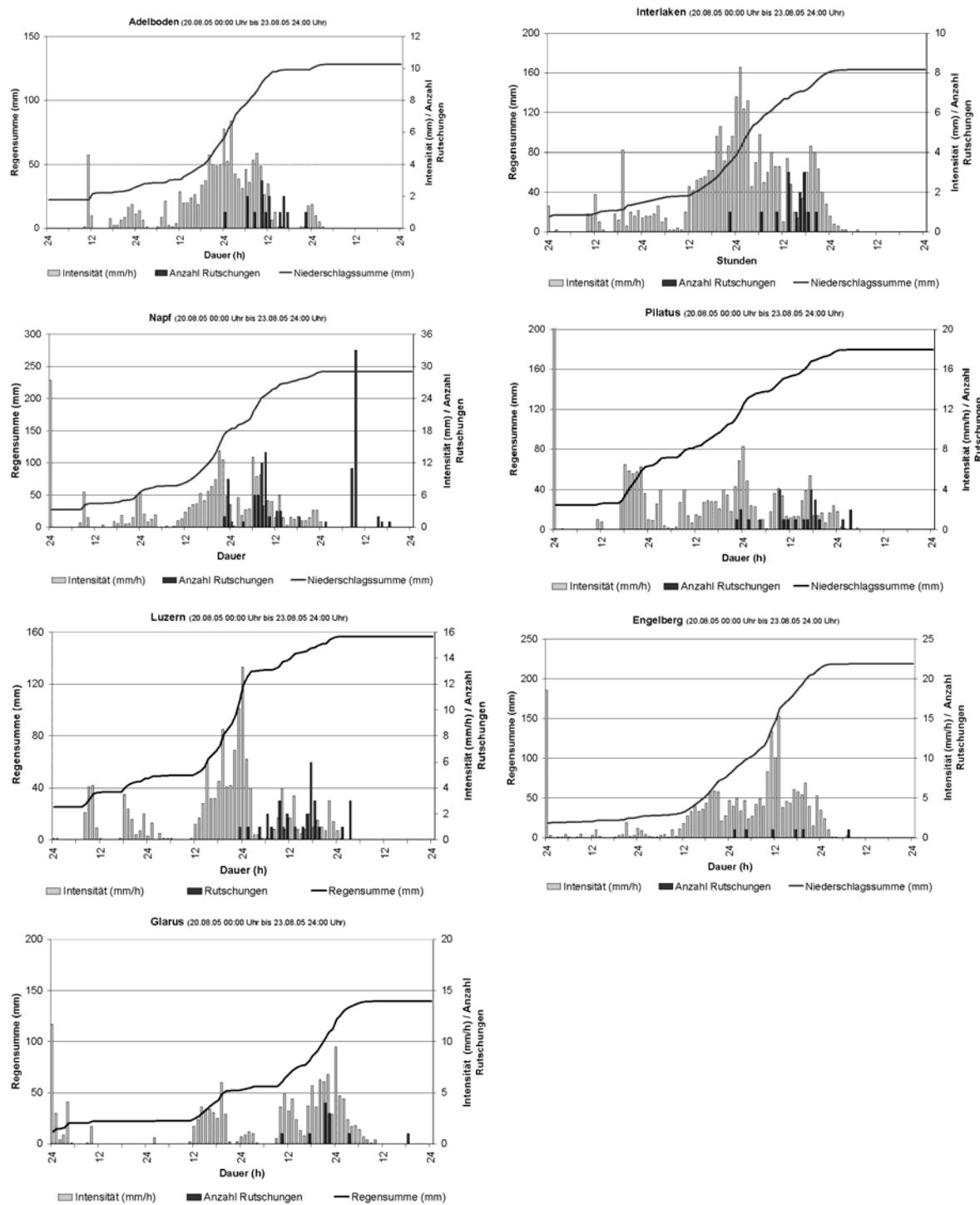


Abbildung A3: Niederschlagsverlauf (Regensumme und Regenintensität) ab dem 18.08.2005, 0600 UTC für ausgewählte ANETZ-Stationen sowie ausgelöste Hanginstabilitäten im Umkreis von 20 km um die entsprechende Messstation.

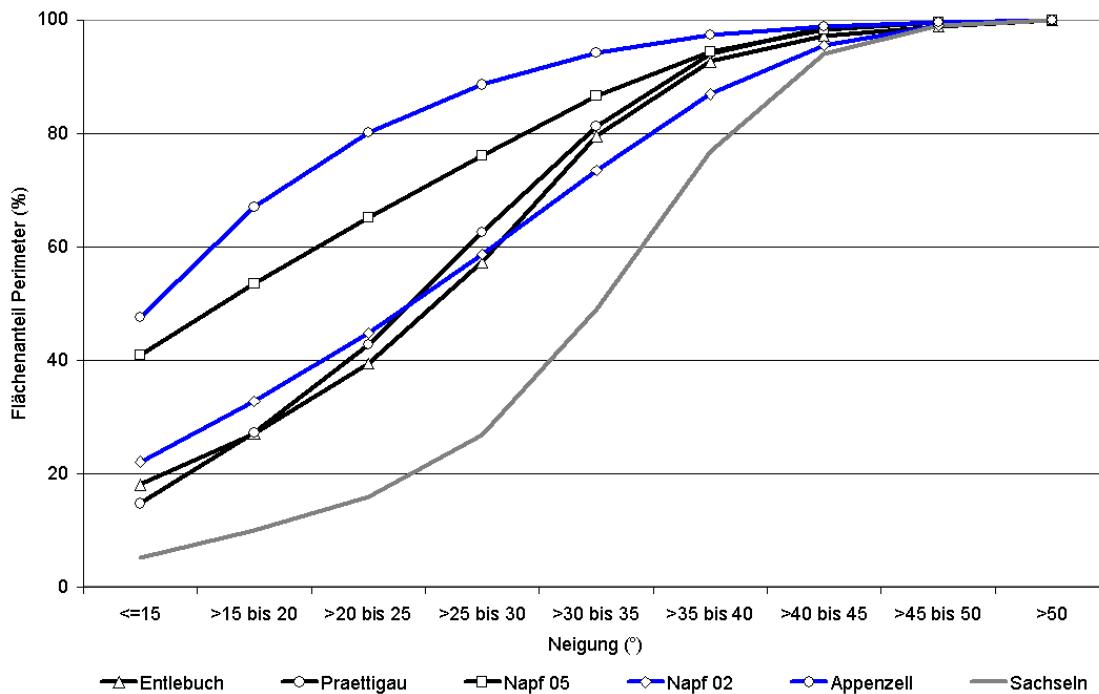


Abbildung A4: Neigungsverhältnisse in den verschiedenen Untersuchungsperimetern.

Tabelle A13: Sturmschadenflächen im Perimeter Napf. Die Flächen Nr. 1 bis 3 entstanden durch den Orkan „Lothar“. Die Flächen x1, x2 usw. sind entweder während anderen Sturmereignissen entstanden oder auch durch Lothar (waren jedoch damals nicht erfasst worden, da zu klein). Sie wurden anlässlich einer Feldbegehung auf eine Karte eingetragen. Bei den Flächenangaben handelt es sich um Schätzungen.

Nr.	Bezeichnung	Fläche (ha)
1	Totalschaden To 012, Wald mit Schutzfunktion	0.8
2	Teilschaden Ts 052, Wald mit Schutzfunktion	2.4
3	Teilschaden Ts 049, Wald mit Schutzfunktion	0.7
x1	Teilschaden	0.5
x2	Teilschaden	0.2
x3	Teilschaden	0.6
x4	Teilschaden	0.2
x5	Teilschaden	0.1
Total		5.5