

Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Ap- penzell



Bundesamt für Wasser und Geologie BWG
Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG
Ufficio federale delle acque e della geologia UFAEG



Eidg. Forschungsanstalt WSL
Institut fédéral de recherches WSL
Istituto federale di ricerca WSL

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.

Autoren: Christian Rickli und Hansueli Bucher, WSL

Begleitung: Albert Böll, WSL

Titelbild: Rutschung Nr. 2007, "Hinter Zinggen", Brandösch, Napfgebiet

© WSL, 2003

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Rahmen.....	3
1.2	Auftrag.....	3
2	Grundlagen	4
2.1	Unterlagen zu den Ereignissen Napf und Appenzell	4
2.2	Untersuchungen zu oberflächennahen Rutschprozessen	4
2.3	Unwetterereignisse im Napfgebiet und Kanton Appenzell AR	5
2.3.1	Unwetter im Napfgebiet vom 15.-16. Juli 2002	5
2.3.2	Unwetter im Kanton Appenzell Ausserrhoden vom 31.8.-1.9.2002	6
2.4	Charakterisierung der Untersuchungsgebiete	7
2.4.1	Napf	7
2.4.2	Appenzell	9
3	Methoden	12
3.1	Allgemeines	12
3.2	Untersuchungssperimeter.....	12
3.3	Aufnahmen bei den Rutschungen	13
3.3.1	Allgemeines	13
3.3.2	Kriterien für eine Erfassung der Rutschungsdaten.....	14
3.3.3	Angaben zur eigentlichen Rutschfläche	14
3.3.4	Angaben zum Rutschhang	15
3.4	GIS / Luftbilder	16
3.5	Bodenuntersuchungen.....	18
4	Ergebnisse	19
4.1	Datengrundlage	19
4.2	Angaben zum Entstehungsort der Rutschungen	20
4.2.1	Höhenlage	20
4.2.2	Neigungsverhältnisse	20
4.2.3	Geländeform	23
4.2.4	Exposition	24
4.3	Abmessungen der Rutschungen	25
4.4	Standortsverhältnisse bei den Rutschungen	28
4.4.1	Vegetation (Wald / Freiland).....	28
4.4.2	Nutzung	30
4.4.3	Hydrologie.....	33
4.4.4	Hydrogeologie und Hangwasser	33
4.4.5	Anzeichen alter Rutschbewegungen	34
4.5	Geologie.....	36
4.5.1	Festgestein	36
4.5.2	Lockergestein	37

4.6	<i>Bodenmechanik</i>	39
4.6.1	Korngrössenanalysen und Klassifikation der Lockergesteine	40
4.6.2	Bodenmechanik	41
4.7	<i>Böden</i>	44
4.7.1	Bodenentwicklung	44
4.7.2	Makroporen	45
4.7.3	Durchwurzelung	47
4.7.4	Durchlässigkeit	49
4.8	<i>Rutschmechanismen - Abfliessvorgang</i>	50
4.8.1	Translation/Rotation	50
4.8.2	Ort der Gleitfläche	51
4.8.3	Materialverlagerung	52
4.8.4	Auslaufstrecke und Pauschalgefälle	54
5	Diskussion	58
5.1	<i>Allgemeines</i>	58
5.2	<i>Rutschaktivität in den Untersuchungsgebieten</i>	58
5.3	<i>Abmessungen der Rutschungen</i>	58
5.4	<i>Einflussgrössen auf die Rutschauslösung</i>	59
5.4.1	Höhenlage	59
5.4.2	Neigung	59
5.4.3	Geländeform	60
5.4.4	Exposition	60
5.4.5	Einfluss von Wald und Freiland auf die Rutschprozesse	61
5.4.6	Nutzung des Freilandes, Zustand des Waldes	62
5.4.7	Hydrologie	64
5.4.8	Hydrogeologie und Hangwasser	65
5.4.9	Anzeichen alter Rutschbewegungen	65
5.4.10	Geologie	66
5.4.11	Böden	67
5.5	<i>Bodenmechanik</i>	69
5.6	<i>Rutschmechanismen – Abfliessvorgang</i>	69
6	Zusammenfassung	71
7	Literatur	73
8	Anhang	77

1 Einleitung

1.1 Rahmen

In der Nacht vom 15. auf den 16. Juli 2002 verursachten heftige Gewitterniederschläge in der Napf-region viele Schäden durch oberflächennahe Rutschungen, Bachausbrüche und Überschwem-mungen. Eineinhalb Monate später, in der Nacht vom 31. August auf den 1. September 2002, er-eigneten sich auch in der Region St. Gallen und Appenzell ähnliche Schadenereignisse. Das **Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG)** beauftragte die **Eidgenössische Forschungsan-stalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)** mit Schreiben vom 4.12.2002, die oberflächenna-hen Rutschprozesse in den beiden Schadengebieten Napf und Appenzell zu dokumentieren und zu analysieren.

1.2 Auftrag

Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Dokumentation der Rutschprozesse in den Gebieten Napf und Appenzell vom Sommer 2002 und in der Analyse massgebender Einflussgrössen auf die Rutschauslösung und auf den Transportprozess von Rutschmaterial. Der Auftrag des BWG um-fasste die folgenden Aspekte:

- Erhebungen im Napfgebiet: Untersuchungsperimeter Zinggengraben auf Gemeindegebiet Trub BE (2.5 km²)
- Erhebungen im Kanton Appenzell AR: Untersuchungsperimeter in den Gemeinden Rehetobel und Wald AR (10.2 km²)
- Jeweils Untersuchung der geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und hydrogeo-logischen Verhältnisse am Ort der Rutschungen; Kartierung der Ereignisse
- Anknüpfung an die von BUWAL und Kanton Obwalden 1998 in Auftrag gegebene Untersu-chung der Rutschprozesse von Sachseln (Rickli 2001) und weiterführende Analyse für Hang-muren und Rutschungen
- Erarbeitung allgemeiner, gesamtschweizerisch anwendbarer Erkenntnisse im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung von flachgründigen Rutschungen

2 Grundlagen

2.1 *Unterlagen zu den Ereignissen Napf und Appenzell*

Zum Zeitpunkt der Projektarbeiten konnte auf folgende Unterlagen und Berichte zu den Ereignissen in den Gebieten Napf und Appenzell abgestützt werden:

- Bericht "Unwetter im Napfgebiet vom 15./16. Juli 2002" – Ereignisdokumentation" der Arbeitsgemeinschaft ARGE Geo7 AG und Schälchli, Abegg + Hunzinger (2003)
- Niederschlagsanalyse der Unwetter Napf (Tergeso AG 2002)
- Niederschlagsanalyse der Unwetter Appenzell (Tergeso AG 2003)
- Kartierung der Gerinneprozesse im Gebiet Appenzell (Ingenieure Bart AG 2002)
- Luftbilder 1:10'000 der Schadengebiete 2002 in der Ostschweiz (Flug vom 18.9.2002)

2.2 *Untersuchungen zu oberflächennahen Rutschprozessen*

Leider kommt es immer wieder zu Schadenereignissen infolge heftiger Niederschläge. Nachfolgend sind einige Fälle der letzten Jahre aufgeführt, bei denen sich in der Schweiz regional konzentrierte oberflächennahe 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: Sachsler Wildbäche (BWW 1998, Rickli 2001)
- 1999: verschiedene Regionen in der gesamten Schweiz (AGN 2000)
- 2002: Gebiete Napf (Juli), Appenzell (Aug/Sept.) und Graubünden (Nov.)

Auch aus den Berggebieten unserer Nachbarländer sind verschiedene Schadenereignisse durch oberflächennahe Rutschungen dokumentiert. Beispielhaft erwähnt seien die Ereignisse in Kärnten (A) in den Jahren 1966 und 1975 (Moser 1980), im Mittleren Inntal (A) 1985 (Moser und Schoger 1989), im Veltlin (I) in den Jahren 1983 und 1987 (Polloni et al. 1991), in Slovenien im Jahr 1989 (Fazarinc und Mikos 1992) sowie im Piemont (I) im Jahr 1994 (Aleotti et al. 1996).

Diese Aufzählungen aus dem In- und Ausland lassen erkennen, dass auch in Zukunft mit Schäden durch oberflächennahe Rutschprozesse zu rechnen ist.

2.3 Unwetterereignisse im Napfgebiet und Kanton Appenzell AR

2.3.1 Unwetter im Napfgebiet vom 15.-16. Juli 2002

Gemäss der Niederschlagsanalyse der Unwetter im Napfgebiet vom 15.-16. Juli 2002 (Tergeso AG 2002) entstanden die Starkniederschläge am Nordrand eines Kaltlufttropfens mit Zentrum über Genua zwischen der kalten Innenluft und der nördlich davon liegenden wärmeren Luft. Die bodennahe Strömung drehte in der Nacht auf Nord und schob eine wärmere Luftschicht unter die Kaltluft.

Am 15. Juli setzte in der Region Trub (ca. 5 km südlich des Untersuchungsperimeters, Abbildung 2.1) im Zeitraum zwischen 22:30 und 23:00 Uhr heftiger Regen ein. Etwa um 00:45 Uhr wurde das Maximum der Niederschlagsintensität erreicht und gegen 01:30 Uhr liess der Regen nach. Die Hauptphase der Niederschläge dauerte somit in Trub etwa 2.5 bis 3 Stunden.

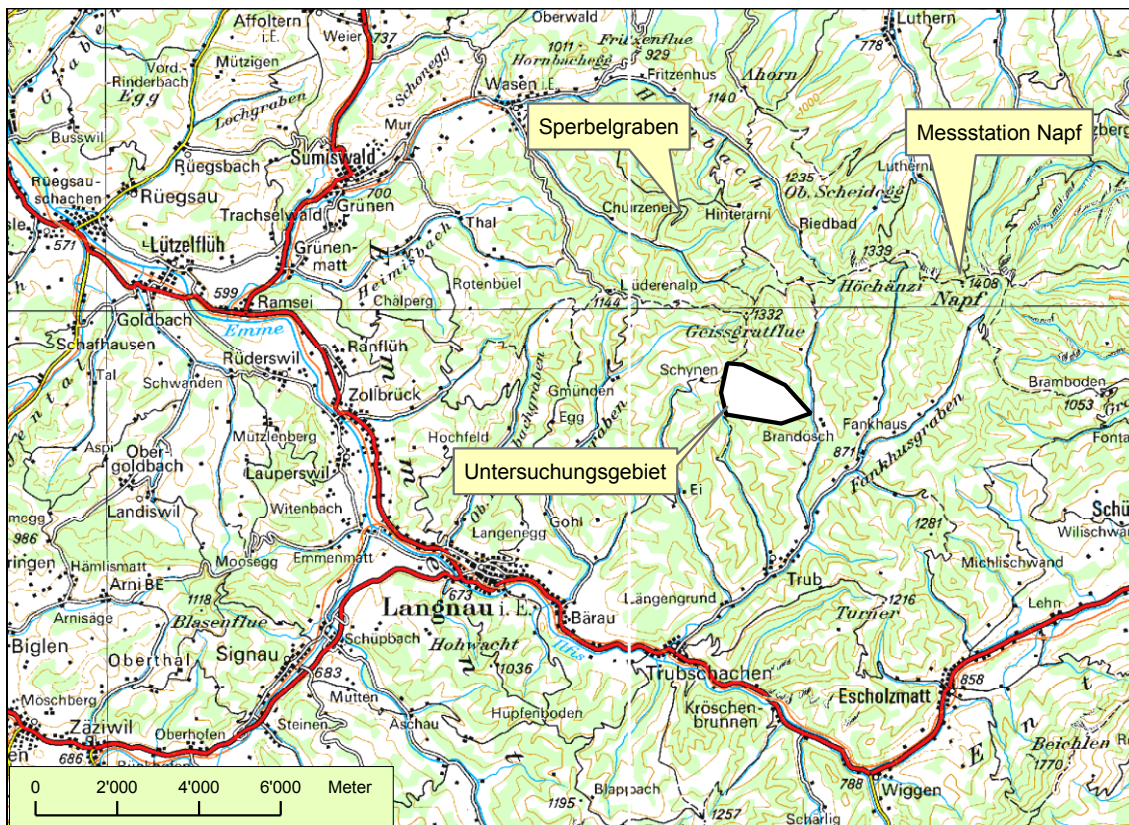


Abbildung 2.1: Übersicht über das Schadengebiet Napf. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA035469).

An der Niederschlagsmessstation auf dem Napf, welche sich in einer Entfernung von etwa 5 km nordöstlich des Untersuchungsgebietes befindet, wurden innerhalb von drei Stunden 41 mm Regen gemessen. An der Messstation Sperbelgraben (WSL) wurden innerhalb des gleichen Zeitraumes 51 mm registriert. In den am stärksten betroffenen Gebieten der Region Napf betrugen die Niederschlagssummen für 24 Stunden zwischen 70 und 80 mm und die 3-Stunden Summe zwischen 55 und 60 mm. Dies würde nach Geiger et al. (1991) einem Unwetter in diesem Gebiet mit

einer Wiederkehrdauer von ungefähr 10 bis 30 Jahren entsprechen. Bereits in den Tagen vor dem Ereignis fielen in der Region ausgedehnte Niederschläge (108 mm in 8 Tagen, Tergeso AG 2002).

Durch die intensiven Niederschläge wurden im Kerngebiet zahlreiche, oberflächennahe Rutschungen ausgelöst. Unter anderem waren im nördlichen Teil der Gemeinde Trub auch drei Bauernhäuser von den Erdmassen betroffen (Wegmüller 2003). Im Weiteren entstanden durch die Hochwasserabflüsse massive Schäden an Wasserbauten: Zerstörung oder Beschädigung von Längs- und Querwerken, Erosion und Auflandungen. In einigen Gemeinden (Langnau, Sumiswald und Trubschachen) entstanden kleinere Überflutungsflächen (ARGE Geo7, SA+A 2003).

2.3.2 Unwetter im Kanton Appenzell Ausserrhoden vom 31.8.-1.9.2002

Nach Eugster (2003) führte bereits am 20. August 2002 ein lokales Gewitter zu Überflutungen in den Gemeinden Schönengrund und Urnäsch (Abbildung 2.2). Die Schadenssumme an Gebäuden, Kulturen und Gewässern belief sich auf rund 5 Mio. Franken.

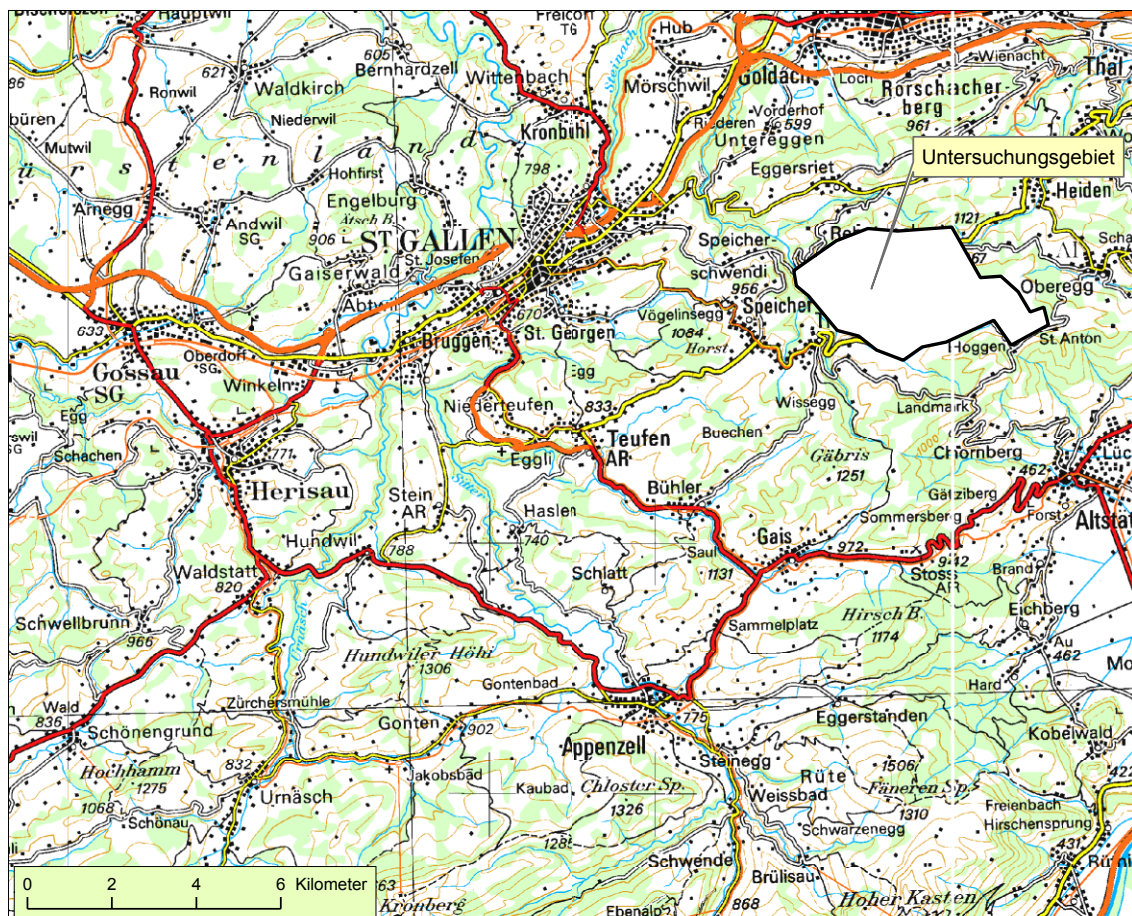


Abbildung 2.2: Übersicht über das Schadengebiet Appenzell. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA035469).

Gemäss dem Bericht über die Niederschläge beim Unwetter vom 31.8. bis 1.9.2002 im Raum Appenzellerland (Tergeso AG 2003) verlagerte sich im Verlauf des 31.8. eine Kaltfront von Westen nach Osten über Europa. Eine erste Welle verursachte bereits am Vormittag des 31.8. vereinzelt

zwei- bis dreistündige Niederschlagsspitzen bis 25 mm im späteren Schadensgebiet. Die Hauptkaltfront erreichte den Raum Appenzell in der zweiten Tageshälfte. Am Abend und in der Nacht vom 31.8. auf den 1.9.2002 kam es zu intensiven Niederschlägen mit Niederschlagssummen von bis über 150 mm in 12 Stunden bzw. über 100 mm in 6 Stunden. Der höchste Tagesniederschlag wurde mit 171 mm in Eggen (ca. 7 km ENE des Untersuchungsgebietes) gemessen. Für den 4-stündigen Niederschlag, welcher für die Station Eggen auf etwa 100 mm geschätzt wird, ergibt sich eine Wiederkehrperiode von ungefähr 30 bis 50 Jahren. Der Einfluss des Vorregens auf die Schadenprozesse wird im vorliegenden Fall als eher unbedeutend eingestuft (Tergeso AG 2003).

Der Schwerpunkt der Niederschläge und der Schäden lag im Einzugsgebiet der Goldach (Gemeinden Speicher, Trogen, Rehetobel, Wald) sowie im östlichen Teil des Rotbachtals (Gemeinden Teufen, Bühler, Gais). Das Unwetter vom 31. August auf den 1. September verursachte nach Eugster (2003) Schäden in der Grössenordnung von insgesamt über 50 Mio. Franken.

2.4 Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

2.4.1 Napf

Das Untersuchungsgebiet Napf liegt auf dem Gebiet der Gemeinde Trub BE im Emmental. Es umfasst das hydrologische Einzugsgebiet des Zinggengrabens mit einer Gesamtfläche von 2.5 km² und ist zu 48 % bewaldet (1.2 km² Wald, 1.3 km² Freiland). Während der Wald typischerweise in den steilen Gebieten der höheren Lagen stockt, finden sich das Freiland und die Siedlungen hauptsächlich auf den weniger stark geneigten Flächen der tieferen Lagen (Abbildung 2.3). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 900 m ü.M. bei der Einmündung des Zinggengrabens in den Brandöschgraben bis ca. 1360 m ü.M. westlich der Hohmattflue (Kartendarstellungen des Perimeters: Abbildungen 3.1 und A.1 im Anhang).

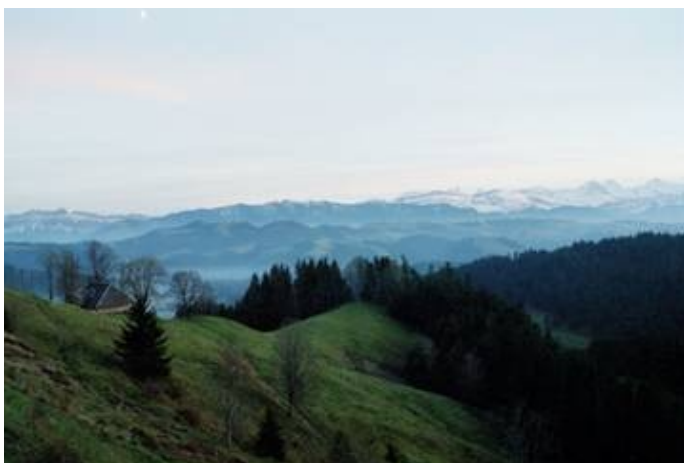


Abbildung 2.3: Napfgebiet und dazugehöriges Relief-Typprofil zur Darstellung der Wald-/Freilandverteilung.

Vegetation, Besiedlung und Nutzung

Die Besiedlung des Zinggengrabens zeichnet sich durch zerstreut gelegene Einzelhofsiedlungen aus, welche an sonniger Lage, meist leicht erhöht auf einer Flussterrasse aber grundsätzlich im flachen Talboden des Grabens gegründet wurden. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen sind in den flacheren Partien auf den Flussterrassenschottern der linken Talseite und nördlich des Heugrats zu finden. Die oberhalb von 1100 m ü.M. zerstreut vorkommenden Weiden sind häufig vernässt (Feuchtwiesen, Ried) und werden nur extensiv genutzt. Der Abfluss des Wassers erfolgt aus den Waldgebieten in die darunter liegenden Weiden und Wiesen.

Der Wald stockt zur Hauptsache auf den steilen, aufgrund zahlreicher Rippen und Gräben stark kupierten Flanken des Einzugsgebietes oberhalb der Freilandflächen. Durch den Sturm Lothar am 26.12.1999 sind im Wald zahlreiche Flächen- und Streuschäden entstanden. Die unbeschädigten Bestände sind im Hinblick auf ein ideales Plentergleichgewicht mit guter Struktur und genügend Verjüngung eher zu starkholzreich und zu dunkel, was auf eine zurückhaltende Bewirtschaftung hinweist.

Geologie

Gemäss der Geologischen Generalkarte der Schweiz 1:200'000 (Blatt 2, 1951) sowie dem Bericht zur Hydrogeologie im Truebtal (WEA 1991) herrschen im gesamten Untersuchungsgebiet die Napfschichten der Oberen Süsswassermolasse (Tortonien, vgl. Tabelle 2.1) vor.

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

Klassische Unterteilung	Alter in Mio. J.	Internationale Unterteilung		Wichtigste Nagelfluhfächer (von Ost nach West)	Alpines Liefergebiet der Gerölle
Obere Süsswassermolasse	5 10 15	Miozän	Tortonien Serravallien Langhien	«Tortonien» Bodensee-Pfänder Hörnli Napf (ob. Teil)	Penninische Decken
Obere Meeresmolasse	16.3		oberer Teil: «Helvetien» Burdigalien		
Untere Süsswassermolasse	22.5		Aquitainen	Hörnli Napf (mittl. Teil)	Helvetische D. Hohe penninische Decken (m. Ophiolithen)
Untere Meeresmolasse	24	Oligozän	Chattien	Gäbris-Kronberg Höhrne Napf (unt. Teil)	Ostalpine Kristallindecken (Err-Bernina)
	30		Rupélien	Stampfen Speer Rigi Thunersee Pélerin	Ostalpine Sedi-mentdecken Simmendecke
	36			keine Nagelfluhfächer	

Die Schichten sind nur wenig geneigt; sie 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 Sedimentgeröllen besteht, mindestens 10% Gerölle

kristalliner Herkunft enthält. Abbildung 2.4 zeigt einen Aufschluss der oberen Süsswassermolasse, welcher sich zwar nicht im Untersuchungsgebiet befindet, jedoch als repräsentativ für die entsprechenden Verhältnisse erachtet wird.

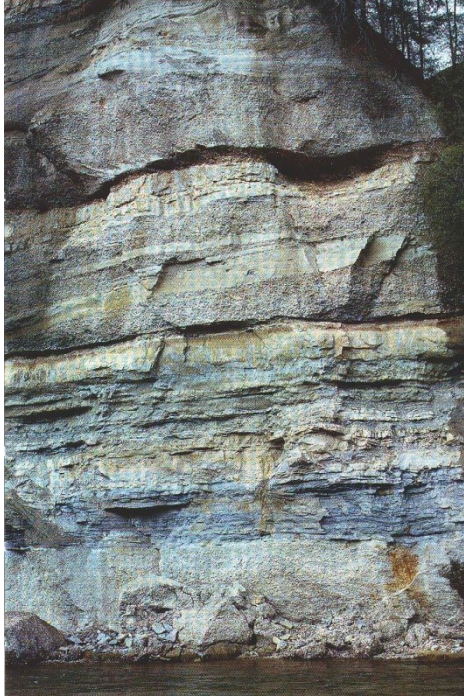


Abbildung 2.4: Wechsellagerung von Nagelfluh, Sandstein und Mergel in der alpennahen Oberen Süsswassermolasse bei Wolhusen LU (Höhe des Aufschlusses ca. 15 m; Labhart 1993).

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

2.4.2 Appenzell

Das Untersuchungsgebiet Appenzell liegt auf dem Gebiet der Gemeinden Wald und Rehetobel AR. Es umfasst eine Gesamtfläche von 10.2 km² und ist zu 23 % bewaldet (2.3 km² Wald, 7.9 km² Freiland). Während der Wald typischerweise in den steilen Tobeleinhängen stockt, befinden sich das Freiland und die Siedlungen hauptsächlich auf den weniger stark geneigten Rücken und Flächen zwischen den Gerinnen (Abbildung 2.5). Damit unterscheidet sich die topographische Verteilung von Wald und Freiland grundsätzlich von jener im Gebiet Napf. Die Grenze des Untersuchungsgebietes wurde anhand der natürlichen Topographie festgelegt: im südlichen Teil durch die Gewässer Goldach und Sägibach, ansonsten durch die hydrologische Einzugsgebietsgrenze der Goldach bei Zweibrücken (Kartendarstellungen des Perimeters: Abbildungen 3.1 und A.2 im Anhang).

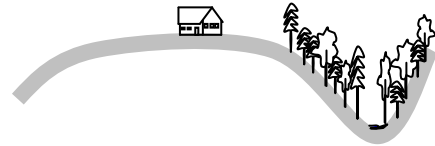


Abbildung 2.5: Appenzellerland und dazugehöriges Relief-Typprofil zur Darstellung der Wald-/ Freilandverteilung.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 650 m ü.M. bei Zweibrücken an der Goldach bis 1120 m ü.M. nördlich von Kaien bei Rehetobel. Mehr als 90 % der Perimeterfläche liegen in einem Höhenbereich zwischen 800 und 1100 m ü.M.

Vegetation, Besiedlung und Nutzung

Etwas mehr als drei Viertel der Untersuchungsfläche sind landwirtschaftliche Nutzflächen, Siedlungen und Strassen. Auf den Landwirtschaftsflächen wird zumeist Viehwirtschaft betrieben, wobei die flacheren Partien als Mähwiesen, die steileren und damit schwer zu bewirtschaftenden Flächen fast ausnahmslos als Weiden genutzt werden. Entsprechend der Verteilung von Wald und Freiland ergibt sich mehrheitlich eine Entwässerung vom flacheren Freiland in bewaldete und steilere Gebiete, teilweise ergänzt durch Meliorationen sowie Strassen- und Siedlungsentwässerungen.

Die Nutzung der Wälder war in letzter Zeit eher zurückhaltend. Abgeleitet wird diese Aussage von der meist gleichförmigen Bestandesstruktur und dem grossen Anteil Baumholz im Vergleich zu relativ wenigen Jungwaldflächen.

Geologie

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich der geneigten Molasse. Gemäss den Kartenblättern 23 (1949) und 45 (1964) des Geologischen Atlas der Schweiz herrscht im Perimeter die Untere Süsswassermolasse vor, wobei der grösste Teil das Aquitanien (Tabelle 2.1) ausmacht. Lithologisch zeichnet sich das Aquitanien durch granitische Sandsteine, Kalksandsteine und Mergel aus und die Schichten fallen mit ca. 25 bis 40° gegen NNW ein (Abbildung 2.6). Im Südosten des Untersuchungsgebietes befindet sich die Antiklinalzone, innerhalb derer die Schichten des Aquitanien steil anstehen. In der äussersten SE-Ecke des Untersuchungsgebietes kommen auf geringer Fläche Molasseformationen des Chattien vor, welche zur Hauptsache aus grauen Mergeln und Kalksandsteinen bestehen.

Der Molassefels ist an einigen Stellen mit glazialen Ablagerungen bedeckt (hauptsächlich Riss-, teilweise auch Würmmoräne). In den übrigen Gebieten bestehen die Lockergesteine im flacheren Gelände zur Hauptsache aus Verwitterungsmaterial der Molasse, in steilen Lagen aus Gehängeschutt.

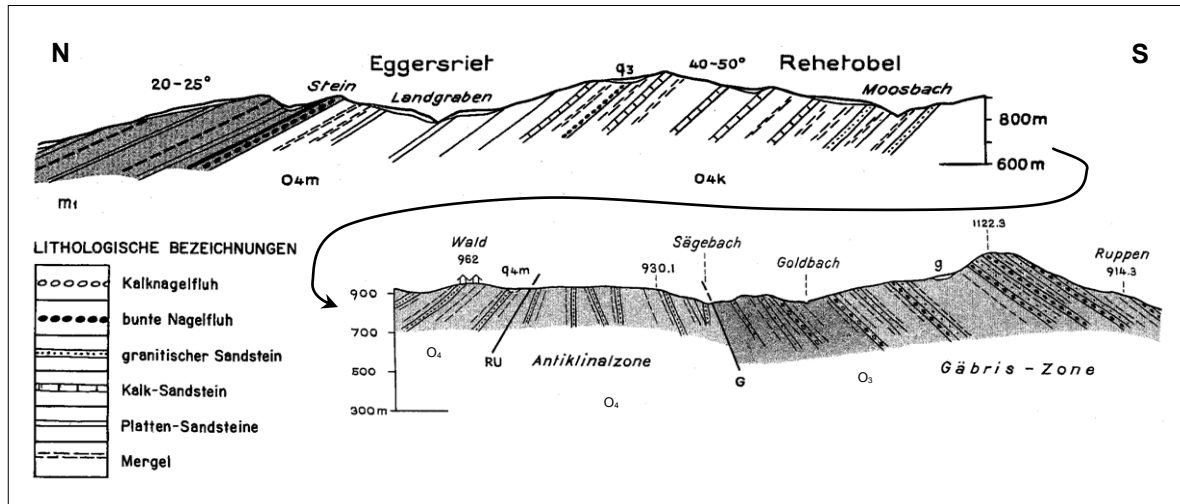


Abbildung 2.6: Geologische Profile in Richtung Nord/Süd durch den Untersuchungsperimeter Appenzell. Von Nord nach Süd folgen sich die Ortsbezeichnungen Rehetobel (Nordrand des Untersuchungsperimeters), Moosbach, Wald und Sägebach (Südrand des Untersuchungsperimeters). Bezeichnungen: m₁: Burdigalien; o₄: Aquitanien (m= Mergelzone, k=Kalkzone); o₃: Chattien; q₃: Riss-Moräne; q_{4m}: Würm-Moräne, g: Gehängeschutt; RU: Randunterschiebung, G: Gäbris-Aufschiebung.

3 Methoden

3.1 Allgemeines

In den beiden Schadengebieten Napf und Appenzell wurde je ein Untersuchungsperimeter definiert. Innerhalb dieser Perimeter wurden alle Rutschungen, welche gewisse Kriterien erfüllten (vgl. Kapitel 3.3.2), im Feld untersucht und dokumentiert. Ein im Rahmen der Vorbereitungen für die Feldaufnahmen erarbeitetes Formular sowie eine entsprechende Anleitung (vgl. Anhang 2 und 3) garantierten die einheitliche Ansprache und Messung der zahlreichen Parameter. Die Felddaten wurden in einer Access-Datenbank abgelegt. Im Weiteren wurden eine Photodokumentation erstellt sowie Bodenproben entnommen und im Labor analysiert. Zusätzlich zu den Erhebungen bei den Rutschungen wurden mit einem GIS verschiedene Angaben zu den Untersuchungsgebieten bearbeitet: Flächenbestimmungen (Wald, Freiland, usw.), Topographie (Höhenlage, Exposition, Neigungen), u.a.m. Die Planung der Felderhebungen konnte teilweise auf Hinweise aus aktuellen Luftbildern abgestützt werden.

3.2 Untersuchungsperimeter

Die Untersuchungsperimeter Napf und Appenzell (Abbildung 3.1) befinden sich jeweils ungefähr im Zentrum der entsprechenden Starkregengebiete. Im Anhang finden sich weitere Abbildungen der Perimeter (Abbildungen A.1 und A.2).

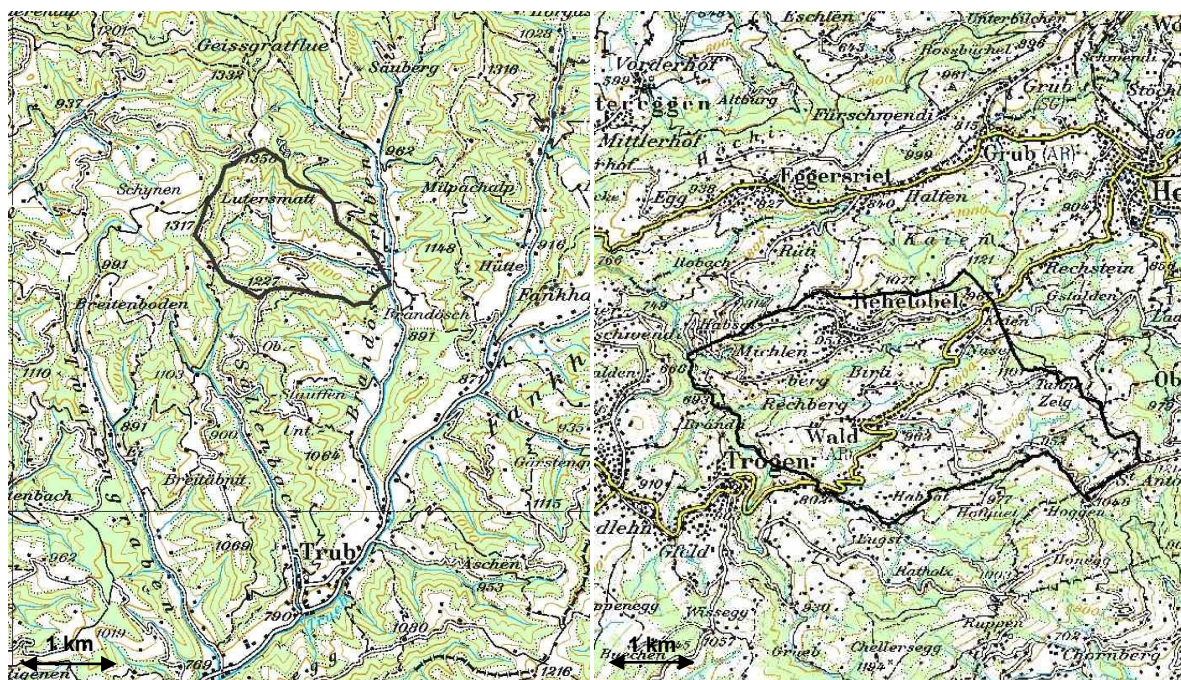


Abbildung 3.1: Links: Untersuchungsperimeter Napf (2.5 km²); rechts: Untersuchungsperimeter Appenzell (10.2 km²). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA035469).

Die Perimetergrenzen mussten im Verlauf der Feldaufnahmen angepasst werden. Das massgebende Kriterium war dabei die maximale Anzahl Rutschungen, die in der zur Verfügung stehenden Zeit (Oktober bis Dezember 2002) erfasst werden konnte. Zudem bestand das Ziel, die definierten Perimeter vollständig zu bearbeiten. Ein weiteres Kriterium bei der Wahl der Perimeter war, dass möglichst wenige der Rutschungen verändert bzw. verbaut waren, da in diesen Fällen nicht mehr alle Parameter erhoben werden können.

3.3 Aufnahmen bei den Rutschungen

3.3.1 Allgemeines

Die Feldaufnahmen erfolgten in der Zeit zwischen dem 1. Oktober und dem 16. Dezember 2002. Die Rutschungen wurden nach den in Kapitel 3.3.2 festgelegten Kriterien ausgewählt und dokumentiert. Das Aufnahmeverfahren ist aus den nachfolgenden Ausführungen sowie aus dem Aufnahmeformular und den dazu erarbeiteten Instruktionen ersichtlich (beide im Anhang). Beurteilt wurde die Rutschung und das umliegende Gelände in drei Räumen unterschiedlicher Ausdehnung (Abbildung 3.2). Bei jeder Rutschung wurden zudem diverse Fotos gemacht.

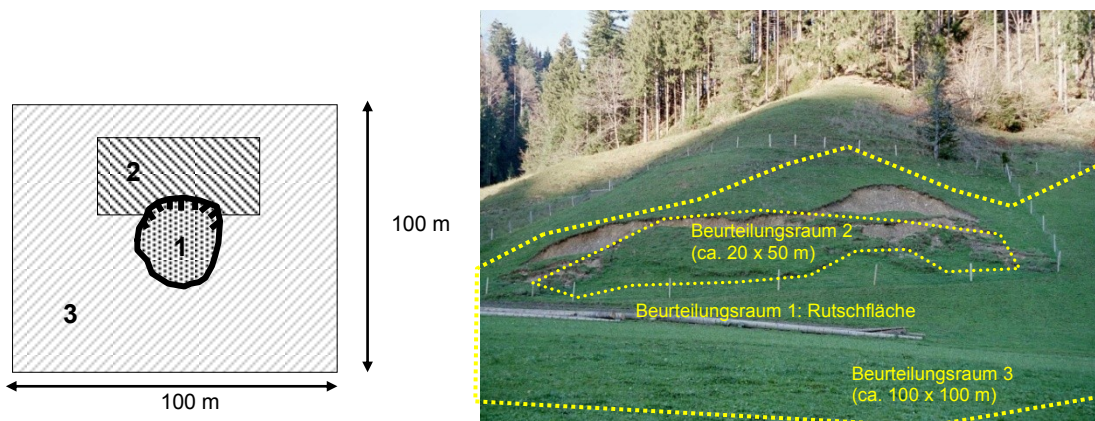


Abbildung 3.2: Drei unterschiedliche Beurteilungsräume. Beurteilungsraum 1 (eigentliche Rutschfläche); Beurteilungsraum 2 (Fläche von ca. 20 x 50 m unmittelbar oberhalb des Anrissrandes); Beurteilungsraum 3 (Fläche von ca. 100 x 100 m in der Umgebung der Rutschung).

Messgeräte:

- Neigungen: Vertex (Haglöff)
- Höhenlage: Höhenmeter Thommen
- Exposition: Bussole Meridian
- Distanzmessung: Sonin (Ultraschall-Distanzmessung)
- Lagekoordinaten: GPS Garmin 90

3.3.2 Kriterien für eine Erfassung der Rutschungsdaten

Verschiedene Aspekte führten dazu, dass bereits zu Beginn der Feldaufnahmen Kriterien für die Erfassung von Rutschungen definiert werden mussten. Im Zusammenhang mit den hauptsächlichen Fragestellungen dieses Projektes sind nur jene Rutschungen interessant, welche eine minimale Grösse und damit auch ein entsprechendes Gefahrenpotential aufweisen. Als minimale Grösse einer Rutschung galt ein Rutschvolumen von mindestens 30 m³. Kleinere Rutschungen wurden nur im Zweifelsfall eingemessen und protokolliert.

Es wurden nur Rutschungen beurteilt, die nicht durch bereits im Gelände klar ersichtliche Ursachen wie Strassenbau, Gerinneerosion, usw. ausgelöst worden waren. Verzichtet wurde auch auf die Untersuchung der in Einzelfällen vorkommenden mittel- oder tiefgründigen Rutschungen, welche durch die Starkniederschläge reaktiviert wurden. Ebenfalls nicht aufgenommen und beurteilt wurden murgangähnliche Prozesse in alten Rinnen und Runsen. Ein weiterer Grund für die Einführung von Ausschlusskriterien war die Tatsache, dass in der zur Verfügung stehenden Zeit (Oktober bis Mitte Dezember 2002) nur eine begrenzte Anzahl Rutschungen im Feld dokumentiert werden konnte. Die Kriterien für die Beurteilung der Rutschungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (vgl. auch Tabelle A.8 im Anhang):

- Rutschungen, ausgelöst durch die Niederschlagsereignisse des Sommers 2002
- Rutschungen innerhalb der definierten Untersuchungsgebiete
- flachgründige Rutschungen (mittlere Mächtigkeit ≤ 2.0 m)
- minimales Rutschvolumen: 30 m³
- nicht ausgelöst durch klar erkennbare Ursachen wie Gerinneerosion, Strassenböschungen und –entwässerungen, usw.

3.3.3 Angaben zur eigentlichen Rutschfläche

In der eigentlichen Rutschfläche, d.h. im Beurteilungsraum 1 gemäss Abbildung 3.2, wurden folgende Parameter erhoben:

- *Am bzw. ausgehend vom oberen Anrissrand:*
Koordinaten, Höhe ü.M., Exposition, Neigung der Rutschfläche, Auslaufstrecke und Pauschalgefälle (vgl. Abbildung 3.3)
- *In einem Bodenprofil am oberen Anrissrand:*
Boden, Wurzelraum, Lockergestein, Festgestein, Wasserführung
- *In der Rutschfläche:*
Abmessungen der Rutschung (Länge, Breite, Mächtigkeit), Rutschmechanismus, Materialbilanz, Ort der Gleitfläche, Wasserführung

3.3.4 Angaben zum Rutschhang

Auf einer Fläche von ungefähr 20 x 50 m (mindestens jedoch so breit wie der Anriss) unmittelbar über dem oberen Anrissrand der Rutschung, d.h. im Beurteilungsraum 2 gemäss Abbildung 3.2, wurden folgende Parameter erhoben:

- Hangneigung oberhalb der Rutschung
- Hydrologische Standortseigenschaften
- Alte Rutsch- oder Kriechbewegungen (Anzeichen)
- Mögliche Beeinflussung (anthropogen, Vegetationswechsel, etc.)

Auf einer Fläche von ungefähr 100 x 100 m in der Umgebung der Rutschung, d.h. im Beurteilungsraum 3 gemäss Abbildung 3.2, wurden folgende Parameter erhoben:

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

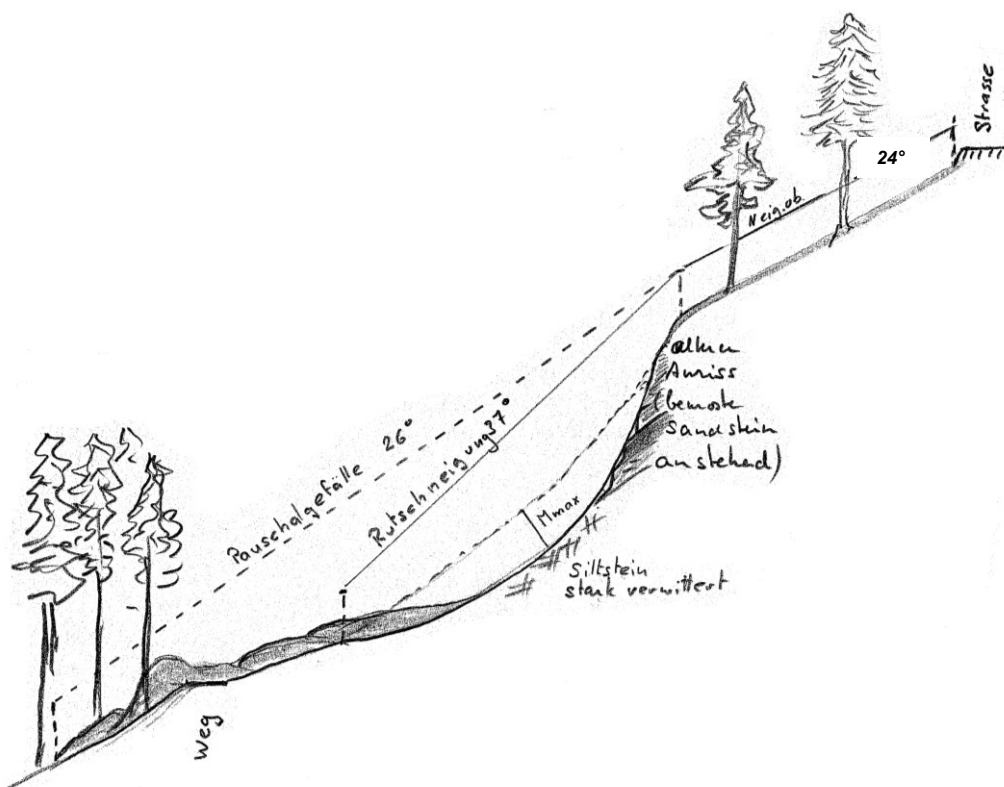


Abbildung 3.3: Beispiel einer Längenprofil-Feldskizze: Rutschung Nr. 1030 bei Rehetobel AR.

3.4 GIS / Luftbilder

Arbeiten mit ArcGIS

Neben den Erhebungen bei den Rutschungen sind für eine sinnvolle Auswertung und Interpretation der Ergebnisse auch flächenhafte Informationen zu den Untersuchungsgebieten erforderlich. Dazu gehören beispielsweise Angaben zum Bewaldungsprozent sowie zu den Verhältnissen bezüglich Exposition, Höhenstufen und Hangneigung (z.B. Flächenanteil pro Hangneigungsklasse) in den Untersuchungsgebieten. Die entsprechenden Informationen wurden mit dem geographischen Informationssystem ArcGIS erarbeitet.

Als wichtige Grundlage diente die Pixelkarte 1:25'000 der Landestopographie. Nachführungsstand der im Rahmen des Projektes verwendeten Pixelkarte ist im Gebiet Napf das Jahr 1989 und im Gebiet Appenzell 1989/90. Basierend auf der Pixelkarte wurden für beide Untersuchungsgebiete die Perimetergrenzen digitalisiert. Der nächste Schritt bestand in der Bestimmung der Waldrandlinien und damit der Waldflächen. Dazu wurde der Waldton der Pixelkarte verwendet. Da die Kartennachführung mehr als 10 Jahre zurückliegt, sind zwischen den aktuellen Waldgrenzen und jenen der Pixelkarte gewisse Abweichungen zu erwarten.

Für die Berechnung der Höhenlagen, Hangneigungen und Expositionen in ArcGIS wurde das digitale Höhenmodell DHM25 (Rasterweite: 25 m) der Landestopographie verwendet. Im Zusammenhang mit den Hangneigungen wurde festgestellt, dass die mit dem DHM25 ermittelten Neigungen bei den Rutschungen im Durchschnitt markant tiefer waren als die im Gelände gemessenen Werte (Abbildung 3.4). Dies trifft auch zu für das DHM10 des Kantons Bern (Rasterweite 10 m), welches für das Untersuchungsgebiet Napf zur Verfügung stand, wobei die Differenzen zwischen den im Feld gemessenen und mit dem DHM10 berechneten Hangneigungen etwas weniger markant ausfielen. Für das Untersuchungsgebiet Appenzell besteht leider kein genaueres Höhenmodell als das DHM25. Als Gründe für die Abweichungen von im Gelände gemessenen Hangneigungen von den Neigungen der digitalen Höhenmodelle kommen massgeblich die folgenden Aspekte in Frage:

- *Relief:* das kleinräumige Relief wird durch die gegenwärtig zur Verfügung stehenden digitalen Höhenmodelle für diese Aufgabenstellung zu ungenau erfasst. Beispiel: in vielen Fällen, wo in Abbildung 3.4 die GIS-Neigung im Vergleich zu der gemessenen Neigung deutlich zu gering ist, befinden sich die Rutschungen in Kretenlagen. Nach dem DHM liegen die Rutschungen in einer flachliegenden Kreten-Rasterzelle, effektiv brach die Rutschung jedoch im steilen Hang knapp unterhalb der Krete los. Dabei gibt es Rutschungen, bei denen das DHM10 die effektiven Verhältnisse deutlich besser modelliert, jedoch auch solche, wo die Unterschiede zum DHM25 nur gering sind oder keine Differenzen bestehen.
- *Position:* die mit dem GPS gemessene Position der Rutschungen kann mit einem Fehler behaftet sein. Da kein differenzielles GPS eingesetzt wurde, sind Abweichungen (horizontal) von bis zu 15 m möglich, bei mangelhaftem Satellitenempfang in schwierigen topographischen Verhältnissen noch etwas mehr. Dadurch kann es sein, dass die Position der Rutschung in eine benachbarte Rasterzelle des DHM zu liegen kommt.
- *Rasterweite:* mit Zunahme der Rasterweite entstehen bei allen Daten Interpolationseffekte.

Da für das Gebiet Appenzell kein genaueres Höhenmodell als das DHM25 der Landestopographie zur Verfügung stand, wurden schlussendlich im Hinblick auf die Vergleichbarkeit in beiden Untersuchungsgebieten die entsprechenden Parameter (Höhenlage, Exposition, Neigungsverhältnisse) mit dem DHM25 gerechnet. Die Ergebnisse zu den Hangneigungen konnten jedoch leider aufgrund der erwähnten Abweichungen zwischen Modell und Geländemessung nicht weiter verwendet werden.

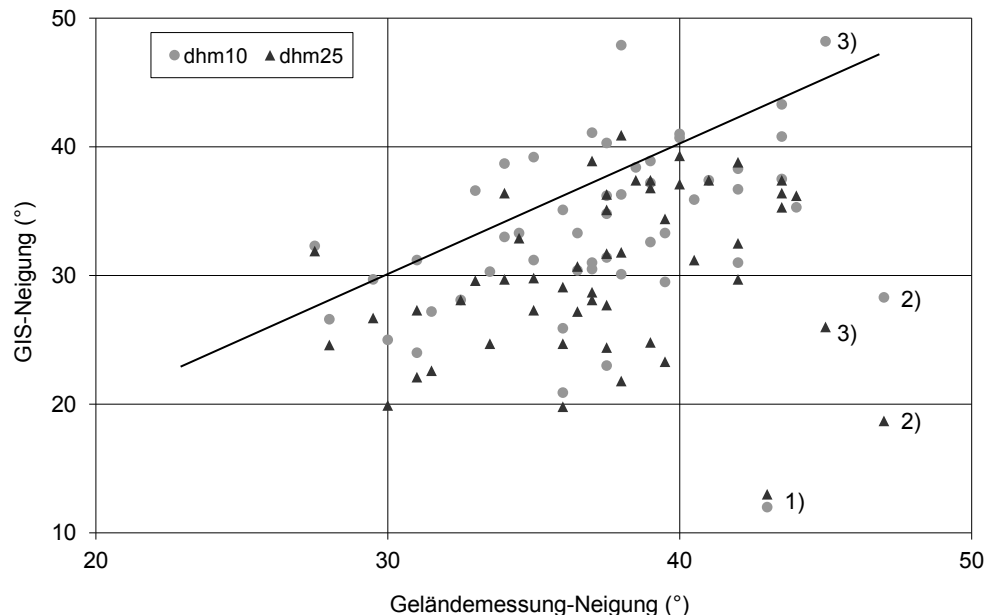


Abbildung 3.4: Vergleich zwischen den im Gelände gemessenen und im GIS mit dem digitalen Höhenmodell DHM25 (Landestopographie) bzw. DHM10 des Kantons Bern berechneten Hangneigungen bei den Rutschungen im Gebiet Napf. Eingezeichnet ist die Gerade der genauen Übereinstimmung Gelände – GIS. Beispiele für Rutschungen in Kretenlagen: 1) sowohl das DHM25 wie das DHM10 unterschätzen die effektive Hangneigung massiv, 2) DHM10 etwas besser als DHM25, 3) DHM25: deutliche Unterschätzung, DHM10 mässige Überschätzung.

Luftbilder

Gemäss ARGE Geo7, SA+H (2003) wurde das Unwettergebiet Napf am 23. Juli sowie am 12. August 2002 befliegen. Die Auswertung der Luftbilder im Massstab 1:10'000 erfolgte durch die oben genannte Arbeitsgemeinschaft. Die Lage-Koordinaten der Anrissstellen der zahlreichen Rutschungen wurden der WSL für die Planung der Felderhebungen zur Verfügung gestellt. Mitte September erfolgten Bildflüge über den Schadengebieten der Ostschweiz. Die Luftbilder im Massstab 1:10'000 wurden an der WSL für die Planung der Felderhebung mit einem Aviopret Stereoskop ausgewertet.

Bei der Auswertung der Luftbilder zeigte sich folgende Problematik: während die Ergebnisse der Luftbildinterpretation für das Freiland gut und hilfreich waren, lieferten die Auswertungen für das Waldareal nur bedingt brauchbare Resultate. Der Grund liegt darin, dass Anrisse in bestockten Flächen nur unzuverlässig auf den Luftbildern zu entdecken sind (Schattenwirkung, Bestandeschluss). In vielen Fällen gaben einzig Abfluss Spuren beim Übergang von Wald zu Freiland Hinweise auf Rutschprozesse im Wald.

3.5 Bodenuntersuchungen

Bei fünf Rutschungen im Gebiet Appenzell sowie bei zwei Rutschungen im Gebiet Napf wurden Bodenproben aus dem Bereich des oberen Anrissrandes entnommen. Das Bodenmaterial stammt jeweils aus der Zone unmittelbar über der Gleitfläche bzw. aus dem Bruchhorizont. Es repräsentiert das Material an der Gleitfläche, nicht aber unbedingt den gesamten darüber liegenden Boden. Die Feinanteile Silt und Ton nehmen tendenziell mit zunehmender Tiefe zu und damit auch die Anzeichen von Wechselfeuchtigkeit (Marmorierung) bis hin zu Vernässungsmerkmalen (blau-grau-grüne Reduktionsfarben wegen Sauerstoffmangel). Ziele der Bodenuntersuchungen waren:

- Vielfalt der vorkommenden Lockergesteinsböden erfassen
- Eichung der Feldklassifikation
- Ermittlung von Bodenkennwerten für bodenmechanische Analysen an ausgewählten Rutschstandorten

Das Probengewicht (feucht) betrug jeweils zwischen 15 und 22 kg. Im Labor wurde bei allen Proben der Wassergehalt bestimmt und eine Korngrössenanalyse durchgeführt. Im Bereich von 63 bis 10 mm erfolgte eine Trockensiebung, von 10 bis 0.125 mm eine Nasssiebung. Die Feinanteile (< 0.06 mm) wurden mit der Aräometeranalyse untersucht. Bei den feinkörnigen Böden wurden zudem die Fliess- und Ausrollgrenze bestimmt. Die Klassifikation der Böden erfolgte nach SN670 008a (VSS 1997). Der Scherwinkel ϕ' wurde aufgrund der Korngrössenverteilung nach der Methode von Dhawan (in Lang et al. 1996) abgeschätzt und mit den Werten für die Bodenkennziffern der Schweizer Norm SN 670 010b (VSS 1999) verglichen.

4 Ergebnisse

4.1 Datengrundlage

Tabelle 4.1 enthält eine Zusammenstellung über die im Feld aufgesuchten und beurteilten Rutschungen. Im Perimeter Appenzell sind 82 Rutschungen (wovon eine verbaut) und im Perimeter Napf 51 Rutschungen (wovon drei verbaut) umfassend dokumentiert. Diese insgesamt 133 Rutschungen in beiden Untersuchungsgebieten stellen die Datengrundlage für die nachfolgenden Auswertungen und Interpretationen dar. Die insgesamt vier in der Datengrundlage enthaltenen verbauten Rutschungen befinden sich alle auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Im Anhang sind die entsprechenden Rutschungen innerhalb der Untersuchungsgebiete lokalisiert (Abbildungen A.1 und A.2).

Tabelle 4.1: Im Rahmen der Felderhebungen dokumentierte Rutschungen; grau hinterlegt: Rutschungen, welche bei den folgenden Auswertungen verwendet wurden.

Untersuchungsgebiet	Total im Feld angesprochen	bei den Auswertungen nicht verwendete Daten (d.h. Aufnahmekriterien nicht erfüllt, vgl. Kap.3.3.2)					bei den Auswertungen verwendete Daten	
		zu klein (<30 m ³)	Ursache: Strasse	Ursache: Gerinneprozesse	andere Ursachen	ausserhalb Perimeter	verbaute Rutschung	unverbaute Rutschung
Appenz.	143	24	20	6	4	7	1	81
Napf	91	15	8	1	16	-	3	48
Total	234	39	28	7	20	7	4	129

Neben den 133 Rutschungen, zu welchen vollständige Datensätze erarbeitet wurden, sind zu 101 weiteren Rutschungen (zu klein, klar erkennbare Ursachen, etc.) gewisse Angaben erfasst worden. Aufgenommen wurden sie, wenn sie im Luftbild als solche erkannt waren und im Gelände aufgesucht wurden. Es ist jedoch wichtig zu bemerken, dass die Rutschungen, welche die Aufnahmekriterien nicht erfüllten, aus Zeit- und Aufwandgründen nicht flächendeckend in den Untersuchungsgebieten erfasst sind. Insbesondere die von Gerinnen beeinflussten Rutschungen sind sehr viel zahlreicher als in Tabelle 4.1 angegeben.

In Tabelle 4.2 sind in einem Überblick Angaben zu Rutschungen und Flächenanteilen in den beiden Untersuchungsgebieten sowie zum Vergleich im Untersuchungsgebiet Sachseln (Rickli 2001) zusammengefasst. Im Rahmen der Untersuchung Sachseln wurden ähnliche Kriterien für die Aufnahme der Rutschungen verwendet wie bei der vorliegenden Untersuchung. Eine Ausnahme stellt die unteren Grenze des Rutschungsvolumens dar (Napf/Appenzell: 30 m³, Sachseln: 20 m³). In Tabelle 4.2 sind deshalb entsprechende Angaben für Minimalvolumen von 20 und 30 m³ angegeben. Es zeigt sich, dass die Rutschaktivität in Sachseln am grössten war, gefolgt vom Gebiet Napf. Im Gebiet Appenzell war die Rutschaktivität am geringsten. Weitere Angaben zu den Rutschaktivitäten in Wald und Freiland finden sich in Tabelle 4.7.

Tabelle 4.2: Anzahl Rutschungen und Rutschaktivität (N/ha) in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell sowie zum Vergleich im Untersuchungsgebiet Sachseln. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten werden für die Untersuchung Sachseln die entsprechenden Zahlen sowohl für ein Minimalvolumen der Rutschungen von 20 als auch von 30 m³ angegeben.

Untersuchungsgebiet	Fläche (ha)	Anzahl (N)	Rutschaktivität (N/ha)
Appenzell (Rutschungen ≥ 30 m ³)	1022	82	0.08
Napf (Rutschungen ≥ 30 m ³)	247	51	0.21
Sachseln (Rutschungen ≥ 20 m ³)	822	280	0.34
Sachseln (Rutschungen ≥ 30 m ³)	822	256	0.31

4.2 Angaben zum Entstehungsort der Rutschungen

4.2.1 Höhenlage

Das Untersuchungsgebiet *Napf* erstreckt sich von 900 bis 1360 m ü.M., wobei mehr als 80% der Fläche über 1000 m ü.M. liegen. Bei den Waldrutschungen liegt der grösste Anteil zwischen 1150 und 1300 m ü.M. Die Freilandrutschungen ereigneten sich zu 95% zwischen 1000 und 1200 m ü.M. Tiefer liegende Freilandflächen in den flacheren Talböden sind nicht von Rutschungen betroffen (Tabelle A.11 im Anhang).

Das Untersuchungsgebiet *Appenzell* erstreckt sich von 650 bis 1120 m ü.M., wobei mehr als 90% der Perimeterfläche auf über 800 m ü.M. liegen. Die Rutschungen, welche sich am 31.8./1.9.2002 ereigneten, sind nicht gleichmässig über die Höhenlage verteilt; sie befinden sich zu 90% in den tiefer gelegenen, steileren Lagen (Gerinneabhängungen) auf 750 bis 950 m ü.M. Waldrutschungen befinden sich entsprechend der Wald-/Freilandverteilung im Untersuchungsgebiet vergleichsweise eher in tieferen Lagen (Tabelle A.12 im Anhang).

4.2.2 Neigungsverhältnisse

Bei den Rutschungen wurde die Neigung zwischen dem Bereich des Anrisses und dem Ausbiss der Gleitfläche gemessen ("Rutschneigung" in Abbildung 3.3). Abbildung 4.1 gibt Aufschluss über Anzahl und Anteil der Rutschungen pro Neigungsklasse in den verschiedenen Untersuchungsperimetern. Die Rutschungen ereigneten sich in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell in Hangneigungen von 23 bis 50°. Nahezu 90% der Rutschungen fanden jedoch in einem Bereich von 29 bis 44° statt. Im Untersuchungsgebiet Napf wurden die Rutschungen in etwas steilerem Gebiet ausgelöst als im Gebiet Appenzell. Im Vergleich dazu liegen die Rutschungen von Sachseln in einem engeren Bereich, d.h. es ereigneten sich weniger Rutschungen im flachen und auch weniger im sehr steilen Gelände.

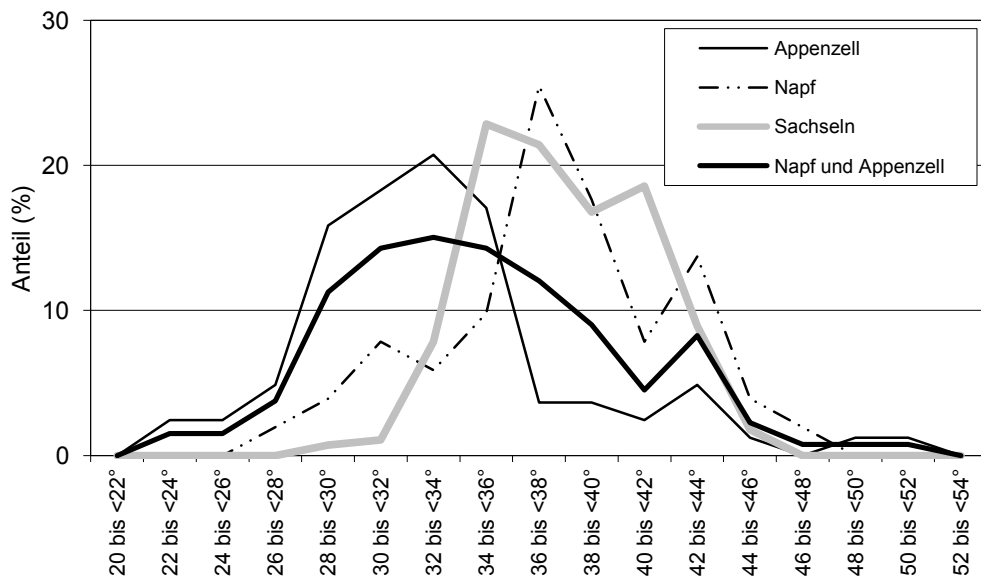


Abbildung 4.1: Anteil Rutschungen pro Neigungsklasse in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell, zusammengefasst für beide Untersuchungsgebiete ("Napf und Appenzell") sowie zum Vergleich im Untersuchungsgebiet Sachseln.

Bei Waldrutschungen wurden im Durchschnitt deutlich grössere Neigungen gemessen als bei Freilandrutschungen (Tabelle 4.3). Die Differenz des Mittelwertes bzw. des Medians beträgt in beiden Untersuchungsgebieten je 4 bis 5°. Da die Hangneigung ein grundlegender Faktor für die Hangstabilität ist, muss diese Tatsache bei Fragen zu Unterschieden der Rutschaktivität zwischen Wald und Freiland immer berücksichtigt werden. Die drei Rutschungen mit den geringsten Neigungen (23°, 23.5°, 25°) ereigneten sich im Gebiet Appenzell. Es handelt sich dabei um Flächen, bei welchen Stauwasserhorizonte und damit verbunden ausgeprägte Durchlässigkeitsgradienten beobachtet wurden. Die steilste Rutschung (50°) ereignete sich ebenfalls im Gebiet Appenzell, muss jedoch aufgrund der Tatsache, dass die Fläche zum Teil durch Materialschüttung und Mülldeponie anthropogen beeinflusst ist, als Spezialfall taxiert werden.

Tabelle 4.3: Hangneigungen bei den Rutschungen in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell sowie jeweils im Wald und im Freiland (N = Anzahl Rutschungen).

		N	Min.	Max.	Mittel	Median	1.Quartil	3.Quartil	Std. Abw.
Beide Perimeter	Wald	64	26.0	48.5	37.4	37.5	33.9	41.3	4.9
	Freiland	69	23.0	50.0	32.0	31.5	29	34	4.3
	Gesamt	133	23.0	50.0	34.6	34.0	31	38	5.3
Appenzell	Wald	34	26.0	48.5	35.5	35.0	32.0	38.0	5.0
	Freiland	48	23.0	50.0	31.0	31.0	29.0	33.0	4.3
	Gesamt	82	23.0	50.0	32.9	32.0	29.6	35.0	5.1
Napf	Wald	30	28.0	47.0	39.4	39.3	37.5	42.0	4.0
	Freiland	21	27.5	39.5	34.4	35.0	31.5	37.0	3.3
	Gesamt	51	27.5	47.0	37.4	37.5	34.8	40.0	4.4

In Tabelle 4.4 sind neben den geringsten gemessenen Neigungen bei den Rutschungen auch die Neigungen angegeben, welche von 80 resp. 90% aller Rutschungen überschritten wurden. Diesbezügliche Angaben und Überlegungen können nützlich sein im Zusammenhang mit Gefahrenbe-

urteilungen, insbesondere mit Fragen der Eintretenswahrscheinlichkeit von oberflächennahen Rutschungen. Tabelle 4.4 zeigt, dass 90% aller Rutschungen bei Hangneigungen von mehr als 28° (Appenzell) und 31° (Napf) entstanden sind. Die entsprechenden Neigungen sind im Freiland durchwegs flacher als im Wald. Die Unterschiede zwischen den Neigungen von Rutschungen im Wald und im Freiland sind in Sachseln am geringsten. Werden die drei Untersuchungsgebiete Sachseln, Napf und Appenzell verglichen, kann bezüglich der Neigungen folgende Reihenfolge ausgemacht werden: Appenzell < Napf < Sachseln. Die Differenzen zwischen den 90%- resp. 80%-Überschreitungswerten betragen je etwa 1 bis 3°.

Tabelle 4.4: Geringste gemessene Neigung bei den Rutschungen in den Untersuchungsgebieten Napf, Appenzell und Sachseln sowie Neigung, welche bei 90 bzw. 80% aller Rutschungen überschritten wurde.

		Minimalneigung	> 90%	> 80%
Appenzell	Wald (N=34)	26°	30°	31°
	Freiland (N=48)	23°	26°	29°
	Total (N=82)	23°	28°	29°
Napf	Wald (N=30)	28°	34°	37°
	Freiland (N=21)	28°	30°	31°
	Total (N=51)	28°	31°	34°
Sachseln	Wald (N=136)	30°	35°	36°
	Freiland (N=144)	28°	33°	34°
	Total (N=280)	28°	34°	35°

Neigungsverlauf oberhalb der Rutschfläche:

Neben der Neigung der Rutschfläche wurde auch die Neigung oberhalb des Anrisses gemessen ("Neig. ob" in Abbildung 3.3). Für das Gebiet *Appenzell* wurde festgestellt, dass in 43 von 48 Fällen bei Freilandrutschungen die Geländeneigung oberhalb der Rutschfläche wesentlich geringer ist als die Neigung der Rutschfläche selbst (Abbildung 4.2). Bei Waldrutschungen wurden etwa in einem ähnlichen Mass oberhalb der Rutschung steilere wie flachere Neigungen gemessen.

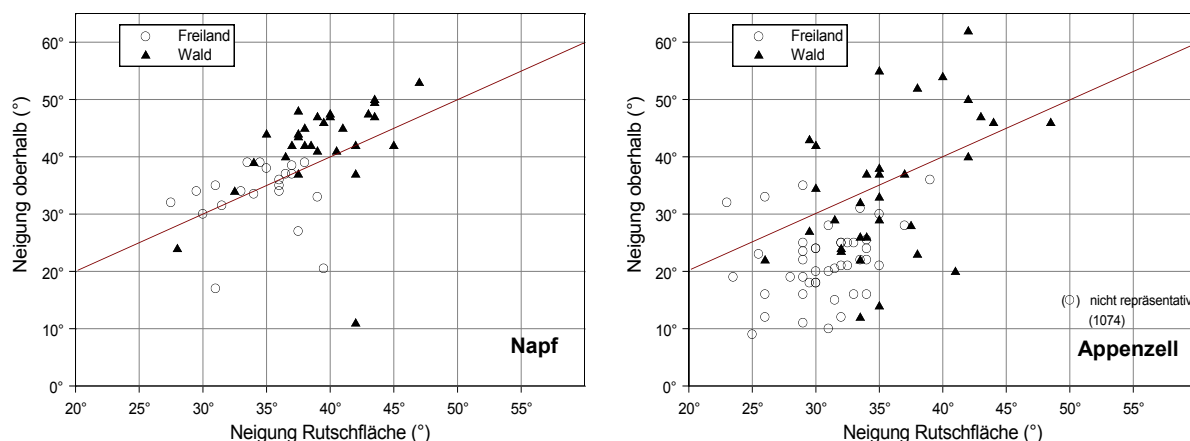


Abbildung 4.2: Vergleich zwischen der Neigung in der Rutschfläche und der Neigung oberhalb der Rutschfläche für Wald- und Freilandrutschungen (beide Neigungen im Feld gemessen) in den beiden Untersuchungsperimetern Napf (links) und Appenzell (rechts). Die eingezeichnete Gerade entspricht der Übereinstimmung der Neigung in der Rutschfläche und jener oberhalb der Rutschfläche.

Im Gebiet *Napf* ist der Unterschied zwischen der Neigung in der Rutschung und jener oberhalb etwas weniger ausgeprägt als im Gebiet Appenzell. Trotzdem zeigt sich, dass bei den Waldrutschungen die Neigungen oberhalb oft steiler sind als in der Rutschfläche. Diese Resultate geben einen ersten Hinweis auf die Bedeutung der Geländeform bei den Rutschungen (vgl. Kap. 4.2.3). Für beide Untersuchungsgebiete zeigt sich zudem auch in dieser Darstellungsweise, dass die Freilandrutschungen in vergleichsweise flacheren Neigungen entstanden sind.

4.2.3 Geländeform

Die Geländeform wurde im Bereich der Rutschung auf einer Fläche von etwa 100 mal 100 m um die Anrisszone beurteilt (Abbildung 3.2). Es erfolgte eine Einteilung der Wölbung (konkav, flach, konvex) sowohl in horizontaler Ausdehnung als auch in der Hangfalllinie. In Abbildung 4.3 sind Beispiele für häufige Geländeformen bei den Rutschungen abgebildet.



Abbildung 4.3: Beispiele für verschiedene Geländeformen. Links: konvex im Längensprofil, typisch für Rutschungen im Gebiet Appenzell. Rechts: konkav im Querprofil, typisch für Waldrutschungen im Gebiet Napf.

Die Ergebnisse bezüglich der Geländeform sind für die Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell in Abbildung 4.4 dargestellt. In beiden Untersuchungsgebieten am häufigsten traten Rutschungen in der bezüglich Längensprofil konvexen Geländeform 6 auf, gefolgt von den Geländeformen 9 und 8. Die Geländeformen 1, 2, 4 und 7 kamen jeweils nur in wenigen Fällen vor. Zwischen den beiden Untersuchungsgebieten sind einige Unterschiede festzustellen. Im Gebiet Appenzell überwiegen sowohl im Wald als auch im Freiland die konvexen Geländeformen 6 und 9 (d.h. Übergang von oben flach zu unten steil). Dies stimmt im Übrigen auch mit der Feststellung überein, wonach dort die Mehrzahl aller Rutschungen oberhalb ein flacheres Gelände aufweist (vgl. Abbildung 4.2). Im Gebiet Napf gibt es Unterschiede zwischen Wald und Freiland: bei Freilandrutschungen sind - wie im Gebiet Appenzell - die Geländeformen 6 und 9 vorherrschend; im Wald sind jedoch die Rutschungen überwiegend in "Rinnenlagen" (Geländeform 8) entstanden.

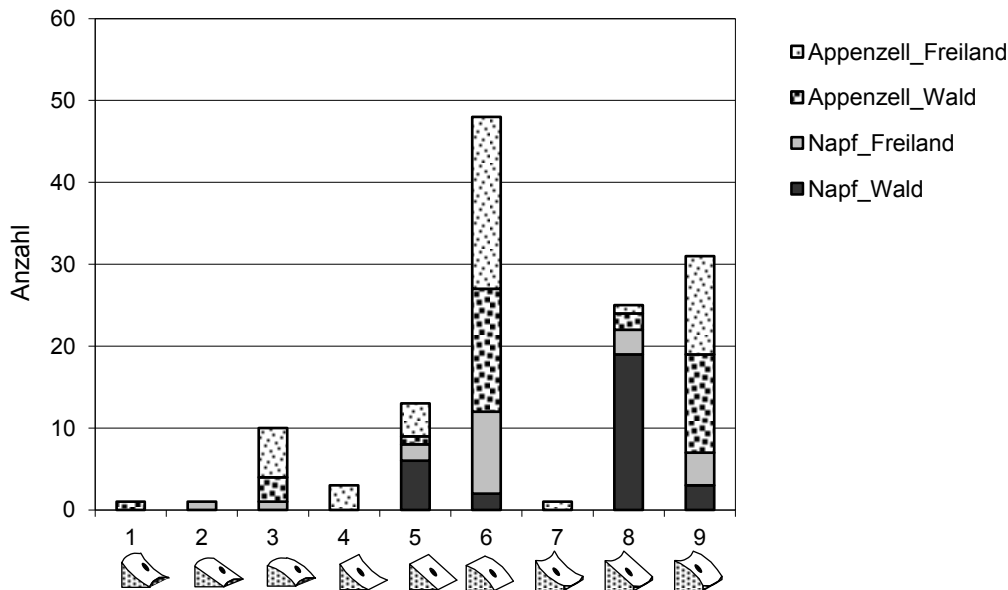


Abbildung 4.4: Anzahl Rutschungen in den verschiedenen Geländeformen (1 bis 9).

Diese Resultate weichen deutlich von den Beobachtungen in Sachseln ab. Dort wurden die Rutschungen zu mehr als der Hälfte in Gebieten ohne Wölbung (Geländeform 5) festgestellt, gefolgt von den Geländeformen 2 und 8. Die anderen Geländeformen traten kaum auf.

4.2.4 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 pro Untersuchungsgebiet die Flächen in den verschiedenen Expositionen berechnet. Diese Flächen wurden in Bezug gesetzt zu den in den jeweiligen Expositionen entstandenen Rutschungen.

In Abbildung 4.5 sind die damit berechneten Rutschaktivitäten (N/ha) pro Exposition dargestellt. Weitereangaben finden sich in Tabelle A.12 im Anhang. Die Rutschaktivität ist im Gebiet Napf in den Expositionen N und NE vergleichsweise gering. Demgegenüber sind im Gebiet Appenzell Expositionen NW, W und SW nur sehr wenig Rutschungen pro Hektare entstanden. Aufgrund zu geringer Flächenanteile dürfen im Perimeter Napf die Expositionen NW und W, im Perimeter Appenzell die Expositionen NE und E bei Interpretationen nicht berücksichtigt werden. Insgesamt sind die Resultate zum Einfluss der Exposition auf die Rutschaktivität uneinheitlich und schwer interpretierbar.

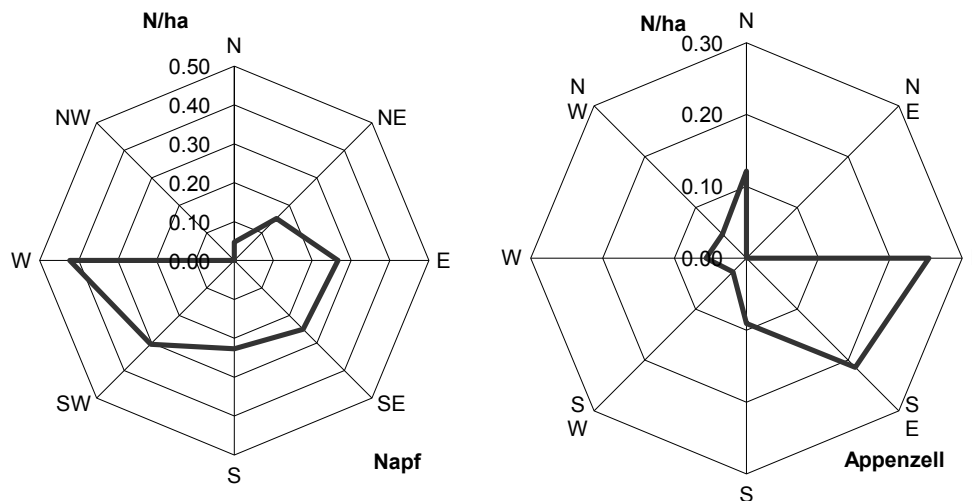


Abbildung 4.5: Rutschaktivität (N/ha) im Wald und im Freiland in Abhängigkeit der Exposition. Aufgrund zu geringer Flächenanteile dürfen im Perimeter Napf die Expositionen NW und W, im Perimeter Appenzell die Expositionen NE und E nicht bei Interpretationen berücksichtigt werden!

4.3 Abmessungen der Rutschungen

Länge und *Breite* wurden an der jeweils längsten bzw. breitesten Stelle der Rutschung auf einen halben Meter genau ermittelt (Abbildung A.5 im Anhang). Die *maximale Mächtigkeit* gibt die maximale Dicke des Rutschkörpers an, gemessen an der tiefsten Stelle, senkrecht zur Gleitfläche. Die *Anrisshöhe* ist die vertikale Höhe des Anrisses, im obersten Punkt der Anrisslinie gemessen.

Die *Rutschfläche* wurde ermittelt durch die Multiplikation einer der Rutschform entsprechenden mittleren Länge und Breite. Multipliziert mit einer *durchschnittlichen Mächtigkeit*, welche aus der Gesamtheit der in der Skizze eingetragenen Mächtigkeiten abgeschätzt wurde, ergibt dies eine Schätzung für das abgerutschte *Volumen* in m^3 . Bodenmaterial, das durch abfliessende Rutschmassen unterhalb der Ausbisslinie der Gleitfläche erodiert wurde, ist nicht dem Rutschvolumen zugerechnet worden.

In Tabelle 4.5 sind Werte angegeben für die Abmessungen der Rutschungen in den beiden Untersuchungsgebieten zusammenfasst sowie getrennt nach Wald- und Freilandrutschungen. Namentlich durch die Tatsache, dass eine untere Grenze für die Aufnahme der Rutschungen eingeführt wurde (Volumen mind. 30 m^3), ergeben sich bei der Datenanalyse keine Normalverteilungen sondern so genannte schiefe Verteilungen (vgl. auch Abbildung 4.6). Aus diesem Grund sind in Tabelle 4.5 nicht Mittelwert und Standardabweichung, sondern Median und Quantile für die Beschreibung der Daten angegeben.

Allen Messungen gemeinsam ist die grosse Streubreite der Werte. Die kleinste dokumentierte Rutschung ist 5 m lang, 10 m breit, 0.5 m mächtig und weist ein Volumen von 30 m^3 auf. Es ist allerdings zu bemerken, dass sich zahlreiche kleinere Rutschungen (d.h. mit einem Volumen $< 30 \text{ m}^3$) ereigneten, welche jedoch im Rahmen der Felderhebungen nicht untersucht wurden. Die grösste erfasste Rutschung ist 20 m lang, 30 m breit, 2.2 m mächtig und umfasst ein Volumen von 1100 m^3 . Sie ereignete sich im Untersuchungsgebiet Appenzell im Freiland. Gemäss Definition in BU-

WAL/BWG/BRP (1997) handelt es sich um flachgründige Rutschungen (mittlere Mächtigkeit ≤ 2.0 m).

In beiden Untersuchungsgebieten sind Waldrutschungen kleiner als Freilandrutschungen; d.h. die Mediane von allen erhobenen Ausmassen liegen für Waldrutschungen tiefer als für Freilandrutschungen (Tabelle 4.5). Die Werte für die Abmessungen der Rutschungen getrennt nach Untersuchungsgebiet sind in den Tabellen A.13 und A.14 im Anhang dargestellt. Sie bewegen sich grundsätzlich in einem ähnlichen Rahmen. Insgesamt sind jedoch die Rutschungen im Gebiet Appenzell grösser als jene im Gebiet Napf.

Tabelle 4.5: Abmessungen der Rutschungen der Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell zusammengefasst, mit Unterteilung nach Wald- und Freilandrutschungen. Angaben zu den Ergebnissen in den einzelnen Untersuchungsgebieten finden sich in Tabelle A.13 und A.14 im Anhang.

		N	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Median	25%-Quantil	75%-Quantil
Wald	max. Rutschlänge (m)	64	8.5	71.0	17.5	14.0	21.9
	max. Rutschbreite (m)	64	6.0	27.0	12.0	9.5	15.0
	Rutschfläche (m ²)	64	45	1200	142	104	222
	max. Mächtigkeit (m)	64	0.3	1.8	0.8	0.7	1.1
	Anrisshöhe (m)	64	0.0	2.0	0.6	0.3	0.7
	Rutschvolumen (m ³)	64	32	720	60	45	93
Freiland	max. Rutschlänge (m)	69	4.5	49	18.5	12.5	24
	max. Rutschbreite (m)	69	6.0	62	14.5	11.5	20.5
	Rutschfläche (m ²)	69	48	900	160	100	260
	max. Mächtigkeit (m)	67	0.5	2.2	0.9	0.8	1.3
	Anrisshöhe (m)	68	0.2	1.5	0.8	0.6	1.0
	Rutschvolumen (m ³)	69	30	1100	88	60	160
Gesamt	max. Rutschlänge (m)	133	4.5	71	16.5	13.0	23
	max. Rutschbreite (m)	133	6.0	62	13.5	10.0	16.0
	Rutschfläche (m ²)	133	45	1200	150	100	240
	max. Mächtigkeit (m)	131	0.3	2.2	0.9	0.7	1.2
	Anrisshöhe (m)	132	0.0	2.0	0.7	0.5	1.0
	Rutschvolumen (m ³)	133	30	1100	72	48	130

Die Abmessungen der Rutschungen liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Ergebnisse der Untersuchung von Sachseln. Allerdings besteht ein massgeblicher Unterschied darin, dass bei den aktuellen Daten (Napf/Appenzell) die Waldrutschungen im Durchschnitt kleiner sind als Freilandrutschungen (Tabelle 4.5), während Waldrutschungen in Sachseln signifikant grösser waren als Freilandrutschungen. Die Gründe für diese unterschiedlichen Ergebnisse sind momentan noch unklar. Die Hangneigung, welche das Volumen beeinflusst, kommt als Erklärung nicht in Frage, denn sowohl in Sachseln als auch in den Gebieten Napf und Appenzell sind die Neigungsverhältnisse jeweils im Wald etwa um den gleichen Betrag grösser als im Freiland.

Abbildung 4.6 zeigt, dass die Anzahl Rutschungen pro Volumenklasse mit zunehmendem Volumen abnimmt. Zudem handelt es sich grösstenteils um kleine Rutschungen: mehr als 90% der Rutschungen sind kleiner als 300 m³ und 84% der Rutschungen sind kleiner als 200 m³. Allerdings machen die Rutschungen mit weniger als 200 m³ nur noch 52% des Gesamtvolumens aus. Grosse Rutschungen mit Volumen von mehr als 400 m³ sind selten (in Bezug auf die Anzahl knapp 4%). Es sind deren fünf, welche ausschliesslich im Gebiet Appenzell aufgetreten sind, dort aber zusammen mehr als 28% des Rutschvolumens ausmachen. Insgesamt stimmen die Ergebnisse gut

mit jenen der Untersuchung Sachseln überein. Das gesamte Rutschvolumen in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell beläuft sich auf etwa 16'000 m³, wovon 12'000 m³ auf das Gebiet Appenzell und 4'000 m³ auf das Gebiet Napf entfallen.

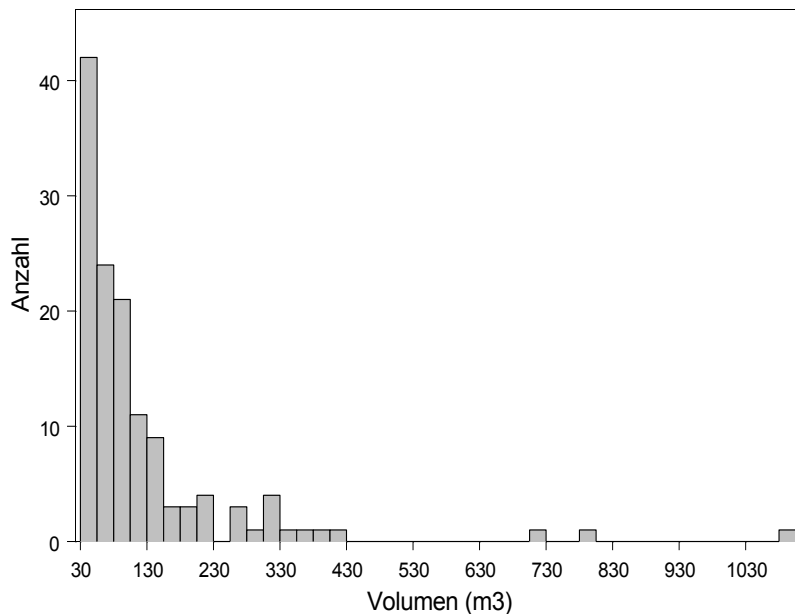





Abbildung 4.6: Anzahl Rutschungen pro Volumenklasse (N=133).

Rutschform

In Bezug auf die Form wurden die Rutschungen in die Kategorien "lang", "breit" und "symmetrisch" eingeteilt. Der Kategorie "lang" wurden jene Rutschungen zugeteilt, welche eine Länge L von mehr als 1.4 (= ca. Wurzel aus 2) mal die Breite B aufweisen. Ist umgekehrt L kleiner als 0.7 B, so bezeichnen wir die Rutschung als "breit". In den übrigen Fällen wird die Rutschform als "symmetrisch" bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Mehr als die Hälfte der Rutschungen wurden der länglichen Rutschform zugeordnet. Die restlichen Rutschungen teilen sich ungefähr zur Hälfte auf die Kategorien "breit" und "symmetrisch" auf. Zwischen den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell wurden keine nennenswerten Unterschiede festgestellt.

Tabelle 4.6: Anzahl Rutschungen mit verschiedenen Rutschformen (B=Breite, L=Länge, N=Anzahl).

	"lang" L > 1.4B 	"breit" B > 1.4L 	"symmetrisch" 0.7B < L < 1.4B 
Gesamt (N=133)	78 (59%)	33 (25%)	22 (16%)
Appenzell (N= 82)	46 (56%)	22 (27%)	14 (17%)
Napf (N=51)	32 (63%)	11 (21%)	8 (16%)

4.4 Standortverhältnisse bei den Rutschungen

4.4.1 Vegetation (Wald / Freiland)

Jede Rutschung wurde entweder dem Wald oder dem Freiland zugeteilt. Im Bereich des Waldrandes war die Zuteilung zum Teil schwierig. Entscheidend war die Lage des Anrisses. In einigen Fällen haben dem Freiland zugeordnete Rutschungen deshalb nur zu einem geringen Teil wirklich auf der Freilandfläche stattgefunden; es sind eigentlich Waldrutschungen mit Anriss in der Waldrandzone. Mit Neigungsänderungen sind häufig Vegetationsänderungen von Wald zu Nichtwald oder auch Nutzungsänderungen von Weide zu Mähwiese verbunden (Abbildung 4.7).



Abbildung 4.7: Beispiel einer Nutzungsänderung von Mähwiese zu Weide/Hecke, die verbunden ist mit einer Änderung der Hangneigung (Rutschung Nr. 1060, Appenzell).

Als Mass für die Rutschaktivität in den beiden Vegetationstypen Wald und Freiland wird die Anzahl Rutschungen pro ha Wald- beziehungsweise Freilandfläche verwendet (N/ha). Über beide Untersuchungsgebiete gerechnet beträgt die Rutschaktivität 0.11 N/ha oder – anders ausgedrückt - eine Rutschung pro 9.5 ha (Tabelle 4.7). Waldgebiete sind mit 0.18 N/ha deutlich stärker betroffen als das Freiland (0.08 N/ha). Dieser Unterschied bezüglich der Rutschaktivität im Wald und im Freiland ist im Untersuchungsgebiet Napf etwas weniger ausgeprägt als im Gebiet Appenzell.

Die Rutschaktivität ist im Gebiet Napf deutlich höher als im Untersuchungsgebiet Appenzell. Sie liegt für Waldflächen um das 1.7-fache, für Freilandflächen gar um das 2.7-fache höher. Für die Gesamt-Rutschaktivität ergeben sich Häufigkeiten von einer Rutschung pro 13 Hektaren im Gebiet Appenzell und von einer Rutschung pro 5 Hektaren im Gebiet Napf.

Tabelle 4.7: Rutschaktivität (N/ha) im Wald und im Freiland der verschiedenen Untersuchungsgebiete.

		Fläche		Anzahl Rutschungen (N)		N/ha	ha/N
		ha	%	N	%		
Appenzell	Wald	230	23	34	41	0.15	7
	Freiland	792	77	48	59	0.06	17
	Total	1022	100	82	100	0.08	13
Napf	Wald	119	48	30	59	0.25	4
	Freiland	127	52	21	41	0.16	6
	Total	247	100	51	100	0.21	5
Napf und Appenzell	Wald	349	28	64	48	0.18	6
	Freiland	919	72	69	52	0.08	13
	Total	1269	100	133	100	0.11	10
Sachselsn	Wald	414	50	136	49	0.33	3
	Freiland	408	50	144	51	0.35	3
	Total	822	100	280	100	0.34	3

Weder im Untersuchungsgebiet Napf noch in jenem von Appenzell wurde die Rutschaktivität von Sachselsn erreicht. Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, beruht dies nur unwesentlich auf der Tatsache, dass die untere Grenze für die Aufnahme dort bei einem Rutschvolumen von 20 m^3 und nicht bei 30 m^3 wie in der vorliegenden Untersuchung betrug. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei der Untersuchung von Sachselsn die Rutschaktivität im Wald und im Freiland etwa ähnlich war.

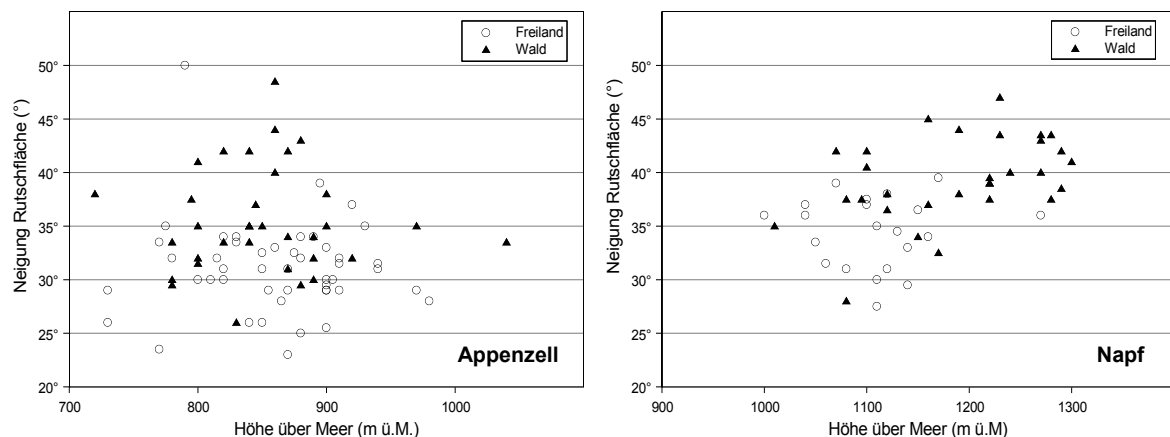


Abbildung 4.8 Verteilung von Wald- und Freilandrutschungen nach Höhe (m ü.M.) und Hangneigung (°).

Aus den Abbildungen 4.8 und 4.9 geht hervor, dass die Hangneigungen bei den Rutschungen einerseits in beiden Untersuchungsgebieten im Wald grösser sind als im Freiland und andererseits im Gebiet Napf grösser sind als im Gebiet Appenzell. Diese Tatsache wird als wesentliche Ursache für die entsprechenden Unterschiede bezüglich Rutschaktivität gedeutet (Tabelle 4.7). Es wird namentlich davon ausgegangen, dass unterschiedliche Rutschaktivitäten in Wald und Freiland weniger auf die Vegetation, sondern vielmehr auf die vorherrschenden Hangneignungsverhältnisse zurückzuführen sind. Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass Wald meist die steileren Geländeabschnitte bedeckt: im Gebiet Appenzell sind dies die steilen Einhänge der Bäche, im Napf die steilen kretennahen und höher gelegenen Hangpartien.

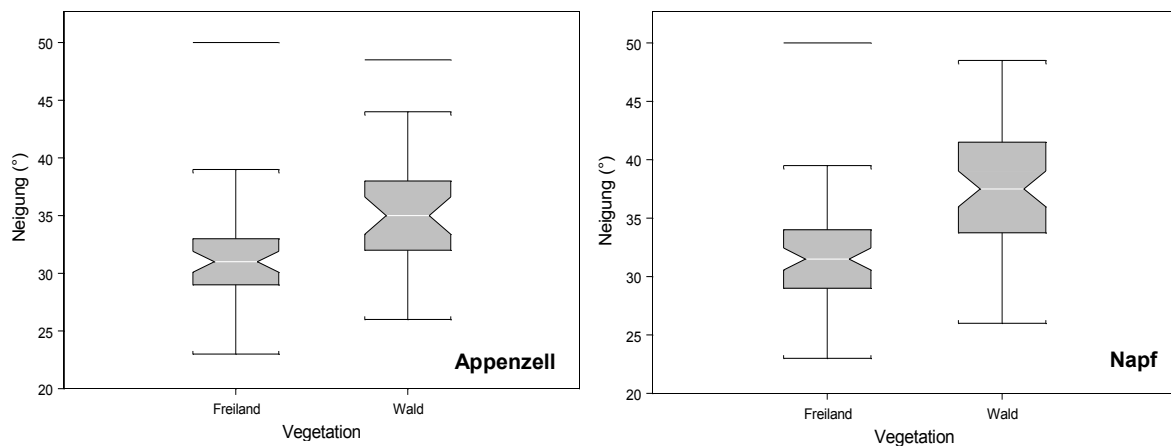


Abbildung 4.9: Neigungsverhältnisse bei Wald- und Freilandrutschungen beider Untersuchungsgebiete (N=133).

4.4.2 Nutzung

Nutzung von Freilandflächen

Bei Rutschungen im Freiland wurde unterschieden zwischen Wiesen, welche zumindest periodisch gemäht werden, und mehrheitlich beweideten Flächen. Eine weitere Kategorie bilden Flächen, welche im Begriff sind, zu Wald einzuwachsen. In Abbildung 4.10 ist beispielhaft eine Rutschung im Übergang von flacherer Wiese (oben) zu steilerer Weide (unten) abgebildet.



Abbildung 4.10: Rutschung im Übergang von Wiese (oben, flach) zu Weide (unten, steil, mit Trittberven) in der Nähe des Waldrandes.

Von den 69 Freilandrutschungen in beiden Untersuchungsgebieten liegen 58 in Weiden. Nur bei sieben Rutschungen befindet sich der Anriss in Mähwiesen (alle im Gebiet Appenzell). Vier Flächen wurden seit einiger Zeit nicht mehr landwirtschaftlich genutzt und sind im Begriff einzuwachsen. Häufig sind auf Weiden deutliche Spuren der Beweidung sichtbar: Trittberven in Hanglagen und Trittsiegel oder -löcher auf feuchten und vernässten Böden. Die Tatsache, dass im Anrissbe-

reich der Rutschungen Weideflächen gegenüber Mähwiesen deutlich dominieren, ist ein Hinweis darauf, dass im Freiland die steileren Gebiete, d.h. wo Rutschungen entstehen können, in der Regel extensiv genutzt werden.

Die Hangneigungen bei den Rutschungen in beweideten bzw. einwachsenden Gebieten sind tendenziell etwas höher als im Wiesland (Abbildung 4.11). Die geringe Anzahl Rutschungen in Wiesland und in einwachsenden Flächen dürfte einer der Gründe sein, warum dieser Unterschied statistisch nicht signifikant ist. Es ist jedoch allgemein bekannt, dass mit zunehmender Hangneigung in der Regel die Intensität der Bewirtschaftung abnimmt.

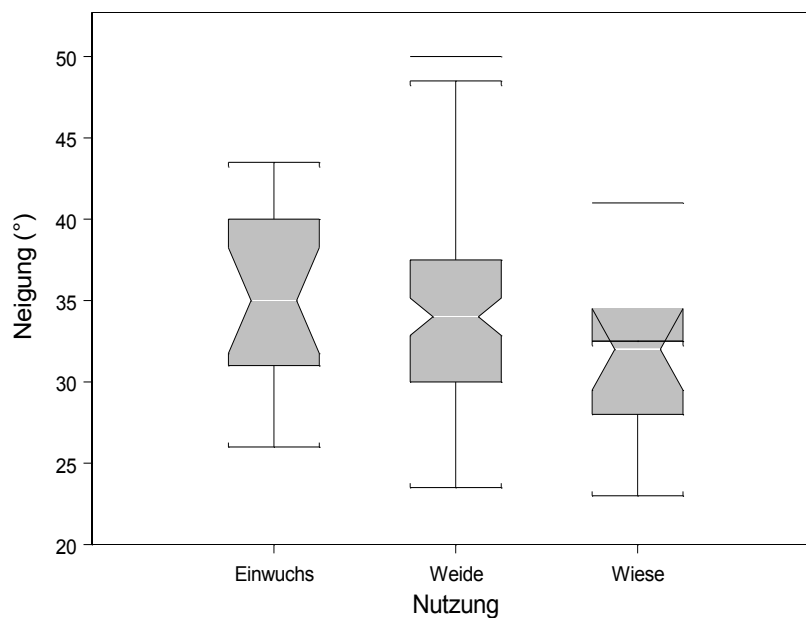


Abbildung 4.11: Neigungen in den verschiedenen Nutzungskategorien des Freilandes; Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell (Einwuchs: N=4; Weide: N=58; Wiese: N=7; Total Freiland: N=69).

Waldbestände

Im Gegensatz zum Freiland wurde bei Rutschungen im Wald nicht die aktuelle Nutzung der Waldflächen beurteilt, sondern Aspekte des Waldzustandes: die Bestandesstruktur¹, Entwicklungsstufe², Baumartenmischung und der Deckungsgrad³ der Bestockungen. Eine derartige Bestandesbeschreibung erlaubt gewisse Rückschlüsse auf die frühere Nutzung und Bewirtschaftung des Waldes.

Einschichtige und stufige Strukturen dominieren deutlich. Im Untersuchungsgebiet Appenzell machen gleichförmige Bestände mehr als 80% aus; im Gebiet Napf dominieren stufige bzw. plenter-

¹ Bestandesstruktur: vertikaler Aufbau eines Bestandes; d.h. einschichtig, mehrschichtig, stufig

² Entwicklungsstufe: Klassierung von Beständen aufgrund des dominanten Brusthöhendurchmessers (BHD)

³ Deckungsgrad: Kronen-Projektionsfläche in % der Gesamtfläche

förmige¹ Strukturen (Tabelle 4.8). Unbestockte Flächen kommen nur selten vor: es sind dies insbesondere Lothar-Sturmschadenflächen im Gebiet Napf, welche liegendes Holz, geworfene Stöcke etc. aufweisen, und wo sich noch keine Verjüngung eingestellt hat. Im Untersuchungsgebiet Appenzell ereignete sich eine Rutschung in einer sehr spärlich bestockten, vernässten Waldlichtung.

Bei den Rutschungen in den nicht-stufigen bzw. gleichförmigen Beständen des Gebietes Appenzell wurden nur in wenigen Fällen junge Bestockungen (d.h. Jungwuchs, Dickung oder Stangenholz) angetroffen (Tabelle 4.8). Es überwiegen deutlich die Baumholzstufen mit Durchmesser über 40 cm. Dies stützt die Beobachtung, dass die Wälder in den steilen Bacheinhängen wenig bis gar nicht bewirtschaftet werden. Wo Lothar nicht eine massive Vorratsreduktion² bewirkt hat, ist auch in den Plenterwäldern (stufige Bestände) des Napfgebiets der Vorrat relativ hoch, was auch dort als Hinweis für eine extensive Bewirtschaftung der Wälder interpretiert werden kann.

Tabelle 4.8: Angaben zu den Waldbeständen bei den Rutschungen. Beurteilt wurden folgende Bestandesparameter: Bestandesstruktur, Entwicklungsstufe, Baumartenmischung, Deckungsgrad. * BHD = Brusthöhendurchmesser; + DG = Deckungsgrad.

		Anzahl Rutschungen		
		Total	Appenzell	Napf
Bestandesstruktur	unbestockte Flächen	6	1	5
	einschichtige Bestände	31	28	3
	mehrschichtige Bestände	1	1	-
	stufige Bestände	26	4	22
	Total	64	34	30
Entwicklungsstufe	unbestockt	6	1	5
	Jungwuchs/Dickung	2	2	-
	Stangenholz	3	2	1
	Baumholz I (BHD* 30-40 cm)	1	1	-
	Baumholz II (BHD* 40-50 cm)	11	10	1
	Baumholz III (BHD* >50 cm)	15	14	1
	stufige Bestände	26	4	22
	Total	64	34	30
Baumartenmischung	unbestockt	6	1	5
	> 80% Nadelholz	35	19	16
	Mischbestand	15	10	5
	> 80% Laubholz	8	4	4
	Total	64	34	30
Schlussgrad	unbestockt (bzw. Jungwuchs)	7	2	5
	gedrängt (DG ⁺ 90%)	14	14	-
	normal (DG ⁺ 80%)	20	11	9
	locker (DG ⁺ 60%)	9	4	5
	lückig (DG ⁺ 40%)	4	-	4
	aufgelöst (DG ⁺ 20%)	10	3	7
	Total	64	34	30

In beiden Untersuchungsgebieten sind laubholzreiche Bestockungen selten anzutreffen; entsprechend selten sind Rutschungen in Bestockungen mit viel Laubholz entstanden. Wesentlich häufiger wurden nadelholzreiche Bestände bei den Rutschungen beobachtet. Auch der Schlussgrad der Bestände bei den Rutschungen weist einerseits auf die zurückhaltende Nutzung im Gebiet Appen-

¹ Plenterwald: Wald mit stufiger Struktur, in welchem Bäume aller Stärkekassen nebeneinander wachsen

² Vorrat: stehendes Holzvolumen einer Fläche in m³/ha

zell (hoher Anteil an dichten Bestockungen) und andererseits auf die Schäden durch Lothar im Gebiet Napf hin (grosse Anzahl lückiger bis aufgelöster Bestände).

Im Rahmen der Untersuchung Sachseln wurden Aussagen erarbeitet im Zusammenhang mit der Auswirkung des Waldzustandes auf die Rutschaktivität. Dies ist bei der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, da der Waldzustand nicht flächendeckend über die gesamten jeweiligen Waldflächen der Untersuchungsgebiete erhoben werden konnte.

4.4.3 Hydrologie

Oftmals werden vernässte Standorte als besonders rutschungsempfindlich taxiert. Um dies 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 Kategorien "frisch/feucht" und "vernässt" eingeteilt. Die Ansprache der hydrologischen Verhältnisse erfolgte im Gebiet Appenzell ein bis zwei Monate, im Gebiet Napf vier Monate nach dem Unwetterereignis.

Bei insgesamt 127 Rutschungen (95%) wurden die hydrologischen Standortseigenschaften als frisch bis feucht beurteilt. Während im Perimeter Appenzell ausschliesslich frische bis feuchte Standorte festgestellt wurden, befinden sich im Gebiet Napf 45 Rutschungen auf frisch bis feuchten Böden und 6 auf vernässten Standorten. Auf diesen 6 Standorten wurden Nässezeiger, insbesondere Binsen (*Juncus*) beobachtet sowie in drei Rutschungen auch stehendes Wasser oder fließendes Hangwasser (Hangried). Mit einer Ausnahme haben sich die Rutschungen auf vernässten Standorten im Freiland ereignet.

Die Tatsache, dass nur ein sehr kleiner Anteil der Rutschungen auf vernässten Standorten entstanden ist, stimmt gut mit den Ergebnissen der Untersuchung Sachseln überein. Auch dort wurden bei nur 5% der Rutschungen vernässte Standorte beobachtet.

4.4.4 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 kann die Beurteilung durch die aktuelle Witterung beeinflusst werden. Die Wasserführung wurde gemäss Aufnahmeanleitung (Anhang 3) in die vier Kategorien "keine", "keine, jedoch Merkmale sichtbar", "wenig" und "viel" eingeteilt.

Bei 129 Rutschflächen konnte die Wasserführung in der Rutschfläche beurteilt werden (Abbildung 4.12). In der Hälfte aller Flächen (N=64) wurde keine Wasserführung festgestellt. Viel Wasser wurde in 18% der Rutschflächen beobachtet. In fünf der sechs als vernässt beurteilten Rutschflächen (Kapitel 4.4.3) ist eine grosse Wasserführung (d.h. Kategorie "viel") beobachtet worden. Die beiden Untersuchungsgebiete unterscheiden sich dadurch, dass im Gebiet Napf ein grösserer Anteil Rutschungen mit Wasserführung (viel, wenig) oder mit entsprechenden Anzeichen festgestellt wurde als im Gebiet Appenzell.

Die Resultate der vorliegenden Untersuchung stimmen gut mit den Ergebnissen der Untersuchung Sachseln überein ("keine Wasserführung": 50%; "Anzeichen": 12%; "wenig": 26%; "viel": 11%).

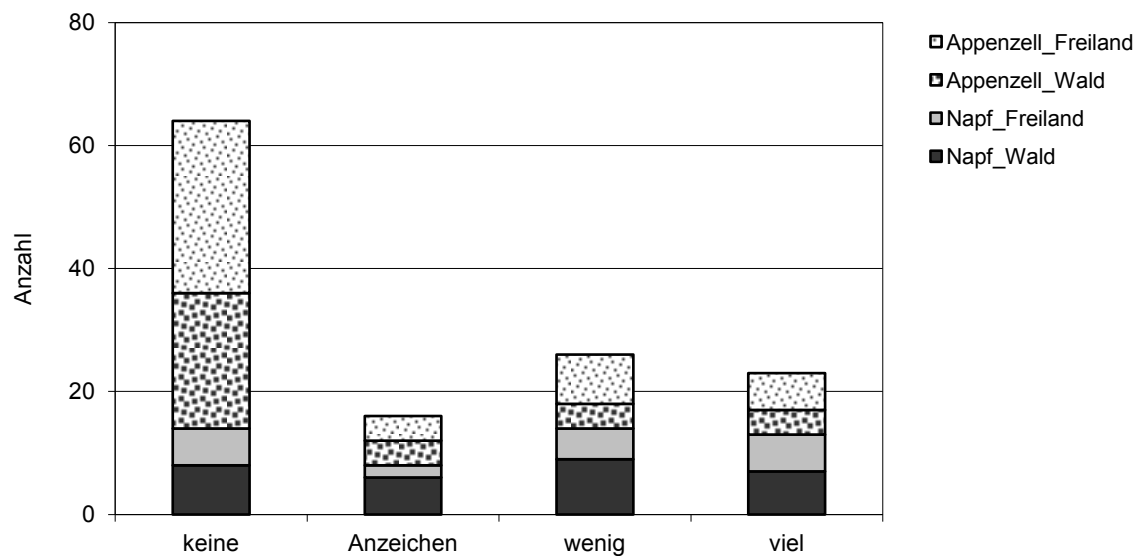


Abbildung 4.12: Wasserführung in den Rutschflächen (keine: 50%; Anzeichen: 12%; wenig: 20%; viel: 18%; N=129).

4.4.5 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Im Bereich der Anrisszone wurde nach Hinweisen auf frühere Rutschbewegungen und Hanginstabilitäten gesucht. Dazu gehören namentlich Geländeformen wie Rutschmulden und Rutschbuckel (Abbildung 4.13), spezielle Wuchsformen der Bäume (Säbelwuchs, Schiefstand), rezente Anrisse (gut erkennbare Anrisse/Ablagerungen von Bewegungen, welche jedoch vor dem Sommer 2002 entstanden sind) sowie allenfalls Hinweise auf Rutschbewegungen im Bodenprofil (überlagerte Humus-Horizonte).



Abbildung 4.13: Geländeformen als Anzeichen früherer Rutschbewegungen im Gebiet Appenzell.

Gemäss den Angaben in Tabelle 4.9 sind beim überwiegenden Teil aller Rutschungen (98%) Hinweise auf alte Rutschbewegungen beobachtet worden. In 120 der 131 Rutschungen mit Anzeichen wurden diese Anzeichen als markant beurteilt. In 11 Fällen waren die Anzeichen nur undeutlich auszumachen.

Rutschmulden und –buckel sind die häufigsten Anzeichen auf frühere Rutschungsaktivitäten. Selten waren die Hinweise der Vegetation, da die Wuchsformen der Bäume a priori nur im Waldareal beobachtbar sind. Rezente Anrisse sind vorwiegend im Gebiet Napf festgestellt worden. Bei den Untersuchungen in Sachseln wurden in 21% der Flächen gesicherte, und in 46% vermutete Anzeichen alter Rutschungen beobachtet.

Tabelle 4.9: Anzahl Rutschungen mit Anzeichen alter Rutschbewegungen in den beiden Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell.

		Anzeichen vorhanden		Anzeichen markant		Art der Anzeichen	
Wald	64	JA	64	JA	59	Geländeform	46
						Vegetation	2
						Rezente Anrisse	11
				NEIN	5	Geländeform	3
						Vegetation	1
						Rezente Anrisse	1
		NEIN	0				
Freiland	69	JA	67	JA	61	Geländeform	61
				NEIN	6	Geländeform	6
		NEIN	2				

4.5 Geologie

4.5.1 Festgestein

Sofern das Festgestein in der Rutschfläche aufgeschlossen war, wurde es den in Tabelle 4.10 aufgeführten Gesteinen zugeordnet. Da zum Teil nur geringe Flächenanteile der Felsoberfläche sichtbar waren, wurde die Bankung nicht systematisch erhoben. Ebenfalls nicht erhoben werden konnten Fallwinkel und -azimut.

Tabelle 4.10: Festgesteine in den Rutschflächen der beiden Untersuchungsperimeter.

Festgestein	Napf und Appenzell		Napf		Appenzell	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Nagelfluh (N)	16	12	16	31	0	0
Sandstein (S)	39	29	2	4	37	45
Mergel (M)	9	7	0	0	9	11
Wechselagerung N-M	8	6	8	15	0	0
Wechselagerung N-S	10	8	10	20	0	0
Wechselagerung N-S-M	3	2	3	6	0	0
Wechselagerung S-M	21	16	2	4	19	23
nicht aufgeschlossen	27	20	10	20	17	21
Total	133	100	51	100	82	100

Wie in Kap. 2.4 dargelegt, steht im Gebiet Appenzell die Untere Süsswassermolasse an und im Gebiet Napf die Obere Süsswassermolasse. Aufgrund dieser Tatsache unterscheiden sich die freigelegten Gesteine in den beiden Untersuchungsgebieten deutlich: während im Gebiet Appenzell Sandsteine, Mergel und Wechselagerungen Sandstein-Mergel vorkommen, dominieren im Gebiet Napf Nagelfluh und Wechselagerungen Nagelfluh-Sandstein bzw. Mergel.

Das Festgestein ist in rund 80% aller Rutschungen beider Perimeter aufgeschlossen. Bei 27 Rutschungen war der Fels nicht aufgeschlossen, d.h. der Bruch verlief vollständig im Lockergestein. Im Gebiet Napf wurden die vorgefundenen Lockergesteine als Gehängeschutt beurteilt. Im Gebiet Appenzell ereigneten sich die Lockergesteinsrutschungen mehrheitlich in Moränematerial und zum kleineren Teil in tiefgründigen Verwitterungsböden. Weitere Angaben hierzu finden sich in Kapitel 4.8.2.

Im Weiteren wurden die Neigungsverhältnisse bei den Rutschungen in den verschiedenen Gesteinsformationen untersucht (Abbildung 4.14). Dabei kann festgestellt werden, dass Rutschungen auf Nagelfluh in steileren Gebieten losbrachen als Rutschungen auf Sandsteinen, Mergel und entsprechenden Wechselagerungen. Dies kann einerseits zurückgeführt werden auf die in bodenmechanischer Hinsicht günstigeren Eigenschaften der Nagelfluh und deren Verwitterungsprodukte im Vergleich zum Mergel. Andererseits ist es so, dass Nagelfluh ausschliesslich im Gebiet Napf vorkommt und die Neigungsverhältnisse dort steiler sind als im Gebiet Appenzell (vgl. Tabelle 4.3).

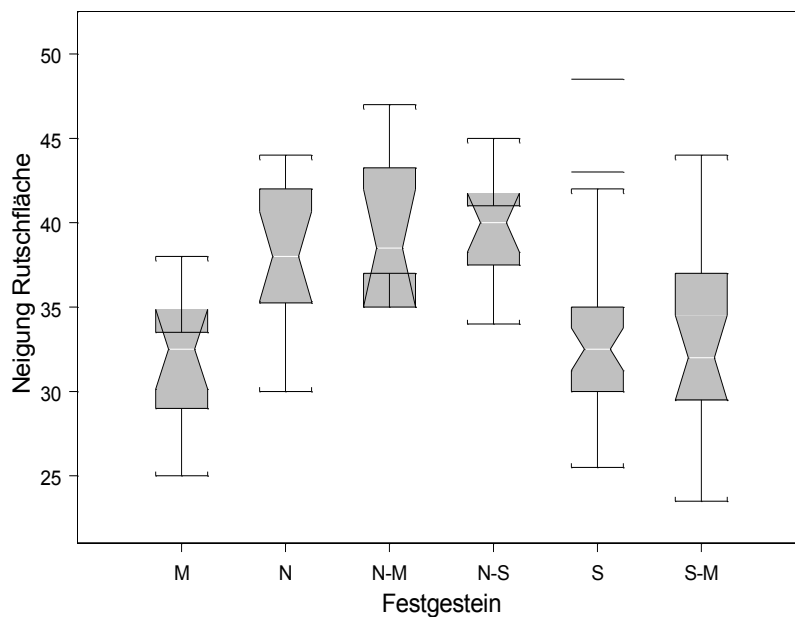


Abbildung 4.14: Neigungsverhältnisse in verschiedenen Gesteinsformationen, wobei nur Formationen mit mehr als 8 Beobachtungen in der Grafik dargestellt sind (N=103).

Bei den oberflächennahen Rutschungen der Unwetter von Sachseln wurde der Fels in etwa der Hälfte der Fälle freigelegt. Die Gesteine lassen sich nicht vergleichen: in den Sachsler Wildbach-einzugsgebieten kommen namentlich Mergelschiefer, Kalke, Glaukonitsandstein und Wechsella-gerungen Kalk-Mergelschiefer vor.

4.5.2 Lockergestein

Bei jeder Rutschung wurde jeweils am oberen Anrissrand in einem Bodenprofil das Lockergestein angesprochen. Die Bezeichnungen wurden gemäss SN 670 005a ("Identifikation der Lockergestei-ne – Feldmethode") verwendet. In einem weiteren Schritt wurden USCS-Bezeichnungen zugeord-net (vgl. Anleitung, Anhang 3).

In beiden Untersuchungsgebieten wurden die vorgefundenen Lockergesteine in der Regel als Ge-hängeschutt beurteilt, d.h. mehr oder weniger stark verlagerte Verwitterungsprodukte des Aus-gangsgesteines Molasse. Moränenmaterial kommt ausschliesslich im Gebiet Appenzell vor (bei 13 Rutschungen).

Gemäss Abbildung 4.15 ergab die Feldklassifikation der Lockergesteine bei den Rutschungen im Gebiet Napf zu ca. 80% siltige Kiese (GM) und siltige Sande (SM). Im Gebiet Appenzell kommen zu über 70% siltige Sande (SM) vor. In beiden Perimetern zusammen herrschen die siltigen Sande mit 60% und die siltigen Kiese (15%) vor. Die feinkörnigen Böden (CL, CL-ML) sind eher von un-tergeordneter Bedeutung. In etwa 10% der Rutschungen wurde im Bereich der Gleitfläche am Übergang zwischen Locker- und Festgestein (meist bei Sandsteinen oder Mergel) ein gegenüber dem gesamten Bodenprofil erhöhter Feinanteil (Ton, Silt) festgestellt.

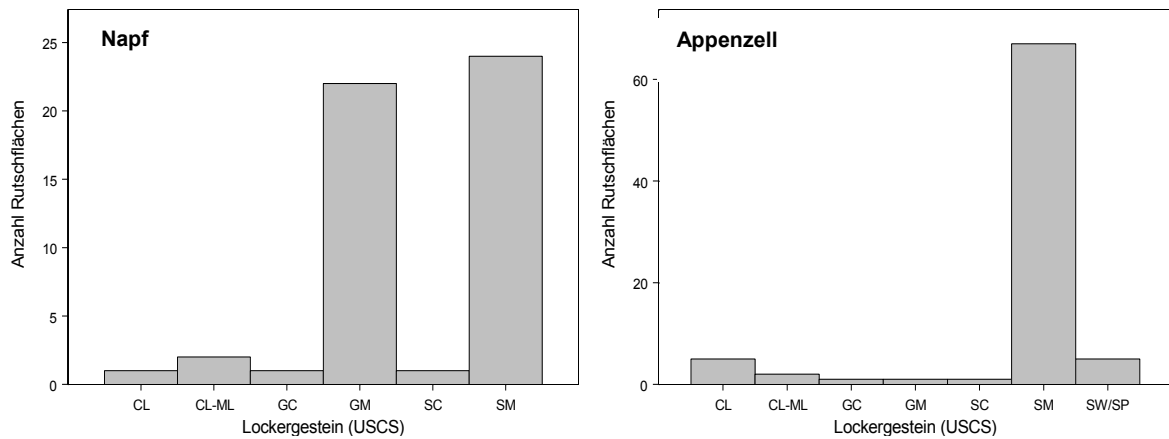


Abbildung 4.15: Vorkommen der verschiedenen Lockergesteine (Bezeichnungen nach USCS) in den Untersuchungsgebieten.

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

- feinkörnige, d.h. siltige/tonige Lockergesteine: CL, CL-ML
- mittelhörnige, d.h. sandige Lockergesteine: SC, SM, SW/SP
- grobkörnige, d.h. kiesige Lockergesteine: GC, GM

Aus Abbildung 4.16 geht hervor, dass die mittelhörnigen (sandigen) Lockergesteine deutlich überwiegen (N=93). Verhältnismässig selten wurden Rutschungen in grobkörnigen (N=25) und feinkörnigen Lockergesteinen (N=10) beobachtet.

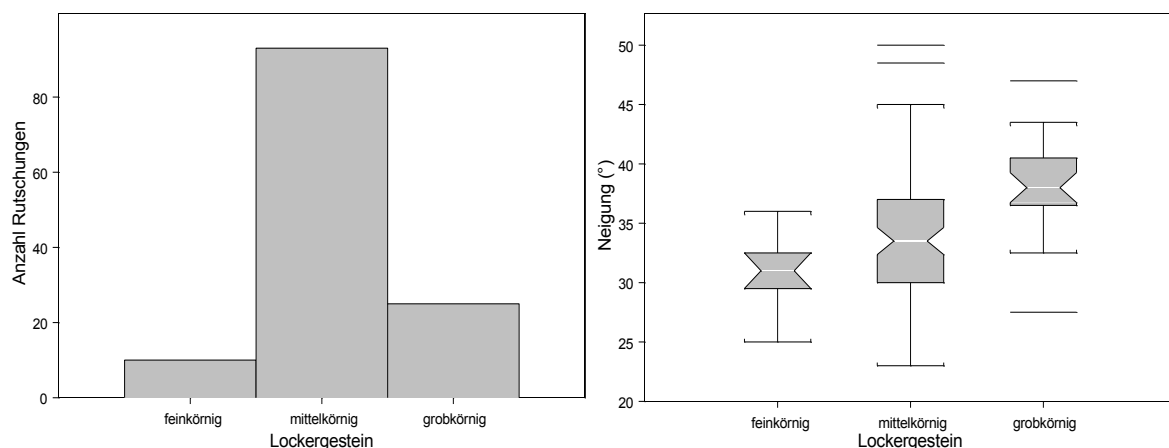


Abbildung 4.16: Anzahl (links) und Neigungsverhältnisse (rechts) von Rutschungen in den unterschiedlichen Lockergesteinsgruppen (Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell).

Bei einem Vergleich bezüglich der Neigungsverhältnisse zeigt sich Folgendes: Rutschungen in feinkörnigen Lockergesteinen, d.h. vorwiegend siltigen oder tonigen Materialien weisen im Mittel eine Hangneigung von 31° auf. Etwas steiler sind die Neigungen von Rutschungen in mittelhörnigen

gen Lockergesteinen (34°). Grobkörnige Lockergesteine weisen im Mittel deutlich steilere Neigungen auf (38°). Bei diesen Vergleichen ist wiederum zu erwähnen, dass die feinkörnigen Lockergesteine zur Hauptsache im Gebiet Appenzell vorkommen und die Neignungsverhältnisse dort flacher sind als im Gebiet Appenzell (vgl. Tabelle 4.3).

Neben dem Lockergestein im Profil über dem Bruchhorizont wurde auch das Lockergestein im Bereich des Bruchhorizontes beurteilt. Die Angaben in Tabelle 4.11 zeigen, dass die Lockergesteine über und im Bruchhorizont in den meisten Fällen ähnlich beurteilt wurden (feinkörnig/feinkörnig: N=10; mittelkörnig/mittelkörnig: N=75; grobkörnig/grobkörnig: N=21). Nur bei 16 Rutschungen wurde ein Übergang von mittelkörnigem (über dem Bruchhorizont) zu feinkörnigem (im Bruchhorizont) Lockergestein festgestellt. Ein Wechsel von feinerem (über dem Bruchhorizont) zu gröberem (im Bruchhorizont) Lockergestein wurde nur in einem Fall beobachtet.

Tabelle 4.11: Vergleich der Lockergesteine über und im Bereich des Bruchhorizontes: Anzahl Rutschungen (N) sowie Angaben zu den Hangneigungen (Median und Quartile).

			Lockergestein über dem Bruchhorizont			
			feinkörnig: siltig/tonig	mittelkörnig: sandig	grobkörnig: kiesig	Total
Lockergestein im Bereich des Bruchhorizontes	feinkörnig:	N:	10	16	3	29
	siltig/tonig	1.Quartil:	29.5	31	40	30
		Median:	31	33	42	32
		3.Quartil:	32	35	43	35
	mittelkörnig:	N:	-	75	-	75
	sandig	1.Quartil:		30		30
		Median:		33.5		33.5
		3.Quartil:		37		37
	grobkörnig:	N:	-	1	21	22
	kiesig	1.Quartil:		30	34	34
		Median:		30	37.5	37.5
		3.Quartil:		30	39	39
Total		N:	10	93	25	
		1.Quartil:	29.5	30	36.5	
		Median:	31	33.5	38	
		3.Quartil:	32	37	40.5	

Im Bezug auf die Neigungen zeigt sich für das Lockergestein im Bruchhorizont die gleiche Tendenz wie beim Lockergestein darüber: je grobkörniger das Lockergestein im Bereich der Bruchzone, desto steiler die Hangneigung bei den entsprechenden Rutschungen. Mit einer mittleren Neigung von 31° sind Rutschungen mit feinkörnigen Lockergesteinen am flachsten - sowohl über als auch im Bruchhorizont. Etwas steiler (32.5°) sind Rutschungen mit mittelkörnigem Lockergestein über und feinkörnigem Material im Bruchhorizont sowie Rutschungen mit profilumfassend mittelkörnigem Lockergestein (33.5°). Am steilsten sind Rutschungen mit vorwiegend kiesigen Lockergesteinen im gesamten Profilaufbau (37.5°).

4.6 Bodenmechanik

Bei insgesamt sieben Rutschungen - wovon zwei im Gebiet Napf und fünf im Gebiet Appenzell - wurden Lockergesteinsproben entnommen und im Labor analysiert. Bei einer Rutschung wurden in zwei unterschiedlichen Tiefen je eine Probe entnommen. Das Bodenmaterial der insgesamt acht

Proben stammen jeweils aus der Zone unmittelbar über der Gleitfläche bzw. aus oder in der Nähe der Bruchzone. Ziel der Lockergesteins-Untersuchungen war, die Vielfalt der vorkommenden Lockergesteine zu erfassen, eine Eichung der Feldklassifikation zu erreichen und Bodenkennwerte für bodenmechanische Analysen zu bestimmen.

4.6.1 Korngrössenanalysen und Klassifikation der Lockergesteine

Die Lockergesteinsproben wurden nach SN 670 008a (Identifikation der Lockergesteine – Labor-methode mit Klassifikation nach USCS, VSS 1997) untersucht und klassiert. Abbildung 4.17 gibt Hinweise über die Variabilität der entnommenen Lockergesteine.

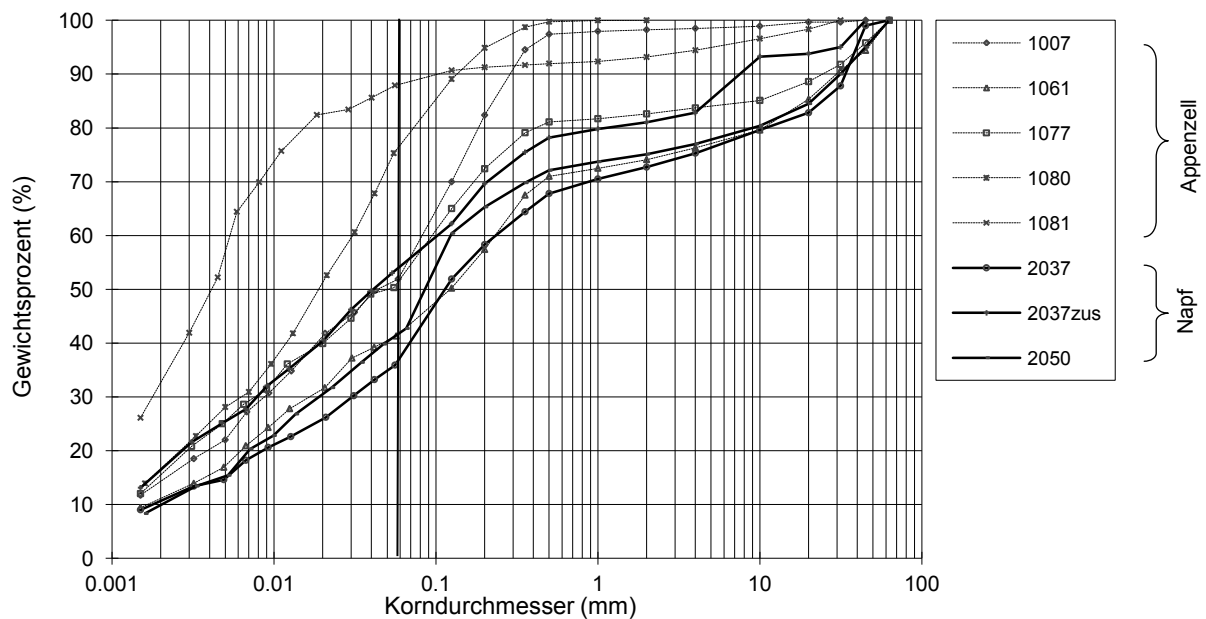


Abbildung 4.17: Korngrössenanalyse von Lockergesteinsproben aus den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell. Fraktionsgrenzen: Ton: < 0,002 mm, Silt: 0,002 bis 0,06 mm, Sand: 0,06 bis 2,0 mm, Kies: 2 bis 60 mm, Steine und Blöcke: > 60 mm.

Gemäss SN670 008a (VSS 1997) wird zwischen grobkörnigen Lockergesteinen (Kiese oder Sande; $D_{50} \geq 0.06$ mm) und feinkörnigen Lockergesteinen (Tone oder Silte; $D_{50} \leq 0.06$ mm) unterschieden. Entsprechend sind die Proben 1080 und 1081 klar den feinkörnigen zuzuordnen, die Proben 1007, 1077 und 2037zus liegen an der Grenze zwischen fein- und grobkörnig (jedoch immer noch im feinkörnigen Bereich). Die Proben 1061, 2050 und 2037 sind grobkörnige Lockergesteine. Tabelle 4.12 enthält weitere Angaben zu den untersuchten Böden sowie deren Klassifikation.

Tabelle 4.12: Angaben zu den untersuchten Böden: Entnahmetiefe der Bodenproben in den Profilen, Fließgrenze w_L , Plastizitätsindex I_P , USCS-Klassifikation und Gruppen gemäss SN670 008a.

Nach Böll (1997) übt die Sickerlinie einen sehr grossen Einfluss auf die Stabilität eines Hanges aus. Dies zeigen die beiden Grenzfälle:

- Keine Sickerlinie: aus $z_1 = 0$ ergibt sich $F = \frac{\tan \Phi}{\tan \alpha}$ (1)
- Sickerlinie identisch mit Bodenoberfläche: $z_2 = 0$ ergibt sich $F = \frac{\rho' \tan \Phi}{\rho_{sat} \tan \alpha}$ (2)

Falls gilt $F = 1.0$, ist die Böschung rechnerisch noch gerade 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' .

Scherwinkel

Den im Labor analysierten und klassierten Lockergesteinen aus den Untersuchungsgebieten sind in Tabelle 4.13 Werte für den Scherwinkel zugeordnet. Ein erster Wert (ϕ'_{norm}) stammt aus der Norm SN 670 010b (Bodenkennwerte). Ein zweiter Wert (ϕ'_{Dhawan}) wurde anhand der Korngrössenverteilung nach der Methode von Dhawan (in Lang et al., 1996) ermittelt. Für die weiteren Betrachtungen wurde schliesslich ein Scherwinkel (ϕ'_{gew}) berechnet, welcher auf den beiden erwähnten Werten basiert, jedoch die Korngrössenverteilung stärker berücksichtigt: $\phi'_{gew} = 1/3(\phi'_{norm} + 2\phi'_{Dhawan})$.

Tabelle 4.13: Angaben zu den untersuchten Böden: USCS-Klassifikation, Scherwinkel ϕ'_{norm} gemäss SN670 010b, Scherwinkel ϕ'_{Dhawan} nach Dhawan (ohne Korrektur nach Brinch Hansen, in Lang et al., 1996), gewichteter Scherwinkel ϕ'_{gew} ($\phi'_{gew} = 1/3(\phi'_{norm} + 2\phi'_{Dhawan})$), Feuchtraumgewicht γ und Wassergehalt w gemäss SN670 010b, berechnete Raumgewichte gesättigt γ_{sat} und unter Auftrieb γ' , kritische Hangneigungen α_{krit} bei profilumfassender Sättigung, kritische Hangneigungen α_{krit} bei profilumfassender Sättigung und einer Kohäsion $c' = 5 \text{ kN/m}^2$).

Probe (Nr.)	USCS	ϕ'_{norm} (°)	ϕ'_{Dhawan} (°)	ϕ'_{gew} (°)	γ (kN/m ³)	W (%)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	α_{krit} (°)	$\alpha_{krit,c}$ (°)
1007	CL	31	30	30	21.3	19.6	21.2	11.2	17.0	30.9
1061	SC	35	32	33	22.1	14.8	22.1	12.1	19.6	32.5
1077	CM	25	30	28	20.3	25.5	20.2	10.2	15.0	30.0
1080	CM	25	28	27	20.3	25.5	20.2	10.2	14.4	29.5
1081	CM	25	22	23	20.3	25.5	20.2	10.2	12.1	27.7
2037	SC	35	33	34	22.1	14.8	22.1	12.1	20.3	33.1
2037zus	CM	25	30	28	20.3	25.5	20.2	10.2	15.0	30.0
2050	SC	35	32	33	22.1	14.8	22.1	12.1	19.6	32.5

Bodenmechanische Überlegungen

Für die in den Untersuchungsgebieten entnommenen Lockergesteinsproben variiert der Scherwinkel ϕ'_{gew} im Bereich zwischen 23 bis 34° (Tabelle 4.13). In den Untersuchungsgebieten kommen jedoch nicht selten auch Hänge vor, die steiler als der Scherwinkel sind und damit gemäss den früheren Ausführungen sogar bei durchschnittlichen Sättigungsverhältnissen nicht stabil wären (vgl. Formel 1). Diese Diskrepanz zwischen den Modellergebnissen und den effektiven Stabilitätsverhältnissen in den Untersuchungsperimetern deutet auf Schwierigkeiten bei der Anwendung des Modells der unendlich langen Böschung hin, welches nur für kohäsionsloses Material gilt.

Immerhin können mit dem Modell der unendlich langen Böschung Überlegungen zu der Frage nach der unteren Grenze der Hangneigung für Rutschbewegungen gemacht werden. Bei Annahme einer profilumfassenden Sättigung (Sickerlinie identisch mit der Bodenoberfläche, vgl. Formel 2) und unter Verwendung der Bodenkennwerte der in den Untersuchungsgebieten vorgefundenen Lockergesteine ergeben sich die in Tabelle 4.13 angegebenen Minimalneigungen α_{krit} . Die Werte sagen aus, dass bei SC-Böden unterhalb von 20° , bei CL-Böden unterhalb von 17° und bei CM-Böden unterhalb von 12° keine Rutschungen zu erwarten sind. Im Zusammenhang mit globalen Betrachtungen im Rahmen der Gefahrenbeurteilung (d.h. nicht bei Stabilitätsanalysen von bestimmten Böschungen) sind demzufolge Hänge mit Neigungen bis zu den angegebenen Werten als sicher bezüglich der Rutschauslösung zu beurteilen. Dies zeigen auch die Feldaufnahmen, wonach in Gebieten mit Hangneigungen von weniger als 20° keine Rutschungen gefunden wurden (vgl. Abbildung 4.1).

Im Folgenden wird untersucht, ob sich durch die Berücksichtigung einer Kohäsion c' im Modell der unendlich langen Böschung die eher konservativen Angaben zu den Minimalneigungen α_{krit} erweitern lassen. Zwar hat sich unter anderem auch im Rahmen der Untersuchung Sachseln gezeigt, dass die Einführung der Kohäsion problematisch ist. Der Grund liegt darin, dass ausgehend von einer angenommenen Gleitfläche und einer Kohäsion immer eine tiefer liegende Gleitfläche gefunden werden kann, bei der für den gleichen Sicherheitsgrad eine noch grössere Kohäsion eingesetzt werden muss. Da bei den oberflächennahen Rutschungen der Gebiete Napf und Appenzell einerseits meistens die Gleitflächen durch Fels vorgegeben sind und andererseits die Lockergesteinsproben aus dem Bereich der Gleitfläche entnommen wurden, wird im Folgenden dennoch der Versuch gemacht, den Einfluss der Kohäsion zu quantifizieren.

In Tabelle 4.13 sind Werte für kritische Hangneigungen $\alpha_{\text{krit,c}}$ bei vollständiger Sättigung und unter Berücksichtigung der Kohäsion angegeben. Sie wurden berechnet mit dem Modell der unendlich langen Böschung und beispielhaft unter Annahme einer Kohäsion c' von 5 kN/m^2 und einer Tiefe der Gleitfläche in 0.8 m Tiefe (jeweils für alle Bodenproben). Die kritischen Hangneigungen $\alpha_{\text{krit,c}}$ liegen nun bei Einbezug der Kohäsion für die CM- und CL-Böden zwischen 28 und 30° und für die SC-Böden bei 32 bis 33° . Bei Gefahrenbeurteilungen sind demzufolge in Hängen mit Neigungen bis zu den angegebenen Werten nur wenig Rutschungen zu erwarten. Zum Vergleich: die Felderhebungen hatten zum Ergebnis, dass 93% aller Rutschungen in Neigungen $> 28^\circ$ und 82% aller Rutschungen in Neigungen $> 30^\circ$ entstanden sind.

Das durch die Poren eines Bodens strömende Wasser übt einen in Strömungsrichtung auf den Boden wirkenden Strömungsdruck auf. Der Strömungsdruck wird bei der klassischen Stabilitätsanalyse (z.B. in Lang et al., 1996) in der Porenwasserspannung u berücksichtigt und ist somit in der Annahme enthalten, dass die Sickerlinie der Geländeoberfläche entspricht (maximaler Porenwasserdruck). Andererseits kann der Strömungsdruck in Fällen, wo im oberen Profilbereich im Vergleich zu weiter unten eine schlechte Durchlässigkeit herrscht (z.B. Verdichtung durch intensive Beweidung) ein auslösender Faktor sein im Sinne eines hydraulischen Grundbruches. Dieser Vorgang wird teilweise auch als Hangwasserexplosion bezeichnet. Da in den meisten Fällen der untersuchten Rutschungen in den Gebieten Napf und Appenzell die Durchlässigkeit von oben nach

unten abnimmt (vgl. Kapitel 4.7.4) dürfte dieser Aspekt jedoch eine untergeordnete Rolle gespielt haben.

4.7 Böden

Im Anriss der Rutschung wurde jeweils ein Bodenprofil zur Beschreibung des Bodens erstellt. Besonderes Augenmerk galt dabei den Faktoren Bodenentwicklung, Makroporen, Durchwurzelung und Durchlässigkeit. Eine flächenhafte Beurteilung der Böden auf der gesamten Perimeterfläche (Bodenkarte) ist nicht verfügbar. Daher kann der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Rutschaktivität nur gutachtlich abgeschätzt werden.

4.7.1 Bodenentwicklung

Die Entwicklung der Böden bei den Rutschungen wurde den drei Entwicklungsstufen "Rohböden", "entwickelte Böden" und "Nassböden" zugeordnet. Als Rohböden angesprochen wurden Böden ohne Verwitterungshorizont¹ (B), d.h. der Humushorizont² (A) liegt direkt auf dem Ausgangsmaterial (C-Horizont³). Als Rohböden wurden auch jene Profile bezeichnet, wo nur ein schwach ausgeprägter Verwitterungshorizont (beginnende Verbraunung) beobachtet wurde oder wo eine klare Trennung zwischen B- und C-Horizont nicht möglich war. Bei den entwickelten Böden kann ein mehr oder weniger deutlicher B-Horizont festgestellt werden. Nassböden sind beeinflusst durch Stau- oder Hangwasser und weisen deutliche, permanent wasserbeeinflusste Horizonte mit entsprechenden Vernässungsmerkmalen wie Rostflecken, Fahl-Rotfärbungen und Reduktionsfarben (blau-grau-grünlich) auf. Weitere Anzeichen sind stehendes oder konstant fließendes Wasser.

Insgesamt am stärksten vertreten sind die entwickelten Böden (Tabelle 4.14). Allerdings sind zwischen den beiden Untersuchungsgebieten Unterschiede klar festzustellen: im Gebiet Appenzell wurden bei 80% der Rutschungen, im Gebiet Napf jedoch bei nur 40% entwickelte Böden beobachtet. In beiden Gebieten wurden nur neun Böden als vernässt (Nassböden) beurteilt. Davon liegen acht im Freiland und einer in einer mit Weide und Erle einwachsenden Waldlichtung. Die Nassböden befinden sich zur Hauptsache im Gebiet Napf. Sie sind dort häufig als Hangried zu bezeichnen und kommen in Muldenlagen, an Hangkanten oder Geländebrüchen vor. Insgesamt 34 Böden wurden als Rohböden angesprochen; sie befinden sich praktisch alle auf Waldstandorten. Rohböden sind im Gebiet Napf wesentlich häufiger als im Gebiet Appenzell. Die Mehrzahl der Rutschungen mit Rohböden (23 von 34) ereigneten sich in Muldenlagen (Geländeformen 8 und 9, Abbildung 4.4).

¹ B-Horizont: Mineralerdehorizont, der durch zahlreiche Bodenbildungsvorgänge gekennzeichnet ist, wie z.B. Verwitterung, Anreicherung, Neubildung. Er folgt, von oben nach unten betrachtet häufig einem A-Horizont und geht nach unten über ins Muttergestein (C-Horizont) oder in vernässte Horizonte.

² A-Horizont: oberster humushaltiger (dunkel gefärbter) Mineralerdehorizont, bestehend aus Mineralerde, gemischt mit organischer Substanz.

³ C-Horizont (Muttergestein): jenes mineralische Ausgangsmaterial, aus dem der mineralische Anteil des darüber liegenden Bodens gebildet worden ist. Es ist das Gesteinsmaterial, das von der Bodenbildung am Ort nicht erfasst worden ist.

Tabelle 4.14: Entwicklung der Böden bei den Rutschungen.

Bodenentwicklung	Appenzell	Napf	Total
Rohböden	12	22	34
entwickelte Böden	68	22	90
Nassböden	2	7	9
Total	82	51	133

4.7.2 Makroporen

Makroporen sind massgeblich beteiligt am raschen Eindringen von Niederschlags- und Oberflächenwasser in tiefere Bodenschichten. Aus diesem Grund wurden die Makroporen im Rahmen der Felderhebungen am Profil in der Anrisszone der Rutschung beurteilt und in vier Kategorien eingeteilt: Wurmgänge, Wurzelkanäle, Risse/Spalten und Mausgänge (Abbildung 4.19). Im Weiteren erfolgte eine Angabe über das Ausmass und die Eindringtiefe der jeweiligen Makroporen.



Abbildung 4.19: Makroporen: Wurmgänge, Wurzelkanäle, Risse/Spalten und Mausgänge.

Bei den Makroporen wurden folgende Eigenschaften beobachtet:

Wurmgänge sind in vertikaler Richtung häufig ausgewaschen und in sandigen Böden oftmals bis zu Fingerdicke ausgespült. *Wurzelkanäle* entstehen durch das Verfaulen von abgestorbenen Wurzeln. Sie gehen mitunter sehr tief und führen dadurch Wasser in tiefere Bodenhorizonte. Im Zusammenhang mit den Wurzelkanälen sind zahlreiche Fälle aufgetreten, wo die Rhizzodermis (Wurzelrinde) vorhanden, das Wurzelholz jedoch vollständig abgebaut und verschwunden war. Solche Makroporen wirken wie Rohrleitungen. Brüche im Bodengefüge sind direkt sichtbar als feine *Risse und Spalten* oder an blockigen bis plattigen Strukturen im Profil. Allerdings konnte jeweils nicht eindeutig beurteilt werden, ob die Risse und Spalten bereits vor dem Ereignis vorhanden waren, oder ob die Rutschbewegungen selbst das Bodengefüge aufgelockert haben. In der

Regel weniger tief als die bereits genannten Makroporen reichen die *Mausgänge*; sie haben jedoch unter Umständen – insbesondere in Hanglagen - ein grosses Potential hinsichtlich Wasserführung.

Tabelle 4.15 enthält Angaben zu Art und Ausmass der Makroporen in den Bodenprofilen der Rutschungen. Im überwiegenden Teil der Profile wurden Makroporen festgestellt. Nur gerade sieben Rutschungen weisen an der Anrissstelle keine Makroporen auf (vier davon auf Rohböden, eine fehlende Angabe, zwei verbaut). Die Rutschungen ohne Makroporen im Bodenprofil befinden sich zu gleichen Teilen im Wald und im Freiland. In allen entwickelten Böden konnten Makroporen beobachtet werden.

Tabelle 4.15: Übersicht über die Häufigkeit des Vorkommens sowie das Ausmass der verschiedenen Makroporen im Anriss.

	Wurm- gänge	Wurzel- kanäle	Risse/ Spalten	Maus- gänge	Total
keine Makroporen					4
wenige/einige	28	26	13	9	76
viele	37	24	43	1	105
sehr viele	0	1	0	0	1
ohne Angabe über das Ausmass	11	8	14	0	33
verbaut bzw. fehlende Angabe					3
Total	76	59	70	10	

Der grösste Teil der Profile (93%) weisen mindestens eine Art von Makroporen auf, 57% mindestens zwei Arten und 8% mindestens 3 Arten. *Wurmgänge* kommen in 57% der Anrisszonen vor (7 Rohböden, 6 Nassböden, 62 entwickelte Böden). *Wurzelkanäle* sind in 44% der Bodenprofile festgestellt worden (11 Freilandprofile und 48 Waldprofile). *Mausgänge* waren an 10 Profilen (8%) bei der Tiefensickerung des Wassers beteiligt. Es sind dies pro Profil meist nur einzelne, jedoch stark ausgewaschene Gänge, welche bis in Tiefen zwischen 30 und 60 cm reichen. In allen Fällen sind gleichzeitig auch Wurmgänge und/oder Wurzelkanäle vorhanden. Siebzig Rutschungen (53%) weisen im Profil *Risse, Spalten oder eine aufgelockerte Bodenstruktur* auf.

Tiefe der Makroporen im Profil

Im Weiteren wurde untersucht, ob während der Niederschlagsereignisse durch die Makroporen Infiltrationswasser bis in die Tiefe der Gleitfläche transportiert werden konnte. Zu diesem Zweck wurde bei 112 Rutschungen die Profiltiefe bestimmt, bis in welche mindestens eine der verschiedenen Makroporen-Gruppen im Maximum vordringt. Diese Profiltiefe wurde mit der Tiefe des Gleithorizontes im Anriss verglichen. Die Makroporen reichen bei 24 Rutschungen (21%) weniger tief als der Bereich der Gleitfläche (definiert als im Profil beobachtete Gleitflächentiefe ± 20 cm). In 79 Fällen (71%) gehen die Makroporen gleich tief und in 9 Fällen (8%) tiefer als die Gleitfläche. Bei der überwiegenden Anzahl der diesbezüglich beurteilten Bodenprofile kann somit Wasser schnell und in grossen Mengen in den Bereich des Gleithorizontes geführt werden.

Wurmgänge, Wurzelkanäle und Risse/Spalten reichen teilweise in Tiefen bis unter den Bereich der Bruchzone hinaus, wobei die Wurzelkanäle insgesamt bis in die grössten Tiefen vordringen (Tabelle 4.16). Mausgänge reichen nicht in grössere Tiefen als die Bruchzone.

Tabelle 4.16: Übersicht über die Häufigkeit der verschiedenen Makroporen und ihre Eindringtiefe in Relation zur Anrissshöhe (=Tiefe der Gleitschicht im Anriss).

	Wurm- gänge	Wurzel- kanäle	Risse/ Spalten	Maus- gänge
> 20 cm weniger tief als Gleithorizont	19 (29%)	12 (23%)	15 (23%)	3 (60%)
bis 20 cm weniger tief als Gleithorizont	16 (25%)	19 (36%)	20 (31%)	1 (20%)
Eindringtiefe = Tiefe des Gleithorizontes	17 (26%)	4 (8%)	15 (22%)	1 (20%)
bis 20 cm tiefer als Gleithorizont	8 (12%)	12 (23%)	14 (22%)	-
> 20 cm tiefer als Gleithorizont	5 (8%)	5 (10%)	1 (2%)	-
Total	65	52	65	5

4.7.3 Durchwurzelung

Allgemein wird davon ausgegangen, dass insbesondere gröbere d.h. verholzte Wurzeln (Hauptwurzeln) zur Stabilisierung des Bodens beitragen. Für die nachfolgenden Auswertungen wird in diesem Zusammenhang ein Minimaldurchmesser von 2 mm als relevant definiert. Im Rahmen der Bodenprofilbeurteilungen bei den Rutschungen wurde deshalb der sogenannte Hauptwurzelraum festgehalten, d.h. die Tiefe, welche von Wurzeln mit einem Durchmesser > 2 mm erreicht wird (Abbildung 4.20). Nicht erfasst wurde jedoch die Intensität der Durchwurzelung.



Abbildung 4.20: Profil-Beispiele für die Durchwurzelung in Freilandböden (links) und in Waldböden (rechts).

In 58 von 133 untersuchten Rutschungen (44%) in den beiden Untersuchungsgebieten sind im beurteilten Bodenprofil keine Wurzeln von mehr als 2 mm Durchmesser gefunden worden (Tabelle 4.17). Es sind dies aus nahe liegenden Gründen hauptsächlich Bodenprofile bei Rutschungen im Freiland (54). Bei 75 Rutschungen (56%) kamen lebende Wurzeln von 2 mm und mehr Durchmesser vor, wovon 59 im Wald und 16 im Freiland. Bei den Wurzeln in den Freilandböden handelte es sich um Wurzeln von Kräutern wie Löwenzahn oder Wegerich; vereinzelt auch um Wurzeln von Sträuchern (Hundsrose) und Solitäräumen (Ahorn, Birken, Weissleren). Im Waldrandbereich oder auf einwachsenden Freiflächen kamen auch Wurzeln von Waldrandbäumen und –sträuchern vor.

Tabelle 4.17: Angaben zum Vorkommen von Wurzeln > 2 mm in den Bodenprofilen bei den Rutschungen.

	Appenzell		Napf		Total	
	Wald	Freiland	Wald	Freiland	Wald	Freiland
Ohne Wurzeln >2mm	1	36	3	18	4	54
Mit Wurzeln >2mm	33	12	26	4	59	16

Die Tiefe des Hauptwurzelraumes variiert bei den Waldrutschungen zwischen 5 und 140 cm (Abbildung 4.21). Bei den Freilandrutschungen reicht der Hauptwurzelraum von 30 bis 100 cm und liegt somit in einem im Vergleich zu den Waldrutschungen engeren Bereich. Der Median der beobachteten Hauptwurzelräume liegt im Wald etwas tiefer als im Freiland. Dies liegt jedoch namentlich daran, dass der potentiell durchwurzelbare Bereich der Böden im Freiland im Mittel mächtiger ist als im Wald. Wird der Hauptwurzelraum in Bezug gesetzt zur Bodenmächtigkeit, dann ergeben sich für Wald und Freiland ähnliche Werte; d.h. die Hauptwurzeln reichen im Wald und im Freiland im Verhältnis zur Bodenmächtigkeit in ähnliche Tiefen.

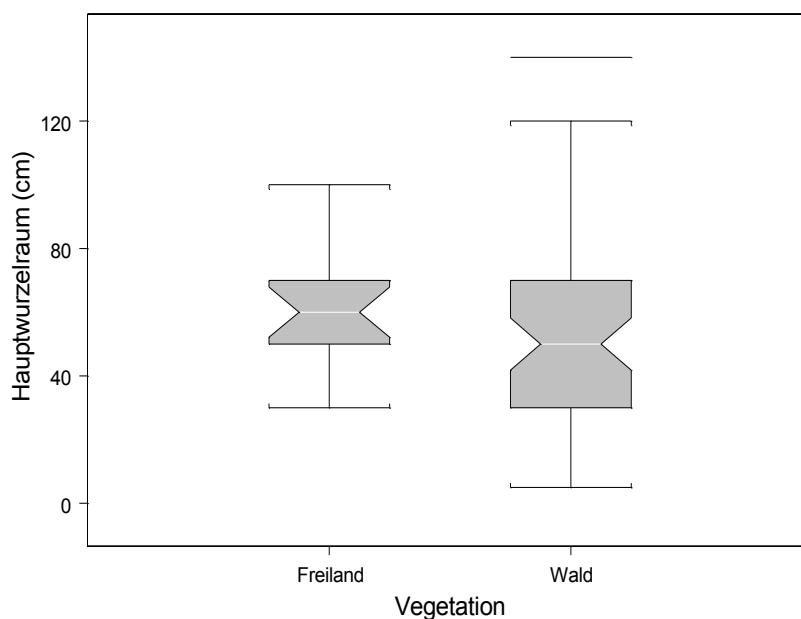


Abbildung 4.21: Hauptwurzelraum bei Wald- und Freilandrutschungen (Freiland: N=16; Wald: N=59).

4.7.4 Durchlässigkeit

Die verschiedenen Bodenhorizonte der Profile bei den Rutschungen wurden jeweils in Bezug auf ihre Durchlässigkeit beurteilt (gemäss Tabelle A.4 im Anhang). Sofern innerhalb der Bodenhorizonte Änderungen bezüglich der Durchlässigkeit oder der Lockergesteinseigenschaften vorkamen, wurden die entsprechenden Horizonte weiter unterteilt (in Tabelle 4.18 mit Indizes bezeichnet, zunehmender Index entspricht zunehmender Profiltiefe).

Tabelle 4.18 zeigt, dass die Horizonte des Oberbodens (A_h) sowie die oberen Bereiche der Mineralerdehorizonte (B und B₁) in den meisten Fällen gute Durchlässigkeiten aufweisen, welche ein ungestörtes Einsickern von Niederschlags- und Oberflächenwasser ermöglichen. Die weniger durchlässigen Bodenhorizonte sind in den tieferen Bereichen der Mineralerdehorizonte (B₂, B₃, B₄) und insbesondere in den verschiedenen Schichten des Ausgangsmaterials (C bis C₃) zu finden.

Tabelle 4.18: Anzahl Beobachtungen pro Durchlässigkeitskategorie (vgl. Tabelle A.4 im Anhang) und Bodenhorizont. Bei den Horizontbezeichnungen sind Bereiche mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten oder Lockergesteinseigenschaften mit Indizes bezeichnet (zunehmender Index entspricht zunehmender Profiltiefe).

Horizonte	Abkürzung Horizonte	Durchlässigkeit					
		übermässig durchlässig (>1000 cm/Tag)	normal durchlässig (100-1000 cm/Tag)	leicht gehemmt (10-100 cm/Tag)	stark gehemmt (1-10 cm/Tag)	± undurch- lässig (< 1 cm/Tag)	ohne Beurtei- lung der Durch- lässigkeit
Oberboden- horizonte A	A _h	2	129	1			1
	A _b		4	2	1		
Mineralerdeh- orizonte B	B	1	33	5	1		26
	B ₁	2	57	6			
	B ₂	1	5	44	10		
	B ₃		5	6	12		
	B ₄				2		
Übergangs- horizonte BC	BC	1	17	5	5		
	BC ₁		2	1			
	BC ₂			1	2		
Stauwasser- horizonte G	G _o			2			
	G _r				2		
Ausgangs- material (Mut- tergestein) C	C		3	1	41	16	
	C ₁		1	2	4		
	C ₂			1	2	6	
	C ₃				1	1	

Abkürzungserklärungen:

- A_h Oberbodenhorizont (Mineralerde, vermischt mit organischem Material); humushaltig, deutlich dunkle Farbe, Krümelgefüge
- A_b begrabener Oberbodenhorizont
- B Mineralerdehorizont, durch Prozesse der Verwitterung, Anreicherung und Neubildung beeinflusst; braun gefärbt. B₁..B₄: B-Horizonte, welche sich durch unterschiedliche Durchlässigkeit oder Lockergesteinseigenschaften unterscheiden (entspricht nicht der üblichen bodenkundlichen Systematik)
- BC Übergangshorizont (vom B- zum C-Horizont). BC₁..BC₂: wie oben
- G_o Gleyhorizont; Oxidationshorizont (Rostflecken), wechselnd zwischen Wassersättigung und normalen Durchlüftungsverhältnissen
- G_r Reduktionshorizont (Reduktionsfarben) +/- ständig wassergesättigt
- C Mineralisches Ausgangsmaterial; Untergrund von der Bodenbildung nicht beeinflusst. C₁..C₃: wie oben

Markante Änderungen der Durchlässigkeit in einem Bodenprofil werden bezüglich Hangstabilität oft als negativ beurteilt. Deshalb werden im Folgenden die Böden im Hinblick auf markante Durchläss-

sigkeitsänderungen innerhalb der Bodenprofile untersucht. Tabelle 4.19 gibt an, in welche Richtung und wie stark sich die Durchlässigkeit der verschiedenen Bodenhorizonte von oben nach unten im Profil verändert.

Die Durchlässigkeit verändert sich zwischen dem Oberboden (1 in Tabelle 4.19) und den oberen Mineralerdehorizonten (2) meist nur unbedeutend. Ein schwacher Gradient lässt sich feststellen vom Oberboden zum dritten Horizont im Profil (1-3); d.h. die Durchlässigkeit nimmt oft um eine Stufe ab. Auch vom obersten zum nächsten Mineralerdehorizont (2-3) lässt sich in 66 Fällen eine Verschlechterung um eine Stufe feststellen; in 23 Fällen auch eine markante Verschlechterung um 2 Stufen. Eine deutlichere Verschlechterung der Durchlässigkeit ist in den 63 Profilen, welche mindestens 4 unterschiedliche Horizonte aufweisen, vom zweiten zum vierten Horizont festzustellen. Siebzehn Profile wiesen 5 Horizonte auf, ebenfalls mit Tendenz abnehmender Durchlässigkeit in tieferen Horizonten.

Tabelle 4.19: Änderung der Durchlässigkeit beim Übergang von den höher gelegenen Bodenhorizonten zu tiefer gelegenen. Die Zahlen geben den Ort der Bodenhorizonte im Bodenprofil an (1: oberster Horizont im Bodenprofil, 5: unterster Horizont im Bodenprofil). Bsp: Änderung 1-2 betrifft in den meisten Fällen den Übergang vom Oberboden (A-Horizont) in den obersten Bereich des Mineralerdehorizontes (B-Horizont).

Durchlässigkeitsänderung von Horizont x zu Horizont y (Stufen gemäss Tabelle 4.16)	Änderung der Durchlässigkeit über 2 Horizonte				Änderung der Durchlässigkeit über mehrere Horizonte					
	1-2	2-3	3-4	4-5	1-3	1-4	1-5	2-4	2-5	3-5
stark verbessert (um ≥ 3 Stufen)										
verbessert (um 2 Stufen)										
leicht verbessert (um 1 Stufe)	4	2	4		2					
gleichbleibend	105	18	11	6	15			9		
leicht verschlechtert (um 1 Stufe)	14	66	42	9	54			9		
verschlechtert (um 2 Stufen)	6	23	5	2	35			37		
stark verschlechtert (um ≥ 3 Stufen)	3	3	1		6			8		
Anzahl Beobachtungen mit entsprechendem Vorkommen	132	112	63	17	112	63	17	63		
kein Gradient	1	21	70	116	21	70		70		

4.8 Rutschmechanismen - Abfliessvorgang

4.8.1 Translation/Rotation

Von den insgesamt 133 ausgewerteten Rutschungen wurde die überwiegende Mehrzahl als Translationsrutschungen (117) beurteilt. Nur gerade 12 Rutschungen waren Rotationsrutschungen (Tabelle 4.20). Bei den meisten Translationsrutschungen verlief die Gleitfläche an der Grenze zwischen dem Lockermaterial und der Felsoberfläche, bei den Rotationsrutschungen innerhalb des Lockergesteins (Abbildung 4.22). Typische Rotationsrutschungen sind aufgrund der relativ geringen Mächtigkeit des Lockergesteins in beiden Untersuchungsgebieten selten. Häufig sind Mischformen festzustellen mit rotationsförmigem Anriss und Übergang in eine translationsförmige Rutschbewegung. Dieser Rutschtyp wurde den Translationsrutschungen zugeordnet. Bei vier Rutschungen konnte die Bewegungsart nicht erfasst werden, da sie zum Aufnahmezeitpunkt bereits vollständig oder teilweise verbaut waren.

Tabelle 4.20: Angaben zu den Rutschmechanismen und zum Ort der Gleitfläche (LG=Lockergestein, FG=Festgestein).

	Anzahl	Ort der Gleitfläche	Anzahl
Translationsrutschungen	117	Innerhalb LG	21
		Grenze LG/FG	95
		Innerhalb FG	1
Rotationsrutschungen	12	Innerhalb LG	8
		Grenze LG/FG	4
		Innerhalb FG	0
fehlende Angabe	4		4
Total	133		133

In steileren Rutschflächen sind häufig murgangähnliche Prozesse im Spiel, wobei das Rutschmaterial oft in ein Gerinne gleitet und dort als Murgang weiter fliesst. In diesen Fällen ist die Bestimmung der Ausbisslinie schwierig.



Abbildung 4.22: Typische Rotationsrutschung (links) mit muschelförmiger Anrisslinie und in den Untersuchungsgebieten häufig vorkommende Translationsrutschung (rechts) mit hangparalleler Gleitfläche, meist im Übergang vom Festgestein zum Lockergestein.

4.8.2 Ort der Gleitfläche

In jeder Rutschfläche wurde beurteilt, wo und in welchem Material die Gleitfläche verlief bzw. der Bruch stattfand. Die Beurteilung war in vielen Fällen einfach; z.B. dort, wo in grossen Teilen der Rutschfläche die Felsoberfläche freigelegt wurde. Schwieriger war die Zuordnung dort, wo die Gleitfläche durch verschiedene Bodenmaterialien verlief; z.B. im oberen Teil der Rutschfläche durch Lockergestein und weiter unten auf der Felsoberfläche. In solchen Fällen wurde abgeschätzt, zu welchem Anteil die Gleitfläche durch ein bestimmtes Material verlief und entsprechend dem grössten Anteil wurde die Zuordnung vorgenommen.

In beiden Untersuchungsgebieten zusammen rutschte das Bodenmaterial in 75% der Fälle (99 Rutschungen) auf der Felsoberfläche ab (Tabelle 4.21). Bei 7 Rutschungen war zwar der Fels in der Rutschfläche örtlich aufgeschlossen, die Bruchfläche verlief jedoch zum grössten Teil im Lockergestein. Insgesamt bei 32 Rutschungen (24%) verlief die Gleitfläche innerhalb des Lockergesteins. Nur in einem Fall rutschte auch ein Teil des aufgelockerten Festgesteins mit. Zwischen den

beiden Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell gibt es in Bezug auf den Ort der Gleitfläche keine wesentlichen Unterschiede. Allerdings sind in den beiden Perimetern nicht die gleichen Lockergesteine betroffen: die 13 Rutschungen, bei denen Moräne betroffen ist, befinden sich ausnahmslos im Gebiet Appenzell; Rutschungen mit Gehängeschutt kamen nur im Napfgebiet vor (Tabellen A.15 und A.16 im Anhang). Die Gründe dafür sind im Vorkommen der verschiedenen Lockergesteine in den Untersuchungsgebieten zu suchen.

Tabelle 4.21: Ort der Gleitfläche mit Angabe der betroffenen Locker- und Festgesteine (Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell; es fehlen die Angaben einer verbauten Rutschung).

Ort der Gleitfläche	Rutschungen mit aufgeschlossenem Festgestein								ausschliesslich Lockergestein betroffen				Total	
	Nagelfluh (N)	Sandstein (S)	Mergel (M)	Wechsellagerungen					Moräne	Gehängeschut	Verwitterungsmaterial an Ort	Total Lockergestein		
				N-S	N-M	S-M	N-S-M	Total Festgestein						
Innerhalb Lockergestein	2	4	1					7	13	9	3	25	32	
Grenze Lockergestein/Fels	14	34	8	10	8	22	3	99					99	
Im aufgelockerten Fels		1						1					1	
								107					25	132

4.8.3 Materialverlagerung

Bei sehr vielen Rutschungen floss ein grosser Teil des Rutschmaterials aufgrund der grossen Hangneigungen und der grossen Wassersättigung des Bodenmaterials hangabwärts. Bei jeder Rutschung erfolgte eine Abschätzung, zu welchen Anteilen das Rutschmaterial hangabwärts verlagert wurde respektive im Bereich der Gleitfläche verblieb. Unter dem nachfolgend als Materialbilanz verwendeten Begriff wird der Anteil der Rutschmasse verstanden, der sich nur um wenige Meter bewegte. Zusammen mit der Auslaufstrecke und dem Pauschalgefälle ist dieser Parameter für das Prozessverständnis und damit insbesondere auch für die Gefahrenbeurteilung von Bedeutung.

Bei fast der Hälfte der Rutschungen befinden sich weniger als 10% der Rutschkubatur in Verbindung mit der Gleitfläche oder – anders ausgedrückt - 90% der Rutschmasse wurden aus der Rutschfläche abtransportiert (Abbildung 4.23). Der grösste Teil der Rutschungen weist eine Materialbilanz von weniger als 30% auf und nur in wenigen Fällen befindet sich noch mehr als 50% des Rutschvolumens in Verbindung mit der Gleitfläche. Zwischen den beiden Perimetern gibt es nur geringe Unterschiede; sie bestehen zur Hauptsache darin, dass im Gebiet Appenzell mehr Rutschungen mit weniger starker Verlagerung vorkommen als im Gebiet Napf. Die Ergebnisse der Untersuchung Sachseln sind ähnlich wie jene der aktuellen Untersuchung mit dem Unterschied, dass es bei den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell deutlich mehr Rutschungen mit Anteil $\geq 30\%$ gibt (Napf und Appenzell: 26%; Sachseln: 4%).

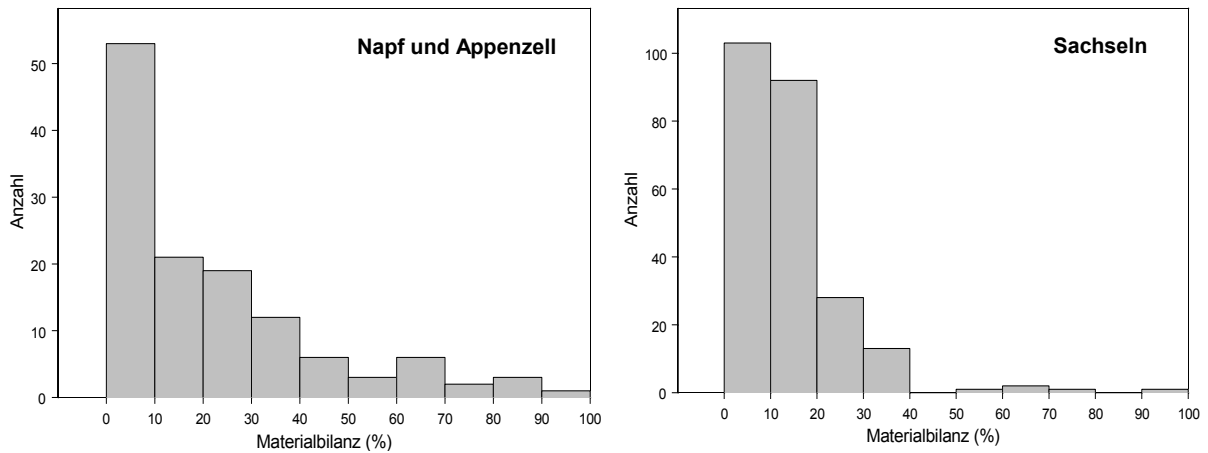


Abbildung 4.23: Anteil des Rutschvolumens, das sich noch in Kontakt mit der Rutschfläche befindet (Materialbilanz in %) für beide Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell (links, N=126) und zum Vergleich die Werte von Sachseln (rechts; N=241).

Im Weiteren wurden verschiedene mögliche Einflussgrössen auf die Materialbilanz untersucht. Es zeigte sich, dass Rutschungen mit grosser Verlagerung (d.h. $\geq 30\%$ Verlagerung) im Mittel in steileren Gebieten losgebrochen sind und kleiner sind, d.h. weniger Volumen aufweisen. In Bezug auf die Geländeform als mögliche Einflussgrösse auf die Materialbilanz zeigte sich, dass bei Rutschungen in konvexen Geländeformen 6 und 9 (N=79, Geländeformen vgl. Abbildung 4.4) die Materialbilanz im Schnitt grösser ist, jedoch über einen grösseren Bereich streut als bei Rutschungen in gleichmässig geneigten oder konkaven Geländeformen (Abbildung 4.24 links). Eine abnehmende Tendenz ist bei der Materialbilanz von den eher feinkörnigen (N=10) über die mittelnkörnigen (N=93) zu den grobkörnigen Lockergesteinen (N=25) feststellbar (Abbildung 4.24 rechts).

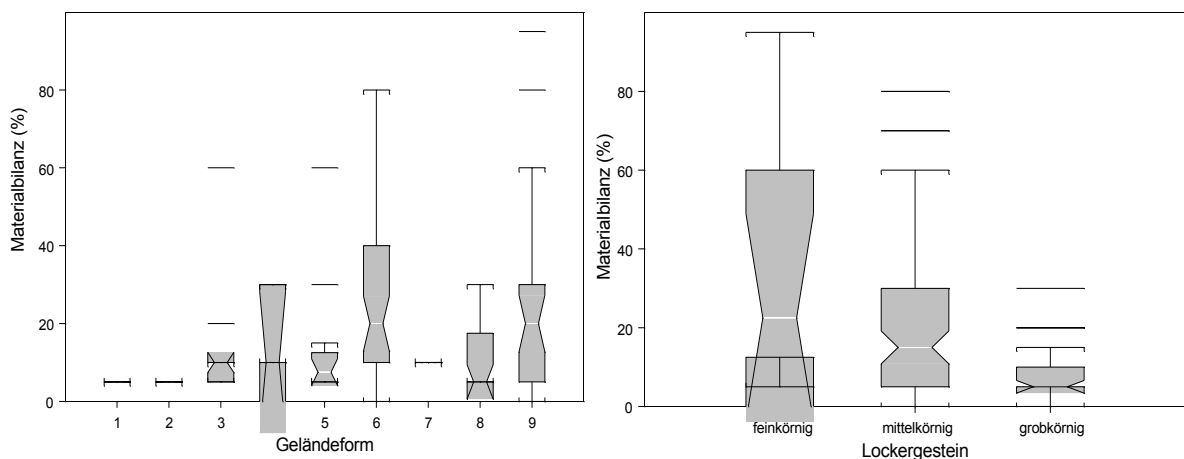


Abbildung 4.24: Mögliche Einflussgrössen auf die Verlagerung des Rutschmaterials (Materialbilanz = Anteil des Rutschvolumens, der im Kontakt mit der Gleitfläche geblieben ist). Links: Geomorphologie; rechts: Art des Lockergesteins.

4.8.4 Auslaufstrecke und Pauschalgefälle

Die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle der abfliessenden Rutschmassen sind bei der Gefahrenkartierung von Bedeutung, indem im Anschluss an die Identifizierung der Auslöseorte auch die durch die abfliessenden Rutschmassen gefährdeten Bereiche abgeschätzt werden müssen. Um die Auslaufstrecke der Rutschmasse zu bestimmen, wurde die schiefe Distanz geschätzt zwischen dem oberen Anrissrand der Rutschung und dem Ort, wo der grösste Teil der Rutschmasse abgelagert wurde. Das Pauschalgefälle gibt die Neigung zwischen dem oberen Anrissrand und dem unteren Rand des Ablagerungsgebietes an (Abbildung 4.25). Leider sind anlässlich der Untersuchung der oberflächennahen Rutschungen in Sachseln in diesem Zusammenhang keine Daten erhoben worden.

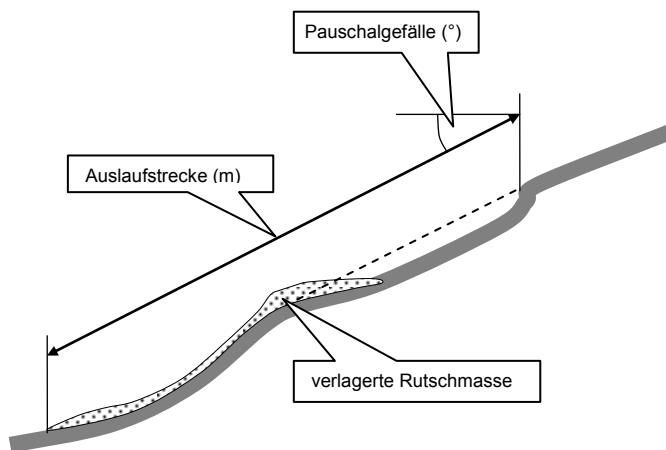


Abbildung 4.25: Schematische Darstellung zur Auslaufstrecke und zum Pauschalgefälle.

Die Auslaufstrecke konnte bei 109 Rutschungen erfasst werden. Gemäss Abbildung 4.26 liegen die Auslaufstrecken beim grössten Teil der Rutschungen in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell zwischen 20 und 80 m. 15% (N=16) weisen Auslaufstrecken von 80 m und mehr auf. Die maximale Distanz zwischen Anriss und Ablagerung beträgt 150 m.

Das Pauschalgefälle wurde bei 120 Rutschungen gemessen. Der überwiegende Anteil der Hangprozesse weist ein Pauschalgefälle von 20 bis 40° auf (Abbildung 4.26 rechts). Nur bei drei Rutschungen wurden Pauschalgefälle von weniger als 20° beobachtet. Das flachste Pauschalgefälle liegt bei 17°, das steilste bei 48°.

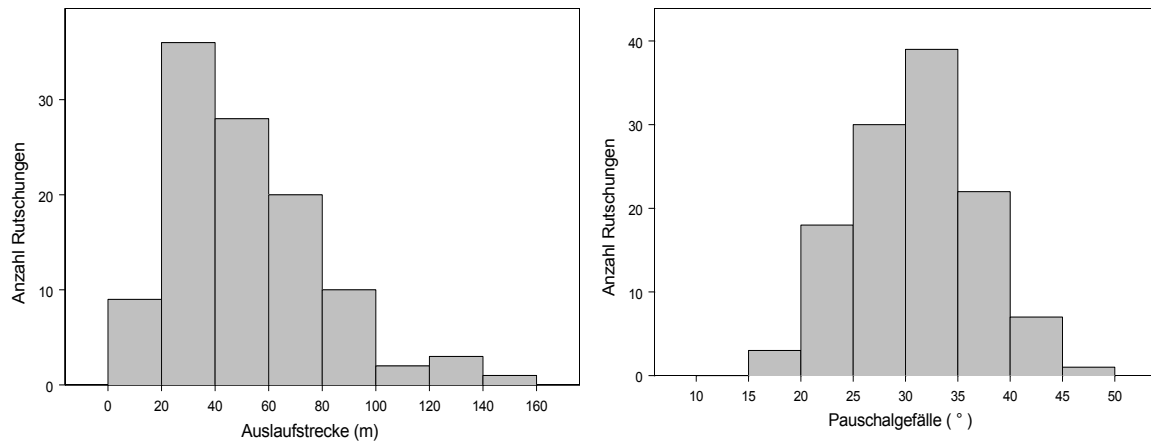


Abbildung 4.26: Auslaufstrecke (links, N=109) und Pauschalgefälle (rechts, N=120) für die Rutschungen der beiden Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell. Wichtig: der Fließ- und Ablagerungsvorgang war nur bei 38 Rutschungen vollständig nachvollziehbar und ungestört! Bei den anderen Rutschungen sind die angegebenen Werte für das Pauschalgefälle und die Auslaufstrecke als Minimalwerte zu verstehen, d.h. bei diesen Rutschungen sind die Auslaufstrecken länger und die Pauschalgefälle kleiner als die angegebenen Werte.

In Bezug auf die Interpretation der Werte in Abbildung 4.26 ist zu bemerken, dass in vielen Fällen die Fließstrecken nicht vollständig (d.h. bis zum Ablagerungsort) einsehbar waren oder der Abfluss gestört war:

- nicht einsehbar infolge Geländekante mit nach unten steiler werdender Neigung (N=20)
- Abfluss bis in ein Gerinne mit anschliessendem Abtransport durch Hochwasser (N=66)
- Hindernisse oder markante Mulden im Bereich der Fließstrecke (N=9)

Aus diesem Grund sind zusätzlich in Abbildung 4.27 die Auslaufstrecken und Pauschalgefälle für jene Rutschungen (N=38) angegeben, bei denen die Fließstrecke vollständig einsehbar war, die Rutschmasse in einer Flachstrecke zum Stillstand kam und der Abfluss nicht durch Hindernisse gestört war. Die Werte für die Auslaufstrecke liegen grösstenteils wiederum zwischen 20 und 80 m (3 Rutschungen ≥ 80 m), jene für das Pauschalgefälle zwischen 20 und 40° (2 Rutschungen $< 20^\circ$). Es ergeben sich keine grundsätzlichen Differenzen zu Abbildung 4.26.

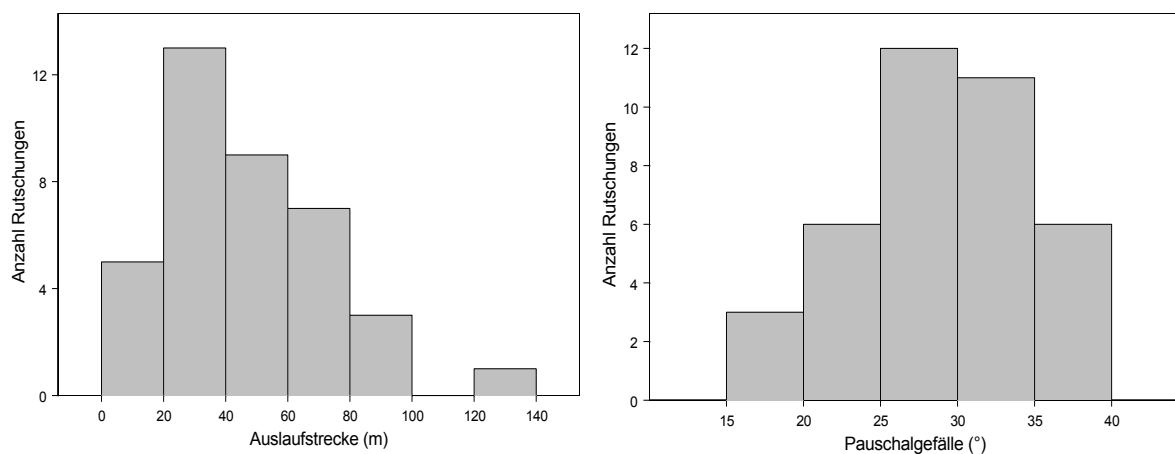


Abbildung 4.27: Auslaufstrecke und Pauschalgefälle für Rutschungen mit einsehbarer Auslaufstrecke (N=38).

Der Mittelwert für das Pauschalgefälle liegt bei den Rutschungen mit einsehbaren und nicht durch Hindernisse beeinflussten Flie遝sstrecken bei 28.5°. Er liegt in einer ähnlichen Grössenordnung bei Rutschungen mit nicht vollständig einsehbaren Flie遝sstrecken (28.9°). Dagegen liegt der Mittelwert für das Pauschalgefälle etwas höher bei Rutschungen mit Hindernissen in der Flie遝sstrecke (31.8°) und solchen, die in Gerinne flossen (32.5°).

Im Zusammenhang mit der Gefahrenbeurteilung und -kartierung stellt sich die Frage, ob und durch welche Einflussgrössen die Auslaufstrecke bzw. das Pauschalgefälle beeinflusst wird. Zunächst wurde untersucht, inwiefern sich die Hangneigung bei den Rutschungen oder das Rutschvolumen auf das Pauschalgefälle auswirkte. Abbildung 4.28 zeigt die Tendenz, dass mit zunehmender Hangneigung bei den Rutschungen das Pauschalgefälle der Flie遝sstrecke zunimmt. Andererseits ist bei grossen Volumina im Durchschnitt ein eher geringeres Pauschalgefälle festgestellt worden. Beim Volumen ist jedoch die Streuung der Werte so gross, dass der Zusammenhang nur sehr schwach ist.

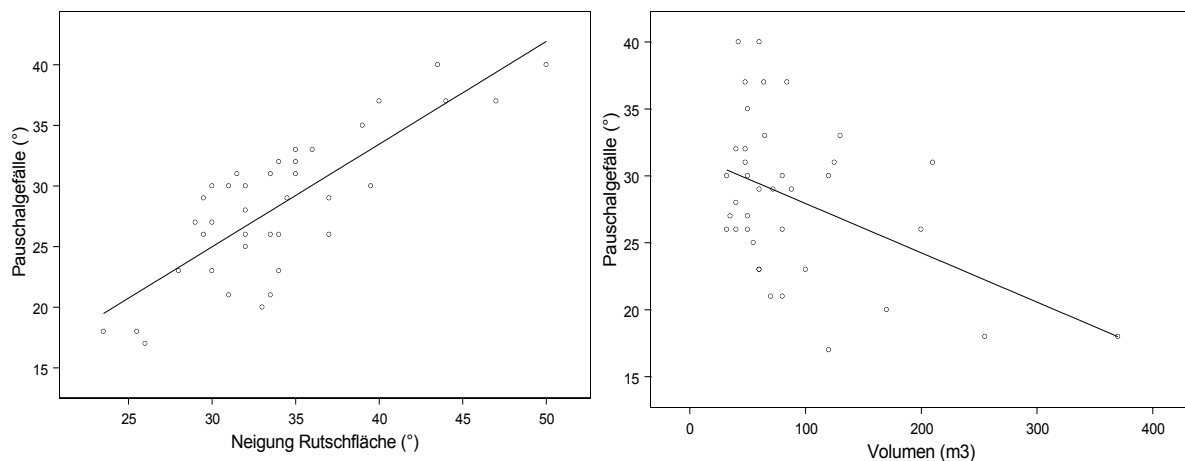


Abbildung 4.28: Zusammenhang zwischen der Hangneigung bei den Rutschungen sowie dem Rutschvolumen und dem Pauschalgefälle für Rutschungen mit einsehbarer Auslaufstrecke (N=38; Punkte-Darstellung mit Trendlinie). Namentlich der Zusammenhang Volumen-Pauschalgefälle ist nur sehr schwach!

Die Auslaufstrecken von Rutschungen mit der Gleitfläche an der Grenze zwischen Lockergestein und Fels sind grösser als jene von Lockergesteinsrutschungen (Abbildung 4.29). Ein analoger Zusammenhang zwischen dem Ort der Gleitfläche und dem Pauschalgefälle besteht nicht. Sowohl die Art des Lockergesteins (grob-, mittel-, feinkörnig) wie auch die Geländeform wirken sich gemäss den vorliegenden Daten nicht auf die Länge der Auslaufstrecke und auf das Pauschalgefälle aus bzw. es lassen sich keine gesicherten Zusammenhänge ableiten.

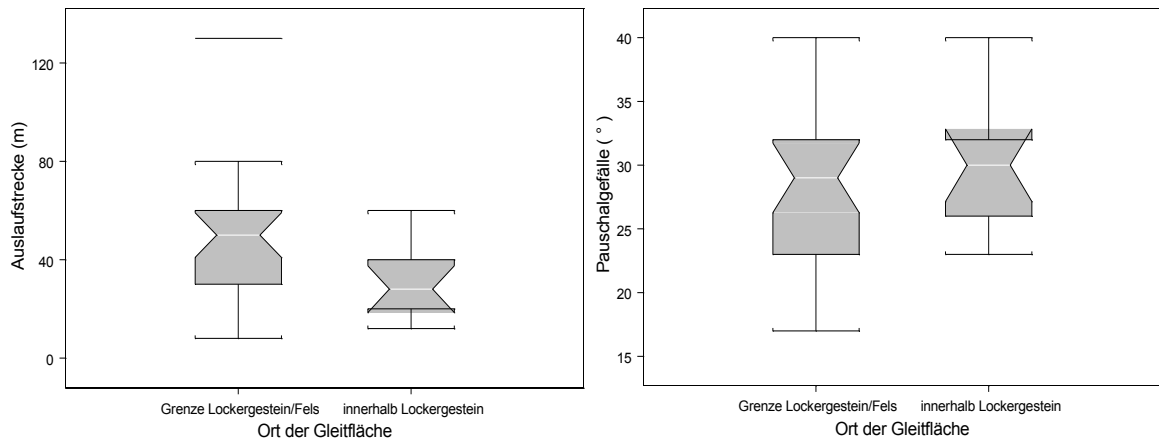


Abbildung 4.29: Auslaufstrecke (links) und Pauschalgefälle (rechts) in Abhängigkeit vom Ort der Gleitfläche für Rutschungen mit einsehbarer Auslaufstrecke (Gleitfläche innerhalb Lockergestein: N=11, Gleitfläche an Grenze zum Festgestein: N=27).

5 Diskussion

5.1 Allgemeines

Das Ziel der Untersuchung zu den oberflächennahen Rutschprozessen anlässlich der Unwetterereignisse in den Gebieten Napf und Appenzell bestand primär in der Analyse der Standortverhältnisse bei den Rutschungen (Geologie, Geomorphologie, Hydrologie, Vegetation etc.) sowie in der Kartierung der Ereignisse. In beiden Unwettergebieten wurden Untersuchungsperimeter definiert, welche in der zur Verfügung stehenden Zeit bearbeitet werden konnten. Alle oberflächennahen Rutschprozesse, welche sich innerhalb dieser Perimeter befanden und gewisse Kriterien erfüllten, wurden anlässlich von Feldaufnahmen dokumentiert. Die Angaben zu diesen Rutschungen bildeten die Datengrundlage für Auswertungen im Zusammenhang mit massgebenden Faktoren für die Rutschauslösung sowie für die Transportprozesse von Rutschmaterial.

5.2 Rutschaktivität in den Untersuchungsgebieten

Die Rutschaktivität, welche in der vorliegenden Untersuchung ausgedrückt wird als Anzahl Rutschungen pro Fläche (N/ha), liegt im Untersuchungsgebiet Appenzell (0.08 N/ha) deutlich unter jener im Gebiet Napf (0.21 N/ha). Im Rahmen der Untersuchung Sachseln wurde eine nochmals höhere Rutschaktivität festgestellt (0.34 N/ha). Der Grund dafür dürfte namentlich in den unterschiedlichen Neigungsverhältnissen in den Untersuchungsgebieten liegen: im Gebiet Appenzell kommen grössere Flächenanteile mit relativ geringen Hangneigungen vor als im Gebiet Napf. Die Niederschläge kommen als Grund für die unterschiedlichen Rutschaktivitäten nicht in Frage, da im Gebiet Napf eher geringere Regenmengen fielen als im Gebiet Appenzell. Inwiefern die stärkeren Vorregen im Gebiet Napf eine Rolle spielten, ist schwierig abzuschätzen. Die Tatsache, dass die Rutschaktivität in Sachseln grösser war, beruht zu einem Teil darauf, dass die Grenze für die Aufnahme dort bei einem Rutschvolumen von 20 m^3 lag und jene der vorliegenden Untersuchung bei 30 m^3 . Aber auch wenn die Rutschungen $< 30 \text{ m}^3$ von Sachseln nicht berücksichtigt werden, liegt die Rutschaktivität mit 0.31 N/ha immer noch deutlich über jener der Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell.

5.3 Abmessungen der Rutschungen

Bei den dokumentierten Hangprozessen handelt es sich um Rutschungen mit grösstenteils geringen Abmessungen: mehr als 90% der Rutschungen weisen ein Volumen von weniger als 300 m^3 auf. Gemäss der Klassifikation in BRP, BWB, BUWAL (1997) fallen die Prozesse in die Kategorie der flachgründigen Rutschungen (mittlere Mächtigkeit $\leq 2.0 \text{ m}$). In Bezug auf die Intensität der Gefahrenprozesse, welche sich in der entsprechenden Empfehlung nach der mittleren Mächtigkeit

der mobilisierbaren Schicht richtet, werden die Rutschungen der Untersuchungsgebiete Napf und Appenzell den Kategorien kleine bis mittlere Intensität zugeordnet. Die vorliegende Erfahrung zeigt, dass die Definition der Intensität überdacht werden muss. Dies insbesondere auch deshalb, weil bei der mittleren Intensität u.a. auch davon ausgegangen wird, dass Personen innerhalb von Gebäuden nicht gefährdet sind. Im Verlauf der Unwetter Appenzell 2002 waren bei einem ähnlichen Hangprozess (Mächtigkeit < 2.0 m) jedoch drei Todesopfer in einem Wohnhaus zu beklagen.

5.4 Einflussgrössen auf die Rutschauslösung

5.4.1 Höhenlage

Zwischen der Höhenlage und der Rutschaktivität konnten nur bedingt Zusammenhänge festgestellt werden. Beispielsweise war es so, dass im Untersuchungsgebiet Appenzell zwar vermehrt Rutschungen in den tieferen Lagen ausgelöst wurden. Dies liegt jedoch nicht im eigentlichen Sinne an der Höhenlage, sondern primär an den vergleichsweise wesentlich grösseren Hangneigungen in den tieferen Lagen (Grabeneinhänge).

Im Rahmen der Untersuchungen von Sachseln wurde eine höhenabhängige Rutschaktivität festgestellt. Dies wurde damit begründet, dass die Ausprägung gewisser wesentlicher Parameter mit der Höhenlage verbunden sind, insbesondere die Niederschlagsintensität, Vegetation und Lockergesteinseigenschaften.

Im Rahmen einer Gefahrenbeurteilung wird im Allgemeinen die Höhenlage per se deshalb nicht als wichtiges Kriterium zu berücksichtigen sein sondern höchstens als Hinweis auf eine mögliche Veränderung wichtiger Standortsfaktoren.

5.4.2 Neigung

Aus bodenmechanischen Überlegungen ist die Hangneigung ein zentraler Einflussfaktor auf die Hangstabilität. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen bestätigen dies. Rutschungen wurden im Bereich von 23 bis 50° festgestellt, wobei nahezu 90% der Rutschungen im Bereich von 29 bis 44° liegen. Andere Untersuchungen wie beispielsweise Moser und Schoger (1989) stellen einen ähnlichen Neigungsbereich fest (21 bis 50°). Im Vergleich dazu liegen die Rutschungen von Sachseln in einem engeren Bereich (28 bis 45°), d.h. es ereigneten sich weniger Rutschungen im sehr flachen und auch weniger im sehr steilen Gelände.

Die Ergebnisse zu den Neigungen bei den Rutschungen dienen als Anhaltspunkte für Neigungsbe-
reiche, in welchen spontane Rutschungen bei extremen Niederschlägen zu erwarten sind. In Bezug auf Gefahrenbeurteilungen sind diese Angaben – neben weiteren Informationen wie zum Beispiel zu den Lockergesteinseigenschaften – von zentraler Bedeutung. Der untere Rand des beobachteten Neigungsbereiches ist in diesem Zusammenhang besonders wichtig. Es ist jedoch kaum sinnvoll, alle Gebiete mit Hangneigungen über der flachsten beobachteten Rutschung als gefährdet zu beurteilen, denn gerade die Rutschungen mit den flachsten Neigungen sind oft Spezialfälle. Zudem sind diese Fälle weniger für die Definition einer Grenzneigung zur Ausscheidung gefährdeter Gebiete geeignet, da dadurch die entsprechenden Flächen zu gross würden. Eine

Möglichkeit, diese Problematik zu entschärfen, besteht darin, jene Neigung zu berücksichtigen, über welcher beispielsweise 80% oder 90% der Rutschungen angebrochen sind (vgl. Tabelle 4.4). Diese Neigungen liegen jeweils um mehrere Neigungsgrade über der geringsten beobachteten Neigung bei den Rutschungen. Das beschriebene Verfahren bedeutet allerdings, dass ein entsprechendes Restrisiko eingegangen wird. Im Weiteren ist zu bemerken, dass die Angaben in Tabelle 4.4 nur für unbeeinflusste Rutschungen gelten. Bei Hängen, welche durch Strassenböschungen, konzentrierte Wassereinleitungen und Gerinneerosion beeinflusst sind, muss auch bei geringeren Neigungen mit Hangbewegungen gerechnet werden.

5.4.3 Geländeform

Die Mehrzahl aller Rutschungen entstand beim Übergang von oben flacheren zu unten steileren Gebieten (insbesondere Appenzell) oder in Mulden- bzw. Rinnenlagen (insbesondere Napf). Damit scheinen diese Geländetypen besonders gefährdet zu sein bezüglich der Entstehung von oberflächennahen Rutschungen. Um den Einfluss der Geländeform quantifizieren zu können, müssten jedoch Kenntnisse erarbeitet werden über das flächenmässige Vorkommen der verschiedenen Geländeformen in den Untersuchungsgebieten. Dies war insbesondere deshalb nicht möglich, weil kein genügend genaues digitales Höhenmodell zur Verfügung stand (das DHM25 ist für diese Zwecke ungeeignet).

Bei den oberflächennahen Rutschungen von Sachseln ereigneten sich mehr als die Hälfte aller Rutschungen in Gebieten ohne Wölbung. Aus diesem Ergebnis wurde auf einen geringen Einfluss der Geomorphologie auf die Hangstabilität geschlossen. Im Gegensatz dazu stellten Aleotti (1996) und Moser (1980) fest, dass Muldenlagen und Terrassenkanten besonders stark gefährdet sind. Letztere Aussage wird nun in Bezug auf die Muldenlagen (erhöhte Wasserkonzentration?) durch die Ergebnisse aus dem Gebiet Napf (Waldrutschungen) sowie in Bezug auf die Terrassenkanten (erhöhter Strömungsdruck?) durch die Ergebnisse aus dem Gebiet Appenzell gestützt.

Im Zusammenhang mit Fragen der Gefahrenbeurteilung beschränken sich die gegenwärtigen Schlüsse auf die Aussage, dass es offenbar gebietsabhängig ist (bezüglich auslösendem Niederschlag, Geologie, Relief, etc.), ob die Geländeform wichtig ist für die Entstehung von oberflächennahen Rutschungen oder nicht. Weitere Untersuchungen sind notwendig.

5.4.4 Exposition

Die Auswertungen zur Exposition ergaben ein uneinheitliches Bild. Im Perimeter Napf war von den auswertbaren Expositionen die Rutschaktivität in der Ausrichtung N deutlich schwächer. Im Gebiet Appenzell sind in den Expositionen NW, W und SW vergleichsweise weniger Rutschungen pro Flächeneinheit entstanden.

Für die unterschiedlichen Rutschaktivitäten in den verschiedenen Expositionen konnte bis anhin keine Erklärung gefunden werden. Ein nachvollziehbarer Grund für einen Einfluss der Exposition auf die Hangprozesse wäre beispielsweise die Orientierung der geologischen Schichten (hangparallele Schichten). Insbesondere aufgrund des geringeren Scherwiderstandes müsste die hangparallele Orientierung von glatten, wenig zerklüfteten Schichten die Anfälligkeit für Rutschungen erhöhen. Entsprechende Untersuchungen in Sachseln weisen zwar in diese Richtung, ein

eindeutiger Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden. Da die Schichten im Gebiet Napf nur flach geneigt sind, kann dieser Faktor dort keinen wesentlichen Einfluss ausüben. Im Gebiet Appenzell, mit hauptsächlich nach N bis NW geneigten Schichten, wurde in den entsprechenden Expositionen keine besonders grosse Rutschaktivität festgestellt. Die Orientierung der Schichten stellt somit nach den vorliegenden Ergebnissen keine Erklärung für die unterschiedlich intensiven Hangprozesse in den verschiedenen Expositionen dar.

Inwiefern allenfalls die Ausrichtung des Geländes gegenüber der Zugrichtung der Gewitterzellen bzw. gegenüber der Windrichtung einen Einfluss auf die Rutschaktivität ausübte, ist für die Unwetter 2002 unter anderem auch aufgrund fehlender Meteodaten in genügender Auflösung schwierig zu beurteilen. Zu überprüfen wäre, ob mit der Exposition andere, wichtige Einflussparameter wie beispielsweise die Hangneigung oder die Ausgangs-Bodenfeuchte einhergehen. In der Untersuchung von Sachseln wurde dies allerdings ohne Erfolg geprüft.

Nach den vorliegenden Ergebnissen stellt die Exposition kein klares Kriterium für die Beurteilung der Gefahr von oberflächennahen, spontanen Rutschungen dar.

5.4.5 Einfluss von Wald und Freiland auf die Rutschprozesse

Eine unterschiedliche Wirkung der Wald- bzw. Freilandvegetation auf die Rutschaktivität konnte nicht klar quantifiziert werden. Die in der vorliegenden Untersuchung festgestellte, höhere Rutschaktivität in Waldflächen lässt sich kaum durch die negative Wirkung der Waldvegetation erklären. Der Grund dürfte vielmehr in den deutlich grösseren Neigungen der Wald- gegenüber den Freilandflächen liegen (vgl. Kap 4.2.2). Es ist allgemein bekannt, dass im Laufe der Besiedlung die Hangneigung als wichtigster Einflussfaktor, daneben aber auch weitere Parameter wie Höhenlage oder Exposition einen bedeutenden Einfluss auf die Verteilung von Wald und Freiland hatten.

Geht man davon aus, dass Wurzeln als Bewehrung des Bodens einen wesentlichen Beitrag zur Hangstabilität leisten, kommt dem Wald eine grosse Rolle zu. Gemäss den vorliegenden Ergebnissen ist das Vorkommen von Hauptwurzeln (Durchmesser > 2 mm) im Wald wesentlich häufiger als im Freiland (Wald: bei 94% der Rutschungen, Freiland: bei 23% der Rutschungen). Die Hauptwurzeln reichen im Verhältnis zur Bodenmächtigkeit im Wald in ungefähr die gleichen Profiltiefen wie im Freiland. Die Intensität der Durchwurzelung mit Hauptwurzeln wurde zwar nicht quantitativ erhoben, wird jedoch gemäss den Beobachtungen während der Erhebungen im Wald als intensiver eingeschätzt.

Die Auswertungen zu den Rutschvolumina zeigen, dass in den beiden Gebieten Napf und Appenzell jeweils die Waldrutschungen kleiner waren als die Freilandrutschungen. Dies steht im Gegensatz zu den Unwetterereignissen von Sachseln, wo die Waldrutschungen im Vergleich zu den Freilandrutschungen grösser waren.

Obwohl anhand der vorliegenden Daten nicht explizit quantifizierbar, weisen doch verschiedene Aspekte auf eine insgesamt positive Wirkung der Waldvegetation auf die Hangstabilität im Zusammenhang mit oberflächennahen Rutschungen hin. Dazu gehören neben den deutlich höheren Neigungen der Waldrutschungen und der stärkeren Durchwurzelung mit groben Wurzeln in den Ge-

bieten Napf und Appenzell auch die Ergebnisse von SachseIn, wonach auf vergleichbaren Standorten (bezüglich Neigung, Niederschlagsintensität, usw.) im Wald weniger Rutschvolumen pro Flächeneinheit in Bewegung geriet als im Freiland. Eine positive Waldwirkung kann im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen zum Beispiel mit einer um einige Neigungsgrade gegenüber dem Freiland erhöhten Minimalneigung für die Entstehung von spontanen Rutschungen berücksichtigt werden.

5.4.6 Nutzung des Freilandes, Zustand des Waldes

Inwiefern sich die Nutzung des Freilandes sowie der Zustand des Waldes auf die Rutschaktivität auswirkten, war nicht hauptsächlicher Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Deshalb wurden die entsprechenden (aufwändig zu erarbeitenden) Grundlagen zu den Untersuchungsgebieten (d.h. flächendeckende Zustandkartierungen) nicht erhoben. Obwohl keine quantitativen Aussagen zum Einfluss des Vegetationszustandes möglich sind, werden im Folgenden dennoch einige qualitative Angaben gemacht und die bei den Rutschungen vorgefundenen Verhältnisse und Beobachtungen diskutiert.

Im Freiland traten Rutschungen in beweideten Flächen deutlich häufiger auf als in regelmässig gemähten Wiesen. Beweidete Flächen sind meist steil, schlecht zugänglich oder vernässt und werden deshalb extensiv genutzt. Der Grund für die grosse Rutschaktivität in beweideten Flächen dürfte hauptsächlich in der Steilheit der Gebiete zu suchen sein.

Durch die intensive und ausschliessliche Beweidung steiler Landwirtschaftsflächen entstehen oft ausgeprägte hangparallele Trittbermen mit oberflächlichen Verdichtungserscheinungen (Abbildung 5.1). Auf den horizontalen Trittf lächen fehlt die Grasnarbe oder sie ist durch das Begehen von Weidevieh stark verletzt. Häufig beobachtet wurde, dass die Anrisslinie einer Rutschung entlang dieser Trittbermen verläuft. Inwiefern die Beweidung und deren Folgen wie Trittschäden an der Grasnarbe, Bermenbildung und Verdichtung eine Rolle bei Rutschvorgängen spielen, bedarf weiterer Abklärung. Im Zusammenhang mit Bermen ist auch die Frage zu untersuchen, welcher Einfluss stärker zu gewichten ist: der Wasserrückhalt durch die Bermen und damit eine allenfalls verstärkte Infiltration, oder die lokale Verdichtung, welche die Durchlässigkeit und damit die Infiltrationskapazität herabsetzt.



Abbildung 5.1: Stehendes Wasser in Trittbermen.

Im Wald sind die Altersstruktur, Entwicklungsstufe, Häufigkeit von Verjüngungsflächen und die Dichte der Bestockungen ein Mass für die Bewirtschaftung und Pflege der Bestände. Deutliche Hinweise auf eine extensive Bewirtschaftung geben im Untersuchungsgebiet Appenzell einerseits die bei 70% der Rutschungen vorgefundenen Bestände mit mehr als 40 cm Brusthöhendurchmesser und andererseits die bei mehr als 40% der Rutschungen vorgefundenen Bestockungen mit gedrängtem Kronenschluss. Die Bestände im Gebiet Napf wurden im Hinblick auf ein ideales Plentergleichgewicht mit guter Struktur und ausreichend Verjüngung als zu starkholzreich und zu dunkel beurteilt. Diese Aussagen leiten sich zwar nur von der Bestandesansprache in der unmittelbaren Umgebung der Rutschungen ab, decken sich aber mit weiteren Beobachtungen während der Erhebungen und Aussagen von Privatwaldbesitzern, welche bei den heutigen Holzpreis-Aufwand-Relationen kein Interesse an der Waldbewirtschaftung haben.

An vielen Orten besteht im Fall von fehlenden minimalen Pflegemassnahmen die Gefahr, dass die nachhaltige Stabilität der Bestände gegenüber Naturereignissen wie Sturm, Schneebruch usw. längerfristig abnimmt. Eine weitere Folge sind zunehmende Bestandesvorräte und abnehmende Verjüngung. Die Ergebnisse der Untersuchung Sachseln zeigen, dass auf Flächen mit ausgedehnten Bestandesschäden die Hangstabilität in Bezug auf oberflächennahe Rutschungen reduziert ist. Sowohl aufgrund der grösseren Vorräte als auch der geringeren Stabilität ungepflegter Bestände und der erhöhten Rutschanfälligkeit im Fall von Bestandesschäden besteht die Gefahr, dass entlang von Gerinnen zunehmend grössere Totholzmassen bereitgestellt werden. Das Totholz kann in die Gerinne gelangen und dort als Schwemmholz gefährliche Auswirkungen haben (Abbildung 5.2). Diese Zusammenhänge sollen im Rahmen eines Forschungsprojektes zum Einfluss ufernäher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen näher untersucht und quantifiziert werden (Forschungsprojekt WSL im Auftrag des BUWAL).



Abbildung 5.2: Links: Zusammen mit Rutschmaterial verlagerte Baumstämme und Windwurfholz im Gebiet Napf; rechts: Verkläuserung durch Schwemmholz im Moosbach, Appenzell.

Im Gebiet Napf sind die traditionell im Plenterbetrieb bewirtschafteten Wälder vor drei Jahren stark durch Lothar in Mitleidenschaft gezogen worden. Die zahlreichen Sturmflächen sowie auch die kleineren Lücken waren zum Zeitpunkt der Aufnahmen noch nicht neu bestockt. Es ist denkbar, dass geworfene Stämme durch die aufgerissene Bodendecke potentielle Anrisszonen für Rutsch- und Erosionsprozesse bilden. Dies wird durch die Beobachtung gestützt, dass bei zahlreichen Rutschungen im Rahmen der Feldaufnahmen Lotharschäden zu finden sind. Direkte Zusammenhänge sind jedoch schwer nachzuweisen.

Wie erwähnt, wurden im Rahmen der Untersuchung Sachseln auf ehemaligen Sturm- und Borkenkäferflächen eine deutlich erhöhte Rutschaktivität festgestellt. Dies wurde namentlich mit dem Vermorschen der Wurzeln (und damit dem Wegfallen der armierenden Wirkung der Wurzeln) einige Jahre nach dem Sturmereignis begründet. Im Fall der Unwetter 2002 dürfte dieser Zusammenhang bei gebrochenen Bäumen (Wurzeln intakt) jedoch nicht von Bedeutung sein, da zwischen Lothar vom Dezember 1999 und den Unwetterereignissen nur 2.5 Jahre liegen. Bei Bäumen, welche mitsamt den Wurzeln geworfen wurden, ist es jedoch durchaus möglich (aufgrund der vorliegenden Daten jedoch nicht nachweis- oder quantifizierbar), dass die fehlende Bodenarmierung einen Einfluss auf die Hangstabilität ausübte.

Aus der vorliegenden Untersuchung können keine gesicherten Erkenntnisse zum Einfluss des Zustandes der Vegetation auf die Hangstabilität abgeleitet werden, die sich direkt bei der Beurteilung der Gefahr von oberflächennahen Rutschungen anwenden lassen. Verschiedene Beobachtungen im Verlauf der Felderhebungen stimmen jedoch mit den Ergebnissen der Untersuchung von Sachseln überein, wonach die Rutschaktivität im Wald auf Schadenflächen und im Freiland auf intensiv beweideten Flächen besonders gross war.

5.4.7 Hydrologie

Die Beurteilung der hydrologischen Verhältnisse in der Umgebung der Rutschungen ergab, dass nur gerade 5% der Rutschungen auf vernässten Standorten entstanden sind. Dies entspricht auch den Beobachtungen in Sachseln.

Bei spontanen oberflächennahen Rutschprozessen kann die Vernässung des Standortes bei Gefahrenbeurteilungen nicht als alleiniges Kriterium für eine erhöhte Rutschungsanfälligkeit dienen. Auch auf nicht vernässten Standorten sind Rutschungen zu erwarten. Vernässte Standorte sind jedoch besonders kritisch zu beurteilen.

5.4.8 Hydrogeologie und Hangwasser

Die Wasserführung auf der Gleitfläche wurde mit grossem zeitlichen Abstand (d.h. bis zu vier Monate nach den Unwetterereignissen) beurteilt. Die Witterungs- und Bodenwasserverhältnisse entsprachen also nicht jenen während der Unwetter. Dass die Wasserführung in Abhängigkeit der aktuellen Witterung stark variieren kann, zeigte sich bei einigen Rutschungen, welche zu verschiedenen Zeitpunkten aufgesucht wurden. Die Beurteilung der Wasserführung im Rahmen der Felderhebungen kann nur bedingt Rückschlüsse auf die Wasserführung während Extremereignissen liefern.

In 50% der Rutschungen konnten bei den Felderhebungen keine Merkmale von Wasserführung auf der Gleitfläche gefunden werden. Nur in etwa einem Fünftel der Rutschungen wurde eine grosse Wasserführung beobachtet (Kriterien: vgl. Anleitung zum Aufnahmeformular im Anhang). Dies steht im Gegensatz zur Annahme, dass während der Unwetter in vielen der betroffenen Böden erhebliche laterale Sickerströmungen stattgefunden haben müssen, welche (neben der Aufsättigung des Bodens durch infiltrierendes Wasser) mitverantwortlich waren für die Rutschauslösung. Das verbreitete Vorkommen von Makroporen in den Böden (vgl. Kapitel 5.4.11) zeigt, dass schnelle und umfangreiche Wasserflüsse grundsätzlich möglich sind.

Die Faktoren Hydrogeologie und Hangwasser sind bei einer Gefahrenbeurteilung schwierig anzuwenden. Einerseits, weil in den zu beurteilenden Gebieten in der Regel zu wenig Aufschlüsse zur Beurteilung der Hangwasserverhältnisse bestehen. 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.

5.4.9 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Geländeformen wie Rutschnischen und buckelförmige Ablagerungen, rezente Anrisszonen oder auch die Vegetation (Säbelwuchs, Schiefstand) dienen als Hinweise auf alte Rutsch- und Kriechbewegungen. Während diese Anzeichen im Wald leicht zu erkennen sind, werden im Freiland Rutschungen rasch wieder verbaut und langlebige Pflanzen mit Ausnahme von Obstbäumen sind selten. Wichtige Hinweise - welche in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht systematisch berücksichtigt wurden - können auch überlieferte Informationen von Vorfahren der Grundstückbesitzer sein, wie dies in Appenzell an einzelnen Beispielen durch die Aussage: „es hat hier schon immer Rutschungen gegeben“ deutlich der Fall war.

Mit Ausnahme von zwei Freilandrutschungen waren überall Anzeichen erkennbar (98%), in 120 von 133 Fällen (90%) sogar markante Anzeichen. Häufigster und bester Anhaltspunkt für frühere Rutschbewegungen war die Geländeform. Zweithäufigstes Merkmal waren rezente Anrisse, vorwiegend im Napfgebiet. Säbelwuchs bei Bäumen wurde nur in zwei Fällen beobachtet. Auch bei den Untersuchungen in Sachseln wurden häufig Anzeichen alter Rutschbewegungen beobachtet, allerdings nicht so oft wie in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell (in 21% der Flächen gesicherte, in 46% vermutete Anzeichen).

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung weisen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Untersuchung Sachseln auf eine grosse Bedeutung der Berücksichtigung von Anzeichen alter Rutschbewegungen bei der Beurteilung und Erkennung potentiell gefährlicher Gebiete hin.

5.4.10 Geologie

Das Untersuchungsgebiet Napf liegt in der Oberen Süsswassermolasse mit den vorherrschenden Gesteinen Nagelfluh, Wechsellagerungen Nagelfluh/Sandstein und Nagelfluh/Mergel. Das Gebiet Appenzell liegt in der Unteren Süsswassermolasse mit Sandsteinen, Mergeln und entsprechenden Wechsellagerungen als dominierende Gesteine. Moräne kommt in geringem Mass nur im Perimeter Appenzell vor. Im grössten Teil der Rutschflächen wurde der Fels freigelegt. Diese Tatsache weist darauf hin, dass die Lockergesteinsüberdeckung in den beiden Untersuchungsgebieten allgemein gering ist. Rutschungen, bei denen Nagelfluh beobachtet wurde, sind in deutlich grösseren Hangneigungen angebrochen als Rutschungen, wo Sandstein und Mergel vorkommt.

Für die beiden Untersuchungsgebiete liegt leider keine detaillierte geologische Kartierung vor, aus der die Flächenanteile der in Tabelle 4.10 aufgeführten Gesteine hervorgehen. Eine Auswertung zum Einfluss der Gesteine auf die Rutschaktivität (Anzahl Rutschungen mit bestimmtem Festgestein bezogen auf den Flächenanteil dieses Festgesteins im Untersuchungsperimeter) konnte deshalb nicht durchgeführt werden.

Die geologischen Verhältnisse von Sachseln (Helvetikum; Wildhorn-Drusbergdecke) lassen sich nicht mit jenen der Gebiete Napf und Appenzell vergleichen. Allerdings wurde anlässlich der Untersuchungen von Sachseln festgestellt, dass die Drusbergschichten und Amdenermergel besonders stark von Rutschungen betroffen waren und dass bei diesen mergeligen Gesteinen oftmals eine Verwitterungsschicht entsteht, die ungünstige geotechnische Eigenschaften aufweist. Übertragen auf die Gebiete Napf und Appenzell könnte deshalb davon ausgegangen werden, dass die Mergelschichten in den Wechsellagerungen besonders kritisch bezüglich Hangstabilität sind, was sich auch aus bodenmechanischer Sicht erklären lässt. Leider lassen sich - wie oben bereits erwähnt - bei geologischen Einheiten, welche aus Wechsellagerungen bestehen, nur mit grossem Aufwand Aussagen machen, wo und in welchem Mass die eher günstigen Nagelfluh- oder Sandsteinschichten anstehen bzw. wo sich die ungünstigen Mergelschichten befinden. Die örtliche Variabilität der Gesteine stellt deshalb in Bezug auf die Gefahrenbeurteilung ein wesentliches Problem dar.

Die verbreitete (und in Sachseln bestätigte) Vermutung, wonach bei übereinstimmender Hang- und Schichtorientierung aufgrund der vorgegebenen Gleitfläche besonders kritische Verhältnisse vorzufinden sind, konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht untersucht werden (Schicht-

orientierung wurde nicht erfasst). Immerhin weisen einige zum Teil spektakuläre Fälle (insbesondere im Gebiet Appenzell) durchaus auf einen derartigen Zusammenhang hin.

Der Einfluss der Lockergesteinseigenschaften auf die oberflächennahen Rutschprozesse konnte nicht quantifiziert werden, da die räumliche Verteilung der verschiedenen Lockergesteine in den Untersuchungsgebieten nicht kartiert ist. Im Rahmen der Untersuchung von Sachseln wurde ein geringer Einfluss der Festgesteinsunterlage auf die Art der darüber liegenden Lockergesteine festgestellt. Dies ist in der vorliegenden Untersuchung nicht der Fall; im Napfgebiet (nagelfluhreicht) kommen siltige Kiese und siltige Sande vor, während im Perimeter Appenzell (keine Nagelfluh) praktisch nur siltige Sande vorkommen. Der Scherwinkel siltiger Kiese ist gemäss SN 670 010b (Bodenkennziffern) jedoch nur wenig höher als der Scherwinkel siltiger Sande und damit dürften sich die Stabilitätseigenschaften der beiden Bodenmaterialien - mindestens was die Aussagemöglichkeiten im Rahmen von flächenhaften Gefahrenbeurteilungen betrifft - nicht grundsätzlich unterscheiden.

Die geologischen Verhältnisse, d.h. insbesondere die Eigenschaften der Locker- und Festgesteine üben aus bodenmechanischen Überlegungen einen entscheidenden Einfluss auf die Hangstabilität im Fall von oberflächennahen Rutschungen aus. Diese Aussage kann zwar aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht in quantitativer Form bekräftigt werden. Die Beobachtungen bei den Rutschungen der Unwetter 2002 weisen jedoch in die gleiche Richtung. Es ist naheliegend, dass – wo Kenntnisse über die Locker- und Festgesteine zur Verfügung stehen – diese bei einer Gefahrenbeurteilung einzubeziehen sind. Allerdings fehlen leider die entsprechenden Grundlagen in ausreichendem Detaillierungsgrad in den meisten Fällen.

5.4.11 Böden

Entwicklung

Die Bodenprofile in den Rutschanrissen wurden den entwickelten Böden, den Rohböden oder den ständig wasserbeeinflussten Nassböden zugeordnet. Nahezu 70% aller Rutschungen ereigneten sich auf entwickelten Böden. Etwa ein Viertel der Rutschungen entstanden auf Rohböden, welche im Napfgebiet gleich stark vertreten waren wie die entwickelten Böden. Nassböden unter ständigem Stau- oder Hangwassereinfluss sind selten. Im Zusammenhang mit Gefahrenbeurteilungen zeigt sich (wie auch bereits bei der Hydrologie und der Wasserführung in der Rutschfläche), dass die Vernässung kein wesentliches Kriterium ist, um Rückschlüsse auf ein erhöhtes Rutschrisiko zu ziehen. Die Ergebnisse der Untersuchung von Sachseln zeigen, dass dort bei den Rutschungen die Verhältnisse eher umgekehrt sind, d.h. die entwickelten Böden gegenüber den Rohböden stark untervertreten sind. Da keine detaillierten Bodenkarten zur Verfügung stehen, kann der Einfluss der Bodenentwicklung auf das Rutschgeschehen nicht quantifiziert werden.

Die Resultate zur Bodenentwicklung zeigen, dass Rutschungen in allen Kategorien der Bodenentwicklung vorkommen können. Somit ist dieser Faktor für Gefahrenbeurteilungen eher von untergeordneter Bedeutung.

Makroporen

Wie oben erwähnt, wurden nur wenige Rutschungen auf vernässten Standorten einerseits und mit Wasseraustritten in der Rutschfläche andererseits beobachtet. Das Wasser, welches letztlich zur Auslösung der Rutschbewegung führte, musste also im Verlauf der Gewitterniederschläge (wenige Stunden) in den Boden infiltrieren bzw. lateral herangeführt und den Boden an der betreffenden Stelle sättigen können, damit es zum Bruch kam. Dabei sind Makroporen wie Wurmgänge, Wurzelkanäle, Risse und Spalten sowie grössere Hohlräume wie Mausgänge von besonderer Bedeutung. Die Tatsache, dass bei mehr als 90% der beurteilten Bodenprofile Makroporen vorkommen, zeigt, dass eine schnelle Infiltration der Niederschläge und Sättigung der Böden in den beiden Untersuchungsgebieten durchaus möglich war. Die Bedeutung der Makroporen wird auch durch die Beobachtung bestätigt, dass die Makroporen (insbesondere Wurmlöcher und alte Wurzelkanäle) oft stark ausgewaschen sind. Mit Ausnahme einzelner Wurzelkanäle fehlten Makroporen in den stark gehemmt durchlässigen Bodenschichten.

Die Makroporen dringen grösstenteils (70%) bis in den Bereich des Gleithorizontes vor. Nur bei wenigen Rutschungen wurden Makroporen beobachtet, welche sogar bis unter den Gleithorizont reichen (vorwiegend Wurzelkanäle). Wurmgänge, Risse und Spalten gehen kaum oder nur selten tiefer als bis zur Gleitfläche. Bei 24 Rutschungen reichten die Makroporen weniger tief als bis zur Gleitfläche. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass in den meisten der untersuchten Bodenprofile der schnelle Wasserfluss in Makroporen bis in den kritischen Bereich der Bruchzone möglich war. Viele Anrisszonen wiesen zum Zeitpunkt der Aufnahme zudem eine lockere Bodenstruktur auf. Dies zeigte sich besonders deutlich beim Graben des Bodenprofils im Anriss. Sandige Profile waren extrem locker, siltige und tonreichere Böden zeigten deutlich plattige bis brockige Gefüge.

Durchwurzelung

Die Erhebungen zum Hauptwurzelraum zeigen, dass die Waldböden intensiver durchwurzelt sind als Freilandböden. Falls davon ausgegangen wird, dass Wurzeln zur Hangstabilität beitragen, ist dieses Resultat ein Hinweis auf eine positive, stabilisierende Wirkung der Waldvegetation. Allerdings ist die Wirkung von Wurzeln als Armierung des Lockergesteins nur möglich, falls der Wurzelhorizont mindestens so mächtig ist wie die Mächtigkeit der Rutschung bzw. falls die Wurzeln den Bereich der Gleitfläche durchdringen.

Durchlässigkeit

Die Böden – insbesondere die obersten Bodenhorizonte – sind in den beiden Untersuchungsgebieten im Allgemeinen gut wasserdurchlässig. Dies trifft besonders zu für die siltigen Sande in beiden Perimetern und für die siltigen Kiese im Napfgebiet. Vielfach ist jedoch im Profil von der Bodenoberfläche bis zur Gleitfläche eine mehr oder weniger starke Abnahme der Durchlässigkeit (Durchlässigkeitsgradient) festzustellen. Zonen mit verringerter Durchlässigkeit sind an Oxidations- und Reduktionsprozessen oder an Verlagerungs- und Anreicherungszone von Ton erkennbar. Im Übergang vom Oberboden zum Verwitterungshorizont ist die Durchlässigkeit meist normal bis übermässig durchlässig und nur in wenigen Fällen verschlechtert sich die Durchlässigkeit um eine

oder mehrere Stufen. Durchlässigkeitsgradienten sind stärker und häufiger innerhalb der verschiedenen Bereiche der Verwitterungshorizonte oder in den Übergangshorizonten zwischen Verwitterungshorizont und Ausgangsgestein. Spätestens beim Übergang vom Lockergestein zum Festgestein, welches bei 99 Rutschungen (77%) die Gleitfläche bildet, tritt ein eigentlicher Stauhorizont auf. Auf Grund dieser häufigen Konstellation muss angenommen werden, dass während der Niederschlagsereignisse sehr viel Wasser in die Böden infiltrieren konnte und es aufgrund der geringeren Durchlässigkeit im Bereich der Gleitflächen zu einem Aufstau des Wassers und im Folgenden zu einer Sättigung des gesamten Bodenprofils und zum Aufbau entsprechender Sickerströmungsdrücke kam.

Bei Gefahrenbeurteilungen sind gut durchlässige Böden auf stark gehemmt durchlässigen bis undurchlässigen Ausgangsmaterialien und ausreichend grosser Hangneigung für die Hangstabilität als sehr kritisch zu beurteilen.

5.5 Bodenmechanik

In den Untersuchungsgebieten wurden bei sieben Rutschungen insgesamt acht Lockergesteinsproben aus dem Bereich der Gleitfläche der Rutschungen entnommen. Die Analyse der Proben im Labor ermöglichte die Klassifikation der Lockergesteine und die Herleitung wichtiger Bodenkennwerte, welche zur Durchführung einfacher bodenmechanischer Modellbetrachtungen dienen.

Bei Gefahrenbeurteilungen ist die vollständige Sättigung der Böden mit Niederschlagswasser als wichtiges Szenario zu berücksichtigen. Nach dem Modell der unendlich langen Böschung (in Böll 1997) sind bei vollständiger Sättigung der Böden Hänge mit Neigungen von weniger als 12 bis 20° (je nach Bodenmaterial; kritische Hangneigung ohne Berücksichtigung der Kohäsion α_{krit}) als ausreichend sicher zu beurteilen. Wird eine Kohäsion berücksichtigt, liegen die entsprechenden kritischen Hangneigungen $\alpha_{\text{krit,c}}$ in einem Bereich von 28 bis 33°. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass in Extremfällen auch bei kohäsiven Böden die Kohäsion auf Null absinken kann. Damit ist das Eintreten von Rutschungen bei Neigungen zwischen α_{krit} und $\alpha_{\text{krit,c}}$ zwar selten, aber dennoch möglich.

In Bezug auf Gefahrenbeurteilungen sind die bodenmechanischen Eigenschaften der Lockergesteine von grosser Bedeutung. Lassen sich in einem zu untersuchenden Gebiet die Lockergesteine klassieren, können die oben erwähnten kritischen Hangneigungen (α_{krit} und $\alpha_{\text{krit,c}}$) ermittelt werden. Es ist nun zu diskutieren, ob sich derartige Werte verwenden lassen für die Definition von Grenzen der Eintretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen.

5.6 Rutschmechanismen – Abfliessvorgang

Die Bewegungsform der Rutschungen wurde in den meisten Fällen als Translation mit Gleitfläche auf der Felsoberfläche beurteilt. Bei den nur vereinzelt aufgetretenen Rotationsrutschungen verlief die Gleitfläche zur Hauptsache innerhalb des Lockergesteins. Die diesbezüglichen Ergebnisse der

Untersuchung Sachseln weichen davon ab, indem sich dort immerhin knapp 50% der Rutschungen rotationsförmig bewegten. Diese Unterschiede sind teilweise darauf zurückzuführen, dass die Lockergesteinsdecke in den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell im Durchschnitt geringmächtiger ist als im Untersuchungsgebiet Sachseln. Dies dürfte unter anderem damit zusammenhängen, dass aufgrund der grösseren Höhendifferenzen und längeren Transportdistanzen in Sachseln mächtigere Lockergesteinsauflagen (insbes. Gehängeschutt) aufgebaut werden konnten. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass die Analyse der Bewegungsform (Translation bzw. Rotation) im Zusammenhang mit Gefahrenbeurteilungen wesentlich weniger von Bedeutung ist als beispielsweise die Fragen, welcher Anteil der Rutschmasse murgangförmig abfließt und wie lang die Fliessstrecke ist.

Beim grössten Teil der Rutschungen verblieb weniger als 30% des Rutschvolumens in Verbindung mit der Gleitfläche, d.h. ein grosser Teil floss murgangförmig ab. Dieser Sachverhalt wurde auch in Sachseln festgestellt. In den Untersuchungsgebieten Napf und Appenzell konnte zudem eine Tendenz zu intensiverer Verlagerung bzw. umfassenderem Abtransport der Rutschmassen in steileren Lagen beobachtet werden.

Im Zusammenhang mit Gefahrenbeurteilungen ist neben der Lokalisierung rutschgefährdeter Gebiete insbesondere auch die Frage von Bedeutung, bis in welche Distanz zum Entstehungsort die Rutschmassen abfliessen und dort Leben und Sachwerte gefährden können. Dies ist insbesondere auch deshalb wichtig, da bei den Ereignissen 2002 nur in Einzelfällen das Rutschmaterial nicht murgangförmig abfloss bzw. im Kontakt zur Gleitfläche blieb. Deshalb wurde für die Rutschungen in den Gebieten Appenzell und Napf die Auslaufstrecke und das Pauschalgefälle bestimmt. Es ergab sich eine grosse Bandbreite der Auslaufstrecken (8 bis 150 m) und der Pauschalgefälle (17 bis 48°). Bei Gefahrenbeurteilungen sind aus naheliegenden Gründen die längsten Auslaufstrecken und die flachsten Pauschalgefälle relevant: bei über 90 % der Rutschungen, bei denen die Fliessstrecke vollständig einsehbar und nicht durch Hindernisse beeinflusst war (N=38), betrugen die Auslaufstrecken weniger als 80 m und die Pauschalgefälle mehr als 20°.

Durch welche Einflussgrössen das Pauschalgefälle beeinflusst wird, konnte nur im Ansatz untersucht werden, da lediglich bei 38 Rutschungen die Fliessstrecke vollständig einsehbar war. Die sehr vorsichtig zu interpretierenden Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Hangneigung bei den Rutschungen das Pauschalgefälle zunimmt und mit zunehmendem Volumen abnimmt. Gemäss den vorliegenden Daten besteht offenbar kein Einfluss der Art des Lockergesteins oder der Geländeform auf das Pauschalgefälle. Leider sind anlässlich der Untersuchung der oberflächennahen Rutschungen in Sachseln in diesem Zusammenhang keine Daten erhoben worden. Diese Zusammenhänge sind anhand weiterer Untersuchungen zu überprüfen und zu ergänzen.

6 Zusammenfassung

Im Sommer 2002 fanden in den Regionen Napf und Appenzell schwere Unwetter mit intensiven Hangprozessen statt. Im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG untersuchte die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft in ausgewählten Untersuchungsgebieten die oberflächennahen Rutschprozesse. Das Ziel bestand darin, weiterführende Kenntnisse zu den massgebenden Einflussgrössen auf die Rutschauslösung und auf die Transportprozesse der abfliessenden Rutschmassen zu erarbeiten.

In beiden Schadengebieten wurde je ein Untersuchungsperimeter definiert, innerhalb derer die Rutschprozesse dokumentiert wurden. Im Herbst 2002 wurden insgesamt 133 Rutschungen im Feld umfassend beurteilt. Einige ausgewählte Erkenntnisse aus den vorliegenden Daten sowie Erfahrungen und Beobachtungen im Feld sind nachfolgend aufgeführt:

- Neigungen: Rutschungen ereigneten sich bei Neigungen zwischen 23 und 50°. Im Vergleich zu Sachseln war ein breiterer Neigungsbereich betroffen.
- Volumen: die Rutschungen sind klein; d.h. > 90% sind kleiner als 300 m³.
- Geländeform: viele Rutschungen entstanden in konvexen oder rinnenförmigen Lagen. Im Gegensatz zu Sachseln hat sich dieser Faktor in den Gebieten Napf und Appenzell offenbar ausgewirkt.
- Wald/Freiland: im Wald fand eine grössere Rutschaktivität als im Freiland statt; dies ist jedoch nicht auf die Vegetationswirkung sondern auf die steileren Neigungsverhältnisse im Wald zurückzuführen. Waldrutschungen sind im Mittel kleiner als Freilandrutschungen (letzteres im Gegensatz zu den Ergebnissen von Sachseln).
- Hydrologie: die meisten Rutschungen ereigneten sich auf nicht vernässten Standorten. Die Vernässung eignet sich nicht als primärer Faktor für die Identifikation von potentiellen Anrissgebieten (in Übereinstimmung mit Sachseln).
- Anzeichen: bei den meisten Rutschungen wurden Anzeichen früherer Hangbewegungen festgestellt. Bei einer Gefahrenbeurteilung sind deshalb Anzeichen (insbesondere Geländeformen wie Mulden und Buckel) von zentraler Bedeutung.
- Rutschprozess: bei der überwiegenden Anzahl der Rutschungen bildete die Felsoberfläche die Gleitfläche.
- Transport: die Rutschmassen wurden zum grössten Teil aus dem Bereich der Rutschfläche abtransportiert. Die gemessenen Pauschalgefälle liegen im Bereich zwischen 17 und 40°.
- Niederschläge: trotz der weniger intensiven Niederschläge im Gebiet Napf war dort die Rutschaktivität grösser als im Gebiet Appenzell (Bedeutung Vorregen jedoch nicht klar).
- Luftbildinterpretation: Luftbilder ergeben gute Resultate im Freiland, sind jedoch für die Identifikation und Auswertung oberflächennaher Rutschungen im Wald nicht geeignet.

Untersuchungen wie die vorliegende tragen dazu bei, das Verständnis zum Gefahrenprozess der oberflächennahen Rutschungen zu verbessern. Erweiterte Kenntnisse in diesem Zusammenhang sind dringend notwendig, um im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen präzisere Aussagen machen zu können. Die Ergebnisse des Projektes haben zwar in einigen Fragen eine Erweiterung der Kenntnisse gebracht. Allerdings muss betont werden, dass die Prognose von oberflächennahen Rutschprozessen nach wie vor schwierig ist und deshalb weitere Untersuchungen notwendig sind.

Die im Rahmen des Projektes erhobenen Daten könnten im Weiteren zur Eichung bestehender oder neuer Modelle im Bereich der Identifikation von Rutschprozessen verwendet werden. Allerdings ist im Zusammenhang mit oberflächennahen, spontanen Prozessen auf die grossen Schwierigkeiten für Modelle mit hohem Detaillierungsgrad hinzuweisen. Der Grund liegt massgeblich in der sehr kleinflächigen Variation und damit der sehr aufwändigen Erfassung der massgebenden Einflussgrössen. Die digitalen Grundlagen in der notwendigen (sehr detaillierten!) Auflösung – insbesondere auch in Bezug auf die digitalen Höhenmodelle – stehen in der Regel noch nicht zur Verfügung.

7 Literatur

- ARGE Geo7, SA+H, 2003: Unwetter im Napfgebiet vom 15./16. Juli 2002 – Ereignisdokumentation im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG), Biel sowie des Tiefbauamtes des Kantons Bern, 24 S.
- AGN (Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren), 2000: Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999. Bull. Angew. Geol., 5: 3-152.
- 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.
- Böll, A., 1997: Wildbach- und Hangverbau. Ber. Eidg. Forschungsanst. Wald Schnee Landsch. 343: 123 S.
- 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. + Anh.
- Eugster, M., 2003: Die Unwetter vom August / September 2002 im Kanton Appenzell Ausserrhoden. Beitrag FAN-Forum 2003, 6 S.
- Fazarinc, R., Mikos, M., 1992: Feststoffmobilisierung als Folge der extremen Niederschläge in Slowenien. Proc. Int. Symp. Interpraevent 1992, Bern, Vol. 1: 377-388.
- Geiger, H., Zeller, J., Röthlisberger, G., 1991: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes, Bd.7. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Ingenieure Bart AG, 2002: Unwetter 31.8./1.9.2002 - Kartierung der Gerinneprozesse im Gebiet Appenzell (Ereigniskarte 1:10'000, unveröff.).
- Jahn, J., 1991: Ursachenanalyse Hochwasser, Teilprojekt Oberflächenerosion. In: Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4: 67-70.
- Kienholz, H., Kläy, M., Mani, P., 1988: Naturgefahren an der Rigi-Nordlehne. Mitteilungen der naturforschenden Gesellschaft Luzern, 30: 309-321.
- 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.

- 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., Schoger, H., 1989: Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. Wildbach- und Lawinenverbau, 53/110: 1-22.
- 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.
- Röthlisberger, G., 1991: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. "wasser, energie, luft", 83 3/4: 65-70.
- 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.
- Tergeso AG, 2003: Der Niederschlag beim Unwetter vom 31.8. bis 1.9.2002 im Raum Appenzellerland. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG), Biel. 21 S. (unveröff.)
- Tergeso AG, 2002: Starkniederschlag am 15.-16. Juli 2002 im Napfgebiet. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG), Biel. 8 S. (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.
- 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.
- Wegmüller, A., 2003: Wetterwarnungen vor und nach einem Ereignis – Erfahrungen einer Einsatzorganisation. Zusammenfassung Referat FAN-Forum 2003, 7 S.
- 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.).

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 Karten

Geologische Generalkarte der Schweiz 1:200'000: Blatt 2 Basel-Bern, 1942. Hrsg: Geologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.

Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000: Blatt 23 (St. Gallen – Appenzell, 1949) und Blatt 45 (Rorschach, 1964). Hrsg: Geologische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft.

Anhang

1	Untersuchungsgebiete	78
2	Aufnahmeformular	80
3	Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular	82
4	Ergänzende Angaben zur Aufnahmemethode	88
4.1	<i>Kriterien für den Entscheid zur Aufnahme einer Rutschung.....</i>	<i>88</i>
4.2	<i>Beurteilungsräume</i>	<i>89</i>
4.3	<i>Ergänzungen, Bemerkungen und Illustrationen zum Erhebungsformular</i>	<i>90</i>
4.3.1	Koordinaten	90
4.3.2	Rutschkomplexe – mehrere nahe beieinander liegende Rutschungen.....	90
4.3.3	Hydrologie.....	90
4.3.4	Geomorphologie	91
4.3.5	Anzeichen alter Rutschbewegungen	91
4.3.6	Vegetation /Nutzung	92
4.3.7	Mögliche Beeinflussung.....	93
5	Ergänzende Resultate.....	94

1 Untersuchungsgebiete

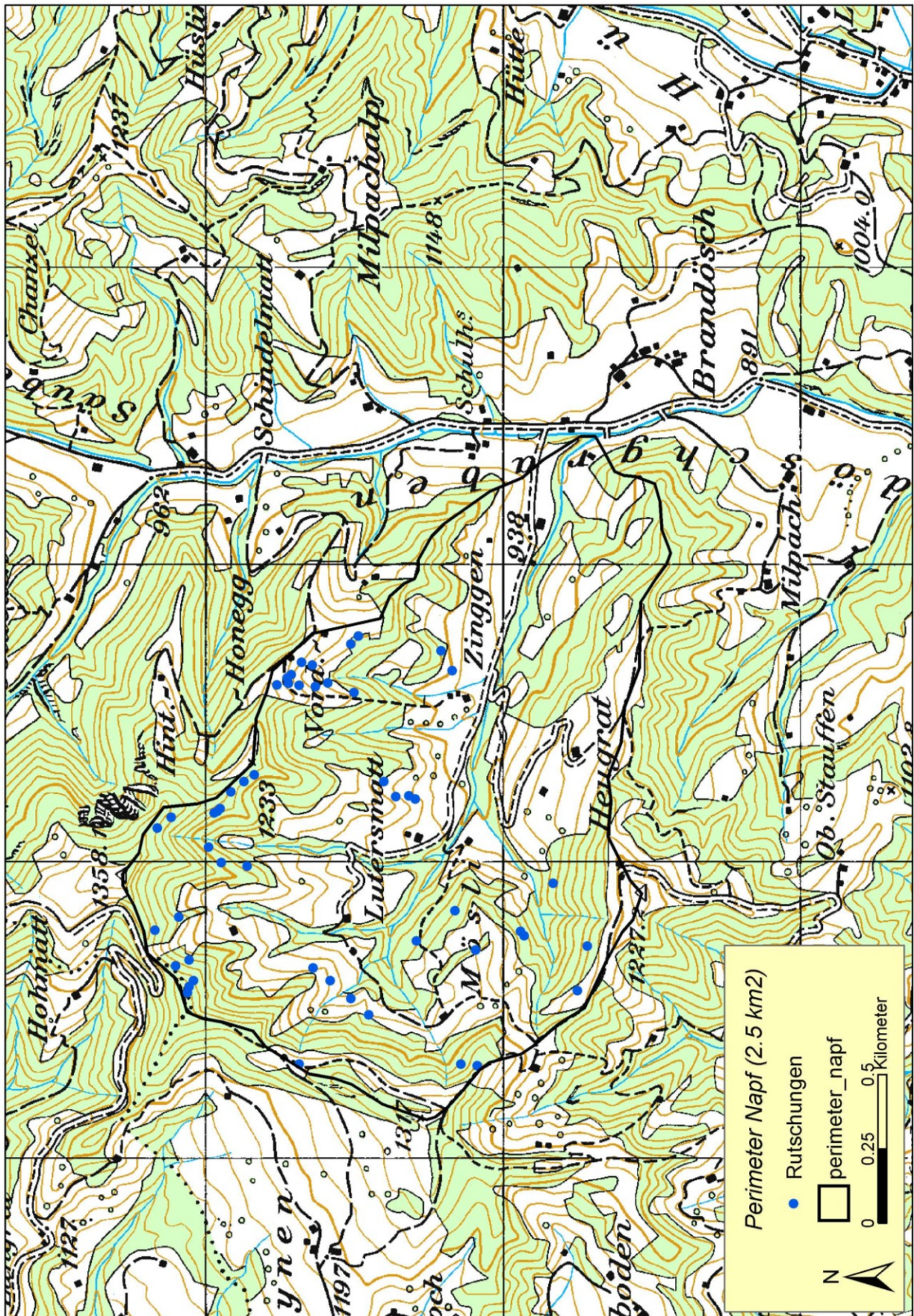


Abbildung A.1: Untersuchungsgebiet Napf.

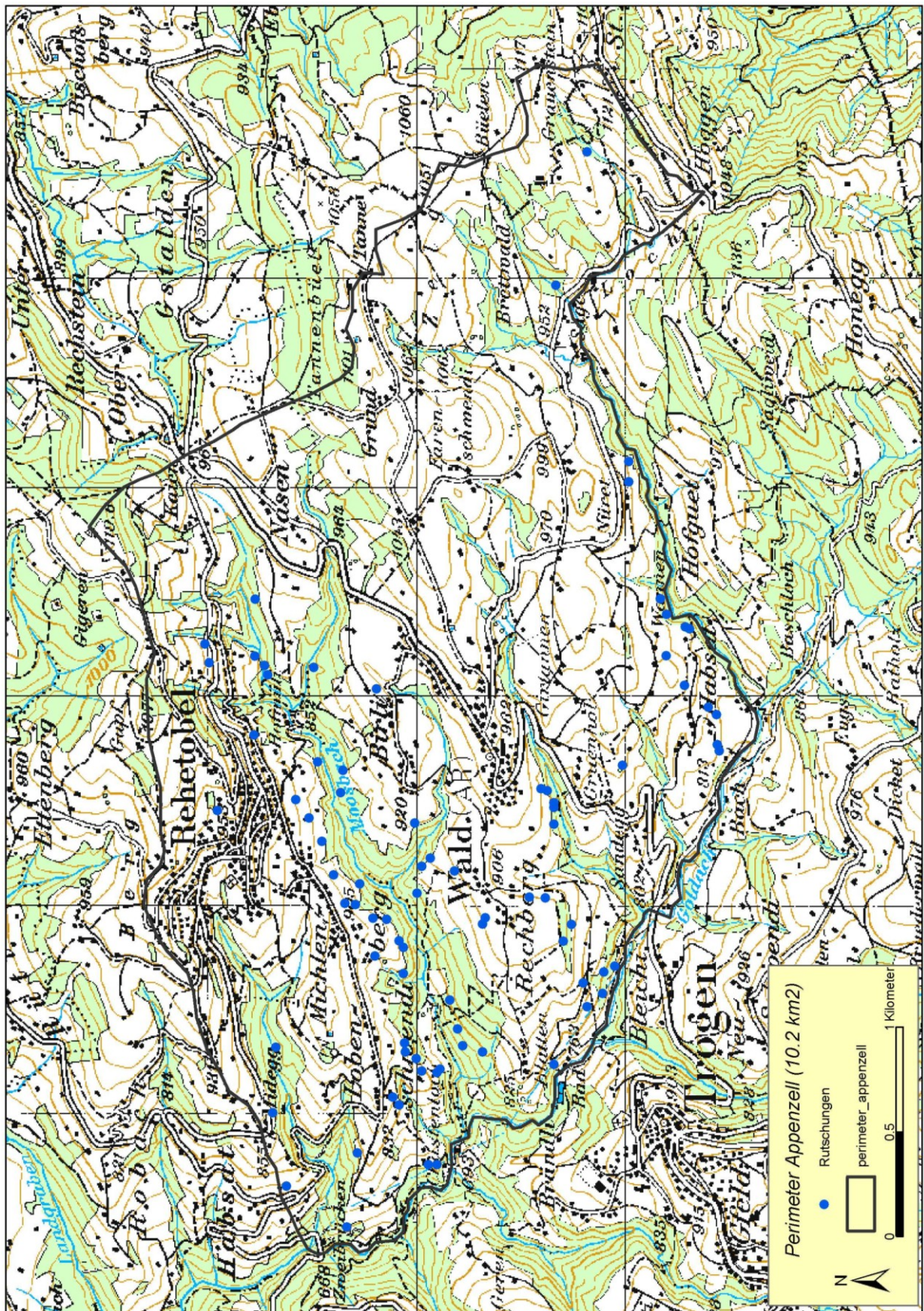


Abbildung A.2: Untersuchungsgebiet Appenzell.

2 Aufnahmeformular










Aufnahmeformular Rutschungen

14.10.2002 / Habu.

1. Grunddaten und Messungen

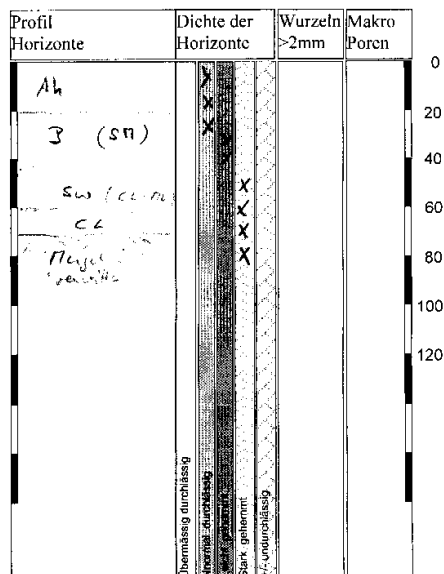
1.1 Nr. **1027** 1.2 Koord. **754672** **1252992** 1.3 Lokalname: **Oberhall**
 1.4 Exposition: **180**° 1.5 Höhe: **890** m ü.M. 1.6 Neigung Rutschfläche: **32**° oberh.: **25**°
 1.7 Länge: **14** m 1.8 Breite: **14** m 1.9 Mächtigkeit: **0,5** m 1.10 Anrisshöhe: **0,5** m
 1.11 Fläche: **12112** = **140** m² 1.12 Volumen: **140** m² x **0,4** m = **55** m³
 1.13 Massnahmen: ☒ keine ☐ verbaut ☐ andere

2. Beurteilung Rutschhang

2.1 Hydrologie: ☒ frisch/feucht ☐ nass ☐ Nässezeiger
☐
 2.2 Geomorphologie-Typ:   
  
  
 2.3 Anzeichen alter Rutschbewegungen: ☐ nein ☒ ja, ☒ markant **Nische Zuckel**
☐ nicht deutlich
 2.4 Vegetation: ☒ Freiland ☐ Wald
 2.5 Nutzung/Zustand: **Wälder (Trittbäume)**
 2.6 Mögliche Beeinflussung durch:

3. Beurteilung Rutschfläche, Profil, Mechanismus

3.1 Boden- ☐ Rohboden
 Entwicklung: ☐ entwickelter Boden
☒ Nassboden **Pseudogley**
 Makroporen: ☐ nein ☒ ja
Wenige Risse bis cm
Wenige Wurzeln bis cm
 3.2 Hauptwurzelraum: cm
 3.3 Lockergestein: **G.K. - M.L. mit Plagiokl.**
 mit:
 3.4 Festgestein: **Granit / Sandstein**
 3.5 Wasserführung: ☐ keine ☐ Anzeichen ☒ wenig ☐ viel
 3.6 Rutschmechanismus: ☒ Translation ☐ Rotation
 3.7 Materialbilanz: **60** %
 3.8 Auslaufstrecke: **45** m } bis: **Shale**
 3.9 Pauschalgefälle: **25**°
 3.10 Ort der Gleitfläche: **G.L. - Horizont**



Bemerkungen (Ursachen, besondere Beobachtungen, usw.):

Fläche im alten Rutschmulde
Anriss oberhalb Rutschfläche und links im
ganzen Hang

Film	Photo	Fotos: Sujet
4	24	v. unten
	23	Profil

Abk.: (S) Schätzung M Mächtigkeit A Anriss Gf Gleitflächenhorizont

Abbildung A.3: Beispiel eines ausgefüllten Aufnahmeformulars (Seite 1).



Abbildung A.4: Beispiel eines ausgefüllten Aufnahmeformulars (Seite 2).

3 Anleitung und Kommentar zum Aufnahmeformular

Allgemeines

Alle Rutschungen innerhalb der Perimeter „Napf“ und „Appenzell“ 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 Aufnahmeformulars eine eingeschränkte Genauigkeit.

Angaben zur den einzelnen Punkten

(Nummerierung gemäss Aufnahmeformular)

1 Grunddaten und Messungen

- 1.1 *Nummer:* 4-stellige Nummer Typ 1001, 1002, etc. Erste Ziffer für Untersuchungsperimeter (1 = Appenzell, 2 = Napf); folgende Ziffern für die laufende Nummerierung der Rutschungen.
- 1.2 *Koordinaten:* Erhebung mit GPS; falls kein Empfang im Feld: als Punkt in LK einzeichnen.
- 1.3 *Lokalnahme:* 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.
- 1.7 - 1.9 Die Vermessung der Rutschungen erfolgt gemäss Abbildung A.5, 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.

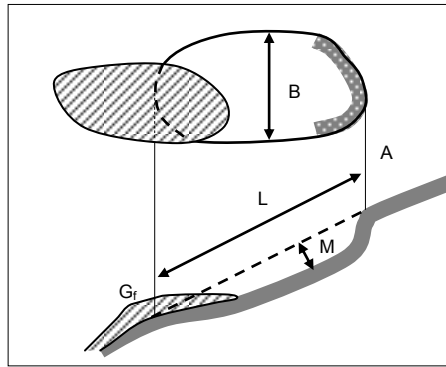


Abbildung A.5: Vermessung der Rutschungen.

L = max. Länge

B = max. Breite

M = max. Mächtigkeit

A = Anriss

Gr = Gleitflächenfront

gestrichelt: ehem. Geländeoberfläche

- 1.10 Die *Anrisshöhe* gibt die Höhe des senkrechten Rutschabrisses im Bereich des obersten Punktes einer Rutschung an. Diese Grösse dient zusammen mit den Neigungsmessungen dem Zeichnen eines möglichst realitätsnahen Längenprofils. 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, ingenieurbioologische Massnahmen usw.

2 Beurteilung Rutschhang

Die unter Punkt 2 gemachten Angaben beziehen sich auf den Rutschhang, d.h. die Umgebung der Rutschung. Im Speziellen werden die Angaben unter 2.1 (exklusiv Hangwassereinfluss/Einzugsgebiet) und 2.3 auf einer Fläche von ca. 20 x 50 m im Bereich des Rutschanrisses beurteilt. Die Angaben unter 2.2 beziehen sich auf eine Fläche von ca. 100 x 100 m mit dem Rutschanriss im Zentrum (Abbildung A.6).

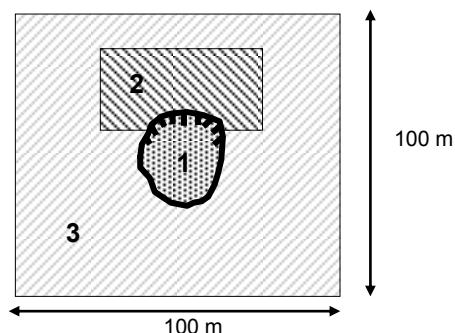
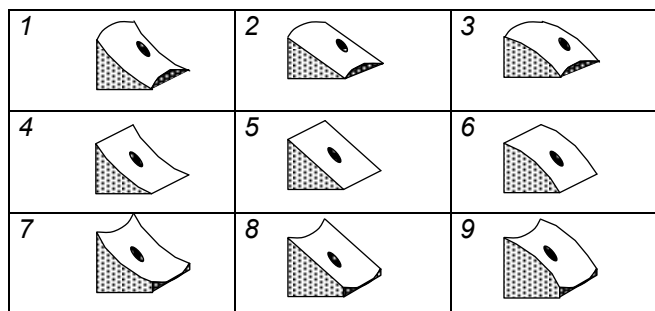


Abbildung A.6: Beurteilungsräume (1, 2, 3) bei den Rutschungen.

- 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.
- 2.2 *Geomorphologie*: Der Standort wird einem Typ in Tabelle A.1 zugeordnet. Angaben zum Mikorelief (z.B. Viehtritte können in den Bemerkungen gemacht werden. Mikorelief bezieht sich auf Geländemerkmale im Bereich 0.5 bis 1.0 m.

Tabelle A.1: Codierung der verschiedenen Geländeformen.



- 2.3 *Anzeichen alter Rutsch- oder Kriechbewegungen* werden aufgrund von morphologischen Merkmalen wie Rutschnischen und -buckel, Anrissstellen, Säbelwuchs bei Bäumen etc. beurteilt.
- 2.4 *Vegetation*: Zuordnung zu den Kategorien Wald und Freiland.
- 2.5 *Nutzung/Zustand*: Im Wald wird eine grobe Bestandesbeschreibung mittels Bestandescode durchgeführt (Tabelle A.2). Im Freiland wird die Nutzung sowie deren Intensität (Verdichtungserscheinungen?) beurteilt.

Tabelle A.2: Informationen des Bestandescodes.

Schichtung		Entwicklungsstufe	
0xxx	unbestockt	x0xx	unbestockt
1xxx	einschichtig	x1xx	Jungwuchs / Dichtung
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*: anthropogen (Leitungen, Aufschüttungen, usw.), Vegetationswechsel (Wald↔Freiland), usw.

3 Beurteilung Rutschfläche, Profil, Mechanismus

- 3.1 Boden: 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 Tabelle A.3, wobei nur unterschieden wird zwischen Rohboden (Codes 0-4), entwickelter Boden (Codes 5-7) und Nassböden. Die Beurteilung der *Durchlässigkeit* wird aufgrund der Angaben in Tabelle A.4 vorgenommen.

Tabelle A.3: Kategorien der Bodenentwicklung (Codes 1-7). Im Rahmen der Vorliegenden Untersuchungen nur differenziert nach Rohböden (Codes 0 bis 4), entwickelten Böden (Codes 5 bis 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 "Mischgestein", 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	

Tabelle A.4: 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

- 3.2 *Hauptwurzelraum*: ungefähre Profiltiefe mit Wurzeln eines Durchmessers ≥ 2 mm.
- 3.3 *Lockergestein*: Die geotechnische Beschreibung erfolgt nach SN 670 005 (Tabellen A.5 und A.6). Für die geologische Interpretation wurden folgende Klassen verwendet: Humus, Gehängelehm, Gehängeschutt, Moräne. Beurteilung in der Nähe der Gleitfläche bzw. möglichst tief.

Tabelle A.5: Geotechnische Bezeichnung der grob- und mittelkörnigen Lockergesteine nach SN 670 005.

Bestimmende Eigenschaften als Beiwort	Hauptbestandteil als Hauptwort	Nebengemengeteile als beigeordnetes Hauptwort	Restliche Gemengeteile als 2. beigeordnetes Hauptwort, evtl. zu präzisieren.
sauberer siltiger toniger	Kies	mit $\left\{ \begin{array}{l} \text{wenig (3-15\%)} \\ \text{reichlich (16-30\%)} \\ \text{viel (31-49\%)} \end{array} \right\}$ Sand	und mit $\left\{ \begin{array}{l} \text{Blöcken} \\ \text{Steinen} \\ \text{org. Beimengungen} \\ \text{Torf} \end{array} \right\}$
sauberer siltiger toniger	Sand	mit $\left\{ \begin{array}{l} \text{wenig (3-15\%)} \\ \text{reichlich (16-30\%)} \\ \text{viel (31-49\%)} \end{array} \right\}$ Kies	und mit $\left\{ \begin{array}{l} \text{Blöcken} \\ \text{Steinen} \\ \text{org. Beimengungen} \\ \text{Torf} \end{array} \right\}$

Tabelle A.6: Geotechnische Bezeichnung der feinkörnigen Lockergesteine nach SN 670 005.

Charakteristisches Merkmal als Beiwort	Hauptbestandteil als Hauptwort	Plastizitätseigenschaften beschreiben	Nebengemenge als beigeordnetes Hauptwort
toniger siltiger	Silt Ton		

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

3.4 **Festgestein:** Zuordnung zu den in den Untersuchungsgebieten vorkommenden Gesteinen: Nagelfluh, Sandstein, Mergel und entsprechende Wechsellagerungen.

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.
- "keine, jedoch Merkmale erkennbar": Anzeichen 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 Längensprofil 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 Punkt, bis wo das meiste Material abgelagert ist. Ausnahmen im Fall von:

- Hindernissen: Distanz bis Hindernis
- Ablenkung in Mulden: Distanz bis Mulde
- Geländekante: Distanz bis Kante

Es wird zudem angegeben, ob die Auslaufstrecke einsehbar ist.







3.9 **Pauschalgefälle:** Messung der Neigung der Verbindungslinie vom Anriss bis zum Punkt, bis wo das meiste Material abgelagert ist (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. Zudem wird das Gestein unmittelbar oberhalb der Gleitfläche nach USCS klassifiziert und die Gleitschicht mit Signatur im Bodenprofil angegeben.

4 Ergänzende Angaben zur Aufnahmemethode

4.1 Kriterien für den Entscheid zur Aufnahme einer Rutschung

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.

4.2 Beurteilungsräume

Die 3 Beurteilungsräume umfassen die folgenden Bereiche (Abbildung A.7):

- 1) Rutschfläche mit den entsprechenden Ausmassen L, B.
- 2) Die Zone in der der Anriss stattgefunden hat auf einer Fläche von ca. 20 x 50 m, aber immer den ganzen Anriss beinhaltend ($\geq B$).
- 3) Geländeparameter, Anzeichen alter Rutschungen, Vegetation, Nutzung etc. Die Angaben beziehen sich auf eine Fläche von ca. 100 x 100 m um die Rutschung.

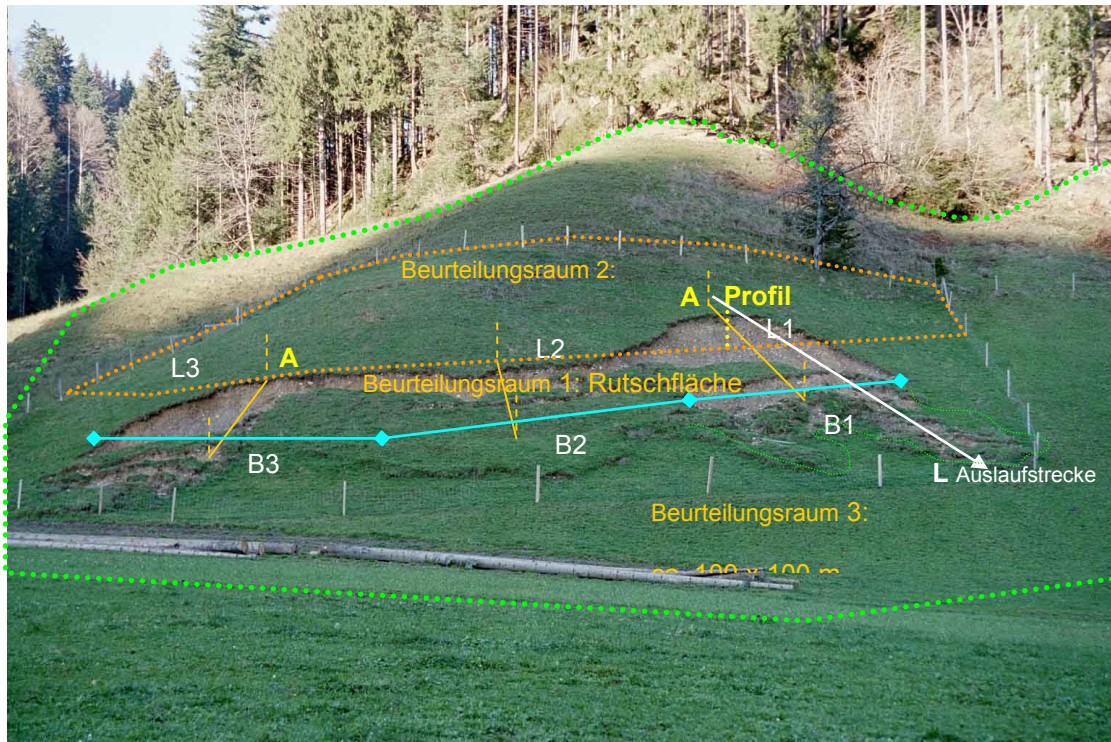


Abbildung A.7: Beurteilungsräume und Ausmessung der Rutschung.

Im Rahmen der Feldbegehungen wurden ausschliesslich die Rutschfläche und das unmittelbar umliegende Gelände beurteilt. Zum restlichen Gelände in den Untersuchungsgebieten stehen nur Angaben zur Verfügung, welche aus der Landeskarte abgeleitet werden können sowie aus den GIS-Auswertungen.

Tabelle A.9: GIS-Daten und deren Verwendbarkeit im Rahmen der Auswertungen.

Aufgrund GIS (Pixelkarte, digitales Höhenmodell) ermittelte Angaben	Bewertung der Brauchbarkeit für die Auswertung
Flächenanteile nach Geländeneigungsklassen	ungenügend, da Neigungen im 25m-Raster zu flach berechnet werden.
Flächenanteile nach Vegetation	brauchbar, aber im Waldrandbereich überprüfen
Flächenanteile nach Expositionen	brauchbar
Flächenanteile nach Höhenstufen	brauchbar

4.3 Ergänzungen, Bemerkungen und Illustrationen zum Erhebungsformular

4.3.1 Koordinaten

Die *Koordinaten* wurden mit Hilfe eines GPS ermittelt. Probleme mit dem Satellitenempfang traten vor allem in Waldflächen und in steilen Bacheinhängen auf. Oft war das Zentrum der Rutschung der geeignetste Ort für die Messung, da der Satellitenempfang dort am besten war. Wo möglich, wurden die Koordinaten jedoch am Anriss gemessen. Falls mit GPS keine Messung möglich war, wurde die Position möglichst genau aufgrund von Höhenmeter, Karte und Geländemerkmale. Bei der Auswertung zeigte sich, dass die Koordinaten sehr wichtig sind für die Zuordnung der Felddaten zu Rastermodellen im GIS. Probleme bei der Auswertung: die Koordinaten am Anriss (oft an Geländekanten) fallen häufig in flache Geländeabschnitte, die nicht der lokalen Rutschneigung entsprechen.

4.3.2 Rutschkomplexe – mehrere nahe beieinander liegende Rutschungen

Eine Rutschung wird als ein Objekt betrachtet, wenn eventuelle Teilrutschungen im Anriss zusammenhängen (Abbildung A.8, links). Ist die Anrisslinie nicht durchgehend, handelt es sich um zwei oder mehrere Rutschungen. Bei einer mehreren, nahe beieinander liegenden Teilrutschungen mit durchgehender Anrisslinie werden für die Berechnung von Flächen und Volumen mehrere Längen gemessen. Für die Gesamtbreite werden die Distanzen der einzelnen Teilflächen addiert (vgl. Abbildung A.7).



Abbildung A.8: Rutschkomplexe. Links: im oberen Bereich durchgehende Anrisslinie und somit als eine Rutschung beurteilt; etwas weiter links unten: separate Rutschung. Rechts: Rutschkomplex mit nicht durchgehenden Anrisslinien, welche als einzelne Rutschungen beurteilt werden.

4.3.3 Hydrologie

Die hydrologischen Standortseigenschaften werden im Beurteilungsraum 2 (Abbildung A.7) beurteilt und den Kategorien "frisch/feucht" oder "nass" zugeordnet. Hinweise zur Vernässung geben Zeigerpflanzen, wasserbeeinflusste Bodenhorizonte (Abbildung A.9), oder stehendes bzw. fließendes Wasser.

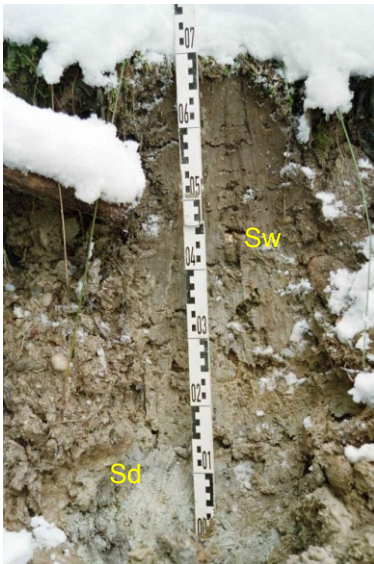


Abbildung A.9: Vernässtes Bodenprofil mit Stauwassersohle (Sd) und Stauwasserleiter (Sw)

4.3.4 Geomorphologie

Übergänge zwischen den einzelnen Typen sind häufig und stark von der Grösse des Beurteilungsraumes abhängig. Auf einer Fläche von 100m x 100m sind oft verschiedene Geomorphologietypen möglich, besonders in stark kuperem Gelände wie dem Napfgebiet mit zahlreichen Rippen und Mulden. Verbesserungsvorschlag: Im Zweifelsfall den Beurteilungsraum verkleinern bis eindeutig auf einen Typ geschlossen werden kann. Andererseits ist die Geomorphologie wichtig im Zusammenhang mit dem potentiellen „Einzugsgebiet“ und daher auf grösserer Fläche von Bedeutung.

4.3.5 Anzeichen alter Rutschbewegungen

Nachfolgend sind einige Illustrationen zu Anzeichen alter/früherer Rutschbewegungen dargestellt. Ein Beispiel für alte Rutschnischen und -buckel sowie Anrisse ist in Abbildung 4.13 des Berichtes zu finden. In Abbildung A.10 sind ein durch eine frühere Rutschbewegung überlagerter ("begrabener") Humushorizont dargestellt sowie Wuchsformen der Vegetation, welche auf kontinuierliche oder periodische Bodenbewegungen schliessen lassen.



Abbildung A.10: Anzeichen alter Rutschbewegungen. Links: überlagerter, etwas dunklerer gefärbter Humus-Horizont; rechts: Anzeichen der Vegetation mit Hinweis auf kontinuierliche bis periodische Bodenbewegungen.

4.3.6 Vegetation /Nutzung

In vielen Fällen zeigte sich, dass Rutschungen im Bereich von Vegetationswechseln von Wald zu Freiland oder umgekehrt, und bei Nutzungswechseln von Wiese zu Weide losgebrochen sind, was aber auch mit Neigungswechseln in diesen Bereichen zusammenhängt. Diesem Aspekt müsste bei künftigen Felderhebungen grössere Beachtung zukommen.

4.3.7 Mögliche Beeinflussung

Diese Information ist schwierig auszuwerten, da unterschiedliche Ursachen als mögliche Auslösefaktoren in Betracht kommen können, häufig im Gelände aber keine Hinweise auszumachen sind. Daher ist diese Information nur beschränkt aussagekräftig. Bei künftigen Erhebungen wäre es sinnvoll in der Aufnahmeanleitung bzw. auf dem Formular eine Auswahl (z.B.: anthropogene Beeinflussung wie Entwässerung, Ablagerungen, topographische Faktoren wie Neigung, Geländeform, Boden: Lockergestein, Durchlässigkeit, etc.) anzugeben, aus welchen dann bei der Feldbeurteilung ausgewählt werden kann.



Abbildung A.11: Anthropogene Beeinflussung als Ursache für die Rutschauslösung?

5 Ergänzende Resultate

Tabelle A.10: Fläche (ha), Anzahl Rutschungen (N) und Rutschaktivität (N/ha) im Untersuchungsgebiet Napf.

	Höhenstufen Napf (m ü.M.)	Fläche (ha)	Anzahl Rut- schungen (N)	Rutschaktivi- tät (N/ha)
Wald	900-950	3.19	0	0.00
	950-1000	10.81	0	0.00
	1000-1050	18.86	1	0.05
	1050-1100	26.23	4	0.15
	1100-1150	17.48	4	0.23
	1150-1200	15.99	6	0.38
	1200-1250	14.79	7	0.47
	1250-1300	8.97	7	0.78
	1300-1350	3.03	1	0.33
	1350-1400	0.07	0	0.00
	Gesamt	119.41	30	0.25
Freiland	900-950	6.39	0	0.00
	950-1000	22.44	0	0.00
	1000-1050	22.10	3	0.14
	1050-1100	26.20	4	0.15
	1100-1150	26.89	10	0.37
	1150-1200	16.15	3	0.19
	1200-1250	3.32	0	0.00
	1250-1300	3.65	1	0.27
	1300-1350	0.17	0	0.00
	1350-1400	0.00	0	0.00
	Gesamt	127.31	21	0.16
Gesamt	900-950	9.58	0	0.00
	950-1000	33.24	0	0.00
	1000-1050	40.96	4	0.10
	1050-1100	52.43	8	0.15
	1100-1150	44.37	14	0.32
	1150-1200	32.14	9	0.28
	1200-1250	18.11	7	0.39
	1250-1300	12.62	8	0.63
	1300-1350	3.19	1	0.31
	1350-1400	0.07	0	0.00
	Gesamt	246.72	51	0.21

Tabelle A.11: Fläche (ha), Anzahl Rutschungen (N) und Rutschaktivität (N/ha) im Untersuchungsgebiet Appenzell.

	Höhenstufen Appenzell (m ü.M.)	Fläche (ha)	Anzahl Rutschungen (N)	Rutschaktivität (N/ha)
Wald	<650	0.00	0	
	650-700	3.76	0	0.00
	700-750	13.21	1	0.08
	750-800	22.92	4	0.17
	800-850	44.56	12	0.27
	850-900	42.23	12	0.28
	900-950	30.21	3	0.10
	950-1000	29.10	1	0.03
	1000-1050	31.56	1	0.03
	1050-1100	12.06	0	0.00
	1100-1150	0.29	0	0.00
	>1150	0.00	0	
	Gesamt	229.90	34	0.15
Freiland	<650	0.00	0	
	650-700	2.50	0	0.00
	700-750	8.81	2	0.23
	750-800	24.41	5	0.20
	800-850	63.06	9	0.14
	850-900	127.05	15	0.12
	900-950	175.30	14	0.08
	950-1000	191.35	3	0.02
	1000-1050	123.66	0	0.00
	1050-1100	72.52	0	0.00
	1100-1150	3.22	0	0.00
	>1150	0.00	0	
	Gesamt	791.87	48	0.06
Gesamt	<650	0.00	0	
	650-700	6.26	0	0.00
	700-750	22.02	3	0.14
	750-800	47.33	9	0.19
	800-850	107.62	21	0.20
	850-900	169.28	27	0.16
	900-950	205.51	17	0.08
	950-1000	220.45	4	0.02
	1000-1050	155.22	1	0.01
	1050-1100	84.58	0	0.00
	1100-1150	3.51	0	0.00
	>1150	0.00	0	
	Gesamt	1021.77	82	0.08

Tabelle A.12: Exposition: Flächen (ha), Anzahl Rutschungen (N) und Rutschaktivität (N/ha) in den verschiedenen Expositionen. Grau hinterlegt: Expositionen mit geringen Flächenanteilen.

		ha	Rutschun- gen (N)	Anzahl pro ha (N/ha)
Napf	N	42.5	2	0.05
	NE	39.2	6	0.15
	E	30.0	8	0.27
	SE	44.1	11	0.25
	S	52.8	12	0.23
	SW	26.3	8	0.30
	W	9.5	4	0.42
	NW	2.3	0	0.00
Appenzell	N	74.3	9	0.12
	NE	10.9	0	0.00
	E	15.7	4	0.25
	SE	88.7	19	0.21
	S	309.6	28	0.09
	SW	187.1	5	0.03
	W	124.3	7	0.06
	NW	211.2	10	0.05
Gesamt	N	116.8	11	0.09
	NE	50.1	6	0.12
	E	45.7	12	0.26
	SE	132.8	30	0.23
	S	362.4	40	0.11
	SW	213.4	13	0.06
	W	133.8	11	0.08
	NW	213.5	10	0.05

Tabelle A.13: Ausmasse der Rutschungen im Untersuchungsgebiet Napf.

Napf		N	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Median	25%-Quantil	75%-Quantil
Wald	max. Rutschlänge (m)	30	10.5	40	17	14.1	20.4
	max. Rutschbreite (m)	30	6.5	19	12	9.6	15.0
	Rutschfläche (m ²)	30	80	375	158	114	218.3
	max. Mächtigkeit (m)	30	0.30	1.80	0.725	0.60	0.875
	Anrisshöhe (m)	30	0.10	2.00	0.40	0.30	0.60
	Rutschvolumen (m ³)	30	33	160	53.5	42.3	78
Freiland	max. Rutschlänge (m)	21	7.5	33	15	10	24
	max. Rutschbreite (m)	21	9	36.5	13.5	12.0	20.5
	Rutschfläche (m ²)	21	54	750	176	112	240
	max. Mächtigkeit (m)	20	0.50	1.40	0.80	0.70	0.90
	Anrisshöhe (m)	21	0.40	1.40	0.60	0.50	0.90
	Rutschvolumen (m ³)	21	30	330	80	48	130
Gesamt	max. Rutschlänge (m)	51	7.5	40	17	13.5	21.8
	max. Rutschbreite (m)	51	6.5	36.5	12.0	10.0	16.0
	Rutschfläche (m ²)	51	54	750	183.8	112	223
	max. Mächtigkeit (m)	50	0.3	1.8	0.8	0.63	0.9
	Anrisshöhe (m)	51	0.1	2.0	0.5	0.38	0.6
	Rutschvolumen (m ³)	51	30	330	60	44.5	95

Tabelle A.14: Ausmasse der Rutschungen im Untersuchungsgebiet Appenzell.

Appenzell		N	Minimaler Wert	Maximaler Wert	Median	25%-Quantil	75%-Quantil
Wald	max. Rutschlänge (m)	34	8.5	71	18.5	13.5	24.4
	max. Rutschbreite (m)	34	6.0	27	11.8	9.6	15.4
	Rutschfläche (m ²)	34	45	1200	132	100	241.5
	max. Mächtigkeit (m)	34	0.50	1.60	1.00	0.80	1.175
	Anrisshöhe (m)	34	0.00	1.70	0.70	0.50	1.00
	Rutschvolumen (m ³)	34	32	720	62.5	45.8	140.8
Freiland	max. Rutschlänge (m)	48	4.5	49	15.5	12.5	22.0
	max. Rutschbreite (m)	48	6	62	14.8	11	20.5
	Rutschfläche (m ²)	48	48	900	140	100	265
	max. Mächtigkeit (m)	47	0.50	2.20	1.00	0.80	1.40
	Anrisshöhe (m)	47	0.20	1.50	0.80	0.60	1.00
	Rutschvolumen (m ³)	48	32	1100	98	60	202
Gesamt	max. Rutschlänge (m)	82	4.5	71	16.3	12.5	24.4
	max. Rutschbreite (m)	82	6	62	13.8	10	16.7
	Rutschfläche (m ²)	82	45	1200	140	100	260
	max. Mächtigkeit (m)	81	0.5	2.2	1.0	0.8	1.2
	Anrisshöhe (m)	81	0.6	1.7	0.8	0.6	1.0
	Rutschvolumen (m ³)	82	32	1100	80	51	168

Tabelle A.15: Ort der Gleitfläche im Untersuchungsgebiet Napf (Anzahl Rutschungen).

Napf	Festgestein							Lockergestein						
	Nagelfluh (N)	Sandstein (S)	Mergel (M)	Wechsellagerung				Total					Total	
				N-S	N-M	S-M	N-S-M		Moräne	Gehänge-schutt	Verwitte-rungsmaterial	andere		
Innerhalb Lockerge-stein	2	1						3		9			9	
Grenze Lockerge-stein/Fels	14	1		10	8	3	3	39						
Im aufge-lockerten Fels														
								42						9

Tabelle A.16: Ort der Gleitfläche im Untersuchungsgebiet Appenzell (Anzahl Rutschungen). Es fehlen die Angaben einer Verbauten Rutschung (1701).

Appenzell	Festgestein							Lockergestein					
	Nagelfluh (N)	Sandstein (S)	Mergel (M)	Wechsellagerung				Total	Moräne	Gehänge-schutt	Verwitte-rungsmaterial	andere	Total
				N-S	N-M	S-M	N-S-M						
Innerhalb Lockerge-stein		3	1					4	13		3		16
Grenze Lockerge-stein/Fels		33	8			19		60					
Im aufge-lockerten Fels		1						1					
								65					16