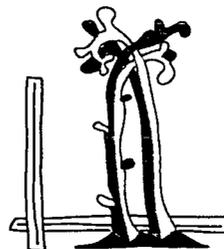


Diplomarbeit

# Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen

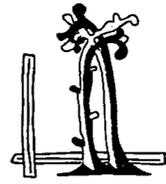
von

Mario A. Niederschick





Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Bautechnik und  
Naturgefahren



Institut für Ingenieurbiologie  
und Landschaftsbau

---

*universität des lebens*

# Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen

Grundlagen für die Anwendung ingenieurbiologischer Bauweisen zur  
Stabilisierung von Hängen und Untersuchungen an ausgewählten  
Rutschungen im Einzugsgebiet des Trattenbaches (Salzburg)

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOMINGENIEUR

in der Studienrichtung

LANDSCHAFTSPLANUNG UND LANDSCHAFTSPFLEGE

Eingereicht von:

*Mario A. Niederschick*

Angefertigt am *Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien*

Betreuung:

*O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth*

Mitbetreuung:

*Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. Johann Peter Rauch*

*Dipl. Ing. Walter Lammeranner*

Wien, Mai 2007

Universität für Bodenkultur

Gregor Mendel Straße 33, A-1180 Wien, Österreich · Internet: <http://www.boku.ac.at>

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am 17. Mai 2007

Mario A. Niederschick

## Danksagungen

An erster Stelle möchte ich **meinen Eltern** danken, weil sie mir das Studieren ermöglichten, mich dabei vertrauensvoll bedingungslos unterstützten und mir immer wieder zeigten, dass sie an mich glauben.

Meinem Professor **Dr. Florin Florineth** danke ich dafür, dass er in mir die Freude an der lebendigen Technik geweckt hat; dass er mir ermöglicht hat die Diplomarbeit am Institut zu schreiben; und dass ich stets mit einer Frage zu ihm kommen durfte.

Meinem Zweitbetreuer **Dr. Hans Peter Rauch**, der mich wie ein Erstbetreuer behandelte, danke ich für seine Offenheit, seine hilfreichen Ratschläge und dafür, dass seine Tür immer für mich offen stand.

Meinem Drittbetreuer **Drs. Walter Lammeranner** danke ich für die freundschaftlich-kollegiale Zusammenarbeit.

Meinen Zwischendurchbetreuern, den übrigen **InstitutsmitarbeiterInnen**, möchte ich einen besonderen Dank aussprechen, dafür dass sie mir nie das Gefühl gaben nicht zum Institut zu gehören.

Meinem Kollegen **cand. Dipl. Ing. Clemens Weissteiner** danke ich für fachlichen, technischen und persönlichen Beistand.

Dank an **Drs. Fabrício Jaques Sutili**, der mich in die Welt der Grafik-Magie einführte. Obrigado!

**Professor Edmund Krauter** und **Dr. Manuel Lauterbach** aus Karlsruhe, danke ich dafür, dass sie mir freundlicherweise eine Kopie der deutschen Ausgabe des *Multilingual Landslide Glossary* geschickt haben.

**Harald Rieder** vom Institut für Meteorologie danke ich dafür, dass er mich freundlicherweise mit Klimadaten zum Untersuchungsgebiet versorgt hat.

**Dipl. Ing. Bernhard Leiner** und **cand. Dipl. Ing. Josef Eisenknapp**, sowie **Dipl. Ing. (FH) Gerald Holl** danke ich dafür, dass sie mich in meinem Vorhaben, extra für die Erstellung dieser Diplomarbeit das Satzprogramm  $\LaTeX$  zu erlernen und anzuwenden, unterstützt haben, indem sie mir auf unzählige Fragen zu jeder Zeit

hilfreiche Antworten gaben.

An dieser Stelle danke ich auch gleich allen **Internetforen, Dokumentationsautoren und  $\LaTeX$ -Liehabern**, die mir evtl. im letzten Jahr weitergeholfen haben.

Weiterer anonymer Dank gilt [www.wie-sagt-man-noch.de/synonyme/](http://www.wie-sagt-man-noch.de/synonyme/), wo mir desöfteren rethorisch aus der Patsche geholfen wurde, und <http://dict.leo.org/>, der mir alles Englische ins Deutsche übersetzen half.

Meinem Bruder **Andreas**, dem Andersmann, danke ich dafür, dass er da ist und dass ich ihm während etlicher langer Spaziergänge seine beiden Ohren u. a. mit Diplomarbeitssdingen vollfüllen durfte.

Größter Dank gilt meiner Freundin **Agnes**. Sie hat mich durch ihre sachlich-pragmatische und geduldige Beratung immer wieder von meinen geistigen Wandertagen zurück zum eigentlichen Thema geführt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2 Abstract</b>	<b>3</b>
<b>3 Einleitung</b>	<b>5</b>
3.1 Problemstellung . . . . .	5
3.2 Ziel und Methodik der Arbeit . . . . .	6
3.3 Allgemeines zu Hangprozessen . . . . .	8
<b>4 Geomorphologie</b>	<b>11</b>
4.1 Hangformen . . . . .	11
4.2 Hangbewegungen . . . . .	13
4.2.1 Ursachen und Faktoren . . . . .	21
4.2.2 Klassifikation von Hangbewegungen . . . . .	26
4.2.3 Kippen . . . . .	28
4.2.4 Gleiten . . . . .	28
Rotationsrutschung . . . . .	32
Translationsrutschung . . . . .	35
Blockgleiten/Blockdriften . . . . .	41
4.2.5 Driften . . . . .	41
4.2.6 Fließen . . . . .	42
Fließen . . . . .	42
Kriechen . . . . .	43
4.2.7 Kombinationen/Komplexe . . . . .	45
4.2.8 Erosion . . . . .	46
Wassererosion . . . . .	46
Winderosion . . . . .	50
<b>5 Boden</b>	<b>51</b>
5.1 Chemische Eigenschaften . . . . .	51
Ionensorption . . . . .	51
Bodenacidität . . . . .	51
pH-Wert . . . . .	52
Redox-Reaktionen . . . . .	52
Bodenlösung . . . . .	53

	Elektrische Leitfähigkeit . . . . .	53
	Mineralische Zusammensetzung . . . . .	53
5.2	Physikalische Eigenschaften . . . . .	53
	Bodendichte $\rho$ . . . . .	53
	Wichte $\gamma$ . . . . .	53
	Körnung und Lagerung . . . . .	54
	Korngröße . . . . .	54
	Bodenart . . . . .	55
	Bodengefüge oder Bodenstruktur . . . . .	55
	Bodenluft . . . . .	56
	Bodenwasser . . . . .	56
	Wechselwirkungen zwischen fester Phase und Wasser . . . . .	58
	Wasserbewegung im Boden . . . . .	58
	Pufferung, Filterung, Transformation . . . . .	59
	Transportvorgänge und Verlagerungen . . . . .	59
	Konsolidation . . . . .	59
5.2.1	Bodenfestigkeit . . . . .	59
	Spannung . . . . .	59
	Scherfestigkeit $\tau_f$ . . . . .	60
	Kohäsion . . . . .	62
	Reibung $\mu$ und Reibungswinkel $\varphi$ . . . . .	63
	Bodenkonsistenz . . . . .	64
5.3	Bodenansprache . . . . .	66
	Fleckung und Konkretation . . . . .	66
	Karbonate . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Vegetation</b> . . . . .	<b>69</b>
	Strahlung und Licht . . . . .	69
	Temperatur . . . . .	72
	<i>Leaching</i> und <i>Exsudation</i> . . . . .	73
6.1	Hydrologische Funktion . . . . .	76
	Transpiration, Interzeption und Evapotranspiration . . . . .	76
	Infiltration . . . . .	78
	Überstaubarkeit . . . . .	78
6.2	Stabilisierende Funktion . . . . .	78
	Wurzeln . . . . .	79
	Biotechnische Eigenschaften . . . . .	80
	Wald . . . . .	81
	Vegetative Vermehrung . . . . .	83
6.3	Oberflächenschutzfunktion . . . . .	86
6.4	Analytische Funktion . . . . .	87
	Stumme Zeugen . . . . .	87
	Zeigerfunktion . . . . .	90

<b>7 Untersuchungsgebiet</b>	<b>93</b>
Geologie . . . . .	94
Boden . . . . .	96
Klima . . . . .	96
<b>8 Datenerhebung</b>	<b>97</b>
8.1 Grundlagen . . . . .	97
Luftbilder . . . . .	97
Geologie . . . . .	98
8.2 Feldbegehung . . . . .	99
Aufnahmearbeiten . . . . .	100
Standort . . . . .	100
Rutschungsgeometrie . . . . .	101
Hydrologie . . . . .	101
Geomorphologie . . . . .	102
Vegetation . . . . .	102
Boden . . . . .	102
Beschreibung der Rutschung . . . . .	103
Sonstiges . . . . .	103
<b>9 Datenauswertung</b>	<b>105</b>
9.1 Teilgebiet „Nach der Sperre links“ – <i>NSL</i> . . . . .	107
Hydrologie . . . . .	111
Boden . . . . .	111
Bewegungsmechanismen . . . . .	112
9.2 Teilgebiet „Nach der Sperre rechts“ – <i>NSR</i> . . . . .	114
Hydrologie . . . . .	121
Boden . . . . .	121
Bewegungsmechanismen . . . . .	122
9.3 Teilgebiet „Einzugsgebiet Trattenbach“ – <i>ET</i> . . . . .	125
Hydrologie . . . . .	133
Boden . . . . .	133
Bewegungsmechanismen . . . . .	133
9.4 Teilgebiet „Ziegelhütte“ – <i>Z</i> . . . . .	137
Hydrologie . . . . .	140
Boden . . . . .	140
Bewegungsmechanismen . . . . .	140
9.5 Zusammenfassung der Auswertung . . . . .	143
<b>10 Diskussion und Ausblick</b>	<b>147</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>163</b>
<b>A Anhang</b>	<b>165</b>
A.1 Aufnahmeformular . . . . .	167
A.2 Pflanzenliste . . . . .	173

# 1 Zusammenfassung

Eine ingenieurbioologische Planung gliedert sich in mehrere Planungsschritte. Für die erfolgreiche Anwendung von ingenieurbioologischen Techniken zur Hang- und Grabensicherung sind Detektion und Bewertung von Rutschhängen wesentliche Fundamente. Ziel der Diplomarbeit ist es, Grundlagen für diese Planungsschritte zu sammeln und zu untersuchen, um die Auswahl von ingenieurbioologischen Bautypen und der verwendbaren Pflanzenarten zu optimieren.

Der erste Teil birgt eine umfassende Recherche zu den Bereichen Geomorphologie, Boden und Vegetation, wobei der Fokus auf ingenieurbioologisch relevanten Aspekten liegt. Um die gesammelten Grundlagen für die praktische Anwendung zu testen, wurde in einem zweiten Schritt im Frühsommer 2006 in einem Untersuchungsgebiet in der Gemeinde Taxenbach/Salzburg eine Feldbegehung durchgeführt. In vier Teilgebieten konnten dabei insgesamt 21 Rutschungen aufgenommen und bewertet werden. Dafür wurde ein auf den Grundlagen basierendes Aufnahmeformular nach projektspezifischen Kriterien konzipiert. Bei Aufnahme und Auswertung wurde sichtbar, dass einige Kriterien sehr gute Ergebnisse lieferten, andere sich wiederum verbesserungswürdig zeigten. So ergab die Untersuchung nach geomorphologischen Gesichtspunkten eine gute und einfache Abschätzbarkeit der maßgeblichen Hangprozesse. Auch die Analyse von Zeigerpflanzen erwies sich als relativ erfolgreich, obwohl hier Verbesserungsmöglichkeiten zu diskutieren sind. Eine grobe Ansprache von Bodenprofilen erlaubt, mit relativ wenig Aufwand, Einblicke in den Schichtungsaufbau und zeigt evt. vorhandene Vernässungszonen. Detailliertere Aussagen zur Bodenbeschaffenheit sind mit erhöhtem Aufwand verbunden und erfordern viel Erfahrung.

Im Kapitel *Diskussion und Ausblick* wird detailliert auf die erkannten Möglichkeiten und Probleme der Feldbegehung eingegangen. Desweiteren findet sich hier eine Stellungnahme zu den Möglichkeiten von Fernerkundungsmethoden für zukünftige ingenieurbioologische Hangstabilitätsanalysen.

Zusammengefasst kam die Diplomarbeit zu folgenden Ergebnissen:

- Sammlung von interdisziplinären Grundlagen zur Hangstabilitätsanalyse
- Entwicklung eines projektspezifischen Aufnahmeformulars
- Beurteilung ausgewählter Rutschungen mit Kriterien der Geomorphologie, des Bodens und der Vegetation
- Ausblick auf methodische Verbesserungsmöglichkeiten unter Einbeziehung neuer Technologien im Bereich der Fernerkundung

## 2 Abstract

A soil bioengineering design is structured into several steps. For the successful application of soil bioengineering techniques for slope and gully protection, the detection and assessment of slope activities is very important. Aim of this thesis (diploma) is to gather and to examine basics of these planning steps to optimise the selection of soil bioengineering construction types and applicable plants. The first part contains a comprehensive enquiry of geomorphologic, soil and vegetation parameters with main focus on soil bioengineering aspects.

In order to probe the collected basics for the practical use extended field surveys were carried out in the catchment area of the Trattenbach (Salzburg, Austria). Within four areas 21 slope failures were detected and assessed. Therefore a basic-based survey blank was created in respect to soil bioengineering criteria.

The field survey and the following analysis showed that many criteria were chosen well and some had to be refined: The examined geomorphologic parameters approved to be very suitable to evaluate the significant slope movements. Also the analysis of indicator plants seemed to be relatively useful, even if some revisions have to be discussed. A simple soil investigation shows soil strata and water-loggings with low efforts; More detailed statements on soil parameters demand more extensive surveys and experience.

In the chapter *Discussion and Outlook* the possibilities and problems are reconsidered in detail. Furthermore the possibilities of remote sensing for soil bioengineering analyses are stated.

Summarised these thesis (diploma) gets to following results:

- Collection of interdisciplinary basics for slope failure analysis
- Development of an project-specific survey blank
- Assessment of selected slope failures in respect to geomorphology, soil and vegetation
- Outlook on improvements by using new remote sensing techniques

## 3 Einleitung

### 3.1 Problemstellung

Die Ingenieurbiologie hat gegenüber anderen technischen Lösungen gewisse Vorteile. In Zeiten knapper Ressourcen, ökologischer und ästhetischer Forderungen, bietet sie die entsprechende Alternative zu konventionellen Bauweisen. Der Einsatz von Pflanzen als Baustoff hat lange Tradition, so verwendeten bereits die Römer Raubäume zur Sicherung von Bach- und Flussufern (FLORINETH, 2004). Im Laufe der Technisierung wurden diese Bauweisen aber verdrängt und das Wissen darüber ging verloren. Seit den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts besinnt man sich nun wieder auf die Vorteile des umweltkonformen Bauens und setzt daher zunehmend ingenieurbiologische Bauweisen ein. Um optimale Ergebnisse zu erreichen, werden heutzutage traditionelle Technik und moderne Methoden synergetisch verbunden.

Nach der langen Zeit im Abseits müssen Grundlagen für die ingenieurbiologische Arbeit neu geschaffen werden. BEGEMANN und SCHIECHTL (1986) schreiben zu diesem Umstand in ihrem für die Ingenieurbiologie so wichtigen Buch: *„Obwohl das Interesse für diese Dinge [Ingenieurbiologie] wächst, gilt das bedauerlicherweise nicht für den Kenntnisstand und das führt leider zu manch negativen Begleiterscheinungen und Ergebnissen.“*

Die Ingenieurbiologie bezieht in ihrem Arbeitsbereich Grundwissen anderer Bereiche mit ein. Zusätzlich zum fachinternen Wissen benötigt sie geologisches, pedologisches, hydrologisches, geotechnisches, botanisches, etc. Fachwissen, was ihr interdisziplinären Charakter verleiht.

Letzendlich fußt die ingenieurbiologische Planung aber weitgehend auf Erfahrungswissen. Dadurch erschwert sich oft die interdisziplinäre Zusammenarbeit, weil in anderen – vor allem technischen – Bereichen auf die Berechenbarkeit von Bauwerken und eine quantitative Abschätzung von Sicherheiten größter Wert gelegt wird. Zwar gibt es zahlreiche Studien zur Verbesserung der technischen Handhabung von Vegetation im ingenieurbio-

logischen Bereich. Von einer standardisierten Dimensionierung, wie sie konventionelle, nicht lebende Baustoffe an den Tag legen, ist diese Technik aber noch weit entfernt.

Bei der Planung von ingenieurbioologischen Hangsicherungsmaßnahmen hat die Detektion und die Beurteilung von Rutschungen besondere Bedeutung. Geomorphologische, bodenkundliche und vegetationskundliche Parameter müssen aufgenommen, analysiert und interpretiert werden und sind die Basis der Planung. Nur wenn die daraus resultierenden Hangprozesse richtig abgeleitet werden, können ingenieurbioologische Techniken in der Hangsicherung erfolgreich angewendet werden.

### 3.2 Ziel und Methodik der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, eine umfassende Sammlung von Grundlagen zu den maßgebenden Parametern *Geomorphologie*, *Boden* und *Vegetation* bereitzustellen, um eine optimale Auswahl von Bautypen und Pflanzen in der ingenieurbioologischen Planung zu unterstützen. Im Zuge einer Feldbegehung werden die beiden Planungsschritte **Detektion** und **Bewertung** überprüft. Die weiteren Planungsschritte *Maßnahmen* und *Monitoring* sind nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit.

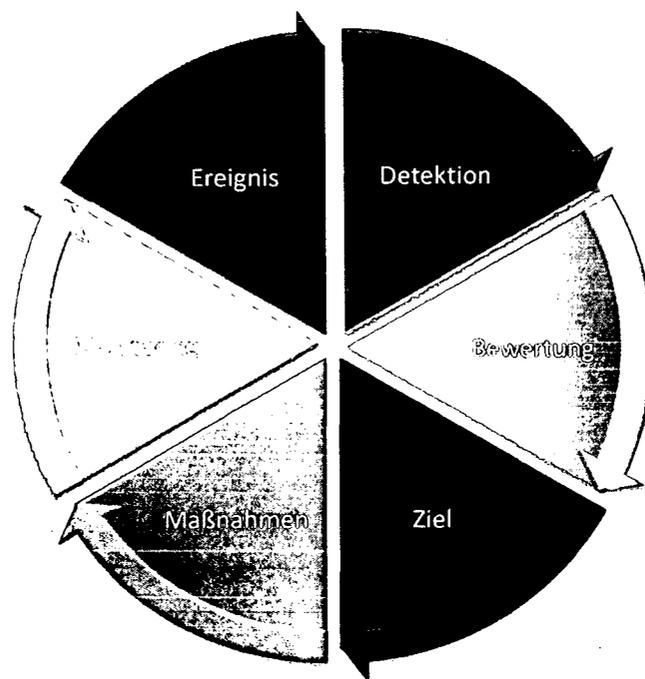


Abbildung 3.1: Ingenieurbioologische Planungsschritte zur Sicherung von Hangbewegungen.

Der erste Teil beinhaltet, nach einer allgemeinen Einführung zu Hangprozessen, die umfassende Beschreibung der drei Hauptthemen Geomorphologie, Boden und Vegetation. Im Kapitel *Geomorphologie* werden allgemein die Formen von Hängen und speziell Hangbewegungen erörtert. Der spezielle Abschnitt behandelt insbesondere die Klassifikation, die Ursachen und Einflüsse, sowie die Prozesscharakteristika von maßgeblichen Hangbewegungen. Unter den Einflussfaktoren werden im Kapitel *Boden* v. a. dessen Eigenschaften bezüglich der Hangstabilität beleuchtet und im Kapitel *Vegetation* wird auf die stabilisierenden Wirkungen von Pflanzen eingegangen.

Der zweite Teil dokumentiert eine Untersuchung, die im Frühsommer 2006 im Zuge der Diplomarbeit durchgeführt wurde. Das Untersuchungsgebiet war das Trattenbachtal bei Taxenbach in Salzburg. Vor der Feldbegehung standen einige Vorarbeiten (Kapitel 8.1):

Zur besseren Übersicht wurden anhand von Luftbildern thematische Karten erstellt und damit Aufnahmebereiche festgelegt. Die Luftbilder wurden im Zuge eines Projekts des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau von dessen Auftraggebern *Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)* und dem *Österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit)* zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden Luftbilder des *Salzburger Geographischen Informationssystems (SAGIS)* hinzugezogen. Für die Bearbeitung der Bilder konnte das Anwendungsprogramm *ArcGIS 9.0* der Firma *ESRI* verwendet werden.

Weiters wurde zur Abschätzung der örtlichen Geologie die Geologische Übersichtskarte von Salzburg 1:200.000 (2005) verwendet. Eine Karte dieses Gebiets mit größerem Maßstab war nicht verfügbar.

Für die Feldbegehung (Kapitel 8.2) wurde ein spezifisches Aufnahmeformular erstellt, wobei auf die Grundlagen aus dem ersten Teil zurückgegriffen wurde. Mit dem Formular konnten in vier Teilgebieten insgesamt 21 Rutschungen aufgenommen und beurteilt werden.

Im abschließenden Kapitel *Diskussion und Ausblick* werden schließlich die Grundlagen, die Anwendung, sowie weitere mögliche Methoden diskutiert und sich daraus ergebende Forschungsfragen aufgezeigt.

### 3.3 Allgemeines zu Hangprozessen

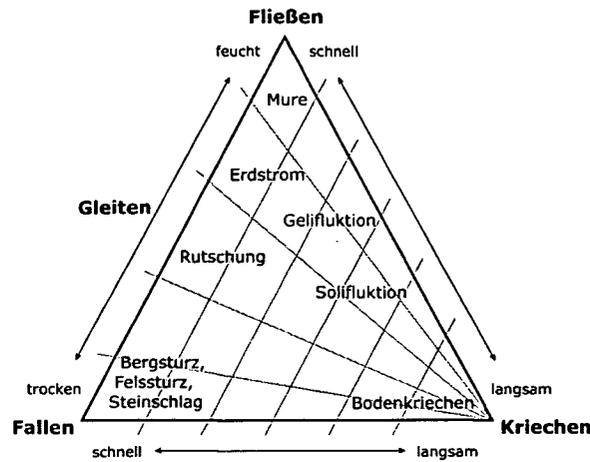
Hochaufragende Geländeteile, ausgeprägte Reliefs oder Gebirge streben zeitlebens einen stabileren Zustand an. Das bedeutet nichts Anderes, als dass sie versuchen sich einzuebnen. Behilflich sind dabei so genannte exogene Kräfte, welche für die Abtragung der, in geologischen Zeiträumen gesehen instabilen, gebirgigen Erdoberfläche, Sorge tragen. Unter diese exogenen (außenbürtigen) Kräfte reihen sich Wasser, Wind, Eis, Sonnenenergie, Schwerkraft, Mensch, Gezeiten und Organismen. Ausnahmslos werden Erhebungen in letzter Konsequenz immer eingeebnet werden, was am Beispiel der Böhmisches Masse, die einst als hohes Gebirgsmassiv emporragte, deutlich wird. Jedoch erleben wir Menschen diese Sukzessionen typischerweise nicht zur Gänze, sondern nur einen Bruchteil des Gesamtprozesses und so scheinen uns die Gebirge als etwas Ewiges. Es gibt denn auch Vorgänge innerhalb der Erdkruste, die einer solchen Einebnung Widerstand leisten. Diesen besorgen die endogenen (innenbürtige) Kräfte, die ausgelöst durch plattentektonische Verschiebungen oder Vulkanismus zur Hebung der an sich im Abtragen befindlichen Geländeerhebungen führen.

Ausdruck der in Summe meist positiven Abtragungstendenz sind Hangbewegungen in umfassendem Sinn. Diese sind ein Subsystem der Hangentwicklung und diese wiederum ein Subsystem des von Flüssen dominierten fluvialen Systems oder des von Gletschern bestimmten glazialen Systems oder dem litoralen System oder dem nicht so sehr gravitativ beeinflussten äolischen System. Der Einfluss der Schwerkraft zeigt sich, indem die mittlere Abtragungsrates (m pro 1000 Jahre) vom mittleren Relief und der mittleren Hangneigung eines gebirgigen Geländes abhängen (vgl. WILHELMY (2002)).

Hangbewegungen oder Massenbewegungen lassen sich in fünf Grundbewegungstypen einteilen – *Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen*. Wissenschaftlich korrekt sind diese Prozesse als Massenschwerebewegungen zu bezeichnen. Abbildung 3.2 zeigt ein Einordnungsschema (mit Ausnahme des Bewegungstyps *Kippen*).

Die Bewegungsart *Gleiten*, die sich im Schema zwischen dem Fließen und dem Fallen befindet, hat in dieser Diplomarbeit eine Sonderstellung, da sie für die Ingenieurbio-logie am Bedeutendsten ist. Spezielle Gleitformen sind Rotations- und Translationsrutschungen, die ein Hauptarbeitsgebiet der Ingenieurbio-logie ausmachen. Ebenso wichtig wie die Rutschungen sind Bodenerosionsprozesse, die aber nicht unter die Massenschwerebewegungen fallen, sondern als Massentransport bezeichnet werden.

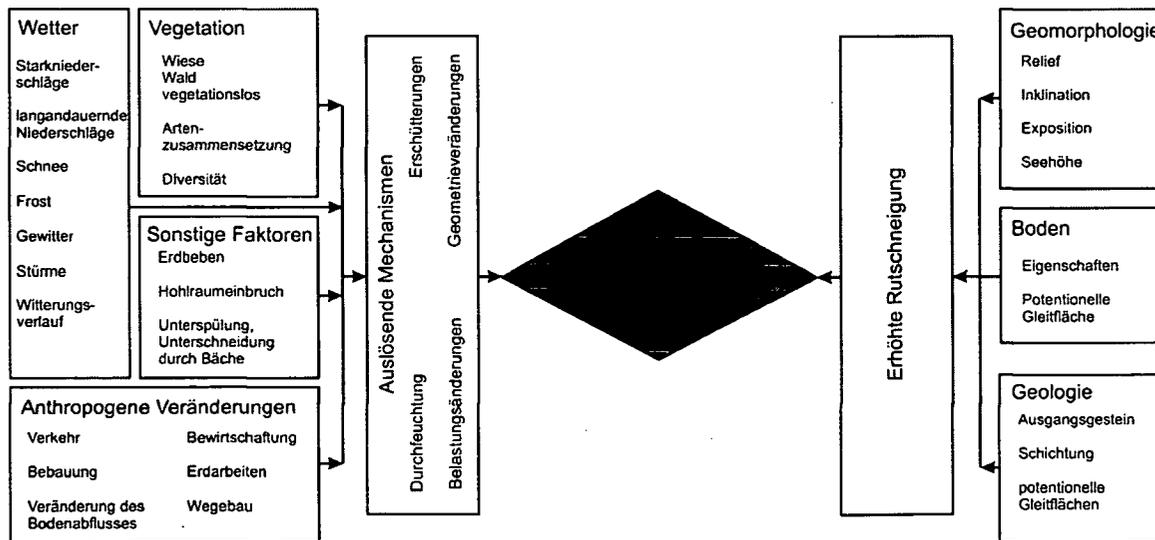
Massenbewegungen sind Interaktionen mehrerer Teilprozesse und werden von verschiedenen Faktoren und Einflussgrößen vorbereitet, ausgelöst und gesteuert. Beeinflussend



**Abbildung 3.2:** Typisierung der Massenschwerebewegungen. Das Diagramm wird durch grundlegende Bewegungstypen nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) gebildet. Je nach Bewegungsgeschwindigkeit und Materialfeuchte entstehen Kombinationen aus diesen Grundprozessen. Modifiziert nach CARSON und KIKBY (1972).

wirken die Geologie, die Pedologie, die Hydrologie, das Wetter, die Geomorphologie, die Vegetation und der Mensch. Die Abbildung 3.3 stellt die Zusammenhänge dar.

Eine Beschreibung all dieser Einflussgebiete würde den Rahmen der Diplomarbeit sprengen und so beschränken sich die späteren Ausführungen auf die drei Faktorengruppen Geomorphologie, Boden und Vegetation.



**Abbildung 3.3:** Modell für Massenbewegungen. In Anlehnung an WAGNER (2004).

## 4 Geomorphologie

Die Geomorphologie beschreibt die Erdoberfläche (Relief) und deren Entstehung. Dabei geht sie auf die verschiedenen Geländeformen und die Prozesse, wodurch Massen verlagert oder transportiert werden, ein. Für die Hanganalyse kann sie ein Indikator für vergangene oder künftige Hangbewegungen sein („Stumme Zeugen“). Diese drücken sich u. a. in Form von Rissen, Unregelmäßigkeiten, Verlagerungs- und Anlagerungszonen aus.

Die beiden anschließenden Kapitel geben zuerst einen Überblick über Hangformen und zeigen danach ausführlich die Entstehung und Formen von landschaftsgestaltenden Hangbewegungen.

### 4.1 Hangformen

In diesem Kapitel werden Hänge und Böschungen beschrieben, an welchen die in der Diplomarbeit behandelten Massenbewegungen stattfinden.

Nach KRAUTER (2001) sind Böschungen oder Hänge wie folgt charakterisiert:

*„Natürliche Böschungen, auch als Hänge bezeichnet, sind geneigte Gelände­flächen, die durch endogene und exogene geodynamische Prozesse entstanden sind. Dazu zählen auch die Uferböschungen an fließenden und stehenden Gewässern. Sind geneigte Gelände­flächen durch technische Eingriffe hergestellt, werden sie als Böschungen oder künstliche Böschungen bezeichnet. Die Begriffe natürliche Böschungen, Böschungen oder Hänge werden im allgemeinen Sprachgebrauch synonym verwendet.“*

Einen Unterschied zwischen Hang und Böschung zitieren BEGEMANN und SCHIECHTL (1986) aus dem dtv-Lexikon von 1971. Ein **Hang** ist demnach ein geneigter Teil der Erdoberfläche, eingeteilt nach der Lokalisierung in Berg- oder Talhang und flachgeböschter **Gleithang** oder steil konkaver **Prallhang** an Flüssen. Dagegen ist

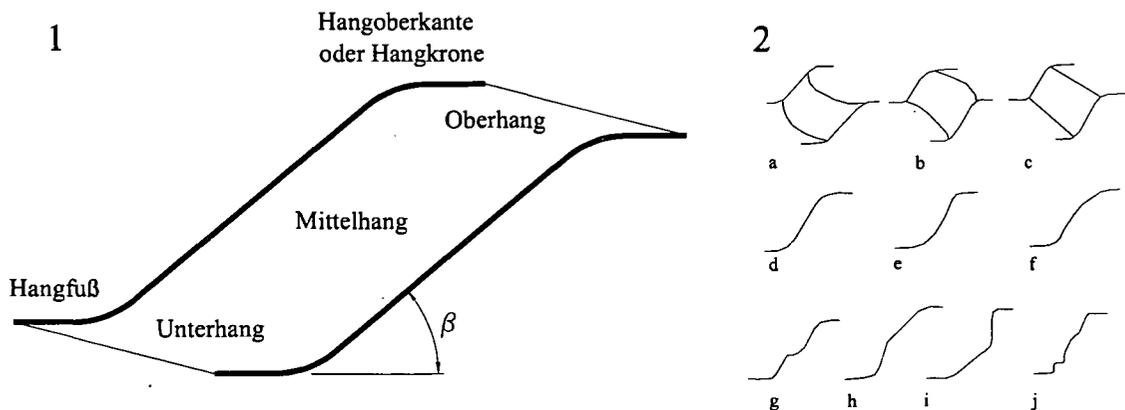
eine **Böschung** durch Bautätigkeit entstanden und bezeichnet die Neigung zwischen zwei verschieden hohen Ebenen.

In der Tabelle 4.1 werden Böschungen bzw. Hänge nach deren Steilheit in fünf Kategorien eingeteilt.

**Tabelle 4.1:** Einteilung von Böschungen nach ihrer Neigung. Nach KRAUTER (2001).

Böschungsbezeichnung	Neigung [°]
Extrem flache Böschungen	3 - 5
Flachböschungen	5 - 15
mäßig steile Böschungen	15 - 40
Steilböschungen	40 - 90
übersteile (überhängende) Böschungen	> 90

Die Abbildung 4.1 zeigt Bereiche und Formen von Hängen, wobei einerseits das Querprofil und andererseits das Längsprofil zur Charakterisierung herangezogen wird. Hangbereiche werden eingeteilt in Hangoberkante (oder -krone), Hangfuß, sowie Ober-, Mittel- und Unterhang. Desweiteren können Hänge auch topographisch zu einer Geländeform des Makroreliefs zugeordnet werden: Kuppe, Mulde, Kessel, Ebene, Plateau, Talboden, Wanne, Graben, Schwemm-, Schuttfächer, oder Schwemm-, Schuttkegel.



**Abbildung 4.1:** 1 Bereiche eines Hanges. 2 Hangformen: a konvex, b konkav, c gestreckt, d eben, e hängend, f bauchig, g gestaffelt, h und i zusammengesetzt, j unregelmäßig. (KRAUTER, 2001, S. 616).

## 4.2 Hangbewegungen

In der Fachwelt gibt es seit Beginn der wissenschaftlichen Beschäftigung mit Hangbewegungen unterschiedliche Bezeichnungen und Definitionen dieser Phänomene. So werden etwa mechanisch weitgehend identische Prozesse in verschiedenen Ländern abweichend bezeichnet, was auch nicht verwunderlich ist. Zum Beispiel ist in der Schweiz ein 'Schliff' in Österreich und Deutschland ein 'Hangrutsch', eine 'Runse' ist synonym mit 'Gully' oder 'Graben' (OPLATKA et al., 1996). SCHINDLER (1996) weist auf ungenügende Abgrenzung einzelner Grundtypen zueinander und deshalb gelegentlich verschiedener Verwendung dieser (zB Kriechen, Bergsturz) hin. Auch erwähnt er Unterschiede im Sprachgebrauch der Schweiz zu Deutschland (zB Sackung).

Die Fachwelt ist in der Begriffsbestimmung uneins. In unserer global vernetzten Welt ist es aber mittlerweile Usus – um nicht zu sagen obligat – Wissen und Erfahrungen über Ländergrenzen, sogar Kontinente hinweg auszutauschen und Synergien zu schaffen. Deshalb gab und gibt es zahlreiche Bestrebungen den allgemeinen nationalen und internationalen Begriffsverwirrungen ein Ende zu setzen und eine einheitliche internationale Klassifikation einzuführen.

Die von vielen Autoren (HUTCHINSON, 1988; SELBY, 1993, u. a.) als wichtigste und in weiten Teilen auch heute noch gültige Klassifikation ist jene des amerikanischen Ingenieurgeologen David J. VARNES (1958, 1978).

Die große Anzahl an Klassifizierungsansätzen erschwerte es jedoch, zu einer international gültigen Vereinheitlichung zu gelangen. 1993 entstand dann die Klassifikation der 'UNESCO-Working Party for Landslide Inventory' (WP/WLI) und der 'International Association of Engineering Geology' (IAEG). Von dieser Arbeitsgruppe wurde eine allgemeingültige Terminologie für Rutschungen vorgeschlagen, die im MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) publiziert wurde. Diese Arbeit stellt die erste offizielle Klassifizierung von Rutschungen bzw. Hangbewegungen dar und ist in die Sprachen Chinesisch, Französisch, Deutsch, Spanisch und Russisch aus abgestimmten englischen Bezeichnungen übersetzt. Leider sind auch in diesem Glossary nur die Grundbewegungstypen Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Fließen definiert. Spezialformen, die als Grundform einer dieser fünf Typen vorliegen, sind nicht gesondert definiert. Die Diplomarbeit hält sich an dieser grundsätzlichen Terminologie an.

In kürzester Form wird im MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) eine *Rutschung* in folgender Weise definiert (nach CRUDEN 1991): „*A movement of a mass*

of rock, earth or debris down a slope.“ Rutschungen (landslides) sind also hangabwärts gerichtete Bewegungen von Boden-, Fels- und Schuttmassen.

Eine ausführlichere und mehr differenziertere allgemeine Definition von Hangbewegungen liefert einer der Initiatoren des Landslide Glossary's Edmund KRAUTER (2001):

*„Massenbewegungen oder Hangbewegungen sind Verlagerungen von Locker- und Festgesteinen aus höheren in tiefere Lagen, infolge der Schwerkraftwirkung. Man spricht von (direkter) Massenschwerebewegung bzw. Massenselbstbewegung oder Denudation. Bedient sich die Schwerkraft der Mithilfe von Transportmitteln wie Wasser, Gletschereis oder Luft, wird der Begriff Massentransport oder Erosion verwendet. Massenschwerebewegungen werden auch als Rutschungen im weiteren Sinne benannt, sofern kein Fallen stattfindet.“*

Im Vergleich mit der UNESCO-Definition schreibt er abschließend, dass der Begriff Rutschung Massenschwerebewegungen und Massentransport durch Wasser umfasst.

Wasser in Form von Niederschlägen, Schmelzwasser, Bergwasser oder Eis ist in fast allen Bewegungsabläufen an Hängen auslösend oder steuernd beteiligt. SELBY (1993, S. 249) schreibt über dieses Faktum und führt auch Erklärungen dafür an:

*„Water and ice, however, are frequently involved in mass wasting by reducing the strength of slope materials and by contributing to plastic and fluid behavior of soils.“*

Eine Ergänzung zu der Krauter'schen Beschreibung von *Denudation* und *Erosion* gibt LATELTIN (1997) indem er in Ersterer eine flächenhafte und in Zweiterer eine linienartige Massenverlagerung sieht.

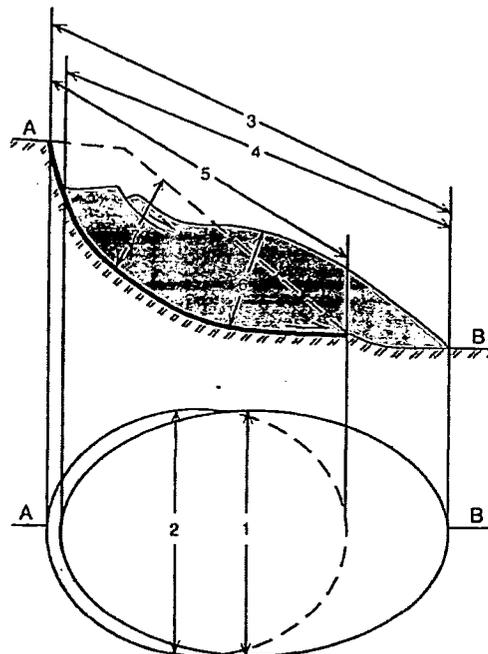
Aus der Definition der UNESCO von 1993 lässt sich ableiten, dass der früher allgemein benutzte übergeordnete Begriff *Massenbewegungen* durch den Begriff *Rutschungen* ersetzbar ist. PRINZ (1997, S. 276) stellt sogar fest, dass der Oberbegriff *Massenbewegungen* international wieder aufgegeben worden ist.

In dieser Diplomarbeit werden die Begriffe 'Rutschung', 'Hangbewegungen', 'Massenbewegung' in der allgemeinen Beschreibung synonym verwendet, wenn nicht spezielle Bewegungstypen im Fokus stehen.

Im ingenieurbiologischen Kontext sind, wie im Kapitel 6 erläutert wird, v. a. flachgründige oder oberflächliche (siehe Tabelle 4.13 auf Seite 30) Hangbewegungen von Bedeutung, weshalb in den nachfolgenden Beschreibungen auf diese ein besonderes Augenmerk gelegt werden wird.



- 
- **Top**                   höchster Punkt des Kontaktes zwischen verlagertem Material und Hauptabriss
  - **Kopf**                   oberer Rand der Rutschung entlang dem Kontakt zwischen verlagertem Material und Hauptanriss
  - **Sekundärabriss**       durch unterschiedliche Bewegungen innerhalb des verlagerten Materials der Rutschmasse entstandene steil einfallende Fläche
  - **Hauptrutschkörper**   Teil des verlagerten Materials der Rutschung, der sich über der Gleitfläche zwischen Hauptanriss und Gleitflächenfront befindet
  - **Fuß**                   unterer Teil der Rutschmasse, der über die Gleitfläche hinausreicht und über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt, auch als **Rutschungszunge** bezeichnet
  - **Fußspitze**           jener Teil der Front, der am weitesten vom Top der Rutschung entfernt ist
  - **Front**                 die vordere, meist gekrümmte Begrenzung des verlagerten Materials der Rutschung, die am weitesten vom Hauptanriss entfernt ist
  - **Gleitfläche**           jene Fläche, welche die untere Grenze des verlagerten Materials unter der ursprünglichen Geländeoberfläche bildet (oder gebildet hat)
  - **Gleitflächenfront**   Grenzlinie (meist verdeckt) zwischen dem unteren Teil der Gleitfläche und der ursprünglichen Geländeoberfläche
  - **Überschiebungsfläche** Teil der ursprünglichen Geländeoberfläche, die vom Fuß der Rutschung überlagert wird
  - **Verlagertes Material**   von der Rutschung erfasste und aus ihrer ursprünglichen Position verlagerte Masse. Sie umfasst sowohl die Sackungsmasse als auch die Akkumulation
  - **Sackungszone**       Bereich der Rutschung, in dem das verlagerte Material tiefer liegt als die ursprüngliche Geländeoberfläche
  - **Akkumulationszone**   Bereich der Rutschung, in dem das verlagerte Material über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt
  - **Sackungsraum**       als Volumen, das vom Hauptanriss, von der Sackungsmasse und der ursprünglichen Geländeoberfläche begrenzt wird
  - **Sackungsmasse**       Teil des verlagerten Materials, das über der Gleitfläche und unter der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt
  - **Akkumulation**       Volumen des verlagerten Materials bezeichnet, das über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt
  - **Flanke**               in-situ liegendes Material, das unmittelbar an die seitlichen Abrisse anschließt. Die Beschreibung mit Kompassrichtung wird bevorzugt; falls mit rechts oder links bezeichnet, bezieht sich dies aus der Sicht von oben nach unten
  - **Ursprüngliche Geländeoberfläche**   Oberfläche des Hanges, die vor Beginn der Rutschung bestand
-

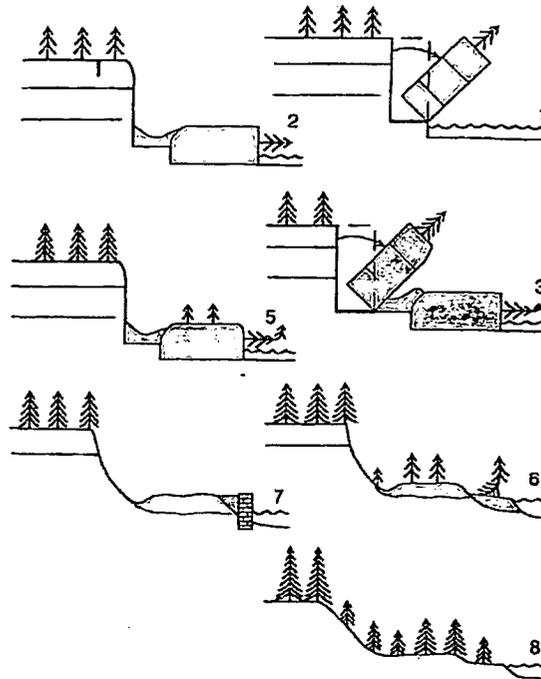


**Abbildung 4.3:** Dimensionen einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der dunklere Bereich bildet das Ausmaß des verlagerten Materials ab. 1) **Breite Rutschmasse**, 2) **Breite Gesamtlänge**, 3) **Gesamtlänge**, 4) **Länge Rutschmasse**, 5) **Gleitflächenlänge**, 6) **Mächtigkeit Rutschmasse**, 7) **Tiefe Gleitfläche**. Aus MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993, deutsche Fassung).

### Rutschungsdimensionen

(siehe Abb. 4.3)

Dimension	Zeichen	Beschreibung
• <b>Breite der Rutschmasse</b>	$W_d$	maximale Breite der Rutschmasse senkrecht zur Längsachse, $L_d$
• <b>Breite der Gesamtlänge</b>	$W_r$	maximale Breite zwischen den Flanken der Rutschung, senkrecht zur Längsachse $L_r$
• <b>Gesamtlänge</b>	$L$	kleinster Abstand zwischen Fußspitze und Krone der Rutschung
• <b>Länge der Rutschmasse</b>	$L_d$	kleinster Abstand zwischen Fußspitze und Top
• <b>Gleitflächenlänge</b>	$L_r$	kleinster Abstand zwischen Gleitflächenfront und Krone
• <b>Mächtigkeit d. Rutschmasse</b>	$D_d$	maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene $W_d$ und $W_L$
• <b>Tiefe der Gleitfläche</b>	$D_r$	maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene $W_r$ und $L_r$

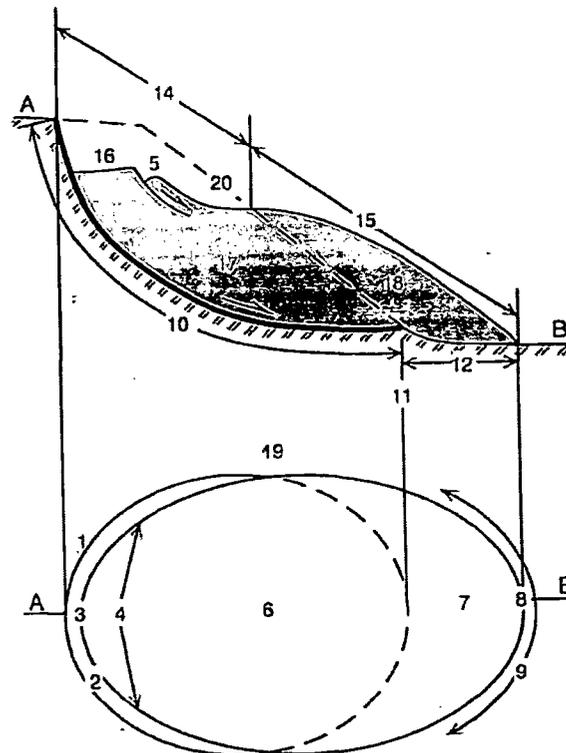


**Abbildung 4.4:** Zustand einer Rutschung. Schnitte durch Hänge mit Kippbewegungen in verschiedenem Aktivitätszustand. 1) **Aktiv**, 2) **Blockiert**, 3) **Reaktiviert**, 4) *ist nicht dargestellt*, 5) **Latent**, 6) **Abgeschlossen**, 7) **Stabilisiert**, 8) **Fossil**. Aus MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993, deutsche Fassung).

### Zustand der Rutschungsaktivität

(siehe Abb. 4.4)

Zustand	Beschreibung
• <b>aktiv</b>	ist gegenwärtig in Bewegung
• <b>blockiert</b>	hat sich in den letzten 12 Monaten bewegt, ist aber zur Zeit nicht aktiv
• <b>reaktiviert</b>	ist eine aktive Rutschung, die vorher inaktiv war
• <b>inaktiv</b>	hat sich in den letzten 12 Monaten nicht bewegt
○ <b>latent</b>	kann durch ihre ursprünglichen Ursachen reaktiviert werden
○ <b>abgeschlossen</b>	wird nicht mehr von ihren ursprünglichen Ursachen beeinflusst
○ <b>stabilisiert</b>	die ursprüngliche Aktivität ist durch Sanierungsmaßnahmen nicht mehr wirksam
○ <b>fossil</b>	hat sich unter erheblich unterschiedlichen klimatischen und geomorphologischen Bedingungen im Vergleich zur Gegenwart entwickelt

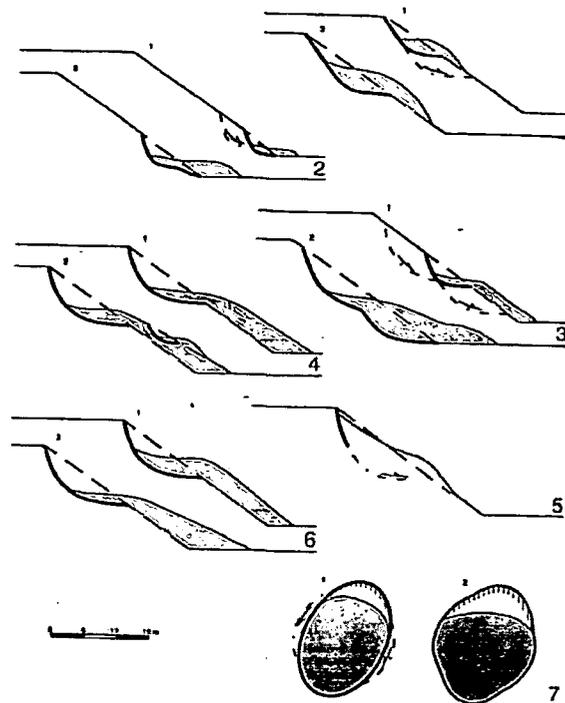


**Abbildung 4.5:** Art der Rutschungsaktivität. Rutschungen, welche die verschiedenen Arten von Aktivitäten aufzeigen 1) **Komplex**, 2) **Zusammengesetzt**, 3) **Sukzessiv**, 4) **Einzelrutschung**, 5) **Mehrfachrutschung**. Aus MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993, deutsche Fassung).

### Art der Rutschungsaktivität

(siehe Abb. 4.5)

Rutschaktivität	Beschreibung
• <b>komplex</b>	weist mindestens zwei Bewegungstypen (Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen) in Folge auf
• <b>zusammengesetzt</b>	weist mindestens zwei Bewegungstypen auf, die gleichzeitig in verschiedenen Teilen der Rutschmassen auftreten
• <b>sukzessiv</b>	ist vom gleichen Typ wie die unmittelbar benachbarte ältere Rutschung. Verlagertes Material und Gleitflächen sind jedoch voneinander getrennt
• <b>einzel</b>	weist nur eine Einzelbewegung des verlagerten Materials auf
• <b>mehrfach</b>	eine wiederholte Entwicklung gleichen Bewegungstyps



**Abbildung 4.6:** Rutschungen zeigen verschiedene Verteilung der Aktivitäten auf. 1) Fortschreitend, 2) Rückschreitend, 3) Vergrößernd, 4) Verkleinernd, 5) Beschränkt ausgebildet, 6) Fortsetzend, 7) Ausweitend. Das Profil 2 stellt den Hang nach der Bewegung auf der Gleitfläche dar. Die Rutschmasse ist gepunktet. Aus MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993, deutsche Fassung).

### Verteilung der Rutschungsaktivitäten

(siehe Abb. 4.6)

Verteilung	Beschreibung
• fortschreitend	die Gleitfläche breitet sich in Bewegungsrichtung aus
• rückschreitend	breitet sich entgegen der Bewegungsrichtung des verlagerten Materials aus
• vergrößernd	die Gleitfläche breitet sich in zwei oder mehr Richtungen aus
• verkleinernd	das Volumen des verlagerten Materials verringert sich
• beschränkt ausbildend	es gibt zwar einen Abriss, aber am Fuß der Rutschmasse ist eine Gleitfläche nicht ausgebildet
• fortsetzend	ohne sichtbare Veränderung der Gleitfläche und des Volumens des verlagerten Materials
• ausweitend	die Gleitfläche breitet sich in einer oder in beiden Flanken der Rutschung aus

### 4.2.1 Ursachen und Faktoren

Im Allgemeinen entstehen Hangbewegungen durch Veränderungen des Gleichgewichtes zwischen rückhaltenden und treibenden Kräften im Hang. Dargestellt wird dieser Zusammenhang mit der Beziehung:

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{haltende Kräfte}}{\text{treibende Kräfte}} \quad (4.1)$$

Das Verhältnis dieser beiden Kräfte zueinander ergibt den Sicherheitsfaktor mit welchem das Maß der Hangstabilität ausgedrückt wird. Erreicht der Sicherheitsfaktor Werte  $\geq 1$  ist der Hang (gerade noch) stabil, während er bei Werten  $< 1$  instabil ist und abgehen wird.

Die genannten Kräfte stellen Einflüsse dar, die einer Hangbewegung einerseits Widerstand leisten (haltende Kräfte) und andererseits diese fördern, auslösen oder aufrechterhalten (treibende Kräfte). Sie stehen stellvertretend für eine Vielzahl von Faktoren, die untereinander in komplexen Wechselbeziehungen stehen. Im Folgenden werden diese Faktoren vorgestellt und erläutert.

Faktoren, die ursächliche oder auslösende Wirkung für Hangbewegungen haben können, werden zuerst in zwei Klassen eingeteilt, in externe und interne Faktoren.

**Externe Faktoren** erhöhen die Scherspannung und stärken also die treibenden Kräfte (siehe Tabelle 4.7 Teil A).

**Interne Faktoren** vermindern die Scherfestigkeit und schwächen daher die haltenden Kräfte (siehe Tabelle 4.7 Teil B).

Eine weitere Unterscheidung von Faktoren hält sich an deren Wirkungszeitpunkt oder Wirkungsdauer:

**Vorbereitende oder permanent wirkende Faktoren** verändern die Sensibilität eines Hanges gegenüber Naturereignissen, ohne jedoch unmittelbar zu einer Hangbewegung zu führen. Hierunter fallen Tektonik, Erosion, Verwitterung oder die Schwerkraft. Zeitraum: vor der Massenbewegung.

**Auslösende oder episodisch wirkende Faktoren** stellen die Zündfunken einer Hangbewegung dar, indem sie die treibenden Kräfte über das Niveau der haltenden Kräfte bugsieren. Sie bringen den Sicherheitsfaktor der Hangstabilität also auf einen Wert  $< 1$ . Zeitpunkt: kurz vor Beginn der Bewegung. Beispiele siehe Tabelle 4.8.

**Kontrollierende Faktoren** steuern eine aktive Bewegung. Zum Beispiel brauchen kontinuierliche Kriechvorgänge ein relativ exaktes Zusammenspiel mehrerer kontrollierender Faktoren um ihren Charakter beibehalten zu können (Gleichmäßige Wasserzufuhr, keine größere Änderung der Hanggeometrie im Verlauf der Bewegung). Zeitraum: im Laufe der Bewegung.

KRAUTER (2001, S. 622) sieht als Primär- oder Ur-Ursache von Hangbewegungen die **Geologie**. In der Ursachenhierarchie folgt aus ingenieurbio-logischer Sicht die **Pedologie** (siehe auch Kapitel 5). **Wasser** stellt in den meisten Fällen das hauptauslösende Moment dar. Es wirkt insbesondere auf den Porenwasserdruck, auf Sickerströmungen und auf Quelldrücke infolge Quellens von Tonmineralien (LATELTIN, 1997) und kommt in Form von Niederschlägen, Schmelzwasser oder Bergwasser vor. Wasser kann auch als kontrollierender Faktor auftreten, wenn es zB die Bewegungsgeschwindigkeit steuert. Ganz allgemein wirkt Wasserzufuhr in einen Hang durch **Lastzunahme** der durchtränkten Bodenkörper rutschungsfördernd.

**Grundwasser** kann v.a. den Hangfuß beeinflussen, weil der Grundwasserspiegel durch seine im Vergleich mit dem Hang geringere Neigung im Fußbereich am höchsten ist. Somit zeigt sich an einem betrachteten Hang der Hangfuß als am stärksten befeuchtet. Der durch die Befeuchtung initiierte Auftrieb kann eine Hangbewegung beschleunigen. Auch ein **Anstieg des Wasserstandes des Vorfluters** kann eine Erhöhung des Auftriebs am Hangfuß bewirken. Ebenso kann sich aber auch ein **rasches Absinken des Wasserstandes** durch die Erhöhung des Strömungsdruckes und durch das Wegfallen des vom Wasserkörper gegebenen Widerlagers auf die Beschleunigung der Hangdeformation positiv auswirken.

Ein besonders tragisches Beispiel für den auslösenden Einfluss von sinkendem Wasserstand auf Hangbewegungen zeigt sich in der Vajontkatastrophe. Der norditalienische Fluss Vajont wurde zur Energiegewinnung ab 1956 aufgestaut. Nachdem Defizite in der Stabilität der umliegenden Bergflanken bekannt waren und auch schon einige Bergstürze abgegangen sind, wurde 1963 der Stausee vorbeugend abgelassen, um dadurch eine mögliche Flutwelle zu verkleinern. Gerade durch diese Maßnahme, welche eine Entlastung des Hangfußes zur Folge hatte, kam es am 9. Oktober 1963 zur Katastrophe. 270 Mio m<sup>3</sup> Bergmasse stürzten in den Stausee und erzeugten zwei Flutwellen. Eine ganze Stadt und einige Dörfer unterhalb der Staumauer wurden von der zweiten Flutwelle (25 Mio m<sup>3</sup>), die über die Staumauer schwabhte, erfasst. Etwa 2000 Menschen fanden dabei den Tod. Die Mauer selbst blieb unbeschadet (WIKIPEDIA: Stichwort *Vajont-Staumauer*, Abruf: 25.2.2007).

Wie sich Wasser in **Wechselfolgen von gut durchlässigen Schichten und weniger**

**Tabelle 4.7:** Faktoren die Massenbewegungen von Böden beeinflussen. Aus SELBY (1993).

<b>A. Faktoren, die die Scherspannung erhöhen</b>	
<b>Faktor</b>	<b>Wirkung</b>
Wegfall von seitlichen Stützen	Fluss-, Wasser-, oder glaziale Erosion Verwitterung, Befeuchtung, Austrocknung und Frost Hangneigung wird durch Massenbewegungen erhöht Bergbau, oder ähnliche durch den Menschen erfolgte Wegnahme
Überlastung durch	Gewicht von Regen, Schnee oder Aufböschungen Auffüllungen, Müllhalden, Bauwerke
Vorübergehende Belastungen	Erdbeben – Bodenbewegungen und -kippen Vibrationen durch menschliche Tätigkeiten – Sprengungen, Verkehr, Maschinen
Wegfall von stützendem Untergrund	Unterspülung durch fließendes Wasser Verwitterung, Befeuchtung, Austrocknung und Frost Erosion im Untergrund (Auswaschung von Feintellen oder Lösung von Salzen), Herausdrücken von plastischen Böden aus dem Untergrund Untertagebau, Schaffung von Seen oder Reservoirs
Seitlicher Druck	Wasser in Bodenlücken Gefrieren von Wasser Quellen durch Wasseranlagerung an Tonteilchen Mobilisierung von Eigenspannung (residual stress)
Versteilerung des Hanges	regionales tektonisch bedingtes Neigen Vulkanische Prozesse
<b>B. Faktoren die die Scherfestigkeit vermindern</b>	
<b>Faktor</b>	<b>Wirkung</b>
Aufbau und Gefüge	schwache Materialien wie vulkanischer Tuff und sedimentäre Tone locker gepackte Materialien glatte Kornform enggestufte Korngrößenverteilung
Physico-chemische Reaktionen	Kationen-(Basen)-Austausch Hydratation von Tonen Trocknen von Tonen Lösung von Bindemitteln
Effekte des Porenwassers	Auftrieb Verminderung der Kapillarspannung Reibungswiderstand von fließendem Wasser auf Bodenteilchen, piping
Änderungen im Gefüge	Spontane Verflüssigung fortschreitendes Kriechen mit Neuausrichtung von Tonen Reaktivierung von ehemaligen Scherflächen
Entfernung von Bäumen	Verminderung der Normalspannung Wegfall der scheinbaren Kohäsion durch Baumwurzeln Erhöhung des Grundwasserspiegels Erhöhte Rissbildung
Relief Strukturen	Unstetigkeitsstellen und andere Schwachstellen Schichtung von plastischen und undurchlässigen Böden

**Tabelle 4.8:** Beispiele für auslösende oder episodisch wirkende Faktoren, natürlichen oder anthropogenen Ursprungs. Aus KRAUTER (2001).

Faktor	Ursache natürlich	Ursache anthropogen	Wirkung
Veränderung des Bergwasserstandes, hohe Durchfeuchtung	anomale Niederschläge, Frostverschluss, Schneeschmelze	Defekte in Wasserleitungen oder Kanalisation, gestörte Drainage, Aufstau	Konsistenzänderung, Plastifizierung von Kluftfüllungen, Strömungsdruck, Kluftwasserdruck, Auftrieb, Verwitterung, Hydrolyse
Erschütterungen	Erdbeben	Sprengungen, Ramm- und Bohrarbeiten, rollender Verkehr	Porenwasserüberdruck, Thixotropie-Effekt, Auflockerung, Spannungsänderung
Belastungsänderungen	anomale Niederschläge, Schmelzwasser, Frostverschluss	Aufschüttungen, Kippen, Halden, Bauwerke	Spannungsänderung
Änderung der äußeren Form	Unterspülung	Hanganschnitte und Hangeinschnitte	Spannungsänderung

gut durchlässigen (stauenden) Schichten auswirken kann, ist besonders interessant für die Entstehung von Translationsrutschungen (S. 35). Dabei sind **Wasseraustritte (Quellen)** im Hang jeweils an der Grenzfläche zur stauenden Schicht. Die Durchfeuchtung dieser Schicht führt häufig zu Rutschungen (KRAUTER, 2001, S. 630).

**Wasserzufuhr** kann Tone und Tonsteine mit quellfähigen Tonmineralen zum **Quellen** bringen, wodurch das **Gefüge aufgelockert** wird und eine **Plastifizierung** eintritt. Bindige Lockergesteine und veränderlich feste Ton-Schluff-Gesteine werden mit zunehmender Wassersättigung in der Konsistenz weicher und die Beträge der Scherparameter nehmen ab. Im feinkörnigen Boden kann ein erhöhter Porenwasserdruck oder Strömungsdruck auftreten, wodurch die abschiebenden Kräfte verstärkt werden. In klüftigen Böden und Fels schwemmt das Wasser feine Bodenteilchen an, wodurch sogenannte **Bestege** (geologischer Begriff für feinen mineralischen Belag auf Kluftflächen) entstehen, die bei Anstieg des Bergwasserstandes wie ein Schmierfilm wirken (KRAUTER, 2001, S. 631). Bestege können auch durch tektonisch verursachte Bewegungen entstehen.

Flüsse oder Bäche können durch **Unterspülen** des Hangfußes zu rückschreitenden Rutschbewegungen führen.

Die **Hangneigung** ist als Einflussfaktor abhängig vom Material des Hanges. Tab. 4.9 zeigt die kritischen Neigungswinkel (Böschungswinkel) für einige Materialien. Neben dem Böschungswinkel, der die natürliche maximale Neigung einer Böschung darstellt, sind zur Bestimmung der kritischen Neigung aber auch die Kohäsion und die Wichte von Bedeutung.

**Tabelle 4.9:** Typische maximale Hangneigungen von verfestigtem Material aus LÖWNER (2005) nach CARSON und KIRKBY (1972).

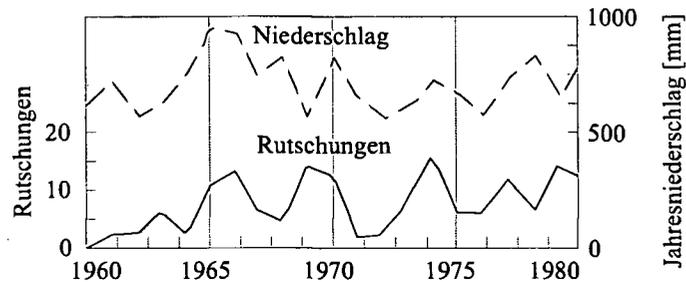
Hangneigung [°]	Hangmaterial
Felsblockmaterial, augenscheinlich kohäsionslos aber mit hoher Lagerungsdichte	43 - 45
Material wie oben aber geringere Lagerungsdichte	33 - 38
Aluviale Hänge (stark gemischte Korngröße), in denen ein hoher Porenwasserdruck herrschen kann	25 - 38
Sandiges Material	19 - 21
Tone	8 - 11

Massenschwerebewegungen sind weiters abhängig von der **Exposition** des betreffenden Hanges und treten nach KRAUTER (2001) am häufigsten an **süd- und westexponierten Hängen** auf.

Die **Verwitterung** trägt als vorbereitender Faktor allgemein dazu bei Fels- und Bodenkörper zu entfestigen und wirkt sich durch häufigere **Tau-Gefrier- und Trocknungs-Befeuchtungs-Wechseln** an Süd- und Westhängen intensiver aus als an Nord- oder Osthängen.

Dabei ist auch der Einfluss der Hauptwindrichtung zu erwähnen, da der **Wind** den entgegen dieser Richtung gelegenen Hängen Regen in höherem Maße zubläst und dort zu einer verstärkten Durchfeuchtung führt. **Frost**, ein Klimafaktor, kann ein Gelände oberflächlich auflockern, indem durch die Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren Klüfte aufgeweitet und vergrößert oder in Lockergestein neue Klüfte gebildet werden. Frost kann aber auch festigkeits- bzw. stabilitätserhöhend sein, wenn er in den Poren von Permafrostböden als Bindemittel fungiert. Durch **Schrumpfrisse** in bindigen Schichten kann Niederschlagswasser in den Sommermonaten in den Boden eindringen und gezielt potentielle Gleitflächen bewässern, wodurch Rutschungen ausgelöst werden (KRAUTER, 2001). **Überlagerung von Klimaereignissen** wie Starkniederschlag, höhere Temperatur und dadurch Schneeschmelze führen zu einer Häufung von Rutschungen in anfälligen Regionen.

Nach KRAUTER (2001) gibt es eine eindeutige Abhängigkeit der Beschleunigung und der Anzahl der Massenschwerebewegungen von Niederschlägen. Der Einfluss der Niederschläge kann sich auf die Hangbewegungen erst Wochen bis Monate verzögert bemerkbar machen (Abb. 4.7).



**Abbildung 4.7:** Zusammenhang zwischen Anzahl der Rutschungen und der jährlichen Niederschläge aus KRAUTER (2001, S. 629).

#### 4.2.2 Klassifikation von Hangbewegungen

Hinsichtlich Entstehung, Ablauf und Wirkungsweise sind Hangbewegungen äußerst verschiedenartig, wie Abbildung 3.2 auf Seite 9 anhand zweier grundlegender Parameter (Prozessgeschwindigkeit und Materialfeuchte) veranschaulicht. Sie können flächenhaft (*Denudation*) oder linienartig (*Erosion*) verlaufen, schnell und plötzlich auftreten (zB Sturzprozesse) oder als langsame, kontinuierliche Prozesse ablaufen (zB Rutschungen). Die beteiligten Materialien können fest oder locker sein und in annähernd flüssigem Zustand sein oder weitgehend trocken. Durch ihr plötzliches Eintreten gefährden sie Menschen an Leib und Leben. Zudem können sie langsam aber kontinuierlich zur Beschädigung oder Zerstörung von Gebäuden, Kulturland und Wald führen (LATELTIN, 1997). Aus dieser großen Bandbreite von möglichen Prozessvorgängen wird nun eine Klassifikation dargestellt, wie sie im MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) vorgeschlagen ist.

In der folgenden Aufstellung werden den fünf Bewegungsgrundtypen nach dem MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) – Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen – je nach vorherrschendem Material, spezifische Bewegungsarten zugewiesen. Für die Ingenieurbilogie sind v.a. die Gleitbewegungen von Interesse.

**Tabelle 4.10:** Klassifikation von Massenbewegungen nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993).

Bewegungstyp	Felsgestein	vorwiegend rolliges Gestein	vorwiegend bindiges Gestein
Fallen	Steinschlag Felssturz Bergsturz		Lockergesteinssturz
Kippen	Felskippping		Kippung im Lockergestein
Gleiten, rotativ	Felsgleitung: einfache multiple sukzessive		Rotationsrutschung: einfache multiple sukzessive
Gleiten, translativ planar	planare Felsgleitung		Translationsrutschung
nicht planar	Blockglei- tung	Schollenrutschung	Blattanbruch
Driften, Blockdeformation	Felsdriften	Schuttdriften	Bodendriften
Fließen	Talzus Schub	Mure, Schuttstrom	Schlammstrom
Komplex	zB Felslawine, Sturzstrom	zB Fließrutschung, Muschelanbruch mit Vermurung	zB Rutsch-Erdfließen, Muschelanbruch mit folgender Bodenverflüssigung

Zusätzlich zu den fünf Grundtypen und den daraus entstehenden komplexen Bewegungen, stellt **Bodenerosion** einen weiteren Abtrageprozess dar, der, wie auch das Gleiten, zu den Hauptprozessen der Ingenieurbiologie gehört.

Im Folgenden werden die Prozesse näher dargestellt, wobei besonderes Augenmerk auf die für die ingenieurbiologische Arbeit wichtigen Prozesse gelegt wird.

### 4.2.3 Kippen

Definition nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993):

*„Kippen (topple) ist eine Vorwärtsrotation aus dem Hang heraus von Blöcken aus Fels- oder kohäsivem Bodenmaterial um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunktes.“*

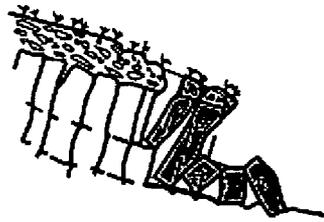


Abbildung 4.8: Bewegungstyp Kippen. MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993).

Als Kippen bezeichnet man Rotationsbewegungen um quasi *horizontale* Achsen eines oder mehrerer hintereinander liegender Kluftkörper. Es tritt allgemein nur an Steilhängen auf. In Verbindung mit Blockbewegungen findet Kippen jedoch auch an flachen und mäßig steilen Hängen statt. Bewegungen um *steilstehende* Achsen von Kluftkörpern und Rutschschollen bezeichnet man unterscheidend dazu als Drehen (KRAUTER, 2001, S. 640).

Kippen kann Fall- oder Gleitbewegungen vorangehen oder nachfolgen und zeigt sich manchmal deutlich durch aus dem Verband gelöste instabile Körper in Steilhängen. Spezielle Formen des Kippens sind das Hakenschlagen, Beulen und Knicken (siehe KRAUTER, 2001, S. 642)

### 4.2.4 Gleiten

Definition nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993):

*„Gleiten (slide) ist eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Boden- oder Felsmassen auf Gleitflächen oder auf verhältnismäßig dünnen Zonen intensiver Scherverformung.“*

Gleiten ist ein übergeordneter Begriff für Hangbewegungen von mehr oder weniger kohärenten Massen entlang einer oder mehrerer Gleitflächen oder Gleitzonen. Diese Zonen

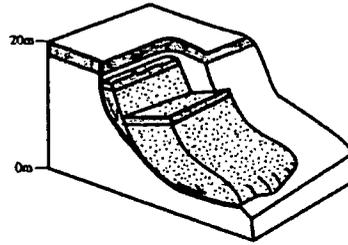


Abbildung 4.9: Bewegungstyp Gleiten. MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993).

stellen auch das wichtigste Charakteristikum von Gleitprozessen dar. Damit sind sie eindeutig gegen andere Prozessarten abgegrenzt. In Entstehung, Form, Art und Material können Gleitflächen oder Gleitzonen ihrerseits verschieden sein.

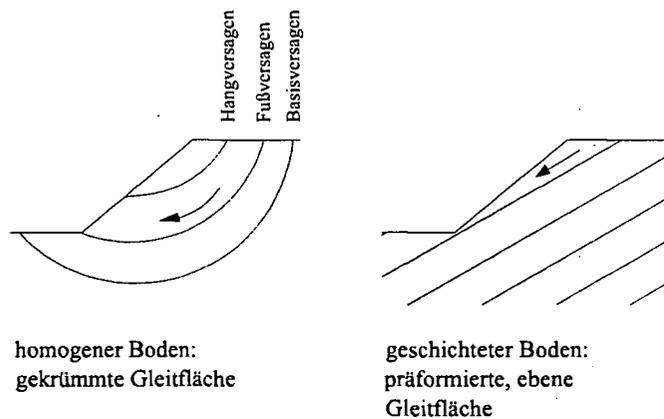
Man unterscheidet diese Bereiche in *präformierte* und in *bei Bewegung entstehende* Gleitzonen (Abb. 4.10). Präformiert nennt man jene Zonen, die vor der eigentlichen Bewegung bereits vorhanden sind und deren Auslösung hauptsächlich mitverursachen. Dieser Typus ist charakteristisch bei **Translationalrutschungen**. Anders verhält es sich bei **Rotationsrutschungen** deren Gleitflächen erst durch die Bewegung entstehen. Rotationsrutschungen entstehen durch Materialbruch, Translationsrutschungen durch geringe Scherfestigkeiten entlang von Gleitschichten. Bei Festgesteinsrutschungen sind meist Unstetigkeiten wie Schichtfugen, Schiefer- und Klufflächen ausschlaggebend.

Eine dritte Art der Gleitbewegungen kann das **Blockdriften** ('lateral-spread-Rutschung') sein. Es ist aber für diese Arbeit nicht relevant und soll hier nur eine Erwähnung finden. Spezielle Gleitflächentypen werden später erwähnt.

Tabelle 4.11: Arten von Gleitprozessen (exkl. Blockdriften).

Prozessart	Merkmale	Ursachen
Rotationsrutschung	gekrümmte Gleitfläche, tiefgründig	Mächtigkeit, Porenwasserdruck
Translationsrutschung	vorgezeichnete Gleitfläche, seichtgründig	Schichtaufbau, Zwischenabfluss
Blaiken	rutschen der Vegetationsdecke samt Wurzelschicht	Schneedruck

Der Entstehungsmechanismus von Gleitvorgängen erklärt sich mit der Überwindung der *haltenden Kräfte* durch die *treibenden Kräfte*. Haltende Kräfte sind jene, die einer Bewegung Widerstand leisten. Dazu gehören die Scherfestigkeit des Materials oder die Bewehrung des Bodens durch Pflanzenwurzeln. Die treibenden Kräfte sind jene, die eine



**Abbildung 4.10:** Grundsätzliche Gleitflächenformen

Bewegung verursachen. An erster Stelle sind das die Scherspannung, der Porenwasserdruck und das Eigengewicht der Rutschmasse. Die Sicherheit gegen das Abrutschen wurde bereits mit der weiter oben dargestellten Beziehung 4.1 auf Seite 21 definiert.

Starkniederschläge können die treibenden Kräfte erstarken und größer als die haltenden Kräfte werden lassen (Sicherheitsfaktor wird  $< 1$ ). Die Folge ist ein Scherbruch und das Abrutschen der Gleitmasse.

Die Aktivität von Rutschungen teilt LATELTIN (1997) nach der durchschnittlichen Bewegungsgeschwindigkeit (Tab. 4.12) und nach der Rutschungsmächtigkeit (Tab.4.13) ein:

**Tabelle 4.12:** Klassifikation nach Aktivität. Entspricht der über einen längeren Zeitraum feststellbaren, durchschnittlichen Rutschgeschwindigkeit in cm pro Jahr (LATELTIN, 1997).

Rutschung	Rutschgeschwindigkeit
substabil, sehr langsam	0 bis 2 cm
wenig aktiv, langsam	2 bis 10 cm
aktiv (oder langsam mit schnellen Phasen)	> 10 cm

**Tabelle 4.13:** Klassifikation nach Tiefe der Gleitfläche (in m unter Terrain) (LATELTIN, 1997).

Rutschung	Gleitfläche
oberflächlich	0 bis 2 m
mitteltief	2 bis 10 m
tief	>10 m



Tabelle 4.14: Morphologische Merkmale einer Rotationsrutschung (BUNZA, 1992, S. 100).

Rutschungsart	Rotationsrutschung	
Material	bindige oder nichtbindige Böden	
Stabile Teile in der Umgebung der Rutschung	Krone	zahlreiche, meist halbkreisförmige Risse zur Anbruchfläche hin; oberster Teil der ursprünglichen Hangoberfläche
	Ablösungs-, Anbruchfläche	steile, konkav oder unregelmäßig gekrümmte Gleitfläche, oberer Teil meist senkrecht, z. T. mit Rutschstreifen oder -furchen
	Flanken	Höhe der seitlichen Anbruchfläche nimmt gegen den Fuß hin ab. Rutschflanken können höher sein als die Rutschfläche zwischen Fuß und Zunge; Risse an den Flanken staffelförmig angeordnet; Rutschstreifen an den Ablösungsflächen der Flanken; oben mehr senkrecht, unten fast waagrecht
Bewegte Teile	Kopfregion	flacher als die ursprüngliche Hangoberfläche oder sogar zum Hang hin geneigt; vielfach bilden sich hier Nackenseen oder Vernässungszonen aus; transversale Risse; kleine Rutschungen, Gräben, Aufwerfungen; Bäume zum Hang hin geneigt
	Rutschkörper	meist zerbrochen, z. T. in Stufen zerlegt; Längsrisse, Stauchwälle und Verebnungszonen; oberhalb des Fußes können sich Nackenseen und Vernässungszonen entwickeln; Baumstellung nach allen Richtungen möglich
	Fuß	transversale Stauchwälle und Risse; Auftriebszone; keine Einzelblöcke mehr; Baumstellungen vom Hang weg
	Zunge	oft eine Zone des Erdfließens, geklappte Form, Radialrisse, überfahrenes und begrabenes Material. Bäume liegen z. T. flach oder in verschiedenen Winkeln, z. T. sind sie ins Material eingearbeitet

**Rotationsrutschung** Diese Gleitbewegungen finden ausschließlich in kohäsiven Substraten statt. Das sind vor allem tonige und siltige Lockergesteine wie Tonsteine in unverwittertem Zustand oder Geschiebemergel (LEWIN, 1998, S 260). Meist handelt es sich um eher tiefgründige Bewegungen. Da sie mechanisch ein quasi-isotropes Verhalten des Substrats voraussetzen, d. h. dass die Bodenfestigkeit nicht richtungsabhängig, sondern in alle Richtungen gleich groß sein muss. Das kommt aber in der Natur nur selten vor, weshalb reine Rotationsrutschungen die Ausnahme sind. Es entstehen vorwiegend komplexe Bewegungen (Abb. 4.11, Kapitel 4.2.7).

Wie bereits erwähnt, entsteht eine Gleitfläche bei diesem Bewegungstyp erst zu Beginn der Rutschung in einem kurz zuvor noch unbeschädigten homogenen, jedoch unter hoher Spannung stehenden Bodenkörper. Aus diesem Grund kann vor einer Rutschung auch durch Bodenaufschlüsse (Bohrungen) keine potentielle Gleitfläche erkannt werden.

Die Gleitfläche weist eine gekrümmte (konkave) Gleitform auf (Abb. 4.10, links), die aufgrund ihrer Geometrie als *Muschelanbruch* bezeichnet wird. Dadurch lassen sich Rotationsrutschungen relativ rasch von Translationsrutschungen, welchen annähernd planare (geradlinige) Gleitflächen (*Blattanbruch*, Abb. 4.10, rechts) eigen sind, unterscheiden. In der Bodenmechanik gibt es Verfahren um diese Gleitflächen zu berechnen und zu lokalisieren, bekannt unter der Bezeichnung Gleitkreisberechnung.

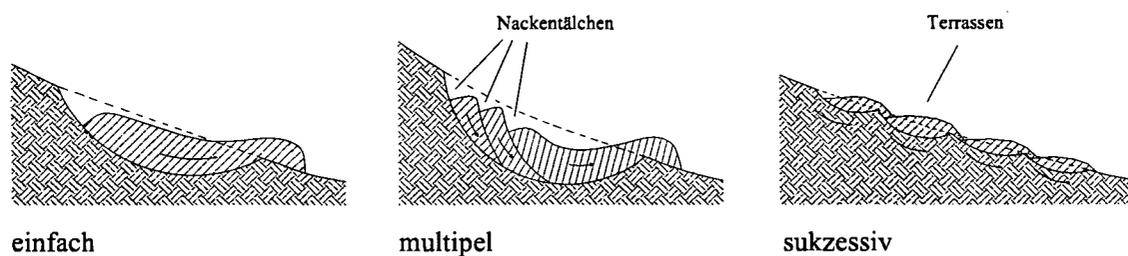


Abbildung 4.12: Arten von Rotationsrutschungen.

Bei Rotationsrutschungen bewegen sich Erdmassen um eine quasi-horizontale Achse „rotierend“ und verlagern sich dadurch hangabwärts. Dabei können einfache, multiple oder sukzessive Rotationsbewegungen entstehen (Abb. 4.12). Diese Rutschungsform tritt, wie gesagt, selten in Reinform auf. Meist geht die rotationale Bewegung unterhalb der Gleitfläche in andere Formen über, je nach den herrschenden Bedingungen. Frontal wird die Rutschmasse aufgestaucht, zerfällt und geht bei starker Wassersättigung teils in schlammige Fließrutschungen (sog. Hangmuren) über (LATELTIN, 1997).

Die Stabilität von Hängen auf kohäsiven, für Rotationsbewegungen prädestinierten Substraten, hängt von mehreren Faktoren ab. Für die Auslösung am Bedeutensten sind die Scherfestigkeit des Bodens, die Hanggeometrie und der Wassergehalt. Zu den Eigenschaften der Hanggeometrie merkt LEWIN (1998, S. 260) an, dass es für Rotationsrutschungen keinen kritischen Hangneigungswinkel gibt, da die Stabilität eines Hanges neben dem Neigungswinkel auch von seiner Höhe abhängt. Vom Wassergehalt wird u. a. der Porenwasserdruck und das Gewicht der Rutschmasse bestimmt. Im Substrat können Risse, oder andere Unstetigkeiten, Erschütterungen durch Erdbeben, sowie menschliche Eingriffe (Straßenbau, Gebäude, etc.) die Hängstabilität beeinflussen. Steigen diese

Parameter – was in der Regel infolge Starkniederschlägen geschieht – auf Werte, die die so genannten rückhaltenden Kräfte eines Hanges (allen voran die Scherfestigkeit) übersteigen, kommt es zum Versagen und der 'Hang geht ab'. Rotationsrutschungen treten (im Gegensatz zu Translationsrutschungen) meist erst eine gewissen Zeitspanne nach Regenfällen auf, weil das Wasser erst in den Boden einsickern muss, um zu einem auslösenden Faktor zu werden.

Die Abtragungsraten durch Scherflächenrutschungen beschreibt LEWIN (1998, S. 260) als relativ gering und gibt als Richtwerte wenige Zentimeter bis wenige Meter pro Jahr an. SCHINDLER (1996, S. 14) nennt Geschwindigkeiten von Dezimeter pro Jahr und gibt auch Beispiele für Ausnahmefälle an, die viel rascher Verschiebungen, ohne Zusammenbruch der Rutschmasse, von mehreren Decametern pro Tag nennen.

Laut LEWIN (1998, S. 260) sind aktive Rotationsrutschungen nur auf Hänge beschränkt, „an deren Fuß keine Abtragung stattfindet“, mit der Begründung, dass „nur dort intaktes, unverwittertes Material länger in einem stabilen Zustand bleiben kann. Durch angreifende Verwitterung verlieren ursprünglich kohäsive Substrate allmählich ihre Bindekraft, und es kommt zu Hangabtragungen, die durch die Eigenschaften von nichtkohäsivem, verwittertem Substrat bestimmt sind.“ Dieser Erklärung widerspricht SELBY (1993), denn er schreibt: „They (Slumps) occur also under entirely natural conditions, especially where the toe of a slope has been undercut by river or wave action.“ Der scheinbare Widerspruch relativiert sich jedoch, wenn einige Zeilen weiter zu lesen ist: „Slumps with failure planes at depth occur in cohesive soils ...“. Für beide Autoren bedingen tiefgründige Rotationsrutschungen also in erster Linie kohäsives Material, weswegen eine Entstehung durch Abtragung eines Hangfußes aber nicht völlig auszuschließen ist.

Durch Rotationsrutschungen, besonders wenn sie wiederholt stattfinden, wird ein Gebiet auf ganz charakteristische Weise geprägt: Es entsteht ein buckelig-unruhiges Gelände mit deutlichen Steilhängen. Ausschlaggebend für diese Reliefform sind Rutschblöcke, die flacher als die ursprünglichen Hänge und manchmal sogar entgegengesetzt geneigt sind. Dies kommt daher, dass die kohäsiven Rutschkörper auf gekrümmten Flächen abgleiten, aber nicht zerfallen. Somit bleibt die ehemalige Oberfläche des Rutschblockes bestehen, flacht sich ab und neigt sich in vielen Fällen sogar entgegen der Hangneigung. Durch dieses Phänomen entstehen in den Flächen zwischen der Abrissfläche einer Rutschung und der gegengeneigten Oberfläche des Rutschblockes sogenannte *Nackentälchen* und *Zerrspalten* (siehe Abb. 4.12, mittlere Skizze). In nämlichen Nackentälchen können je nach

ihrer Größe kleinere Teiche bis Seen entstehen, die nach SELBY (1993) eine Fortsetzung der Bewegung provozieren oder beschleunigen können.

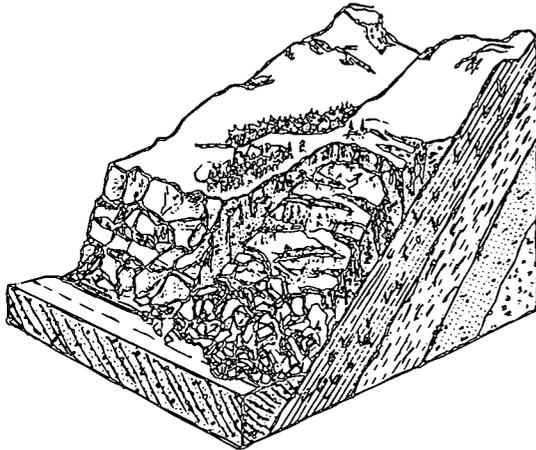


Abbildung 4.13: Translationsrutschung.

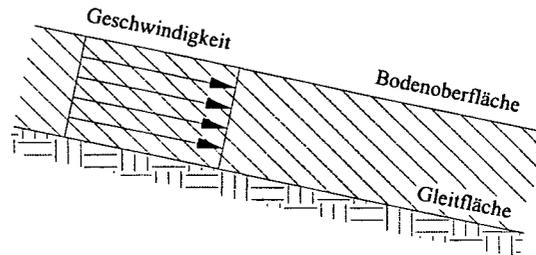


Abbildung 4.14: Prinzipskizze zum Gleiten. Wegen der en bloc-Verlagerungen sind Geschwindigkeiten und Verlagerungsdistanzen an jedem Punkt der Gleitmasse gleich (ZEPP, 2002, S. 106).

**Translationsrutschung** Translationale Bewegungen sind meist seichtgründig (LEWIN, 1998; SELBY, 1993, jeweils S. 260). Sie sind die wohl am meisten verbreitete Form von Rutschungen und entstehen häufig auf Flysch, kalkigen Mergelschiefern oder metamorphen Schiefen (CENAT, 2007). Tiefgründige (bis mehrere Zehnermeter) Translationsrutschungen treten auf, wenn die Scherflächen geologisch bedingt sind.

Translationsrutschungen sind gekennzeichnet durch ebene (planare), maximal leicht gewellte, annähernd oberflächenparallele Gleitflächen. Diese können in Entstehung, Form oder Aufbau verschiedenartig sein, gleichen sich aber in deren Auswirkung. Sie bezeichnen Inhomogenitäten oder Schwächezonen wie sedimentäre oder tektonische Trennflächen oder Bruchflächen, sowie Zonen erhöhten Porenwasserdruckes.

Am häufigsten entstehen die Gleitzonen entlang der Grenze zweier Bodenmaterialien, die sich in ihrer Scherfestigkeit oder Wasserdurchlässigkeit unterscheiden (Tab. 4.16):

Liegt etwa eine permeable, also wasserdurchlässige Schicht einer bindigeren, undurchlässigeren Schicht auf, bildet sich an der Oberfläche der unteren Schicht eine wasserstauende Zone, worauf bei Starkregen ein konzentrierter Abfluss innerhalb des Hanges entsteht. Nach SELBY (1993, S. 216) gibt es mehrere Termini für diese hanginternen Abflüsse: *Interflow*, *Throughflow* und *Return Flow*. Ersterer beschreibt Wasserbewegungen in Verbindung mit dem Grundwasser. Der Zweite, der im gegenständlichen Zusammenhang wichtig ist, meint speziell den Abfluss der durch in porösem Material

Tabelle 4.15: Morphologische Merkmale einer Translationsrutschung (BUNZA, 1992, S. 113).

Rutschungsart	Translationsrutschung	
Material	bindige oder nichtbindige Böden	
Stabile Teile in der Umgebung der Rutschung	Krone	Spannungsrisse oberhalb des Abrissgebietes verlaufen in etwa horizontal und folgen mehr oder weniger der Hangkontur
	Ablösungs-, Anbruchsfläche	meist glatte, hangparallele Kahlflächen, im oberen Teil meist steiler als weiter unten
	Flanken	Ablösungsflächen hier ziemlich tief reichend, Flankenrisse in etwa vertikal verlaufend
Bewegte Teile	Kopfregion	falls vorhanden – relativ unzerstört, keine Rotation, viele Blöcke
	Rutschkörper	entweder eine oder mehrere Schollen, Einheiten vielfach auch zerbrochen und über die Anbruchsfläche verteilt, unzerstörte Schollen zeigen kleine Dehnungsrisse
	Fuß	kein Fuß, eine Zone des Auftriebs fehlt
	Zunge	die Hangoberfläche wird hier eventuell von den Rutschmassen umgepflügt oder sie wird überflossen; dabei bilden sich Stauchwälle und Verebnungszonen (zunehmender Gleitwiderstand von oben nach unten); Stauch-Druckbeanspruchung in der Akkumulationszone; Erdfließen kann vorkommen
	Vernässungszone	kaum vorhanden und meist nur schwach ausgeprägt
Neigungsrichtung rutschgeschädigter Bäume: ungerichtet		

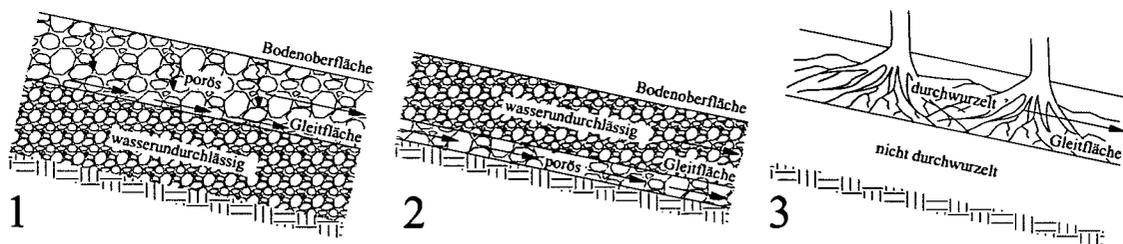
Tabelle 4.16: Gleitflächen von Translationsrutschungen.

Gleitflächentypen	
Grenze	permeabler zu weniger permeablen Bodenschichten
	Boden/Regolith zu Saprolit (Lockergestein)
	Boden zu Fels (Festgestein)
	durchwurzelter zu undurchwurzeltem Bodenkörper
(dünne) Zwischenschichten geringer Scherfestigkeit	

versickerndes und auf weniger permeablen Schichten dann sich stauendes und abfließendes Wasser entsteht. Und der Dritte ist ein genereller Terminus für Wasseraustritt aus einer

begrabenen Oberfläche an die Bodenoberfläche. Oft wird jedoch für jegliche Art von Zwischenabflüssen pauschal der Begriff Interflow verwendet (Abb. 4.15, 1 u. 2).

Im gleichen Prinzip, nur in umgekehrter Reihenfolge, kann eine Gleitfläche aus einer dünnen, porösen Schicht unterhalb einer weniger durchlässigen Bodenschicht entstehen. Dies zeigt KRAUTER (2001, S. 630) anhand eines Beispiels, wo zwischen feinkörnigen Bodenkörpern dünne Feinsandschichten verlaufen, die in niederschlagsreichen Zeiten Porenwasserüberdrücke aufbauen und somit die obere undurchlässigere Schicht zum Abgleiten bringen können (Abb. 4.15, 2). In beiden Fällen entstehen im Initialstadium einer Bewegung meist Querrisse (Zugrisse) am Hang, wodurch oberflächlich abfließendes Wasser leichter zu der Gleitfläche gelangt und die Rutschneigung dadurch erhöht wird.



**Abbildung 4.15:** Schematische Darstellung von Gleitschichten. 1 durchlässige auf undurchlässiger Schicht; 2 poröse Zwischenschicht; 3 Gleitschicht unter Wurzelgrenze.

In Lockergestein bildet die Grenze zwischen unverwitterten (regolithischen) und verwitterten (saprolithischen) Gesteins- bzw. Bodenschichten häufig eine Scherzone aus. Diese Schichtgrenze ist jedoch nur schwer zu erkennen, da der Übergang zwischen verwittertem und unverwittertem Gestein nicht eindeutig zu definieren ist. Interessant ist jene Gleitzonenspezies, die durch Pflanzenwurzeln hervorgerufen wird. Üblicherweise stehen Wurzeln für Stabilisation. Wird aber ein homogener Bodenkörper flächig von Wurzeln der gleichen Länge und Bewurzelungsdichte durchwachsen, wie es beispielsweise bei Fichtenmonokulturen vorkommt, teilt er sich in zwei Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Die Untergrenze des bewurzelten Raumes stellt hierbei die Grenzschicht dar, auf welcher der obere durchwuzelte Bodenkörper unter bestimmten Bedingungen abrutschen kann (u. a. Blaikten). Schematisch zeigt dies Abbildung 4.15, 3. Auch primär oder sekundär eingeregelter flächiger Mineralien können als Gleitfläche wirken.

Nachdem bei Translationsrutschungen die Gleitzonen vorgezeichnet sind, können die Ausmaße und der Zeitpunkt der Bewegung eher erahnt werden, als dies bei Rotationsrutschungen möglich ist.

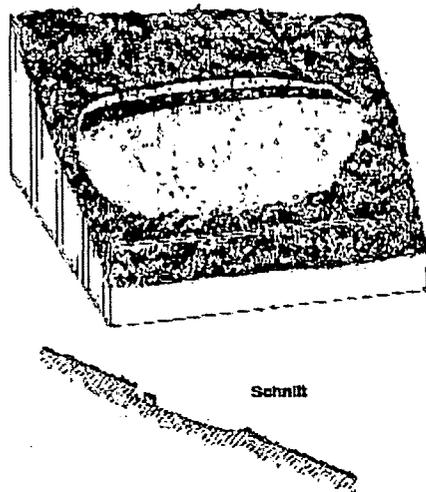
Auch hier spielen viele Faktoren eine Rolle. Während die kohäsiven Substrate von Rotationsbewegungen ein isotropes Festigkeitsverhalten aufweisen, ist die Scherfestigkeit in potentiell translativ aktiven Hängen anisotrop verteilt. Das heißt, entlang der Gleitzone bestehen deutliche Festigkeit-Minima, während die darüber und darunterliegenden Schichten auch höheren Scherbeanspruchungen standhalten können. Deshalb ist die Hangbewegung hauptsächlich von der Scherfestigkeit dieser verhältnismäßig schmalen Zone abhängig.

Nach LEWIN (1998, S. 260) ist unter den Eigenschaften der Hanggeometrie bei Translationsbewegungen nur eine ausschlaggebend, nämlich die Hangneigung. Mit steigender Wasseraufnahme bei Regenereignissen erhöht sich die Scherspannung, die auf die schwache Gleitzone einwirkt. Weitere bestimmende Faktoren sind der Porenwasserdruck (außer bei grobkörnigsten, nichtkohäsiven Regolithen) und das Gewicht der potentiellen Rutschmasse, deren Ausmaße ebenfalls vom Wasserhaushalt abhängen. Übersteigen die treibenden Kräfte (Scherspannung) die haltenden Kräfte (Scherfestigkeit), kommt es zum Hangversagen und die Rutschmasse bewegt sich hangabwärts. Translationsrutschungen treten meist schon während den ausschlaggebenden Starkregenniedergängen auf, im Gegensatz zu anderen Bewegungstypen, wie Rotationsrutschungen, die zeitlich versetzt auftreten (SELBY, 1993, S.263). Die Bewegungsgeschwindigkeit ist laut LEWIN (1998) höher als bei Rutschungen in kohäsiven Material, aber trotzdem noch relativ gering.

Anders als kohäsive Rutschmassen verlieren Kohäsionslose nach der Rutschung ihren Zusammenhalt und zerfließen hangabwärts, wobei eine exponierte Abrissnische zurückbleibt, deren Form noch einige Zeit erhalten bleiben kann. (LEWIN, 1998, S. 260). Latent aktive Rutschungen, mit noch zusammenhängendem Rutschkörper, zeigen eine Tieferlegung des Geländes. Zur Morphologie von Translationsrutschungen gibt die Tabelle 4.15 auf Seite 36 nähere Auskunft. Zu den Baumstellungen siehe auch Kapitel 6.4 auf Seite 87.

Eine besondere Form translativer Bewegungen, die im Untersuchungsgebiet häufig vorgefunden wurden, sind die sogenannte Blaikten.

**Blaiken** Darunter werden nach SCHAUER (1975) Erosionsformen verstanden, die durch Gleiten oder Rutschen einer geschlossenen Vegetationsdecke samt Wurzelschicht und Erdreich mit einer Mächtigkeit von etwa 20-40 cm und einer Flächengröße von 2-200 m<sup>2</sup> entstehen. Der Rutschung dieser blattigen, meist großflächigen Vegetationsschollen gehen



**Abbildung 4.16:** Typische Blaike. Am oberen Rand ist bereits ein neuer Streifen der geschlossenen Vegetationsdecke nachgerutscht (SCHAUER, 1975).



**Abbildung 4.17:** Formen von abgerutschten Grasschollen (SCHAUER, 1975).

Zugrisse quer zum Hang von 1 bis 20 m Länge und mehr am Oberhang voraus. Ausgelöst werden diese Zugrisse mit anschließendem Abgleiten von Humus- und Vegetationsdecke vor allem durch Schneekriechen, das sich grundsätzlich anders auswirkt wie Schneeschurf. Bei letzterem entstehen hangabwärtsgerichtete, längliche Aushobelungsformen, wobei allmählich die Vegetationsdecke, dann nach und nach die Humus- und tieferen Bodenschichten abgetragen werden. Schneeschurf tritt erst bei Hangneigungen um 35-40° in größerem Maße auf, während Schneekriechen bereits bei 30° und weniger vorkommt und auf weicheren, ton- und schluffreichen Schichten zu einer Blaikenbildung führt.

Die Scherkraft der Schneemassen überträgt sich auf die Vegetation samt Wurzel- und Bodenschicht und zwar umso mehr, je höher die Reibung zwischen der Vegetation und dem hangabwärts kriechenden Schnee ist. Dabei bieten horstbildende Gräser und hochwüchsige Kräuter zumindest im eingefrorenen Zustand dem Schneekriechen einen hohen Widerstand (erhöhte Reibung), der bei kurzgehaltenem Gras (Mahd, Weide) wesentlich geringer ist.

Je steiler der Hang und je wirksamer damit die Schwerkraft, je stärker die Belastung, je größer die Schneemasse, je stärker die Haftung und Verbindung der Schneedecke mit der

Vegetationsdecke und je dünner die durchwurzelte und zusammengehörige Bodenschicht, um so häufiger treten Zugrisse und damit Ansätze zu Blaiken auf.

In die Zugrisse dringt oberflächlich abfließendes Niederschlagswasser ein und fließt hangparallel an der Untergrenze des Wurzelhorizontes der Vegetationsgrenze ab. Dabei entsteht ein Gleithorizont, auf dem die obere Boden- und Vegetationsschicht, ausgelöst durch Starkregen oder hoher Schneelast, abgleitet.

Ihre Zugehörigkeit zu den translativen Gleitprozessen zeigen die Blaiken auch in ihrer Morphologie: Die Blattanbrüche sind häufig viel breiter (quer zum Hang) als hoch; ihre Rutschfläche ist hangparallel und meist eben.

Besonderen Einfluss auf die Entstehung von Blaiken hat die Beweidung. Sie wirkt aber nicht destabilisierend, sondern sogar stabilisierend. Gründe für diesen positiven Einfluss sind die dabei entstehende Terrassierung des Hanges und die sogenannten Viehgangeln (Abb. 4.18). Beide unterteilen oder zerstückeln die potentiellen Rutschmassen und verhindern somit ein großflächiges Abrutschen. Als Problematisch zeigt sich das in den letzten Jahrzehnten immer schwerer werdene Vieh, aber auch eine Extensivierung oder das gänzliche Auflassen von Weiden. Dadurch entfällt die stabilisierende Wirkung der Beweidung, sie wandelt sich postum sogar zu einer blaikenfördernden Wirkung um.



**Abbildung 4.18:** Treppenprofil eines Hanges im Querschnitt. Flachere tiefgründige Stellen mit hochwüchsiger Vegetation; steilere flachergründige Blaikenstellen mit lockerer Vegetation (SCHAUER, 1975).



**Abbildung 4.19:** Blaiken durch Schneedruck auf den Grünlerlenstrauch entstanden.

Eine sehr ausführliche Darstellung zu der Rutschungsform *Blaiken* bietet das in diesem Abschnitt ausschließlich zitierte Heft 1 der Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, verfasst von SCHAUER (1975).

**Blockgleiten/Blockdriften** Es handelt sich um flache bis sehr tief reichende Felsbewegungen. Sie entstehen durch Plastifizierung der unterliegenden Schichten, wodurch härtere (kompetentere) Großluftkörper auf oder in weicheren (inkompetenteren) Schichten gleiten. Als Ursache ist das Eigengewicht zu sehen (KRAUTER, 2001). Diese Bewegungen sind eher unüblich, wenn dann in sehr kleinem Ausmaß (SELBY, 1993).

#### 4.2.5 Driften

Definition nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993):

*Driften (lateral spreading) ist eine laterale Bewegung von Fels- oder kohäsiven Bodenmassen bei einem gleichzeitigen Einsinken in die liegenden weniger kompetenten Schichten. Eine intensive Scherung auf Gleitflächen findet nicht statt. Driften kann durch Liquifaktion oder Fließen (und Extrusion) des liegenden weniger kompetenten Materials entstehen.*<sup>1</sup>

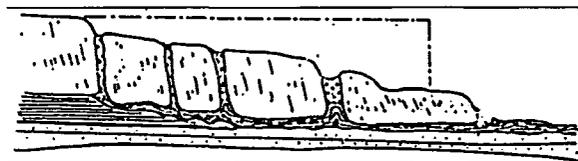


Abbildung 4.20: Bewegungstyp Driften (FEUERBACH, 2004).

Als Driften werden allgemein langsame, seitliche Ausbreitungsbewegungen bezeichnet, die keine deutlich ausgeprägte Gleitfläche aufweisen. Diese Bewegung findet dann statt, wenn feste, kompakte Fels- oder Bodenmassen auf einem weicheren, duktilen Sockel aufliegen. Eine prädestinierte und häufige Kombination sind Karbonate auf Mergeln oder Tonsteinen. Spezielle Formen des Driftens sind *Blockbewegung* (flach bis sehr tief), *Talzus Schub* und *Bergzerrei ßung* (tief bis sehr tief).

<sup>1</sup>Einige Begriffserklärungen: *Das Liegende*: Ursprünglich bergmännischer Begriff. In der Geologie bezeichnet es Horizonte oder geologische Schichten, die unterhalb des *Hangenden* liegen. Das Liegende muss nicht zwingend älter sein als das Hangende und stellt mitunter besonders interessante Schichten wie etwa eine Scherzone dar.

*weniger kompetent*: = weniger kompakt, weicher.

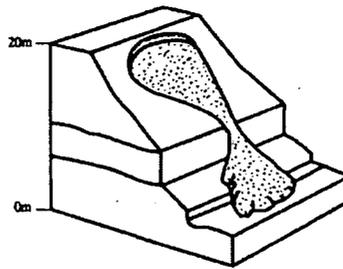
*Liquifaktion*: Verflüssigung von Sedimenten durch Einfluss von Erdbeben, Treibsand oder „Quick Clay“. Gesättigter unterkonsolidierter Boden oder Sand wird in eine Suspension übergeführt.

*Extrusion*: Ausfließen von Magma auf der Erdoberfläche in Form von Decken und Strömen; Sammelbegriff für das Auspressen zähflüssiger Gesteinsschmelzen aus Vulkanen.

### 4.2.6 Fließen

Definition nach MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993):

*Fließen (flow) ist eine räumliche, kontinuierliche Bewegung bei der Scherflächen nur kurzzeitig vorhanden, dicht angeordnet und gewöhnlich nicht erhalten sind. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit.*



**Abbildung 4.21:** Bewegungstyp Fließen. MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993).

Fließprozesse treten auf, wenn grober Schutt, feinkörniger Boden oder feinstkörniger, toniger Boden verflüssigt werden. Nach diesen Materialien unterscheidet SELBY (1993) zwischen Schutt-, Erd- und Schlammfließen.

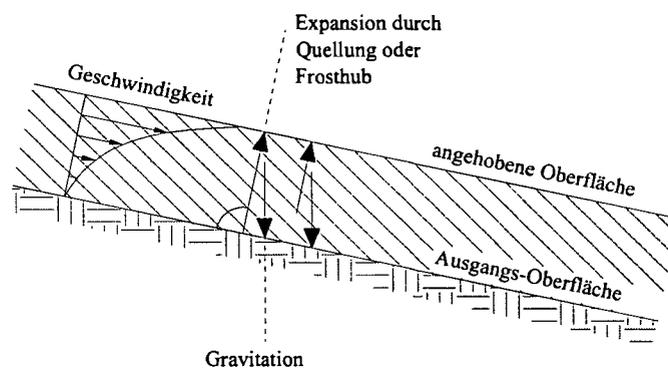
Die Neigung einer Rutschmasse, sich fließend zu verlagern, wird gefördert durch einige vorbereitende Faktoren: Rutschungen können Material für Fließbewegungen vorbereiten und bereitstellen; Vorhandensein von Tonen mit einer hohen Fließgrenze nach Atterberg in niederschlagsreichen Gebieten; Das Vorhandensein von Böden mit niedriger Fließgrenze in Gebieten mit wenig Niederschlag - solche Böden zeigen schon durch geringe Wasserzufuhr flüssigkeitsähnliches Verhalten; das Vorhandensein von Böden mit offenem Gefüge, das durch Koagulation bei der Ablagerung entstanden ist; oder das Auftauen von Eis (SELBY, 1993, S. 263f).

Innerhalb des Prozesstyps Fließen bestehen zwei Mechanismenkomplexe, die sich in Entstehung und Geschwindigkeit unterscheiden. Einerseits gibt es das schnelle Fließen (per se), andererseits das langsame Kriechen. Diese beiden verhalten sich zueinander grob gesagt, wie das Fließen von Wasser zum Fließen von Glas.

**Fließen** LEWIN (1998) schreibt von mehreren, in Material, Mechanismus, Geschwindigkeit und Ausmaß sich unterscheidenden Arten von Fließprozessen. Sehr große Bergstürze

können verdichtete Luft einschließen, sodass sich der Schutt wie auf einem Luftkissen mit sehr hoher Geschwindigkeit mehrere Kilometer weit fortbewegt. In grobkörnigem Regolith kann Rutschfließen durch extrem hohen Porenwasserdruck ausgelöst werden und durch ständige Zufuhr von Wasser aufrechterhalten werden.

Als Muren (oder Schlammströme) bezeichnet man fließende Bewegungen von Sediment, ausgelöst durch große Wassermengen. Im Gegensatz zu hochwasserführenden Wildbächen ist bei Muren (volumenbezogen) oft mehr Sediment als Wasser beteiligt und auch grobe Partikel fließen mit der Geschwindigkeit des Wassers. Die Prozessgeschwindigkeit ist in der Regel sehr hoch (1 bis  $10 \text{ m s}^{-1}$ ).



**Abbildung 4.22:** Prinzipskizze zum Fließen/Kriechen. Geschwindigkeit der hangabwärts gerichteten Verlagerung nimmt mit zunehmender Tiefe ab (ZEPP, 2002, S. 105).

**Kriechen** „Unter Kriechbewegungen versteht man langsame, hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Schutt in einer feineren Matrix. Sie sind durch zyklische Expansions- und Kontraktionsvorgänge im Substrat bedingt, wodurch eine dem Gefälle folgende Bewegung entsteht. Einzelne Gesteinsfragmente können durch zyklische Expansionsvorgänge bei Erwärmung/Abkühlung oder Tauen/Gefrieren nach oben verlagert werden („Auffrieren“) falls das umgebende Material locker ist“ (LEWIN, 1998, S. 260). Im periglazialen Bereich gibt es die Sonderform der Solifluktion (oder Gelifluktion), die durch kompliziertere Mechanismen (Frosthebung) im Permafrost hervorgerufen werden (Abb. 4.24). Solifluktion ist das Hangabwärtsfließen, oder -kriechen der obersten, lockeren, wasserdurchtränkten Bodenschicht und kann etwas höhere Geschwindigkeiten als andere Kriechprozesse erreichen. Kriechbewegungen betreffen meistens großflächige Gebiete. Sie sind in ihrer Tiefe aber nur sehr gering, wobei die Wirkung mit der Tiefe rasch abnimmt.

Ein kriechendes Gelände zeigt typische Merkmale wie schiefstehende Strommasten oder Säbelwuchs von Bäumen (Abb. 4.23).

Großvolumige Arten von Fließprozessen sind Talzus Schub und Bergzerreißung. Diese bezeichnen langzeitiges Fließen (Kriechen) zusammenhängender Massen, die stets vom Hangfuß ausgehend nahezu den gesamten Hang in Falllinie erfassen (KRAUTER, 2001).



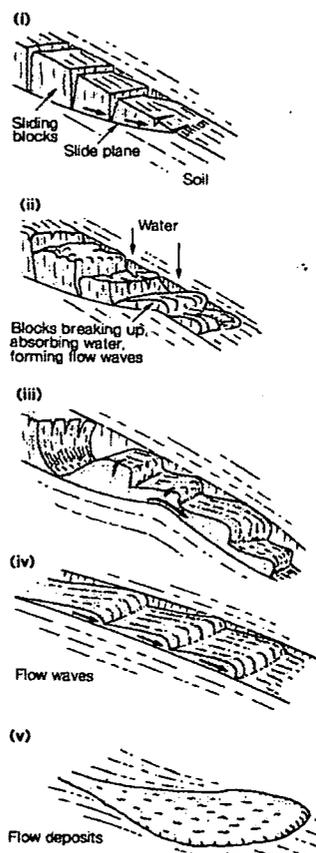
**Abbildung 4.23:** Landschaftsmorphologie durch Kriechen (CENAT, 2007).



**Abbildung 4.24:** Wulstgirlanden. Solifluktuonserscheinung im Hochgebirge (Quelle unbekannt).

### 4.2.7 Kombinationen/Komplexe

Die meisten Rutschungstypen kommen nicht in Reinform vor, sondern transformieren sich – oder entstehen in ihrem Verlauf – aus anderen Prozessen. Zum Beispiel verwandelt sich eine Rotationsrutschung nach dem Verlassen ihrer Gleitfläche in einen Schuttstrom, wie Abbildung 4.11 zeigt. Dazu muss das Wasserangebot genügend groß sein. Abbildung 4.25 zeigt den Übergang einer Translationsrutschung zu einer Fließrutschung.



**Abbildung 4.26:** Beispiel für eine zusammengesetzte Rutschbewegung. Eine Rotationsrutschung geht in eine Translationsrutschung über (BUNZA, 1992, S. 118).

**Abbildung 4.25:** Beispiel für komplexe Rutschbewegung. Die Darstellung zeigt eine schematische Sequenz von Prozessen entlang eines Rutschkanals, initiiert durch einen translationalen Gleitprozess (SELBY, 1993, S. 305).

Bodenerosion ist bei fast allen Bewegungen beteiligt. Das nächste und letzte Kapitel zu den Hangprozessen soll diese Form der Massenbewegungen vorstellen.

### 4.2.8 Erosion

Ob die Bodenerosion als Hangbewegung bezeichnet werden kann oder nicht, soll hier nicht diskutiert werden. Dass dieser Abtragungsprozess für die Ingenieurbiologie relevant und deshalb gleich zu bewerten ist wie das Gleiten, steht aber fest. Deshalb wird in diesem Kapitel der Erosion (gemeint ist hier stets die Bodenerosion) breiter Raum gewidmet.

Über die Erosion auf Hängen schreibt SELBY (1993, S. 219):

*„Erosion is an inclusive term for the detachment and removal of soil and rock by the action of running water, wind, waves, flowing ice, and mass movement. On hillslopes in most parts of the world the dominant processes are action by raindrops, running water, subsurface water, and mass wasting.“*

Erosion ist also ein durch abfließendes Wasser, Windeinfluss, Wellenschlag, gleitendes Eis (Gletscher) oder ein durch Massenbewegungen verursachtes Ablösen von Bodenpartikeln (Primärteilchen oder Aggregate) oder Festgesteinesteilen aus ihrem Gefüge inklusive deren Abtransport. Je nach Transportmedium spricht man von Wassererosion oder Winderosion, um nur die beiden für Bodenerosion wichtigsten Vertreter zu nennen. Hinzu kommen Sonderformen wie Schneeschurf durch Kriechschnee oder die Verlagerung bei der Bodenbearbeitung (SCHEFFER et al., 1998).

**Wassererosion** kann auf verschiedenen Wegen vonstattengehen. Durch den Aufprall von Regentropfen auf Bodenaggregate (Tab 4.17), werden diese zerteilt und bis zu 1,5 m weit weg geschleudert (der so genannte 'Splash- Effekt', Abb. 4.27). Da die abgesprengten Bodenpartikel bergab weiter fliegen als bergauf, kommt es zu einem Nettotransport hangabwärts. Die Wirkung der Regentropfen wird vergrößert durch Luftsprengung. Das geschieht, wenn sommerlicher Starkregen auf eine ausgetrocknete Bodenoberfläche trifft und das in die Aggregate eindringende Wasser Luft miteinschließt, wodurch diese auf Drücke von bis zu 6000 hPa komprimiert werden und somit zum Zerbersten der Aggregate führen kann. Zusätzlich können Scherrisse bei anisotropen Quellen entstehen, wodurch Wasser schneller eindringen kann. Die Regentropfen verdichten gleichzeitig durch ihren Druck die Bodenoberfläche. Die abgelösten Feinteile werden vom Regenwasser in den Boden eingeschwemmt und verstopfen dadurch die Poren, was die Infiltrierbarkeit des Bodens vermindert und den Oberflächenabfluss begünstigt. Wie in Tab. 4.17 zu lesen ist, vergrößert sich mit zunehmender Intensität des Regens der Tropfendurchmesser. Damit

**Tabelle 4.17:** Niederschlagsintensität, medianer Tropfendurchmesser, mittlere Fallgeschwindigkeit, Tropfdichte und kinetische Energie bei unterschiedlichen Arten des Niederschlags (SCHEFFER et al., 1998). Tropfdichte aus SELBY (1993) nach Daten von LAWS (1941), LAWS und PARSON (1943) und ELLISON (1947).

Regentyp	Intensität (mm h <sup>-1</sup> )	medianer Durch- messer (mm)	Fall- geschw- indigkeit (m s <sup>-1</sup> )	Tropf- dichte (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	Kinetische Energie (kJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
Nebel	0,1	0,01	0,003	67 000 000	10 <sup>-6</sup>
Sprühregen	0,2	0,1	0,2	27 000	10 <sup>-3</sup>
Nieselregen	0,5	1,0	4,2	150	10 <sup>0</sup>
Leichter Regen	1	1,2	4,9	280	10 <sup>1</sup>
Mittlerer Regen	4	1,6	5,8	500	10 <sup>2</sup>
Starker Regen	15	2,1	6,9	500	10 <sup>3</sup>
Gewitterregen	100	3,0	8,4	130 - 1215	10 <sup>4</sup>

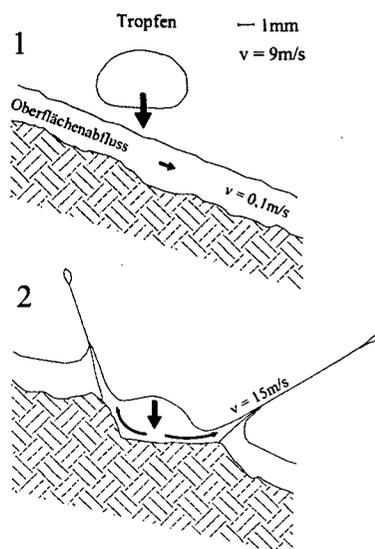
erhöht sich auch die Fallgeschwindigkeit und die Aufprallenergie, da diese gemäß der Beziehung

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (4.2)$$

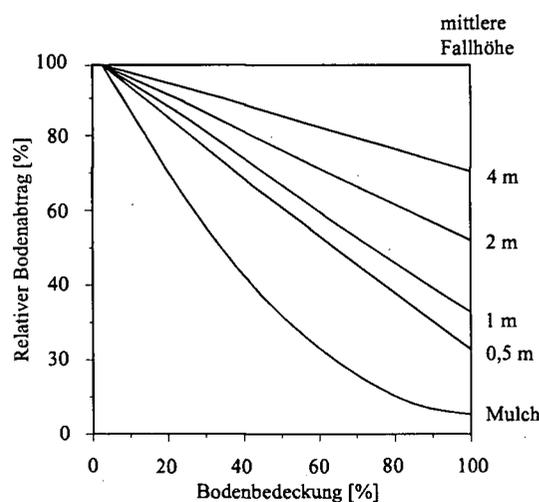
mit steigender Geschwindigkeit quadratisch zunimmt. Da mit der Regenintensität auch die Tropfdichte ansteigt, variiert die kinetische Energie der Regenarten über 10 Zehnerpotenzen.

Die Abbildung 4.27 gibt Geschwindigkeiten des Regentropfens, des oberflächlichen Abflusses und im unteren Bild die Geschwindigkeit der beim Aufprall entstehenden Spritztröpfchen an. Dabei zeigt sich, dass die Spritztröpfchen mit nahezu der doppelten Geschwindigkeit des Tropfens weggeschleudert werden. Das erklärt sich dadurch, dass die beim Aufprall entstehenden Drücke sehr hoch sind und der Tropfen nicht mit seiner Fallgeschwindigkeit in den Boden infiltrieren kann. Darum muss der Tropfen seitlich ausweichen, wobei er beschleunigt wird.

Eine weitere Möglichkeit ist die Erosion durch Oberflächenabfluss die **Spüldenudation**. Die Scherkraft des Abflusses ist zwar geringer als die der Tropfen, aber er wirkt auf einer größeren Fläche und längere Zeit, wodurch auch größere Partikel gelöst werden können. Auch können Turbulenzen und Wirbel örtlich und zeitlich begrenzte Kräfte entwickeln, die die Scherfestigkeit des Bodens überwinden. Durch konzentrierten Abfluss können



**Abbildung 4.27:** Wirkung und Geschwindigkeiten von Regentropfen. Abfluss und Spritztröpfchen beim Auftreffen eines Regentropfens auf eine geneigte, wasserbedeckte Bodenoberfläche (SCHEFFER et al., 1998, S. 366).



**Abbildung 4.28:** Relative Veränderung des Bodenabtrags durch Regen in Abhängigkeit von Bodenbedeckung und ihrer Entfernung zur Bodenoberfläche (SCHEFFER et al., 1998, S. 368).

Rinnen entstehen, die höhere Abtragungsraten bewirken können. Wie Abbildung 4.29 zeigt, können durch spezielle Gesteinskonfigurationen extreme, bizarre Formen entstehen.

Sozusagen als Übergangsform zwischen dem Tropfen- und dem Abflusstransport fungiert der **Dünnschichtabfluss**. Dabei ist der Wasserfilm an der Bodenoberfläche bereits zu dick um einen reinen Tropfentransport zuzulassen, aber noch nicht dick genug für effektiven Transport durch Oberflächenabfluss. Diese Transportform kann aber trotzdem relativ effektiv sein, da die Feststoffe durch die Turbulenzen des ständigen Tropfenaufschlags in Suspension gehalten werden. Auf kurzen Hängen oder im Bereich zwischen Rinnen kann Dünnschichtabfluss durch den geringen Wasserabfluss dominierend sein.

Die direkte Einwirkung eines Regentropfens geschieht zwar auf einen kleinen Ort begrenzt, viele Regentropfen verursachen aber durchaus flächigen Abtrag und Transport. Sie bewirken eine *Flächen-* oder *Schichterosion*. Im Gegensatz dazu verursacht der eigentlich flächig auftretende Oberflächenabfluss oft kleinräumige lineare Erosion. Darunter fällt die *Rillenerosion*, wodurch mehrere etwa 10 cm tiefe Rillen gebildet werden, auf die sich der Abfluss verteilt. Je mehr Einzelrinnsale zusammenfließen und je mehr die Abflussfracht dadurch erhöht wird, desto tiefer und breiter werden die Rillen. Bis 30 cm Tiefe spricht man von *Rinnenerosion*, noch tiefere Formen nennt man Graben- oder Gully-Erosion.

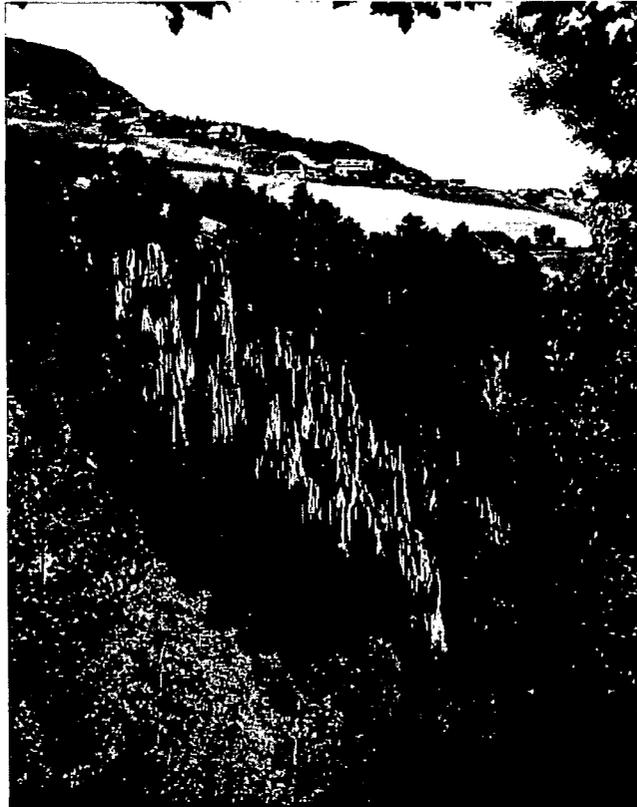


Abbildung 4.29: Spüldenudation in Ritten bei Bozen/Südtirol.

Als vierte Erosionsform ist hier noch die *Tunnelerosion* zu nennen, die im instabilen Unterboden wirkt.

Größten Einfluss auf den Abtrag von Oberflächenmaterial hat die Vegetation (siehe dazu auch Kapitel 6.3 auf Seite 86). Diese schützt vor der zerstörerischen Kraft der Regentropfen und das umso besser, je höher der Deckungsgrad ist und je näher die Pflanzenschicht dem Boden ist (Abb. 4.28). Bei sehr hoher Vegetation, v. a. bei Bäumen, tritt dagegen ein ablösungsfördernder Effekt ein. Dort werden Regentropfen zwar zuerst einmal zurückgehalten, beim Wiederabtropfen von den Bäumen erreichen die Tropfen aber größere Durchmesser und beschleunigen sich, wodurch letztendlich die Erosivität unter dem Blätterdach höher sein kann als darüber. Eine Mulchauflage zeigt sich als besonders erosionshemmend.

In gemäßigten und kalten Klimaten kann Wassererosion auch bei der Schneeschmelze auftreten, wobei die Lockerung durch Frost-Tau-Zyklen geschieht. Durch den gefrorenen Boden ist die Infiltration behindert.

Die Erosionsdisposition des Bodens wird *Bodenerodierbarkeit* oder *Bodenerodibilität* genannt, während die erosionsauslösende Wirkung von Niederschlägen als *Erosivität* bezeichnet wird.

Die Erosionsrate hängt ab von der *Erosivität* und von der *Bodenerodibilität* des Bodens, oder:

$$Erosion = f(Erosivität, Bodenerodibilität) \quad (4.3)$$

Die Erosivität ist bestimmt durch die erodierende Kraft der Regentropfen, des abfließenden Wassers oder der fließenden bzw. gleitenden Erdmassen. Die Regenerosivität nimmt, wie gesagt, etwa quadratisch mit der Intensität zu; die Abflusserosivität steigt mit der Hangneigung und der Größe des darüberliegenden Einzugsgebietes. Die Bodenerodierbarkeit hängt hauptsächlich von der Textur ab, aber auch andere Bodeneigenschaften können Einfluss haben. So steigt sie mit zunehmendem Humusgehalt, abnehmender Wasserdurchlässigkeit und zunehmendem Anteil einwertiger Kationen. Ein beeinflussender Faktor ist auch die Art der bodenkulturellen Nutzung, wobei die Erodibilität mit abnehmender Bodenbedeckung steigt. (SCHEFFER et al., 1998).

**Winderosion** bezeichnet das Lösen und Wegblasen von Bodenpartikeln durch Wind. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit fangen die Teilchen erst an zu zittern, werden dann vom Windstrom erfasst, in steilem Winkel (ungefähr 80°) in die Höhe gehoben und fallen nach einer gewissen Transportstrecke, die das 10 bis 15fache der Höhe betragen kann, wieder flach (ungefähr 6 bis 12°) auf die Oberfläche zurück (SCHEFFER et al., 1998, S.369). Die Abtragsrate hängt von der Windgeschwindigkeit (ab 4 bis 5 m s<sup>-1</sup> in 30 cm über dem Boden), der Kohäsivität, dem Teilchendurchmesser (am Anfälligsten: 0,05 bis 0,2 mm Durchmesser) und der Vegetationsbedeckung (auch Windschutzbepflanzung) ab.

Der Anteil der Winderosion am gesamten Bodenabtrag an Hängen ist eher gering und steht weit hinter der Wassererosion. Großen Einfluss hat der Wind jedoch in der Landwirtschaft im Flachland, besonders dort, wo große Windgeschwindigkeiten häufig vorkommen (Beckenlandschaften, Meernähe).

## 5 Boden

Der Boden ist das Element, welches ingenieurbologisch relevante Hangprozesse trägt. In Kapitel *Ursachen und Faktoren* (4.2.1 auf Seite 21) wurde bereits auf den hohen Stellenwert des Bodens für die ingenieurbologische Arbeit hingewiesen, weshalb ihm hier ein eigenes Kapitel gewidmet wird. Dieses wird Eigenschaften des Bodens zur Sprache bringen, zuerst die chemischen, dann die physikalischen und in einem eigenen kurzen Abschnitt die für Hangstabilitätsuntersuchungen wichtigen Festigkeitseigenschaften und maßgebenden Kräftewirkungen im Boden.

Das hierfür angelegte Kapitel soll keine erschöpfende Abhandlung über Bodeneigenschaften sein – zu diesem Zweck wird auf die ausgezeichnete Fachliteratur verwiesen (SCHEFFER et al., 1998; SCHROEDER, 1992) – sondern es soll eine Übersicht relevanter Eigenschaften von Böden bieten und diese kurz beschreiben.

### 5.1 Chemische Eigenschaften

**Ionensorption** An den Grenzflächen zwischen den Bodenkörnern und den sich im Boden befindlichen Gasen und Lösungen finden vielfältige Reaktionen statt. Die bekannteste dieser Korn-Oberflächenreaktionen ist die Ionensorption. Darunter versteht man die Anlagerung und Abgabe gasförmiger und gelöster Stoffe, die Adsorption und die Desorption. Diese Stoffe können neutrale Moleküle wie Wasser und viele Organika sein, aber v. a. geladene Atome und Moleküle, also Kationen und Anionen. Die Ionensorption hat u. a. Auswirkung auf die Nährstoffversorgung der Vegetation, sowie auf Wasser- und Lufthaushalt und die biologische Aktivität im Boden. (SCHEFFER et al., 1998).

**Bodenacidität** Wenn einem Boden mehr Protonen (zB  $H^+$ -Ionen) zugeführt werden als er neutralisieren, d. h. abpuffern kann, dann versauert er. Dies geschieht, wenn basische Reaktionsprodukte wie zB  $HCO_3^-$  ausgewaschen werden, was in humiden Klimaten häufig der Fall ist. Bodenacidität hat Einfluss auf die Schadstoffbindefähigkeit,

CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN	PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN
Ionensorption	Bodendichte
Bodenacidität	Wichte
pH-Wert	Körnung und Lagerung,
Redox-Reaktionen	Korngröße, Bodengefüge
Bodenlösung	Bodenluft
Elektrische Leitfähigkeit	Bodenwasser
Mineralische Zusammensetzung	Kapillar-, Absorptionswasser, Wasserkapazität, Wasserspannung, Welkepunkt, Porenwasserdruck
BODENFESTIGKEIT	
Spannung	Wechselwirkung zw. fester Phase und Wasser
Normalspannung, effektive Spannung	Flockung oder Koagulation, Thixotropie, Schrumpfen und Quellen, Kohäsion
Scherfestigkeit	Wasserbewegung im Boden
Restscherfestigkeit	Infiltration, Perkolation, kapillarer Aufstieg
Kohäsion	Pufferung, Filterung, Transformation
Reibungswinkel	Transport und Verlagerung
Bodenkonsistenz	Konsolidation

Gefügeeigenschaften, Nährstoffverfügbarkeit, pH-Wert und dadurch auf die Vegetation. Im Gegensatz zu humiden Gebieten herrscht in ariden Klimaten meist Bodenalkalität vor. (SCHEFFER et al., 1998).

**pH-Wert** Gibt die Menge an  $H^+$ -Ionen im Boden an, wobei diese Menge mit negativem Vorzeichen und auf einer zehner-logarithmischen Skala dargestellt wird. Ein niedriger pH-Wert ( $< 7$ ) kennzeichnet eine hohe Anzahl von  $H^+$ -Ionen bzw. einen sauren Zustand, während ein hoher pH-Wert ( $> 7$ ) wenige  $H^+$ -, aber viele  $OH^-$ -Ionen anzeigt, also einen basischen Zustand.

Der pH-Wert eines Bodens steht mit vielen anderen Eigenschaften von Böden mehr oder weniger in Beziehung. Er beeinflusst u. a. die Pedogenese, den Nährstoffhaushalt und somit die Vegetation, wobei extreme pH-Werte (pH 1-3 und pH 9-14) fast immer negative Wirkungen haben und mäßige bis schwach saure und neutrale Bedingungen (pH 5-8) positive Effekte zeigen. (SCHROEDER, 1992).

**Redox-Reaktionen** Findet *Oxidation*, d. h. Abgabe von Elektronen und Wasserstoff, Aufnahme von Sauerstoff und *Reduktion*, d. h. Aufnahme von Elektronen und  $H_2$ , Abgabe

von  $O_2$  gleichzeitig in systematischen Gegensatz statt, spricht man von Redox-Reaktionen. Bei steigendem (el.) Redox-Potential (oxidierende- bzw. reduzierende Kraft eines Redox-Systems [mV]) sinkt der pH-Wert und vice versa. Desweiteren werden dadurch die Oxidationsverwitterung und der Nährstoffhaushalt beeinflusst. (SCHROEDER, 1992).

**Bodenlösung** Die Lösungsphase von Böden besteht neben dem Lösungsmittel Wasser, aus gelösten Gasen, Ionen, Molekülen, dispergierten Kolloiden (0,1 bis 10  $\mu\text{m}$  große Teilchen die fest, flüssig oder gasförmig in einem anderen Stoff verteilt sind), anorganischer, organischer und organo-mineralischer Substanzen. Sie stellt das Medium für die meisten bodenchemischen Reaktionen dar. (SCHEFFER et al., 1998).

**Elektrische Leitfähigkeit** Damit kann eine Aussage über die Salzkonzentration in der Bodenlösung und somit der Biomasseproduktion von Pflanzen gemacht werden. (SCHEFFER et al., 1998).

**Mineralische Zusammensetzung** Die im Boden enthaltenen Minerale stammen entweder aus autochthonem oder allochthonem Ausgangsmaterial oder sind Neubildungen (Tonminerale, Oxide und Hydroxide von zB Silicium). Sie bilden (ausgenommen in Torfböden) den überwiegenden Anteil der festen Bodensubstanz (SCHROEDER, 1992). Sie beeinflussen v. a. den pH-Wert aber auch Gefüge, Wasserhaushalt, etc. und damit die Vegetation.

## 5.2 Physikalische Eigenschaften

**Bodendichte**  $\rho$  Gibt das Verhältnis von Masse [kg] zum Volumen [ $\text{m}^3$ ] ohne Berücksichtigung der Hohlräume an. Bei mineralischer Bodensubstanz liegt sie im Mittel bei 2,65, der Dichte des Quarzes, bei humifizierter organischer Substanz um 1,4. Die Lagerungsdichte ist abhängig vom Gehalt an organischer Substanz und bewegt sich bei schwach bis mäßig humosen Oberböden um 2,40 - 2,65. Im Gegensatz zur Dichte gibt das **Raumgewicht** die Dichte des trockenen Bodens einschließlich der Hohlräume an, was bei Mineralböden 1,1 - 1,8  $\text{kg m}^{-3}$  ausmacht. (SCHROEDER, 1992).

**Wichte**  $\gamma$  Ist das Verhältnis der Gewichtskraft eines Körpers zu seinem Volumen. Im Gegensatz zur Dichte bezieht die Wichte statt der Masse  $m$  die Gewichtskraft  $F_G$  auf ein Volumen  $V$ . Dadurch unterscheiden sich Wichte und Dichte durch die Fallbeschleunigung  $g$ ,

weshalb die Wichte ortsabhängig ist. Sie wird häufig in den Ingenieurwissenschaften verwendet.

$$\gamma = \frac{F_G}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g, [Nm^{-3}] \quad (5.1)$$

**Körnung und Lagerung** Anorganische wie auch organische Bodenkomponenten liegen gewöhnlich nicht als Kontinuum vor, sondern in körniger Form. Dadurch und durch die Lagerung der Körner aneinander ergibt sich die **Porosität** von Böden, welche die Voraussetzung für Bodenwasser und -luft, für Wurzeln und für Bodentiere ist. Somit beeinflussen diese Bodeneigenschaften Lebensvorgänge im Boden genauso wie Wechselwirkungen zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase. (SCHEFFER et al., 1998).

**Tabelle 5.1:** Einteilung und Bezeichnung der Korn-Fraktionen, aus SCHROEDER (1992), nach ÖNORM L 1061.

Äquivalent-Ø				Korn-Fraktionen		Symbol	
				gerundet	eckig-kantig		
mm	µm						
> 200				Blöcke, Geschiebe			
200	- 63			Gerölle	Grobsteine	Kiese: <b>G</b>	Grobboden (Bodenskelett)
63	- 20			Grobkies	Mittelsteine		
20	- 6,3			Mittelkies	Feinsteine	Steine: <b>X</b>	
6,3	- 2			Feinkies	Grus		
2	- 0,063	2000	- 630	Grobsand	} <b>Sand</b>	<b>S</b>	
		630	- 200	Mittelsand			
		200	- 63	Feinsand			
0,063	- 0,002	63	- 20	Grobschluff	} <b>Schluff</b>	<b>U</b>	Feinboden
		20	- 6,3	Mittelschluff			
		6,3	- 2,0	Feinschluff			
< 0,002		2,0	- 0,63	Grobton	} <b>Ton</b>	<b>T</b>	
		0,63	- 0,2	Mittelton			
		< 0,2		Feinton			

**Korngröße** Bodenkörner entstehen durch Abtrag, Verwitterung oder Neubildung und weisen eine sehr breite Größenverteilung auf (Tabelle 5.1). Da die Körner eine unregelmäßige Oberfläche ausweisen, wird ein Äquivalenzdurchmesser als Hilfsgröße herangezogen. Die Verteilung von Korngrößen in einer Bodenprobe wird üblicherweise mittels

Siebverfahren, oder, wenn Teilchengrößen kleiner als Grobsand vorliegen (Feinsand, Schluff, Ton), mit Sedimentationsverfahren eruiert. Ergebnis dieser Verfahren ist eine Körnungssummenkurve oder Sieblinie, womit die Verteilung grafisch dargestellt wird. (SCHEFFER et al., 1998).

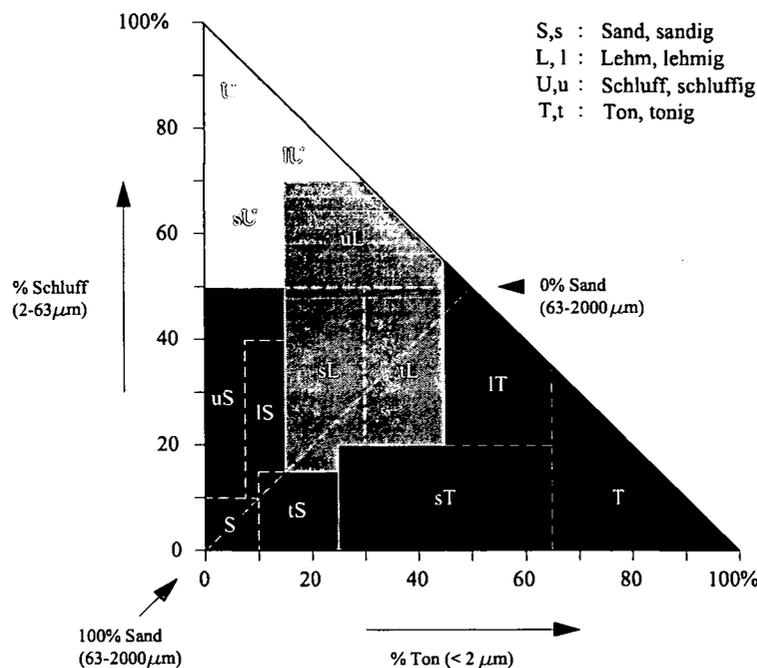


Abbildung 5.1: Einteilung der Bodenarten (vereinfacht). (SCHROEDER, 1992, S. 33).

**Bodenart** Ist eine Körnungs- oder Textur-Klasse die vom Anteil der Korn-Fraktionen S, U und T (siehe Tabelle 5.1, Abb. 5.1) bestimmt wird. Die dominierende Fraktion wird durch einen Großbuchstaben, eventuelle Beimischungen mit einem Kleinbuchstaben bezeichnet. Eine Mittelstellung zwischen S, U und T nimmt L, der Lehm ein. ZB ist Ls ein sandiger Lehm (früher sL), Sl wäre lehmiger Sand usw. Neben der vorher genannten Sieblinie, kann die Bodenart auch durch Fingerprobe (Tab. 5.5 auf Seite 67) von erdfrischem Boden vor Ort bestimmt werden. (SCHROEDER, 1992). BEGEMANN und SCHIECHTL (1986) weisen darauf hin, dass die Bodenart für die Ingenieurbioogie die wichtigste Unterscheidungsform von Böden ist.

**Bodengefüge oder Bodenstruktur** Darunter versteht man die räumliche Anordnung der Bodenteilchen als eine von Porenräumen durchzogene Matrix fester mineralischer

oder organischer Bestandteile. Es werden vier Gefügeformen unterschieden: Elementar- oder Einzelkorngefüge, Kohärent- oder Hüllengefüge, Aggregat- oder Aufbaugefüge und Segregat- oder Absonderungsgefüge. Die Porenräumen werden in Grobporen (mittl.  $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ), Mittelporen (mittl.  $\varnothing 10 - 0,2 \mu\text{m}$ ) und Feinporen (mittl.  $\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$ ) eingeteilt. (SCHROEDER, 1992).

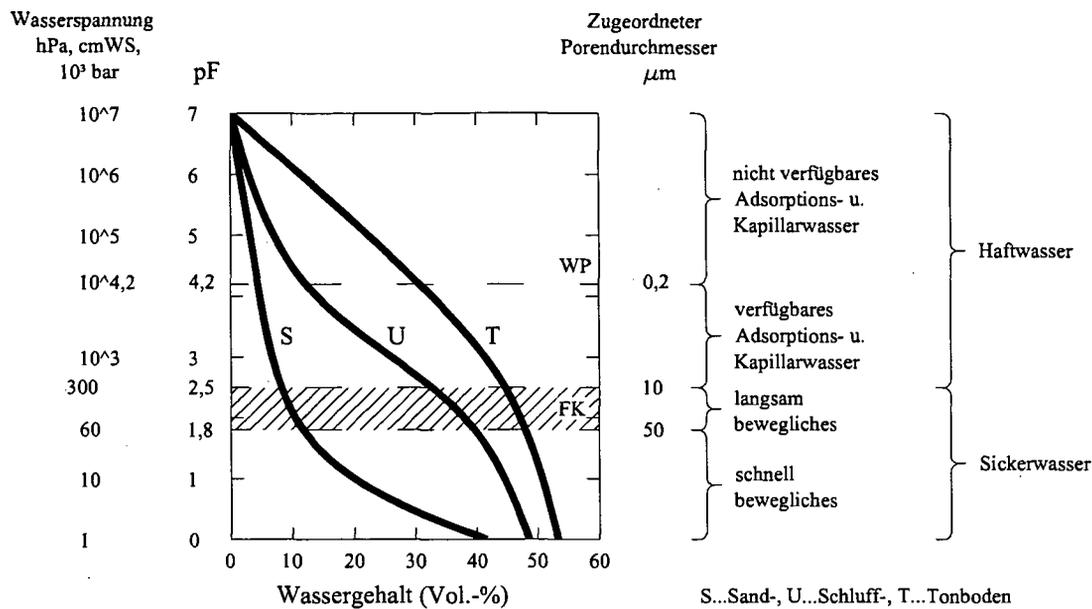
**Bodenluft** Ist die gasförmige Komponente der Bodenbestandteile und für die Atmung von Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen, sowie für die Steuerung von Oxidations- und Reduktionsvorgängen von Bedeutung. (SCHROEDER, 1992).

**Bodenwasser** „Unter natürlichen Bedingungen enthält jeder Boden stets Wasser“ (SCHEFFER et al., 1998). Wasser kann durch Trocknen bei  $105^\circ\text{C}$  aus dem Boden getrieben werden. Diejenigen Wasseranteile, die danach noch im Boden sind rechnet man nicht mehr zum Bodenwasser, sondern zum Konstitutions- oder Kristallwasser der festen Bodenpartikel.

Bodenwasser wird durch Niederschläge, Grundwasser und in kleinerem Maße durch Kondensation aus der Atmosphäre ergänzt. Es enthält gelöste Salze und Gase. Wird mehr Wasser angeliefert, als vom Boden aufgenommen werden kann, entsteht Oberflächenabfluss und zwar um so mehr, je intensiver die Niederschläge sind, je steiler die Bodenoberfläche ist und je langsamer die Niederschläge aufgenommen werden können. Er ist bei ton- und schluffreichen Böden meist höher als bei sandreichen, bei verdichteten höher als bei unverdichteten und besonders hoch, wenn der Boden bereits wassergesättigt ist. Dies ist der Fall, wenn der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt ist. (SCHEFFER et al., 1998).

Im Boden befindliches Wasser kann entweder der Schwerkraft folgend als Sickerwasser, der Schwerkraft trotzend oder gegenlaufend als Haftwasser bezeichnet werden. Ersteres durchläuft die Bodenschicht und bildet Grund- oder Stauwasser ( $\text{Poren}\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ). Zweiteres hält Wasser an der Oberfläche fester Bodenpartikel als **Adsorptionswasser**, oder in Kapillaren und Poren als **Kapillarwasser** fest ( $\text{Poren}\varnothing < 10 \mu\text{m}$ ).

**Wasserspannung (pF)** entsteht durch die Saugspannung im Boden, die durch Adsorptions- und Kapillarkräfte verursacht wird. Je nach Wassergehalt variiert die Saugspannung, wobei sie bei hohem Wassergehalt niedrig und bei geringem Wassergehalt hoch ist. Völlig trockener Boden kann so mit bis zu 10 000 bar Wasser (und Wasserdampf) ansaugen, die Wasserspannung ist dementsprechend hoch. Der pF-Wert ergibt sich aus:



**Abbildung 5.2:** Beziehungen zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei Sand-, Schluff- und Tonböden. pF... Wasserspannung, WP... (permanenter) Welkepunkt, FK... Feldkapazität (SCHEFFER et al., 1998; SCHROEDER, 1992).

$$pF = \log cm WS \tag{5.2}$$

Beispiel: Wasserspannung von 1 bar = 10<sup>3</sup> cm WS = pF 3.

**Wasserkapazität** ist die maximale Haftwassermenge eines Bodens und wird auch als Feldkapazität (FK) bezeichnet. Die FK befindet sich bei pF 2,5, was einer Wasserspannung von 0,3 bar entspricht.

Der **Welkepunkt (WP)** ist der Wassergehalt des Bodens, bei dem die meisten Pflanzen permanent welken (pF 4,2 / 15 bar). WP und FK bilden die Grenzen für das **pflanzenverfügbare Wasser**. Oberhalb WP wird Wasser zu fest im Boden gehalten, während es unterhalb FK zu rasch versickert. Der **Bodenfeuchtegrad** kennzeichnet den Wasserzustand des Bodens und wird mit dem pF-Wert ausgedrückt: pF 5 = dürr, 4 = trocken, 3 = frisch; 2 = feucht, 1 = nass. Vgl. SCHROEDER (1992).

**Porenwasserdruck** ist die Spannung in den wassergefüllten Poren des Bodens. Er setzt sich zusammen aus dem Druck durch die Eigenlast des Wassers in einer bestimmten Tiefe und dem Überdruck. Der Porenwasserüberdruck wird durch allmähliches Abströmen des

Porenwassers abgebaut (WORMUTH und SCHNEIDER, 2007). Ein negativer Porenwasserdruck (nur teilweise Befeuchtung der Poren) erhöht die Kohäsion, während positiver Porenwasserdruck (Wasser füllt Poren vollständig aus) die Kohäsion schwächt und somit die Grenzscherfestigkeit vermindert. Hoher Porenwasserdruck ist in den meisten Fällen ein auslösender Faktor für Hangbewegungen.

**Wechselwirkungen zwischen fester Phase und Wasser** Diese Interaktionen zählen zu den wichtigsten haltenden oder treibenden Einflussgrößen auf die Hangstabilität.

**Flockung** oder **Koagulation** ist das Entstehen größerer Einheiten aus aneinanderhaftenden Primärteilchen. D.h., sie gehen vom dispergierten sogenannten *Sol*-Zustand in ausgeflockten sogenannten *Gel*-Zustand über. Der gegenteilige Prozess, wodurch Flocken oder Koagulate wieder getrennt und suspendiert werden, heißt **Peptisation**. Vgl. SCHEFFER et al. (1998); SCHROEDER (1992).

**Thixotropie** ist ein Vorgang in feinkörnigen, meist tonigen Sedimenten. Es zeigt sich ein Abfallen der Viskosität bei konstanter Scherbeanspruchung (ZIEREP und BÜHLER, 1996). Der Boden leistet anfangs einen hohen Widerstand, der mit fortschreitender Verformung rasch absinkt. Auslösend können zB Erschütterungen sein, wodurch fester Boden unverzüglich (zäh)verflüssigt wird. Thixotropie ist ein reversibler Prozess, weshalb ein Boden ebenso rasch wie er sich verflüssigt hat wieder in einen festen Zustand zurückkehren kann (SELBY, 1993). Ein Beispiel ist Treibsand.

**Schrumpfen und Quellen** entsteht bei raschem, weitgehenden Austrocknen oder bei häufigem Wechsel von Austrocknung und Wiederbefeuchtung. Dadurch bilden sich Schrumpfspalten und -risse, die Verwitterung beschleunigen und die Infiltration erhöhen. Böden schrumpfen und quellen umso stärker, je höher der Tongehalt, insbesondere der Anteil an quellbaren Dreischicht-Tonmineralen. Auch die Art der adsorbierten Ionen hat Einfluss (Na-Ionen: breitmaschige Schrumpfspalten; Ca-Ionen: engmaschiges Netz). (SCHROEDER, 1992).

Die Kohäsion gehört ebenfalls zu den Wechselwirkungen zwischen fester Phase und Wasser. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Bodenstabilität wird sie aber im nächsten Kapitel Bodenfestigkeit 5.2.1 angeführt.

**Wasserbewegung im Boden** Wasser bewegt sich im Boden hauptsächlich in flüssiger Form, zu einem kleinen Anteil aber auch gasförmig. **Infiltration** ist das Einsickern des

Wassers in den Boden. **Perkolation** ist das Versickern des Wassers bis zum Grund- oder Stauwasser. Als **kapillaren Aufstieg** bezeichnet man den umgekehrten Vorgang zur Infiltration: Das Aufsteigen von Wasser vom Grund- oder Stauwasserspiegel gegen die Schwerkraft. Einfluss auf die Wasserbewegung haben die Porosität, größere Leitungsbahnen (Wurzelröhren, Tiergänge, Schrumpfrisse und -spalten), Wasseraufnahme der Pflanzen und Evaporation an der Bodenoberfläche. Die letzteren beiden sorgen für Haftwasserbewegung, indem sie Bodenbereiche durch Wasserentnahme trockener machen als deren Umgebung und so Wasser dem Saugspannungsgradient folgend in Bewegung gerät. (SCHROEDER, 1992).

**Pufferung, Filterung, Transformation** Die physikalische Pufferungsfunktion ist die Speicherkapazität für Wasser inklusive zeitverzögerter Wiederabgabe an das Grundwasser oder die Pflanzen. Die physiko-chemischen und chemischen Filter- und Pufferreaktion regelt die Reinigung des Grundwassers und der Nahrungskette. Die biologisch/biochemische Transformationsfunktion baut organische Schadstoffe mikrobiell ab bzw. um. (SCHROEDER, 1992).

**Transportvorgänge und Verlagerungen** Transport von Materie auf der Bodenoberfläche und im Boden erfolgt durch konvektive oder kapillare dispergierende Wasserströmung, oder, wenn Bodenluft als Transportmedium innerhalb des Bodens auftritt, durch Diffusion. (SCHEFFER et al., 1998).

**Konsolidation** (auch: Konsolidierung) Bezeichnet in der Bodenmechanik die zeitlich verzögerte Zusammendrückung des Bodens infolge einer Lasterhöhung. Ursache ist die behinderte Fließbewegung des im Zuge der Verdichtung ausgepressten Porenwassers.

### 5.2.1 Bodenfestigkeit

**Spannung** Sie bezeichnet die Kräfteverhältnisse, denen ein Bodenpartikel ausgesetzt ist. Im Boden können mehrere Arten von Spannungen auftreten.

Die **Totalspannung**  $\sigma$  [ $\text{kN m}^{-2}$ ] kennzeichnet die Kraft pro Flächeneinheit, die auf ein Bodenpartikel einwirkt. Neben der Gewichtskomponente wirken zwischen aneinanderliegenden Bodenteilchen auch elektrische Spannungen und Kräfte die durch angelagertes Wasser erzeugt werden (Wasserspannung, siehe **Kohäsion**).

Die **effektive Spannung**  $\sigma'$  ergibt sich aus  $\sigma$  und dem Porenwasserdruck  $u$ .

$$\sigma' = \sigma - u \quad (5.3)$$

Die **Scherspannung** ist die Kraft, die von anderen Bodenteilchen lateral oder geneigt auf ein Bodenpartikel einwirkt, d. h., sie sind durch ihren Druckvektor in der Lage, das belastete Bodenteilchen aus seiner ursprünglichen Position heraus zu bewegen. Im Unterschied dazu beschreibt die Normalspannung die vertikale Komponente des Druckes.

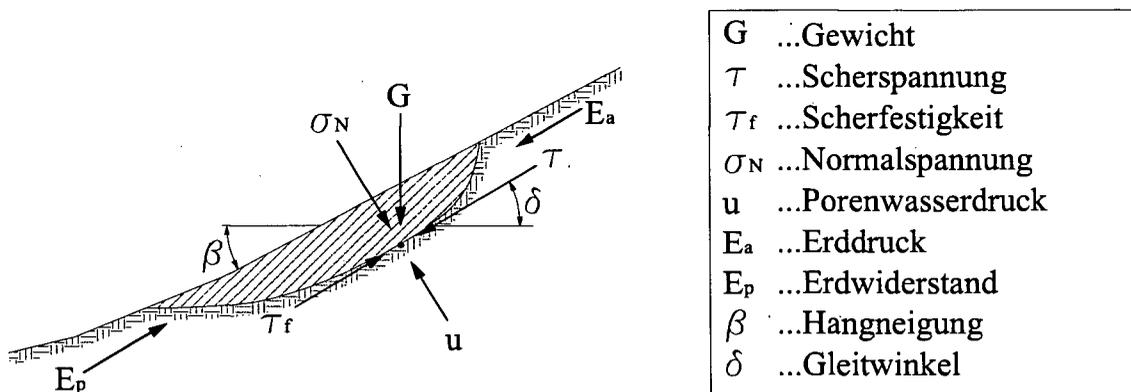


Abbildung 5.3: Kräfte im Boden nach SELBY (1993); BEGEMANN und SCHIECHTL (1986).

**Scherfestigkeit**  $\tau_f$  Als Festigkeit wird die Widerstandsfähigkeit eines Materials gegen Verformung und Bruch bezeichnet (CZICHOS, 1996). Die Scherfestigkeit eines Bodens ist der Maximalwert der Schubspannung in einer Bruchfläche. Physikalisch setzt sich die Scherfestigkeit aus der Reibung zwischen den einzelnen Bodenpartikeln und der Haftfestigkeit des Materials, also der Kohäsion, zusammen (TOBIAS, 2000).

Nach SELBY (1993) ist die Scherfestigkeit von folgenden Faktoren abhängig:

$$\tau_f = f(e, \varphi, C, \sigma', c', H, T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, S, \dots), \quad (5.4)$$

- mit:
- $\tau_f$  Scherfestigkeit
  - $e$  Porenzahl
  - $\varphi$  Reibungswiderstand des Materials, Reibungswinkel
  - $C$  Zusammensetzung des Bodens
  - $\sigma'$  effektive Normalspannung (senkrecht zur Bodenoberfläche)
  - $c'$  effektive Kohäsion

H	Spannungsverlauf
T	Temperatur
$\varepsilon$	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Verformungsgeschwindigkeit
S	Struktur des Materials

Hinzu kommt die bodenarmierende Wirkung der Pflanzen, welche die Arbeitsgrundlage der Ingenieurbiologie ist.

Die Scherfestigkeit wird vereinfacht nach SELBY folgendermaßen dargestellt (FLORINETH, 2004):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \tan \varphi \quad (5.5)$$

Darin zeigen sich, neben der Normalspannung  $\sigma$  und dem Porenwasserdruck  $u$ , die beiden maßgebenden Scherfestigkeitsparameter Kohäsion und Reibungswinkel. Alle Gleichungsparameter, mit Ausnahme des Reibungswinkels, werden in  $[kN \cdot m^{-2}]$  angegeben.

KATZENBACH und WERNER (2005, S.386) verwendet eine aus der effektiven Spannungszustandgleichung nach BISHOP (1959) abgewandelte Form, die von FREDLUND und RAHARDJO (1993) eingeführt wurde:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi_b \quad (5.6)$$

Hierbei ist  $u_a$  der Porenluftdruck,  $u_w$  der Porenwasserdruck und  $\varphi'$  der Reibungswinkel im drainierten Zustand.  $\varphi_b$  gibt den Reibungswinkel an, der von der Saugspannung  $(u_a - u_w)$  im porösen Medium abhängig ist.

Die Kohäsion setzt sich in diesem Fall aus zwei Anteilen zusammen, der effektiven Kohäsion  $c'$  und der Kapillarkohäsion  $(u_a - u_w) \cdot \tan \varphi_b$ :

$$c = c' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi_b \quad (5.7)$$

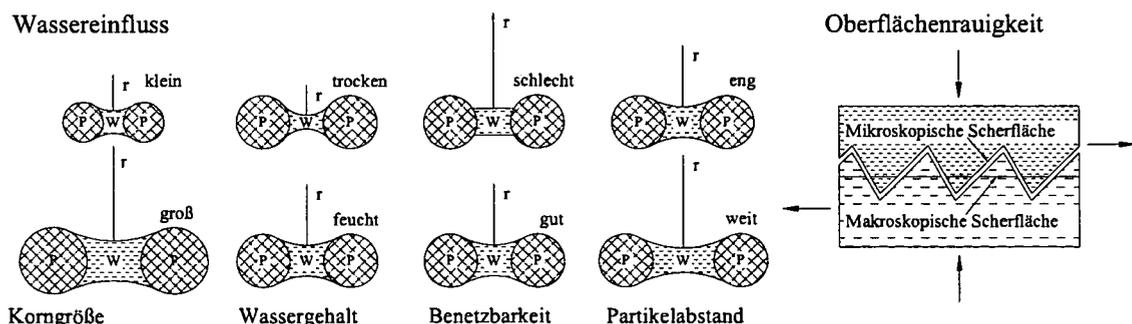
Pflanzenwurzeln zeigen durch ihre armierende und entwässernde Wirkung Einfluss auf die Bodenkohäsion. Dies berücksichtigen COPPIN und RICHARDS (1990), indem sie die Gleichung 5.6 um die Wurzelkohäsion  $c_w$  erweitern:

$$\tau_f = c' + c_w + (\sigma - u_a) \cdot \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \tan \varphi_b \quad (5.8)$$

Kohäsion, Reibung und Reibungswinkel werden später noch ausführlicher behandelt.

Nach der erstmaligen Mobilisierung eines Hanges bleibt ein Teil der Scherfestigkeit erhalten. Dieser wird als **Restscherfestigkeit** bezeichnet. Da sich Bodenpartikel bei der ersten Mobilisierung nach der Bewegung der Rutschmasse einregeln, sich also entsprechend der Krafrichtung ausrichten, reduziert sich die Rauigkeit der Scherfläche und die rückhaltenden Kräfte werden vermindert. Dadurch kann ein wieder zur Ruhe gekommener Hang sogar sensibler auf ein Naturereignis reagieren als der ursprüngliche Hang.

**Kohäsion** umfasst grundsätzlich die zusammenhaltenden (Bindungs-)Kräfte in bindigen, d. h. feinkörnigen ton- und schluffreichen Böden, wobei sie eine Funktion des Wassergehaltes ist. Die Kohäsivität ist besonders abhängig von der Art der Tonminerale: Gut kohäsiv sind die Dreischichttonminerale Vermiculit und Montmorillonit, schlecht der zweischichtige Kaolinit, der dreischichtige Illit und der vierschichtige Chlorit (SCHROEDER, 1992). Für einige kohäsive Materialien werden in Tabelle 5.4 Werte angegeben. Die Bindungsarten, welche den Zusammenhalt der Bodenteilchen erzeugen, werden in Tabelle 5.3 gegenübergestellt. Kohäsive Kräfte werden insbesondere durch elektrostatische Kräfte zwischen geladenen Oberflächen von Tonpartikel und -ionen, chemische Bindungen, wodurch Partikel etc. förmlich verklebt werden und durch Einfluss von Wasser hervorgerufen. Die relativ schwachen van der Waals-Kräfte haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Kohäsion, wirken aber über größere Entfernungen als chemische Bindungskräfte (Van der Waals: 1- mehrere 100 nm, chemisch: 0,05-0,35 nm). Magnetische Bindungen sind ebenfalls sehr schwach und treten auf, wenn metallische Oxide wie Hämatit oder Goethit als Oberflächenfilm auf Bodenpartikeln vorhanden sind. Die geringe Wirkung kann ein Beitrag zur Aggregation in der Sedimentierungsphase sein.



**Abbildung 5.4:** Effekte der Scheinkohäsion. Einflüsse von Korngröße, Wassergehalt, Benetzbarkeit und Partikelabstand. P... Partikel, W... Wasserfilm zwischen den Partikeln,  $r$ ... Radius des Wasserfilms. Daneben Verzahnung durch Oberflächenrauigkeit. (SELBY, 1993).

Wenn durch Wasseraufnahme das Korngerüst im Boden mit zusätzlichem Gewicht belastet wird, erhöht sich die Reibungskraft. Dieser Effekt wird als **scheinbare Kohäsion** bezeichnet, der auch in rolligen (nicht tonhaltigen) Böden auftreten kann (TOBIAS, 2000). Ursächlich dafür verantwortlich sind zwei Effekte: die durch Oberflächenspannung von Wasserfilmen zwischen Partikeln ausgelöste Kapillarspannung (Kapillarkohäsion) und die Verzahnung von Körnern auf mikroskopischer Ebene aufgrund der Oberflächenrauigkeit (Strukturkohäsion) (SELBY, 1993). Abbildung 5.4 zeigt die beiden Effekte. Darin zeigt sich, dass die scheinbare Kohäsion umso größer ist, je kleiner der Radius der Wasserfilmoberfläche zwischen den Teilchen und umso größer daher die Kapillarspannung ist. Lockere Lagerung, große Korngrößen, hoher Wassergehalt und geringe Benetzbarkeit von Partikel verringern die scheinbare Kohäsion. Nach TOBIAS (2000) kann auch Armierung durch Pflanzenwurzeln zu einem kohäsionsähnlichen Effekt führen. Ebenso können Wurzelausscheidungen und Mykorrhizapilze (FLORINETH, 2004) bzw. ein „Mucigel“ mit hoher Haftfähigkeit, das durch die abgestorbenen Zellteile von Haarwurzeln entsteht (BEGEMANN und SCHIECHTL, 1986), Bodenaggregate bilden und die Kohäsion im Boden steigern.

**Tabelle 5.3:** Bindungsarten und -kräfte in Böden nach SELBY (1993).

Bindungsart	Bindungskraft im Bodensystem [kN · m <sup>-2</sup> ]
magnetische Kräfte von eisen- und magnesiumhaltigen Mineralen	0,1 - 1
elektrostatisch (Coulomb), Anziehungs- und Abstoßungskräfte durch Oberflächenladung von (tonigen) Partikeln	1 - 10
van der Waalsbindung, gegenseitige Beeinflussung polarer Moleküle	< 10
Kapillare, Scheinkohäsion durch Oberflächenspannung von Wasserfilmen (Sand und Schluff)	< 400
elektrostatische Ionenbindung, Interaktion zwischen negativ geladenen tonigen Oberflächen und Kationen	< 1000
chemische-, intermolekulare ionische-, kovalente- und Wasserstoffbrückenbindung	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>

**Reibung  $\mu$  und Reibungswinkel  $\varphi$**  Die Reibung ist eine physikalische Kraft, die einer Relativbewegung zweier einander berührender Körper entgegenwirkt. Diese Körper können zwei Bodenschichten sein, genauso wie zwei Bodenpartikel, die aneinander reiben.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Haft- und Gleit-, Roll-, Wälz-, etc. kurz Bewegungsreibung. Ein Unterschied besteht darin, dass für die Überwindung von Haftreibung größere Kräfte wirken müssen als für die Überwindung von Bewegungsreibung nötig sind, d. h. im Allgemeinen: Haftreibungskraft > Bewegungsreibungskraft.

Der **Reibungswinkel**, auch Winkel innerer Reibung, ist der Winkel, unter dem eine kohäsionslose Lockermasse oder ein kohäsiver Boden (evt. unter Belastung) gerade noch nicht in Bewegung gerät oder abrutscht. Er ist umso größer, je kantiger die beteiligten Korngrößen sind, bzw. je höher die Kohäsion ist. Bei Aufschüttungen nennt man ihn Böschungswinkel.

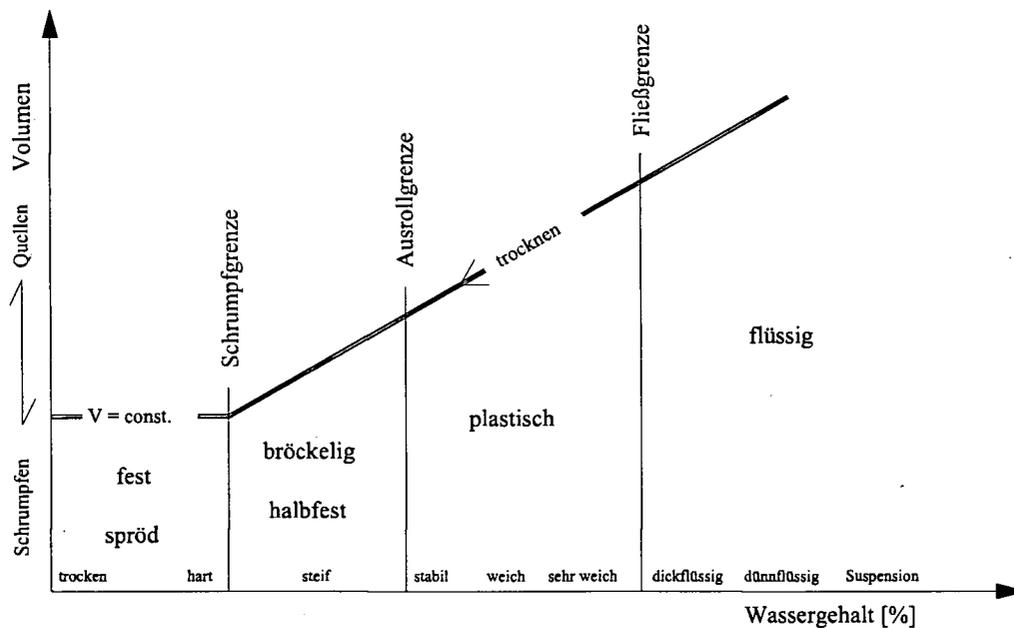
Tabelle 5.4 gibt Beispiele von Wichte, Reibungswinkel und Kohäsionskraft einiger Materialien an.

**Tabelle 5.4:** Für die Stabilitäts-Analyse wichtige Bodeneigenschaften von ausgewählten Materialien nach SELBY (1993).

Art und Material	Wichte (gesättigt/trocken) [kN · m <sup>-3</sup> ]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN · m <sup>-2</sup> ]
<b>KOHÄSIONSLOS</b>			
<b>Sand</b>			
lockerer Sand, einheitliche Korngröße	19/14	28-34	
dichtgepackter Sand, gemischte Korngrößen	21/18	38-46	
<b>Kies</b>			
Kies, einheitliche Korngröße	22/20	34-37	
Sand und Kies, gemischte Korngrößen	19/17	45-48	
<b>KOHÄSIV</b>			
<b>Ton</b>			
weicher Bentonit	13/6	7-13	10-20
weicher, leicht organischer Ton	16/10	22-27	20-50
glaziale Sedimente, gemischte Korngrößen	23/20	32-35	150-250

**Bodenkonsistenz** Sie teilt den mechanischen Zustand des Bodens danach ein, ob er sich festkörperartig, plastisch oder fluidal verhält. Konsistenz besteht aus mehreren Bodeneigenschaften und beschreibt dessen Verhalten unter Stress oder Krafteinwir-

kung. Ausschlaggebend ist der Wassergehalt. Die Grenzen zwischen den verschiedenen Zuständen beschreiben die **Atterberg'schen Konsistenzgrenzen** (Abb. 5.5): *Schrumpfgrenze* (engl. Shrinkage Limit), *Ausrollgrenze* (engl. Plastic Limit), *Fließgrenze* (engl. *Liquid Limit*). Diese geben einen Grenzwassergehalt in Gramm Wasser pro Gramm trockenem Boden an und sind ein Maß für die Kohäsion eines Bodens. Die Differenz von Flüssigkeitsgrenze und Ausrollgrenze bildet den Plastizitäts-Index, der bei der Klassifizierung von Bodeneigenschaften hilfreich ist. Flüssigkeitsgrenze, Ausrollgrenze und Plastizitäts-Index steigen mit zunehmendem Tongehalt und zunehmendem Anteil an organischen Material im Boden. (McLAREN und CAMERON, 1996).



**Abbildung 5.5:** Zustandsgrenzen nach Atterberg. Modifiziert nach McLAREN und CAMERON (1996).

### 5.3 Bodenansprache

An diesem Punkt soll eine Methode angeführt werden, mit der die Bodenart relativ rasch und direkt am Standort bestimmt werden kann. Es handelt sich um die **Fingerprobe**. Dafür muss die Bodenprobe zuerst annähernd in den Zustand der Fließgrenze gebracht werden. Dies ist dann der Fall, wenn die Probe glänzt und beim Andrücken zwar die Finger feucht werden, aber noch kein Wasser austritt. Grobe Bestandteile müssen vor der Fingerprobe entfernt werden. Nach diesen Vorbereitungen wird die Bodenprobe auf folgende Eigenschaften überprüft: Sichtbarkeit und Fühlbarkeit von Einzelkörnern, Rauheit beim Reiben, Formbarkeit, sowie die Wiederholbarkeit der Verformung, Haften in den Hautrillen und Klebrigkeit. Die Schritte der Fingerprobe sind wie folgt: Grobskelett absondern, mit Wasser anfeuchten, vermischen und dann zwischen Daumen und Zeigefinger reiben, rollen und formen. Diese Art der Bodenansprache ist zwar nicht exakt, jedoch kann auf diese Weise mit einiger Übung eine hinreichende Bestimmung der Bodenart erfolgen.

Tabelle 5.5 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der einzelnen Bodenarten bezüglich der Fingerbeprobung.

**Fleckung und Konkretation** BLUM et al. (1986, S. 22) beschreiben Flecken nach:

**Kontrast:** d... deutlich, u... undeutlich, d. h. Flecken können nicht mehr nach Häufigkeit und/oder Art beschrieben werden

**Häufigkeit:** 1... einzelne (< 5 % der Fläche), 2... mehrere (5-20 % der Fläche), 3... viele (> 20 % der Fläche)

**Art:** B... Bleichflecken, R... Rostflecken

**Karbonate** Die Prüfung auf Karbonate erfolgt im Gelände mit 10-prozentiger Salzsäure. Dabei wird festgestellt ob der Feinboden nach Anträufeln mit 10%iger HCl reagiert und daher kalkhaltig ist, oder nicht. Kalkstein und Fällungskalk brausen stark und rasch, Dolomit dagegen schwach und verzögert. (BLUM et al., 1986, S. 23).

**Tabelle 5.5:** Bestimmung der Bodenart durch die Fingerprobe. BA...Bodenart, SK...Schwereklasse, SE...Sichtbarkeit der Einzelkörner, FE...Fühlbarkeit der Einzelkörner, Rau...Rauheit durch Reiben, Form...Formbarkeit, WV...Wiederholbarkeit der Verformung, Haft...Haften in den Hautrillen, Kleb...Klebrigkeit. Nach BLUM et al. (1986, S. 18f)

BA	SK	SE	FE	Rau	Form	WV	Haft	Kleb	
S	I	Xxx	xxx	Xxx	-	-	-	-	
uS	I	Xxx	xx	xx	-	-	-	-	Schluff glitzert; Material fühlt sich mehlig an
lS	II	xx	xx	xx	x	x	x	-	reißt und bricht bei Verformung
tS	III	x	xx	x	x	x	xx	x	schwach plastisch
sU	II	x	xx	x	x	x	xx	-	Schluff glänzt seidig; Material fühlt sich samtig-mehlig an
U	II	-	-	-	x	x	xx	-	Schluff glänzt stark seidig; Material fühlt sich samtig-mehlig an
lU	III	-	-	-	x	x	xx	-	Schluff glänzt seidig; Material fühlt sich samtig-mehlig an
sL	III	x	xx	x	xx	xx	xx	x	leises, aber hörbares Knirschen beim Kneten; etwa bleistift dick ausrollbar, wird dann brüchig
L	IV	x	x	-	xxxx	xxx	xx	xx	leises, aber hörbares Knirschen beim Kneten; so plastisch, dass sich kleine Püppchen mit Armen u. Beinen formen lassen; läßt sich nicht zu einer langen, dünnen Schnur ausrollen.
uL	IV	x	-	-	xxx	xx	xxx	xx	gut ausrollbar
sT	IV	-	-	-	xxxx	xx	xxx	xx	zähplastisch, gut ausrollbar
lT	V	-	-	-	xxxx	xxx	xxx	xxx	schwach glänzende Reibstellen, läßt sich zu einer langen, dünnen Schnur ausrollen
T	V	-	-	-	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	glänzende Reibstellen; läßt sich zu einer langen, dünnen, biegsamen Schnur ausrollen

## 6 Vegetation

Pflanzen stellen den zentralen Baustoff in der ingenieurbioologischen Arbeit dar. Sie garantieren langlebige, unempfindliche und umweltverträgliche Bauweisen. Die Langlebigkeit rührt von der Fähigkeit der Pflanzen zur Selbstregulation ohne menschliche Eingriffe (SCHLÜTER, 1996, S. 17f). Ebenso vermögen sie es, viele Verletzungen zu regenerieren.

Durch ihre Eigenschaften haben Pflanzen einige baustoffliche Vor- aber auch Nachteile. Vorteilhaft ist die Lebendigkeit, wodurch ein ingenieurbioologisches Bauwerk aus Pflanzen mit der Zeit immer besser, also standfester wird, im Gegensatz zu Bauten aus Beton o. ä., die nach ihrer Fertigstellung kontinuierlich verwittern und zerfallen. KRUEDENER (1951) formuliert diese Eigenheit pointiert-stimmig mit wenigen Worten: „*Sie bauen sich selbst weiter*“. Weitere Vorteile liegen in den ökologischen Fähigkeiten und in der von den meisten Menschen empfundenen Ästhetik von Pflanzen. Nachteilig wirken bei reinen Pflanzbauweisen die begrenzte, meist nicht sofort nach Einbau wirksame Belastbarkeit, die Standortabhängigkeit, sowie die relativ geringe Auswahl an unterschiedlichen Baustoffen. Um diese Nachteile zu verringern, werden einerseits Pflanzen mit breiter ökologischer Amplitude verwendet und andererseits tote Materialien miteingebaut, wobei diese grundsätzlich auf bodenbürtige Mittel (Holz, Stein) beschränkt sind (BEGEMANN und SCHIECHTL, 1986, S. 17).

Den später angeführten biotechnischen Eigenschaften von Pflanzen werden zunächst einige allgemein pflanzenphysiologische Vorgänge und Eigenschaften vorangestellt. Zusammengestellt aus LARCHER (2001, 1973), NULTSCH (2001), STRASBURGER et al. (2002) sowie den Unterlagen zu den Vorlesungen *Gehölzphysiologie* und *Pflanze, Temperatur und Strahlung* gelesen von Prof. Hanno Richter an der BOKU im Wintersemester 2005 (unveröffentlicht).

**Strahlung und Licht** Neben Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff benötigen Pflanzen v. a. Licht um leben und wachsen zu können. Licht ist Teil der Strahlung, die von der Sonne zur Erde geschickt und dort für den Aufbau von Biomasse verwendet wird. Es tritt

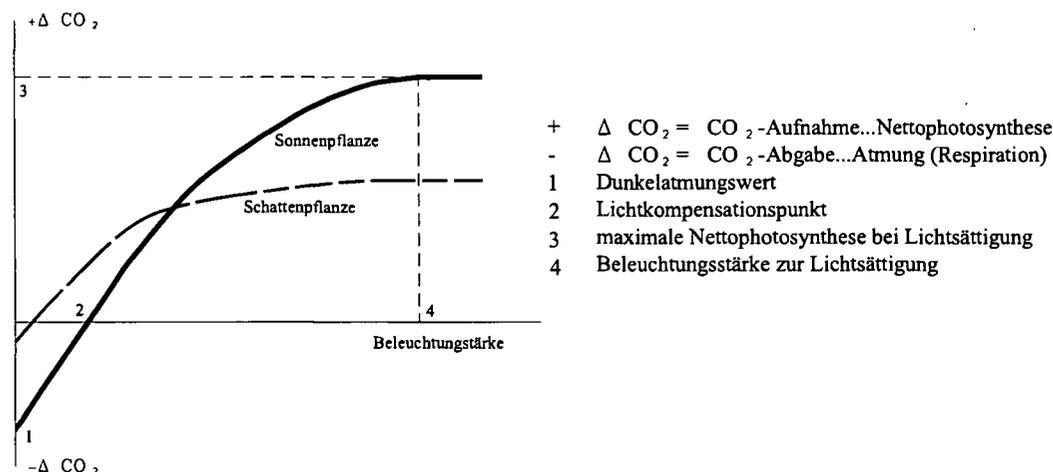
im Wellenlängen-Spektrum von 400 nm (violett/blau) bis 800 nm (rot) auf. Aber nicht nur das sichtbare Licht hat einen Einfluss auf Pflanzen, sondern auch unsichtbare Strahlung mit kleineren und größeren Wellenlängen als sichtbares Licht, und zwar zwei der drei Ultraviolett-(UV)-Spektren – mittelwelliges UV B (280-315 nm) und das langwellige UV A (315-400 nm) – im kurzwelligen Bereich und die Infrarotstrahlung (IR) im langwelligen Bereich (800-3000 nm).

Strahlung im UV-Bereich ist sehr energiereich und zwar umso mehr, je kürzer die Wellenlänge ist (UV B > UV A). Deshalb ist ihre Wirkung auf Pflanzen meist schädigend. Abhängig vom Standort und der dort herrschenden Strahlung, entwickelten Pflanzen im Laufe der Evolution einige Schutzmechanismen. Der Wichtigste ist wohl die *Cuticula*, jene Schutzschicht der Pflanzenoberfläche, wodurch die Pflanze in erster Linie vor Wasserverlust geschützt wird. Desweiteren zeigen Flavonderivate (gelbliche Pflanzenfarbstoffe) wie Anthocyane und Anthoxanthine, aber auch farblose Vertreter schützende Wirkung.

BOGENRIEDER und KLEIN (1980) fanden aber auch einen positiven Einfluss von UV-Strahlung. Der von ihnen untersuchte Alpenampfer (*Rumex alpinus*) zeigte als Antwort auf eine UV-Abschirmung wesentlich schlechtere Nettophotosynthese als seine Artkollegen, die dem UV ausgesetzt waren. Diese kurzwellige Strahlung kann also auch ein Mangelfaktor sein.

Das sichtbare Licht ist Hauptstrahlungslieferant für die pflanzliche **Photosynthese**. Dies ist der Prozess auf den alle vom Menschen genutzten Produkte des Pflanzenreiches und indirekt, auch die des Tierreiches zurückgehen. Sie wird von Botanikern über den CO<sub>2</sub>-Austausch der Pflanze gemessen, wobei eine positive Differenz die Nettophotosyntheseproduktion ausmacht und eine negative Differenz für die Zellatmung (*Respiration*) steht (Abb 6.1). Die Intensität der Photosynthese ist abhängig von der Strahlung und Temperatur, aber auch vom Wasser- und Mineralstoffangebot, sowie von allen anderen Umweltfaktoren. Am wichtigsten für die gesamte Stoffproduktion einer Pflanze ist aber nicht unbedingt diese Photosynthese-Intensität, sondern vielmehr, der Assimilationshaushalt der **gesamten Vegetationszeit**. Dieser ist im wesentlichen artabhängig aber auch von Außenfaktoren bestimmt. Durch optimale Wasserversorgung wird die Ausbildung großer Blätter gefördert, ebenso durch eine optimale Versorgung mit Mineralstoffen insbesondere mit Stickstoff N<sub>2</sub>. Der **Photoperiodismus** bezeichnet die Abhängigkeit der pflanzlichen Entwicklungsprozesse von der Tageslänge (*Langtag-* und *Kurztagpflanzen*) und beeinflusst auch die Produktion von Assimilaten. **Phototropismus** ist die Orientierung in Form einer Krümmung oder sonstiger Lageveränderungen von Pflanzen bzw. ihrer

Organe zur Lichtrichtung. Dabei bewegen sich in erster Linie die Sprossachsen und zwar durch Krümmung, aber auch Blätter, indem sie sich senkrecht zur Lichtrichtung stellen. Im Gegensatz zu den anderen Pflanzenorganen verhalten sich Wurzeln in der Regel indifferent oder sie reagieren phototropisch negativ, also sie wachsen entgegengesetzt der Lichtrichtung (NULTSCH, 2001). Steigende **Lichtintensität** erhöht die Photosynthese solange, bis ein Sättigungswert erreicht ist (Abb. 6.1). Hierbei sind zwei unterschiedliche Blatttypen zu nennen: Schatten- und Sonnenblätter. Den ersten Typ findet man an vielen Jungpflanzen und im Kroneninneren, oder bei an lichtarme Schattenstandorte angepasste Pflanzen. Diese Blättern weisen ein nur einschichtiges Palisadenparenchym und thylakoidenreiche Chloroplasten auf. Dadurch kann auch wenig intensive Strahlung effizient umgewandelt werden. Obwohl schon bei wenig Licht assimiliert werden kann, ist die Lichtsättigung dieser Blätter schon bei geringerer Beleuchtungsstärke als bei Sonnenblättern erreicht, weshalb die absolute Produktion bei Schattenblättern geringer ist. Sonnenblätter sind im Gegensatz zu Schattenblättern dick und relativ kleinflächig, haben dickere Palisadenparenchyme und sind dahingehend optimiert, möglichst zurückhaltend zu transpirieren.



**Abbildung 6.1:** Abhängigkeit der Nettophotosynthese von der Beleuchtungsstärke bei Sonnen- und Schattenpflanzen (Lichtkurve, schematisch).

Die Abbildung 6.1 zeigt über zwei Lichtkurven die Abhängigkeit der Nettophotosynthese von der Stärke des Lichts. Oberhalb der Bezugslinie wird mehr  $\text{CO}_2$  assimiliert als veratmet und es ergibt sich eine Nettophotosyntheseproduktion. Unterhalb der Linie ist die Produktion nicht groß genug um die Atmungsverluste zu kompensieren und Energie, oder  $\text{CO}_2$  wird verbraucht. Jener Punkt, an dem Assimilation und Atmung (Respiration)

gleich groß sind, heißt Lichtkompensationspunkt. Bei einer bestimmten Lichtstärke kommt es zur Lichtsättigung, worüber auch durch zunehmende Beleuchtungsstärke keine Steigerung der Photosynthese möglich ist.

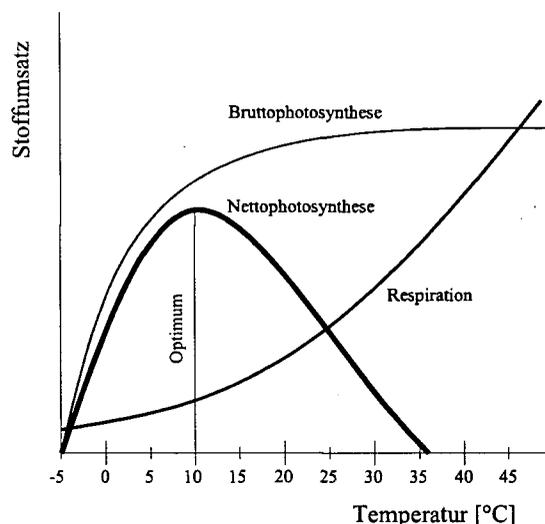
**Temperatur** Sie kann Mangel- oder Stressfaktor sein. Am wichtigsten ist dabei die Temperatur des Blattes, da es am meisten zu den lebenserhaltenden Vorgängen in einer Pflanze beiträgt. Bei Kälte ( $> 0^{\circ}\text{C}$ ) treten Einbußen in der Produktivität auf, während durch Frost ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) auch Schädigungen, d. h. **Gefrierschäden**, auftreten können, die auf Eisbildung innerhalb der Pflanzenorgane zurückgehen. Besonders schädlich ist hierfür eine rasche Abkühlung, verstärkend wirken etwa durch Luftverunreinigung verursachte Vorschädigungen.

Die meisten Pflanzen unserer Breiten besitzen eine gewisse Gefrierresistenz, die als Vermeidung oder Toleranz von Gefriervorgängen oder in Form von Restitution von Schäden auftreten kann. **Vermeidung** von Gefriervorgängen kann durch Gefrierpunktserniedrigung, durch Entwässerung oder durch Unterkühlung erreicht werden. Die Mechanismen der **Toleranz** von Gefriervorgängen werden in der Fachwelt viel diskutiert, aber zwei Vorgänge scheinen sehr plausible Erklärungen zu sein: Einerseits ist es eine Vermeidung der bei Vereisung hervorgerufenen Zellkontraktion durch Anhäufung von gelösten, osmotischen Stoffen in der Vakuole. Und andererseits wird die Toleranz des Protoplasmas gegenüber Entwässerung erhöht, indem Schutzstoffe, niedermolekulare Substanzen (Zucker, Glycerin, ...) oder hydrophile Polypeptide eingelagert werden.

Übersteigt die Temperatur einen bestimmten Wert können **Hitzeschäden** auftreten. Dieser artspezifische bzw. von der Lebensweise abhängige Grenzwert liegt für *psychrophile* Organismen, worunter Bakterien oder Pilze fallen bei  $15\text{-}20^{\circ}\text{C}$ , für *mesophile*, darunter höhere Schattenpflanzen und Moose bei  $35\text{-}45^{\circ}\text{C}$  und für die *moderat thermophilen* höhere Landpflanzen bei  $45\text{-}65^{\circ}\text{C}$ . Im Gegensatz zu Gefrierschädigungen ist Hitze umso schädlicher, je länger sie einwirkt. Gegen diese Schädigungen gibt es einige Mechanismen, die als Hitzeresistenz bezeichnet werden. Wie schon bei der Gefrierresistenz gibt es auch hier drei Schutzstrategien: die Vermeidung der Hitzebelastung, sowie deren Toleranz oder die Reparatur von Schädigungen. Die **Vermeidung** wird durch **Reflexion**, **Transmission**, **Transpirationskühlung**, **Isolation** (durch die Borke) oder **geförderte Konvektion** erreicht. Reflexion wird durch Wachsüberzug oder Behaarung der Blätter verstärkt. Transmission wird umso größer, je dünner ein Blatt ist. Durch Transpiration, wenn also pflanzeneigenes Wasser an der Blattoberfläche verdunstet, wird der Pflanze

(Verdunstungs-)Wärme entzogen. Isolation ist wichtig für die massiven Organe von Holzpflanzen. Vor Hitzeschäden wie etwa Sonnenbrand, der häufig an dünnrindigen Bäumen wie der Buche auftritt, schützen sich manche Bäume mittels Korklagen oder komplex gebaute Borken (zB Eichen), manche Stauden mittels einfacher Periderme. Durch Konvektion kann ein Blatt, das wärmer als die Luft ist, Wärme an die Umgebung abgeben. Manche Blattyten (zB Fiederblätter) oder -formen (zB das lange Bananenblatt) fördern diesen Energieaustausch.

Die Temperatur, welche die höchste Vitalität bzw. die maximale Photosyntheseproduktion zulässt, ist die artspezifische **Optimaltemperatur** (Abb. 6.2). Sie liegt für Nadelhölzer bei 10-15 °C, für Laubhölzer bei etwa 20 °C und für krautige Pflanzen bei etwa 25 °C. Zum Vergleich benötigen tropische C<sub>4</sub>-Pflanzen mehr als 30 °C für ein optimales Wachstum.

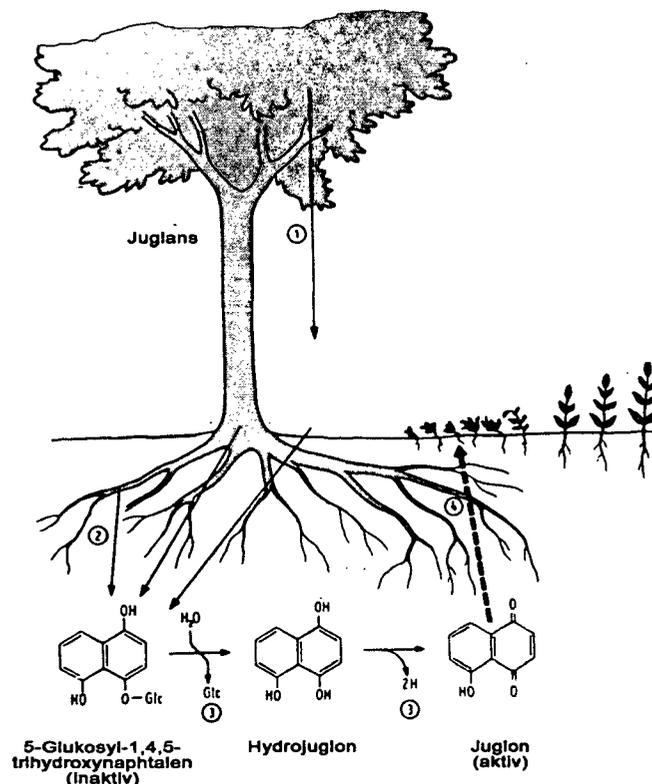


**Abbildung 6.2:** Stoffumsatz einer Pflanze in Abhängigkeit der Temperatur am Beispiel der Zirbe (*Pinus cembra*).  $T_{min} = -5\text{ °C}$ ,  $T_{max} = 36\text{ °C}$ ,  $T_{opt} = 10\text{ °C}$  (verändert nach TRANQUILLINI (1959)).

**Leaching und Exsudation** Darunter versteht man die Abgabe von organischen Substanzen an die Umwelt. Beim **Leaching** (zu deutsch: Auslaugung) werden zum größten Teil aus den Blättern und zu einem geringen Teil aus dem Stamm organische aber auch anorganische Substanzen durch Regen, Nebel oder Tau herausgelöst und abgewaschen. Der Effekt ist abhängig von der Dauer der Niederschläge und von der Benetzbarkeit der

Blätter, wobei Letztere von Art zu Art verschieden ist und auch vom Alter der Pflanze abhängt. Jüngere Blätter verfügen über eine noch intakte Wachsschicht und verlieren dadurch weniger Substanz.

Werden Stoffe durch die Wurzeln von Holzpflanzen abgegeben, spricht man von *Exsudation*. Die Exsudate üben besonderen Einfluss auf die Umgebung der abgebenden Holzpflanze und auf diese selbst aus. So werden etwa das Wachstum und die Vermehrung von für Pflanzen schädliche Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze gehemmt, andererseits für Pflanzen nützliche Mykorrhiza gefördert. Die symbiotischen Mykorrhizapilze benötigen die abgegebenen Substanzen um in die Wurzel eindringen zu können. Auf bestimmte Bäume spezialisierte Formen benötigen Exsudate als Wegweiser.



**Abbildung 6.3:** Allelopathie durch Bildung von Juglon aus 5-Glycosyl-1,4,5-trihydroxynaphtalen bei *Juglans regia*. 1... Freisetzung durch Auswaschung, 2... Freisetzung durch Wurzelexsudation, 3... mikrobielle Umwandlung (Hydrolyse, Oxidation), 4... allelopathischer Effekt (Pflanzen welken und sterben ab). Aus Unterlagen zur Vorlesung *Gehölzphysiologie* gelesen von Prof. Hanno Richter (Sommersemester 2005).

Durch Abwehrstoffe, sogenannte *Allelochemikalien*, die von manchen Pflanzen aus einem Teil ihrer Photosyntheseprodukte erzeugt werden, können konkurrierende Pflanzen anderer Arten an der Keimung oder im Wachstum gehemmt werden. Dieses Abwehrverhalten, das zusätzlich zum Kronenschatten ungünstige Verhältnisse für die Konkurrenten schafft, wird als **Allelopathie** bezeichnet. Die Substanzen können durch Auswaschung (Leaching), Exsudation, oder durch Verrottung abfallender Blätter oder Früchte in den Boden gelangen. Bekannte Beispiele liefern hier u. a. die Arten *Eucalyptus*, *Juglans* (zB die Walnuss) und *Magnolia*. Die von diesen Bäumen freigesetzten ätherische Öle, wie etwa das *Juglon* der Nuss (Abb. 6.3), verhindern selektiv das Wachstum von krautigen Pflanzen und Keimlingen anderer Holzpflanzen. Zwei weitere Beispiele sind die Besenheide (*Calluna vulgaris*) und die Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), deren Blätter die Keimung der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*) hemmen.

**Tabelle 6.1:** Wirkungen von Pflanzen in hydrologischer und bodenmechanischer Hinsicht. + vorteilhafte Auswirkung, – nachteilige Auswirkung. Modifiziert nach DURLO und SUTILI (2005).

Hydrologische Wirkung	Mechanische Wirkung
	Bäume und Sträucher
± Interzeption, Transpiration	± Gewicht der oberirdischen Masse
± Infiltration wird durch Interzeption reduziert	± Schutz des Bodens vor Sonne und Wind
	– Kraftübertragung von Wind in den Boden
	+ Verringerung der Aufprallwirkung von Regentropfen
	– Vergrößerte Aufprallwirkung bei Wiederabtropfen von hohen Bäumen
	Bodendeckerpflanzen
± Wasser infiltriert besser und bleibt länger im Boden	+ Minderung der Aufprallkraft von Regentropfen
+ Durch Widerstand wird die Abflussgeschwindigkeit vermindert	+ Mechanischer Schutz vor diversen Belastungen (Tiertritte)
+ Mikroklima auf der Bodenoberfläche	+ Schutz vor Winderosion
	Wurzeln
± Verbesserung der Infiltrationskapazität	+ Aggregatbildung
± Erhöhte Porosität	+ Verbesserung der Bodenscherfestigkeit
+ Wasseraufnahme für die Pflanze	+ Verteilung von Boden Spannungen
± Erzeugung von Porenwasserunterdruck	+ Verankerung des Bodens
	+ Stützen den Baum / die Pflanze
	+ Beschränken Bodenbewegungen

Auf die Stabilität von Hängen wirken Pflanzen einerseits entwässernd und andererseits bewehrend, auf die Bodenoberfläche wirken sie schützend. Diese Wirkungen werden in den nächsten Kapiteln erläutert.

## 6.1 Hydrologische Funktion

**Transpiration, Interzeption und Evapotranspiration** Die Entwässerungswirkung der Vegetation entsteht durch den lebensnotwendigen Eigenbedarf von Wasser als Transportagens (Ionen, gelöste Substanzen) innerhalb der Pflanze (**Transpiration**), welcher durch Aufnahme aus dem Boden und zu einem geringeren Teil aus Regen- oder Tauwasser gedeckt und in weiterer Folge verdunstet wird. Bei **cuticulärer Transpiration** wird Wasser in Form von Wasserdampf durch die Epidermisaussenwände und durch die Cuticula (trotz deren hydrophober Eigenschaften!) abgegeben. Diese Art der Wasserabgabe trägt aber nur etwa 10 % zur Gesamttranspirationsleistung der Pflanze bei. Viel stärker entwässert die **stomatäre Transpiration**. Dabei kann – im Gegensatz zur cuticulären Abgabe – der Wasserausstoß mittels Schließzellen in den Spaltöffnungen der Blätter reguliert werden. Wie später noch zu sehen sein wird, kann durch Transpiration der Wärmehaushalt von Pflanzen geregelt werden. Desweiteren wird Wasser in Tropfenform abgegeben, was als **Guttation** bezeichnet wird. (NULTSCH, 2001).

Die oberirdischen Teile einer Pflanze (v. a. die Blätter) vermindern die Menge des Niederschlagswassers, das bis zum Boden gelangt, indem sie größere Mengen zurückhalten (**Interzeption**) und entweder in sich aufnehmen, verdunsten (**Transpiration**) oder verzögert dem Boden zukommen lassen. Die Verdunstung von Wasser und damit Entwässerung des Bodens ist abhängig von Artenzusammensetzung und Aufbau der Pflanzenbestände. LARCHER (1973) ermittelte Verdunstungsleistungen von verschiedenen Pflanzenbeständen wobei sich enorme Unterschiede zeigten. So verdunstet etwa ein alpiner Rasen lediglich  $50 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$ , oder 5 % vom Gesamtniederschlag, während eine Nasswiese Werte von  $1160 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$ , oder 135 % zeigt. Nadelwälder verdunsten laut der Studie etwas weniger ( $580 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$  / 46 %) als Mischwälder ( $500\text{-}860 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-2}$  / 50-54 %), was an der – trotz Blattabwurfs und -neubildung – höheren Verdunstungskapazität der Laubblätter zu liegen scheint. Die Verdunstung über einer freien Bodenoberfläche, oder über Wasser unter Ausschluss biologisch-physiologischer Prozesse nennt man **Evaporation**. Meist werden die pflanzliche Transpiration und die bodenbürtige Evaporation unter den Begriff **Evapotranspiration** subsumiert. Zusammengefasst ist die Verdunstungsrate

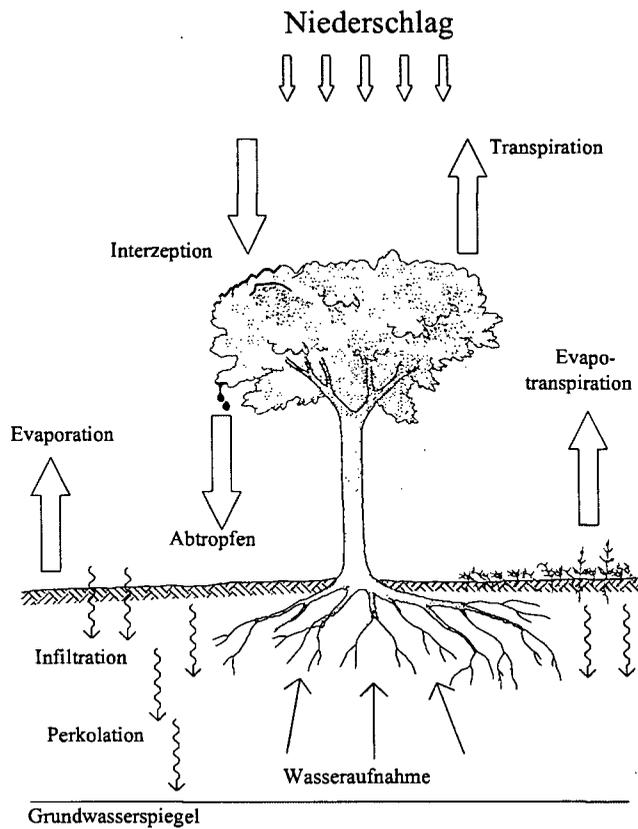


Abbildung 6.4: Vegetation und Wasser.

von der Ausbildung der Bodenoberfläche (Pflanzendecke) und deren Exposition (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit, Sättigungsdefizit der Luft) abhängig (HÖLTING, 1996).

Infolge des Wasserentzuges erhöht sich die Wasserspannung und somit die Kohäsion und der Reibungswiderstand (innerer Reibungswinkel) des Bodens. Weiters verringert sich dadurch der Porenwasserdruck und das Gewicht, womit die Scherfestigkeit und somit die Standsicherheit von Hängen erhöht werden (FLORINETH, 2004, S. 15f). Die Niederschlagsmenge, die u. a. von der Pflanzenoberfläche aufgenommen und zurückgehalten wird, bezeichnet man als Interzeptionskapazität. Für Nadelwälder gibt BRECHTEL (1990) Interzeptionsverluste von 30-40 % des jährlichen Gesamtniederschlags an. Laubwälder halten nach WARD und ROBINSON (1989) 15-25 %, im unbelaubten Zustand 4-7 % zurück. In dichten tropischen Regenwäldern kann die Interzeption bis zu 50 % betragen.

Für Interzeption von Niederschlägen in Form von Schnee ist die quantitative Abschätzung, so der Autor, sehr schwierig.

**Infiltration** Pflanzen beeinflussen die Infiltrationseigenschaften von Böden. Direkten Einfluss nehmen die Wurzeln, an deren Oberflächen Wasser in den Boden eindringen kann oder durch die Bildung von Röhren aus abgestorbenen Wurzeln, die regelrechte Leitbahnen für Wasser bilden (SCHROEDER, 1992, S. 54). Indirekten Einfluss üben Pflanzen durch die Förderung von Bodenlebewesen, die ihrerseits durch Grabgänge die Infiltrationseigenschaften von Böden verändern (FLORINETH, 2004, S. 17). Eine Erhöhung der Infiltrationsleistung kann neben positiven, auch negative Wirkungen auf den Wasserhaushalt haben. Je nach Bodenart und Bewuchs, kann es durch zu hohe Wasserleitfähigkeit/Porosität zu Austrocknung des Bodens oder zur Ausspülung von Nährstoffen kommen. In diesem Zusammenhang kann auch auf die Wasserspeisung des interstratualen Abflusses über wasserstauenden Schichten hingewiesen werden, wodurch Translationsrutschungen ausgelöst werden können (Kapitel Gleiten 4.2.4 auf Seite 28). Während *Infiltration* das Eindringen von Wasser der Bodenoberfläche in den Boden an sich beschreibt, bezeichnet **Perkolation** das Versickern des Wassers im Boden bis zum Grundwasser.

**Überstaubarkeit** Nicht exakt zum Thema dieses Kapitels passend, wird hier dennoch auf eine biotechnische Pflanzeigenschaft mit Bezug zum Wasser hingewiesen: Manchen Pflanzen, wie etwa der Silberweide (*Salix alba*) und der Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) ist die Fähigkeit eigen, an längere Zeit überfluteten Standorten zu überleben (FLORINETH, 2004). Dazu bedürfen sie folgender Eigenschaften, welche HACKER (1997) angibt: Wasserwurzelbildung, Raschwüchsigkeit, schwimm- und flugfähige Samen und Anspruchslosigkeit gegenüber der Nährstoffsituation des Standorts. Diese Eigenschaft berührt hauptsächlich das Thema 'Bauen am Fließgewässer' und wird an Hangverbauungen wahrscheinlich nur sehr selten zum Tragen kommen.

## 6.2 Stabilisierende Funktion

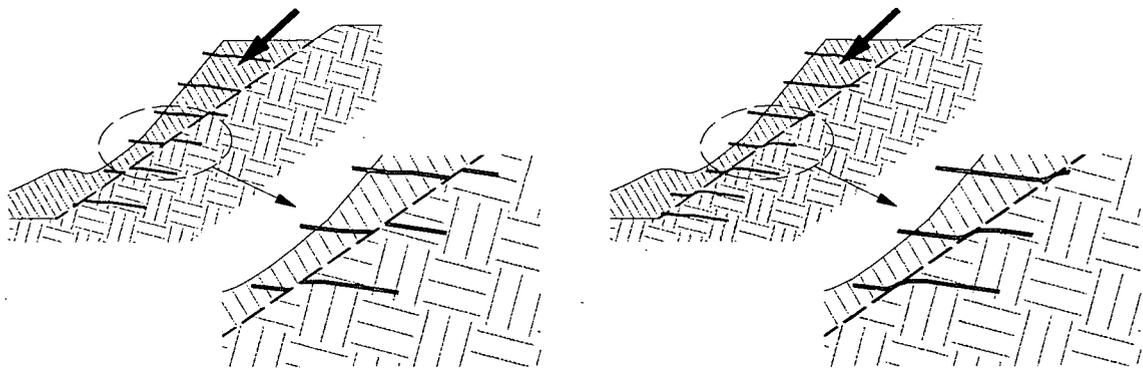
Hierunter wird die Stabilisierung des Bodenkörpers verstanden. Mit der schützenden Wirkung der oberirdischen Pflanzenteile (Stamm, Blätter) beschäftigt sich das Kapitel 6.3, *Oberflächenschutzfunktion*.

**Wurzeln** Diese durchwachsen einen Bodenkörper mit vielen kleineren und größeren „Zugankern“ und erreichen damit neben der Selbststützung auch eine Festigung des Bodenkörpers. Wurzeln müssen dabei einerseits stark und zugfest sein, andererseits aber reißfest und biegefest. McLAREN und CAMERON (1996, S.65) beschreibt die Wirkung der Wurzeln. Danach erzeugen sie durch ihr Längen- und Dickenwachstum einen Druck auf den umgebenden Boden. Gemeinsam mit der kohäsionsfördernden Wirkung durch Wasseraufnahme binden sie den Boden zu Aggregaten. In der Rhizosphäre werden durch mikrobielle Aktivitäten organische Kleber oder sogenannte ‘Muzigels‘ produziert, welche in der Aggregatbindung mithelfen. STANGL und SCARPATETTI (2005) sprechen den Wurzeln (und damit indirekt allgemein den Pflanzen) nach ihren Untersuchungen von Gehölzeinlagen zur Hangstabilisierung hervorragendes mechanische Armierungsvermögen zu, auch in steilen Lagen.

Die **Durchwurzelungscharakteristik, -intensität und -tiefe** ist von mehreren Faktoren abhängig. Zwar gibt es theoretische Wurzelformen (Tief-, Flach- und Herz-), welche aber nur unter idealen Bedingungen entstehen. Gewöhnlich spielt die Art und der Aufbau des Bodens die wesentlich größere Rolle als genetisch bedingte Vorgaben. Auf einem flachgründigen Boden, oder bei Vorhandensein von dichten Bodenschichten, wird auch ein grundsätzlich als Tiefwurzler veranlagter Baum notgedrungen ein flaches Wurzelsystem ausbilden. Auch der Wasserhaushalt spielt bei der Wurzelbildung eine Rolle. Besteht etwa in einiger Tiefe eine Bodenschicht die stark wasserzügig ist, werden, mit Ausnahme einiger Spezialisten (siehe Punkt: ‘Überstaubarkeit‘), die meisten Wurzeln an dieser Grenze halt machen und schichtparallel ausweichen. Andererseits kann ein Wurzelsystem wesentlich tiefer werden, wenn in den oberen Bodenschichten Wassermangel herrscht – die Wurzeln wachsen dorthin, wo Wasser ist (FLORINETH, 2004). Die Bewurzelungstiefe ist für ingenieurbio-logische Bauwerke von großer Bedeutung. Schließlich hängen von ihr die Einsatzmöglichkeiten dieser Bauweisen ab. Worunter die Ingenieurbio-logie oft zu leiden hat ist auch bei der Durchwurzelungstiefe der Fall: es gibt schwerlich nachweisliche Berechnungsgrundlagen von verlässlichen Wurzeltiefen. Man ist gezwungen, auf Erfahrungswerte zurückzugreifen. Diese besagen, dass mit ingenieurbio-logischen Bauweisen Bodenkörper bis zu einer Tiefe von etwa **zwei Metern** erfolgreich und nachhaltig gesichert werden können (FLORINETH persönliche Mitteilung). Zwar können viele Bäume und Sträucher tiefer wurzeln (siehe dazu KUTSCHERA und LICHTENEGGER (2002)), maßgebend ist aber die **Tiefe der größten Durchwurzelungsintensität oder -dichte**, da nur diese Stabilität garantiert. Die Untersuchung von STANGL und SCARPATETTI (2005) ergab

alleine für eingelegte Gehölzsprosse, die durch Dickenwachstum Hauptwurzelcharakter annehmen, eine sehr gute Tiefenbewehrung bis etwa 2 m quer in den Hang hinein. Aus der hier angeführten Tiefengrenze ist abzuleiten, dass diese Diplomarbeit sich vorrangig mit flachgründigen Massenbewegungen beschäftigt. Abschließend soll zur Durchwurzelung erwähnt werden, dass ihre Charakteristik von der Pflanzen-Art abhängig ist, weshalb ein Vegetationsbestand, seien es Gräser-Kräuter oder Bäume, eine große Diversität aufweisen sollte um den Bodenkörper ideal durchwurzeln zu können.

**Biotechnische Eigenschaften** Zu den mechanischen oder biotechnischen Eigenschaften nennt FLORINETH (2004) Elastizität und Biegefestigkeit, Auszugswiderstand und Scherfestigkeit. Die ersten beiden Eigenschaften Elastizität und Biegefestigkeit haben für Hangbewegungen und deren Behandlung weniger Bedeutung als für den Flussbau, weshalb hier nur auf die Literatur verwiesen wird (FLORINETH, 2004, S. 19f).



**Abbildung 6.5:** Böschungsbruch, bei dem die Pflanzen brechen (links). Böschungsbruch, bei dem die Pflanzen aus dem Boden gezogen werden (rechts) (SCHUPPENER, 2003).

Den **Auszugswiderstand** (AZW) beschreibt derselbe Autor als Kraft, die erforderlich ist, um eine Pflanze aus dem Boden zu reißen. Zum Beispiel benötigt man nach einer Studie von BURES (unveröffentlicht) 5 N Zugkraft um englisches Raygras (*Lolium perenne*) aus dem Boden zu ziehen, dagegen 350 N für Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) oder 3250 N für die Luzerne (*Medicago sativa*). WEITZER et al. (1998) ermittelten für Gehölze, etwa für Grünerle (*Alnus viridis*) einen AZW von 0,664 kN bis 11,371 kN oder für Esche (*Fraxinus*) einen AZW von 1,204 kN bis 38,088 kN. Diese Messungen sind allerdings etwas problematisch, da sie nur Laborwerte angeben, die von der Messmethode abhängen. Sie müssen deshalb kritisch betrachtet werden. Abbildung 6.5 zeigt im rechten Bild Wurzeln, die nach Überwindung ihres Auszugswiderstand aus dem Boden herausgezogen werden.

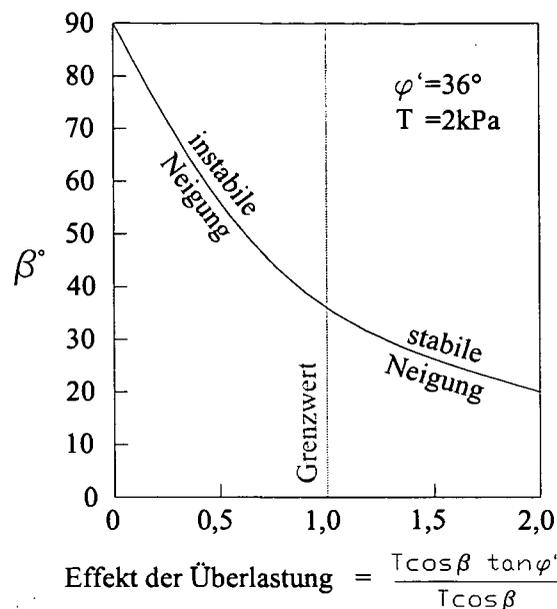
Die **Scherfestigkeit** von Pflanzen gibt den maximalen Seitendruck auf einen Pflanzenteil an, bei dem sie abreißen. Für Gräser bzw. Gräser-Kräuter-Bestände ergeben sich laut TOBIAS (1991) Werte zwischen 30,1 und 48,7 kN·m<sup>-2</sup>. Die Scherfestigkeit eines Bestandes hängt v. a. von der Artenzusammensetzung der Vegetation ab. Abbildung 6.5 zeigt im linken Bild, wie Scherkräfte beim Abrutschen einer Böschung die Scherfestigkeit von Wurzeln überwinden können und diese zum abreißen bringen.

Mithilfe dieser Parameter könnten bei Stabilitätsberechnungen von Hängen oder Böschungen die Wirkungen von Pflanzen berücksichtigt und die durch sie induzierte Erhöhung der Bodenscherfestigkeit nachgewiesen werden. BISCHETTI et al. (2004) errechneten in einem norditalienischen Testgebiet bei Varese eine **Scherkraftherhöhung** der Böden um 4-8 kPa durch Buche und um 6-11 kPa durch Fichte. Baumwurzeln bewirken also eine zusätzliche Bindekraft von Hängen, die manchmal auch als Scheinkohäsion bezeichnet wird. Sie reicht aber nicht aus um bei Extremniederschlägen den hohen Porenwasserdruck in Bodenhohlräumen auszugleichen.

Pflanzen haben aber nicht nur hangstabilisierende Wirkung. Unter bestimmten Umständen (zB Monokulturen von Flachwurzlern, nicht kohäsive oder seichtgründige Böden) können Bäume dem Winddruck nicht standhalten, lockern durch hin- und herschwingen den Boden oder werden gar umgeweht. Ein weiteres Beispiel sind durch von Schneedruck umgedrückte Sträucher, wodurch die von ihnen durchwurzelteten Rasenschollen mit abgehoben werden (siehe Abb. 4.19).

Viele Autoren, u. a. SELBY (1993), messen dem **Hangneigungswinkel**, in der Frage nach der stabilisierenden bzw. destabilisierenden Wirkung von Vegetation, insbesondere von Bäumen, eine entscheidende Rolle zu. Abbildung 6.6 zeigt den Zusammenhang zwischen Hangneigung und Wirkung eines Baumbestandes für die Hangstabilität. Nach diesem Diagramm gibt es bis zu einer Steigung von etwa 36° eine stabilisierende Wirkung, darüber eine destabilisierende. Die Aussage dieses Diagramms ist sicher nicht so generalisierbar, wie es scheinen mag, denn auch andere Faktoren üben hier Einfluss.

**Wald** Oft wird dem Wald eine besondere Wirkung auf Hangstabilität zugeschrieben. In erster Linie wird ihm gerne die Rolle des Stabilisateurs zugeschrieben, wenngleich dieses Thema in Expertenkreisen noch immer heiß diskutiert wird und die Meinungen oft auseinandergehen. So stellte RICKLI (2001) Unterschiede in der Rutschaktivität zwischen Wald und Freiland dahingehend fest, dass jene im Waldbereich durchschnittlich höhere Kubaturen aufwiesen. Auch MOSER (1980) bemerkte eine größere Gesamtanbruchsfläche



**Abbildung 6.6:** Der Effekt des Baumgewichtes auf die Hangstabilität in Abhängigkeit des Hangneigungswinkels. Ab etwa  $36^\circ$  Steigung tritt eine destabilisierende Wirkung durch Bäume ein (SELBY, 1993, S. 279).

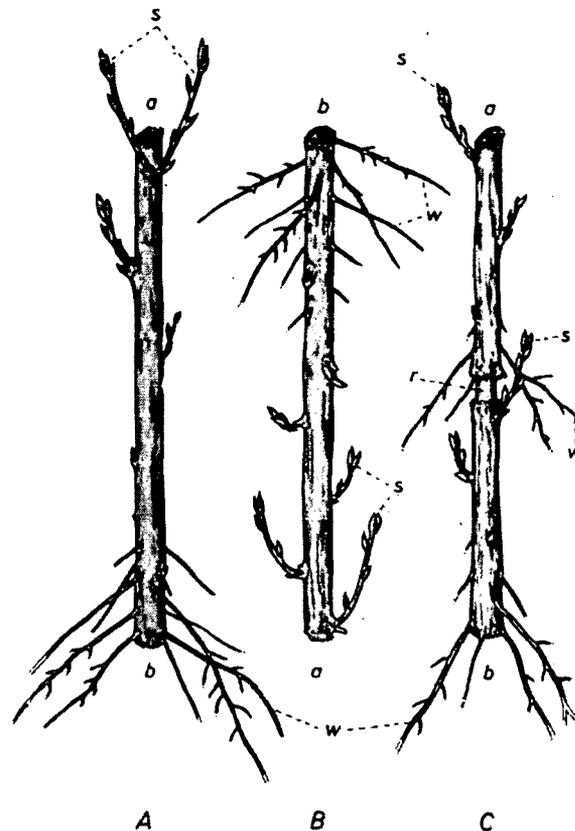
(19-21 ha) im Wald gegenüber Freilandböden (8-10 ha). Untersuchungen von MARKART et al. (2005) konnten diesen Unterschied jedoch nicht entdecken. Desweiteren geht Rickli davon aus, dass sich Vegetation auf Rutschungen nur dann auswirkt, wenn die Gleitfläche nicht wesentlich unterhalb des Wurzelbereiches liegt. Hierauf weisen MARKART et al. auf deren Beobachtung hin, wonach diese Aussage nur bei Einwirkung von Oberflächen- oder Hangwasser aus überliegenden waldfreien Bereichen stimmt. Dies bekräftigen die Autoren durch die Erwähnung einer Arbeit über bodenphysikalischen Ursachen von Waldabbrüchen von Stahr (1991), in der dieser zum Schluss kommt, dass auf den Waldböden für den Aufbau eines abbruchauslösenden Hangwasserspiegels vielfach „Fremdwasser“ aus höher gelegenen Bereichen wahrscheinlich war.

KEPPELER und BROWN (1998) und RICKLI (2001) sehen für Abbrüche im Wald einen engen Zusammenhang zwischen der Rutschaktivität und dem Waldzustand. MARKART et al. kamen in ihren Untersuchungen ebenfalls zu der Meinung, dass Waldvegetation bzw. der Waldzustand flachgründige Rutschungen beeinflussen kann. Sie beobachteten Anbrüche im Wald bevorzugt in und unterhalb von Blößen, auf und unterhalb von Rasenflächen, auf früher landwirtschaftlich genutzten und jetzt in nicht betreuter Sukzession befindlichen Einheiten, sowie in stark aufgelockerten Beständen. Auch unterhalb von

Waldflächen oder direkt am Waldrand wurden flachgründige Rutschungen vorgefunden. Ursache ist in diesen Bereichen das weniger dicht und weniger stark ausgebildete Wurzelwerk der Bäume.

Aus ihren Untersuchungen sehen MARKART et al. (2005) **unkontrollierte Extensivierung** auf ehemals intensiv landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen als rutschungsauslösenden Faktor. Die intensive Durchwurzelung im Waldbereich hat einen höheren **Sekundärporenanteil** (Wurzelröhren, Tierröhren, etc.) zur Folge (WHIPKEY, 1962). Dadurch kommt es zu einem erhöhten Zwischenabfluss bei Niederschlägen (KEPPELER und BROWN, 1998) und die Sekundärporen agieren als eine Art Überdruckventil, womit der Porenwasserdruck ausgeglichen werden kann. Ohne diese Poren steigt der Porenwasserdruck deutlich an und die Rutschbereitschaft ist höher. Für BUNZA (1992, S. 133) ist die schützende oder stabilisierende Wirkung des Waldes in Gebieten die von Natur aus instabil sind und zu Massenbewegungen neigen unterschiedlich zu bewerten. Aus einer Untersuchung (BUNZA et al., 1988) zeigt insbesondere die Entwaldung durch Kahlhieb negativen Einfluss auf den Wasserhaushalt, der sich oberflächlich durch erhöhte Abflüsse und im Untergrund durch Stabilitätsminderung aufgrund Gewichtszunahme oder erhöhte Kluft- und Porenwasserdrucke bemerkbar macht und schließlich durch Überschreitung eines „kritischen Umschlagpunktes“ (BENDEL, 1949) im Verhältnis von Wassergehalt und innerer Reibung im Hang zur Rutschung führen kann. BUNZA (1992, S. 135) schließt sogar einen Einfluss von anthropogenen Maßnahmen (zB Entwaldung) auf tiefgründige Massenbewegungen nicht aus, da infolge des hohen Porenvolumens, das auch Jahre nach dem Kahlschlag noch infiltrierend wirkt und fehlender Evaporation Wasser stärker in den Boden und auch in tieferen Untergrund gelangen kann.

**Vegetative Vermehrung** Pflanzen können sich neben der generativen, geschlechtlichen *Fortpflanzung*, auch vegetativ, asexuell *vermehrten*. Für NULTSCH (2001) ist diese Eigenschaft für viele Pflanzenarten von hoher Bedeutung, da generativ erzeugte Tochterorganismen häufig zugrunde gehen und sie die Erhaltung der Art alleine nicht sichern könnten. Am Rande sei hierzu eine Aussage von Prof. Hanno RICHTER (zur Vorlesung Gehölzphysiologie) erwähnt, worin er darauf hinweist, dass verholzende Pflanzenindividuen in ihren oft jahrzehntelangen Leben lediglich ein einziges Tochterindividuum hervorbringen müssen, um ihren Fortbestand zu sichern. Er räumt dazu ein, dass insbesondere die Bäume aus dem genannten Grund sehr verschwenderisch mit ihren Diasporen umgehen können, zB um Tiere damit füttern.



**Abbildung 6.7:** Polarität austreibender Weidenzweige (*Salix*). A in normaler, B in inverser, C in normaler Lage geringelt. a... apikaler, b... basaler Pol, r... Ringelungsstelle, s... Seitentriebe, w... Wurzeln. Verändert nach SACHS, PFEFFER.

Vegetative Vermehrung geschieht durch mitotische Teilung, die dadurch charakterisiert ist, dass jede Tochterzelle die gleiche Anzahl von Chromosomen wie die Mutterzelle erhält NULTSCH (2001). Die dabei entstehenden Fortpflanzungseinheiten sind also der Mutterpflanze identisch, sozusagen deren Klone. Dies ist insofern leicht nachvollziehbar, da Pflanzen grundsätzlich modular aufgebaut sind, d.h. in jedem Teilstück der Gesamtpflanze wiederholt sich die Gliederung in Sprosspol und Wurzelpol, wobei ursprüngliche Polarität tendenziell erhalten bleibt. Abgeschnittene, abgebrochene oder geringelte Zweige können sich bei vielen Arten am unteren Ende bewurzeln und am oberen Ende Seitentrieben ausbilden, selbst wenn sie verkehrt herum eingelegt werden (Abb. 6.7).

Es gibt zwei Arten von Spross- oder Wurzelanlagen in einer Pflanze: Adventive und Proventive. Die **adventiven Anlagen für Wurzeln oder Seitentriebe** sind anfangs gleichartige, undifferenzierte Meristeme, die durch Teilung von Bastparenchym- oder

Holzstrahlzellen entstanden sind. Solange das Organ an der Pflanze sitzt, sind diese Meristeme (Bildungsgewebe) untätig. Erst durch eine Verletzung werden diese Zellen angeregt sich ausdifferenziert. Diese Anregung erfolgt, wie so viele Vorgänge in der Pflanze hormonell bedingt, wobei die hormonelle Bereitschaft bei jungen, gering verholzten Reisern am größten ist. Bei der Bewurzelung von Stecklingen sind zwei Phytohormone von besonderer Bedeutung: die streckungswachstumsfördernden *Auxine* und die *Cytokinine*, die bei Zellteilungen (*Cytokinesen*) steuernd mitwirken. Orte der Zellteilung und Differenzierung können der Wundkallus an der Stecklingsbasis, im Kambiummantel oder im Phloemparenchym sein. Die dabei entstehenden funktionell differenzierten (Wurzel)Zellen bilden das so genannte Dauergewebe. Besonders in der Induktionsphase der Bewurzelung von Stecklingen ist der Zustand des Ausgangsmaterials wichtig. Dieser hängt vom physiologischen Zustand der Mutterpflanze, von deren Alter und vom Erntetermin ab. NULTSCH (2001) und RICHTER.

**Proventive Spross- oder Wurzelanlagen** sind im Gegensatz zu den adventiven schon am jungen Trieb in Form von sogenannten 'Schlafenden Knospen' vorhanden. Sie sind, wiederum anders als adventive Anlagen mit dem Mark verbunden (FINK, 1980). Nach der Anlage der proventiven Knospen werden sie relativ rasch von der Rinde überdeckt, wodurch sie von aussen nicht mehr zu sehen sind. Ihre Lebensdauer ist teilweise sehr hoch und kann zwischen 1-75 Jahre betragen. Das Hormon *Indolacetylsäure*, welches von den Meristemen gebildet wird und sich in der ganzen Pflanze verteilt, ist für den in Ruhe verharrenden Zustand (**Dormanz**) verantwortlich, das bei der Beschreibung der adventiven Anlagen bereits erwähnte Hormon *Auxin* kontrolliert die Dormanz. Wenn die Konzentration der *Indolacetylsäure* bis unterhalb eines Schwellenwertes absinkt, wird die Dormanz aufgehoben und die Knospe treibt aus. Die eigentliche Aufgabe proventiver Spross- und Wurzelanlagen liegt im Ausgleich von Blatt- oder Kronenverlusten.

In der Ingenieurbiologie wird die vegetative Vermehrbarkeit ausgenutzt um die großen Mengen an Pflanzen die für ingenieurbiologische Bauwerke benötigt werden sicherzustellen. Desweiteren ist auf diese Weise das Baumaterial um vieles günstiger, als wenn bewurzelte Gehölze mit einem Stammdurchmesser von 4-8 cm gekauft werden müssten. Die Methode der Vermehrung von Pflanzen durch das Einlegen von Ästen (Steckholz), dünnen Zweigen (Steckling), Wurzelstücken (Wurzelsteckling), Rhizomen (Rhizomsteckling) oder Brutknospen in die Erde ist schon sehr alt, sie wurde u. a. schon vor 1200 Jahren in Japan mit Koniferen angewendet. Auch nutzten schon die Römer vor 2000 Jahren Weiden als Raubäume, die nach Einschlämmung durch Geschiebeanlandungen

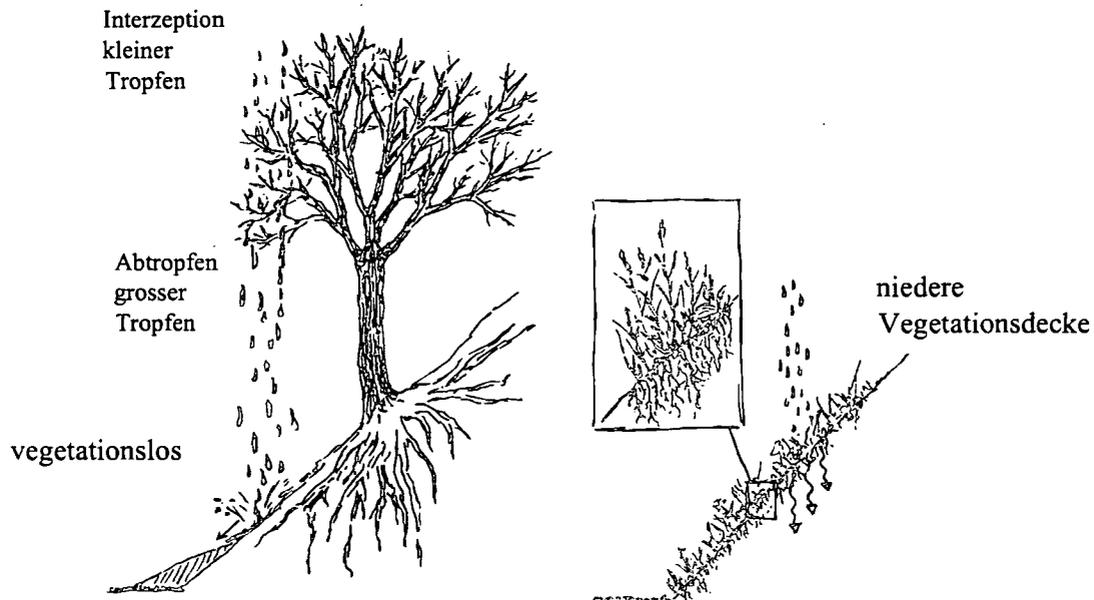
wieder austrieben. Es darf jedoch gemutmaßt werden, dass sie dieses Phänomen eher als Zufall abtaten und es nicht beachteten (HÖRANDL et al., 2002). Weiden, aber auch Schwarzpappel (*Populus nigra*), Liguster (*Ligustrum vulgare*), Deutsche Tamariske (*Myricaria germanica*), Goldregen (*Laburnum anagyroides u. alpinum*), Grauerle (*Alnus incana*), Hasel (*Corylus avellana*), Hartriegel (*Cornus sanguinea*) um einige der wichtigsten zu nennen, haben die Fähigkeit besonders ausgebildet, weswegen sie zu den bevorzugten ingenieurbiologischen Baumaterialien gehören. Bei nichtheimischen Arten sind Bocksdorn (*Lycium barbarum*), Tamariske (*Tamarix gallica, articulata, africana u. parviflora*), Strauchklee (*Medicago arborea*), Forsythie (*Forsythia suspensa u. viridissima*) und Oleander (*Nerium oleander*) sehr gut für die vegetative Steckholzvermehrung geeignet. Neben Methoden, welche ein Abschneiden oder Abtrennen von Pflanzenteilen erfordern, gibt es auch Methoden wo an der Mutterpflanze verbleibende Teile vermehrt und erst nach der Spross- oder Wurzelneubildung von dieser abgetrennt werden. Diese sind Ableger und Absenker, Abrisse, Teilung und auch die Veredelung. (FLORINETH, 2004, S. 28ff).

### 6.3 Oberflächenschutzfunktion

Sie besteht in der Bedeckung von offener Bodenoberfläche durch die oberirdischen Teile der Pflanzen (Stamm bzw. Stängel und Blätter). Diese „vermindern und verzögern die Prallwirkung der Niederschläge und lassen sie je nach Bodenbeschaffenheit und Witterungsbedingungen langsam in den Boden eindringen oder langsam abfließen“ (FLORINETH, 2004). Durch Bepflanzung oder Begrünung kann der erosive Bodenabtrag so sehr klein gehalten oder gar verhindert werden.

Die weiter oben erwähnte Interzeption, das Abfangen von Regentropfen durch Blätter und Äste kann sich positiv, aber auch negativ auf den darunter liegenden Boden auswirken (Abb. 6.8). Die positive Wirkung ist die verzögerte Wasserzugabe an den Boden, wodurch sich der Oberflächen- und Zwischenabfluss verringert. Auch kann die Aufprallkraft der Regentropfen (siehe Abb. 4.27 auf Seite 48) auf der Bodenoberfläche dadurch gemindert werden. Diese positive Wirkung nimmt aber mit zunehmender Höhe der interzeptierenden Pflanze ab, da ab einer gewissen Höhe, das verzögert von den Blättern wiederabtropfende Niederschlagswasser nun größere Tropfen bildet und somit die Aufprallkraft um einiges größer ist, als sie bei direkten Niederschlag gewesen wäre (SCHEFFER et al., 1998).

## Baumbestand



**Abbildung 6.8:** Schutz der Bodenoberfläche durch Vegetation. Hoher Baumbestand bringt wenig bis keinen Schutz (links), niedere Vegetation schützt vor Regentropfen (rechts). Zeichnung: Barbara Ipser.

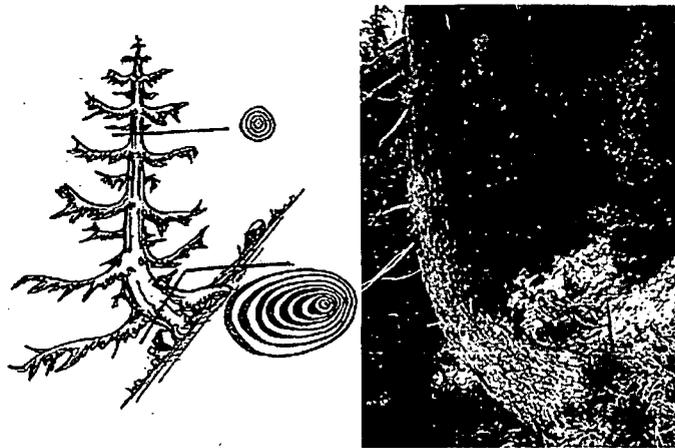
Siehe auch Kapitel 4.2.8 auf Seite 46.

## 6.4 Analytische Funktion

Vegetation kann bei Standortanalysen, worunter auch das Erkennen von Hangbewegungen zu sehen ist, auf verschiedene Weise als Hilfsmittel herangezogen werden.

**Stumme Zeugen** Für geomorphologische Untersuchungen erlauben es unterschiedliche Pflanzen-, insbesondere Baumstellungen, Rückschlüsse auf Geländebewegungen ziehen zu können. Man spricht dabei von *Stummen Zeugen*. HÜBL et al. (2003) definieren sie folgendermaßen: „*Stumme Zeugen sind Spuren im Gelände, die auf abgelaufene und rezente Massenverlagerungsprozesse qualitativ rückschließen lassen und bestenfalls quantitative Interpretationen zulassen.*“ Geomorphologische Merkmale wie Oberflächenrisse, Wulstgirlanden (Abb. 4.24 auf Seite 44) oder Nackentälchen, wurden schon im Kapitel Geomorphologie ab S. 11 beschrieben.

Die Wuchsform oder die Stellung von Bäumen und Sträuchern lässt ebenfalls Rückschlüsse auf Bewegungsprozesse zu. Der sogenannte **Säbelwuchs** von Bäumen oder Sträuchern ist eine Reaktion auf Schneebewegungen (Schneekriechen, -gleiten, Lawinen). Dieses Phänomen tritt nach SCHÖNEBERGER et al. (1994) vorwiegend auf schneereichen Südhängen von 35-40° Neigung mit glatter Oberfläche auf. Jüngere Stämme werden dadurch schief gedrückt. In der Abbildung 6.9 wird der Grund für den gekrümmten Wuchs deutlich. Als Reaktion auf die Druckbelastung entstehen exzentrische Stämme mit Druckholz auf der Talseite. Einige Meter über dem Boden sind die Stämme aber nahezu zentrisch, weil hier die Kräfte kaum mehr einseitig wirken. Säbelartigen Wuchs von Sträuchern zeigt die Abbildung 6.10.



**Abbildung 6.9:** Säbelwuchs als Reaktion auf Schneebewegungen (SCHÖNEBERGER et al., 1994).

**Bogenwuchs** entsteht auf instabilen, sich langsam und über Jahre hinweg bewegendem (kriechenden) Böden. Aufgrund der langsamen Bewegungen (mm bis cm pro Jahr) kann sich eine geschlossene Vegetationsdecke bilden, welche nicht direkt auf eine Bewegung schließen ließe. Stehen auf der bewegten Fläche aber auch Bäume, so kann die Bewegung am bogenförmigen Wuchs erkannt werden. Durch das Kriechen wird an der Bodenoberfläche der Stamm stetig schiefer gestellt, während der Baumwipfel stets vertikal wächst. Da der Stamm sich nicht aufrichten kann, entsteht mit der Zeit – der Intensität der Bodenbewegung entsprechend – eine gebogene Stammachse. Sowohl an der Stammbasis als auch in den Kronen befindet sich Druckholz auf der Talseite des Stammes (Abb. 6.11). **Knickwuchs** deutet auf länger zurückliegende Bewegungen hin.

KOCH (2004) weist in seiner Dissertation darauf hin, dass Kriechbewegungen an der Geländeoberfläche und am Erscheinungsbild eines Baumes nicht immer leicht zu erkennen



Abbildung 6.10: Säbelartige Wuchsform von Grünerlenbüschen als Reaktion auf Schneedruck.

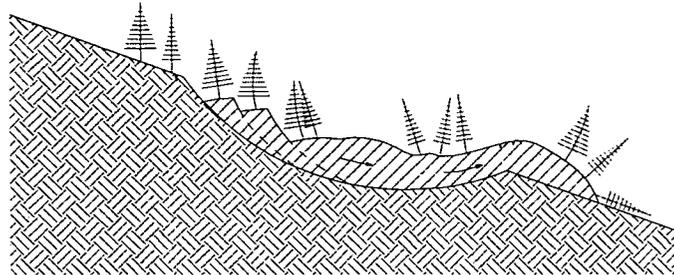


Abbildung 6.11: Bogenwuchs als Reaktion auf Kriechbewegungen (SCHÖNEBERGER et al., 1994).

sind. Jedoch können Bewegungen in einigen Fällen auch mittels Druck- und Zugwurzeln, welche als auffällige Formen aus dem Boden ragen, ergründet werden. Die mehrjährige Ausbildung von Zuwachsreduktionen mit anschließender Druckholzbildung deutet in vielen Fällen auf eine Kriechbewegung als Initialstadium einer folgenden Rutschung hin.

**Rotationsrutschungen** weisen nach BUNZA (1992, S. 100) auf den Rutschschollen im Kopfbereich der Rutschung zum Hang geneigte Bäume, am Rutschkörper in alle Richtungen gestellte Bäume und an der Rutschungszunge vom Hang weggeneigte Bäume auf. Im Bereich der Rutschzunge liegen die Bäume z. T. flach oder in verschiedenen

Winkeln und sind z. T. ins Material eingearbeitet. **Translationsrutschungen** weisen eine durchwegs unregelmäßige Stellung der beeinträchtigten Bäume auf. Umgangssprachlich werden schief durcheinander stehende Bäume, wie sie bei den beiden Rutschungstypen vorkommen können, als „betrunkenen Wald“ bezeichnet.



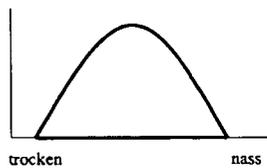
**Abbildung 6.12:** Schematische Abbildung einer einfachen bzw. multiplen rückschreitenden Rotationsrutschung und Darstellung der dabei entstehenden Baumstellungen und Wuchsformen. Verändert nach (BUNZA, 1992, S.100).

**Zeigerfunktion** In der Ökologie gibt es für Organismen die Unterscheidung zwischen jenen mit breiter ökologischer Amplitude und jenen mit enger ökologischer Amplitude. Diejenigen mit breiter Amplitude nennt man *Generalisten*, ihr ökologisches Verhalten ist *euryök* und sie sind relativ anspruchslos, was ihren Standort anbetrifft. Die Organismen mit enger Amplitude heißen *Spezialisten*, sie verhalten sich *stenök*. Diese stellen hohe Anforderungen an ihre Standorte, weshalb sie auch nur an bestimmten Standorten vorkommen. Aber gerade diese Eigenheit macht stenöke Pflanzen zu wertvollen Hilfsmitteln in der Standortanalyse. Abbildung 6.13 zeigt an drei Beispielen die indikatorische Eignung bzw. Uneignung der jeweiligen Pflanze. Der breite Toleranzbereich von *Fagus sylvatica*, die somit ein euryökes Verhalten anzeigt, macht sie als Zeigerpflanze unbrauchbar. Ganz im Gegensatz weisen *Quercus ilex* und *Alnus glutinosa* einen engen Toleranzbereich, also stenökes Verhalten auf. Dadurch können sie für die von ihnen bevorzugten Standortgemeinschaften Indikatoren sein. Beide Bäume zeigen stenohydre (enger Toleranzbereich bezogen auf Wasser) Ansprüche, jedoch in gegensätzlicher Ausbildung. Die Stieleiche ist trockenheitsliebend und fehlt daher auf frischen bis nassen Standorten. Dagegen fühlt sich die Schwarzerle an frischen bis nassen Böden am wohlsten, wofür sie ein Zeiger ist.

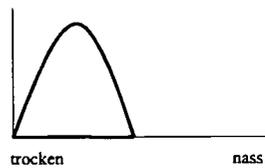
Als Grundlagen für die Anwendung von Zeigerpflanzen erarbeiteten einige Autoren Listen von Pflanzen und den dazugehörigen Zeigerwerten. ELLENBERG et al. (1992) verwenden 9- bis 12teilige Skalen, worin der Wert 1 eine breite faktorielle Toleranz und

## Verschiebung des Potenzbereichs

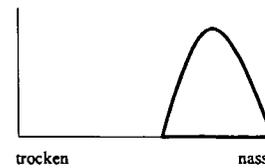
— Toleranz      — Potenz



**Fagus sylvatica**  
Rotbuche, große Potenz bei mittlerer Feuchte, meidet Trockenheit und Nässe



**Quercus ilex**  
Steineiche, große Potenz auf trockenen, fehlt auf frischen oder feuchten Böden



**Alnus glutinosa**  
Schwarzerle, nur auf frischen bis nassen Böden

**Abbildung 6.13:** Schwankungsbereich von ökologischen Amplituden an drei Beispielen. *Fagus sylvatica* zeigt euryöke, *Quercus ilex* und *Alnus glutinosa* stenohydre Standortansprüche. Alle drei Arten haben in ihrem Toleranzbereich jeweils gleich hohe ökologische Potenz.

9 bzw. 12 eine ausgeprägten Abhängigkeit von einem bestimmten Faktor bezeichnet. ZB steht bei einer Tiefschattenpflanze die Lichtzahl 1, bei einer Halbschattenpflanze 5 und bei einer Volllichtpflanze die Zahl 9. Die Feuchtezahl ist diejenige Skala, die 12 Unterteilungen aufweist. Hier steht die Zahl 1 für einen Starktrockenzeiger, die Zahl 7 einen Feuchtezeiger und 12 steht für Unterwasserpflanzen. LANDOLDT (1977) verwendet eine 5teilige Skala und geht speziell auf Pflanzen des (schweizer) Alpenraumes ein. Er bewertet Pflanzen nach den Faktoren Feuchtigkeit, Reaktion, Nährstoffgehalt, Humusgehalt, Verdichtung (Dispersität oder Durchlüftungsmangel), Salzgehalt, Licht, Temperatur, Kontinentalität und Wuchs- und Lebensform. ZB bedeutet der Wert F2 für *Ajuga reptans*, das Kriechende Günsel, dass diese Pflanze ein Zeiger mäßiger Trockenheit ist; *Salix aurita*, die Ohrweide, weist den Zeigerwert F5 auf, was sie zu einem Nässezeiger macht. Zu den fünf Grundzeigerwerten schreibt LANDOLT noch weitere Merkmale zu, wie ein *w* für Pflanzen auf Böden mit wechselnder Feuchtigkeit oder  $\uparrow$  für Pflanzen im Bereich von fließendem Bodenwasser. Nach dieser Skala erhält die Stieleiche aus dem vorigen Beispiel den Wert F1, die Schwarzerle den Wert F5, mit dem Zusatz *w* für wechselfeucht.

FLORINETH et al. (2002) stellten in ihrem Bericht fest, dass die Untersuchung der Vegetation allein i. d. R. nicht ausreicht, um das Erosionspotential zu bewerten. Allerdings genügen oft sehr einfache Bodenuntersuchungen – die vor Ort durchgeführt werden

können –, um die Erosionsgefährdung einer Fläche festzustellen. In schwierigen Fällen sind auch Laboruntersuchungen notwendig.

## 7 Untersuchungsgebiet

Die Methoden zum Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen sollten überprüft werden. So wurden in einem an Massenbewegungen reichen Gebiet in Salzburg, Untersuchungen an Hängen durchgeführt.

Das Untersuchungsgebiet liegt im salzburgischen Pinzgau, in der Gemeinde Taxenbach (88,25 km<sup>2</sup>, 776 m Seehöhe). Nach der Einteilung in forstliche Wuchsgebiete befindet es sich in der hochmontanen bis tiefsubalpinen Zone des Wuchsgebietes 2.2 (Nördliche Zwischenalpen - Ostteil) nach KILIAN et al. (1994). Im Trattenbachtal, nördlich des Ortes Taxenbach erstreckt es sich vom Einzugsgebiet dieses Baches bis hinunter zum Gasthof „Ziegelhütte“. Entlang des Tales wurden vier Teilgebiete ausgewählt, an denen zahlreiche Hangbewegungen vorgefunden wurden. Diese Teilgebiete tragen die Bezeichnungen *ET* – *Einzugsgebiet Trattenbach*, *NSL* – *Nach der Sperre (orographisch) links*, *NSR* – *Nach der Sperre (orographisch) rechts* und *Z* – *Ziegelhütte*. Bei der in der Bezeichnung erwähnten Sperre handelt es sich um eine Geschiebesperre, die kurz unterhalb des Zusammenflusses von Trattenbach und Maderbach besteht.

Die Standorte liegen in den obermontanen bis subalpinen Höhenstufen, auf Seehöhen zwischen 1100 und 1700 m. „*In der obermontanen Stufe bilden meist Fichten- (Tannen-) Wälder, in der subalpinen Stufe Grünerlengebüsche sowie aufgelockerte Fichtenwälder und im obersten Bereich Zwergstrauhheiden die Klimaxgesellschaft*“ (ADLER et al., 1994). Mit Ausnahme der Tannenwälder trifft diese Beschreibung auch auf das Untersuchungsgebiet zu, wobei Weidewirtschaft die Sukzession mancherorts unterbrochen hat und sich dadurch eine Gräser-Kräuter-Vegetation etabliert hat. Im gesamten Gebiet werden die forstlich genutzten Fichtenwälder durch zahlreiche Weideflächen unterbrochen (Abb. 7.5). Das Tal ist bis zum Zusammentreffen mit dem Mauerbach ostnordöstlich, bachabwärts bei den Teilgebieten *NSL* und *NSR* ost-südöstlich und danach östlich ausgerichtet.

Aus relativ weichen und leicht verwitterbaren Gesteinen aufgebaut, zeigen die Berge rundliche Formen, sind größtenteils bewaldet, zudem von zahlreichen Wiesen und Almen bedeckt („Grasberge“). So finden sich viele – v.a. südseitig gelegene – Almwirtschaften

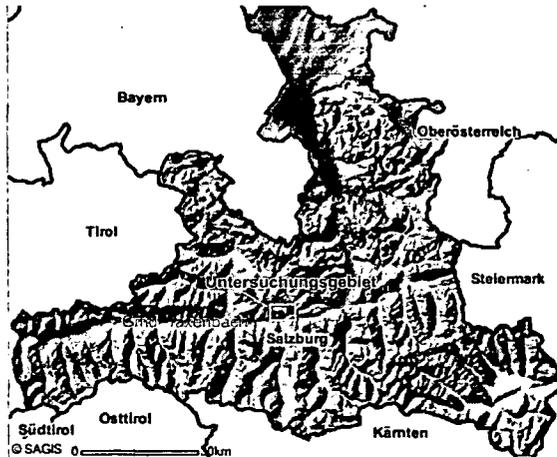


Abbildung 7.1: Übersicht Salzburg aus SAGIS (2005).



Abbildung 7.2: Gemeindegebiet Taxenbach aus SAGIS (2005).

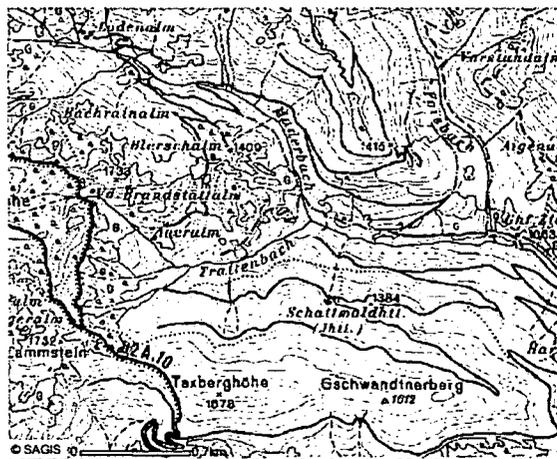


Abbildung 7.3: Trattenbach aus SAGIS (2005).



Abbildung 7.4: Foto vom Trattenbach, bachaufwärts fotografiert, neben dem Gasthof Ziegelhütte (Juni 2006, wie auch alle weiteren Fotos).

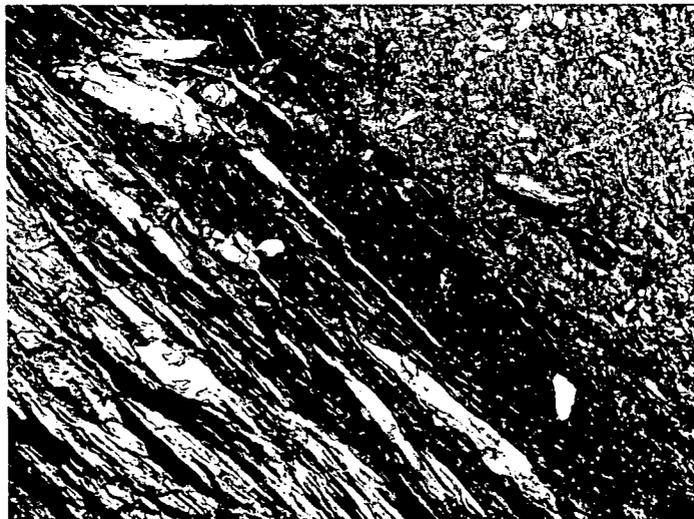
im Gebiet, auch wenn der flächenmäßig größte Teil forstwirtschaftlich genutzt wird. Touristische Wertschöpfung kommt hier vor allem vom Wandertourismus, den zB der Almgasthof Ziegelhütte bewirtschaftet.

**Geologie** Das Untersuchungsgebiet befindet sich im ostalpinen Paläozoikum (Grauwackenzone) der Kitzbühler Alpen. Die Geologie besteht aus den altpaläozoischen Gesteinen (Quarz)Phyllit, (Ton)Schiefer und dem sandig-tonigen Hauptgestein Grauwacke.



**Abbildung 7.5:** Hang oberhalb Teilgebiet NSL. Einfluß von Weide- und Forstwirtschaft erkennbar. Mähwiese im Vordergrund, darüber Weidelandstreifen, weiter oben eine Aufforstung.

Kleinräumig eingeschoben sind auch Karbonatgesteine, Hornblendeschiefer (Amphibolit), Talk- und Chloritschiefer und Grünschiefer, sowie an anderer Stelle Hornblendegneis vorhanden. An den untersuchten Stellen wurde hauptsächlich stark verwitterter Phyllit vorgefunden. (KRENMAYR und et al., 1999; Geologische Übersichtskarte von Salzburg 1:200.000, 2005). Siehe Abb. 8.3.



**Abbildung 7.6:** Schiefrißes Muttermaterial, freigelegt durch eine Rutschung. (Standort NSL3)

**Boden** KILIAN et al. (1994) schreiben diesem forstlichen Wuchsgebiet auf Silikat Semipodsol und auf basenreichem Substrat reiche Braunerde als häufigst anzutreffende Bodentypen zu.

**Klima** Das Gebiet weist ein ausgeprägtes sommerliches Niederschlagsmaximum aber ein nur schwach angedeutetes sekundäres Wintermaximum auf (mitteleuropäischer Klimarhythmus) Dies zeigen die Klimadiagramme von zwei umliegenden Messstellen (Saalbach und Schmittenhöhe), Abbildungen 7.7 und 7.8. Die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssummen bewegen sich zwischen  $1300$  und  $1500 \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1}$ , maximale Tagesniederschläge bis zu  $113 \text{ l/m}^2 \text{ a}^{-1}$ . Die mittleren jährlichen Temperaturen schwanken von  $1,9^\circ\text{C}$  auf  $1973 \text{ m.s.m.}$  bis  $5,3^\circ\text{C}$  auf einer Seehöhe von  $1022 \text{ m.}$  (AUSTRIAN CLIMATE CD, 2000)

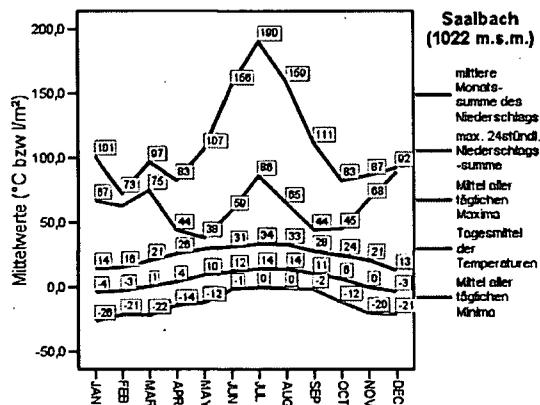


Abbildung 7.7: Klimadiagramm Saalbach nach AUSTRIAN CLIMATE CD (2000).

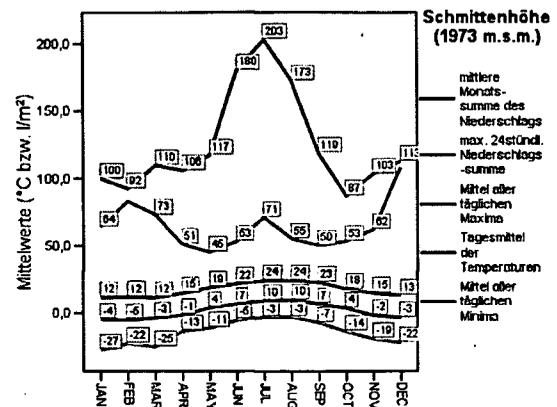


Abbildung 7.8: Klimadiagramm Schmittenhöhe nach AUSTRIAN CLIMATE CD (2000).

Durch Starkniederschläge ist es wiederholt zu Murenereignissen gekommen, die besonders eine sich kurz vor dem Vorfluter (Salzach) befindende Eisenbahnbrücke gefährdet haben. Zwar bestehen bereits eine Reihe von Geschiebesperren, allerdings können diese nicht genügend Schutz bieten, weshalb Anstrengungen forciert werden sollen, den Geschiebeanfall schon im Bereich der Entstehung zu mindern.

## 8 Datenerhebung

### 8.1 Grundlagen

**Luftbilder** Anhand von Luftbildern wurden grundsätzliche Aufnahmeorte ausgesucht und thematische Karten dieser Orte erstellt (Übersicht, Geologie, Hangbewegungen, Abb. 8.1). Mit deren Hilfe konnte die Aufnahme schon im Vorfeld unterstützt werden da sich das Untersuchungsgebiet auf den Bildern anders darstellt als vor Ort. Vorteilhaft sind der Gesamtüberblick, die Sicht auf vom Gelände aus möglicherweise nicht erkennbare Rutschungen oder geomorphologische Ausbildungen und die sich dadurch ergebenden Möglichkeiten in der Aufnahmeplanung.

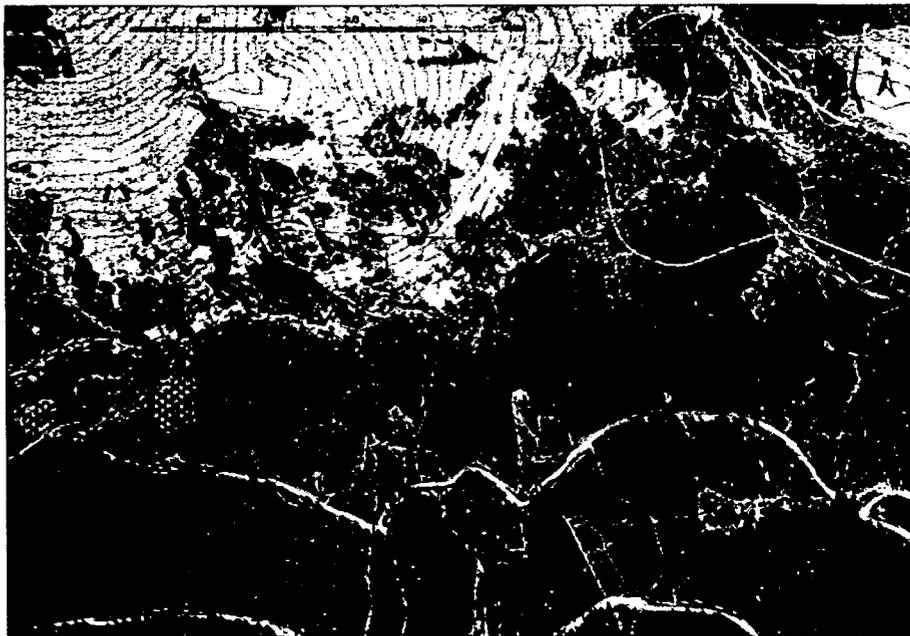
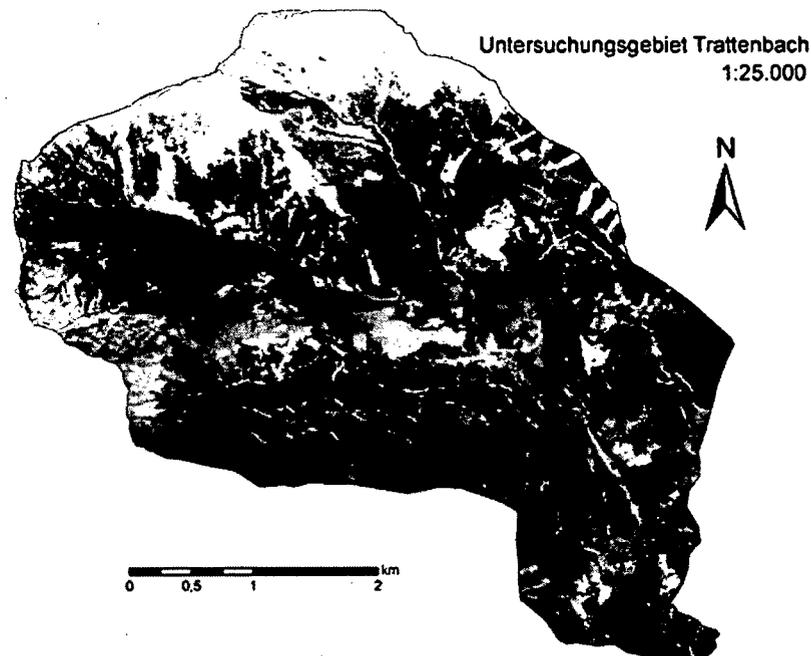


Abbildung 8.1: Themenkarte als Behelf für Aufnahme und Voruntersuchung.



**Abbildung 8.2:** Analoges, panchromatisches Schwarz-Weiss-Luftbild von 2002 überlagert von einem kleineren analogen Farb-Infrarot-Luftbild von 1990.

**Geologie** Für viele Gebiete Österreichs sind geologische Karten der österreichischen Geologischen Bundesanstalt erhältlich, womit die geologische Situation des Gebiets festgestellt werden kann (Gesteinsarten, Schichtungen, Fallrichtungen). Nicht so für das Untersuchungsgebiet. Die erforderliche Geologische Karte Nr. 124 war und ist noch nicht vorhanden. Ebenso wenig konnte eine gleichwertige Karte aufgetrieben werden. Es musste mit der Geologische Übersichtskarte von Salzburg 1:200.000 (2005) vorlieb genommen werden (Ausschnitt des Untersuchungsgebietes siehe Abb. 8.3). Diese konnte aber nur einen Überblick über das Gebiet geben und war für den Untersuchungszweck unzureichend detailliert.

Wie weiter oben schon bemerkt wurde, liegt das Untersuchungsgebiet in der Grauwackenzone. Besieht man den Kartenausschnitt, so sind viele kleinräumig unterschiedliche Gesteinsbereiche zu erkennen. Die Teilgebiete liegen aber durchwegs im grauen Bereich (106... Grauwacke, Schiefer, Phyllit). Bei den Standorten *ET* könnte noch die blaue Gesteinszone (103... Karbonate) hineinspielen, bei *NSL* evtl. Geröllschutt. Genauere Angaben zu Gestein, Lagerung/Schichtung und Fallrichtung konnten aus dieser Karte aber nicht herausgelesen werden.



**Abbildung 8.3:** Geologische Karte des Untersuchungsgebietes. Gelb... Teilgebiete, graue Bereiche (106)... Sand-, Silt- und Tonstein (Grauwacke), Schwarzschiefer und Phyllit, blaue Bereiche (103)... Dolomit, Kalkmarmor und Kalkschiefer, weiß mit blauen Dreiecken... Geröllschutt. (SAGIS, 2005; Geologische Übersichtskarte von Salzburg 1:200.000, 2005)

## 8.2 Feldbegehung

Für die Untersuchungen vor Ort war eine gute Vorbereitung wichtig, da die Feldarbeiten nicht wiederholt werden konnten, insofern eine größere Distanz zurückgelegt werden musste und der Zeit- und Arbeitsaufwand sehr groß war. Zuerst musste festgelegt werden, was, wo und wie untersucht werden soll. Es wäre schwer gefallen, eine Hangbewegung festzustellen, wenn sie unter einer Schneedecke begraben liegt. Dies nur als Beispiel. Für ein standardisiertes Aufnahmeverfahren wurde ein Aufnahmeformular erstellt (Anhang S. 167). Eine Gebietsübersicht gaben die oben erwähnten thematischen Karten.

In erster Linie wurden geomorphologische-, Vegetations- oder Bodenparameter aufgenommen. Um wertvolle Aussagen zu erzielen waren aber auch die Hydrologie und die Geologie des Gebietes abzuklären. Desweiteren war es unumgänglich, Standortparameter wie Seehöhe oder Exposition, sowie die Geometrie der untersuchten Massenbewegung zu bestimmen. Eine Zusammenstellung der aufgenommenen Parameter gibt Tabelle 8.1.

Tabelle 8.1: Übersicht Aufnahmeparameter.

Parametergruppe	Parameter
Standort	Seehöhe, Exposition, Wetter
Geometrie	Länge, Breite, Höhe der Rutschung, Neigung des Hanges
Hydrologie	Wasserführung, Bodenfeuchte
Geologie	Anstehendes Material, Schichtungen
Geomorphologie	Makro-, und Mikrorelief, Längen- und Querprofil
Vegetation	Morphologie von Bäumen, Zeigerpflanzen
Boden	Bodenart, Porosität, Dichte, Schichtungen, etc.
Rutschung	Beschreibung von Mechanismus, Einflüssen und Auslöseursache

Vor den Aufnahmearbeiten wurden noch Vorbereitungen organisatorischer Art getroffen: Es mussten Werkzeuge und Messgeräte besorgt und überprüft, Nachschlagewerke, und nicht zuletzt Quartier und Verpflegung organisiert werden. Es gab, um bei für die Aufnahmearbeiten wenig vorteilhaften nassem Wetter ausweichen zu können, zwei Termine für die Fahrt ins Untersuchungsgebiet.

**Aufnahmearbeiten** Zu Beginn der Arbeiten stand eine Begehung des Untersuchungsgebietes, um einen ersten Eindruck von der Situation zu bekommen. Bei dieser Begehung wurden die Aufnahmestandorte der nächsten Tage festgelegt. Grundsätzlich wurde versucht, unterschiedliche Bewegungsarten bzw. Bewegungen an verschiedenen Hangbereichen (Ober-, Mittel-, Unterhang, Hangfuß) und Bewegungen die durch verschiedene Einflüsse (Unterspülung, menschlicher Einfluss, ...) ausgelöst wurden aufzunehmen.

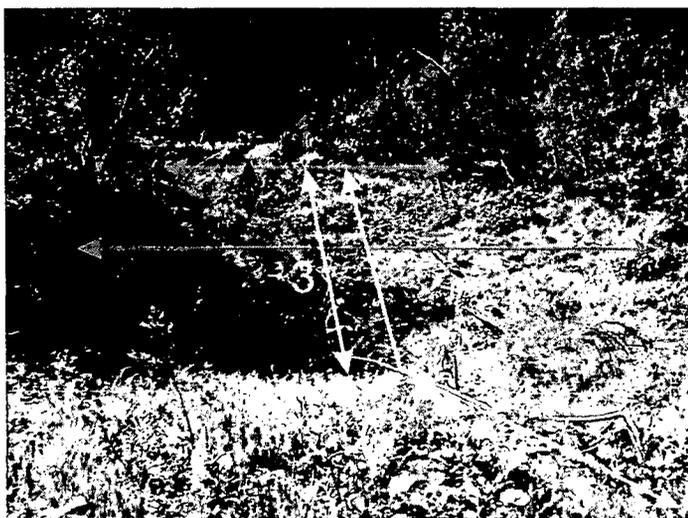
Nach der Einarbeitungsphase begannen die Aufnahmearbeiten. Es wurden, dem Aufnahmeformular folgend, Messungen durchgeführt, geomorphologische Beobachtungen festgehalten, Vegetation aufgenommen und Bodenprofile gegraben, sowie Pflanz- und Bodenproben für spätere Untersuchungen eingesackt. Von jedem Standort wurden zudem Fotos gemacht, die für die Auswertung hilfreich sein sollten.

Im Folgenden werden die einzelnen Aufnahmeparameter und deren Erhebung beschrieben:

**Standort** Zur Beschreibung der Standorte wurde die Seehöhe aus den thematischen Karten abgelesen (5-Meter-Höhenschichtlinien), die mittlere Exposition des Hanges mit

einem Kompass gemessen und Angaben zum aktuellen, wie auch zum vortägigen Wetter gemacht. Klima, Vegetationszone (dazu das forstliche Wuchsgebiet nach KILIAN et al. (1994)) und Höhenstufe der Teilgebiete, wurden teils schon bei der Vorbereitung, teils im Nachhinein festgestellt.

**Rutschungsgeometrie** Die Maße der Rutschflächen bzw. der Rutschkörper wurden abgemessen um dadurch Rückschlüsse auf die an der Bewegung beteiligten Flächen und Kubaturen zu bekommen. Die Abbildung 8.4 zeigt wo an der Rutschung die Maße abgenommen werden. Siehe dazu auch Abbildung 4.3 auf Seite 17.



**Abbildung 8.4:** Ausmaße von Rutschungen. 1 Anrissbreite, 2 max. Rutschbreite, 3 max. Rutschlänge (ohne Ablagerung), 4 Gesamtrutschungslänge (max. Rutschlänge + Ablagerungstrecke); 5 Anrisshöhen, 6 max. Rutschungsmächtigkeit.

**Hydrologie** Es wurden v. a. subjektive Abschätzungen der Standort-Feuchteverhältnisse gemacht, welche nach Auswertung der Feuchtezeigerpflanzen überprüft werden sollten. Besondere Aussagekraft boten hierfür Quellaustritte, oberflächliche Wasserführung oder Versickerungsstellen. Quell- und Versickerungsstellen gaben außerdem wertvolle Hinweise auf evtl. Zwischenwasserführung, welche auf erhöhte Rutschneigung hindeuten können. Für die Abschätzung der durchschnittlichen Feuchteverhältnisse war auch das Wettergeschehen der vorhergehenden Tage, sowie das Wissen um das ortsübliche Klima von Bedeutung. Damit konnte vermieden werden, eine temporäre für eine dauernde Durchfeuchtung oder Vernässung zu halten und umgekehrt.

**Geomorphologie** Aufgenommen wurden die im Grundlagenteil auf Seite 12 angeführten geomorphologischen Parameter.

Das Längen- bzw. Querprofil wurde dann als unregelmäßig bezeichnet, wenn deutliche Erhebungen oder Eintiefungen, Rippen oder Buckel, Rinnen oder Gräben vorhanden waren. Die Wölbung wurde nach Augenmaß als konkav, gestreckt oder konvex angesprochen. Mikrorelief bezieht sich auf Geländemerkmale im Bereich 0,5 bis 1 m. Die Lage des Rutschanrisses wurde nach den in Abbildung 8.5 gezeigten Vorgaben angegeben.

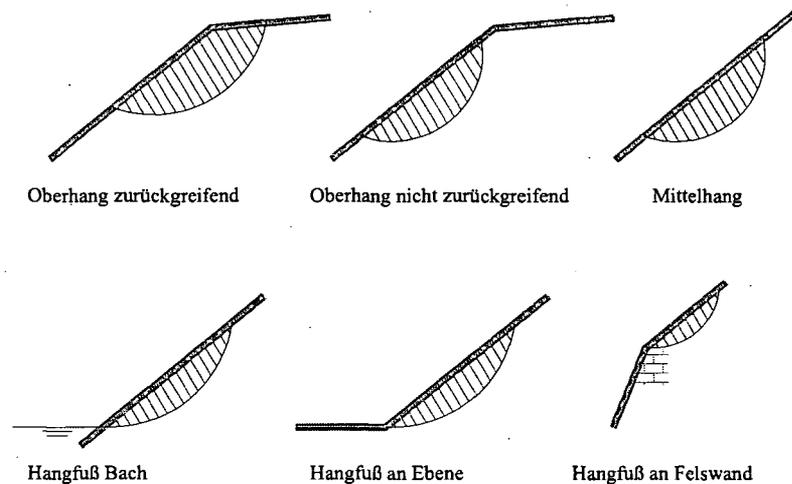


Abbildung 8.5: Lage des Rutschanrisses

**Vegetation** Die Stellung von Bäumen wurde beobachtet und als Hinweis auf die Rutschungsart festgehalten. Zum Zweiten wurden Pflanzen gesammelt, bestimmt und später in Wien nach der Zeigerwertskala von LANDOLDT (1977) eingeteilt. Beides nach Kapitel 'Analytische Hilfsfunktionen' von Pflanzen, S. 87.

**Boden** Es wurden Bodenprofile durch Schürfe oder mittels einem *Pürckhauerbohrer* angefertigt. Daran wurde versucht, Schichtwechsel oder andere Auffälligkeiten wie Verfärbungen und Verlagerungen oder Vernässungen zu erkennen. Mittels der Fingerprobe (Tab. 5.5 auf Seite 67) wurde die Bodenart bestimmt. Zum Zwecke weiterer Untersuchungen am Boden (Korngrößenanalyse, pH-Wert, Karbonatbest.) wurden Bodenproben mitgenommen. (BLUM et al., 1986).

**Beschreibung der Rutschung** Hierfür wurde versucht den oder die maßgeblichen Mechanismen der Rutschung zu erkennen. Dies stellte sich als sehr schwierig heraus, da nur wenige Bewegungen (alle am Standort *ET*) relativ eindeutig zu einem Rutschtyp zugeordnet werden konnten. Die meisten Rutschungen zeigten sich als Kombinationen verschiedener Mechanismen. Sie gelten als 'Komplexe Bewegungen'. Die Einflüsse bzw. Auslöseursachen wurden neben natürlichen Faktoren (Niederschlag, Oberflächenabfluss, geologisch, oder pedologisch bedingter Zwischenschichtabfluss) weitgehend von menschlichen Tätigkeiten (Forst-, Weidewirtschaft, Forststraßen, Gewässerregulierung) abgeleitet. Abschließend wurde eine Prognose zur Stabilität, bzw. der vermuteten Weiterentwicklung der Bewegungen angestellt, was sich als ebenso schwierig, wie die Zuordnung zum Rutschungstyp zeigte.

**Sonstiges** Ergänzungen zum Aufnahmeformular oder individuelle Anmerkungen zu einzelnen Rutschungen wurden in einem eigenen Punkt festgehalten

## 9 Datenauswertung

In vier Teilgebieten wurden an mehreren Standorten insgesamt 21 Rutschungen aufgenommen. Wie schon erwähnt erhielten die Teilgebiete jeweils eine Kurzbezeichnung – *NSL*, *NSR*, *ET* und *Z*. Für die einzelnen Rutschungs-Standorte wurden Nummern vergeben. Im Folgenden wird die Auswertung der Aufnahmen nach Teilgebieten sortiert beschrieben. Zu Beginn steht jeweils eine Charakterisierung der Teilgebiets, woran Darstellungen (Fotos, Skizzen) und Beschreibungen (Geomorphologie, Hydrologie, Boden) zu den am Standort aufgenommenen Rutschungen anschließen. Den detaillierten Beschreibungen folgt eine Zusammenfassung, worin die Rutschungen tabellarisch gegenübergestellt werden. Eine Übersicht bieten Tabelle 9.1 und Abbildung 9.1 auf der nächsten Seite. Eine Liste den aufgenommenen Pflanzen inklusive deren Zeigerwerten ist im Anhang S. 173 zu finden.

**Tabelle 9.1:** Auflistung der Teilgebiete.

Bez.	Ort	Höhenlage m ü. A.	Expo- sition	Rutschun- gen	Beeinflussung durch
NSL	unterhalb Sperre links	1100-1220	SSW	3	Sperre, Trattenbach
NSR	unterhalb Sperre rechts	1100-1250	NNO	7	Sperre, Trattenbach, Forststraße, Kahlschlag
ET	Quellgebiet Trattenbach	1600-1700	OOS	8	Wasserüberangebot, bzw. Extensivierung der Beweidung
Z	Hang gegenüber Gasthof Ziegelhütte	1110-1120	N	3	Kahlschlag

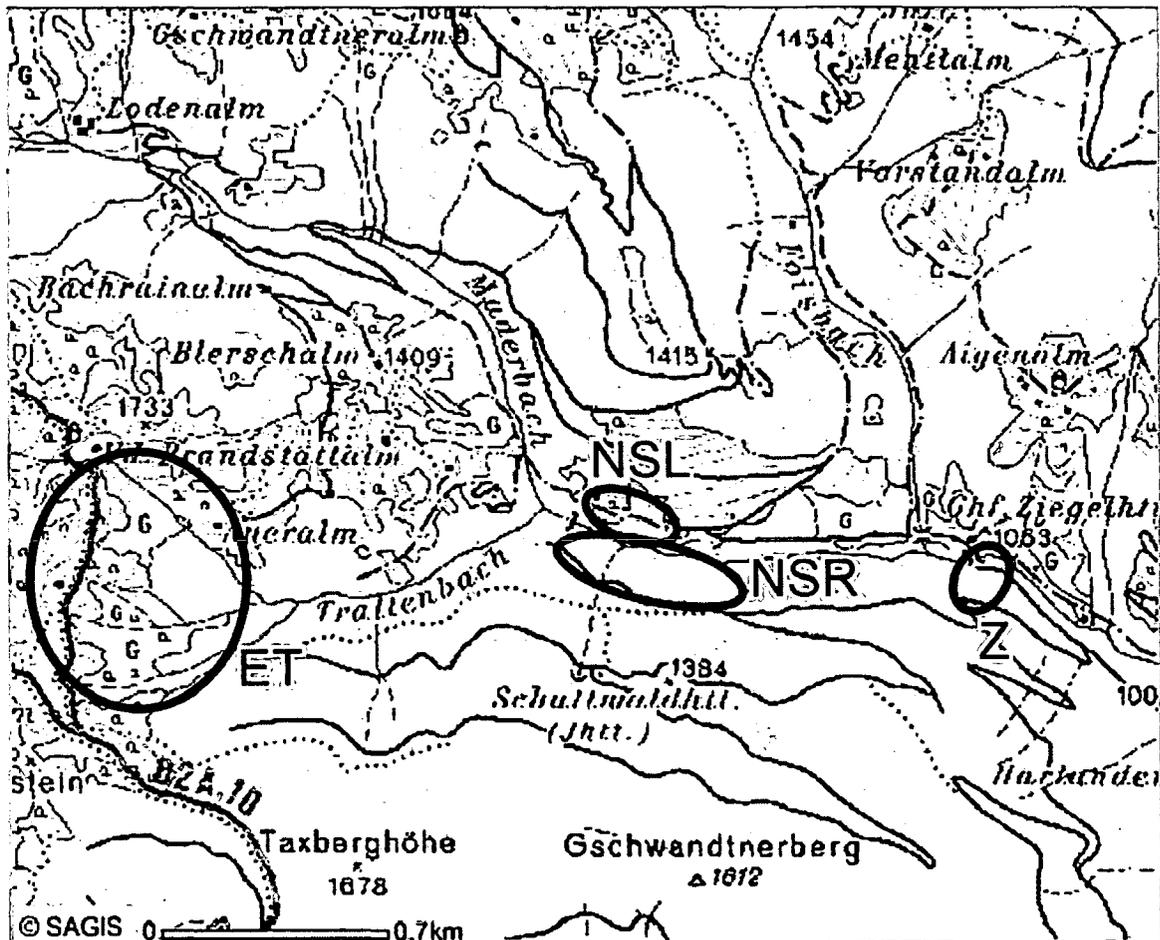


Abbildung 9.1: Teilgebiete im Trattenbachtal.

## 9.1 Teilgebiet „Nach der Sperre links“ – NSL

Etwa 1 km vom Gasthaus Ziegelhütte bachaufwärts besteht ein Geschiebeablagerungsbe- reich, der von einer Geschieberückhaltesperre bachabwärts begrenzt wird (Abb 9.2). Kurz vor dieser Sperre vereinigt sich der Maderbach mit dem Trattenbach. Die Standorte *NSL* befinden sich direkt (*NSL 1* und *NSL 2*) bzw. 100 m (*NSL 3*) nach dieser Sperre auf der orographisch linken Seite (Abb. 9.1) in einer Höhenlage zwischen 1100 und 1200 m ü. A.. Die Nutzung in diesem Teilgebiet ist vor allem die Weidewirtschaft inkl. einer Mähwiese oberhalb *NSL 2*. Eine aktuelle forstwirtschaftliche Nutzung (großflächige Baumentnahme) war hier nicht erkennbar. Als problematisch im Sinne der Hangstabilitäten, zeigte sich die Geschieberückhaltesperre. Da diese verantwortlich ist für die Eintiefung des Trattenbaches ist, gilt sie auch als Hauptverursacherin der Hangbewegungen.



**Abbildung 9.2:** Geschiebesperre unterhalb des Zusammenflusses von Maderbach und Trattenbach. Rechts im Bild Rutschung *NSL 1* und *NSL 2*, links *NSR 1*. Man beachte die Analogie von Rutschungsflanke und Sperre!

**Tabelle 9.2:** Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet *NSL*.

Bez.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Seehöhe [m ü. A.]	Exposition	Neigung [°]	Hangbereich
NSL 1	1250	1190	SSW	40	Unterhang
NSL 2	3000	1190	SSW	40	Unterhang
NSL 3	900	1180	SSW	45	Unterhang



Abbildung 9.3: Teilgebiet *NSL*.

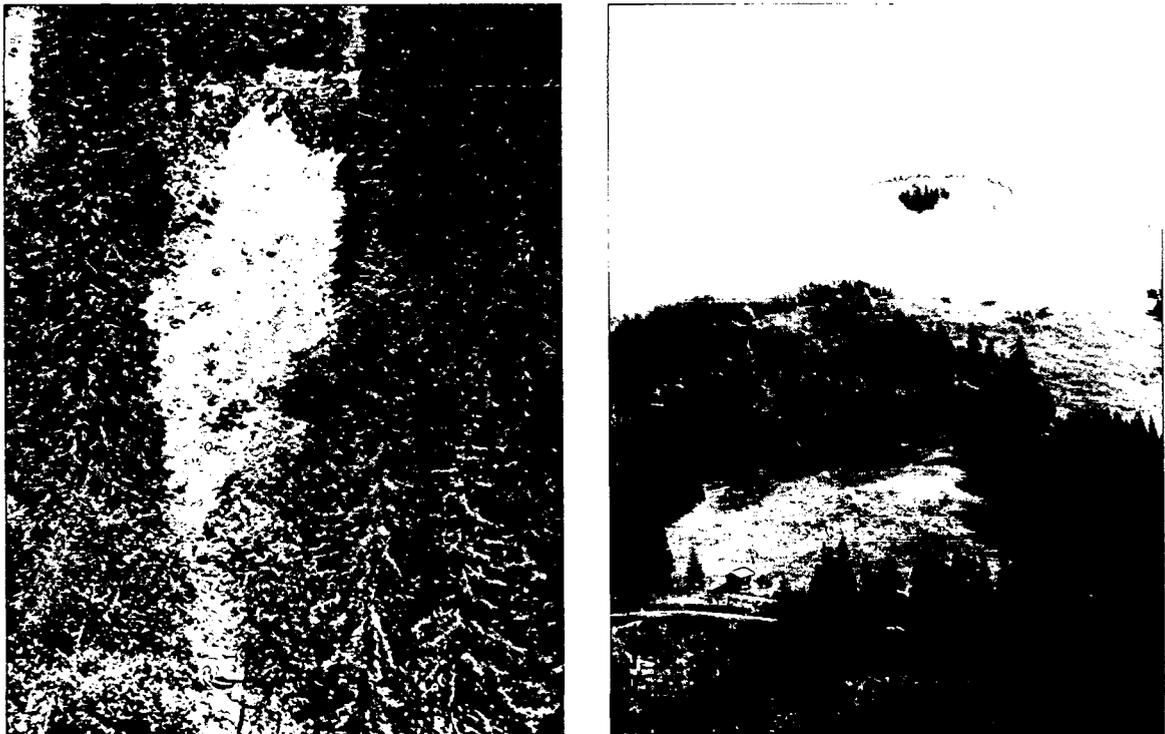


Abbildung 9.4: Teilgebiet *NSL*. Links *NSL 3*, rechts Hang oberhalb *NSL*.

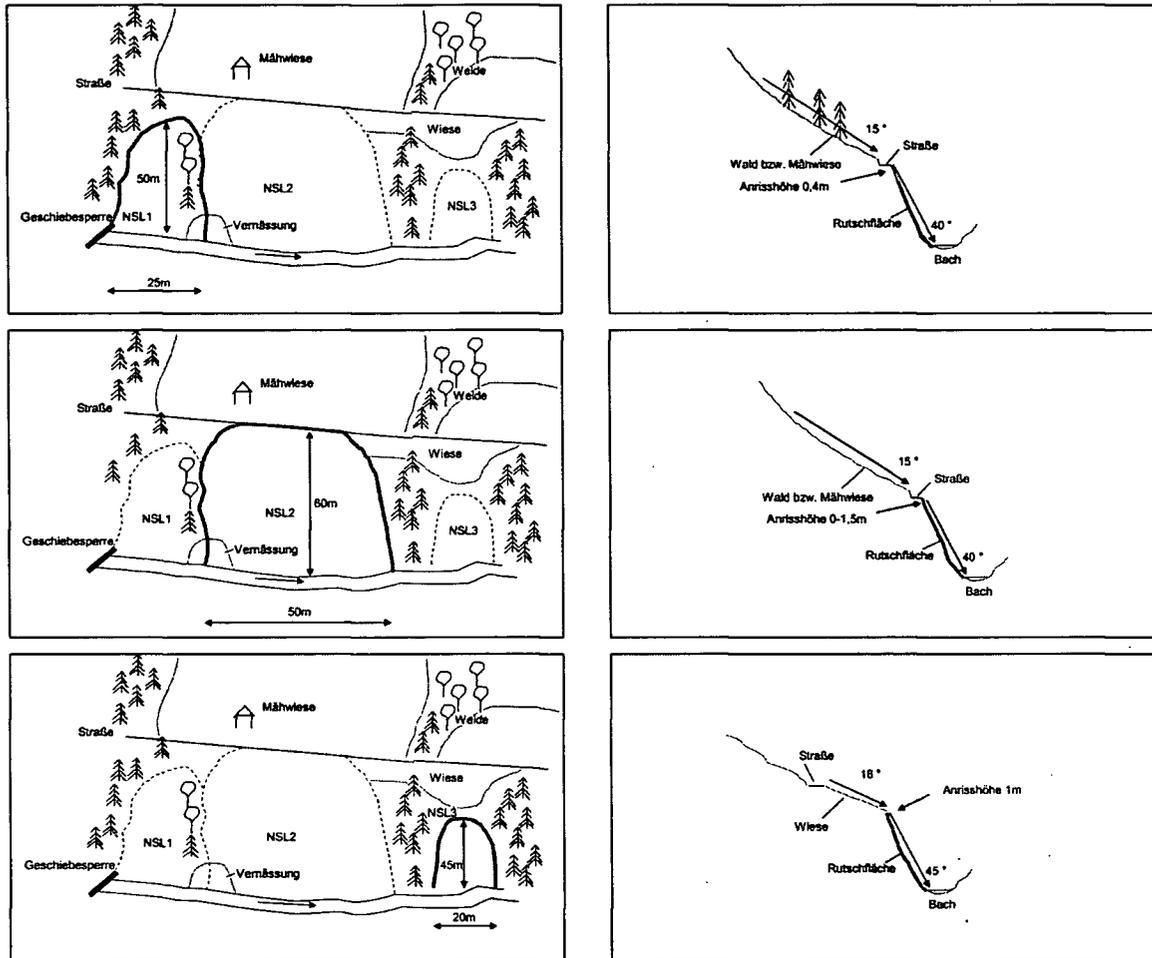
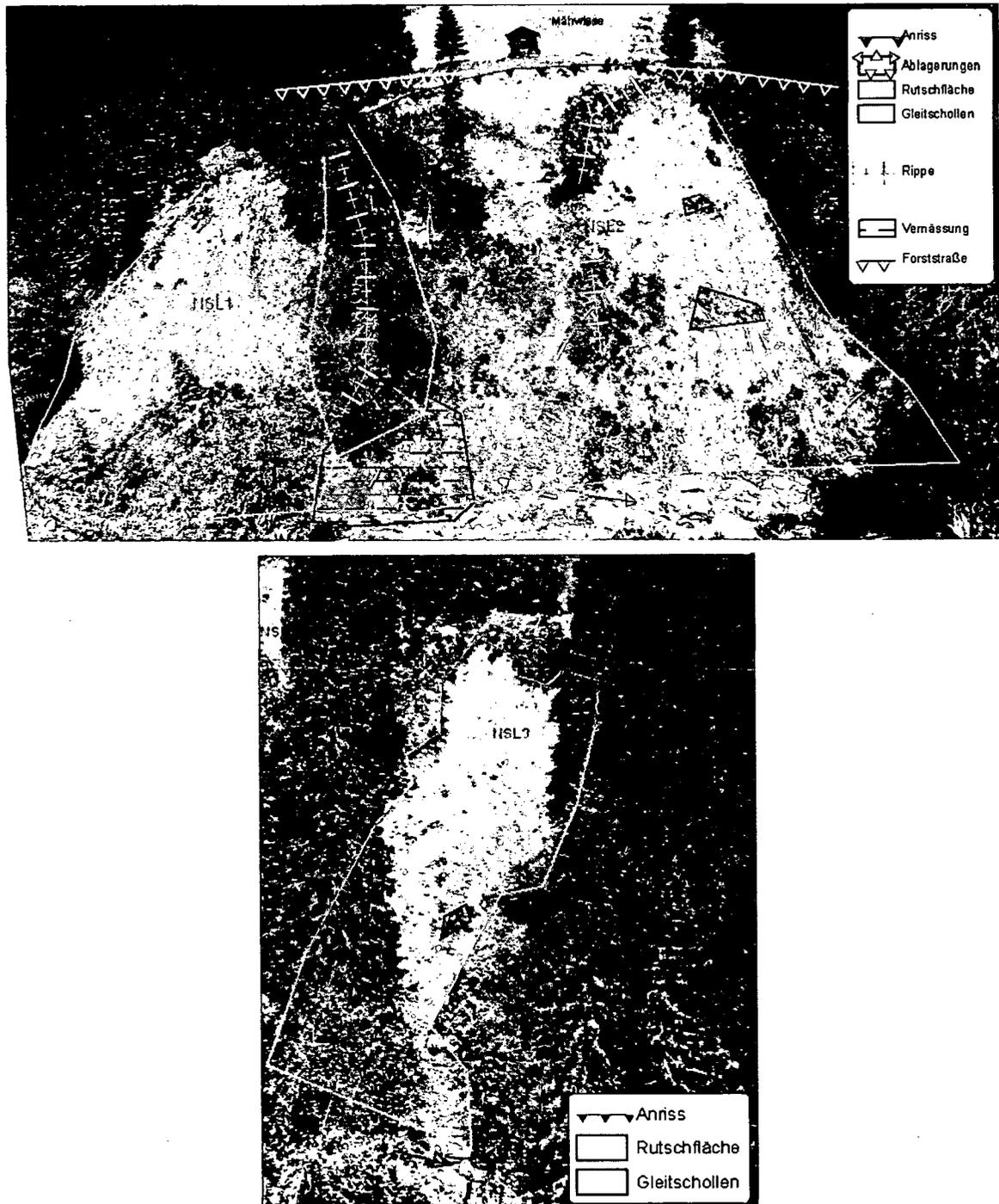


Abbildung 9.5: Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets NSL. Links Ansicht, rechts Längsschnitt.

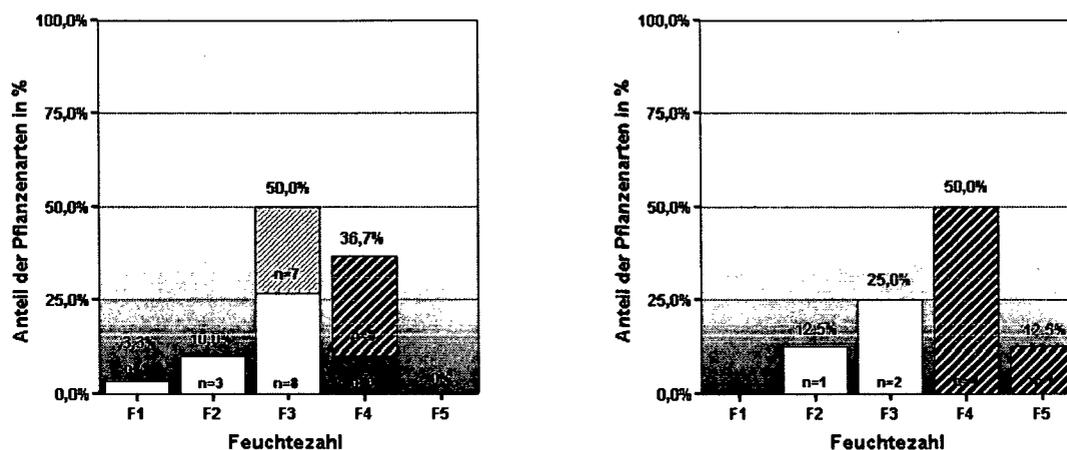
Tabelle 9.3: Vergleich geomorphologischer Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes NSL.

Bez.	Relief		Längs	Profil		Rutschanriss
	Makro	Mikro		Quer		
NSL 1	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	8 m unterhalb Forststraße	
NSL 2	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	unterhalb an Forststraße anschließend	
NSL 3	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	12 m unterhalb Forststraße	



**Abbildung 9.6:** Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets *NSL*. Oben *NSL 1* und *NSL 2*, unten *NSL 3*.

**Hydrologie** An den Standorten *NSL 1* und *NSL 2* wurden 30 Pflanzenarten, am Standort *NSL 3* 8 Arten aufgenommen. Die Zeigerwert-Auswertung ergibt für *NSL 1* und *NSL 2* als dominierenden Wert *F3w* (mittlere Verhältnisse, ± frisch, wechselnd), mit Hang zu *F4w* (feucht, stark wechselnd). Nicht berücksichtigt wird bei dieser Auswertung eine größere Vernässungszone, die vegetationslos war. *NSL 3* zeigt sich als wechselnd feuchter (*F4w*) Standort, mit teilweise mittleren und nassen Verhältnissen. Der Standort in der verbalen Beurteilung als mesisch eingestuft. Die geringe Anzahl der gesammelten Pflanzen ( $n=8$ ) könnte ein Grund für die unterschiedlichen Aussagen sein. Die Rutschfläche war auch zum größten Teil unbewachsen.



**Abbildung 9.7:** Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets *NSL* nach LANDOLDT (1977). Links *NSL 1* und *NSL 2*, rechts *NSL 3*.

**Boden** An diesem Standort wurden die Bodenproben mithilfe des Pürckhauerbohrers entnommen. Wie an den Fotos (Abb. 9.8) zu sehen ist, war es nicht einfach den Bohrkern aus dem Boden zu schaffen, ohne dass er dabei auseinander riss. Dadurch wird die Zuordnung zu einem Profil sehr schwierig, weshalb hier keine Auswertung vorgenommen wurde. An diesem Hang ist besonders auffällig, dass das anstehende phyllitische Gestein – das durch die Bewegungen freigelegt wurde – bereits stark verwittert ist.

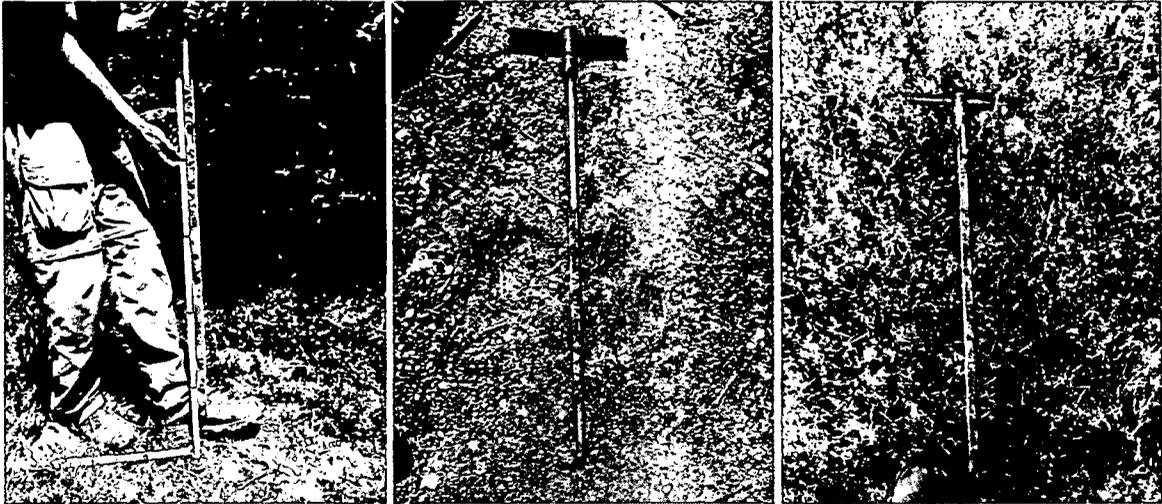
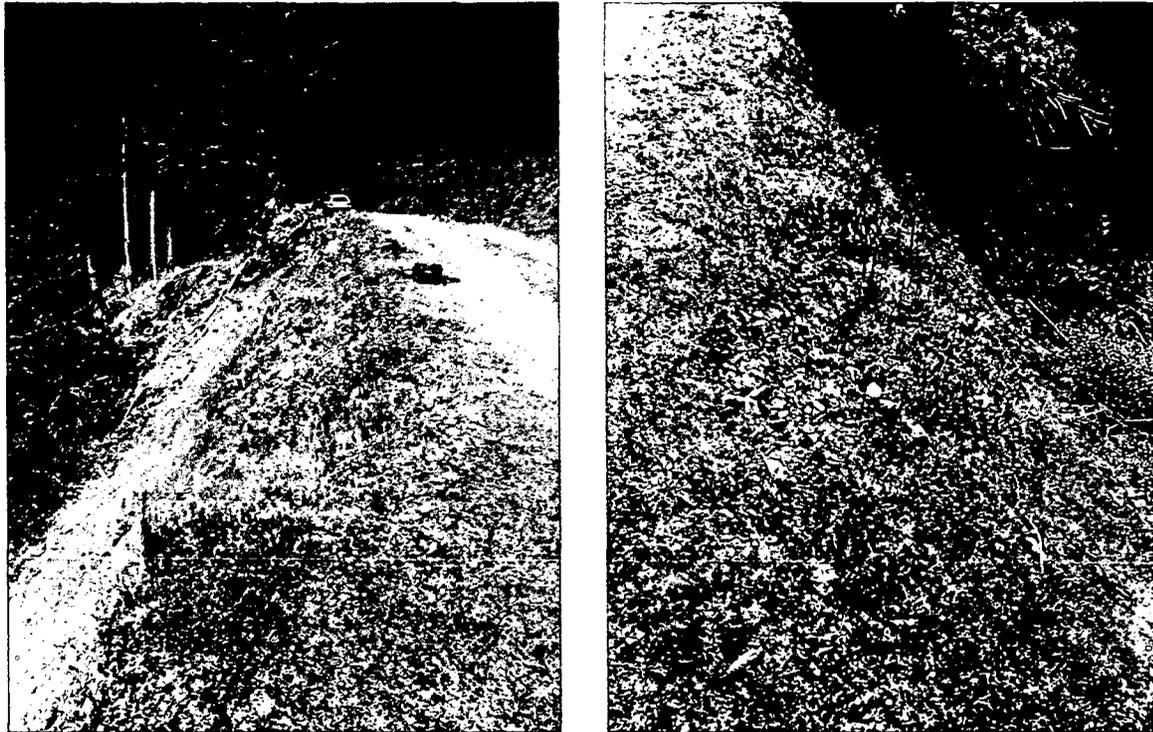


Abbildung 9.8: Probennahme vom Boden des Standorts *NSL*. Links *NSL 2*, Mitte in der Rutschfläche, rechts oberhalb der Rutschfläche von *NSL 3* entnommen.

**Bewegungsmechanismen** Die Bewegungen an den Standorten *NSL* gehen allesamt auf eine augenscheinliche Ursache zurück: Unterspülung des Hangfußes durch die Sohleintiefung unterhalb der Geschieberückhaltesperre. Wie in der Abb. 9.2 auf Seite 107 zu erkennen ist, beginnt die Rutschflanke der Rutschung *NSL 1* exakt in einer Linie mit der Sperre. Daraus ist zu erkennen, dass durch die Sohleintiefung unterhalb der Sperre der Hangfuß an allen drei Standorten massiv erodiert wurde, wodurch es zu einer, zumindest initialen, Bewegung kommen konnte. Einiges deutet dabei auf einen translativen Prozess hin, wie die planare Rutschfläche und der schiefrige Untergrund, der bei entsprechender Ausrichtung der Schieferplatten als Gleitfläche wirken könnte. Die Vernässungzone am Hangfuß und einige Quellaustritte könnten ein Hinweis auf Schichtungen im Boden sein. Eine Bewegung rotationaler Art kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, da eine Gleitfläche nicht offensichtlich vorhanden war. Ein dritter Bewegungsprozess, der jedoch nicht so schwer zu erkennen war, ist die Oberflächenerosion in Form von Rillen. Mit ziemlicher Sicherheit bestand die räumliche und zeitliche Gesamtbewegung in einer Kombination und Überprägung verschiedener Prozesse massenverlagernder und massentransportierender Art, die sukzessiv den Hang versteilt haben und dies evtl. auch weiterhin tun werden. Nach der Definition des MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993) ergäben sich für dieses Teilgebiet **komplexe, zusammengesetzte, sukzessive, mehrfache Gleitbewegungen**, die teilweise aktiv (Erosion) aber hauptsächlich latent inaktiv ist. Die Bachsohle verläuft schon weitgehend auf Festgestein. Daher könnte angenommen

werden, dass die Rutschung in diesem Bereich stabilisiert ist, weil eine weitere Eintiefung nicht sehr wahrscheinlich scheint. Wenn auch nicht durch Sohleintiefung, so ist eine Hangfußunterspülung bei Hochwasser weiterhin möglich. Die über der Rutschung liegende, an *NSL 2* sogar direkt anschließende Forststraße zeigte einige Anzeichen von Instabilität, wie den in Abbildung 9.9 (rechts) gezeigten rückschreitenden Anriss.



**Abbildung 9.9:** Schäden an der Forststraße oberhalb *NSL 2*. Rechts ein rückschreitender Anriss.

## 9.2 Teilgebiet „Nach der Sperre rechts“ – NSR

Die Standorte NSR befinden sich direkt (*NSR 1*), etwas bachabwärts (*NSR 2*) oder verteilt am Hang (*NSR 3* bis *NSR 7*) nach der Geschieberückhaltesperre auf der orographisch rechten Seite, in einer Höhenlage zwischen 1100 und 1250 m ü. A.. Die Nutzung in diesem Teilgebiet ist vor allem die Forstwirtschaft. Eine aktuelle forstwirtschaftliche Nutzung ist durch einige Kahlschlagflächen erkennbar. Für die ersten zwei Rutschungen (*NSR 1* und *2*), die sich im Einflussbereich des Trattenbaches befinden, gilt wie bei NSL die Geschiebesperre als problematisch und als Bewegungshauptursache. Die weiteren fünf Rutschstandorte *NSR 3*, *4*, *5*, *6* und *7*) scheinen einerseits durch eine Forststraße, andererseits durch forstliche Kahlschlag hauptsächlich beeinflusst zu sein. Der Rutschhang *NSR 7* beinhaltet einen ausgeprägten Graben, der seinen Anfang unterhalb von *NSR 5* nimmt und bis hinunter zum Bach verläuft (Abb. 9.12).

**Tabelle 9.4:** Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet *NSR*.

Bez.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Seehöhe [m ü. A.]	Exposition	Neigung [°]	Hangbereich
NSR 1	3580	1190	NNO	35	Unterhang
NSR 2	300	1190	NO	35	Unterhang
NSR 3	600	1240	NNW-NNO	40	Mittelhang
NSR 4	–	1230	NNW-NNO	40	Mittelhang
NSR 5	260	1220	NNO	33	Mittelhang
NSR 6	100	1210	NNO	33	Mittelhang
NSR 7	9700	1225	NNO	–	Mittel- bzw. Unterhang



**Abbildung 9.10:** Standort *NSR 1*.

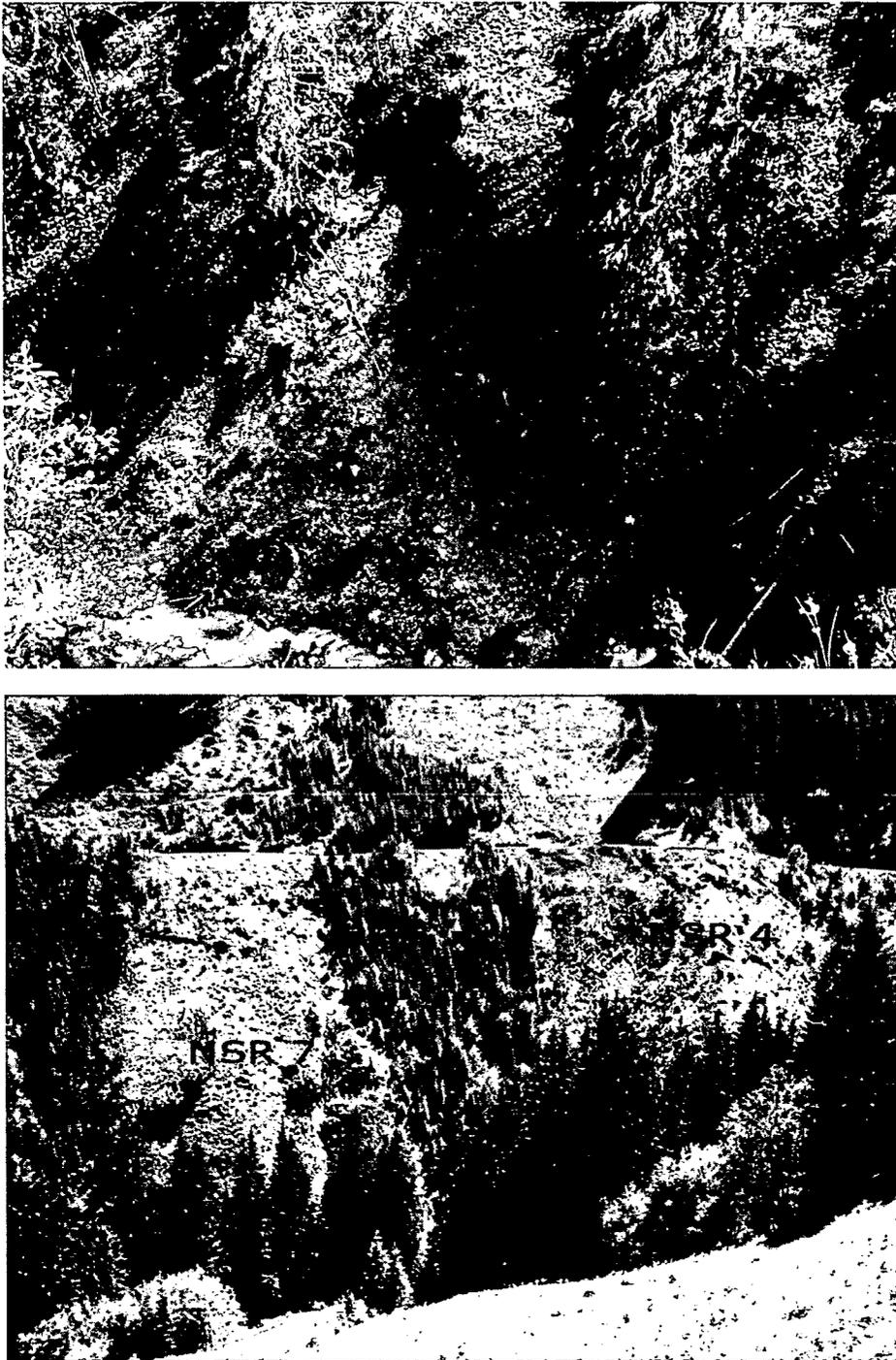


Abbildung 9.11: Standort *NSR 2* (oben) und Übersicht über die Standorte *NSR 3* bis *NSR 7* (unten).

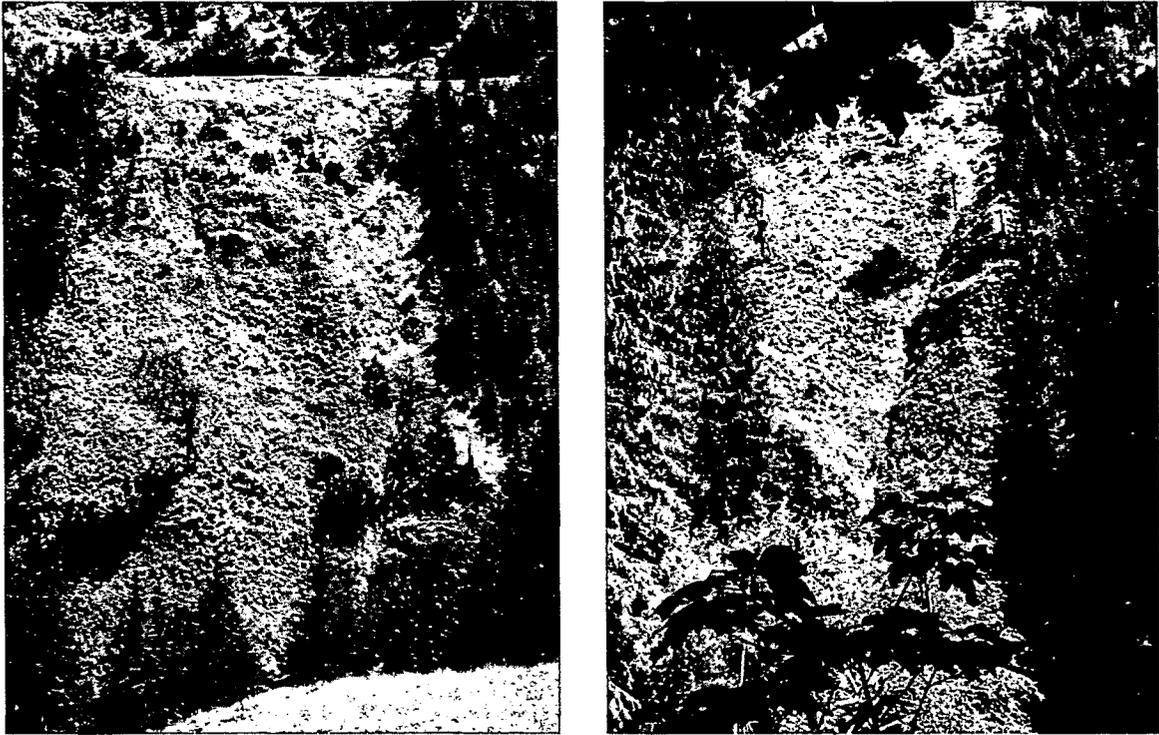


Abbildung 9.12: Gesamthang *NSR 7* (links) und Detail der Grabenerosion an diesem Hang (rechts).

Tabelle 9.5: Vergleich geomorphologischer Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes *NSR*. *NSR 7* ist ein Gesamtrutschhang, der *NSR 5* und *NSR 6* beinhaltet.

Bez.	Relief		Profil		Rutschanriss
	Makro	Mikro	Längs	Quer	
NSR 1 u. 2	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	Mittelhang, Kahlschlagbereich
NSR 3	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	konvex gleichm.	Kahlschlagbereich, oberh. Forststraße
NSR 4	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	konvex unreglm.	Kahlschlagbereich, unterh. Forststraße
NSR 5 u. 6	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	gestreckt gleichm.	Kahlschlagbereich
NSR 7	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konvex unregelm.	gestreckt gleichm.	Kahlschlagbereich, unterh. Forststraße

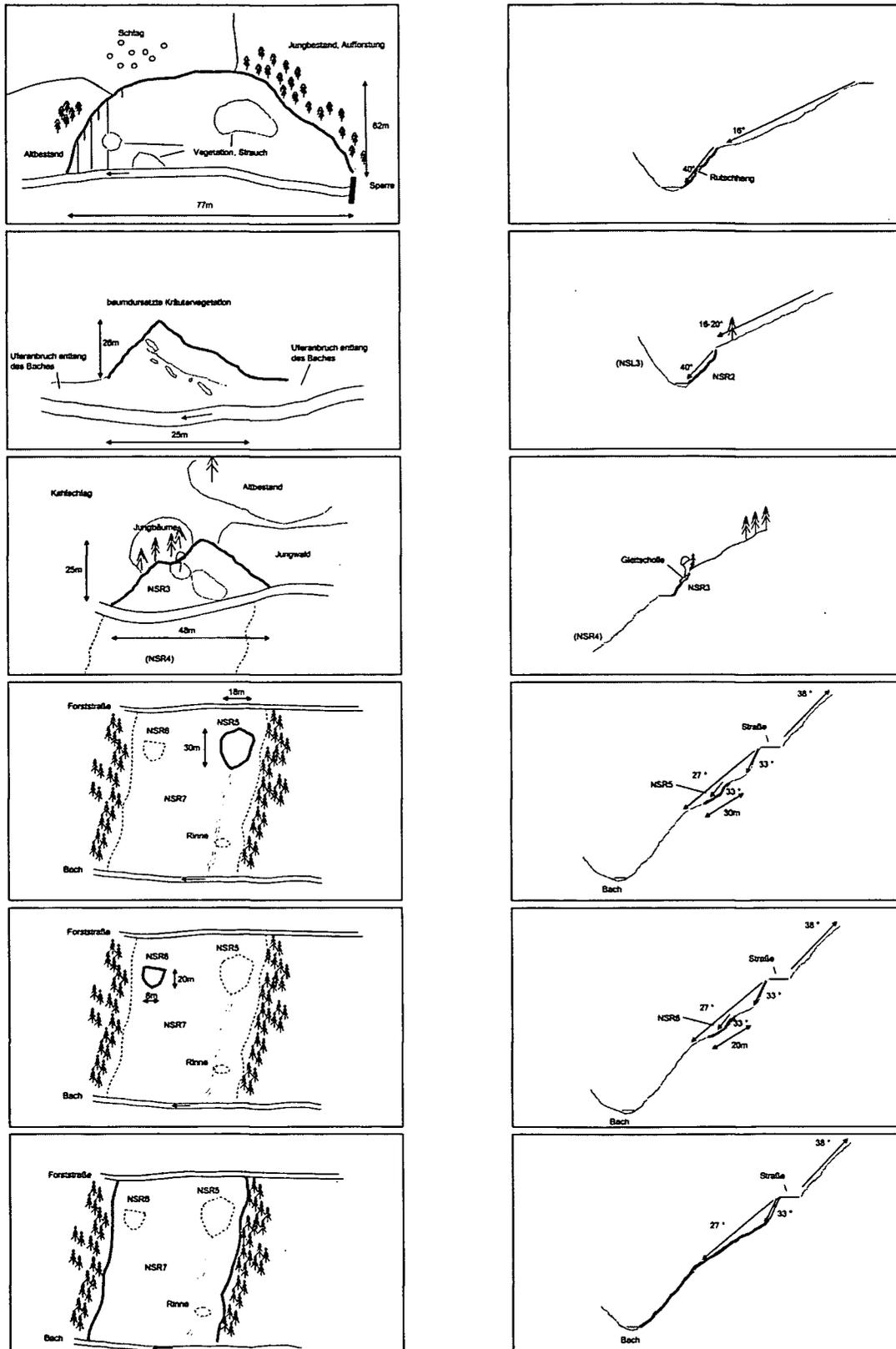
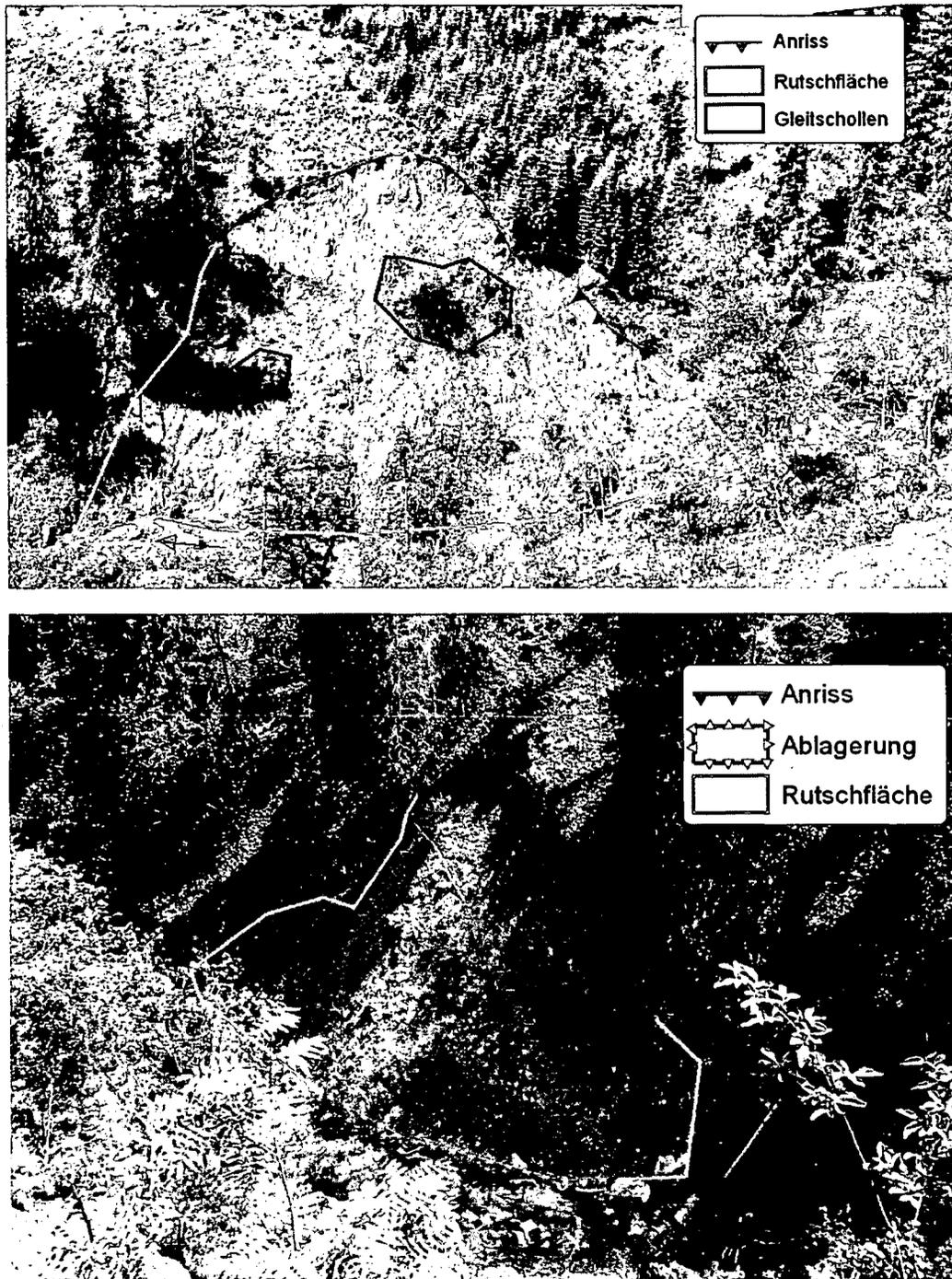
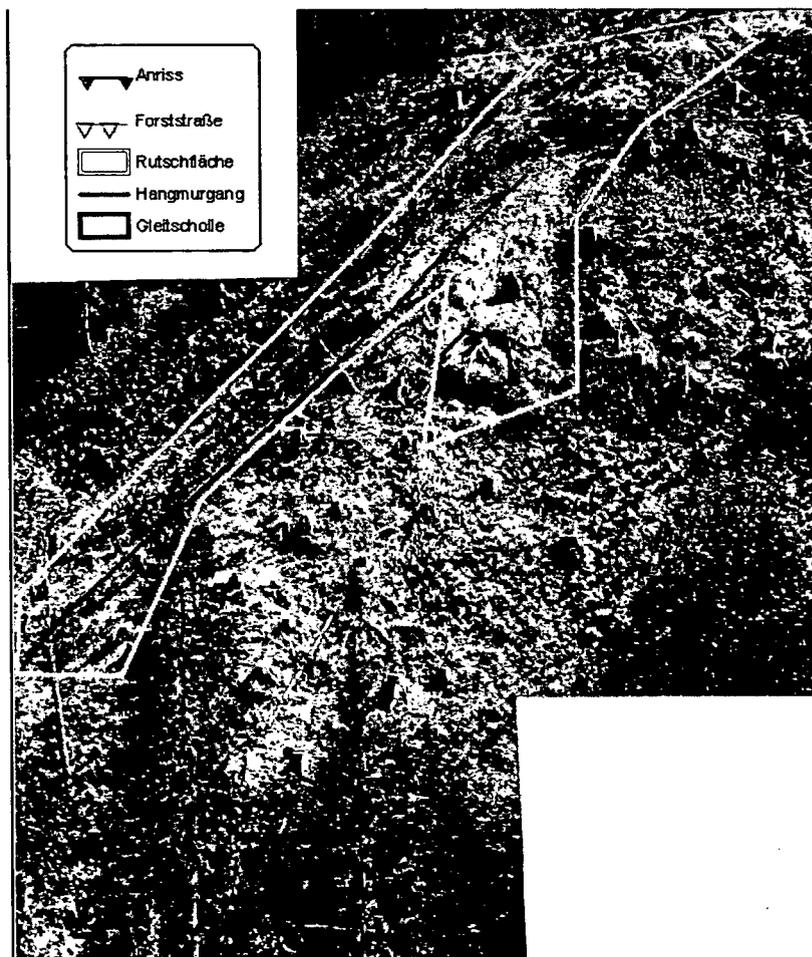
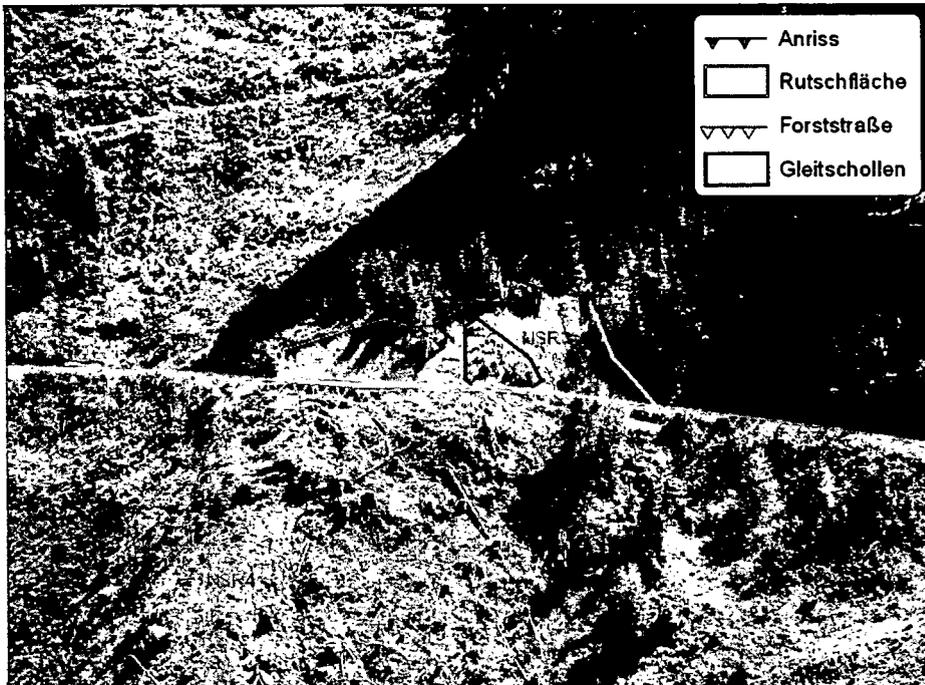


Abbildung 9.13: Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets NSR. Links Ansicht, rechts Längsschnitt.



**Abbildung 9.14:** Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets *NSR*. Oben *NSR 1*, unten *NSR 2*.



**Abbildung 9.15:** Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets NSR. Oben NSR 3, unten NSR 4.

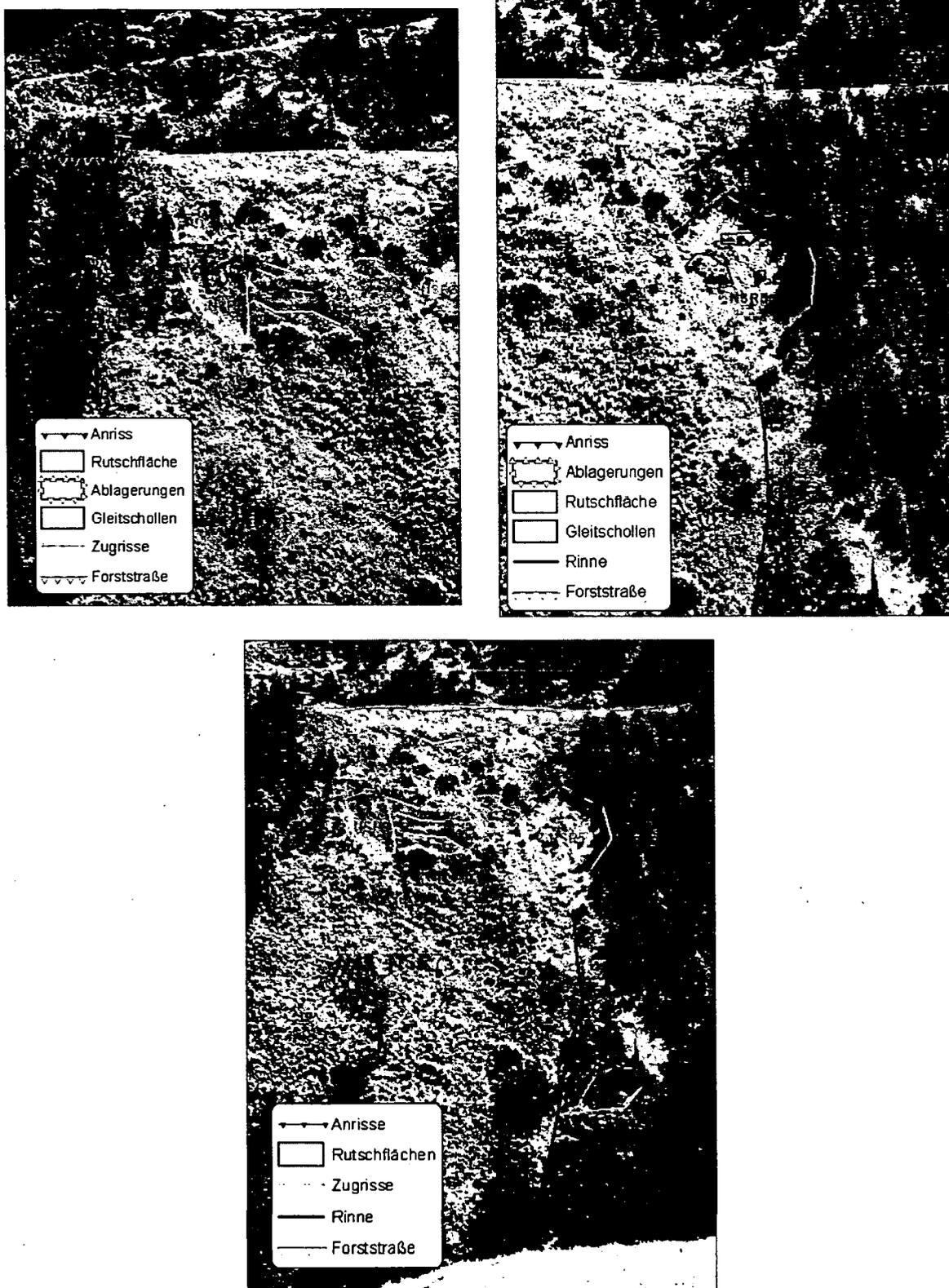
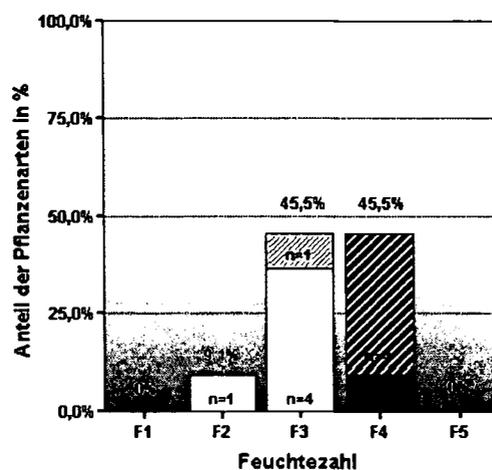


Abbildung 9.16: Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets NSR. Oben links NSR 6, oben rechts NSR 5, unten NSR 7.

**Hydrologie** Die Auswertung der Zeigerpflanzen bestätigt den vor Ort erhaltenen Eindruck: Es zeigen sich grundsätzlich mesische Verhältnisse, die aber stark ins Feuchte wechseln können.



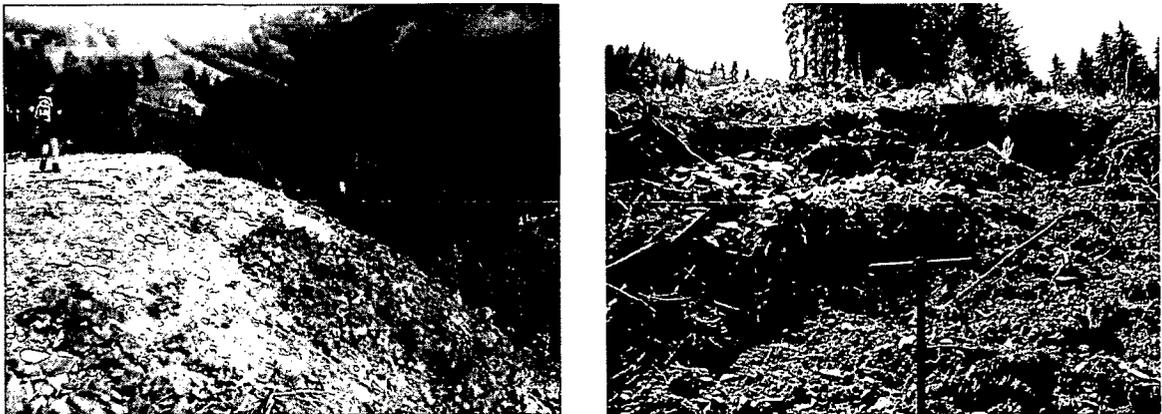
**Abbildung 9.17:** Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets NSR. Gilt für Standorte NSR1 und NSR2.

**Boden** Am Standort NSR4 wurde ein Bodenschurf gegraben. Am Profil war ein Stauhorizont erkennbar.



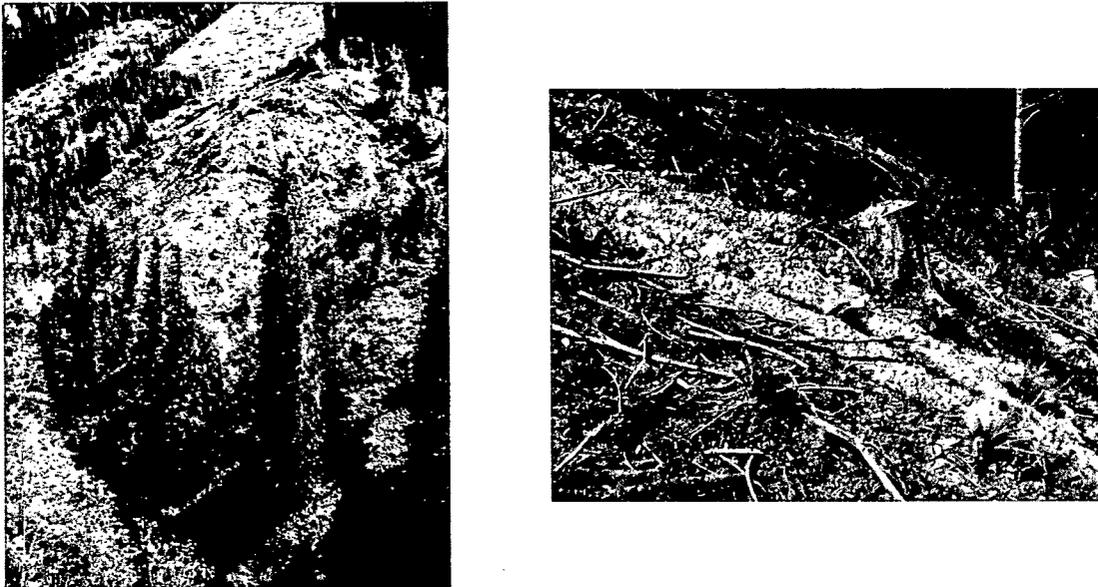
**Abbildung 9.18:** Bodenprofil des Standorts NSR4. Links Ort des Schurfs, rechts Profil.

**Bewegungsmechanismen** Die Standorte *NSR* sind in ihren Bewegungsmechanismen unterschiedlich. *NSR 1* und *NSR 2* ähneln sehr stark den gegenüberliegenden Rutschungen des Teilgebiets *NSL*, weshalb zur ihrer Erklärung auch auf das vorige Kapitel verwiesen wird. *NSR 3* und *NSR 4* liegen – horizontal getrennt durch eine Forststraße – unterhalb einer (*NSR 3*) bzw. in einer Kahlschlagzone (*NSR 4*). Gemeinsam ist ihnen der große nordwärts schauende Buckel auf dem sie beide platziert sind. Ebenso unterliegen beide denselben bewegungsfördernden Einflüssen: Einerseits werden sie von den Einschnitten und Aufschüttungen durch die Forststraße beeinträchtigt, andererseits durch den veränderten Wasserhaushalt infolge der Kahlschläge. Auch hier ist fraglich, ob es einen eindeutigen Rutschtyp gibt. Wahrscheinlicher ist wieder eine Kombination mehrerer Prozesse. Die unterhalb der Straße liegende *NSR 4* weist an ihrem oberen Ende (direkt unter der Straße) zahlreiche Querrisse und auch Anrisse auf, die relativ eindeutig auf rückschreitende Rotationsbewegungen hinweisen (Abb. 9.18 links, Abb. 9.19).



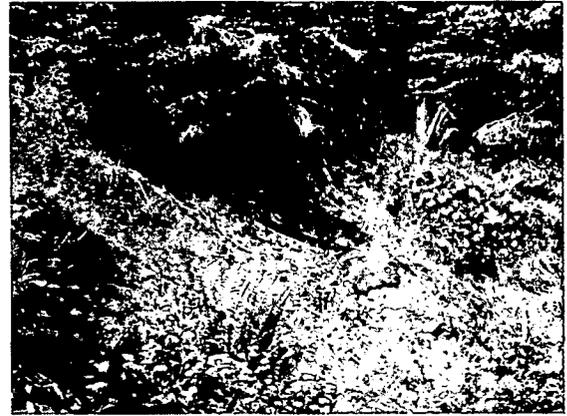
**Abbildung 9.19:** Rutschung *NSR 4*. Links Anriss unterhalb Forststraße, rechts etwas darunter, kurzfristig abgelagerter Rutschkörper sichtbar.

Die Rutschungen *NSR 5* und *NSR 6* liegen auf einem größerem Hang, der insgesamt in Bewegung ist *NSR 7*. Er beinhaltet außer den beiden aufgenommenen Rutschungen auch noch weitere Bewegungen, u. a. einen größeren Graben (Abb. 9.12). Oberhalb verläuft eine Forststraße, darüber befinden sich größere Kahlschlagflächen. Auf *NSR 7* selbst wurde vor einiger Zeit der gesamte Bestand gefällt, worin auch ein möglicher Einfluss auf die Bewegungen zu finden ist. Die kleinflächigen Bewegungen *NSR 5* und *NSR 6* sind Kombinationen aus Translations- und Rotationsprozessen. Die Rutschfläche der ersten Bewegung zeigt beinahe keine Wölbung im Längsprofil (Abb. 9.21, links), was zuerst an eine Translationsrutschung denken lässt. Jedoch wurde auch hier keine offensichtliche



**Abbildung 9.20:** Rutschung *NSR 4* Kahlschlag und Materialablagerung einer kleinen Mure. Links Gesamtansicht, woran der Kahlschlagbereich erkennbar ist, rechts kleine Murenrinne, die unterhalb des Anrissbereiches ansetzt.

Gleitfläche vorgefunden. Möglicherweise handelt es sich bei diesen beiden Rutschungen um Blaiken, die in Folge durch Erosion vertieft und erweitert wurden. Bei *NSR 5* waren punktuelle Hangwasseraustritte und flächige Vernässungszonen anzutreffen. Ein von der Straße herführendes Drainagerohr (Abb. 9.21, rechts) endet kurz unterhalb des Anrisses. Das dort austretende Drainagewasser war wahrscheinlich für die initiale Bewegung verantwortlich, da es die Verwitterung des phyllitischen Untergrundes beschleunigt und zu seiner Mobilisierung beiträgt. *NSR 6* ist im Gegensatz zur vorher genannten Bewegung reich bewachsen, woraus auf eine relative Stabilität – auch gegenüber Oberflächenerosion – geschlossen werden kann. Am gesamten Hang finden sich immer wieder kleine bis größere Querrisse und abgerutschte Schollen. Der Hang scheint demnach in steter Bewegung zu sein. Das zeigt sich sehr schön an der darüberliegenden Forststraße, die mehrmals angerutscht ist (Abb. 9.22, rechts). Auch über der Straße kommt es zu Rutschungen. Abbildung 9.22 (links) zeigt eine stark vernässte Rutschfläche. Das Entfernen der Bäume durch Kahlschlag und der Hangwassereinfluss hatten sicherlich Einfluss auf die Auslösung der Bewegungen.



**Abbildung 9.21:** Rutschung bei und Schäden an der Forststraße oberhalb *NSL 7*. Links eine stark vernässte Rutschfläche, rechts Anrisse im Straßenbereich.



**Abbildung 9.22:** Rutschung bei und Schäden an der Forststraße oberhalb *NSL 7*. Links eine stark vernässte Rutschfläche, rechts Anrisse im Straßenbereich.

### 9.3 Teilgebiet „Einzugsgebiet Trattenbach“ – ET

Ungefähr 2,5 km westlich vom Gasthof Ziegelhütte, über eine Forststraße und weiter nur zu Fuß auf einem Wanderweg erreichbar, befindet sich das Quellgebiet des Trattenbaches. Die Standorte *ET* befinden sich, aufgeteilt auf drei Hänge, direkt (*ET 1*) bzw. in nächster Umgebung unterhalb des Wanderweges (*ET 2* bis *ET 4* bzw. *ET 5* bis *ET 8*) in einer Höhenlage zwischen 1600 und 1700 m ü. A.. Das Teilgebiet ist stark durch die Weidewirtschaft geprägt und weist aktuelle sowie aufgelassene Weideflächen auf. An Vegetationseinheiten sind Wiesen- und Weidegesellschaften, Zwergstrauchheiden und Grünerlengebüsche vorzufinden. In zwei Bereichen des Teilgebietes *ET* (*ET 2* bis *ET 4* und *ET 5* bis *ET 8*) fanden sich noch zahlreiche weitere kleinflächige Rutschungen (Blaiken), die wegen ihrer Gleichartigkeit jedoch nicht alle untersucht wurden. Als Ursache für die Bewegungen ist bei *ET 1* das übermäßige Wasserangebot, bei *ET 2* bis *ET 8* kann eine Extensivierung der Weidewirtschaft als Haupteinfluss angenommen werden.

**Tabelle 9.6:** Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet *Z*.

Bez.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Seehöhe [m ü. A.]	Exposition	Neigung [°]	Hangbereich
ET 1	190	1650	O	19	Mittelhang
ET 2	4,5	1660	OOS	39	Mittelhang
ET 3	48	1640	OOS	39	Mittelhang
ET 4	4	1640	OOS	36	Mittelhang
ET 5	24	1660	OOS	38	Mittelhang
ET 6	44	1670	OOS	38	Mittelhang
ET 7	160	1650	OOS	38	Mittelhang
ET 8	18	1650	OOS	38	Mittelhang

**Tabelle 9.7:** Vergleich geomorphologischer Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes *ET*.

Bez.	Relief		Profil		Rutschanriss
	Makro	Mikro	Längs	Quer	
ET 1	Mittelhang, Graben	unregelm.	konvex unregelm.	konkav unregelm.	ebener Graben
ET 2, 3 u. 4	Mittelhang, oberh. Graben	regelm.	konvex regelm.	konvex regelm.	Mittelhang
ET 5, 6, 7, 8	Mittelhang, oberh. Graben	unregelm.	konvex regelm.	konkav regelm.	Mittelhang



Abbildung 9.23: Teilgebiet *ET*. Links *ET 1*, rechts *ET 2 bis NSR 4*.

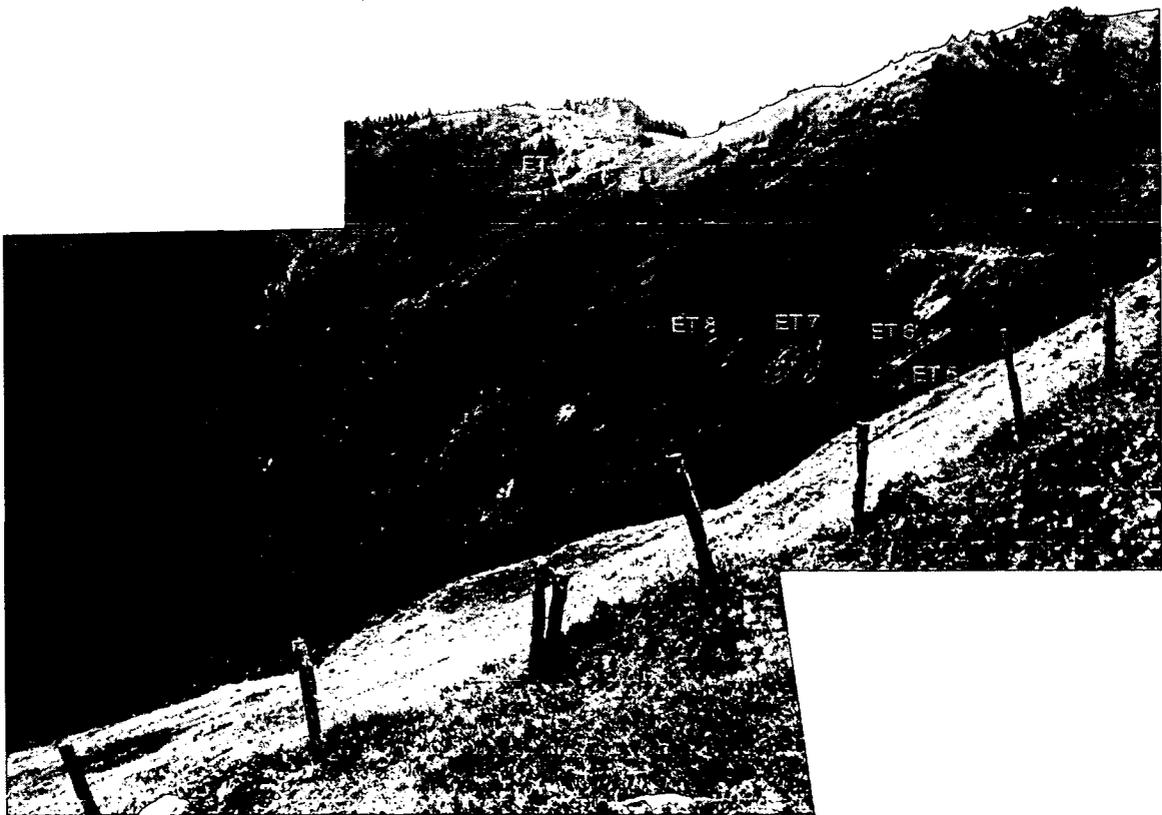


Abbildung 9.24: Teilgebiet *ET*. Übersicht der Standorte *ET 5 bis ET 8*. Im Hintergrund Standorte *ET 1 bis ET 4*.

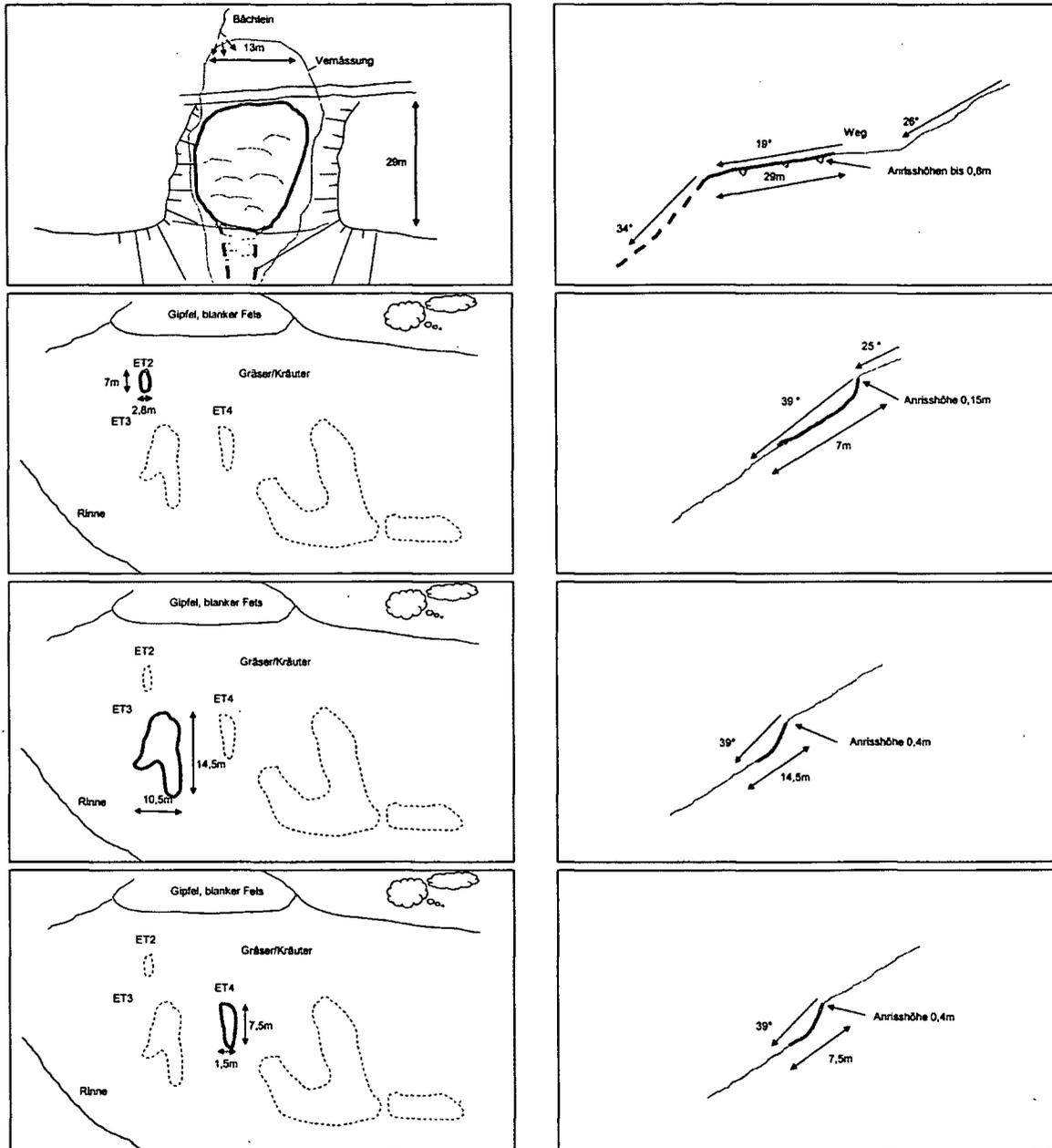


Abbildung 9.25: Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets ET: ET1 bis ET6. Links Ansicht, rechts Längsschnitt.

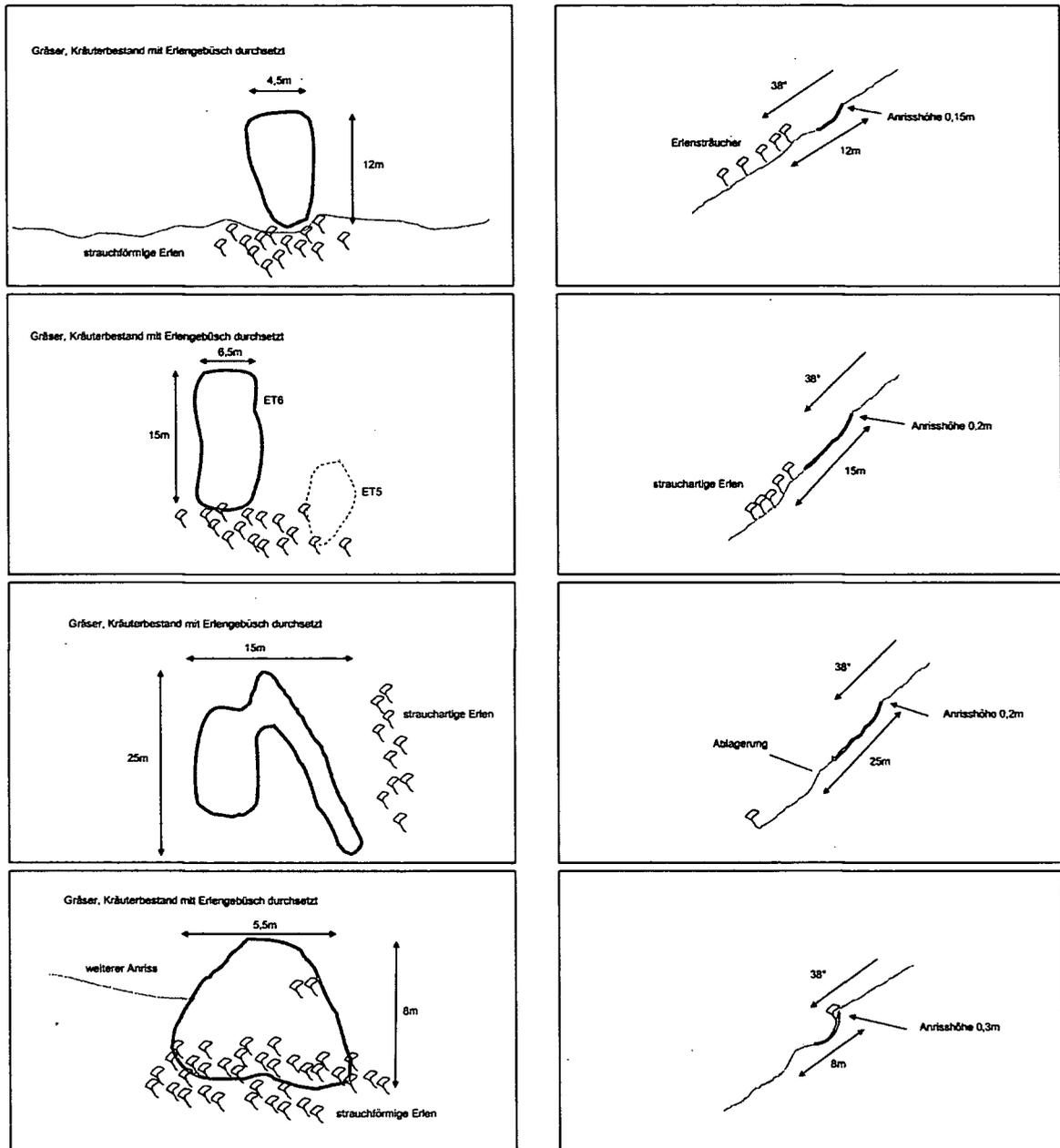
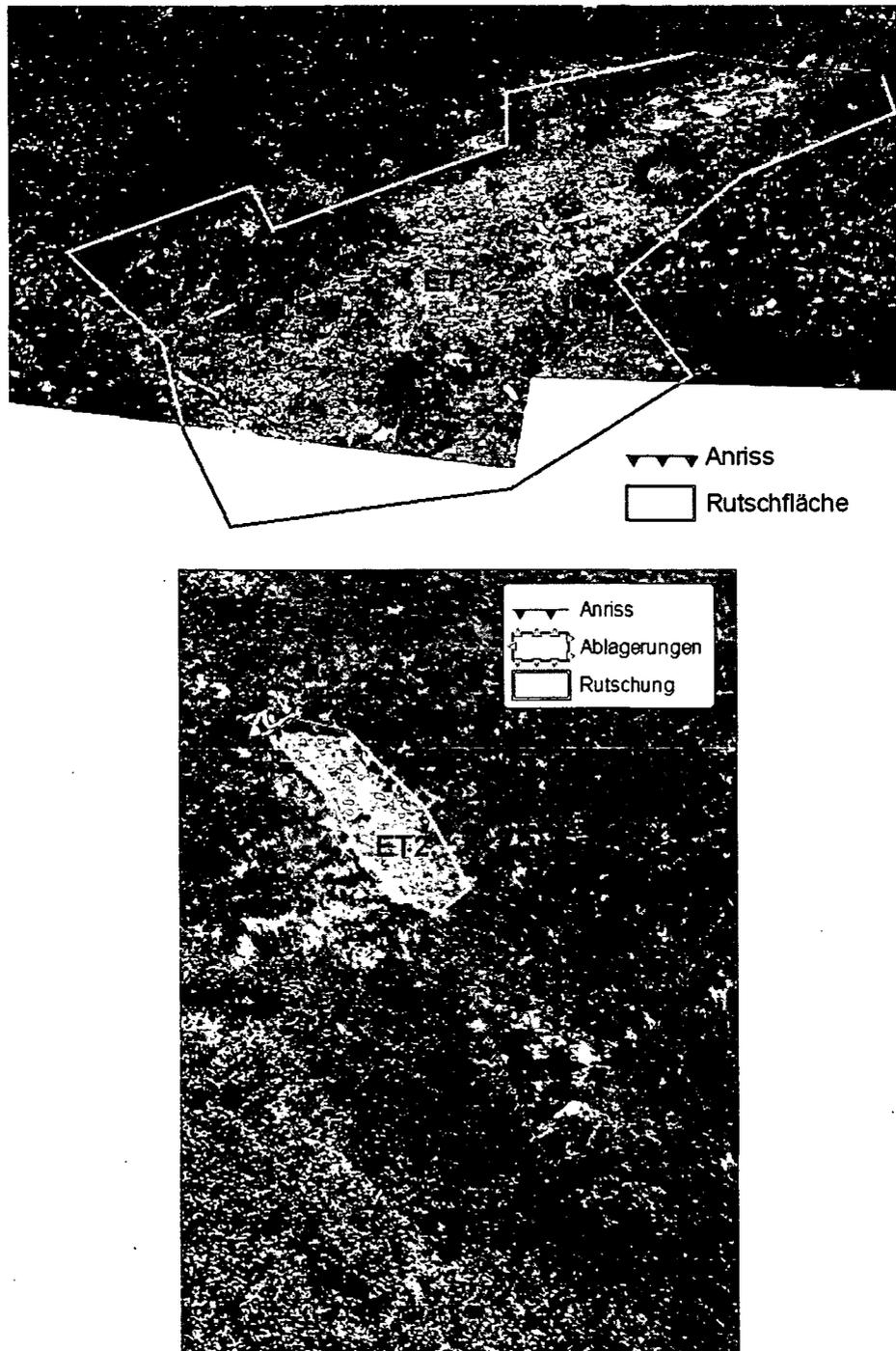


Abbildung 9.26: Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets ET: ET7 und ET8. Links Ansicht, rechts Längsschnitt.



**Abbildung 9.27:** Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets *ET*. Oben *ET1*, unten *ET2*.



**Abbildung 9.28:** Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets *ET*. Oben *ET3*, unten *ET4*.

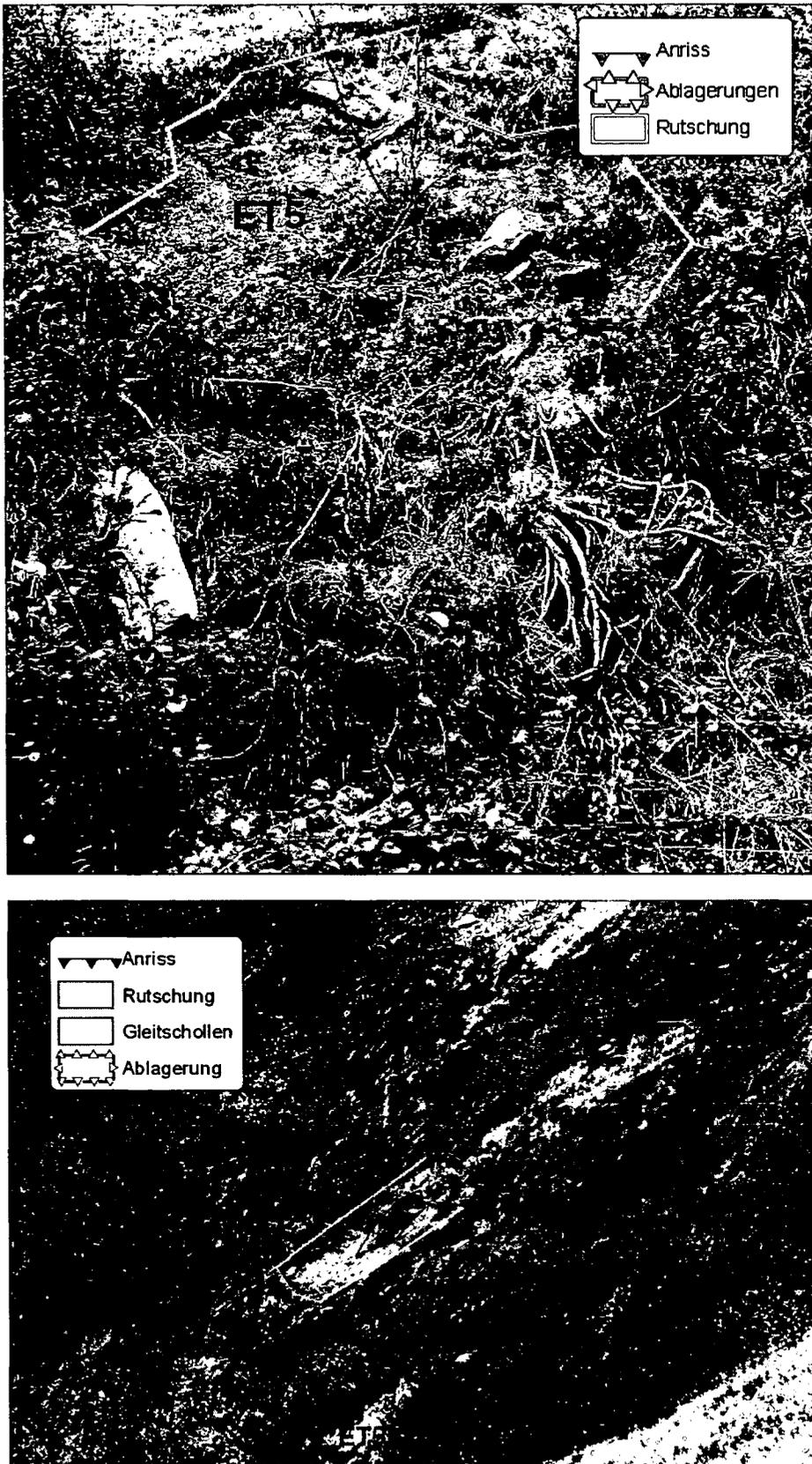


Abbildung 9.29: Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets ET. Oben ET 5, unten ET 6.

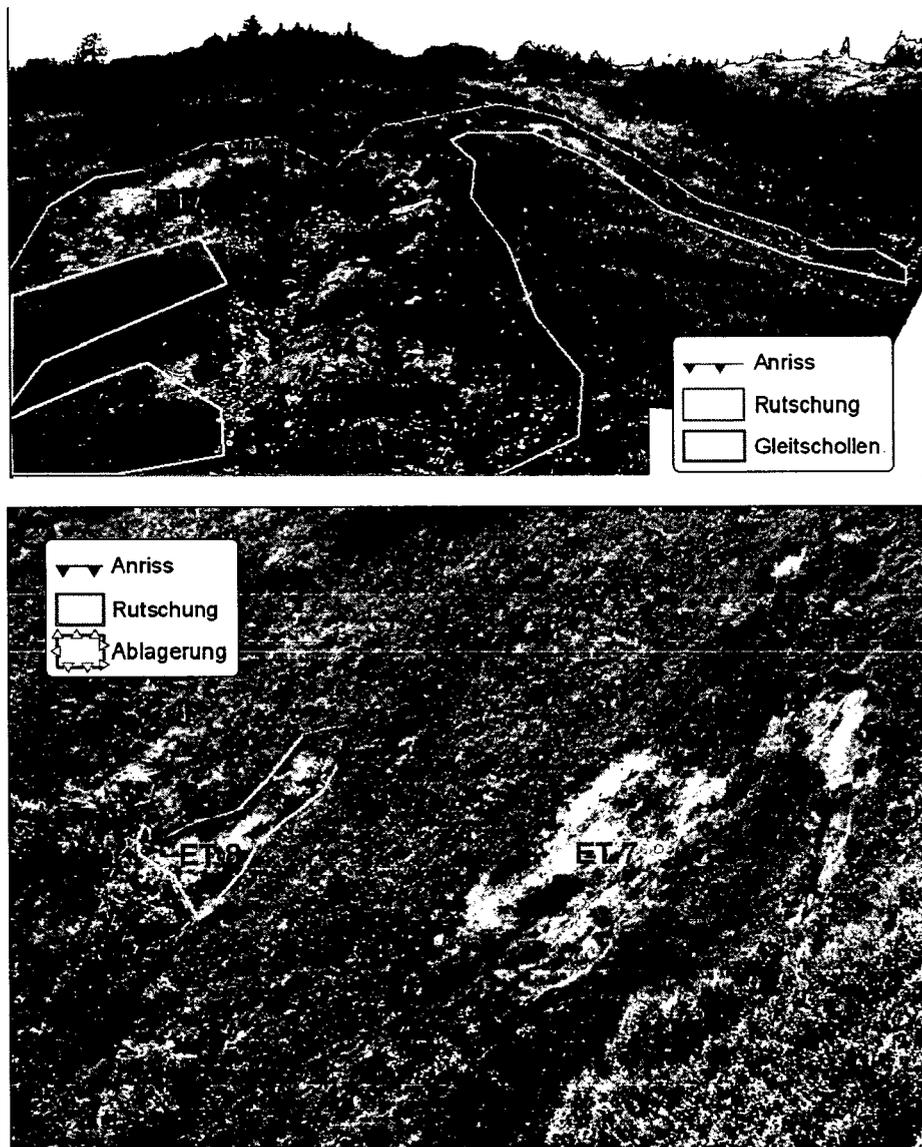
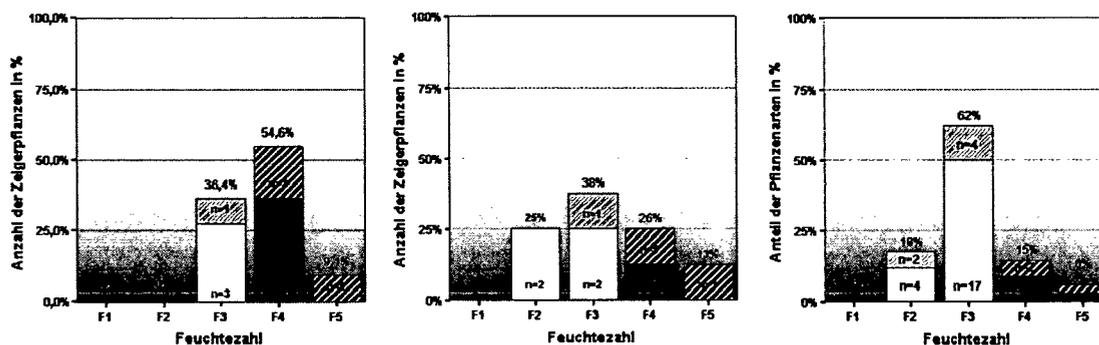


Abbildung 9.30: Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets *ET*. Oben *ET 7*, unten *ET 8*.

**Hydrologie** Die Zeigerpflanzenverteilung des Standortes *ET 1* zeigt wechselnd-feuchte Verhältnisse. Das bestätigt die vor Ort gemachten Beobachtungen nicht ganz, da eindeutig nasse Verhältnisse vorgefunden wurden. Die Aussagekraft der Pflanzen ist jedoch, wegen der geringen Anzahl an gesammelten Arten (11), minderrepräsentativ. Die Standorte *ET 2* bis *ET 4* zeigen mäßig trockene bis wechselnd feuchte Verhältnisse. Eine einzelne Art weist auf wechselnd nasse Verhältnisse hin. Die äußerst geringe Anzahl von Zeigerpflanzen (lediglich 6) vermindert aber die Aussagekraft dieser Verteilung, daher kann sie nur als grösste Abschätzung angesehen werden. Die Verteilung der Zeigerpflanzen an den Standorten *ET 5* bis *ET 8* zeigen hauptsächlich frische Verhältnisse mit geringen mäßig trockenen bzw. feuchten bis nassen Tendenzen. Die vor Ort gemachten Aufnahmen ergaben eher feuchte Verhältnisse, jedoch kann wegen der größeren Zahl an Zeigerpflanzen (34) schon ein gewisses Vertrauen in deren Aussagekraft gelegt werden. Die anzunehmenden Verhältnisse sind daher frisch (mesisch) bis feucht.



**Abbildung 9.31:** Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets *ET*. Links *ET 1*, Mitte *ET 2 bis 4*, rechts *ET 5 bis 8*.

**Boden** An diesem Standort wurden mehrere Bodenschürfe gegraben. Es wurden unterschiedliche Bodenarten und teilweise Vernässungen, jedoch keine besonderen Schichtungen vorgefunden. Durch die Rutschungen (ausgenommen *ET 1*) wurde meist nur die durchwurzelte Bodenschicht abtransportiert. (Abb. 9.32)

**Bewegungsmechanismen** Am Standort *ET* wurden zwei unterschiedliche Bewegungsmechanismen vorgefunden, die im Gegensatz zu den Rutschungen an den ersten beiden Standorten relativ einfach zu erklären sind.

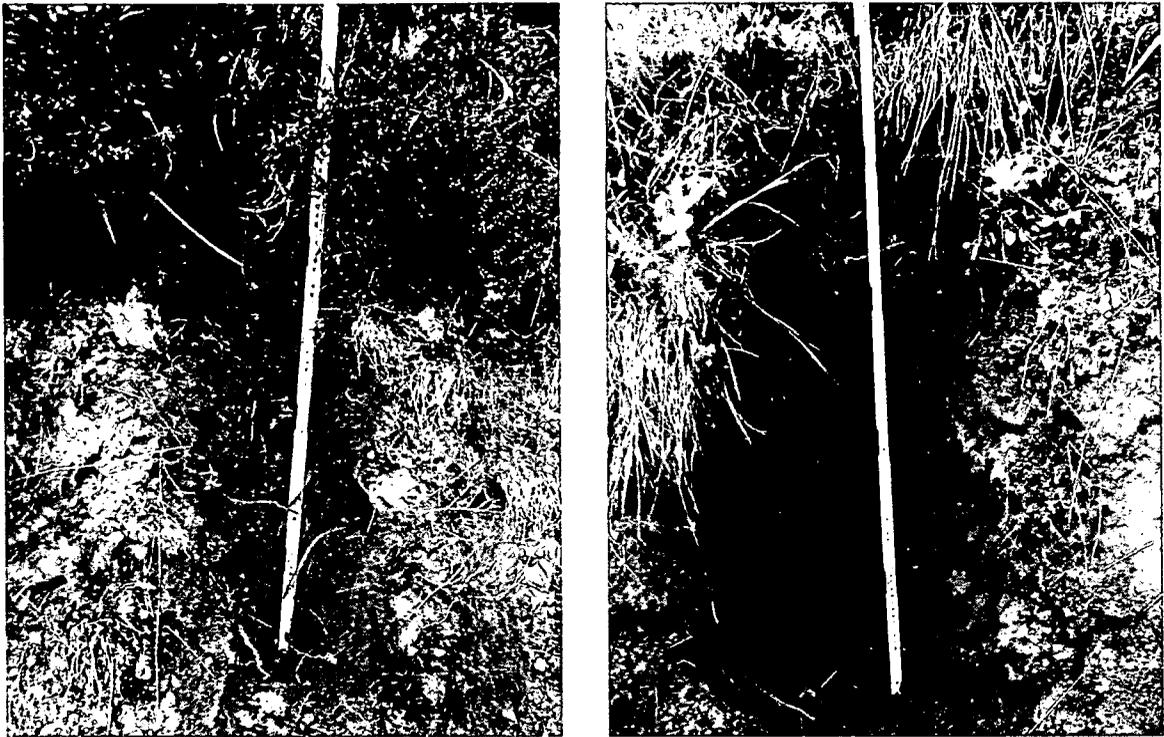
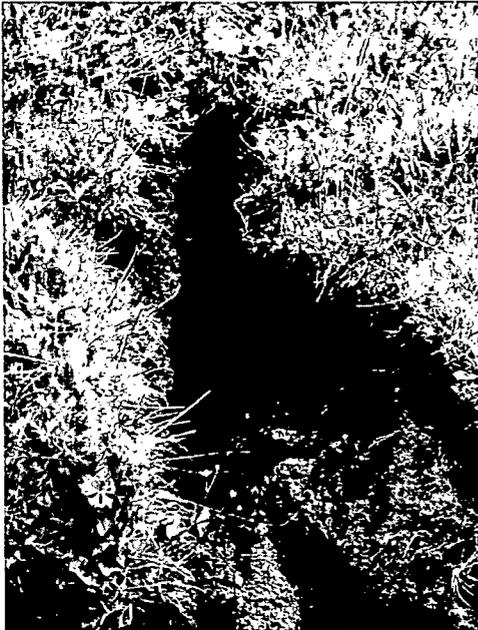


Abbildung 9.32: Bodenprofile der Standorte *ET*. Links *ET2*, rechts *ET7*.

Der Rutschkörper der ersten Bewegung *ET1* liegt in einem breiten, nicht sehr steilen Graben und ist – gespeist von einem Bach – wassergesättigt. In Gleitschollen bewegt er sich abwärts. Unterhalb des Rutschkörpers schließt ein steiler Graben an, wo sich die Bewegung rascher fortsetzt. Spüldenudation (Oberflächenerosion) hat für diesen Hang nur untergeordnete Bedeutung. Die Sättigung des Bodens ist die Hauptursache für die Bewegungen. Abhängig vom Wasserangebot (Niederschlag, Schneeschmelze, Wassermenge des Baches), oder vom Schneedruck, der aber ob der geringen Neigung nicht so sehr ins Gewicht fallen dürfte, gleiten die Gleitschollen auf dem wassergetränkten, viskosen Untergrund abwärts. Der Fortschritt der Bewegung ist grundsätzlich sehr langsam, während und nach stärkeren Regenereignissen wird er sich aber beschleunigen. Die rutschenden Bodenschollen (Abb. 9.33, links) dürften trotz der Wassersättigung noch kohäsiv sein, sie werden auch zusätzlich von der Wurzelmatrix stabilisiert. Die Gleitschicht (Abb. 9.33, rechts) hingegen zeigt einen breiigen, halbflüssigen Zustand. Dadurch gleiten die Schollen in Richtung des Grabens ab, wo sie bei Niederschlag rasch abtransportiert werden. Nach dieser Erklärung handelt es sich um **langsameres, translatives Gleiten**, wobei Ähnlichkeiten mit dem **Blockdriften/Blockgleiten** vorhanden sind.

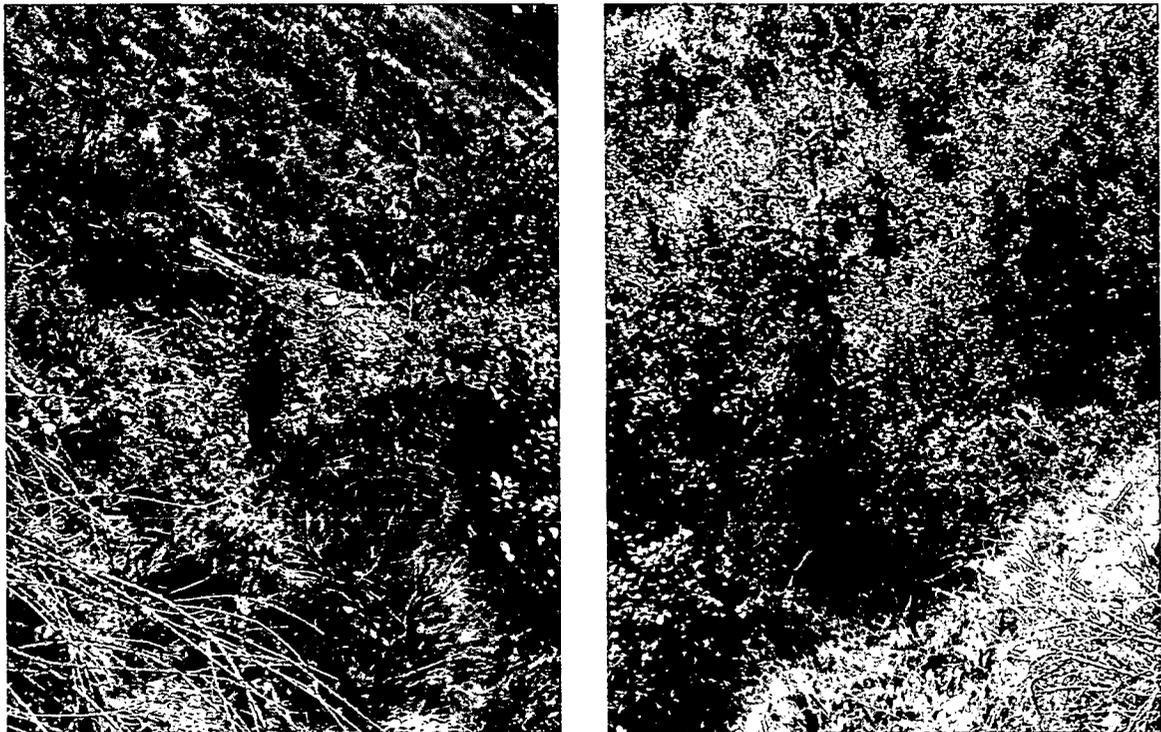


**Abbildung 9.33:** Rissbildung und Gleitschollen der Rutschung *ET 1*. Links im Riss zu sehen: Das noch kohäsive Schollenmaterial, rechts im Vordergrund das breiige Material unter den Schollen.



**Abbildung 9.34:** NäsSESituation der Rutschung *ET 1*. Links Oberfläche der „Gleitschicht“ im Bereich zwischen zwei Gleitschollen, rechts Wassersättigung an der Gleitschollenoberfläche.

Die Bewegungen *ET 2* bis *ET 8* sind als **Blaiken** in Reinform anzusprechen. Zwar gibt es Standortunterschiede zwischen dem Rutschhang *ET 2* bis *ET 4* und dem Hang *ET 5* bis *ET 8* punkto Feuchtigkeit und Bodenart, aber der Rutschmechanismus ist derselbe. Alleine die Spüldenudation ist evtl. bei den letzten vier Bewegungen etwas ausgeprägter. Als Haupteinflussfaktor ist die unkontrollierte Extensivierung der ehemaligen Weidebewirtschaftung zu sehen (siehe Ausführungen zu Blaiken auf Seite 38).



**Abbildung 9.35:** Auswirkung des Schneedrucks auf die Blaikenentwicklung bei Standort *ET*. Links ein neuer Anriss durch Schneedruck auf den Grünerlenbusch als Initialereignis einer neuen Blaike, rechts ein Beispiel für Säbelwuchs.

## 9.4 Teilgebiet „Ziegelhütte“ – Z

Dieses Untersuchungsgebiet ist der Hang gegenüber dem Gasthaus Ziegelhütte. Er ist stark dynamischen Prozessen unterworfen, von Rutschungen bis Grabenerosionen. Die Standorte Z befinden sich im rechten oberen Bereich des Hanges unterhalb einer ehemaligen Forststraße (Z1 und Z2) bzw. oberhalb der Hangmitte, anschließend an die Ablagerung von Z2 (Z3 und Z4), in einer Höhenlage zwischen 1100 und 1120 m ü. A.. Das Teilgebiet wird vor allem forstwirtschaftlich genutzt, wodurch die Bewegungen auch beeinflusst worden sein könnten. Auch die ehemalige Forststraße scheint Einfluss ausgeübt zu haben. Die aufgenommenen Standorte gleichen sich weitgehend in ihren Eigenschaften und Bewegungsverhalten. In diesem Teilgebiet wären auch noch weitere Standorte interessant gewesen, aus zeitlichen Gründen konnten diese aber nicht mehr aufgenommen werden.

**Tabelle 9.8:** Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet Z.

Bez.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Seehöhe [m ü. A.]	Exposition	Neigung [°]	Hangbereich
Z2	192	1120	N	30	Mittelhang
Z3	630	1110	N	27	Mittelhang
Z4	200	1110	N	27	Mittelhang



**Abbildung 9.36:** Teilgebiet Z, Standorte Z2 bis Z4 (offene Flächen rechts oberhalb der Bildmitte).

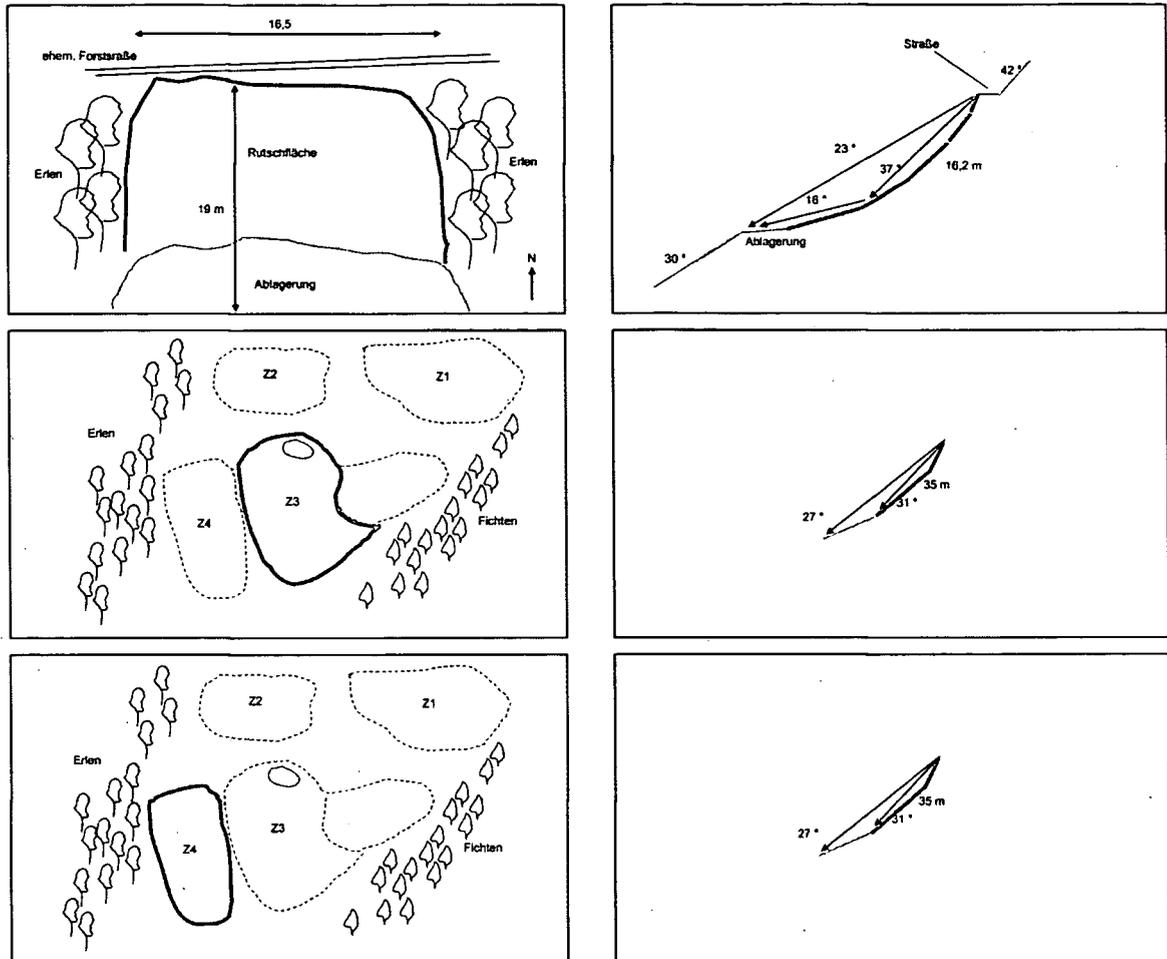


Abbildung 9.37: Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebietes Z. Links Ansicht, rechts Längsschnitt.

Tabelle 9.9: Vergleich geomorphologischer Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes Z.

Bez.	Relief		Profil		Rutschanriss
	Makro	Mikro	Längs	Quer	
Z2	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, unterh. ehem. Forststr., Kahlschlagber.
Z3	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, unterh. Z2, Kahlschlagber.
Z4	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, Kahlschlagber.

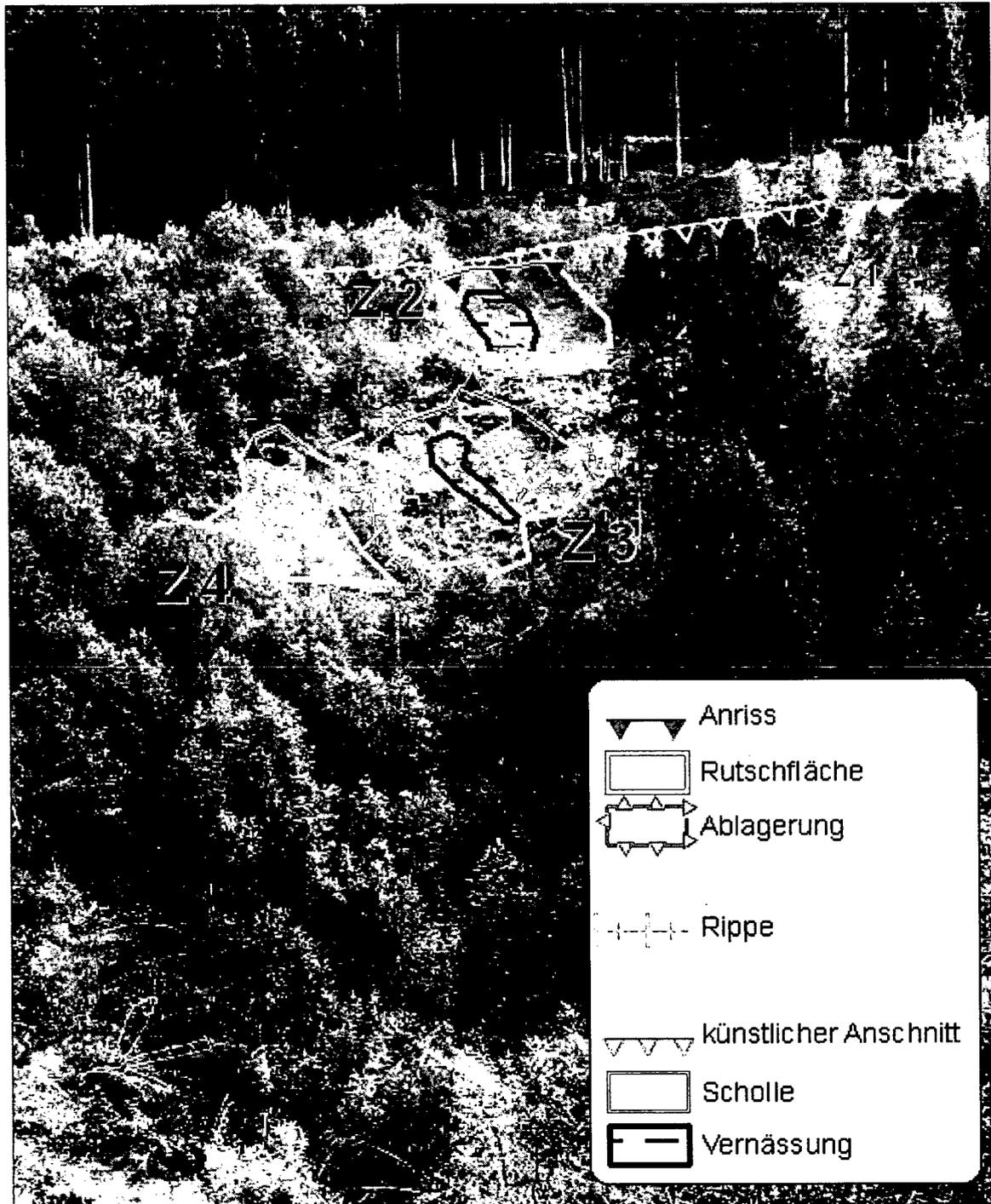
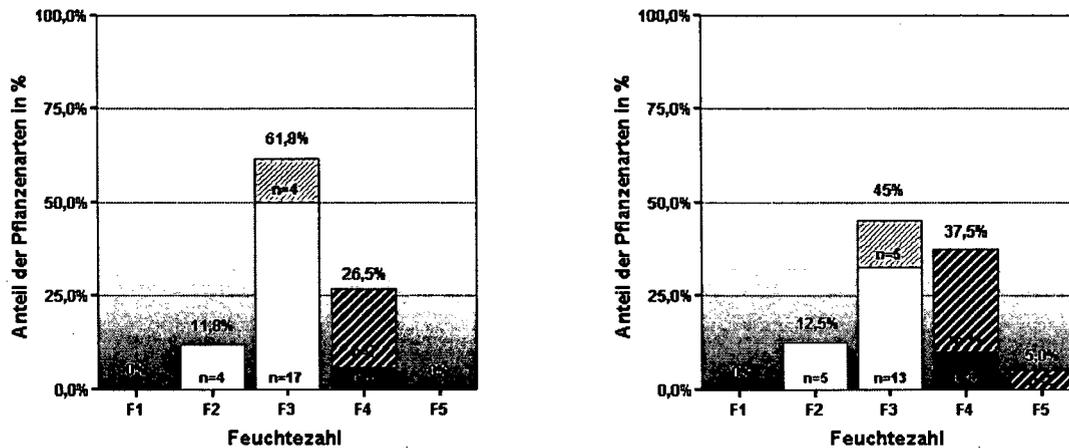


Abbildung 9.38: Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets Z. Oben Z2 darunter Z3 links darunter Z4.

**Hydrologie** Die Verteilung der Zeigerpflanzen beschreibt für Standort *Z 2* hauptsächlich frische Verhältnisse, aber auch mäßig trockene sowie feuchte Zustände, für die Standorte *Z 3* und *Z 4* wechselnd frische Verhältnisse, aber auch mäßig trockene sowie feuchte bis nasse Zustände. Diese Ergebnisse decken sich mit den vorgefundenen Feuchteverhältnissen.



**Abbildung 9.39:** Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets Z. Links *Z 2*, rechts *Z 3* und *Z 4*.

**Boden** Am Standort *Z* wurde ein Bodenschurf gegraben. Das Profil zeigt sehr deutlich zwei verschiedene Schichtungen in der Braunerde (Abb. 9.40). Die untere Schicht ist vermutlich die Mutterschicht, die vor längerer Zeit überschüttet worden ist (möglicherweise bei den Bauarbeiten zur ehemaligen Forststraße).

Die an diesem Standort versuchte Fingerprobe ergab für alle Horizonte Ah, AC, P, C1v, C2v die Bodenart *sandiger Lehm* (sL), wobei der Horizont C2v einen sehr großen Anteil an Lehm (sL – L) zeigte.

**Bewegungsmechanismen** Auch die Rutschungen dieses Teilgebiets gleichen sich weitgehend in ihrer Mechanik. Eine Zuordnung zu einem Rutschungstyp wirft, wie schon bei anderen Rutschungen, gewisse Unklarheiten auf. Wahrscheinlich sind die maßgeblichen Prozesse Überprägungen von Rotations- und Translationsbewegungen, wobei der rotationale Anteil überwiegt. Auch Spüldenudation spielt hier eine Rolle. Als Einflussfaktor ist der schon länger zurückliegende Kahlschlag, der einen Großteil der Fläche betrifft,



Abbildung 9.40: Bodenprofil des Standorts Z2.

anzusehen. Einige Bereiche wurden erst vor wenigen Jahren kahlgeschlagen, was an den Baumstümpfen ablesbar war.

Der Anriss von Z2 befindet sich direkt unterhalb einer ehemaligen, jetzt nicht mehr genutzten und verwachsenen Forststraße (Abb. 9.41, links). Auch deren Einfluss scheint eine gewisse Wirkung auf zumindest diese Rutschung gehabt zu haben, da der Anriss durchgängig an der Straßenaußenkante verläuft.

Alle drei Rutschungen zeigen Vernässungszonen und an der Nahtstelle zwischen Rutschfläche und Ablagerung offene Wasserbereiche (Abb. 9.41, rechts), die, wie zu sehen war, durch Quellaustritte in den Rutschflächen gespeist werden.

Am Gesamtrutschhang (zwischen alter Forststraße und Trattenbach) finden sich noch weitere Massenbewegungen. So zieht sich eine Hangmurenbahn (Abb. 9.42, links) über etwa zwei Drittel des Hanges. Auch im Erlenwald, der in Hangmitte stockt, sind einige Anrisse zu entdecken (Abb. 9.42, rechts).

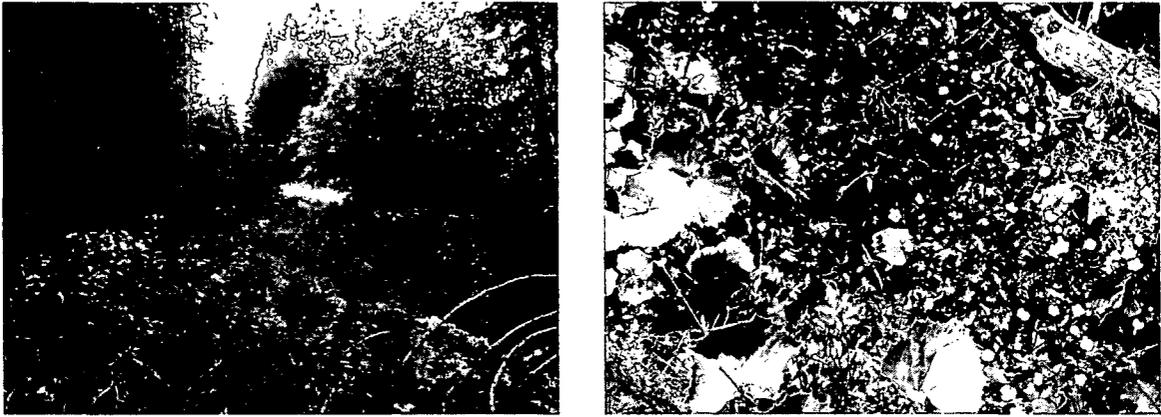


Abbildung 9.41: Forststraße (links) und stehende Wasserbereiche (rechts) am Standort Z.

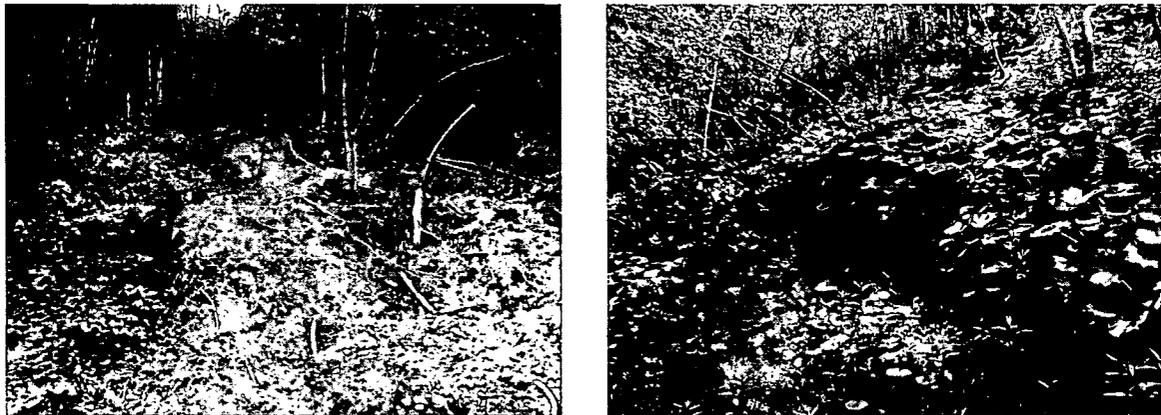


Abbildung 9.42: Ablagerung einer Hangmure (links) und Anriss im Erlenwald (rechts) bei Standort Z.

## 9.5 Zusammenfassung der Auswertung

In diesem Kapitel werden alle Rutschungen in einer allgemeinen Tabelle und in zwei Tabellen zu Geomorphologie bzw. zu Hydrologie gegenübergestellt. Zur Tabelle 9.10 gibt die vorangestellte Legende Erklärungen.

Hangbereich:	<i>O</i> ... Oberhang <i>M</i> ... Mittelhang <i>U</i> ... Unterhang	Bewirtschaftung:	<i>F</i> ... Forst <i>W</i> ... Weide <i>ex</i> ... extensiviert <i>M</i> ... Mähwiese
Hydrologie:	<i>F1</i> ... ausgespr. trocken <i>F2</i> ... mäßig trocken <i>F3</i> ... mittelfeucht <i>F4</i> ... feucht <i>F5</i> ... nass <i>w</i> ... wechselnd feucht	Rutschart:	<i>R</i> ... Rotationsrutschung <i>T</i> ... Translationsrutschung <i>B</i> ... Blaike <i>K</i> ... Komplex (Großgeschriebene dominieren, Kleingeschriebene sind beteiligt) <i>E</i> ... Erosion
Vegetation:	<i>X</i> ... vegetationslos <i>M</i> ... Moose <i>G</i> ... Gräser <i>K</i> ... Kräuter <i>Fa</i> ... Farne <i>Fi</i> ... Fichten		
Umgebung:	<i>X</i> ... vegetationslos <i>Mo</i> ... Moose <i>G</i> ... Gräser <i>Kr</i> ... Kräuter <i>Z</i> ... Zwergsträucher <i>sa</i> ... Weiden (Salix-Arten) <i>E</i> ... Erlen, baumförmig <i>e</i> ... Erlenbusch <i>Fi</i> ... Fichten <i>Ka</i> ... Kahlschlag		

Tabelle 9.10: Aufstufung der untersuchten Rutschungen. Insgesamt 21 Rutschungen in vier Teilgebieten.

Bez.	Fläche [m <sup>2</sup> ]	See- höhe [m ü. A.]	Exposition	Nei- gung [°]	Hang- be- reich	Hydrologie	Vegetation	Umgebung	Bewirt- schaftung	Rutschart
NSL 1	1250	1190	SSW	40	U	F3w	X M G K	Fi	F W M	K <sub>rie</sub>
NSL 2	3000	1190	SSW	40	U	F3w	X M G K	Fi Mo E	F W M	K <sub>rie</sub>
NSL 3	900	1180	SSW	45	U	F4w	X M G K	Fi	F	K <sub>rie</sub>
NSR 1	3580	1190	NNO	35	U	F3 F4w	X M G K Fa Fi	Kr Fi Ka	F	K <sub>rie</sub>
NSR 2	300	1190	NO	35	U	F3 F4w	X M G K Fa	G Kr Fi	F	K <sub>rie</sub>
NSR 3	600	1240	NNW-NNO	40	M	F3w	x M G K Fa Fi	G Kr Fi	F	TB
NSR 4	-	1220	NNW-NNO	40	M	F3w	X G K	G Kr Ka	F	K <sub>rie</sub>
NSR 5	260	1220	NNO	33	M	F4w	x M G K Fa Fi	G Kr Fi	F	K <sub>rie</sub>
NSR 6	100	1210	NNO	33	M	F4w	M G K Fa	G Kr Fi	F	K <sub>rie</sub>
NSR 7	9700	1225	NNO	-	MU	F3 F4w	M G K Fa	G Kr Fi Ka	F	K <sub>rie</sub>
ET 1	190	1650	O	19	M	F4 F5	G K	G K Z W F	Wex	T
ET 2	4,5	1660	OOS	39	M	F2 F3w	X	G K Z F	Wex	TB
ET 3	48	1640	OOS	39	M	F2 F3w	X G K	G K Z W E F	Wex	TB
ET 4	4	1640	OOS	36	M	F2 F3w	X	G K	Wex	TB
ET 5	24	1660	OOS	38	M	F3w	X	G K e	Wex	TBE
ET 6	44	1670	OOS	38	M	F3w	X	G K e	Wex	TBE
ET 7	160	1650	OOS	38	M	F3w	X	G K e	Wex	TBE
ET 8	18	1650	OOS	38	M	F3w	X	G K e	Wex	TBE
Z 2	192	1120	N	30	M	F3 F4w	M G K Fa	G K E F	F	K <sub>rie</sub>
Z 3	630	1110	N	27	M	F3 F4w	M G K Fa	G K E F	F	K <sub>rie</sub>
Z 4	200	1110	N	27	M	F3 F4w	M G K Fa	G K E F	F	K <sub>rie</sub>

Tabelle 9.11: Vergleich geomorphologischer Merkmale der aufgenommenen Rutschungen.

Bez.	Relief		Profil		Rutschanriss
	Makro	Mikro	Längs	Quer	
NSL 1, 2 u. 3	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	unterh. Forststraße
NSR 1 u. 2	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt gleichm.	Mittelhang, Kahlschlagbereich
NSR 3	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	konvex gleichm.	Kahlschlagbereich, oberh. Forststraße
NSR 4	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	konvex unregelm.	Kahlschlagbereich, unterh. Forststraße
NSR 5 u. 6	Mittelhang	unregelm.	konvex unregelm.	gestreckt gleichm.	Kahlschlagbereich
NSR 7	Unterhang, Hangfuß Bach	unregelm.	konvex unregelm.	gestreckt gleichm.	Kahlschlagbereich, unterh. Forststraße
ET 1	Mittelhang, Graben	unregelm.	konvex unregelm.	konkav unregelm.	ebener Graben
ET 2, 3 u. 4	Mittelhang, oberh. Graben	regelm.	konvex regelm.	konvex regelm.	Mittelhang
ET 5, 6, 7, 8	Mittelhang, oberh. Graben	unregelm.	konvex regelm.	konkav regelm.	Mittelhang
Z 2	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, unterh. ehem. Forststr., Kahlschlagb.
Z 3	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, unterh. Z 2, Kahlschlagber.
Z 4	Mittelhang	unregelm.	konkav unregelm.	gestreckt unregelm.	Mittelhang, Kahlschlagber.

Tabelle 9.12: Feuchteverhältnisse: Vergleich von verbaler Einstufung und Zeigerwertverteilung.

Bez.	Feuchteverhältniss		Quellwas- seraustritte	Hangwasse- reinfluss	oberflächlicher Abfluss
	verbal	Zeigerpflanzen (n)			
NSL 1 u. 2	wechselnd feucht	w. frisch bis feucht (30)	vorhanden	groß	teilweise
NSL 3	wechselnd frisch	wechseln feucht (8)	keine	ni. eind. bestimmbar	keine, aber Merkmale erkennbar
NSR 1 u. 2	wechselnd frisch	wechselnd frisch (11)	keine	ni. eind. bestimmbar	keine, aber Merkmale erkennbar
ET 1	vernässt	frisch bis feucht (11)	keine	groß	vorhanden
ET 2 bis 4	wechselnd trocken	trocken bis feucht (8)	keine	unbedeutend	keine
ET 5 bis 8	wechselnd feucht	frisch (34)	vorhanden	ni. eind. bestimmbar	keine
Z 2	frisch bis w. feucht	frisch bis w. feucht (41)	vorhanden	mäßig bis groß	vorhanden
Z 3	frisch bis w. feucht	frisch bis w. feucht (42)	vorhanden	mäßig bis groß	vorhanden

## 10 Diskussion und Ausblick

Die folgenden Seiten befassen sich mit den Erkenntnissen der Diplomarbeit und zeigen Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten der Untersuchungsmethodik auf.

Die ingenieurbioologische Arbeit verlangt einen interdisziplinären Ansatz. Dieser ist wichtig, einerseits um die ingenieurbioologischen Maßnahmen von anderen technischen Lösungen abgrenzen zu können und andererseits um die Auswahl von Bautypen und Pflanzen zu optimieren. Im Grundlagenkapitel wurde versucht die dafür maßgeblichen Parameter zusammenzustellen. Es entstand eine breite Sammlung ingenieurbioologisch relevanter Parameter aus den Bereichen Geomorphologie, Boden und Vegetation. Mit dieser umfassenden Grundlagenkenntnis wurden die Voraussetzungen für eine Konzeption projektspezifischer Aufnahmeformulare bei Hangstabilitätsanalysen geschaffen.

Für die durchgeführte Feldbegehung wurde ein solches Aufnahmeformular erstellt. Während und nach der Untersuchung zeigten sich Stärken und Mängel der gewählten Konzeption:

Der Aufnahmepunkt zu **Geomorphologie** war für die **Abschätzung der Hangsituation sehr hilfreich**. Zum einen konnte an der Struktur der Rutschfläche und der Anrisszonen Hinweise auf die Art der Rutschung abgelesen werden. Zum anderen gab die Betrachtung der Rutschungsumgebung ein Bild der Situation des Gesamthanges. Auch offensichtliche Einflussfaktoren wie die Bewirtschaftungsart, Hangeinschnitte o. ä. konnten dabei erkannt werden.

Im Aufnahmeteil **Boden** konnten einige **aufschlussreiche Ergebnisse hinsichtlich Schichtung des Bodens und evt. vorhandener Vernässungszonen** erlangt werden. Leider fehlte für einige bodenkundliche Untersuchungen das nötige Wissen und die Erfahrung, weshalb Bodenaufnahmen, die die Möglichkeiten der untersuchenden Personen überschritten, ausgelassen wurden. **Aufgrund der großen Bedeutung von Bodenanalysen bei Hangstabilitätsuntersuchung, wird für künftige Untersuchungen eine profunde bodenkundliche Vorbereitung angeraten**. Zu diesem Zweck sollte die Fingerprobe im Vorhinein und wenn möglich unter fachkundiger Aufsicht geübt

werden. Für die Untersuchung des pH-Werts (Bodenacidität) sollte die ÖNORM L 1083, des Karbonatgehalts die ÖNORM L 1084 und zur Analyse der Korngrößen die ÖNORM L 1061-2 hinzugezogen werden.

Die Aufnahme und Analyse der **Vegetation** konnte in vielen Fällen wertvolle Aussagen zu den Bodenfeuchteverhältnissen und zu der Bodenverdichtung geben. Interessant war die teilweise sehr gute Korrelation von verbaler Bewertung und Verteilung der Zeigerwerte im Feuchtebereich. Von acht erstellten Zeigerwertverteilungen zeigten drei (n=11, 41 und 41) exakte und weitere drei (n=30, 8 und 34) weitgehende Übereinstimmung. Nur in zwei Fällen waren hier Differenzen vorhanden, was u. a. in der geringen und nicht repräsentativen Anzahl von gesammelten Pflanzen (n=8 bzw. 11) begründet liegt. **Die Methode der Bestimmung von Boden- und Feuchteverhältnissen mithilfe von Zeigerpflanzen ist prinzipiell sehr gut, weil sie die gewünschten Parameter ohne große Aufwendungen angibt.** Durch die Untersuchung direkt auf der Rutschfläche ergab sich aber meistens der Nachteil, dass diese nur wenig bis gar nicht bewachsen war. Darum war auch die Anzahl der zeigenden Pflanzen für eine glaubhafte Aussage teilweise zu gering. **Deshalb sollten bei weiteren Untersuchungen zusätzlich Pflanzen aus der Umgebung der Rutschung untersucht werden.** Der Vorteil wäre dabei, dass die Situation der Umgebung, durch Zeigerwerte untermauert, besser abgeschätzt werden kann. Nachteilig wäre aber der erhöhte Aufwand und die Frage nach dem 'wo' der Pflanzenentnahme. Letzteres ist eine Frage der Erfahrung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem erstellten Aufnahmeformular ingenieurbiologisch relevante Parameter gut erfasst wurden. Einem Rutschstandort die zugrundeliegenden Mechanismen zuzuordnen, war aber teilweise etwas schwierig. Die Schwierigkeit lässt sich auf mangelnde Erfahrung, jedoch auch auf die erschwerende geologische Situation des Untersuchungsgebietes (verwitterter Phyllit) zurückführen.

Da sich die ingenieurbiologische Arbeit auch auf Wissen und Erfahrung anderer Disziplinen stützt, ist eine Zusammenarbeit mit diesen naheliegend. Die Feldaufnahmen zeigten sehr deutlich, dass für die Detektion und v. a. für die Beurteilung von Hangbewegungen tiefgehendes Querschnittswissen bzw. polydisziplinäre Erfahrungen benötigt werden. Die daraus abzuleitende Empfehlung für Hangstabilitäts-Untersuchungen ist entweder die **profunde Vorbereitung im Bereich Boden und Vegetation**, oder die **Inanspruchnahme von Experten** wie Pedologen, Hydrologen, Geologen, etc.

Zur weiteren Verbesserung der Untersuchungsmethoden zeigen **Methoden der Fernerkundung** großes Potential. Schon für diese Diplomarbeit wurden die Möglichkeiten

der *Luftbildinterpretation* und der Analyse von *Digitalen Geländemodellen* angetestet. Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnten diese Versuche aber nicht in die vorliegende Arbeit integriert werden. Jedoch zeigte sich, dass basierend auf diesen Möglichkeiten die Detektion und Bewertung von ingenieurbologisch relevanten Hangprozessen optimiert werden kann.

Das Prinzip der Fernerkundung ist die Geländeanalyse ex-situ anhand von Luft- oder Satellitenbildern, sowie Radar- oder Laserscanbildern. Die Vorteile liegen in der Sicht von oben, wodurch zB auch unzugängliche Stellen erfasst werden können; in der Erstellung von Zeitreihen, was für das Verständnis der Geländedynamik besonders wichtig ist; in der differenzierten Darstellbarkeit des Geländes. Zum Beispiel können auf Farb-Infrarotfilmen Laub- von Nadelgehölzen aufgrund der sich ergebenden Färbung sehr gut unterschieden werden; und in der Digitalisierbarkeit. Dadurch lassen sich mit geeigneter Software computergestützte Analysen eines Geländes durchführen und Faktoren ermitteln, die eine Rutschneigung anzugeben vermögen. Mit dieser Methode sollten sich Zonen im Gelände ausweisen lassen, die hohes Bewegungsrisiko tragen. Ausschlaggebend hierfür ist die Auflösung des Bildmaterials – worin auch das Problem der Luftbilder lag, die für die Diplomarbeit zur Verfügung gestellt wurden. Ingenieurbologisch relevante Geländestrukturen finden sich im Meter- bis Zentimeter-Bereich. Für zufriedenstellende Analysen ist also eine Bildauflösung im Zentimeter-Bereich Voraussetzung. Moderne, hochauflösende Luft- oder Satellitenaufnahmen ermöglichen diese Auflösungen, womit Mikrostrukturen wahrscheinlich ausreichend darstellbar sind. Der Nachteil von Luftfotos ist, dass Geländeaufnahmen unter Bäumen nicht möglich sind. Laserscans sind hier relativ unempfindlich. Sie tasten ein Gelände mit Laserstrahlen ab, die auch in beschattete Bereiche eindringen können. Scans erreichen bei idealen Bedingungen (nach Herstellerangaben) Oberflächenauflösung im Zentimeter- bis Millimeter-Bereich. Die Entwicklung dieser Methode für ingenieurbologische Anwendung könnte im Rahmen einer Dissertation erfolgen.

## Literaturverzeichnis

- ADLER, W., K. OSWALD, und R. FISCHER (1994). *Exkursionsflora von Österreich*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart und Wien.
- AUSTRIAN CLIMATE CD (2000). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- BEGEMANN, W. und H. M. SCHIECHTL (1986). *Ingenieurbiologie: Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau*. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin.
- BENDEL, L. (1949). *Ingenieurgeologie. Bd. I/II* (2 Aufl.). Springer Verlag, Wien.
- BISCHETTI, K. J., E. A. CHIARADIA, und T. SIMONATO (2004). Evaluation of the effect of root cohesion on slope failures in St. Giulio creek catchment. In *Book of Abstracts. International Conference on ECO ENGINEERING "The use of vegetation to improve slope stability". 13 bis 17 Sept. 2004, Thessaloniki, Greece*, S. 39.
- BISHOP, W. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* 29, 859–863.
- BLUM, W. E. H., O. H. DANNEBERG, G. GLATZEL, H. GRALL, W. KILIAN, F. MUTSCH, und D. STÖHR (1986). *Waldbodenuntersuchung. Geländeaufnahme, Probeannahme, Analyse. Empfehlungen zur Vereinheitlichung der Vorgangsweise in Österreich*. Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft, Arbeitsgruppe Waldbodenuntersuchung, Gregor Mendelstr. 33, A-1180 Wien.
- BOGENRIEDER, A. und R. KLEIN (1980). Beeinflußt der UV-Ausschluß das Ergebnis der Photosynthesemessungen mit Gaswechselmeßanlagen? Ein Beitrag zum Küvettenproblem. In *Flora* 169, S. 510–523.
- BRECHTEL, H. (1990). Interzeption. In *Lehrbuch der Hydrologie, Band I (Allgemeine Hydrologie)*. Borntraeger, Stuttgart.

- BUNZA, G. (1992). *Instabile Hangflanken und ihre Bedeutung für die Wildbachkunde*. Deutscher Alpenverein, München.
- BUNZA, G., J. KARL, und O. KRAUS (1988). Veränderungen der Wildbachgefährdungen und deren Klassifizierung bei großen Waldverlusten. In *Int. Symp. Interpraevent 1988 Graz, Bd. 1, S. 15-49*.
- CARSON, M. A. und M. J. KIRKBY (1972). *Hillslope Form and Process*. University Press, Cambridge.
- CENAT (2007). Naturgefahren Schweiz. <http://www.cenat.ch>, Abruf: 15.1.2007.
- COPPIN, N. J. und I. G. RICHARDS (1990). *Use of vegetation in Civil Engineering*. Construction Industry Research and Information Association/Butterworth, London.
- CZICHOS, H. (1996). *Hütte. Grundlagen der Ingenieurwissenschaften* (30 Aufl.), Kapitel D Werkstoffe, S. D45. Akademischer Verein Hütte e. V., Berlin, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- DURLO, M. A. und F. J. SUTILI (2005). *Bioengenharia. Manejo Biotecnico de Cursos de Agua*. EST Edicoes, Porto Alegre.
- ELLENBERG, H., H. E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH, W. WERNER, und D. PAULIBEN (1992). *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa* (2. verbesserte und erweiterte Aufl.). Hrsg. Lehrstuhl für Geobotanik der Universität Göttingen. Verlag Erich Goltze KG, Göttingen.
- FERNANDEZ-STEGER, T. M. (2002). *Erkennung von Hangrutschungssystemen mit Neuronalen Netzen als Grundlage für Georisikoanalysen*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- FEUERBACH, J. (2004). Erdrutsch, Erdsenkung, Bergsturz. Eine wenig beachtete Elementargefahr. [http://www.geo-international.info/Koln\\_VdS\\_2004\\_FEUERBACH.pdf](http://www.geo-international.info/Koln_VdS_2004_FEUERBACH.pdf), Abruf 11.2.2007.
- FINK, S. (1980). Anatomische Untersuchungen über das Vorkommen von Spross- und Wurzelanlagen im Stammbereich von Laub- und Nadelbäumen. Teil I Proventive Anlagen, Teil II Adventive Anlagen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 151. Jg., Heft 9 und 10.

- FLORINETH, F. (2004). *Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbioogie und Vegetationstechnik*. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- FLORINETH, F., B. MITTENDREIN, und R. STERN (2002). Untersuchung und Früherkennung der Erosionsanfälligkeit von alpinen Rasenbeständen. Forschungsbericht, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Arbeitsbereich Ingenieurbioogie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur, Wien.
- FREDLUND, D. G. und H. RAHARDJO (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons, INC., Brisbane/Chichester/New York/Singapore/Toronto.
- Geologische Übersichtskarte von Salzburg 1:200.000 (2005). Koordination: Braunstingl, R., Bearbeitung: Pestal, G., Hejl, E. et al.
- HACKER, E. (1997). Pflanzen - Überstauung - Ingenieurbioogie, Ergebnisse einer Literaturrecherche. In *Ingenieurbioogie und stark schwankende Wasserspiegel an Talsperren. Jahrbuch 8 der Gesellschaft für Ingenieurbioogie e. V.*, S. 73–84. Gesellschaft für Ingenieurbioogie e. V.
- HÜBL, J., G. BUNZA, K. HAFNER, und W. KLAUS (2003). *ETAlp – Erosion, Transport in Alpinen Systemen. Stummer Zeugen Katalog*. Projektteam ETAlp. die.wildbach und lawinenverbauung, lebensministerium.
- HÖLTING, B. (1996). *Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Enke Verlag, Stuttgart.
- HÖRANDL, E., F. FLORINETH, und F. HADACEK (2002). *Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten*. Eigenverlag des Arbeitsbereiches Ingenieurbioogie und Landschaftsbau, Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbioogie, Univerität für Bodenkultur, Wien.
- HUTCHINSON, J. N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrogeology. In *5th International Symposium on Landslides (Lausanne)*, S. 3–35. Balkema, Rotterdam.
- KATZENBACH, R. und A. WERNER (2005). Experimentelle Untersuchungen zur Standsicherheitsproblematik von historischen Bahndämmen. In *Tagungsbei-*

- träge. 5. Österreichische Geotechniktagung. 21. und 22. Februar 2005, S. 381–400. Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- KEPPELER, E. und D. BROWN (1998). Subsurface Drainage Processes and Management Impacts. Forschungsbericht, United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. General Technical Report PSW-GTR-168-Web.
- KILIAN, W., F. MÜLLER, und F. STARLINGER (1994). Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. Forschungsbericht, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum.
- KOCH, F. (2004). *Zur raum-zeitlichen Variabilität von Massenbewegungen und pedologische Kartierungen in alpinen Einzugsgebieten - Dendrogeomorphologische Fallstudien und Erläuterungen zu den Bodenkarten Lahnenwiesgraben und Reintal (Bayerische Alpen) BAND I*. Dissertation, Philosophische Fakultät III - Geschichte, Gesellschaft, Geographie - der Universität Regensburg.
- KRAUTER, E. (2001). Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In *Grundbau-Taschenbuch Teil : Geotechnische Grundlagen* (6. Aufl.), Kapitel 1.13, S. 613 – 662. Ulrich Smolczyk.
- KRENMAYR, H. G. und et al. (1999). *Rocky Austria. Eine bunte Erdgeschichte von Österreich*. Geologische Bundesanstalt.
- KRUEDENER, A. v. (1951). *Ingenieurbiologie*. Reinhardt Verlag, München, Basel.
- KUTSCHERA, L. und E. LICHTENEGGER (2002). *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Stocker Verlag, Graz.
- LANDOLDT, E. (1977). *Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora*. Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel, Zürich, 64. Heft. Geobotanisches Institut der ETH, Stiftung Rübel, Zürich.
- LARCHER, W. (1973). *Ökologie der Pflanzen*. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- LARCHER, W. (2001). *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt* (6. Neubearb. Aufl.). Ulmer Verlag.

- LATELTIN, O. (1997). Naturgefahren. Empfehlungen 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Version pdf 2001. Forschungsbericht, Bundesamt für Raumplanung BRP, Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.
- LEWIN, J. (1998). *Geomorphologie. Ein Methodenhandbuch für Studium und Praxis*. Hrsg: Andrew Goudie ., Kapitel 4, S. 223–446. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- LÖWNER, D. (2005). Semantische Modellierung von geomorphologischen Objekten in einem Geoinformationssystem (GIS) unter besonderer Berücksichtigung von Wänden und steilen Hangbereichen. Diplomarbeit, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- MARKART, G., F. PERZLI, B. KOHL, R. LUZIAN, und K. KLEEMAYR (2005). Schadereignisse 22./23. August 2005 - Ereignisdokumentation und -analyse von ausgewählten Gemeinden des Bezirkes Bregenz (Vorarlberg). Forschungsbericht, Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft.
- McLAREN, R. G. und K. C. CAMERON (1996). *Soil Science. Sustainable production and environmental protection* (2 Aufl.). Oxford University Press, Oxford, New York.
- MOSER, M. (1980). Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. In *Int. Symp. Interpretation 1980, Bd. 1, Kap. 2, S. 121-18, Bad Ischl*.
- MULTILINGUAL LANDSLIDE GLOSSARY (1993). The International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party for World Landslide Inventory. The Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers Ltd.
- NULTSCH, W. (2001). *Allgemeine Botanik* (11., völlig neubearb. und erw. Aufl.). Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- OPLATKA, M., C. DIEZ, Y. LEUZINGER, F. PALMERI, L. DIBONA, und P.-A. FROSSARD (1996). *Dictionary of Soil Bioengineering. Wörterbuch Ingenieurbiologie*. Verein für Ingenieurbiologie. vdf, Zürich; Teubner, Stuttgart.
- PRINZ, H. (1997). *Abriß der Ingenieurgeologie* (2. Aufl.). Enke, Stuttgart.

- RICKLI, C. (2001). Vegetationswirkung und Rutschungen - Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Forschungsbericht, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- SAGIS (2005). Salzburger Geographisches Informationssystem. <http://www.salzburg.gv.at/sagis>, Abruf 18.10.2007.
- SCHAUER, T. (1975). Die Blaikenbildung in den Alpen. Forschungsbericht, Schriftenreihe bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Heft 1.
- SCHEFFER, F., P. SCHACHTSCHABEL, H.-P. BLUME, und G. BRÜMMER (1998). *Lehrbuch der Bodenkunde* (14. Aufl.). Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHINDLER, C. M. (1996). Einführung in die Grundtypen von Instabilität. In *Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse. Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften.*, S. 7–16. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin.
- SCHLÜTER, U. (1996). *Pflanze als Baustoff. Ingenieurbiologie in Praxis und Umwelt* (2. Aufl.). Patzer, Berlin, Hannover.
- SCHÖNEBERGER, W., F. SCHWEINGRUBER, und C. MATTHECK (1994). Baumformen an der oberen Waldgrenze. In *Bündnerwald 47, 1*, S. 35–42. WSL, CH.
- SCHROEDER, D. (1992). *Bodenkunde in Stichworten* (5. revidierte und erweiterte Aufl.). Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgar.
- SCHUPPENER, B. (2003). *Geotechnische Bemessung von Böschungssicherungen mit Pflanzen. Tagungsbeitrag*, S. 55–79. Österr. Ingenieur- und Architektenverein, Wien.
- SELBY, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press - Oxford.
- STANGL, R. und M. SCARPATETTI (2005). Wurzelcharakteristik von Gehölzeinlagen zur ingenieurbiologischen Hangstabilisierung. *Mitteilungsblatt für die Mitglieder des Vereins für Ingenieurbiologie. Heft Nr. 3+4/2005, 15. Jahrgang*, 30–34.
- STRASBURGER, E., F. NOLL, H. SCHENCK, und A. F. W. SCHIMPER (2002). *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen* (35. Aufl.). Neubearbeitet von Peter Sitte, Elmar

- W. Weiler, Joachim W. Kadereit, Andreas Bresinsky, Christian Körner. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- TOBIAS, S. (1991). *Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Böden und Wurzel*. Dissertation, ETH Zürich.
- TOBIAS, S. (2000). *Einführung in die Ingenieurbilogie. Skriptum*. Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich.
- TRANQUILLINI, W. (1959). Die Stoffproduktion der Zirbe an der Waldgrenze während eines Jahres. *Planta* 54, 130–151.
- VARNES, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Highway Research Board, Special Report, Washington DC 29*, 20–47.
- VARNES, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control*, S. 11–33. TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- WAGNER, K. (2004). *Naturgefahrenbewusstsein und Kommunikation am Beispiel von Sturzfluten und Rutschungen in vier Gemeinden des Bayerischen Alpenraums*. Dissertation, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München.
- WARD, R. C. und M. ROBINSON (1989). *Principles of Hydrology* (3. Aufl.). McGraw-Hill, Maidenhead.
- WEITZER, C., F. DOPPLER, und F. FLORINETH (1998). Untersuchungen über die Wirksamkeit von Pflanzen in Einzugsgebieten des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach- und Lawinenverbauung. Forschungsbericht, Arbeitsbereich Ingenieurbilogie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien. Hrsg. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Gruppe V/C, Wien.
- WHIPKEY, R. Z. (1962). Subsurface Stormflow from Forested Slopes. In *ASAE - Drainage Research Committee: Measuring Saturated Hydraulic Conductivity of Soils. Spec. pub., Sp-Sw-0262*, 74–87.
- WILHELMY, H. (2002). *Geomorphologie in Stichworten. II. Exogene Morphodynamik. Abtragung - Verwitterung - Tal- und Flächenbildung* (6. Aufl.). Ferdinand Hirt.

WORMUTH und SCHNEIDER (2007). *Baulexikon*. Bauwerk Verlag GmbH, Postfach 410880, 12118 Berlin.

ZEPP, H. (2002). *Geomorphologie. Eine Einführung*. Schöningh Verlag, Paderborn, München, Wien, Zürich; UTB für Wissenschaft.

ZIEREP, J. und K. BÜHLER (1996). *Hütte. Grundlagen der Ingenieurwissenschaften* (30 Aufl.), Kapitel E Strömungsmechanik, S. E 121. Akademischer Verein Hütte e. V., Berlin, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Ingenieurbiologische Planungsschritte zur Sicherung von Hangbewegungen.	6
3.2	Typisierung der Massenschwerebewegungen. . . . .	9
3.3	Modell für Massenbewegungen. . . . .	9
4.1	Bereiche eines Hanges und Hangformen . . . . .	12
4.2	Merkmale einer Rutschung . . . . .	15
4.3	Dimensionen einer Rutschung . . . . .	17
4.4	Zustand einer Rutschung . . . . .	18
4.5	Art der Rutschungsaktivität . . . . .	19
4.6	Verteilung der Rutschungsaktivitäten . . . . .	20
4.7	Zusammenhang zwischen Anzahl der Rutschungen und der jährlichen Niederschläge. . . . .	26
4.8	Bewegungstyp Kippen. . . . .	28
4.9	Bewegungstyp Gleiten. . . . .	29
4.10	Grundsätzliche Gleitflächenformen . . . . .	30
4.11	Idealisiertes Blockbild einer komplexen Massenbewegung, die sich aus einer Rotationsrutschung und einem Schuttstrom zusammensetzt. . . . .	31
4.12	Arten von Rotationsrutschungen. . . . .	33
4.13	Translationrutschung. . . . .	35
4.14	Prinzipskizze zum Gleiten. . . . .	35
4.15	Schematische Darstellung von Gleitschichten. . . . .	37
4.16	Typische Blaike. . . . .	39
4.17	Formen von abgerutschten Grasschollen. . . . .	39
4.18	Treppenprofil eines Hanges im Querschnitt. . . . .	40
4.19	Blaike durch Schneedruck auf den Grünerlenstrauch entstanden. . . . .	40
4.20	Bewegungstyp Driften. . . . .	41
4.21	Bewegungstyp Fließen. . . . .	42

4.22	Prinzipskizze zum Fließen/Kriechen. . . . .	43
4.23	Landschaftsmorphologie durch Kriechen. . . . .	44
4.24	Solifluktionerscheinung Wulstgirlanden. . . . .	44
4.25	Beispiel für komplexe Rutschbewegung. . . . .	45
4.26	Beispiel für eine zusammengesetzte Rutschbewegung. . . . .	45
4.27	Wirkung und Geschwindigkeiten von Regentropfen. . . . .	48
4.28	Relative Veränderung des Bodenabtrags durch Regen in Abhängigkeit von Bodenbedeckung und ihrer Entfernung zur Bodenoberfläche. . . . .	48
4.29	Spüldenudation in Südtirol. . . . .	49
5.1	Einteilung der Bodenarten. . . . .	55
5.2	Beziehungen zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei Sand-, Schluff- und Tonböden. . . . .	57
5.3	Kräfte im Boden . . . . .	60
5.4	Effekte der Scheinkohäsion. . . . .	62
5.5	Zustandsgrenzen nach Atterberg. . . . .	65
6.1	Abhängigkeit der Nettophotosynthese von der Beleuchtungsstärke. . . . .	71
6.2	Stoffumsatz einer Pflanze in Abhängigkeit der Temperatur. . . . .	73
6.3	Allelopathie durch Juglon bei <i>Juglans regia</i> . . . . .	74
6.4	Vegetation und Wasser. . . . .	77
6.5	Böschungsbrüche mit abgebrochenen und mit ausgezogen Pflanzen. . . . .	80
6.6	Der Effekt des Baumgewichtes auf die Hangstabilität in Abhängigkeit des Hangneigungswinkels. . . . .	82
6.7	Polarität austreibender Weidenzweige. . . . .	84
6.8	Schutz der Bodenoberfläche durch Vegetation. . . . .	87
6.9	Säbelwuchs als Reaktion auf Schneebewegungen. . . . .	88
6.10	Säbelartige Wuchsform von Grünerlenbüschen als Reaktion auf Schneedruck. . . . .	89
6.11	Bogenwuchs als Reaktion auf Kriechbewegungen. . . . .	89
6.12	Schematische Abbildung einer einfachen bzw. multiplen rückschreitenden Rotationsrutschung und Darstellung der dabei entstehenden Baumstellun- gen und Wuchsformen. . . . .	90
6.13	Schwankungsbereich von ökologischen Amplituden an drei Beispielen. . . . .	91
7.1	Übersicht Salzburg. . . . .	94
7.2	Gemeindegebiet Taxenbach. . . . .	94

7.3	Trattenbach. . . . .	94
7.4	Foto vom Trattenbach. . . . .	94
7.5	Einfluß von Weide- und Forstwirtschaft ersichtlich. Mähwiese im Vordergrund, darüber Weidelandstreifen, weiter oben eine Aufforstung. . . . .	95
7.6	Schiefriges Muttermaterial, freigelegt durch eine Rutschung. . . . .	95
7.7	Klimadiagramm Saalbach. . . . .	96
7.8	Klimadiagramm Schmittenhöhe. . . . .	96
8.1	Themenkarte als Behelf für Aufnahme und Voruntersuchung. . . . .	97
8.2	Schwarz-Weiss- und Farb-Infrarot-Luftbilder. . . . .	98
8.3	Geologische Karte des Untersuchungsgebietes. . . . .	99
8.4	Ausmaße von Rutschungen. . . . .	101
8.5	Lage des Rutschanrisses. . . . .	102
9.1	Teilgebiete. . . . .	106
9.2	Geschiebesperre unterhalb des Zusammenflusses von Maderbach und Trattenbach. . . . .	107
9.3	Teilgebiet <i>NSL</i> . . . . .	108
9.4	Teilgebiet <i>NSL</i> . . . . .	108
9.5	Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets <i>NSL</i> . . . . .	109
9.6	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSL</i> . . .	110
9.7	Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSL</i> . . .	111
9.8	Probennahme vom Boden des Standorts <i>NSL</i> . . . . .	112
9.9	Schäden an der Forststraße oberhalb <i>NSL 2</i> . . . . .	113
9.10	Standort <i>NSR 1</i> . . . . .	114
9.11	Standort <i>NSR 2</i> und Übersicht über die Standorte <i>NSR 3</i> bis <i>NSR 7</i> . . .	115
9.12	Gesamthang <i>NSR 7</i> und Grabenerosion. . . . .	116
9.13	Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . . . .	117
9.14	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	118
9.15	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	119
9.16	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	120
9.17	Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	121
9.18	Bodenprofil des Standorts <i>NSR 4</i> . . . . .	121
9.19	Rutschung <i>NSR 4</i> . . . . .	122
9.20	Rutschung <i>NSR 4</i> Kahlschlag und kleine Mure. . . . .	123

9.21	Rutschung bei und Schäden an der Forststraße oberhalb <i>NSL 7</i> . . . . .	124
9.22	Rutschung bei und Schäden an der Forststraße oberhalb <i>NSL 7</i> . . . . .	124
9.23	Teilgebiet <i>ET</i> . . . . .	126
9.24	Teilgebiet <i>ET</i> . Übersicht der Standorte <i>ET 5 bis ET 8</i> . . . . .	126
9.25	Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets <i>ET</i> : <i>ET 1 bis ET 6</i> . . . . .	127
9.26	Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets <i>ET</i> : <i>ET 7 und ET 8</i> . . . . .	128
9.27	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>ET</i> . . .	129
9.28	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	130
9.29	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	131
9.30	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>NSR</i> . . .	132
9.31	Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets <i>ET</i> . . .	133
9.32	Bodenprofile der Standorte <i>ET</i> . . . . .	134
9.33	Rissbildung und Gleitschollen der Rutschung <i>ET 1</i> . . . . .	135
9.34	Nässesituation der Rutschung <i>ET 1</i> . . . . .	135
9.35	Auswirkung des Schneedrucks auf die Blaikenentwicklung bei Standort <i>ET</i> . . .	136
9.36	Teilgebiet <i>Z</i> . . . . .	137
9.37	Skizzen zu den Rutschungen des Teilgebiets <i>Z</i> . . . . .	138
9.38	Geomorphologische Darstellung der Rutschungen des Teilgebiets <i>Z</i> . . . .	139
9.39	Auswertung von Zeigerpflanzen der Rutschungen des Teilgebiets <i>Z</i> . . . .	140
9.40	Bodenprofil des Standorts <i>Z 2</i> . . . . .	141
9.41	Forststraße und stehende Wasserbereiche am Standort <i>Z</i> . . . . .	142
9.42	Ablagerung einer Hangmure und Anriss im Erlenwald bei Standort <i>Z</i> . . .	142
A.1	Blockbild einer komplexen Massenbewegung, die sich aus einer Rotations- rutschung und einem Schuttstrom zusammensetzt. . . . .	166
A.2	Aufnahmeformular . . . . .	167
A.3	Pflanzenliste . . . . .	173

## Tabellenverzeichnis

4.1	Einteilung von Böschungen nach ihrer Neigung. . . . .	12
4.7	Faktoren, die Massenbewegungen von Böden beeinflussen. . . . .	23
4.8	Beispiele für auslösende oder episodisch wirkende Faktoren. . . . .	24
4.9	Typische maximale Hangneigungen von verfestigtem Material. . . . .	25
4.10	Klassifikation von Massenbewegungen. . . . .	27
4.11	Arten von Gleitprozessen (exkl. Blockdriften). . . . .	29
4.12	Klassifikation nach Aktivität. . . . .	30
4.13	Klassifikation nach Tiefe der Gleitfläche. . . . .	30
4.14	Morphologische Merkmale einer Rotationsrutschung. . . . .	32
4.15	Morphologische Merkmale einer Translationsrutschung. . . . .	36
4.16	Gleitflächen von Translationsrutschungen. . . . .	36
4.17	Fallgeschwindigkeit und kinematische Energie von Regentropfen. . . . .	47
5.1	Einteilung und Bezeichnung der Korn-Fraktionen. . . . .	54
5.3	Bindungsarten und -kräfte in Böden. . . . .	63
5.4	Wichtige Bodeneigenschaften für die Stabilitäts-Analyse. . . . .	64
5.5	Bestimmung der Bodenart durch die Fingerprobe. . . . .	67
6.1	Wirkungen von Pflanzen in hydrologischer und bodenmechanischer Hinsicht. . . . .	75
8.1	Übersicht Aufnahmeparameter. . . . .	100
9.1	Auflistung der Teilgebiete. . . . .	105
9.2	Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet <i>NSL</i> . . . . .	107
9.3	Vergleich geomorph. Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes <i>NSL</i> . . . . .	109
9.4	Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet <i>NSR</i> . . . . .	114
9.5	Vergleich geomorph. Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes <i>NSR</i> . . . . .	116
9.6	Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet <i>Z</i> . . . . .	125
9.7	Vergleich geomorph. Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes <i>ET</i> . . . . .	125

9.8	Übersicht der Rutschungen im Teilgebiet Z. . . . .	137
9.9	Vergleich geomorph. Merkmale der Rutschungen des Teilgebietes Z. . . .	138
9.10	Auffistung der untersuchten Rutschungen. . . . .	144
9.11	Vergleich geomorphologischer Merkmale der aufgenommenen Rutschungen.	145
9.12	Feuchteverhältnisse: Vergleich von verbaler Einstufung und Zeigerwertverteilung. . . . .	146

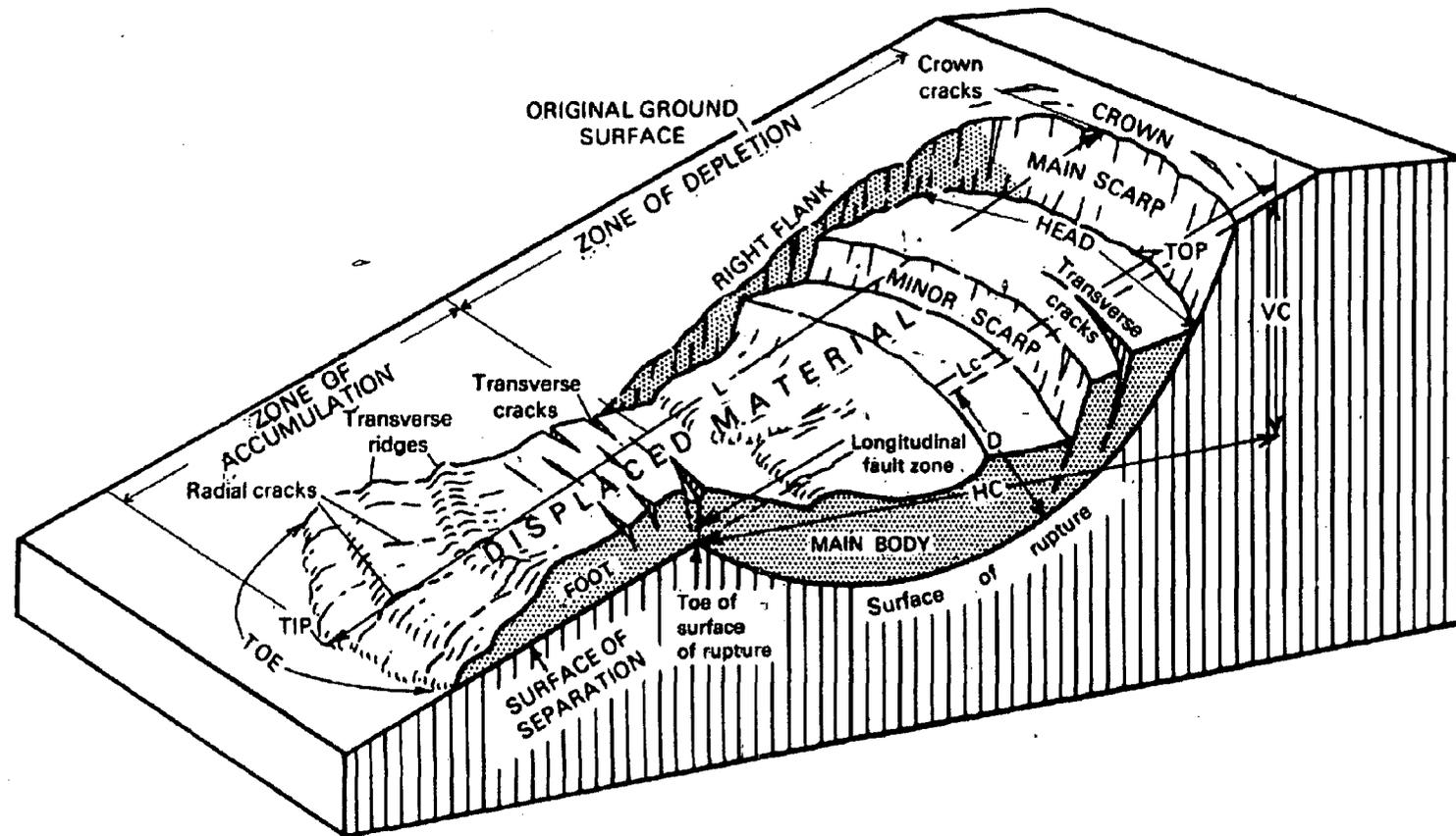


Abbildung A.1: Blockbild einer komplexen Massenbewegung, die sich aus einer Rotationsrutschung und einem Schuttstrom zusammensetzt (Original mit englischer Bezeichnung). (VARNES, 1978)

## Aufnahmeformular

### Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen

#### 1 Grunddaten und Messungen

1.1 Standort: _____	1.2 Kennzahl: _____
1.3 Aufgenommen durch: _____	1.4 Datum: _____
1.5 Wetter: _____	1.6 Höhe: _____
Vortage: _____	gemessen: _____
1.7 Lokalisierung: Koord.: _____	1.8 Exposition: _____
1.9 Neigung: Rutschhang: _____	ursprüngl. Neigung: oberhalb: _____
(Orte der Messung in Skizze eintragen)	Rutschfläche: _____
	unterhalb: _____

1.10 Ausmaß der Rutschfläche:

	Länge L	Breite B	Fläche	Mächtigkeit D	Volumen
maximal	_____				
gemittelt	_____				

1.11 Technische / forstliche / ingenieurbiologische Maßnahmen: \_\_\_\_\_

#### 2 Angaben zum Hang

2.1 Hydrologie (Merkmale in Skizze eintragen)

Flächenmerkmale:

<input type="checkbox"/> trocken	punktuell ...	<input type="checkbox"/> flächig...
<input type="checkbox"/> mesisch <input type="checkbox"/> wechselnd	<input type="checkbox"/> temporär vernässt	<input type="checkbox"/> temporär vernässt
<input type="checkbox"/> feucht	<input type="checkbox"/> dauernd vernässt	<input type="checkbox"/> dauernd vernässt

Quellwasseraustritte:     ja (Skizze)     nein

Versickerungsstellen:     ja (Skizze)     nein

Nässezeiger:     ja (Skizze)     nein    Arten: \_\_\_\_\_

Verdichtungszeiger:     ja (Skizze)     nein    Arten: \_\_\_\_\_

Hangwassereinfluß:     groß     mäßig     unbedeutend     nicht eindeutig bestimmbar

Anmerkungen: \_\_\_\_\_

## 2.2 Geomorphologie

### 2.21 Geländeform:

Makrorelief:  Oberhang  Mittelhang  Unterhang  Kuppe  Mulde, Kessel  
 Ebene  Plateau  Talboden  Wanne  Graben  
 Schwemm-, Schuttfächer  Schwemm-, Schuttkegel

Längenprofil: Regelmässigkeit:  gleichförmig  unregelmässig  
Krümmung:  konvex  konkav  gestreckt  
Wölbung markant:  ja  nein

Querprofil: Regelmässigkeit:  gleichförmig  unregelmässig  
Krümmung:  konvex  konkav  gestreckt  
Wölbung markant:  ja  nein

Mikrorelief:  gleichförmig  unregelmässig

2.22 Lage Rutschanriss:  Oberhang zurückgreifend  Oberhang nicht zurückgreifend  
 Fuß Felswand  Mittelhang  
 Hangfuß Bach  Hangfuß Ebene  Hangfuß Felswand

2.3 Vegetation/Nutzung  Wald  Erlengebüsch  Wiese  Zwergstrauchheiden  
 Fels  Erosionsflächen  andere: \_\_\_\_\_  
 Weide:  aktuelle Weide  nicht aktuelle Weide  
 intensiv  extensiv

---

---

## 3 Angaben zur bewegten Fläche

3.1 Wasserführung (Merkmale in Skizzen Aufsicht / Längsprofil eintragen)

Menge:  keine  keine, aber Merkmale erkennbar (Rinnen etc.)  wenig  viel

Art:  konzentriert  diffus

Ort:  im Lockermaterial  auf Felsoberfläche  auf Fels

Bemerkungen: \_\_\_\_\_

3.2 Geologie Festgestein Geologie gemäss GIS: \_\_\_\_\_

Geologie im Gelände: \_\_\_\_\_  aufgeschlossen  nicht aufgeschlossen

Interpretation Schichten: \_\_\_\_\_

Weiteres Fallwinkel: \_\_\_\_\_ Fallazimut: \_\_\_\_\_

Bemerkungen: \_\_\_\_\_

Potionell ungünstige Geologie: \_\_\_\_\_

3.3 Mechanismus der Bewegung

3.31 Anbruchsform:  Muschelanbruch  Blattanbruch  Feilenbruch  Keilanbruch

3.32 Anbruchzone: Höhe: \_\_\_\_\_  Wasseraustritte / Quellen

konkav  unregelmässig  Zugrisse  rückschreitendes Abbrechen

- 3.33 Rutschkörper:     Doppelgrate         Nackentälchen     Seitenwülste         Druckwülste  
                          Längsrisse         Querrisse         Querspalten         bewegte Objekte  
                          Gleitschollen     Schlammeeinlagerungen     Vernässungen  
Baumstellung:     zum Hang hin         vom Hang weg         in alle Richtungen  
    gekrümmt             geknickt             liegend  
Vegetationmuster: \_\_\_\_\_

- 3.34 Art der Bewegung:     Rotationsrutschung:                             einfach     multipel     sukzessiv  
                                  Translationsrutschung  
                                  Erdfließen  
                                  Erdkriechen  
                                  Bodenkriechen  
                                  Spüldenudation  
                                  Kombination mehrerer Prozesse  
                                  nicht eindeutig zuzuordnen / andere: \_\_\_\_\_

3.35 Anmerkungen zur Bewegung:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

- 3.4 Ort der Gleitfläche:     innerhalb Oberboden / Lockermaterial  
                                  Grenze Lockermaterial / Fels  
                                  im aufgelockerten Fels  
                                  andere:

Material oberhalb Gleitfläche: \_\_\_\_\_

Material unterhalb Gleitfläche: \_\_\_\_\_

- nicht bestimmbar

Anmerkungen: \_\_\_\_\_

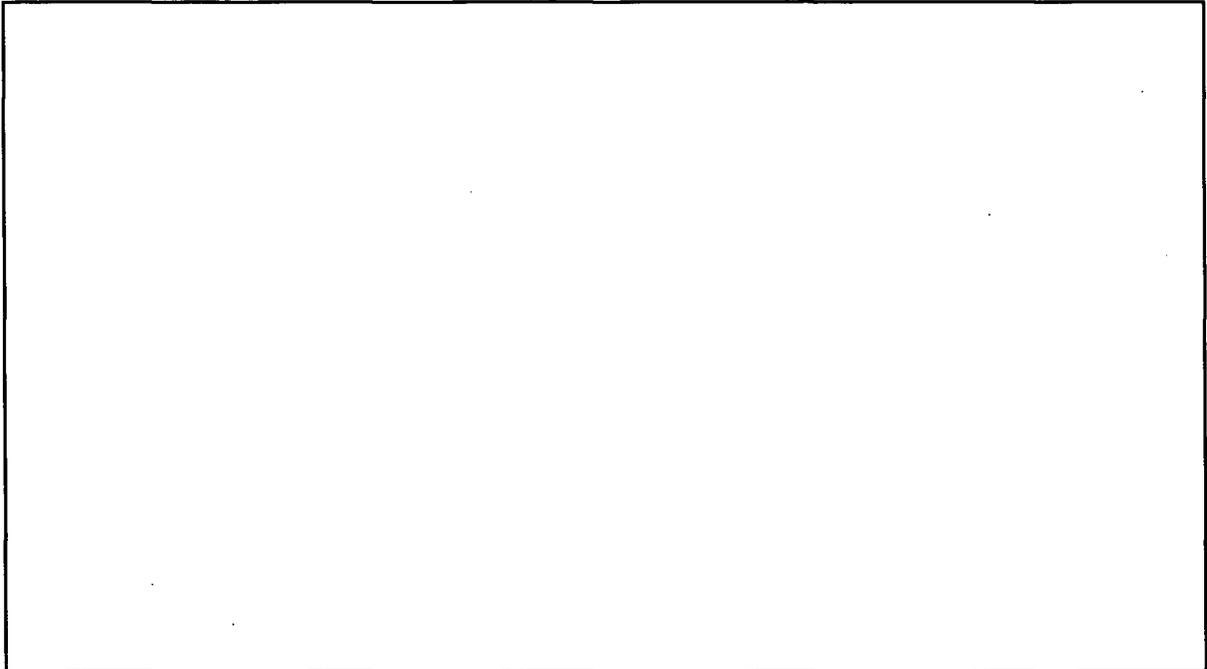
- 3.5 Erkennbare Beeinflussung:     keine     sonstige Auflast  
                                  progressive Rutschaktivität                     künstliche Wasserzufuhr  
                                  Einschnitt (Bsp. Strasse)                     Hangfußerosion  
                                  Schüttung (Bsp. Straße)                     andere:



## 6 Skizzen

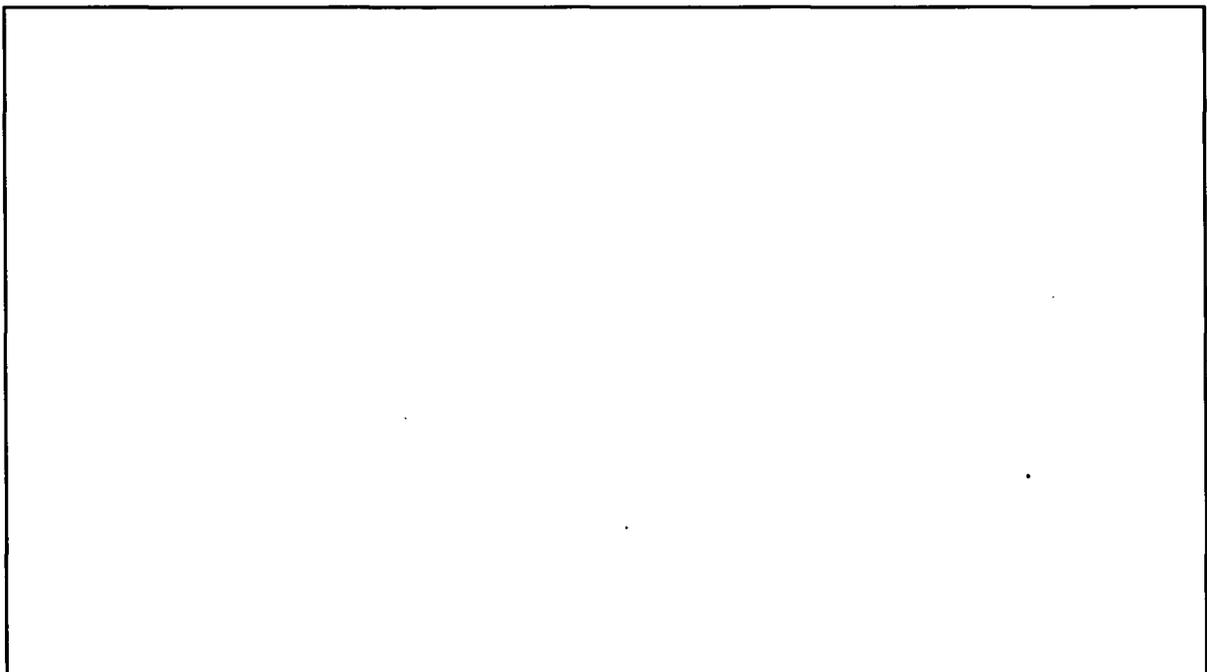
### 6.1 Aufsicht

Umrisse der bewegten Fläche, hydrologische Verhältnisse, Bestandesgrenzen, Orte der Messungen, Profilaufnahmen und Probenaufnahmen sowie Fotostandorte.



### 6.2 Längenprofil

Angaben über den Geländeverlauf vor und nach der Bewegung, dem mutmaßlichen Verlauf des anstehenden Felsens, den Neigungsverhältnissen oberhalb und unterhalb der bewegten Fläche



## 7 Bodenprofil

7.1 Bodentyp: \_\_\_\_\_

7.2 pH-Wert: \_\_\_\_\_

7.3 Aufschlußart:  Profil

7.4 Wechsel Geologie / Substrat:  Bohrkern

H...Horizont BA...Bodenart

0 cm	H	BA
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
120		
140		
160		

kein Wechsel  Textur-, Strukturwechsel

Gesteinswechsel  begraben

7.5 Hydromorphie: Horizont: \_\_\_\_\_

keine  Konkretion schwarz

Diffus-Rostflecken  Kontrast-Rostflecken

Buntfärbung  Fahl-Rot-Färbung (Marmorierung)

Nassbleichung  Reduktionsfarben (grau/blau/grün)

7.6 Vernässung durch:

Hangwasser  Grundwasser  Stauwasser

7.7 Aktuelle Bodenfeuchte:

trocken  frisch  feucht  nass  gesättigt

7.8 Makroporen (innerhalb der Aggregate):

keine  fein  mittel  grob

7.9 Risse / Hohlräume (außerhalb der Aggregate):

keine  fein  mittel  grob

7.10 Karbonat (Reaktion mit HCl):

kein Aufbrausen  schwaches Aufbr. (hörbar)

mittleres Aufbr. (schäumend)  starkes Aufbr. (stark schäumend)

7.11 Limite Wurzelraum:

offen  limitiert durch Verdichtung

limitiert durch Fels  limitiert durch Vernässung

7.12 Anmerkungen:

---



---



---

Hangbezogene Pflanzenliste Felderhebungen Trattenbachtal 2005/2006

Name		Hang	Zeigerwerte nach Landolt				
botanisch	deutsch		F1	F2	F3	F4	D5

		F1	F2	F3	F4	D5
Agrostis stolonifera	Kriechendes Straußgras				w	
Ajuga reptans	Kriechender Günsel					
Alnus incana	Grau-Erle				↑w	
Alnus viridis	Grünerle				w	
Alopecurus sylvestris	Wiesen-Fuchsschwanz					
Arrhenatherum elatius	Französisches Raygras					
Athyrium filix-femina	Wald-Frauenfarn					
Carex brizoides	Zittergrassegge				w	
Carex leporina	Hasenpfoten-Segge			w		
Corylus avellana	Gewöhnliche Haselnuss					
Festuca rubra	Rotschwengel					
Fragaria vesca	Walderdbeere					
Gymnocarpium dryopteris	Eichenfarn					
Hieracium umbellatum	Doldiges Habichtskraut					
Homogyne alpina	Alpenlattich					
Juncus effusus	Flatterbinse				w	
Luzula luzuloides	Busch-Hainsimse					
Luzula pilosa	Haar-Hainsimse					
Maianthemum bifolium	Zweiblättrige Schattenblume					
Myosotis scorpioides	Sumpf-Vergissmeinnicht				w	
Paris quadrifolia	Vierblättrige Einbeere					
Petasites albus	Weißer Pestwurz				w	
Picea abies	Gemeine Fichte					
Poa trivialis	Gemeines Rispengras				w	
Polystichum acelatatum	Gelappter Schildfarn					
Rubus idaeus	Himbeere					
Salix caprea	Sal-Weide				w	
Sambucus racemosa	Traubenholunder					
Senecio fuchsii	Fuchsgreiskraut					
Solidago virga-aurea	Echte Goldrute					
Sorbus aucuparia	Gewöhnliche Eberesche					
Trifolium hybridum	Schwedischen-Klee					
Urtica dioica	Große Brennnessel				w	
Veronica officinalis	Echter Ehrenpreis					

Z1

- F1... ausgesproche Trockenheitszeiger
- F2... Zeiger mäßiger Trockenheit
- F3... Zeiger mittlerer ("nicht extremer", +/- "frischer") Feuchtigkeitsverhältnisse
- F4... Feuchtigkeitszeiger
- F5... Nässezeiger
- D5... Durchlüftungsmangelzahl
- w... auf Böden mit wechselnder Feuchtigkeit
- ↑... Pflanzen im Bereich von fließendem Bodenwasser

Hangbezogene Pflanzenliste Felderhebungen Trattenbachtal 2005/2006

		F1	F2	F3	F4	D5
Agrostis stolonifera	Kriechendes Straußgras				W	
Alnus incana	Grau-Erle				W	
Alnus viridis	Grünerle				W	
Alopecurus sylvestris	Wiesen-Fuchsschwanz				W	
Angelica sylvestris	Wilde Brustwurz				W	
Arrhenatherum elatius	Französisches Raygras					
Athyrium filix-femina	Wald-Frauenfarn					
Avellana flexuosa	Drahtschmiele					
Carex brizoides	Zittergrassegge				W	
Carex leporina	Hasenpfoten-Segge			W		
Corylus avellana	Gewöhnliche Haselnuss					
Dactylis glomerata	Knäuelgras					
Epilobium montanum	Berg-Weidenröschen					
Equisetum sylvaticum	Wald-Schachtelhalm				W	
Fragaria vesca	Walderdbeere					
Geranium robertianum	Gemeiner Storchschnabel					
Gymnocarpium dryopteris	Eichenfarn					
Hieracium umbellatum	Doldiges Habichtskraut					
Juncus alpinoarticulatus	Alpen-Binse				W	
Juncus effusus	Flatterbinse				W	
Luzula luzuloides	Busch-Hainsimse					
Luzula pilosa	Haar-Hainsimse					
Lysimachia nemorum	Wald-Gilbweiderich				W	
Mycelis muralis	Mauerlattich					
Myosotis scorpioides	Sumpf-Vergissmeinnicht				W	
Petasites albus	Weißer Pestwurz				W	
Picea abies	Gemeine Fichte					
Pleurosperum austriacum	Österreichischer Rippensamen				W	
Poa trivialis	Gemeines Rispengras					
Polystichum acclatum	Gelappter Schildfarn					
Potentilla reptans	Kriechendes Fingerkraut					
Ranunculus nemorosus	Hain-Hahnenfuß					
Rubus idaeus	Himbeere					
Salix caprea	Sal-Weide				W	
Sambucus racemosa	Traubenholunder					
Senecio fuchsii	Fuchsgreiskraut					
Sorbus aucuparia	Gewöhnliche Eberesche					
Stellaria nemorum	Hain-Sternmiere					
Trifolium hybridum	Schwedischen-Klee					
Urtica dioica	Große Brennnessel				W	
Veronica montana	Berg-Ehrenpreis				W	

72

Hangbezogene Pflanzenliste Felderhebungen Trattenbachtal 2005/2006

		F1	F2	F3	F4	F5	D5
Agrostis stolonifera	Kriechendes Straußgras				W		
Alnus incana	Grau-Erle				1W		
Alnus viridis	Grünerle				W		
Alopecurus sylvestris	Wiesen-Fuchsschwanz						
Angelica sylvestris	Wilde Brustwurz				W		
Arrhenatherum elatius	Französisches Raygras						
Athyrium filix-femina	Wald-Frauenfarn						
Avellana flexuosa	Drahtschmiele						
Carex leporina	Hasenpfoten-Segge				W		
Corylus avellana	Gewöhnliche Haselnuss						
Epilobium montanum	Berg-Weidenröschen						
Equisetum sylvaticum	Wald-Schachtelhalm				W		
Festuca rubra	Rotschwengel						
Fragaria vesca	Walderdbeere						
Gymnocarpium dryopteris	Eichenfarn						
Hieracium sylvaticum	Wald-Habichtskraut						
Hieracium umbellatum	Doldiges Habichtskraut						
Juncus alpinoarticulatus	Alpen-Binse				W		
Juncus effusus	Flatterbinse				W		
Luzula luzuloides	Busch-Hainsimse						
Lysimachia nemorum	Wald-Gilbweiderich				W		
Maianthemum bifolium	Zweiblättrige Schattenblume						
Myosotis scorpioides	Sumpf-Vergissmeinnicht				W		
Petasites albus	Weißer Pestwurz				W		
Picea abies	Gemeine Fichte						
Pleurosporum austriacum	Österreichischer Rippensamen				W		
Poa trivialis	Gemeines Rispengras				W		
Pohlia nutans	Nickendes Pohlmoos						
Polystichum acclatum	Gelappter Schildfarn						
Rubus idaeus	Himbeere						
Rumex alpestris	Berg-Sauerampfer						
Rumex hydrolapathum	Fluss-Ampfer						
Salix aurita	Ohrweide						
Salix caprea	Sal-Weide				W		
Sambucus racemosa	Traubenholunder						
Senecio fuchsii	Fuchsgreiskraut						
Sorbus aucuparia	Gewöhnliche Eberesche						
Stellaria nemorum	Hain-Sternmiere						
Trifolium hybridum	Schwedischen-Klee						
Urtica dioica	Große Brennnessel				W		
Veronica montana	Berg-Ehrenpreis				W		
Veronica officinalis	Echter Ehrenpreis						

Z3

Hangbezogene Pflanzenliste Felderhebungen Trattenbachtal 2005/2006

		F1	F2	F3	F4	D5
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn			W		
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe					
<i>Achillea roseoalba</i>	Hellrosafarbene Schafgarbe					
<i>Agrostis stolonifera</i>	Kriechendes Straußgras				W	
<i>Alchemilla incisa</i>	Eingeschnittener Frauenmantel					
<i>Alnus incana</i>	Grau-Erle				fW	
<i>Alnus viridis</i>	Grünerle				W	
<i>Athyrium filix-femina</i>	Wald-Frauenfarne					
<i>Carduus personata</i>	Kletten-Distel					
<i>Epilobium angustifolium</i>	Wald-Weidenröschen					
<i>Epilobium parviflorum</i>	Kleinblütiges Weidenröschen				W	
<i>Equisetum sylvaticum</i>	Wald-Schachtelhalm				W	
<i>Fragaria vesca</i>	Walderdbeere					
<i>Hieracium schmidtii</i>	Blasses Habichtskraut					
<i>Hieracium umbellatum</i>	Doldiges Habichtskraut					
<i>Lamium album</i>	Weißes Taubnessel					
<i>Leucanthemum adustum</i>	Berg-Margerite			W		
<i>Lysimachia nemorum</i>	Wald-Gilbweiderich				W	
<i>Petasites albus</i>	Weißes Pestwurz				W	
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte					
<i>Polystichum acclatum</i>	Gelappter Schildfarn					
<i>Prunella vulgaris</i>	Gemeine Brunelle					
<i>Ranunculus nemorosus</i>	Hain-Hahnenfuß				W	
<i>Rinanthus minor</i>	Kleiner Klappertopf				W	
<i>Salix caprea</i>	Sal-Weide				W	
<i>Salix purpurea</i>	Purpurweide				W	
<i>Salvia glutinosa</i>	Klebriger Salbei					
<i>Senecio fuchsii</i>	Fuchsgreiskraut					
<i>Urtica dioica</i>	Große Brennnessel				W	
<i>Veronica montana</i>	Berg-Ehrenpreis				W	
		NSL1 NSL2				
<i>Avellana flexuosa</i>	Drahtschmiele					
<i>Equisetum sylvaticum</i>	Wald-Schachtelhalm				W	
<i>Geranium robertianum</i>	Gemeiner Storchschnabel					
<i>Lysimachia nemorum</i>	Wald-Gilbweiderich				W	
<i>Myosotis scorpioides</i>	Sumpf-Vergissmeinnicht				W	
<i>Petasites albus</i>	Weißes Pestwurz				W	
<i>Salix aurita</i>	Ohrweide					
<i>Senecio fuchsii</i>	Fuchsgreiskraut					
		NSL3				
<i>Alnus incana</i>	Grau-Erle				W	
<i>Alnus viridis</i>	Grünerle				W	
<i>Capsela bursa-pastoris</i>	Gemeines Hirtentäschchen					
<i>Hieracium umbellatum</i>	Doldiges Habichtskraut					
<i>Petasites albus</i>	Weißes Pestwurz				W	
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte					
<i>Polystichum acclatum</i>	Gelappter Schildfarn					
<i>Rubus idaeus</i>	Himbeere					
<i>Salix caprea</i>	Sal-Weide				W	
<i>Sorbus aucuparia</i>	Gewöhnliche Eberesche					
<i>Viola palustris</i>	Sumpf-Veilchen				W	
		NSR				

Hangbezogene Pflanzenliste Felderhebungen Trattenbachtal 2005/2006

		F1	F2	F3	F4	D5
<i>Aconitum napellus</i> ssp. <i>vulgare</i>	Blauer Eisenhut				■	
<i>Alchemilla fissa</i>	Kahler Frauenmantel				■	
<i>Anthriscus sylvestris</i>	Wiesenkerbel			■		
<i>Carex nigra</i>	Wiesensegge				W	
<i>Carex paniculata</i>	Rispensegge					■
<i>Dactylorhiza fuchsii</i>	Geflecktes Knabenkraut			■		
<i>Luzula sylvatica</i>	Wald-Hainsimse					
<i>Petasites albus</i>	Weißer Pestwurz				W	
<i>Rumex acetosa</i>	Wiesenampfer			■		
<i>Rumex alpinus</i>	Alpenampfer					
<i>Veratrum album</i>	Weißer Germer					■
		ET1				
<i>Alchemilla fissa</i>	Kahler Frauenmantel				■	
<i>Calluna vulgaris</i>	Besenheide				■	
<i>Carex nigra</i>	Wiesensegge				W	
<i>Carex paniculata</i>	Rispensegge					■
<i>Dactylorhiza fuchsii</i>	Geflecktes Knabenkraut			■		
<i>Luzula luzuloides</i>	Busch-Hainsimse					
<i>Silene vulgaris</i>	Gemeines Leimkraut					
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Heidelbeere					
		ET2 ET3 ET4				
<i>Achillea millefolium</i>	Gemeine Schafgarbe				■	
<i>Aconitum napellus</i> ssp. <i>vulgare</i>	Blauer Eisenhut				■	
<i>Agrostis capillaris</i>	Haar-Straußgras				■	
<i>Alnus viridis</i>	Grünerle				W	
<i>Arnica montana</i>	Arnika			■		
<i>Blechnum spicant</i>	Rippenfarn					■
<i>Briza media</i>	gemeines Zittergras			■		
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Tresse					
<i>Calluna vulgaris</i>	Besenheide					
<i>Dactylis glomerata</i>	Knäuelgras					
<i>Epilobium angustifolium</i>	Wald-Weidenröschen					
<i>Epilobium parviflorum</i>	Kleinblütiges Weidenröschen				W	
<i>Festuca pratensis</i>	Wiesen-Schwingel					
<i>Festuca rubra</i>	Rotschwingel					
<i>Hypericum perforatum</i>	Gemeines Johanniskraut			■		
<i>Lycopodiella inundata</i>	Moor-Bärlapp					■
<i>Oxalis acetosella</i>	Gemeiner Sauerklee					
<i>Phleum pratense</i>	Gewöhnliches Wiesen-Lieschgras					
<i>Phyteuma betonicifolium</i>	Betonienblättrige Rapunzel					
<i>Picea abies</i>	Gemeine Fichte					
<i>Potentilla reptans</i>	Kriechendes Fingerkraut				W	
<i>Pteridium aquilinum</i>	Adlerfarn					
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	Rostblättrige Alpenrose					
<i>Rubus idaeus</i>	Himbeere					
<i>Rumex alpestris</i> (R. <i>arifolius</i> )	Berg-Sauerampfer					
<i>Senecio fuchsii</i>	Fuchsgreiskraut					
<i>Silene vulgaris</i>	Gemeines Leimkraut					
<i>Trifolium hybridum</i>	Schwedischen-Klee					
<i>Trifolium medium</i>	Mittlerer Klee					
<i>Trifolium repens</i>	Kriechender Klee				W	
<i>Vaccinium myrtillus</i>	Heidelbeer					
<i>Vaccinium uliginosum</i>	Rauschbeere					
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	Preiselbeere					
<i>Veratrum album</i>	Weißer Germer					■
		ET5-8				