

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Entwicklung eines Decision-Support-Systems zur  
Generierung einer zuverlässigen, lokalmaßstäblichen  
Gefahrenbeurteilung potentieller Hangmurbereiche

von

Friederike Meyer  
aus Kassel

Von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der  
Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Ing. Markus Disse  
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Conrad Boley  
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Rafiq Azzam,  
RWTH Aachen

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Oktober 2010

Neubiberg, den 08.02.2011

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in die Thematik</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.1	Gefahr und Risiko	4
1.3	Zielsetzung	5
1.4	Methodik	6
<b>2</b>	<b>Einführung in den Forschungsstand Massenbewegungen</b>	<b>9</b>
2.1	Definition und Klassifizierung von Massenbewegungen im alpinen Raum	9
2.2	Gleitbewegung	12
	2.2.1 <i>Rutschung</i>	12
	2.2.1.1 <i>Rotationsrutschung</i>	13
	2.2.1.2 <i>Translationsrutschung</i>	14
2.3	Fließbewegung	15
	2.3.1 <i>Erd- und Schuttgang</i>	16
	2.3.2 <i>Murgang im weiteren Sinne</i>	16
	2.3.2.1 <i>Talmure</i>	18
	2.3.2.2 <i>Hangmure</i>	19
2.4	Ursachen von Hanginstabilität – die zentrale Rolle des Wassers	22
	2.4.1 <i>Interne Ursachen</i>	23
	2.4.2 <i>Externe Ursachen</i>	28
<b>3</b>	<b>Einführung in die instrumentelle Gefährdungsanalyse</b>	<b>29</b>
3.1	Geoinformationssysteme (GIS)	29
3.2	Decision-Support-Systeme (DSS)	30
3.3	Mangelnde Genauigkeit von GIS - Lücke für DSS	35
<b>4</b>	<b>Hangmurauslösende Faktoren - Generierung der DSS-Wissensbasis</b>	<b>38</b>
4.1	Problematik exakter Wissensbasen	38
	4.1.1 <i>Heterogene Geologie</i>	38
	4.1.2 <i>Datenauswahl und -menge</i>	38
	4.1.3 <i>Fehlerbehaftete Daten</i>	39
4.2	Wissensbasis für Hangmuren	40
4.3	Faktor Hangneigung	43
	4.3.1 <i>Einfluss der Höhenlage</i>	44
	4.3.2 <i>Einfluss Geologie</i>	46
	4.3.3 <i>Einfluss geotechnischer Parameter der Hangauflage</i>	47

4.3.4	<i>Einfluss der Vegetation</i>	48
4.3.5	<i>Einfluss der Morphologie</i>	48
4.3.6	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	49
4.4	Faktor Höhenlage	49
4.4.1	<i>Einfluss des Niederschlags</i>	50
4.4.2	<i>Einfluss geotechnischer Parameter der Hangauflage</i>	51
4.4.3	<i>Einfluss der Vegetation</i>	51
4.4.4	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	52
4.5	Faktor Hangmorphologie	52
4.5.1	<i>Einfluss planarer Längsprofile</i>	54
4.5.2	<i>Einfluss konvexer Längsprofile</i>	56
4.5.3	<i>Einfluss konkaver Längsprofile</i>	58
4.5.5	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	59
4.6	Faktor Exposition	59
4.6.1	<i>Einfluss S- bzw. SE-exponierter Hanglagen</i>	60
4.6.2	<i>Einfluss N-exponierter Hanglagen</i>	61
4.6.3	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	62
4.7	Faktor Vegetation	62
4.7.1	<i>Einfluss von Gehölz</i>	66
4.7.2	<i>Einfluss von Wiesen- und Weideflächen</i>	69
4.7.3	<i>Rechnerischer Ansatz</i>	69
4.7.4	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	70
4.8	Faktor anthropogene Nutzung	71
4.8.1	<i>Einfluss der Bewirtschaftung von Almflächen</i>	72
4.8.1.1	<i>Bestoßung von Gebirgsweiden</i>	73
4.8.1.2	<i>Mähwiesen</i>	74
4.8.1.3	<i>Düngung</i>	74
4.8.2	<i>Einfluss des Skitourismus</i>	75
4.8.3	<i>Einfluss des Straßen- und Wegenetzes</i>	76
4.8.4	<i>Einfluss von Kahlschlag bzw. Rodung und Windwurf</i>	77
4.8.5	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	78
4.9	Faktor Schrumpfrissbildung	79
4.9.1	<i>Gefährdungspotential von Schrumpfrissen</i>	81
4.9.2	<i>Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS</i>	85

4.10	Faktor Oberflächenabfluss und Hydrologie	86
	4.10.1 Einfluss orographischer Einzugsgebiete	88
	4.10.2 Einfluss vernachlässigter Wassersysteme	89
	4.10.3 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS	90
4.11	Faktor geotechnische Parameter der Hangauflage	90
4.12	Faktor Klimawandel	93
	4.12.1 Alpine Klimaszenarien	93
	4.12.2 Zusammenfassende Bewertungskriterien für das DSS	95
<b>5</b>	<b>Generierung der DSS-Schlussfolgerungskomponente</b>	<b>97</b>
5.1	Aufbau der DSS-Schlussfolgerungskomponente	97
5.2	Entscheidungsebene I - Abschätzende Beurteilung	99
	5.2.1 Häufigkeitsverteilungen	100
	5.2.2 Wichtung des Gefährdungspotentials	104
5.3	Entscheidungsebene II - Quantitative Beurteilung	106
	5.3.1 Erkundungskonzept	107
	5.3.1.1 Einfluss des wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risikos	109
	5.3.1.2 Probennahme	110
	5.3.2 Bestimmung charakteristischer geotechnischer Kennwerte	111
	5.3.2.1 Reibungswinkel $\varphi'$	112
	5.3.2.2 Kohäsion $c'$	113
	5.3.2.3 Durchflusswirksames Porenvolumen $n_{eff}$	115
	5.3.2.4 Wichte $\gamma'$	118
	5.3.2.5 Sensitivitätsanalyse	119
	5.3.3 Berechnung der Hangstabilität	119
5.4	Entscheidungsebene III - Qualitative Beurteilung	121
	5.4.1 Gehölzarmierung	122
	5.4.1.1 Häufigkeitsverteilungen	123
	5.4.1.2 Gehölzzustand	125
	5.4.2 Geogen und anthropogen bedingte Erosionsprozesse	127
	5.4.2.1 Oberflächenabflussverhalten	127
	5.4.2.2 Rissstrukturen	129
	5.4.2.3 Morphologie	131
	5.4.3 Porenwasserüberdrucke aufgrund geogener und anthropogener Einflussnahme	131
5.5	Abschließende Gefährdungsbeurteilung	133
5.6	Berücksichtigung des Klimawandels	133

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>138</b>
<b>8</b>	<b>Anlagen</b>	<b>160</b>

## Abkürzungen

### a) Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$c'$	Effektive Kohäsion	kN/m <sup>2</sup>
$c_c$	Scheinbare Kohäsion	kN/m <sup>2</sup>
$c_u$	Scherfestigkeit (Kohäsion) des undrainierten Bodens	kN/m <sup>2</sup>
D	Dauer des Regenereignisses	h
d	Mächtigkeit der Hangauflage	m
$d_k$	Korndurchmesser	mm
g	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
H	Horizontalkraft	kN
$\Delta I$	Impulsänderung des Hangwassers	kg·m/s
$I_N$	Niederschlagsintensität	mm/h
$I_p$	Plastizitätsindex	-
k	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	m/s
$n_{eff}$	Effektiver Porengehalt des Bodens	-
P	Hydrostatischer Druck	kN/m <sup>2</sup>
U	Ungleichförmigkeitszahl	-
$S_r$	Sättigungsgrad	-
$v_w$	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
w	Wassergehalt	-

### b) Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\beta$	Hangneigung	°
$\gamma$	Wichte des adhäsiv feuchten Bodens	kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	Wichte des Bodens unter Auftrieb	kN/m <sup>3</sup>

$\gamma_d$	Wichte des trockenen Bodens	$\text{kN/m}^3$
$\gamma_w$	Wichte des Wassers	$\text{kN/m}^3$
$\eta$	Standsicherheitsgrad	-
$\rho_w$	Dichte des Wassers	$\text{kg/m}^3$
$\tau$	Scherfestigkeit des Lockergesteins	$\text{kN/m}^2$
$\sigma$	Zugfestigkeit	$\text{N/mm}^2$

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Zusammenhang zwischen den Begriffen *Risiko*, *Restrisiko* und *Grenzzisiko*
- Abb. 2:** Einteilungsprinzip gängiger Massenbewegungsformen nach Durchnässungsgrad und Geschwindigkeit des Bewegungsmaterials
- Abb. 3:** Grundtypen von Gleit- und raschen Fließbewegungen im alpinen Raum, erweitert um den Begriff *Spontane Rutschung*
- Abb. 4:** Bewegungszonen von Gleit- und Fließprozessen
- Abb. 5:** Translations- und Rotationsrutschung
- Abb. 6:** Murgang unter dem Einfluss starken Niederschlags
- Abb. 7:** Anrisszone einer Hangmure in Hang- und Verwitterungsschutt
- Abb. 8:** Gegenüberstellung in- und externer Ursachen und mittelbarer Faktoren, die zu Hanginstabilitäten führen können
- Abb. 9:** Bildung von Schwächezonen in der Hangauflage durch den Einfluss innerer Erosion
- Abb. 10:** Niederschlagsintensitäten des Alpenraums
- Abb. 11:** Hangsegment unter Einfluss hangparalleler Durchströmung
- Abb. 12:** Struktur eines Decision-Support-Systems
- Abb. 13:** Entwurf eines Decision-Support-Systems der ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN
- Abb. 14:** Aufbau der Wissensbasis des DSSs
- Abb. 15:** Empirische Dichte der Hangneigung mit Definition des primären und sekundären Gefährdungsbereiches
- Abb. 16:** Punktwolke aus 1052 Einzelereignissen aus DP 1, aufgetragen über Hangneigung und geodätischer Höhe
- Abb. 17:** Prozentuale Verteilung der Hangneigung, differenziert nach verschiedenen Höhenlagen
- Abb. 18:** Prozentuale Verteilung der Hangneigung unter Berücksichtigung verschiedener geologischer Einheiten mit Angabe des primären Gefährdungsbereiches
- Abb. 19:** Prozentuale Verteilung der Höhenlagen von Anrisszonen aus 15 Perimetern
- Abb. 20:** Kombination konkav, konvex und planar geneigter Längs- und Querprofile zu neun Morphologieklassen
- Abb. 21:** Häufigkeitsverteilungen der neun Morphologieklassen basierend auf DP 3
- Abb. 22:** Morphologiekategorie 6 unter dem Einfluss der Gewölbewirkung

- Abb. 23:** Morphologiekategorie 4 unter dem Einfluss der Kohäsionswirkung
- Abb. 24:** Entstehung einer Hangexplosion an einem Hang mit konvexem Längsprofil bei vorheriger erosiver Schwächung der Hangkante
- Abb. 25:** Morphologiekategorie 3 unter dem Einfluss der Gewölbewirkung
- Abb. 26:** Morphologiekategorie 1 unter dem Einfluss der Kohäsionswirkung
- Abb. 27:** Häufigkeitsverteilung für alle acht Expositionen basierend auf Mittelwerten aus DP 1 und DP 3
- Abb. 28:** Punktwolke S-exponierter Anrisszonen, aufgetragen über geodätischer Höhe und Hangneigung
- Abb. 29:** Empirische Dichte von Anrisszonen unter Wald und auf Freiland mit Angabe statistischer Mittelwerte
- Abb. 30:** Mechanik-Modell virtueller Scherkräfte im wurzelarmierten Boden
- Abb. 31:** Prozentuale Verteilung der Höhenlage von Anrisszonen unter Wald und auf Freiland
- Abb. 32:** Ausbildung von Gleitflächen innerhalb der Hangauflage durch flachwurzelnde Monokulturen
- Abb. 33:** Bodendeformation durch Kompaktierung und Scherung
- Abb. 34:** Zusammenhang zwischen Länge eines planierten Hanges und Abtragsintensität
- Abb. 35:** Gleichgewichtsbetrachtungen in einer Kapillare
- Abb. 36:** Visuelle Beurteilung von Rissbildern unter dem Einfluss starker, mittlerer und schwacher Schrumpfungintensität
- Abb. 37:** Einflüsse hydrostatischer Drucke und turbulenter Strömung entlang von Rissbildungen auf die Stabilität der Hangauflage
- Abb. 38:** Ermittlung der Hangerosivität über den LS-Faktor als Funktion von Hanglänge und -neigung
- Abb. 39:** Abflusseigenschaften in tal- und kesselförmigen Einzugsgebieten
- Abb. 40:** Kornverteilungen bzw. deren Hüllkurven von Hangauflage aus zehn 10 Untersuchungsgebieten
- Abb. 41:** Aufbau der Schlussfolgerungskomponente, untergliedert in drei Entscheidungsebenen
- Abb. 42:** Vergleich der Hangmürhäufigkeiten bei Varianz von Morphologie und Exposition
- Abb. 43:** Stichprobenverfahren mit Angaben zu Probenentnahmestellen in Abhängigkeit von den Erkundungsstufen

- Abb. 44:** Entwicklung eines Erkundungsprogramms mit Angaben der Erkundungsstufen pro Rasterzelle für eine ca. 20 ha große Beurteilungsfläche, belegt mit verschiedenen wirtschaftlichen Risiken
- Abb. 45:** Beziehung zwischen Sättigungsgrad der Hangauflage und scheinbarer Kohäsion
- Abb. 46:** Funktionaler Zusammenhang von relativem, nutzbarem Porenvolumen  $n_{\text{eff},r}$  und Durchlässigkeitsbeiwert  $k$
- Abb. 47:** Bestimmungsmöglichkeit des nutzbaren Porenanteils  $n_{\text{eff}}$  für feinklastische Böden

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 1:** Unterscheidung einzelner Murströme nach ihren Anrisszonen
- Tab. 2:** Maßgebende Parameter zur Evaluierung der Hangmurintensität
- Tab. 3:** Zusammenfassung aller zur Verfügung stehenden Daten bezüglich der Faktoren Hangneigung und Höhe aus DP 1 und 3
- Tab. 4:** Zuordnung von Anrisszonen zu bestimmten Festgesteinseinheiten mit Angabe mittlerer Hangneigungen  $\beta$
- Tab. 5:** Grenzwerte der Hangneigung im primären und sekundären Gefährdungsbereich
- Tab. 6:** Zusammenhang zwischen geodätischer Höhe und Mächtigkeit der Hangauflage
- Tab. 7:** Zusammenfassende Beurteilung des Einflusses der Vegetation auf die Hangstabilität
- Tab. 8:** Angabe zu Wurzeleigenschaften und Drainagewirkung alpiner Gehölze
- Tab. 9:** Vergleich der Rutschungsaktivität zwischen Mähwiesen und bestoßenen Weideflächen
- Tab. 10:** Schrumpfpotential von Tonböden
- Tab. 11:** Schrumpfrissbreiten und ihre Bezeichnungen
- Tab. 12:** Einfluss verschiedener Einflussfaktoren auf die Intensität des Oberflächenabflusses
- Tab. 13:** Prognose des saisonalen Witterungsverlaufes in den Alpen
- Tab. 14:** Voraussichtliche klimatische Veränderungen gefährdungsimmanenter Faktoren und ihre fördernden bzw. hemmenden Wirkungen auf die Entstehung von Hangmuren
- Tab. 15:** Multivariate Häufigkeitsverteilung für die Faktoren Neigung, Höhe, Exposition und Morphologie
- Tab. 16:** Gegenüberstellung der Hangmurfrequenzen an Sonnen- und Schattenseiten bei Konstanthalten der Faktoren Neigung, Höhe und Morphologie

- Tab. 17:** Abschätzung des Gefährdungspotentials in EE I mittels der Häufigkeiten aus Tab. 15, der Bewertung des historischen Murpotentials und wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Risikos
- Tab. 18:** Entwicklung des Erkundungsprogramms anhand des abgeschätzten Gefährdungspotentials aus EE I
- Tab. 19:** Vergleich der Methoden von BEYER & SCHWEIGER und HENNING zur Bestimmung des nutzbaren Porenanteils  $n_{\text{eff}}$
- Tab. 20:** Tendenzielles Armierungspotential von Wald, hergeleitet anhand der Gegenüberstellung von Murhäufigkeiten auf Freiland und unter Wald
- Tab. 21:** Kategorisierung des Armierungspotentials von Gehölz mittels der Zustandsbeschreibungen Deckungsgrad, Stufigkeit und Baumart
- Tab. 22:** Beurteilung der Intensität und des zeitlichen Verlaufes von Oberflächenabflüssen anhand verschiedener Einflussfaktoren

## Danksagung

Ich danke Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. C. Boley für die freundliche Aufnahme an seinem Institut und das Vertrauen, das er in mich setzte. Durch sein hilfreiches Wirken waren die Voraussetzungen für hervorragende Arbeitsbedingungen am Institut für Bodenmechanik und Grundbau an der Universität der Bundeswehr gegeben.

Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. R. Azzam vom Institut für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Disse.

Für die uneigennützig überlassung umfangreicher Datensätze zu historischen, alpinen Murereignissen bedanke ich mich aufrichtig bei der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, sowie Herrn C. Rickli für seine Bereitschaft zur kritischen Diskussion. Die Datensätze der WSL aber auch umfangreiche Geländedaten, die durch Diplomarbeiten der Arbeitsgruppe um Prof. Moser, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, zusammengetragen wurden, bilden den Grundstein der statistischen Auswertungen dieser Arbeit. Herrn Prof. Moser danke ich zudem für viele interessante Literaturhinweise und Anregungen.

Herrn Dr. H. Hahn vom Institut für Wirtschaftsinformatik der Universität der Bundeswehr danke ich für die Dokumentation statistischer Auswertungen und die Unterstützung bei der Generierung log-linearer Modelle. Diese Modellansätze waren schlussendlich nicht zielführend, sie haben jedoch zu einer umfassenden Diskussion möglicher Lösungsansätze beigetragen.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau für Ihre Unterstützung während der Fertigstellung meiner Arbeit. Bei meinen Kollegen Dipl.-Ing. Claas Meier und Dr.-Ing. Stefan Schmitz bedanke ich mich besonders für ihre Unterstützung und viele hilfreiche Hinweise.

Meinem Vater, Herrn Dr.-Ing. R. Meyer, gebührt mein besonderer Dank für sein großes Interesse am Thema, seine äußerst kritische Diskussionsbereitschaft aber auch seine stetige Ermutigung.

Herrn Dr. J. Wallner danke ich für viele praxisorientierte Anmerkungen in der Geländeanalyse, seine stetige Unterstützung und seinen aufmunternden Zuspruch. Mit seiner ruhigen und besonnenen Art hat er mich sehr unterstützt.

Diese Arbeit widme ich meiner Mutter

Erika Meyer-Hilker

† August 2007

# 1 Einführung in die Thematik

## 1.1 Problemstellung

Statistiken über das weltweite Auftreten von Naturkatastrophen sprechen eine deutliche Sprache: Naturgefahren stellen nach wie vor ein schwer abschätzbares Risiko für den Menschen dar. Die zunehmende, teils unbekümmerte Besiedlung von Hochrisikobereichen unterstreicht die Notwendigkeit, von Naturgefahren bedrohte Gebiete zu lokalisieren und auszuweisen (Hamberger et al. 2005).

In den letzten 50 Jahren hat u.a. die Zahl katastrophaler Hangbewegungen in voralpinen und alpinen Gebieten deutlich zugenommen. Hangmuren, die zu den schnellsten und unvorhersehbarsten flachgründigen Hangbewegungen zählen, haben während dieser Zeit an negativer Bedeutung gewonnen, u.a. weil sie in ihren Ablagerungsbereichen zunehmend besiedelte und bewirtschaftete Gebiete in Nähe steiler Hanglagen bedrohen. Ihr spontanes, für lokalmaßstäbliche Verhältnisse bisher weitgehend unreflektiertes Auftreten, ihre Mobilität und hohe Schleppkraft bergen ein erhebliches Schadenspotential für Boden, Vegetation und Infrastruktur und damit schlussendlich ein solches auch für Menschen und Fauna (Thali & Bollinger 2000).

Eine erfolgreiche Risikosteuerung mündet in die Definition von Gefahrenzonen. Sie muss Schaden von Leib und Leben abwenden und Sachschäden möglichst zu verhindern, auf jeden Fall aber zu verringern helfen. Vor diesem Hintergrund erfährt die vorgenannte Problematik einen zunehmenden gesellschaftlichen Stellenwert. In den vergangenen Jahren wurden daher vornehmlich auf Seiten der Alpenländer große wissenschaftliche und finanzielle Anstrengungen unternommen, Geoinformationssysteme zu entwickeln, die mittels Simulationen anhand numerischer Modelle Hangbewegungen vorhersagen bzw. die Stabilität von Hängen quantifizieren, um für potentiell betroffene Siedlungen und Infrastrukturbereiche eine auf Dauer verlässliche Frühwarnung verfügbar zu machen.

Derzeit werden beim Aufbau effizienter Frühwarnsysteme vornehmlich GI-Systeme - mitunter gekoppelt mit Sensorsystemen - eingesetzt, die als eine Art *mobiler Erfassungsclient* (Plan et al. 2004) zu verstehen sind und neben Fachleuten wie Geotechnikern, vor allem aber Nutzern ohne fundierte Fachkenntnis vor Ort im Gelände zur Gefahrenabschätzung zur Verfügung stehen. Es sind Nutzer, die in ihrem direkten Umfeld mit einem erhöhten Hangbewegungsrisiko konfrontiert sind und eine Unterstützung bei der Entscheidungsfindung in Planungsprozessen unterschiedlichster Art suchen: Flächennutzungsplaner, Gemeindevertreter,

Forstwirte, Vertreter der Versicherungswirtschaft, Grundstückseigentümer und Katastrophenmanager gehören neben anderen zu diesem Personenkreis.

Trotz steter Bemühungen um möglichst präzise Simulationsverfahren zur Ausscheidung potentieller Gefährdungsgebiete leiden *gängige Dispositionsmodelle* (Damm 2000) nach wie vor an mangelnder Wirklichkeitsnähe, die vornehmlich in einer quantitativ unzureichenden Datengrundlage und diese besonders in der natürlichen Heterogenität der Input-Daten begründet liegt. Um eine hinreichend genaue Ausweisung von Gefahrengebieten zu ermöglichen, ist aber eine ausreichende Informationsdichte über maßgebende Förder- und Hemmfaktoren erforderlich. Die Genauigkeit der Informationen hat der Ereignisrelevanz der von ihnen betroffenen Auslösemechanismen zu entsprechen.

Zumeist weisen Grundlagen geologischer Simulationssysteme, wie geologische, bodenkundliche Karten etc., eine unzureichend flächendeckende Auflösung auf. Dieser Missstand setzt sich in den mittels Simulation erstellten Gefahrenhinweiskarten fort. Bereits minimale geogene oder anthropogene Veränderungen im Gelände können innerhalb kürzester Zeit zum Aktualitätsverlust bestehender Grundlagenkarten führen. Diese können somit keine ausreichend präzise Datengrundlage für GI-Systeme bzw. Gefahrenhinweiskarten bieten.

Eine genaue, hinreichend verlässliche Beurteilung der Gefährdungssituation ist mit Pauschalannahmen nicht durchführbar. Bestehende Arbeiten zur Stabilitätsbeurteilung mittels Geoinformationssystemen erzielen bis dato für lokalmaßstäbliche Untersuchungen nur dann eine ausreichende Genauigkeit, wenn sie entweder auf eine bereits bestehende, umfassend aktuelle Datenbasis zurückgreifen können, oder den Simulationen eine umfangreiche Datenaufnahme im Gelände voraussetzt. Die vorgenannten Datenbasen bzw. die generierten Ereignisdaten sind aufgrund ihrer singulären Ausrichtung auf geogene und anthropogene Besonderheiten des jeweiligen Erhebungsgebietes jedoch - ohne Ungenauigkeiten in Kauf zu nehmen - kaum auf andere Untersuchungsbereiche übertragbar.

Eine lokal ausgerichtete Geodatenbank bzw. Datenakquise, die allen ereignisrelevanten, aktuellen Besonderheiten des Untersuchungsgebietes Rechnung trägt, ist für eine verlässliche Risikobeurteilung von essentieller Bedeutung. Sie führt jedoch zu einem erhöhten Bearbeitungsaufwand und damit zu einer Kostenerhöhung gegenüber der Verwendung regional orientierter Daten.

Für eine umfassende, differenzierte Gefährdungsanalyse bedarf es des Ansatzes vielfältiger Wechselwirkungen zwischen auslösenden Faktoren in einem Mehr-Parameterkonzept. Derzeit existieren jedoch nur wenige Simulationsverfahren, die alle relevanten Aspekte in einem Modell vereinigen. Vereinzelt werden auch Decision-Support-Systeme zur Ausscheidung von Hangbewegungsgefahrenzonen herangezogen. Einige wissenschaftliche Arbeiten verwenden sie bereits als Basis der Entscheidungsfindung. Keines der bekannten Systeme imple-

mentiert jedoch, ähnlich wie Geoinformationssysteme, *alle* - nach aktuellen Erkenntnissen der Wissenschaft - maßgebenden Faktoren. Auch hier findet zumeist eine Konzentration auf nur einige Parameter der Grunddisposition statt. Zudem lassen bekannte DS-Systeme eine wissenschaftlich fundierte Validierungsanalyse vermissen, die eine verlässliche, nachvollziehbare Entscheidung ermöglicht.

Um die Mannigfaltigkeit von Hangmurgefahren betroffener Regionen und Wirtschaftssparten aufzuzeigen, und um die Notwendigkeit einer lokalmaßstäblichen Betrachtung neben bereits bestehenden generalisierenden Gefahrenhinweiskarten, vor allem in der Anwendung durch Fachfremde, deutlich zu machen, werden nachfolgend für alpine Gebiete zwei *alltägliche* geotechnische Gefahrenszenarien vorgestellt.

#### *Gefährdungsszenario I: Aufforstung*

Ein Forstwirt plant für seinen NE-exponierten Forst im Bereich der Gemeinde Immenstadt, am Fuße des Immenstädter Horns, die Aufforstung mit Mischwald, nachdem ein starker Sturm große Teile des Waldes zerstört hat. Durch die mittelfristige Vegetationslosigkeit haben sich im Boden bereits zahlreiche Erosionsspuren gebildet. Mit einem durchschnittlichen Hanggefälle von  $32^\circ$  und einer Hangauflage aus quartären Deckschichten und Mergeln der tertiären Kojen- und Steigbachschichten der Unteren Süßwassermolasse erscheint der sturmgeschädigte Forst durch Hangmuren bedroht. Seine Gefährdung wird außerdem durch bekannte Hangmurabgänge in geologisch ähnlichen Formationen der Umgebung - besonders nach starkem, dauerhaftem Niederschlag - unterstrichen.

Problemstellung: Kann der Forstwirt Stecklinge ausbringen, ohne sie der latenten Gefahr ihrer Vernichtung durch Hangmuren auszusetzen?

#### *Gefährdungsszenario II: Mountainbikestrecke*

Im Gebiet des Taubensteins, oberhalb des Spitzingsees, ca. 10 km SE' des Tegernsees, plant ein Skiliftbetreiber nach mehreren schlechten Skisaisons am Westhang - zwischen Raukopf und Tanzeck - die Nutzung eines Skihanges als Mountainbikestrecke durch den Sommertourismus. Der Hang hat ein mittleres Gefälle von ca.  $25^\circ$ , partiell von  $30^\circ$ . In diesem Bereich stehen oberflächlich verwitterte jurassische Allgäu-Schichten an. Die mergeligen Deckschichten, zusammen mit Geländeschwellen, Kuppen und großflächigen Vernässungszonen sind Hinweise auf eine instabile Hangsituation und den möglichen Abgang von Hangmuren.

Problemstellung: Ist eine ausreichende Hangstabilität für das nicht unbedeutende Investment in eine Mountainbikestrecke gewährleistet?

## 1.2 Gefahr und Risiko

Die im Kapitel 1.1 aufgeworfenen Fragestellungen im besonderen und der Umgang mit Georisiken - wie Hangbewegungen - im allgemeinen erfordern die genaue Definition der verwendeten Begriffe *Gefahr*, *Gefährdung* und *Risiko*:

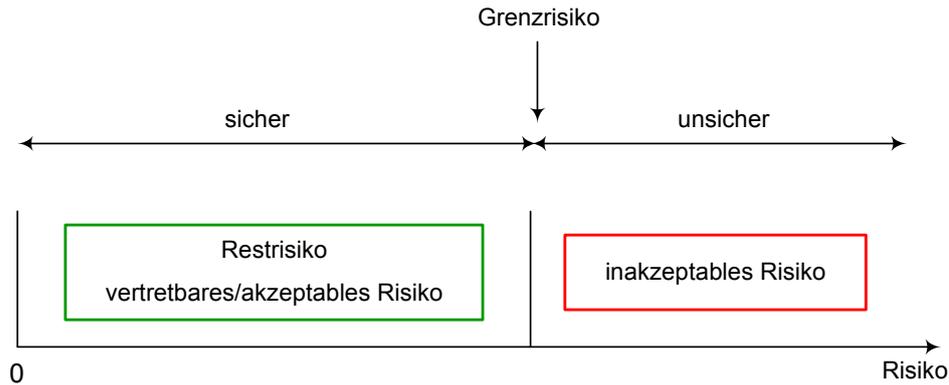
Der Terminus *Gefahr* (engl.: danger) beschreibt eine objektive Bedrohung durch ein zukünftiges Schadensereignis, das unter bestimmten Bedingungen eintritt (BayLfU 2005). ARE (2005) konkretisiert die Verwendung des Begriffs im Zusammenhang mit Naturgefahren: Ereignisse, wie Sturm, Hagel, Erdbeben etc., bedingen Umstände oder Vorgänge, aus denen ein Schaden für Menschen, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann. Umstände der Gefahr sind nicht vorhersehbar.

Eine Gefahr, die sich konkret auf ein bestimmtes Objekt in einer bestimmten Situation bezieht, wird nach BUWAL (1998) als *Gefährdung* (engl.: hazard) bezeichnet. Die Gefährdung beschreibt ein bedingt vorhersehbares Ereignis. Bereiche, die von gefährlichen Prozessen bedroht sind, werden als *Gefährdungsbereiche* bezeichnet (BayLfU 2005).

Die Bewertung möglicher Risiken erfolgt zumeist im Spannungsfeld öffentlicher und privater Interessen (Damm 2000). Der Begriff *Risiko* (engl.: risk) definiert sich dabei aus der Verknüpfung des Eintritts eines Schadensereignisses mit dem Schadensausmaß (Andrecs & Oberndorfer 2008). Er stellt eine Kombination aus Gefährdung, Schadensanfälligkeit und gegebenenfalls einem materiellen Wiederbeschaffungswert dar und ist damit die Vorausschätzung der Wertvernichtung durch einen Schaden innerhalb eines ermittelten Wahrscheinlichkeitsrahmens.

Ein risikofreier Zustand ist nicht erreichbar. Ein Bereich oder Zustand kann jedoch als sicher bezeichnet werden, wenn alle bestehenden Risiken unter einem vertretbaren, akzeptablen Grenzkrisiko liegen (Abb. 1). Ein Restrisiko, das die Gefährdung nach Realisierung aller als erforderlich erachteten Sicherungsmaßnahmen bemisst, ist stets gegeben (BayLfU 2005).

Ausführliche Anmerkungen zur Risikoanalyse bei Naturgefahren finden sich auch bei BUWAL (1999).



**Abb. 1:** Zusammenhang zwischen den Begriffen *Risiko*, *Restrisiko* und *Grenzrisiko* (BayLfU 2005)

Die *Gefahrenhinweiskarte* (engl.: danger map) gibt eine nach objektiven wissenschaftlichen Kriterien (BUWAL 1998) erstellte Übersicht über die geogene Gefährdungssituation innerhalb eines bestimmten Gebietes. Sie macht Angaben zur vorherrschenden Gefahrenart, nicht jedoch zur Gefahrenstufe, d.h. zur Intensität bzw. Wahrscheinlichkeit des Ereignisses (Einstein 1988).

Die Gefahrenhinweiskarte liegt in der Regel in regionalem Maßstab von 1:10.000 bis 1:50.000 vor und dient als Grundlage für Richtplanungen (Flächennutzungsplanungen) (BayLfU 2008a). Großmaßstäbliche Betrachtungen im Maßstab  $> 1:10.000$  werden auch als lokalmaßstäblich bezeichnet (Glade & Crozier 2005).

Das Bayerische Landesamt für Umwelt erarbeitet derzeit für Bayern Gefahrenhinweiskarten, die als Grundlage eines Frühwarn-Modus dienen sollen. Ihre Fertigstellung für die Hauptsiedlungsgebiete wird für 2011 erwartet (BayLfU 2008a).

### 1.3 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Decision-Support-System (DSS) für Hangmuren, eine der gefährlichsten - weil schnellste und unvorhersehbarste - flachgründigen Hangbewegungserscheinungen. Das System liefert auf Grundlage geologisch, hydrogeologisch und geotechnisch relevanter Faktoren einen wirklichkeitsnahen, verlässlichen Leitfaden zur Generierung einer detaillierten Gefahreneinschätzung. Als Anwender ist an Personen gedacht, die keine Fachkenntnis in der Hangbewegungsanalyse haben, grundsätzlich aber versiert sind im Umgang mit Böden und ihrer geotechnischen Analyse. Hierbei ist z.B. an Baugrundlaboranten gedacht. Das Verfahren ist ubiquitär und sofort im jeweiligen Untersuchungsgebiet anwendbar, ohne eine aufwendige Generierung einer Geodatenbank bzw. Kartierung im Gelände voranstellen zu müssen. Das System sieht sich zudem in der Praxis als ein lokal-

maßstäblicher Appendix zu bereits bestehenden regionalmaßstäblichen Gefahrenhinweiskarten.

Ausgehend von bestehenden Schwachpunkten gängiger Gefahrenhinweiskarten, wie Ungenauigkeiten und Pauschalierungen durch Data-, Processing- und Measurement-Fehler, zeigt die vorliegende Arbeit eine wirtschaftliche, zeiteffiziente und transparente Variante der Stabilitätsanalyse auf. Dabei macht das DSS, vergleichbar mit den Inhalten einer Gefahrenhinweiskarte, keine Angaben zur Intensität eines zu erwartenden Hangmurebans. Das Verfahren verzichtet auf die Anwendung von Geoinformationssystemen und definiert durch Einbeziehung ergebnisrelevanter Faktoren Schwellenwerte gemäß dem aktuellen Stand interdisziplinären Expertenwissens. Durch eine quasi geführte Vor-Ort-Begehung wird eine Entscheidungsbasis generiert, die Pauschalierungen, Übertragungsfehler und Interpretationsspielräume minimiert und somit hinsichtlich Genauigkeit Analyseergebnisse bestehender Simulationssysteme verbessert. Mit diesem Verfahren wird für den Anwender die Komplexität der Simulation umgangen. Es gibt vor allem Nutzern mit nur geringen Kenntnissen in Kartierung eine zuverlässige Bearbeitungsgrundlage für eine verfeinerte Risikoquantifizierung ihres Projektgebiets. Beiläufig verfolgt die vorliegende Arbeit auch das Ziel, mit einer aktualisierten Zusammenfassung und Wichtung aller ereignisrelevanten Parameter einen Leitfaden zur Datenakquise und -evaluierung für bestehende Geoinformations- und Simulationssysteme zu generieren. Sie leistet damit einen interdisziplinären Beitrag zur Präzisierung letzterer.

#### **1.4 Methodik**

Mit einem dreistufigen Workflow erzielt das DSS die größtmögliche Genauigkeit in der Ausscheidung potentieller Hangmuregebiete. Die Input-Daten zur Gefährdungsanalyse werden ausschließlich aus der Geländebegehung generiert.

In Entscheidungsebene EE I wird anhand statistisch ausgewerteter Datengrundlagen für Reliefaktoren wie Hangneigung und Höhenlage eine erste Abschätzung des Gefährdungspotentials am Hang vorgenommen. In EE II erfolgt mittels der Entnahme von Bodenproben, ihrer geotechnischen Laboranalyse und geotechnischer Überschlagsrechnungen eine Standsicherheitsbeurteilung. Mit der Implementierung von EE II ins DSS wird vor allem den vielfältigen geotechnischen Eigenschaften des Hangmurematerials und ihren Auswirkungen auf die Stabilität in ausreichender Weise Rechnung getragen.

Da innerhalb der Stabilitätsberechnungen in EE II wesentliche Parameter wie Vegetation, Gewässernetz und anthropogene Einflussnahme nicht zuverlässig für eine Berechnung quantifizierbar sind, erfolgt die Beurteilung ihres Einflusses in EE III. Es werden zudem Faktoren implementiert, die bis dato kaum Berücksichtigung in bestehenden DSSen fanden, aber nach neusten Erkenntnissen der Forschung einen bedeutenden Einfluss auf die Hang-

stabilität haben. In diesem Zusammenhang sind Einflüsse der Straßenentwässerung, aber auch der Schrumpfrissbildung zu nennen, die Infiltrationen von Oberflächenwässern in den Hang fördern.

Mit der Reflektion vorgenannter Einflüsse wird vor allem oberflächennahen Erosionserscheinungen und Porenwasserüberdrücken Rechnung getragen, die bei Standsicherheitsbetrachtungen entlang von Gleitflächen unberücksichtigt bleiben.

Die Ergebnisse der Entscheidungsebenen EE II und EE III werden zur finalen Gefährdungsbeurteilung zusammengeführt.

Um eine möglichst wirklichkeitsnahe und effiziente Auswertung der Geländebeziehungen zu erreichen, erhält der Anwender während der Geländeaufnahme und der nachfolgenden Bearbeitung des Auswertungsformulars eine effektive Unterstützung und Anleitung. Zur Wichtung der Relieffaktoren aus EE I und weiterer Förder- und Hemmfaktoren aus EE III wird eine Vielzahl historischer alpiner Ereignisdaten aus wissenschaftlichen Arbeiten statistisch ausgewertet. Die Auswertungen liefern durch Abgleich mit textlichen Beschreibungen in der Literatur die entscheidungsrelevanten Schwellenwerte des DSSs. Die Präzision der Validierung stellt die Genauigkeit des Abfragemodus sicher.

Die Metadaten werden zunächst losgelöst von ihrem Aufnahmegebiet und ihrer geologischen Einheit betrachtet, so dass der regionalspezifische Einfluss der Daten reduziert wird. Dieser Schritt ermöglicht eine Übertragbarkeit der Informationen auf beliebige alpine Erkundungsgebiete. WICHMANN (2006) formuliert den *modus procedendi* wie folgt:

*Die grundlegenden Annahmen (...) bestehen darin, dass die natürlichen Gegebenheiten, die in der Vergangenheit zur Auslösung dieser Prozesse (Anmerkung: Hangmuren) geführt haben, auch in Zukunft für die Prozessinitiierung maßgebend sind. Dies impliziert, dass die natürlichen Verhältnisse über einen längeren Zeitraum als konstant angesehen werden.*

Innerhalb der Entscheidungsebenen wird zudem Änderungen im Prozessgeschehen durch Berücksichtigung aktueller Klimaprognosen mit einem *Lastfall Klimaveränderung* (KLIWA 2005) Rechnung getragen. Prognostizierte Klimaveränderungen können Einflussfaktoren des DSSs verändern. Ihre Entwicklung ist künftig zu beobachten und gegebenenfalls in eine resümierende Bewertung aufzunehmen. Statische Konzepte verlieren in diesem Zusammenhang ihre Gültigkeit (Beierkuhnlein 2008).

Der Parameter Niederschlag, dem eine zentrale Rolle bei der Auslösung von Hangmuren zugewiesen wird (u.a. Wichmann 2006), zählt zum worst-case Szenario: Es ist somit nicht von Bedeutung, welche Niederschlagsmenge die Hangmure auslöst. Die Grunddisposition eines Hanges zur Hangmurentstehung wird grundsätzlich durch die Einwirkung von Stark-

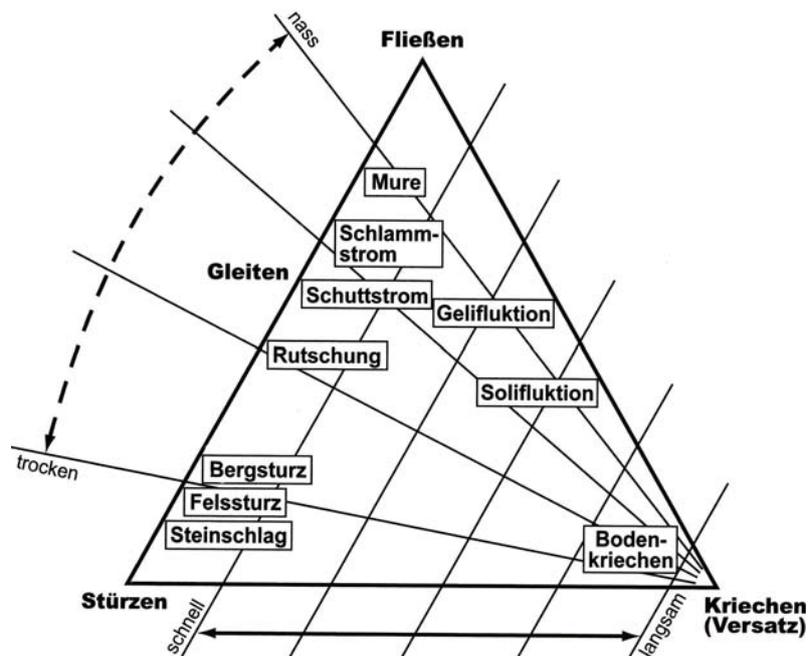
niederschlägen gefördert. Effektive meteorologische Niederschlagsgrenzhöhen bleiben daher im DSS ohne Berücksichtigung.

Alle Entscheidungsebenen des DSSs werden anhand eines Auswertungsformulars durchlaufen. Der Umfang des Formulars ist dabei stets unter wirtschaftlichen/sozialökonomischen Aspekten zu sehen. Es wird ein minimales Befragungs- und Erkundungskonzept entwickelt, das dennoch alle geogenen und anthropogenen Einflüsse erfasst und eine hohe Datensicherheit gewährleistet. Als Orientierung für die Entwicklung der Work-flows dient ein von der schweizer ARBEITSGRUPPE FÜR GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (AGN 2004) entwickeltes System.

## 2 Einführung in den Forschungsstand Massenbewegungen

### 2.1 Definition und Klassifizierung von Massenbewegungen im alpinen Raum

Massenumlagerungsprozesse vereinen langsam (cm/a) bis sehr schnell (km/h) stattfindende Bewegungen (Terzaghi et al. 1929) und weisen eine weite Spanne zugrunde liegender Prozesse und auslösender Faktoren auf (Dikau & Glade 2002), (Abb. 2). Sie umfassen talwärts gerichtete, gravitative Prozesse (Laatsch & Grottenhaler 1972): Sogenannte Massenbewegungen und Transportprozesse, die durch Einwirkung der Medien Wasser, Schnee, Eis und Wind initialisiert werden (Schoger 1988). Zwischen beiden Formen der Umlagerung gibt es Übergänge, die quasiviskoses Fließen und dünnbreiige Erd- und Schuttmassenbewegungen einschließen (Laatsch & Grottenhaler 1972). Massenbewegungen an Böschungen werden als Hangbewegungen zusammengefasst.



**Abb. 2:** Einteilungsprinzip gängiger Massenbewegungsformen nach Durchnässungsgrad und Geschwindigkeit des Bewegungsmaterials (aus Baumhauer 2006)

Die Klassifizierung von Massenbewegungen basiert auf verschiedenen Faktoren (Genese, Bewegungsgeschwindigkeit und -mechanismus, Existenz von Gleitflächen, regionale Einflüsse etc.), die eine Unterteilung in die vier Hauptbewegungsvorgänge *Fallen* bzw. *Stürzen*, *Gleiten*, *Fließen* und *Kriechen* vorgeben. Die Standards nach VARNES (1978) bzw. die deutschsprachigen Klassifikationsvorschläge von BUNZA (1992) bzw. DIKAU und GLA-

DE (2002) nehmen die vorgenannten Hauptbewegungsvorgänge auf und bilden individuell gegliederte Systeme. Neben den vorgenannten Klassifikationen sind weitere nach LAATSCH und GROTTENTHALER (1972) und MOSER und ÜBLAGGER (1984) zu nennen.

Im Fokus der Arbeit stehen Hangmuren. Bezüglich ihrer Kinematik und auslösenden Faktoren zeigen sie Ähnlichkeiten zu oberflächennahen, bis max. 2 m u GOK verlaufenden, schnellen bis sehr schnellen Gleit- und Fließprozessen in quartären Deckschichten. Die Grenzen zwischen Gleit- und Fließbewegungen sind wiederum verwischt. Oftmals existieren graduelle Übergänge bzw. Kombinationen dieser Bewegungsmechanismen (Bunza et al. 1976). In den Kapiteln 2.2 und 2.3 werden die für die Entstehung von Hangmuren ausschlaggebenden Gleit- und Fließbewegungen ausführlich beschrieben.

Trotz steter Bemühungen um eine umfassende, eindeutige Klassifizierung von Hangbewegungen, existieren nach wie vor begriffliche Ungenauigkeiten (Schoger 1988) - insbesondere bei Gleit- und Fließprozessen (Zangerl et al. 2008). LAATSCH und GROTTENTHALER (1972) weisen in diesem Zusammenhang auf Arbeiten hin, die begrifflich nicht ausreichend zwischen Rutschungen und Fließbewegungen differenzieren. Diese Ungenauigkeiten liegen zum einen an einer nicht eindeutigen Definition verschiedener Bewegungsprozesse und zum anderen an der Existenz einer Vielzahl von Synonymen, die in der Literatur eine beliebige Sinnzuweisung erfahren. Sie haben noch keinen Eingang in offizielle Nomenklaturen gefunden und sind somit vom Status der *termini technici* weit entfernt. Dies betrifft auch - und besonders - die zunehmende Verwendung von Anglizismen. BUNZA ET AL. (1976) haben in ihrer Arbeit *Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde* gebräuchliche nomenklatorische Bezeichnungen verschiedener Bewegungsvorgänge aufgenommen. Diese Auflistung wird in den nachfolgenden Kapiteln durch weitere, der Autorin bekannte deutsch- und englischsprachige Termini ergänzt.

Zur Beschreibung von Gleit- und Fließbewegungen wird im folgenden die Einteilung nach MOSER und ÜBLAGGER (1984) herangezogen (Abb. 3). Sie differenziert zwischen Materialeigenschaft, Bewegungsvorgang, Bewegungsgeschwindigkeit und Anbruchsform. Aufgrund gradueller Übergänge zwischen den Bewegungsvorgängen Gleiten und Fließen wird das Modell von MOSER und ÜBLAGGER (1984) um die in gängigen Nomenklaturen bis dato kaum vorkommende flachgründige spontane Rutschung als eine Art zusammenfassender Bewegungstypus für flachgründige Rutschungen, Schuttströme, Hangmuren etc. erweitert (Abb. 3).

### *Spontane Rutschungen*

Gemäß PLANALP (2006) und AGN (2004) gelten spontane Rutschungen als kleinräumiges Phänomen. Sie werden meist durch Niederschläge - in Form von Stark- oder Dauerregen

bzw. von Schneeschmelze - auf undurchlässigem Lockergesteinsuntergrund ausgelöst. Spontane Rutschungen gehen bedingt aus Primärrutschungen innerhalb eines bereits existierenden Rutschgebietes hervor (v. Poschinger 1992). Sie bilden dabei stets eine neue Bruchfläche aus und umfassen große Volumina - bis zu mehreren tausend m<sup>3</sup> (AGN 2004).

Der Wassergehalt des Bodenmaterials ist meist zu gering, um zu einer Verflüssigung zu führen, so dass der Boden eine gewisse Kohäsion beibehält (RUBD & ILFD 2007). Nimmt der Wassergehalt zu, können unter plötzlicher Reduktion der Scherfestigkeit Schuttströme und Hangmuren entstehen.

BEWEGUNGSVORGANG	I. FESTGESTEINE	II. FESTGESTEINE DER FELSGÜTEKLASSE E	III. LOCKERGESTEINE
1. GLEITEN 1.1 rotationsförmig	1.1.1 Felsgleitung ohne vorgezeichnete Gleitfläche Anbruchsform: NISCHENANBRUCH	1.1.2 Rotations-Rutschung in Fels-Güteklasse E Anbruchsform: MUSCHELANBRUCH	1.1.3 Rotations-Rutschung in Lockergesteinen Anbruchsform: MUSCHELANBRUCH (tiefgreifend, flach)
1.2 translationsförmig	1.2.1 Felsgleitung mit vorgezeichneter Gleitfläche Anbruchsform: NISCHENANBRUCH		1.2.2 Translations-Rutschung in Lockergesteinen Anbruchsform: BLATTANBRUCH (tiefgreifend/ flach)
2. FLIESSEN 2.1 schnell (m/Jahr)		2.1.1 Schuttstromfließen	
2.2 sehr schnell (5-20 m/sec)		2.2.1 Mure Anbruchsform: RINNENANBRUCH	

SPONTANE RUTSCHUNG

Flachgründige, spontane Rutschung

Erd- und Schuttgang

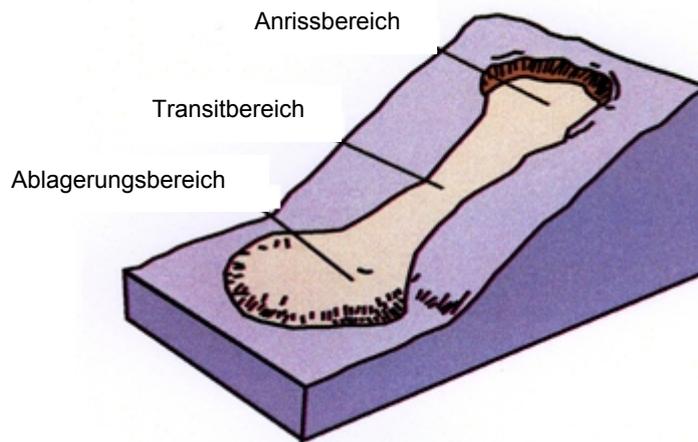
Mure (Hang- bzw. Talmure)

Graduelle Übergänge

Anmerkung: Felsgüteklasse E umfasst stark entfestigte, aufgelockerte und verwitterte Gesteine, die den veränderlich festen Gesteinen zugeordnet werden können.

**Abb. 3:** Grundtypen von Gleit- und raschen Fließbewegungen im alpinen Raum nach MOSER und ÜBLAGGER (1984), erweitert um den Begriff *Spontane Rutschung* mit graduellen Übergängen innerhalb der Bewegungsvorgänge Gleiten und Fließen.

Bewegungsvorgänge im Bereich des Gleitens und Fließens sind in Anrissbereich, Transit- und Ablagerungsbereich gegliedert (Abb. 4). Eine detaillierte Beschreibung der Begriffe ist u.a. RIEGER (1999) zu entnehmen.



**Abb. 4:** Bewegungszonen von Gleit- und Fließprozessen, aus USGS (2004)

## 2.2 Gleitbewegung

Beim Gleiten treten Instabilitäten - hervorgerufen durch den Einfluss von starken Niederschlägen bzw. hohen Hangwasserständen - vornehmlich an steilen bis mittelsteilen Hängen auf. Dabei vollzieht sich der Bewegungsvorgang zumeist entlang einer vorgezeichneten Gleitfläche oder auf einer Fläche, die sich bei Überschreitung der Scherfestigkeit in Form eines Scherbruches bildet (Moser 1980). Die Geschwindigkeiten von Gleitprozessen liegen zwischen cm/a und m/s (Varnes 1978).

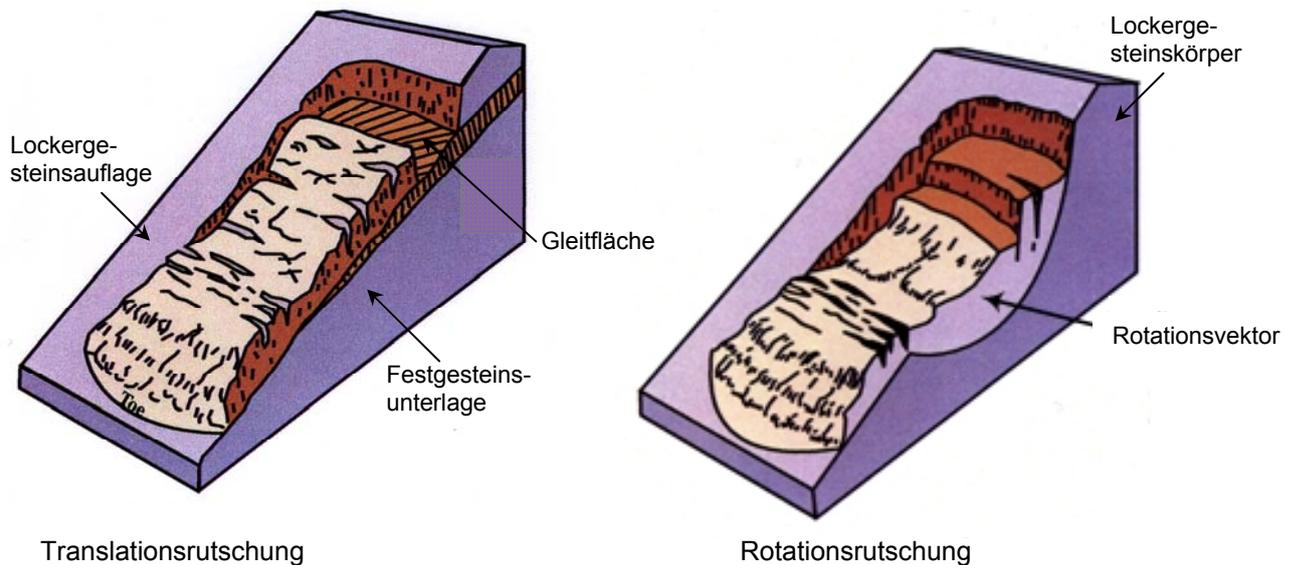
### 2.2.1 Rutschung

Rutschungen - mit Fokus auf Erdbeben - beschreiben ein gravitatives Abgleiten von Boden entlang relativ dünner Zonen großer Scherspannung (Turner & Schuster 1996). Während der Bewegung behält die Rutschmasse den Kontakt zur Unterlage weitgehend bei (v. Poschinger 1992). Voraussetzung für die Entstehung von Rutschungen ist das Eindringen von Wasser entlang von Klüften und Zugspannungs- bzw. Schrumpfungsrissen in den Hang. Auch Schneeschurf und mannigfaltige anthropogene Beeinflussungen können auslösenden Charakter haben (Bunza et al. 1976).

In Hangprofilen, die eine Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k$  im Lockergestein vom Liegenden zum Hangenden zeigen, kann ein Wasserstau zu zunehmender Gewichtsbelastung und großen Porenwasserüberdrücken führen. Dies kann eine explosionsartig verlaufende Rutschung mit extrem hohen Geschwindigkeiten, eine sogenannte *Hangexplosion*, hervorrufen. Verminderte Durchlässigkeiten der Deckschichten können u.a. durch feinteilreichen Boden oder durch anthropogene Verdichtungen hervorgerufen werden (Bunza et al. 1976, Krauer 2004). Unter dem Einfluss der Hangexplosion wird der Gleitkörper stark zerlegt und

murförmig verbracht. Die besonders bei typischen Rotationsrutschungen auftretenden, kreiszylindrischen Gleitflächen können dann kaum mehr beobachtet werden (Moser 1980).

Aufgrund unterschiedlicher Ansätze in Kinematik und Standsicherheitsbetrachtung (Goudie 1998) ist zwischen Translations- und Rotationsrutschungen zu differenzieren (Abb. 5).



**Abb. 5:** Translations- (li.) und Rotationsrutschung (re.), aus USGS (2004)

### 2.2.1.1 Rotationsrutschung

dt. Synonyme: Muschelanbruch, Grundbruch, Gleitflächenbruchrutschung, Rotationserdrutsch

engl. Synonyme: Rotational slip, slump

Rotationsrutschungen treten zumeist in kohäsiven bis stark kohäsiven, mächtigen Hangauf-lagen (Eigenberger 1972) auf, wobei der Anriss vornehmlich innerhalb des Lockergesteinma-terials erfolgt (Abb. 5, re.). Die Rutschmasse erfährt dabei zumeist ausgelöst von Starkregen eine Rotation um eine horizontale Achse (Bunza et al. 1976), die im Anrissbereich zu steilen, bis vertikalen Verschiebungen führt (Zangerl et al. 2008). Die Gleitbahn zeigt eine unregel-mäßige, meist konkav gekrümmte Form, vereinzelt ist sie auch schaufelförmig gebogen oder zylindrisch. Sie entsteht nicht entlang vorangelegter Zonen hoher Inhomogenität (v. Poschin-ger 1992), sondern erst im Augenblick des Bruches bei Überschreitung des Scherwiderstan-des (Laatsch & Grottenthaler 1972).

Die Form des Rutschkörpers wird durch seine Gleichgewichtsverhältnisse bei Abnahme der Scherfestigkeit mit zunehmender Schutthöhe in kohäsiven Böden bestimmt (vgl. Gl. 12).

### 2.2.1.2 Translationsrutschung

dt. Synonyme: Blattanbruch, gleitende Schuttbewegung, Schuttrutschung, Böschungsrutschung, Erdschlipf, Abgleitung, Oberflächenrutschung, Schuttrutsch, (Translations)-Erdrutsch

engl. Synonyme: Translational slip, debris slide, slide in colluvium, slab slide, sheet slide

Translationsrutschungen im Lockergestein betreffen in der Regel flachgründige, schwach kohäsive (Eigenberger 1972, Goudie 1998) Bodenschichten, die sich en-bloc mit geringen Internverschiebungen (Zangerl et al. 2008) auf einer annähernd oberflächenparallelen, präformierten (Laatsch & Grottenthaler 1972, v. Poschinger 1992) Gleitfläche hangabwärts bewegen.

Als potentielle Gleitflächen von Translationsrutschungen sind zu nennen:

- Hangparallele Grenzhorizonte zwischen humosem Boden bzw. unverfestigtem Sediment und Gestein. Letzteres kann als Lockergestein, Festgestein oder veränderlich festes Gestein etc. ausgebildet sein.
- Stauhorizonte (Schmierschichten) aus wasserstauenden bzw. schwach durchlässigen Gleitschichten
- Inhomogenitäten in Form von Auswaschungen, Übergänge mit wechselnden Bodenhorizonten und an Wurzelhorizonten

Der Geschwindigkeitsverlauf einer Translationsrutschung ist über die Mächtigkeit der gleitenden Masse als konstant anzunehmen (Zangerl et al. 2008). Die Tiefe (T) der Rutschung verändert sich über die Länge (L) und Breite (B) kaum (Schoger 1988). SKEMPTON (1953) gibt ein charakteristisches Verhältnis von  $T/L < 0,2$  an. Die Breite des Rutsches ist über die Länge nahezu konstant, lediglich im Ablagerungsbereich (Abb. 4) kann eine Verbreiterung auftreten. Eine scharfe Begrenzung der Anbruchsränder ist signifikant (Schoger 1988).

#### *Translationsbodenrutschung*

dt. Synonyme: Blattanbruch, Rasenschälrrutschung, Oberflächenrutschung, Schollenrutschung, sehr seichte Grasnarbenrutschung, Waldabbruch, Blaike

BUNZA ET AL. (1976) bezeichnen in *Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde* Translationsrutschungen, die nur die obersten Dezimeter der Hangaufgabe - natürlicher Boden bzw. unverfestigtes Sediment - betreffen, als Translationsbodenrutschungen. Sie treten ebenfalls - wie auch Translationsrutschungen - oberflächennah an stark geneigten Hängen (Neigung  $> 30^\circ$ ) auf. Wasser gilt als ihr Haupttrigger. Die Morphologie des Hanges,

die Zusammensetzung des Materials und die Rheologie von Translationsbodenrutschungen zeigen deutliche Vergleichbarkeiten mit Hangmuren.

Als primäre Auslöser von Translationsbodenrutschungen gelten nutzungsbedingte Bodenveränderungen (BayLfW 1996) und Zugrisse in oberflächennahen Bodenschichten, die vornehmlich durch Kriechvorgänge im auflagernden Schnee hervorgerufen werden. Aber auch in Risse eindringende Niederschläge, erstere verursacht durch Trockenheit und Frost, führen in quartären Deckschichten zu Kohäsionsminderungen und einer vergrößerten treibenden Gewichtsbelastung.

Als häufige Form von Translationsbodenrutschungen gelten Blaiken - auch Bleiken oder Plaicken genannt - ein auf flächenhaften, natürlichen und gravitativen Prozessen beruhender Vegetations- und Bodenabtrag (BUWAL 1998, v. Poschinger 1992). Im Bereich großflächiger Blaiken kann mit Zunahme des Wassergehaltes im Boden ein mäßig schneller (5-25 m/a) Erd- bzw. Schuttstrom in sehr schnelle Fließbewegungen übergehen (Bunza et al. 1976).

### 2.3 Fließbewegung

Fließbewegungen in wassergesättigtem Bodenmaterial gelten als kontinuierliche Deformationen (Dikau & Glade 2002) und umfassen schnelle (Schuttgang bzw. -strom) bis sehr schnelle Bewegungen (Muren), (Bunza et al. 1976). LAATSCH und GROTTENTHALER (1972) fassen katastrophenartig ablaufende, quasiviskose Fließbewegungen als Gang zusammen. Sehr langsames, steif plastisches Fließen wird als Kriechen bezeichnet und in der Nomenklatur nach MOSER und ÜBLAGGER (1984) von raschen Fließbewegungen unterschieden. Wegen der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit auf schnelle bis sehr schnelle Fließbewegungen werden Charakteristika von Kriechbewegungen hier nicht weiter verfolgt. PRINZ und STRAUß (2006) definieren Fließprozesse als unterschiedlich schnelle Bewegungen in aufgeweichten Bodenmassen, die Gesteinsschutt bzw. Gerölle aller Korngrößen verfrachten. Diese Vorgänge treten vor allem bei sehr hohen Wassergehalten mit Wasser-Feststoff-Quotienten<sup>1</sup> von  $\geq 1$  auf, so dass sich zumeist hochkonzentrierte, viskose (Dikau & Glade 2002) Suspensionen ergeben. Ihr Geschwindigkeitsprofil ist durch Abnahme der Geschwindigkeit in Richtung der Unterlage des bewegten Materials gekennzeichnet (Zangerl et al. 2008). Fließbewegungen treten aufgrund ihres hohen Wasserbedarfs vornehmlich in hydromorphen Böden mit relativ hohen Tongehalten und geringen Wasserdurchlässigkeiten auf (BayLfW 1996).

---

<sup>1</sup> Das Zitat lässt offen, ob es sich bei dem genannten Wasser-Feststoff-Quotienten um Raum- oder Gewichtsteile handelt. Es steht jedoch zu vermuten, dass hier Raumteile gemeint sind.

Besonders schnelle Fließbewegungen bergen ein großes Zerstörungspotential aufgrund hoher Schleppkraft und damit verbundener großer Energieinhalte.

HEIM (1931) beschreibt in *Bergsturz und Menschenleben* schnelle Fließvorgänge und deutet an, dass nicht selten Gleit- und Fließbewegungen in einander übergehen:

*Man hat beim ersten Anblick (...) den Eindruck eines Stromes mit Fluidalstruktur. Die Schuttrutschung bewegt sich wie jeder Fluss in der Mitte und oben schneller als am Rand und an der Unterlage. (...) Ihr Hauptunterschied vom Fließen des Wassers besteht darin, dass sie mehr Gefälle braucht als das Wasser, weil sowohl die inneren Bewegungswiderstände wie diejenigen vom Rand und am Grunde größer sind. (...) Der größte Unterschied in der Bewegung des Schuttstroms im Vergleich mit Wasser besteht darin, dass der Schuttstrom nicht nur fließt, sondern auch noch gleitet, und dass seine Geschwindigkeit infolge innerer Reibung und größerer Kohäsion viel geringer bleibt als diejenige des Wassers. (...) In der Bewegung eines Schuttstroms ist das Rutschen (Gleiten) bei geringem Wassergehalt stärker, mit Durchtränkung nimmt das Fließen zu - Endglied ist der Schlammstrom, der Murgang.*

### 2.3.1 Erd- und Schuttgang

dt. Synonyme: Schuttlawine, fließender Rutsch, Waldabbrüche, Hangabschälung, Ausplatzung, Murgang

engl. Synonyme: Rapid-earth-flow, debris avalanche

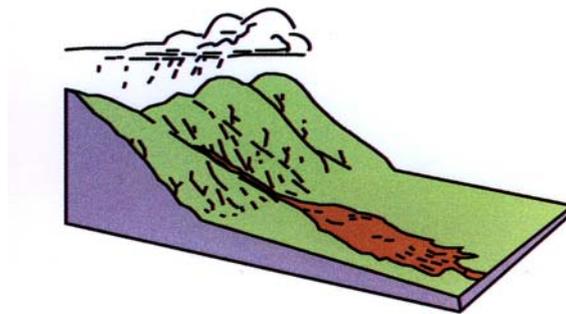
Die Kinematik von Erd- und Schuttgängen bzw. -strömen ist gekennzeichnet durch exzessive Niederschlagsereignisse, die die Wassergehalte des Bodens über seine Fließgrenze hinaus ansteigen lassen und eine explosionsartige Umwandlung von Lockergesteinsmassen in eine weichplastische bis dünnbreiige Suspension hervorrufen. Dieser Bewegungsmechanismus geht aus Translationsrutschungen hervor und tritt zumeist an stark geneigten, freien Hangpartien auf. Der Übergang von Locker- zu Festgestein fungiert in der Regel als präformierte Gleitfläche (Bunza et al. 1976).

Dominiert in der Fließmasse der Feinkornanteil (< 2 mm), so wird der Vorgang als Erdgang angesprochen, überwiegt die Kies- und Steinfraktion, wird er als Schuttgang bezeichnet (Laatsch & Grottenthaler 1972).

### 2.3.2 Mure im weiteren Sinne

BUNZA ET AL. (1976) beschreiben einen Murgang (Abb. 6) als eine sehr schnelle, extrem reißende Bewegung (quasiviskoses Fließen) einer breiartigen Suspension aus Wasser, Erde, grobem und feinem Schutt bis hin zur Blockgröße und zu Baumstämmen. Er tritt zumeist infolge starker Durchnässung des Bodens nach Starkregenereignissen oder Oberflächenab-

flussspitzen infolge Schneeschmelzen (Tognacca 1999) auf, die zu übermäßigen Strömungsdrücken innerhalb des Bodens führen und einen reißenden, breiigen Schuttstrom mit extrem hohen Geschwindigkeiten auslösen (Laatsch & Grottenthaler 1972). Die Fließcharakteristika von Murströmen werden u.a. nach ihrer Materialzusammensetzung und Feststoffkonzentration zwischen viskos und granular unterschieden (Tognacca 1999).



**Abb. 6:** Murgang i.w.S. unter dem Einfluss starken Niederschlags (aus USGS 2004)

Charakteristisch für Muren i.w.S. ist ein wellenförmiger, schubartiger Abfluss mit Ausbildung einer Front mit hoher Feststoffkonzentration, die nahezu gleichmäßig über die Abflusstiefe verteilt ist. An der Murfront ist die Schleppkraft am größten, so dass dort u.a. Gesteinsblöcke mit mehreren Metern Durchmesser transportiert werden können. Hinter der Front nehmen sowohl Abflusstiefe als auch Feststoffkonzentration ab (WSL 2006). Aufgrund des hohen Wassergehaltes wird das Murmaterial - abhängig von der Geländeform - oft weiträumig verschwemmt (PLANALP 2006).

Informationen zu Auslösern und Prozessen vulkanischer Muren, sogenannter Lahare, finden sich u.a. in der Arbeit von PARESCHI ET AL. (2002).

Untersuchungen von Muren haben im deutschsprachigen wie internationalen Raum große Tradition. Historische Murgänge werden u.a. in *Bergsturz und Menschenleben* von HEIM (1931) beschrieben. Das erste Standardwerk zu Muren stammt von STINY (1910). Ein Großteil existierender Untersuchungen widmet sich der Frage nach Ursachen und Auswirkungen der Vermurung großer Wildbachsysteme (Rieger 1999). Vergleichsweise wenige Arbeiten befassen sich explizit mit dem Phänomen Hangmure. Seit Anfang der 1980-er Jahre ist der Begriff Hangmure offiziell in die Literatur eingeführt (Takahashi 1981, Sassa 1984). Erst im Jahre 1987, nach zahlreichen Murkatastrophen in der Schweiz, differenzierte u.a. ZIMMERMANN (1990) Muren gemäß ihren Anrisszonen in Hang- und Talmuren (Tab. 1). In beiden Fällen liegen der Entstehung eines Murgangs dieselben physikalischen Mechanismen zu Grunde (Sassa 1984).

**Tab. 1:** Unterscheidung einzelner Murströme nach ihren Anrisszonen (nach Zimmermann (1990) u.a. aus Rieger (1999), Glade (2005) und Wichmann (2006))

<b>Hangmure</b> (slope debris flow) slope type starting zone		<b>Talmure</b> (gully debris flow) valley type starting zone	
<b>Typ 1a</b>	Anrisszone liegt in steilen, meist schwach konsolidierten Schutthängen. Die Ausbildung der Anbrüche erfolgt zumeist durch rückschreitende Erosion.	<b>Typ 3</b>	Ausgangsmaterialien sind Moränenablagerungen in steilen Gerinnen (Klammern und Wildbächen). Der Anbruch erfolgt vornehmlich über Instabilitäten an der Rinnensohle.
<b>Typ 1b</b>	Als Sedimentlieferanten dienen zumeist flache, translatorische Erd- bzw. Murrutsche, die sich in Muren verwandeln, wenn sie in Rinnen einmünden.	<b>Typ 4</b>	Murganganrisse erfolgen in steilen Gerinnen durch eine plötzliche Remobilisierung abgelagerter Geschiebemengen. Häufig sind die Ereignisse auf Verklausungen oder andere Abflussbehinderungen zurückzuführen.
<b>Typ 2</b>	Anrisszonen liegen im Kontaktbereich von Felswand und steiler Schutthalde. Hangwasser ist innerhalb der Felswand meist entlang von Trennflächen konzentriert und versickert größtenteils in Schutthalden.		

### 2.3.2.1 *Talmure*

dt. Synonyme: Schlammstrom, alpiner Schuttstrom, schnelles Fließen nassen Schutts  
 engl. Synonyme: Gully debris flow, mudflow, mud stream, mud-rock-flow, debris avalanche

Das Anrissgebiet einer Talmure liegt zumeist oberhalb eines Gerinnes oder innerhalb eines Wildbachbettes (Glade 2005), (Tab. 1). Das Ausgangsmaterial wird durch Prozesse wie Bodenkriechen oder Hanggleiten in das Gerinne eingetragen (Sassa 1984). Passiert das Murmaterial nach seiner Initialisierung eine Verengung innerhalb des Murbetts, etwa verursacht durch Felsen, eingeschwemmte Baumstämme etc., kann dies zu einem Aufstau und nachfolgend zu einer Verklausung führen (Bunza et al. 1976). Mit der dabei entstehenden Energieaufhöhung unterspült die Mure zumeist Böschungsfüße und trägt zu Ufer- und Feilenanbrüchen bei. Mitgeführte Bäume und Felsblöcke lassen einen Murstrom mit hohem (Tiefen)-Erosionsvermögen entstehen, der an seiner Front mit Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h (Bader & Kunz 1998) eine große zerstörerische Wirkung entfacht.

Eine Zusammenfassung charakteristischer Kenndaten von Talmuren und Informationen zu Volumina, Spitzenabflusswerten, durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten, Transportweiten etc. findet sich u.a. bei RICKENMANN (1999).

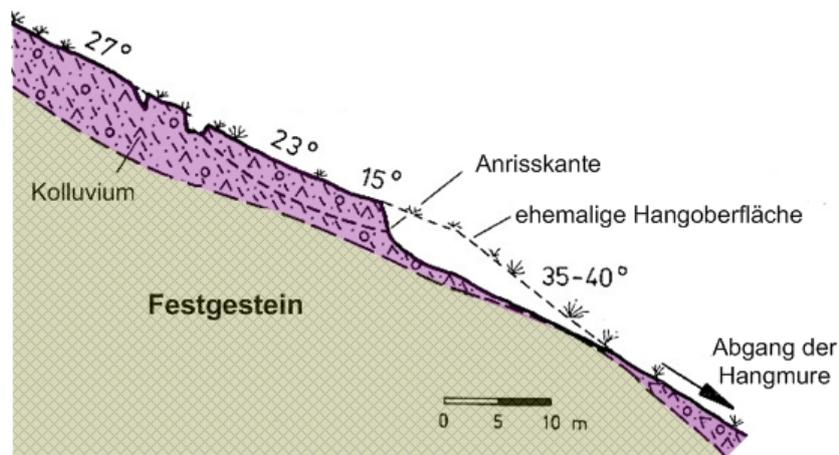
### **2.3.2.2      *Hangmure***

dt. Synonyme:            Fließerutschung, Hautrutsch, Hangexplosion

engl. Synonyme:        Slope debris flow, mudslide, shallow landslide, unconfined debris flow, hillslope (debris) flow, debris avalanche, slope explosion

Murgänge, die aufgrund einer Geländeinstabilität direkt an der Hangoberfläche abgehen und somit den Kriterien der Murtypen 1 und 2 aus Tabelle 1 entsprechen, werden als Hangmuren bezeichnet (u.a. Zimmermann 1990). Diese Bezeichnung trifft sowohl auf Freiland als auch auf Waldgebiete zu. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf Hangmuren des Typs 1. Hangmuren des Typs 2 wurden von RIEGER (1999) untersucht.

Die Kinematik von Hangmuren ist generell mit der von Nassschneelawinen (SchlammLawinen (nach AGN 2004)) bzw. mit dem Abfließen einer feststoffreichen Flüssigkeit vergleichbar (RUBD & ILFD 2007). Durch den plötzlich entstehenden, schnellen Bewegungsprozess werden an relativ stark (zwischen ca. 30° und 40°) geneigten Hängen (AGN 2004, Werlen 2004) zumeist nur oberflächennahe Deckschichten, oftmals nur Boden und viel Wasser mobilisiert und verfrachtet (AGN 2004, Bloetzer et al. 1998). Rollige, schwach bindige Hangauflagen aus Verwitterungsprodukten (BUWAL 1998) sind vornehmlich in Form von umgelagerten glazigenen und fluvioglazialen Sedimenten (Moser 1997) von vorgenannten Bewegungen betroffen. Hangmuren treten dabei oftmals ohne Ausbildung einer Gleitfläche als Produkt eines Scherbruchs auf (Abb. 7). Es bestehen jedoch graduelle Übergänge zu Gleit- und anderen Fließvorgängen, so dass auch bei Hangmuren Gleitflächen ausgebildet sein können (AGN 2004). Dies trifft zumeist auf oberflächennahe Rutschungen in Translationsform (vgl. Kap. 2.2.1.2) oder Schuttströme (vgl. Kap. 2.3.1) zu. Bei Einmündung von Hangmuren in Fließgewässer oder in Rinnen können sich tiefgründige Talmuren entwickeln (AGN 2004).



**Abb. 7:** Anrisszone einer Hangmure in Hang- und Verwitterungsschutt (Kolluvium) (modifiziert nach Moser & Hohensinn 1982/83)

Durch hohe Wassersättigung der Hangauflage nach Infiltration von Niederschlag und/oder durch Grundwasserwirkung entstehen erhöhte Strömungsdrucke, die die treibenden Kräfte im Hang erhöhen (Sassa 1984). Der Auslösemechanismus einer Hangmure liegt dabei zwischen hydrostatischem Grundbruch, Bodenverflüssigung<sup>2</sup> und bruchhafter Ausbildung einer Gleitfläche (AGN 2004). Er kann zu einem plötzlichen Abgang der Deckschichten führen, der Ähnlichkeiten zum Phänomen *Hangexplosion* (vgl. Kap. 2.2.1) zeigt.

#### *Schadwirkungen von Hangmuren*

Die Mobilität von Hangmuren, ihr spontanes Auftreten, ihre hohe Schleppekraft und die energiebezogene Entfaltung enormer Druckwirkung<sup>3</sup> initiieren ein erhebliches Schadenspotential. Boden, Vegetationsbedeckung, Bebauung und Verkehrswege können von Hangmuren mitgerissen werden, wodurch sowohl Menschen als auch Tiere zu Schaden kommen können (Thali & Bollinger 2000).

<sup>2</sup> Bodenverflüssigung: u.a. durch Erschütterung kann sich in vernässtem bis wassergesättigtem Boden ein Porenwasserdruck aufbauen, der sich allseitig fortsetzt. In Abhängigkeit von der Dichtigkeit des Bodens, dem Grenzspannung und der Bodenstruktur entsteht ein Porenwasserüberdruck, der zum Zusammenbruch des Korngefüges und zu plötzlicher Verflüssigung führt. In dichtem Boden tritt keine Verflüssigung auf. Bodenverflüssigung kommt häufig im Zusammenhang mit Erdbeben vor (<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>, Zugriff: 13.06.2007).

<sup>3</sup> Bei Hangmuren in Golzern im Maderanertal, CH, wurde ein Druck von mindestens  $P \sim 45 \text{ kN/m}^2$  vermutet (Thali & Bollinger 2000). Zum Vergleich: Für Lawinen hoher Intensität wird ein Druck von  $P > 30 \text{ kN/m}^2$  angegeben (Kienholz 1995).

Das flachgründig abgehende Bodengemisch einer Hangmure umfasst umgelagerte Volumina von wenigen m<sup>3</sup> bis hin zu mehreren 10.000 m<sup>3</sup> (Lateltin 1997, AGN 2004). Das ehemalige schweizer BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT, BUWAL (1999), gibt für Hangmuren Prozessgeschwindigkeiten von > 8,3 m/s an. Nach BLOETZER ET AL. (1998) bzw. PLANALP (2006) liegen die Verschiebungsgeschwindigkeiten - abhängig vom Wassergehalt des Bodens - zwischen 1 bis 10 m/s. AGN (2004) und WSL (2006) nennen maximale Geschwindigkeiten von 15 m/s<sup>(4)</sup>.

Das Ausmaß der Vulnerabilität eines Gebietes durch Hangmuren wird durch die Reichweite des Bewegungsprozesses bestimmt. Aufgrund ihres hohen Wasseranteils erreichen Hangmuren, abgesehen von hohen Prozessgeschwindigkeiten, auch große Verbringungsweiten (max. Erstreckung von Hangmuren: 105 m, vgl. Anlage II). Als maßgebende Parameter zur Abschätzung ihrer Reichweiten gelten die Mächtigkeit  $M_h$  der durch die Bewegung potentiell mobilisierbaren Schicht (Tab. 2), die Morphologie des betroffenen Geländes und die Rheologie des Materials - hauptsächlich bedingt durch den Einfluss des Wassers im Boden (AGN 2004). Nach WICHMANN (2006) wird die Reichweite von Murgängen stark durch den Tongehalt der Deckschicht beeinflusst. Hohe Tongehalte setzen die Durchlässigkeit des Materials herab, führen zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks und damit einhergehend zu geringerer Viskosität und größeren Reichweiten. Dies gilt im besonderen beim Abfluss eines feinstoffreichen Murmaterials in konkaven Querprofilen. Hier bleibt die Wasserphase besser im umgelagerten Material enthalten als in planarem oder konvexem Gelände (AGN 2004), (s. Kap. 4.5).

Bei Schichtmächtigkeiten  $M_h < 0,5$  m erfolgt gemäß LATELTIN (1997) bzw. BLOETZER ET AL. (1998) die Zuordnung zu schwacher Intensität. Mittlere bzw. starke Intensitäten liegen bei Mächtigkeiten der mobilisierbaren Schichten von < 2 m bzw.  $M_h > 2$  m vor (Tab. 2).

---

<sup>4</sup> In Anlehnung an die Klassifizierung von Massenbewegungen nach VARNES (1978) wird eine Rutschgeschwindigkeit von 15 m/s als *äußerst schnell* bezeichnet. Zum Vergleich: Die Geschwindigkeit eines sprintenden Menschen beträgt ca. 10 m/s.

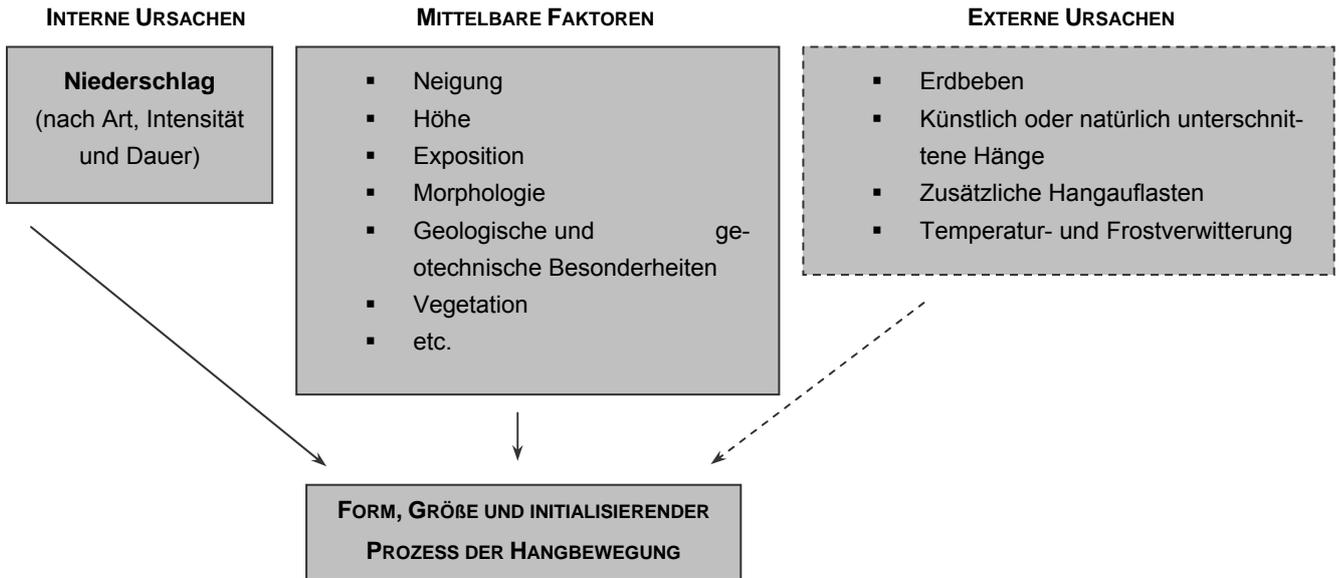
**Tab. 2:** Maßgebende Parameter zur Evaluierung der Hangmurintensität: Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht ( $M_h$ ) und der Ablagerungshöhe ( $h$ ) nach LATELTIN (1997) und BLOETZER ET AL. (1998)

Intensität	Beschreibung der Gefährdung
Schwache Intensität $M_h < 0,5m$	Auslaufbereich von Hangmuren - geringmächtige, abgebremste Schuttmassen. Die Gebäudestandsicherheit, Personen und Tiere sind in keiner Weise gefährdet.
Mittlere Intensität $0,5m < M_h < 2m$ ; $h < 1m$	Trotz geringen Tiefgangs kann mitgeführtes Geröll im Auslaufbereich zu Schäden an Gebäuden und Infrastrukturanlagen (Strassen etc.) führen und Menschen und Tiere im Freien gefährden. Die Wohnqualität eines Hauses kann gemindert werden, jedoch ohne seine Standsicherheit zu beeinträchtigen.
Starke Intensität $M_h > 2m$ ; $h > 1m$	Mit Wasser durchtränkte Geröll-, Schlamm- und Holzmassen führen zu großen strukturellen Schäden an Gebäudeteilen und Infrastrukturanlagen. Durch Einsturz- und Überflutungsgefahr sind Menschen und Tiere gefährdet. Durch Erosion und Geröllablagerungen kommt es zu großen Terrainveränderungen.

## 2.4 Ursachen von Hanginstabilität - die zentrale Rolle des Wassers

In der Naturgefahrenanalyse beeinflussen interne und externe Ursachen die Form, Größe und den initialisierenden Prozess einer Hangbewegung (Moser & Hohensinn 1982/83). Vereinzelt treten sie auch in Kombination auf (Tognacca 1999). Im Alpenraum, wo Niederschlagsereignisse als Haupttrigger von Erosionserscheinungen und Hanginstabilitäten gelten, sind für Hangbewegungen vor allem interne Ursachen verantwortlich (Moser 1980).

Nicht immer führen interne und externe Förderfaktoren allein zur Auslösung einer Hangbewegung. Ob sich zum Abgang prädestinierte Geländebereiche tatsächlich zu einer Hangbewegung entwickeln, hängt zudem von mittelbaren Faktoren (Abb. 8), wie Hangneigung, Höhenlage, Vegetationseinfluss etc., ab (Tognacca 1999). Zur Analyse mittelbarer Faktoren, die nach MOSER (1980) und MOSER und HOHENSINN (1982/83) einen unterschiedlichen Einfluss auf die Anbruchshäufigkeit bzw. auf Form und Vorgang des Anbruchs nehmen, wird auf Kapitel 4.2 verwiesen.



**Abb. 8:** Gegenüberstellung in- und externer Ursachen und mittelbarer Faktoren, die zu Hanginstabilitäten führen können (modifiziert nach Moser & Hohensinn 1982/83)

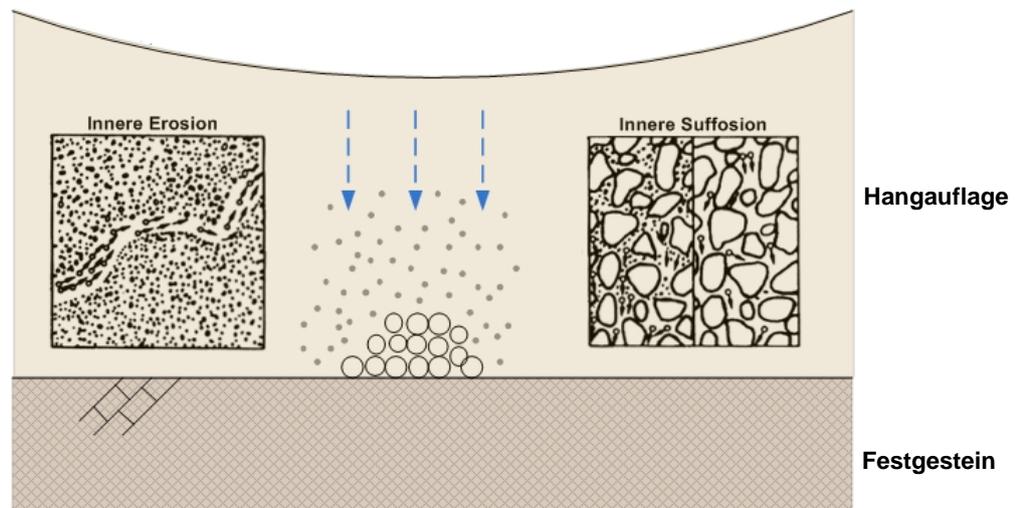
#### 2.4.1 Interne Ursachen

Innere Ursachen initiieren Hangbewegungen ohne sichtbare Änderungen in den Oberflächenverhältnissen (Moser 1980). Unterschiedliche Niederschlagsintensitäten bewirken im allgemeinen Änderungen in den hydrologisch-hydrostatischen Verhältnissen und Materialeigenschaften eines Lockergesteins bzw. Bodens, ohne dass sich dadurch die Oberflächenverhältnisse verändern. Niederschlag erhöht die treibenden Kräfte innerhalb der Hangaufgabe durch einen erhöhten Strömungsdruck und - bei bindigen Böden - durch eine fortschreitende Abnahme der Kohäsion (Terzaghi 1950, Moser 1980, Thielen 2006, Mitchel & Soga 2005). Der Systemwiderstand wird kleiner.

Auch bei der Auslösung von Hangmuren gilt Wasser als zentraler Trigger. Zahlreiche Autoren haben den ursächlichen Zusammenhang zwischen starken bzw. lang andauernden Niederschlägen und dem Auftreten von Hangmuren untersucht und bestätigt (Schoger 1988, Finlay et al. 1997, Thali & Bollinger 2000, Rickli 2001, Giannecchini 2006, Wichmann 2006 etc.).

Direkte oder indirekte Niederschläge führen gemäß TOGNACCA (1999) zu einem Anstieg des Hangwasserspiegels und damit zur Abnahme innerer Scherfestigkeiten. Sie sind damit Teil der vielfältigen Destabilisierung des Bodengefüges:

- Innere Erosion/innere Suffosion: zunehmende Schwächung und Deformation des Bodengefüges durch sukzessive Ausschwemmung von feinteiligen Bodenpartikeln in bevorzugten Porenkanälen infolge oberflächennaher Durchströmung des Hanges (auch in Moser & Hohensinn 1982/83, Sassa 1984, Wilkinson et al. 2002, Lang et al. 2003, Schulz et al. 2008), (Abb. 9). Dies gilt insbesondere für Böden hoher Ungleichförmigkeit.
- Chemische und physikalische Verwitterungsprozesse
- *Aktive Lagen* innerhalb von Permafrostgebieten tragen infolge des Einflusses von Tauphasen zu einem Festigkeitsverlust bei.



#### Legende

- Unverfestigte Zone
- ○ ○ Grundwasserwegkeiten

**Abb. 9:** Bildung von Schwäche­zonen in der Hangauf­lage durch den Einfluss innerer Erosion bzw. Suffosion (modifiziert nach Sassa 1984)

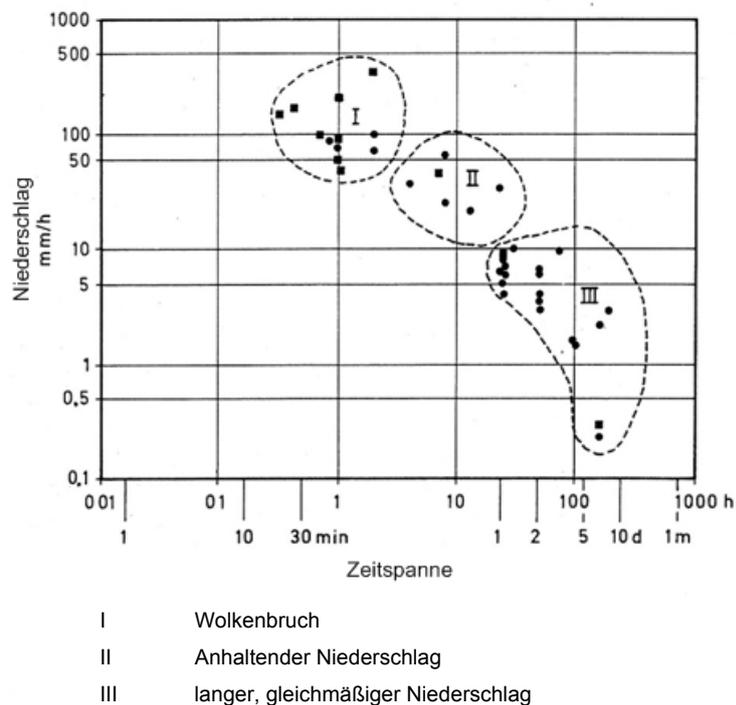
Lokaler, kurzzeitiger Starkregen, vor allem aber lang andauernde Regenfälle (Rickli et al. 2008) können zu einer dauerhaften Schuttau­f­sä­ti­gung mit zeitverzögerter Mobilisierung oberflächennaher Bodenhorizonte beitragen. In diesem Zusammenhang muss besonders eine Überlagerung intensiver Regenfälle mit Schneeschmelzen beachtet werden, die vornehmlich während vegetationsfreier Monate zu einer deutlichen Erhöhung des Oberflächenabflusses führt (Kany & Hammer 1985, Lateltin et al. 1997, Rieger 1999, Bonnard et al. 2008).

MOSER & HOHENSINN (1982/83) unterscheiden murauslösende Niederschläge in drei Intensitätsgruppen (Abb. 10):

Fall I: Niederschlag hoher Intensität (50 - 100 mm/h) von kurzer Dauer auf kleiner Einflussfläche

Fall II: Niederschlagsintensitäten zwischen 20 und 60 mm/h über einen Zeitraum von mehreren Stunden auf einer Einflussfläche von mehreren 1000 ha

Fall III: Gleichmäßiger Niederschlag geringer Intensität (2 mm/h) über einen Zeitraum einiger Tage, zumeist begleitet von starker Schneeschmelze



**Abb. 10:** Murauslösende Niederschlagsintensitäten des Alpenraums (nach Moser 1980, Moser & Hohensinn 1982/83)

Weitergehende Angaben zu lokalen, murauslösenden Niederschlagsintensitäten sind aufgrund kleinräumiger Variabilität und eines unzureichenden Datenerfassungsnetzes im Alpenraum an dieser Stelle nicht möglich.

Mächtige Feststoffdeponien in den intensiver verwitternden Kalkalpen bedingen größere Niederschlagsintensitäten zur Auslösung einer Mure als geringer mächtige Ablagerungen in den Zentralalpen (Rieger 1999). ZIMMERMANN ET AL. (1997) und BADER und KUNZ (1998) definieren murauslösende Niederschlagsintensitäten für die inner- und außeralpine Zone wie folgt:

Inneralpine Zone:  $I_N = 21 \cdot D^{0.72}$

Außeralpine Zone:  $I_N = 32 \cdot D^{0.70}$

Mittlere Niederschlagsintensität  $I_N$  in mm/h, Dauer des Regenereignisses  $D$  in h

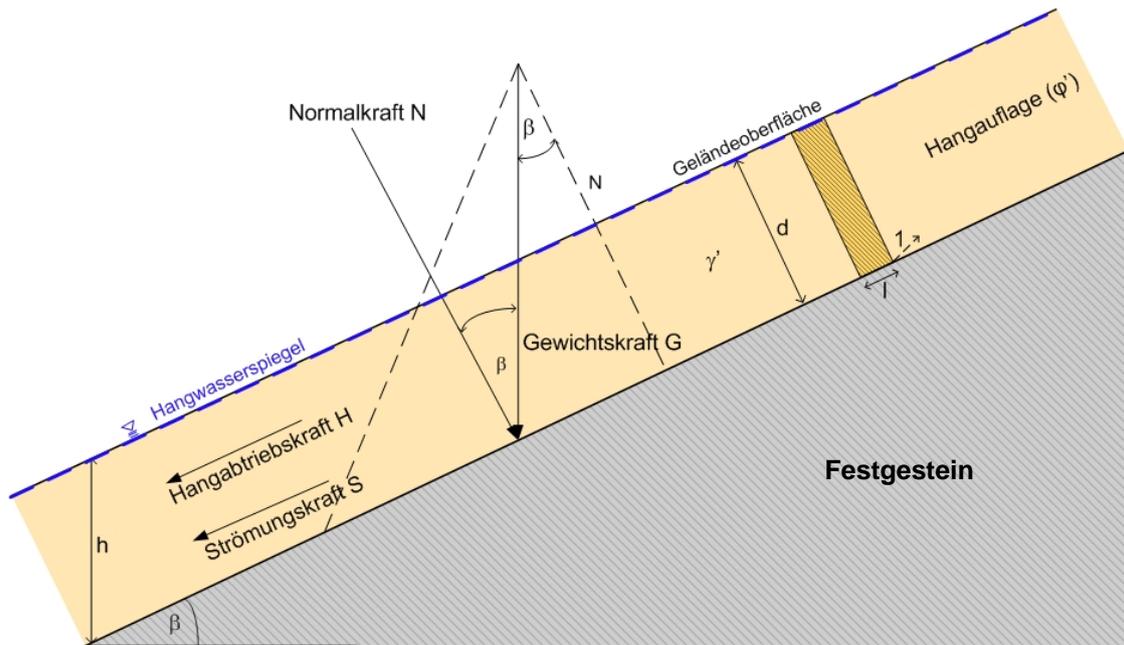
#### *Mechanische Wirkung des Wasser im Boden*

*... Es gibt keinen wichtigeren Stoff - und hierbei können wir an beliebige chemische Elemente und Verbindungen denken - der die Eigenschaften eines Erdstoffes wirksamer beeinflusst als das Wasser (Kèzdi 1969).*

Die Strömungskraft des Hangwassers gilt als wesentliche interne Ursache für die Entstehung von Hanginstabilitäten. In Boden infiltrierendes Wasser führt innerhalb zumeist rolliger, nahezu kohäsionsloser Hang- und Verwitterungsschuttdecken zur Reduzierung der für das statische Gleichgewicht des Hanges maßgeblichen Parameter. Eine Verringerung der Haftreibung und die Destabilisierung bzw. Auflösung von Feststoffbrücken zwischen den Granulaten tragen zu einer abnehmenden Stabilität des Korngerüstes bei. Die Wirkung von Kapillareffekten (scheinbare Kohäsion  $c_c$ ) begünstigt zunächst die Konsistenz innerhalb des Hang- und Verwitterungsschutts. Mit steigendem Wassergehalt wird aber immer mehr Luft aus den Poren des granularen Materials gedrängt, so dass die für die Kapillareffekte notwendige Wasser-Luft-Grenzfläche stetig abnimmt (Schulz et al. 2008). Bei vollständiger Wassersättigung des Hangschuttkörpers gehen Saugspannungen und scheinbare Kohäsion komplett verloren (Thielen 2006). Somit können Strömungsdrucke ohne Porenwasserüberdruckwirkungen die treibenden Kräfte innerhalb eines Hanges deutlich erhöhen (v. Asch et al. 1999).

Zusätzlich kann es zu einer überdruckbedingten Destabilisierung des Hanges kommen. In lokal inpermeablen Böden können sich unter Konzentration schneller Wasserflüsse Strömungs- bzw. Porenwasserüberdrucke aufbauen, die zunächst eine fortschreitende Ausschwemmung von Feinteilen bewirken und letztlich zu einer Hangexplosion führen (Hamberger 2007, AGN 2000).

Rechnerisch orientieren sich die Annahmen zur rein sättigungsbedingten Reduzierung der Standsicherheit an Ansätzen u.a. von HOHENSINN (1979), MOSER und HOHENSINN (1982/83), SCHOGER (1988) und HAMBERGER (2007). Die nachfolgenden Standsicherheitsbetrachtungen basieren auf der Annahme einer Vollsättigung des Hanges bis zur Geländeoberfläche (Abb. 11).



**Abb. 11:** Hangsegment unter Einfluss hangparalleler Durchströmung

$\gamma$	Wichte des adhäsiv feuchten Bodens	20 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma'$	Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = \gamma - (1 - n_{eff}) \cdot \gamma_w$ [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Wichte des Wassers	10 kN/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Dichte des Wassers	1000 kg/m <sup>3</sup>
$g$	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>

Treibend:

$$T = H + S = \gamma' \cdot d \cdot l \cdot \sin \beta + d \cdot l \cdot \rho_w \cdot g \cdot \sin \beta$$

$$T = H + S = \gamma' \cdot d \cdot l \cdot \sin \beta + d \cdot l \cdot \gamma_w \cdot \sin \beta$$

Rückhaltend:

$$R = N \cdot \tan \varphi' = \gamma' \cdot d \cdot l \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi'$$

Standsicherheitsnachweis:  $\eta = \frac{R}{T} \geq 1$

$$\eta = \frac{\gamma' \cdot d \cdot l \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi'}{\gamma' \cdot d \cdot l \cdot \sin \beta + d \cdot l \cdot \gamma_w \cdot \sin \beta} = \frac{\tan \varphi'}{\left(1 + \frac{\gamma_w}{\gamma'}\right) \cdot \tan \beta} \quad [-] \quad \text{Gl.1}$$

Das Ergebnis der Standsicherheitsbetrachtung aus Gleichung 1 zeigt, dass sich z.B. bei  $\gamma' = 14,5 \text{ kN/m}^3$  die Sicherheit eines Hanges  $\eta$  auf ca. 60 % reduziert.

Dennoch gibt es eine Reihe von Hängen, deren Neigung deutlich größer ist als Gleichung 1 zulässt, ohne dass diese Hänge unmittelbar gefährdet sind. Der Einfluss der kapillaren Saugspannung, die wie eine scheinbare Kohäsion wirkt, vergrößert die Scherfestigkeit in diesen Fällen deutlich (Thielen 2006, Hamberger 2007).

#### **2.4.2 Externe Ursachen**

Einflüsse, die eine Zunahme der wirkenden Scherspannungen bei unveränderten Scherfestigkeiten hervorrufen, gehen zumeist auf Ursachen an der Erdoberfläche zurück (Terzaghi 1950). Zu Veränderungen gefährdungsimmanenter Verhältnisse, die durch Ent- und Belasten einer Böschung oder durch Erschütterungen verursacht werden können (Werlen 2004), zählen nach MOSER (1980):

- Versteilung eines Hanges durch anthropogen verursachte Auf- und Abböschung oder natürliche Tiefenerosion führen zu veränderten Stabilitätsverhältnissen
- Zusätzliche Auflasten am Hang führen zu veränderten Stabilitätsverhältnissen - sofern es sich um kohäsive Böden handelt (vgl. Gl. 12, Kap. 5.3.3)
- Erdbeben: schnelle Druckwechsel und Spannungsumlagerungen, die den Gleichgewichtszustand eines Hanges negativ beeinflussen (auch BayLfU 2005)
- Sprengeffekte durch Temperatur- und Frostverwitterung: Entscheidende Parameter sind Temperaturdehnungskoeffizient, -leitfähigkeit und Elastizität des Gesteins. Bei wiederholt aufeinander folgenden Frost- und Tauzyklen und damit einhergehender zunehmender Wasseraufnahme verstärkt sich die Wirkung der Sprengkraft des Wassers (BayLfU 2005).

### 3 Einführung in die instrumentelle Gefährdungsanalyse

#### 3.1 Geoinformationssysteme (GIS)

Der Begriff *GIS* steht für ein Geographisches Informationssystem, das in Anlehnung an den anglo-amerikanischen Sprachgebrauch mittlerweile die allgemeinere Bezeichnung Geo-Informationssystem angenommen hat (Buck 2001). GI-Systeme erfahren in den letzten Jahren durch zunehmende Rechnerkapazitäten einen Boom und sind inzwischen in nahezu allen Bereichen der Geowissenschaften anzutreffen.

Nach BILL (1999) ist ein Geo-Informationssystem ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden. Daten, die die Grundlage für Geo-Informationssysteme bieten, verfügen stets über räumliche Koordinaten. Dabei können große Mengen heterogener Datentypen (z.B. Vektor- oder Rasterdaten, alphanumerische Daten und Multimedia-Daten) verarbeitet werden.

##### *Geoinformationssysteme zur Beurteilung des Hangbewegungspotentials*

Geoinformationssysteme zur Vorhersage von Hangbewegungen und ihrem Gefährdungspotential basieren auf umfangreichem Monitoring, u.a. auch auf Sensorik (Boley & Trauner 2009). Durch Kombination und Interaktion von Messreihen, ihre nachfolgende Speicherung im GIS und ihre Koppelung mit 2-D bzw. 3-D Modellierungen erfolgen geotechnische, computergesteuerte Simulationen von instabilen Hangbereichen (Mayer et al. 2005).

2-D Informationssysteme werden in den Geowissenschaften für die Erstellung und Auswertung von Karten genutzt. Auch Annahmen zur Geometrie- und Stabilitätsbestimmung rutschgefährdeter Hänge und Böschungen basieren üblicherweise auf s-dimensionalen Geländeprofilen (Cornforth 2005). So konnten bereits 2-dimensionale geotechnische Modelle entworfen werden, die die Entwicklung primärer Kriechphasen von Massenbewegungen simulieren (Parotidis 2001). Ist dagegen die Oberflächengeometrie eines in Bewegung befindlichen Hanges dergestalt komplex, dass über seine Länge und über die Zeit Veränderlichkeiten z.B. im geologischen Profil oder im Verlauf des Grundwasserniveaus auftreten, so ist bis jetzt eine analytische Lösung ohne Verfügbarkeit der 4. Dimension nicht erreichbar. Es kann jedoch mit Hilfe eines 3-dimensionalen Profilschnitts eine Gefährdungsabschätzung erzielt werden (Cornforth 2005). Eine strukturierte Menge von Geokörpern erlaubt dabei die Beschreibung des Untergrundes als Ganzes. Sie macht auch einem Nichtfachmann die Komplexität des Unterfangens begreifbar (Elfers et al. 2004).

Mit dem Zugriff auf immer umfangreichere digitale geowissenschaftliche Datenbanken gewann die 3-D Modellierung während der letzten Jahre zunehmend an Bedeutung. Da es bislang noch keine brauchbaren Sicherheitskonzepte für die Langzeitstabilität von Hängen gibt, wurden 3-D Simulationen bis dato kaum flächendeckend und routinemäßig eingesetzt. Geologische Modellierungen basieren heutzutage noch weitgehend auf geologischen Karten, Profilschnitten oder sonstigen Spezialkarten. Dabei ist gerade im Bereich von Hangbewegungen die Visualisierung geologischer Schichten mit ihren räumlichen und zeitlichen Beziehungen zueinander von großer Bedeutung.

Verlässliche Warnsysteme für Hangbewegungen basieren u.a. auf einem Konzept der Kopplung numerischer Simulationen (SIMS) und Geographischer Informationssysteme (GIS). Innerhalb der SIMS werden dabei ein übertragbarer numerischer Simulationsalgorithmus für Hangbewegungen und ein darauf aufbauendes Sicherheitskonzept generiert. Damit wird es möglich, basierend auf vorhandenen Ereignisdaten, Aussagen über die Stabilität eines Hanges, sein zukünftiges Systemverhalten und seine potentiellen Schadensszenarien zu treffen. Es entsteht eine *Kommunikation* zwischen Messdaten/GIS und geotechnischem Modell. Die Ergebnisse der SIMS werden ins GIS übertragen, dort in geeigneter Weise visualisiert und - wenn möglich - mit weiteren Informationen angereichert (Trauner et al. 2007).

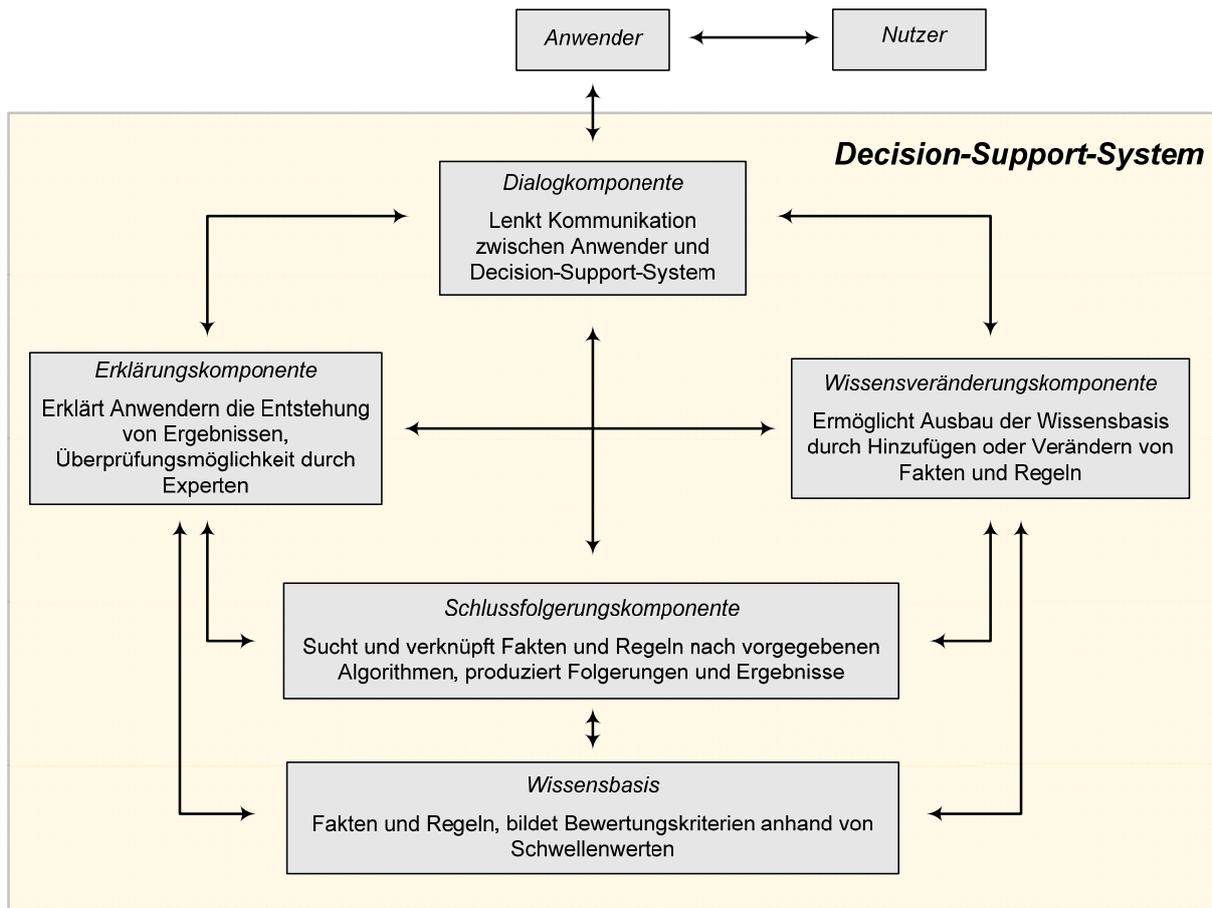
### 3.2 Decision-Support-Systeme (DSS)

*Der Anwendungseffekt von Expertensystemen ist der Problemkomplexität und dem Niveaufälle zwischen Experten und eigentlichem Nutzer proportional (unbekannter Autor).*

Wissensbasierte Systeme (WBS) beruhen im Kern auf einer umfangreichen Informationsakquise und der Zuverfügungstellung ihres Inhalts in Form einer Wissensbasis. Zusammen mit untergeordneten Einheiten, wie Expertensystemen (XPS) bzw. Decision-Support-Systemen (DSS), die sich zusätzlicher Problemlösungskomponenten bedienen, gehören WBS dem Forschungsgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI; engl.: artificial intelligence) an und haben sich seit mehr als fünf Jahrzehnten in vielen Anwendungsbereichen etabliert. Werden KI-Technologien in Geo-Informationssysteme integriert, spricht man von Intelligen-ten Geo-Informationssystemen (I-GIS) (Buck 2001).

Decision-Support-Systeme, im Deutschen auch als Entscheidungsunterstützungssysteme bezeichnet, verwalten nicht nur Wissen bezüglich eines bestimmten Aufgabenbereiches, ähnlich einem WBS, sondern ziehen unter Anwendung der Wissensbasis Schlussfolgerungen aus gegebenen Informationen (Wagner 1992), indem sie interpretieren, diagnostizieren und prognostizieren, planen, entwerfen und kontrollieren (Bullinger & Fähnrich 1988). Sie bieten dem Nutzer durch Nachahmung menschlichen Verhaltens und Denkens - unter Ein-

beziehung eines interdisziplinären Erfahrungsschatzes von Experten - Lösungskonzepte für komplexe Problematiken (Engesser 1993). Des weiteren ermöglichen sie eine zeiteffiziente, operative und strategische Unterstützung bei der Entscheidungsfindung, so dass Fehlentscheidungen vermieden werden und ein positiver Entscheidungsprozess beschleunigt wird. Dies gilt auch, wenn der Entscheidungsträger keine fundierten Fachkenntnisse besitzt. Dabei ist nach WAGNER (1992) das Sachgebietswissen, abgebildet in der Wissensbasis, stets vom Kontroll- und Schlussfolgerungsmechanismus getrennt.



**Abb. 12:** Struktur eines Decision-Support-Systems (modifiziert nach Zabel & Hempel 2000)

Es werden grundsätzlich zwei Arten der Wissensbeschreibung unterschieden (Herden & Hein 1990):

- Analytische Beschreibung: Literatur- und Messwerte in Form von Charakteristika und Gesetzmäßigkeiten (Fakten)
- Heuristische Beschreibung: Erfahrungs- und Intuitionswerte eines Experten (Empirie)

Der Kern eines induktiven DSSs umfasst die Wissensbasis und die angeschlossene Schlussfolgerungskomponente. Erste bezieht ihr Wissen aus Fallstudien, aus deren Informa-

tionen Schlussfolgerungen oder Empfehlungen in Form von Algorithmen abgeleitet werden (Wagner 1992). In der Regel folgen die Schlussfolgerungskomponenten dynamischen Wasserfallmodellen (Herrmann 1997), die auf „wenn (Bedingung) - dann (Schlussfolgerung)“ - Prinzipien (Buck 2001) beruhen und in der Beurteilungsphase in eine Ja/Nein-Entscheidung münden (Egli 1996). Zumeist verfügen die Systeme über Wissensveränderungskomponenten, die durch Austausch einzelner Komponenten neues Wissen hinzufügen, wodurch eine Anpassung an individuelle Bedingungen ermöglicht wird (Abb. 12).

Wissensbasierte Systeme werden u.a. im Bereich der Medizin als schnelle und wirklichkeitsnahe Diagnosesysteme eingesetzt. Detailliert konzipierte Fragebögen ermöglichen die Ausarbeitung eines medizinischen Behandlungskonzepts und die Bereitstellung von Therapieplänen (Pfeffer 2007) - vor allem bei Patienten, die sich auf Grund ihres Krankheitsbildes den behandelnden Ärzten nicht ausreichend genau mitteilen können. DSSe finden aber auch Anwendung im Bereich automatischer Leitsysteme, in Robotersystemen zur Produktautomatisierung (Bullinger et al. 1988). Seit einigen Jahren sind sie auch im Katastrophenschutz (Hangbewegungen, Hochwasser- resp. Deichschutz (Egli 1996, LUBW 2005 etc.)) etabliert.

#### *DS-Systeme zur Beurteilung des Hangbewegungspotentials*

Wissensbasierte Systeme wirken sowohl unterstützend bei der Prozessanalyse des Ist-Zustandes, zur Vorhersage von Eintrittswahrscheinlichkeiten, als auch bei der Anleitung zur Durchführung von Vorkehrungsmaßnahmen. Erkenntnisse aus erfolgten Katastrophenereignissen haben stets einen hohen Lernwert und tragen zur Präzisierung der Wissensbasis bei.

Der momentane Kenntnis- und Forschungsstand im Bereich von Expertensystemen im Zusammenhang mit Hangbewegungen ist wie folgt zu beschreiben:

Unter (1) und (2) werden Erfassungsbögen zur Aufnahme bereits eingetretener Bewegungsvorgänge vorgestellt, deren Auswertungen die Grundlage für Wissensbasen innerhalb der DS-Systeme bilden und zu einem besseren Verständnis bekannter Hangbewegungsprozesse beitragen. Unter (3) wird ein Expertensystem - speziell ausgerichtet auf Hangmuren - vorgestellt.

- (1) Zur Erfassung von Unwetterschäden u.a. im Gebiet der Sachselner Wildbäche, Schweiz, entstand im Zusammenhang mit dem WSL-Projekt *Vegetationswirkungen und Rutschungen* (Rickli 2001) ein standardisiertes Auswertungsformular. Es ermöglicht die Aufnahme von Angaben zum Rutschhang und zur Rutschfläche, aber auch zu wichtigen stabilitätsbeeinflussenden Faktoren eines Hanges, wie Informationen zu Bodenbeschaffenheit, Locker- und Festgesteinseigenschaften und zu hydrologischen, topographischen und geomorphologischen Aspekten. Zudem werden Angaben zur Vegetation und zur Bewirtschaftungsform der Lokalitäten vermerkt. Das *Konzept*

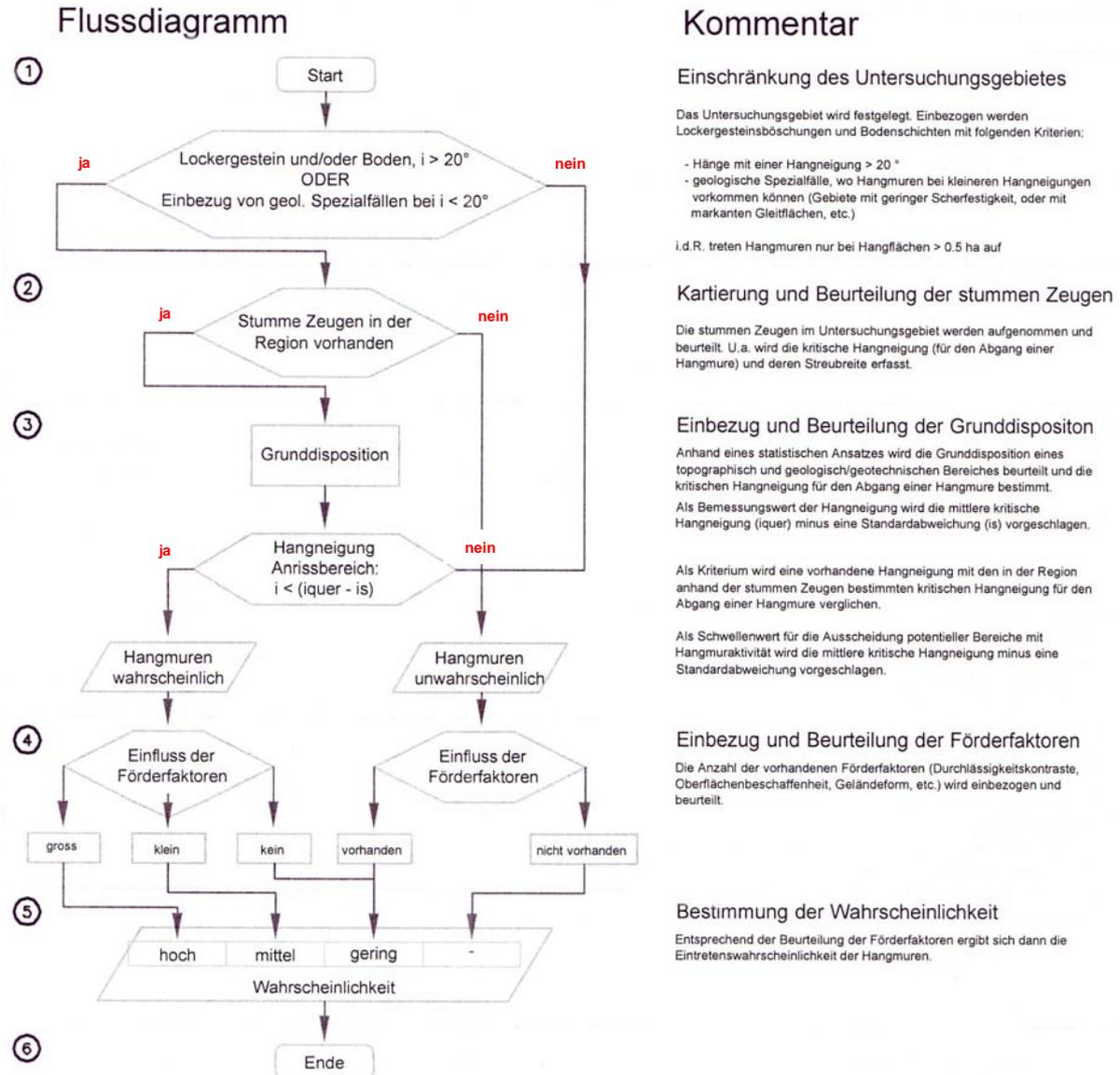
*Sachseln* zeichnet sich zudem durch eine ausführliche Anleitung zum Auswertungsformular aus.

Vergleichbare Auswertungsformulare finden sich u.a. bei RICKLI ET AL. (2008) und NIEDERSCHICK (2007), sowie in Arbeiten der Arbeitsgruppe um Prof. Moser, Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, u.a. von BÜCH (2003), HAMBERGER (2000), RENTSCHLER (1992), SCHÄDLER (2004) und WERNER (2001).

(2) Aus *Empfehlungen zum Erkennen und Erfassen von Rutschungen des Arbeitskreises 4.2 - Böschungen* der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), (Deutsch et al. 1997) ist ein Erfassungsbogen für Rutschungen entstanden, der den Vorgaben der internationalen Dokumentation von Rutschungen im Rahmen der IDNDR (International Decade of Natural Disaster Reduction) angepasst ist und als Checkliste bei der Untersuchung von Rutschungen dient. Das Auswertungsformular gliedert sich in *Allgemeine Angaben* und *Zustand vor und nach dem Ereignis*. Dabei fließen geotechnische, hydrogeologische und klimatische Angaben ebenso in die Erkundung ein, wie ausführliche Beschreibungen des Rutschkörpers, die Ursachen seiner Entstehung und Informationen über seine weitere Überwachung und mögliche Stabilisierung. Für den Erfassungsbogen sind, abgesehen von einer Zusammenstellung regional gebräuchlicher Begriffe für verschiedene Bewegungstypen, keine weiteren Erläuterungen für den Anwender vorgesehen.

(3) Ein Entwurf der ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (AGN 2004) zeigt ein Flussdiagramm samt Erläuterungen zur Gefahreneinschätzung von Hangmuren (Abb. 13). Das Konzept beschreibt ein sechs-stufiges Flussdiagramm, das sich im wesentlichen auf die geologische Beschreibung des Hanges, seine Neigung, das Vorhandensein stummer Zeugen, seine Grunddisposition und weitere Förderfaktoren stützt. Der Kommentar des Entwurfes sieht bei der Beurteilung der Grunddisposition und der Förderfaktoren detaillierte Abfragemodule verschiedener Einflüsse, wie Durchlässigkeitsdiskontinuitäten, hydrologisch-hydrogeologisches Einzugsgebiet etc. vor. Im Flussdiagramm sind die einzelnen Abfrageschritte jedoch nicht dargestellt.

Auch BUWAL (1999) beschreibt in *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren* den quantitativen Ereignisbaum als *Tool* zur Gefahrenanalyse.



**Abb. 13:** Entwurf eines Decision-Support-Systems der ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (AGN 2004)

Die unter (1) und (2) vorgestellten Arbeiten dienen der Aufnahme und Einschätzung abgegangener Rutschungen i.w.S.<sup>5</sup> bezüglich ihres Mechanismus, ihrer Ausdehnung und ihrer vermuteten Weiterentwicklung. Die Auswertungsbögen sind für eine erste Vor-Ort-Einschätzung vorbildlich in ihrer Systematik und Übersichtlichkeit. Zudem nimmt RICKLI (2001) in (1) den Einflussfaktor Vegetation in sein Erfassungsprotokoll auf. Entscheidende bodenmechanische bzw. geotechnische Einflussparameter finden jedoch unter (1) und (2) eine zu geringe Berücksichtigung. Ihre systematische Generierung ist mit den aufgezeigten Erfassungsbögen kaum möglich.

<sup>5</sup> Unter *Rutschungen im weiteren Sinne* werden hangabwärts gerichtete Bewegungen von Locker- und Festgesteinsmassen verstanden (AGN 2004).

Der unter (3) aufgezeigte Workflow nach AGN (2004), (Abb. 13) stellt mit einem dem Flussdiagramm beigefügten Kommentar einen verständlichen und benutzerfreundlichen Entwurf eines Decision-Support-Systems dar - speziell ausgerichtet auf Hangmuren. Durch Reduzierung des Abfragediagramms auf das Vorhandensein stummer Zeugen, die Beurteilung der Grunddisposition und die kritische Hangneigung wird jedoch - ebenso wie unter (1) und (2) - eine Evaluierung entscheidender geotechnischer Kennwerte vernachlässigt. Zwar wird in (3), Stufe ④ (Abb. 13) eine Einbeziehung und Beurteilung weiterer Förderfaktoren vorgenommen, diese umfassen jedoch nicht das gesamte Spektrum geotechnisch relevanter Einflussfaktoren für die Beurteilung des Risikopotentials von Hangmuren. Damit wird der Systementwurf von AGN (2004) nur einer ersten Vorab-Klassifizierung des Gefährdungspotentials, nicht aber einer tiefgründigen Untersuchung unter Mitführung aller relevanten geotechnischen Gesichtspunkte gerecht.

### 3.3 Mangelnde Genauigkeit von GI-Systemen - Lücke für DS-Systeme

Aufgrund der Komplexität von Georisiken stellen Modellierungen mittels GI-Systemen grundsätzlich ein Werkzeug dar, mittels dessen Interaktionen verschiedener Prozesse und Daten zu erfassen, zu verknüpfen, aufzubereiten und zu bewerten sind. Trotz fortschreitender Entwicklung automatischer Datenaufnahme- und Weiterverarbeitungsprozesse leiden Simulationsergebnisse nach wie vor unter einer unzureichenden Datengrundlage (vgl. Kapitel 4.1.3), Datenaufbereitung, einem mangelhaften Digitalisierungsprozess und Ungenauigkeiten im digitalen Höhenmodell (Werlen 2004). Zudem zeigen geologische Grundlagenkarten durch maßstabsbedingte Generalisierungen oftmals eine unzureichende Genauigkeit, die sich in Simulationen, als deren Basis sie dienen, fortsetzt. GLADE (2005) bemerkt mit dem Satz

*Each event is changing the catchment conditions,*

dass sich u.a. die Morphologie eines Untersuchungsgebietes sowohl durch anthropogene als auch geogene Einflüsse innerhalb kürzester Zeit derart verändern kann, dass bestehende Karten und Datenbasen an Aktualität verlieren. Hohe Kosten und hoher Zeitaufwand, die mit einer umfassenden, lokalen Datenakquise in der Praxis einhergehen, verhindern jedoch häufig eine Überarbeitung der Grundlagendaten im Feld, so dass sich Simulationen teilweise auf bereits überholte Daten stützen. Dies kann in Konsequenz zu einer Ausweisung von Gefahrenbereichen führen, die in der Natur nicht so existieren, wie sie im GIS dargestellt werden (BayLfU 2008a). In diesem Zusammenhang sind eine lokalmaßstäbliche Präzisierung bereits bestehender Karten vor Ort im Gelände und vor allem das persönliche Urteilungsvermögen eines Datenaufnehmers entscheidend für eine Qualitätssicherung von Eingangsdaten im GI-System (Cascini et al. 2005).

Gefahrenhinweiskarten werden meist in regionalem Maßstab erstellt. Dabei bleiben mitunter relevante lokalmaßstäbliche Merkmale unberücksichtigt, da sie in dieser Auflösung durch das GIS nicht generierbar sind. HAMBERGER (2000) bemerkt, dass im Untersuchungsgebiet Melchtal (CH) rutschungsrelevante Parameter, wie z.B. morphologische Formen im Rutschungsumfeld unberücksichtigt bleiben mussten, da diese bei der Geländeaufnahme zwar erhoben wurden, aber im GIS nicht flächendeckend generiert werden konnten. VON POSCHINGER (1998) fügt allgemein hinzu, dass bei Einhaltung eines lokalen Maßstabes GIS-Systeme rasch an ihre Grenzen stoßen. Des Weiteren nehmen Gefahrenhinweiskarten nur geogene Gefährdungen auf. Anthropogene Einflüsse bleiben unberücksichtigt, obwohl gerade sie auf die Hangmurentstehung einen nicht zu unterschätzenden Einfluss haben.

RICKLI und BUCHER (2003) weisen auf eine potentielle Lageungenauigkeit von Aufschlusspunkten beim Einsatz von Positionierungssystemen (GPS) hin. Dabei kann es zu horizontalen Abweichungen von bis zu 15 m kommen, so dass Untersuchungspunkte in angrenzende Rasterzellen verrutschen. WERLEN (2004) stellt in den schweizer Untersuchungsgebieten Eggwil, Frutigen, Grindelwald und Napf (s. Anlage I) fest, dass auf Basis eines digitalen Höhenmodells berechnete Hangneigungen im Vergleich zu Messungen im Gelände um bis zu 5° reduziert wurden. Ähnliches berichten auch CASADEI ET AL. (2003) über Daten eines Untersuchungsgebietes nahe El Granada in Kalifornien, USA. Die Abweichungen betreffen vor allem Geländeübergänge, die bei einer Gefahrenanalyse hinsichtlich des Aufbaus von Porenwasserüberdrücken besonders zu berücksichtigen sind. WERLEN (2004) fügt diesbezüglich an:

*Es ist sogar ratsam, diese Stellen (Anmerkung: Bereiche, in denen Abweichungen zwischen im GIS berechneten und real im Feld gemessenen Hangneigungen auftreten) im Gelände aufzusuchen, um eine sichere Abschätzung der Gefahr zu gewährleisten.*

Vorgenannte Anmerkungen unterstreichen, dass die Anwendung von Geoinformationssystemen eine intensive Geländeaufnahme grundsätzlich nicht ersetzen kann (v. Poschinger 1998). Diesen Sachverhalt greift das vorliegende DSS auf, indem es in der Vorhersage der Eintrittswahrscheinlichkeit durch eine ausschließliche Vor-Ort Einschätzung ganz bewusst die Kenntnis der örtlichen Hangsituation sucht und nicht von durch Karten festgeschriebenen Umweltbedingungen und Annahmen ausgeht.

Um das DSS möglichst wirtschaftlich auszurichten, sind jedoch vereinzelt Pauschalierungen sowohl bezüglich der Faktoren der Wissensbasis als auch in der Schlussfolgerungskomponente nicht völlig zu umgehen. Zudem sind einige Faktoren aufgrund mangelnder Feldinformationen mit einer unzureichenden Datengrundlage hinterlegt, die zu Verallgemeinerungen zwingt. Jedoch ist für die Entscheidungsfindung stets ein lokalmaßstäblicher Abgleich der

Ergebnisse der Gefährdungsanalyse mit der realen Geländesituation möglich. Eine große Positionsgenauigkeit des Gefährdungsbereiches bleibt somit erhalten.

Das hier vorgelegte DS-System sieht sich in der Praxis als eine Ergänzung bzw. lokalmaßstäbliche Präzisierung bereits bestehender regionalmaßstäblicher GI-Systeme bzw. Gefahrenhinweiskarten. Mittels der konzipierten Methode können geogene *und* anthropogene Gefährdungspotentiale insbesondere von Hangbereichen bestimmt werden, denen in der Gefahrenanalyse eine erhöhte Bedeutung durch ein besonderes wirtschaftliches und/oder gesellschaftliches Interesse zukommt.

## **4 Hangmurauslösende Faktoren - Generierung der DSS-Wissensbasis**

### **4.1 Problematik exakter Wissensbasen**

Zur Generierung einer möglichst wirklichkeitsnahen, aussagekräftigen Geodatenbank bzw. Wissensbasis innerhalb eines DSSs ist die zuverlässige Bestimmung und fehlerfreie Zusammenstellung geologischer und geotechnischer Parameter entscheidend. Nur durch die Reduzierung ihrer Fehleranfälligkeit kann auf Dauer eine exakte Gefahrenanalyse erbracht werden.

Abgesehen vom Risiko einer nicht ausreichenden Berücksichtigung geologischer Anomalien kann es bereits bei der Probenentnahme im Gelände und bei der Untersuchung von Bodeneigenschaften im Labor zu Ungenauigkeiten kommen. Vor allem aber können Missinterpretationen bei der Auswertung von Daten zu einem hohen Fehlereinfluss führen. Nachfolgend werden Fehlerquellen und Ungenauigkeiten im Aufbau von Wissensbasen benannt.

#### **4.1.1 Heterogene Geologie**

Ungleiche Sedimentations- und Erosionsprozesse führen zu heterogenen geologischen Bedingungen, die *Boden* zu einem komplexen System mit kleinräumig variierenden Parametern machen, die niemals - selbst bei sehr dichtem Erkundungsraster - zur Gänze erfasst werden können. Besonders in glazigen überprägten Bereichen, wie im hier betrachteten Alpenraum, kann es u.a. durch Schichtverdopplungen, -verschuppungen und partielle Überkonsolidierung zu kleinräumigen Heterogenitäten kommen, die mit einem wirtschaftlich vertretbaren Erkundungskonzept nicht erfassbar sind.

#### **4.1.2 Datenauswahl und -menge**

Die Heterogenität der Geologie veranlaßt sowohl aufgrund der Datengewinnung im Gelände, der Auswertung der Proben im Labor als auch der Auswahl von Primärdaten aus Datenpools stets zu subjektiven Entscheidungen.

Der ordnungsgemäße Abgleich entscheidender geotechnischer Parameter mit der Ist-Situation im Gelände setzt zunächst die eindeutige Ansprache bzw. Klassifizierung des Bodens, etwa nach DIN 18196, voraus. Diesem Schritt kommt besonders dann allergrößte Bedeutung zu, wenn aus Kostengründen eine aufwendige Beprobung vermieden werden soll. RACKWITZ (1983) führt hierzu aus:

*Es sind subjektive Wahrscheinlichkeiten, die vom Ingenieur in jedem Einzelfall festzulegen sind und zahlenmäßig nicht mit denen eines anderen Ingenieurs überein zu stimmen brauchen; selbst wenn für beide die objektiven Tatbestände für eine Klassifizierung vorgegeben sind. Solche Unterschiede sind der Ausdruck unterschiedlicher Bewertung einzelner Komponenten objektiver Tatbestände aufgrund verschiedener Ausbildung, Erfahrung und Temperamente.*

Wichtig für die Datengenerierung - dem sogenannten preprocessing - ist neben der Qualität vorhandener Eingangsdaten der Umfang der zur Verfügung stehenden Datenmenge. Im alpinen Raum existiert eine Reihe von Böden, über die nur wenige Informationen vorliegen bzw. deren Daten nicht transformierbar sind oder Lücken und Inkonsistenzen beinhalten, so dass ihre Aufnahme in eine Geodatenbank bzw. Wissensbasis nur bedingt sinnvoll erscheint. Für den Fall einer nicht ausreichend vorhandenen Datenmenge können grundsätzlich Toleranzkriterien im Eingabesystem gesenkt werden, was jedoch zu einem Kompromiss zwischen angestrebter Wirklichkeitsnähe und Verallgemeinerungen führt (Gau & Tiedemann 2005). Kompromisse dieser Art erlauben die subjektive Prägung durch den Bearbeiter. Ihren Ergebnissen fehlt jedoch die Eindeutigkeit.

#### **4.1.3 Fehlerbehaftete Daten**

Fehlerbehaftete Probenentnahmen im Gelände bzw. Versuchsdurchführungen im Labor können zu inkorrekten Bodenkennwerten führen. Mit Aufnahme entsprechend verfälschter Daten in eine Wissensbasis setzen sich die Ungenauigkeiten im Anwendungssystem fort. VON Soos (1983) nimmt zur fehlerbehafteten Erfassung von Einflussparametern im Gelände und im Labor in *Zur Ermittlung der Bodenkennwerte mit Berücksichtigung von Streuung und Korrelation* ausführlich Stellung. Die Qualität der Datenerhebung (Bohrungen, Laboruntersuchungen etc.) ist zu einem gewissen Grad auch vom auftraggeberseits konzidierten Zeit- und Kostenaufwand abhängig. Vor jeder Messreihe sind daher anzustrebender Genauigkeitsgrad und nötiger Aufwand zu definieren und gegeneinander abzuwägen (Kienholz 1995).

Ebenso kann es zu Ungenauigkeiten bei der Verwaltung von Daten kommen. Bei großen Datenmengen wird Fehlern aus Datenlücken nicht immer ausreichend Rechnung getragen, obwohl gerade Datenlücken vielfach entscheidende Informationen u.a. über vorliegende Geländebeziehungen beinhalten. Die Statistik spricht im Zusammenhang mit Datenlücken von *echten Fehlerwerten*, wenn wichtige geotechnische Parameter aufgrund mangelnder Sorgfalt bei der Geländearbeit nicht oder falsch bestimmt wurden. *Unechte Fehlerwerte* kommen vor, wenn Daten u.a. aufgrund von Unwegsamkeiten im Gelände nicht bestimmt wurden.

Echte Fehler können auch bei unsorgfältiger Eingabe von Rohdaten in Datenpools in vielfältiger Weise auftreten:

Lexikalischer Fehler	Rechtschreibfehler bei der Eingabe von Daten
Redundanz	Mehrfache Speicherung gleicher Daten an verschiedenen Stellen des Datenpools
Synonym	Unterschiedliche Bezeichnungen für gleichen Dateninhalt
Homonym	Verwendung gleicher Bezeichnungen für unterschiedliche Dateninhalte
Syntaktischer Fehler	Fehlerhafte bzw. nicht einheitliche Schreibweise der Dateninhalte, Anwendung unterschiedlicher Repräsentanten für Daten
Semantischer Fehler	Nicht korrekt deklarierte Variable

## 4.2 Wissensbasis für Hangmuren

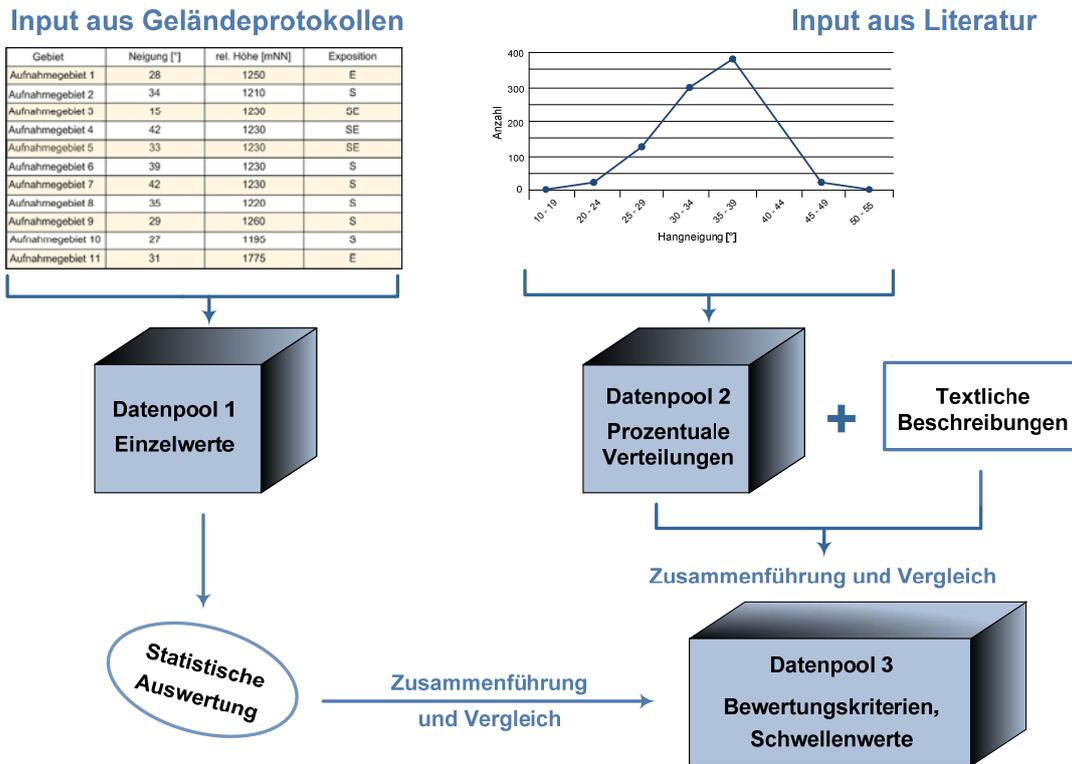
In Kapitel 2.4 wurde bereits ausführlich auf interne und externe Auslösefaktoren von Hangbewegungen hingewiesen. Die in den nachfolgenden Kapiteln genannten Faktoren der Wissensbasis gehören hingegen vornehmlich den mittelbaren Parametern an (vgl. Abb. 8).

Zur Definition von Schwellenwerten ereignisrelevanter Faktoren des DS-Systems wurden umfangreiche, der Autorin zugängliche Metadaten oberflächennaher Hangbewegungen in montanen Gebieten des Alpenraums zusammengetragen. Die Daten basieren auf einer Vielzahl von Geländeaufnahmen historischer Murabgänge (s. Anlage I). Es ist davon auszugehen, dass auslösende Parameter historischer Ereignisse auch in Zukunft prozessinitierend sein werden, so dass ihre Kenntnis die Grundlage einer zuverlässigen Wissensbasis darstellt (Wichmann 2006), (vgl. Kap. 1.4).

Nur selten können die vorliegenden historischen Hangbewegungen samt den zugehörigen Datensätzen - u.a. aufgrund begrifflicher Unschärfe und der Verwendung von Synonymen (vgl. Kap. 2.1), die nicht den Anspruch von *termini technici* erfüllen - eindeutig dem Hangbewegungstypus *Hangmure* zugeordnet werden. Auch RIEGER (1999) bemängelt diese Problematik in Bezug auf die generelle Generierung einer Datenbasis. In der vorliegenden Arbeit werden daher alle zur Verfügung stehenden Metadaten flachgründiger, oberflächennaher Rutsch- und Fließprozesse, die mit dem Phänomen *Hangmure* hinsichtlich ihrer Kinematik vergleichbar sind, in einer Datenbasis (s. Anlage II) zusammengeführt.

Die dem DSS zugrundeliegenden Daten sind aus detaillierten Aufnahmeprotokollen verschiedener Untersuchungsgebiete, vornehmlich in Bayern, der Schweiz, Österreich und Italien, zusammengetragen (s. Anlagen I & II). In Datenpool DP 1 liegt eine Vielzahl von Datensätzen aus 15 Untersuchungsgebieten (Perimeter) mit insgesamt 1052 Einzelereignissen vor, die relevante Parameter jeder einzelnen Hangbewegung erfassen (Abb. 14). Durch die

statistische Auswertung werden Korrelationen der Faktoren, sowie Tendenzen und Zusammenhänge verdeutlicht.



**Abb. 14:** Aufbau der Wissensbasis des DSSs

Alle 1052 Einzelmesswerte aus DP 1 bilden die Elemente einer konkreten Stichprobe  $X$ . Für normalverteilte Einflussgrößen gelten die Verteilungsparameter  $\mu$  (Mittelwert) und  $\sigma$  (Standardabweichung) als charakteristisch. Mit dem Mittelwert  $\mu$  wird das Zentrum, das arithmetische Mittel der Verteilung, das sogenannte Zentralmaß, angegeben. Die Standardabweichung  $\sigma$  zeigt die Streckung bzw. Dichte der Verteilung, das sogenannte Streuungsmaß, an.

Arithmetischer Mittelwert: 
$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{Gl. 2}$$

Standardabweichung: 
$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n}} \quad \text{Gl. 3}$$

mit  $x_1, x_2, \dots, x_n$  Einzelmesswerte  
 $n$  Anzahl der Einzelmesswerte

In Datenpool 2 werden Informationen aus weiteren Untersuchungsgebieten abgespeichert, die nicht in Form von Einzelwerten, sondern lediglich als prozentuale Verteilungen mit Angabe von arithmetischen Mittelwerten und z.T. Standardabweichungen vorliegen. Angaben zu

prozentualen Verteilungen existieren in diesem Zusammenhang vornehmlich für die Einflussfaktoren Hangneigung, geodätische Höhenlage, Exposition, Hangmorphologie und Vegetation. Die durchschnittlichen Angaben zu Höhenlage und Hangneigung von Anrisszonen in Tabelle 3 zeigen eine gute Übereinstimmung der Werte trotz variierender Anzahl der Ereignisse. Umfangreiche faktische und empirische Angaben zu allen relevanten Faktoren fließen zusätzlich aus ungefähr 220 textlichen Literaturbeiträgen in das DSS ein. Mittelwerte aus DP 1 und DP 2 werden als Schwellenwerte in DP 3 zusammengeführt und bilden dort als Bewertungskriterien die Grundlage des Entscheidungsprozesses in der Schlussfolgerungskomponente.

**Tab. 3:** Zusammenfassung aller zur Verfügung stehenden Daten bezüglich der Faktoren Hangneigung und Höhe aus Datenpool 1 und 3 (vgl. Anlagen II & III)

	Datenpool 1 multivariate Verknüpfung			Datenpool 3 univariate Beschreibung	
	Höhe/Neig.	Höhe/Neig./Expo.	Höhe/Neig./Veg.	Neigung	Höhe
Durchschn. Höhenlage	1201,22	1197	1236,34	-	1165,39
Durchschn. Hangneigung	35,34°	34,8°	35,83°	33,08°	-
Anzahl der Ereignisse	1052	783	943	-	-
Anzahl der Perimeter	15	13	11	41	22

Grundsätzlich werden zur Definition von Schwellenwerten nur Daten herangezogen, die in ihrer Auswertung nachvollziehbar erscheinen und eine eindeutige Darstellung und Zuordnung erlauben. Zudem sind gemäß MOSER (1980) Daten schwach gegliederter Untersuchungsgebiete von einer Synopse auszuschließen, da sie zu einer Verfälschung der Ergebnisse infolge zu geringer Parameterabstufungen führen können.

Einige Daten aus DP 1 und DP 2 müssen zunächst umfangreich homogenisiert werden, da sie während ihrer Aufnahme nach unterschiedlichen Regeln kategorisiert wurden, so dass sie für einen direkten Vergleich mit anderen Daten nicht ohne weiteres geeignet erscheinen. Diese Problematik trifft vornehmlich auf DP 2 zu. Mit einigen Daten kann gleichwohl keine Zusammenführung erfolgen, da hierzu eine verfälschende Homogenisierung erforderlich gewesen wäre.

### *Struktur der Wissensbasis*

In den nachfolgenden Kapiteln wird eine DSS-Wissensbasis für Hangmuren generiert, die aus Sicht der Autorin alle entstehungsrelevanten Faktoren von Hangmuren umfasst. Zu-

gleich werden Schwellenwerte definiert, anhand derer Gefährdungspotentiale für Hangmuren in einem vorgegebenen Untersuchungsgebiet bestimmbar werden.

In der Wissensbasis zeigen wesentliche Faktoren eine multivariate Verknüpfung miteinander. Eine umfassende Beschreibung aller gefährdungsimmanenten Faktoren erfordert daher die Darstellung komplexer Verbindungen. Diese werden jedoch zunächst auf themenrelevante Zusammenhänge begrenzt. Ausführliche, univariate Beschreibungen der in Bezug zueinander stehenden Einflussgrößen als eigenständige Entscheidungsparameter werden in nach ihnen benannten Kapiteln vorgenommen.

Mit der Erstellung der Wissensbasis verfolgt die Arbeit das Ziel, eine allgemein gültige, aktualisierte Beschreibung und Wichtung aller beteiligten Faktoren zu generieren. Sie trägt damit zur Präzisierung u.a. von GI-Systemen bei und stellt eine aussagekräftige Grundlage für das zu entwickelnde DSS dar. Am Ende jeder Parameterstudie folgt das Unterkapitel *zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS*, das nur jene Einflüsse eines Faktors auf die Auslösung von Anrissen (Schwellenwerte) benennt, die unmittelbar für eine Gefährdungsevaluierung mittels DSSs relevant, sinnvoll und logisch korrekt sind. Nach HAMILTON ET AL. (1994) *sind Angaben relevant, wenn sie wesentliche Prozesse beschreiben; sie sind sinnvoll, wenn sie als Grundlage für spezifische Handlungen und Entscheidungen dienen und logisch korrekt, wenn sie sich innerhalb des Bereiches von Beobachtungen, historischen Erfahrungen und physikalischen Gesetzen bewegen.*

### 4.3 Faktor Hangneigung

Viele Autoren unterstreichen die große Bedeutung der Neigung bei der Ausweisung von Hangbereichen unsicherer Stabilität. RIEGER (1999) und COSTA (1984) bezeichnen *sehr steile* Hänge als eine Grundvoraussetzung für Murenstehung. NEULAND (2008) führt die Hangneigung als den wichtigsten Parameter in der Gefahrenbeurteilung an. FREHNER ET AL. (2005) nennen das Zusammenwirken von Hangneigung und bodenmechanischen Charakteristika des Lockergesteinmaterials ein entscheidendes Kriterium in der Beurteilung des Risikopotentials am Hang.

Statistische Auswertungen von Einzelereignissen aus DP 1 und Mittelwerten aus DP 3 zeigen die Häufigkeitsverteilung von Hangneigungen oberflächennaher Anrisszonen. Das arithmetische Mittel aller Ereignisse aus DP 1 liegt bei  $\mu = 35,3^\circ$  (Anlage II) mit einer Standardabweichung von  $\sigma = \pm 5,5^\circ$ . Das arithmetische Mittel aller Daten aus DP 3 liegt bei  $\mu \sim 33^\circ$ .

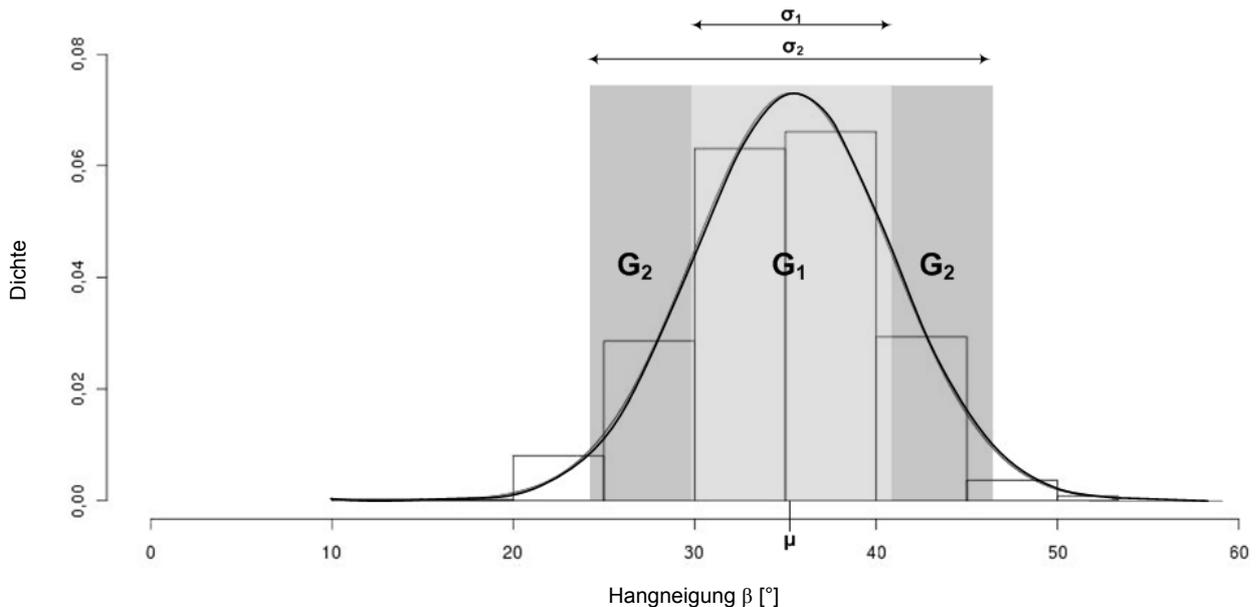
Zur Definition des primären ( $G_1$ ) und sekundären Gefährdungsbereiches ( $G_2$ ) wird der Mittelwert der Normalverteilung von DP 1 mit der einfachen ( $\sigma_1$ ) bzw. doppelten ( $\sigma_2$ ) Standard-

abweichung beaufschlagt und in einer empirischen Dichteverteilung dargestellt (Abb. 15). Die empirische Dichte geht aus dem Verhältnis der relativen Häufigkeit zur Klassenbreite hervor.

Primärer Gefährdungsbereich  $G_1$ :  $\mu - \sigma_1$  bis  $\mu + \sigma_1 \rightarrow 29,8^\circ$  bis  $40,8^\circ$

Sekundärer Gefährdungsbereich  $G_2$ :  $\mu - \sigma_2$  bis  $\mu - \sigma_1 \rightarrow 24,3^\circ$  bis  $29,8^\circ$  bzw.

$\mu + \sigma_1$  bis  $\mu + \sigma_2 \rightarrow 40,8^\circ$  bis  $46,3^\circ$



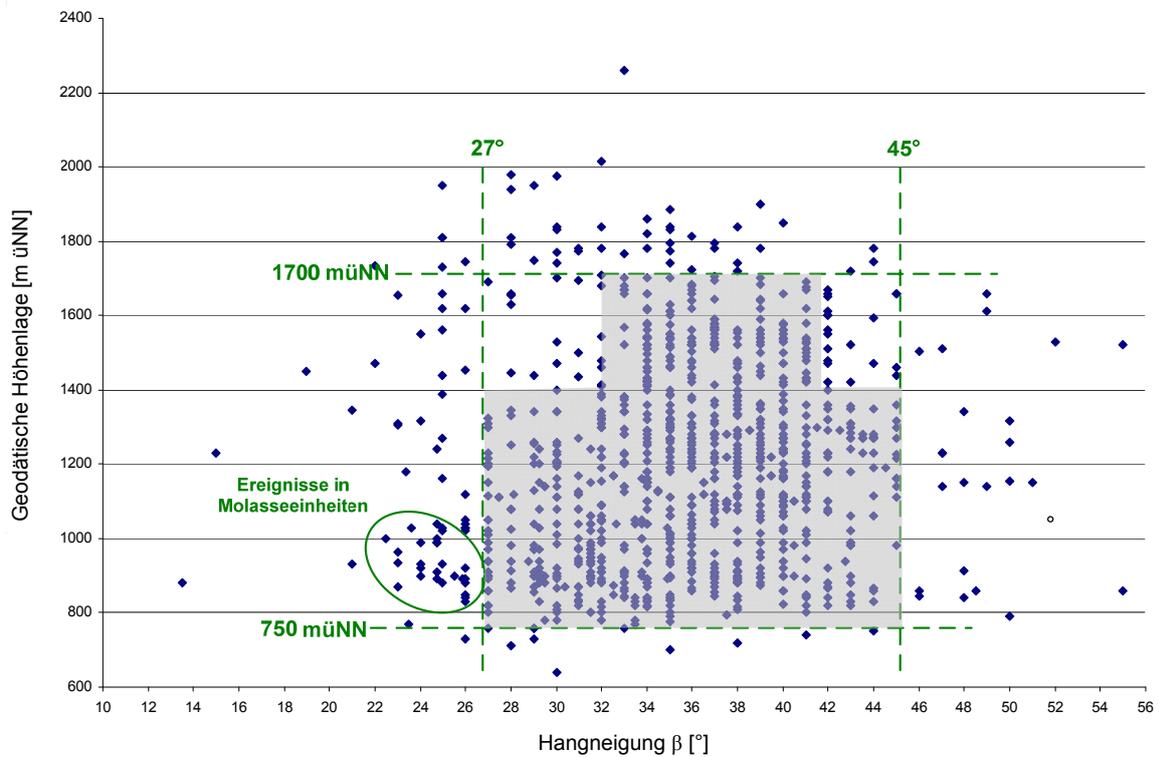
**Abb. 15:** Empirische Dichte der Hangneigung mit Definition des primären ( $G_1$ ) und sekundären ( $G_2$ ) Gefährdungsbereiches. Datenbasis: 1052 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II), dargestellt mit dem Statistikprogramm *R*

#### 4.3.1 Einfluss der Höhenlage

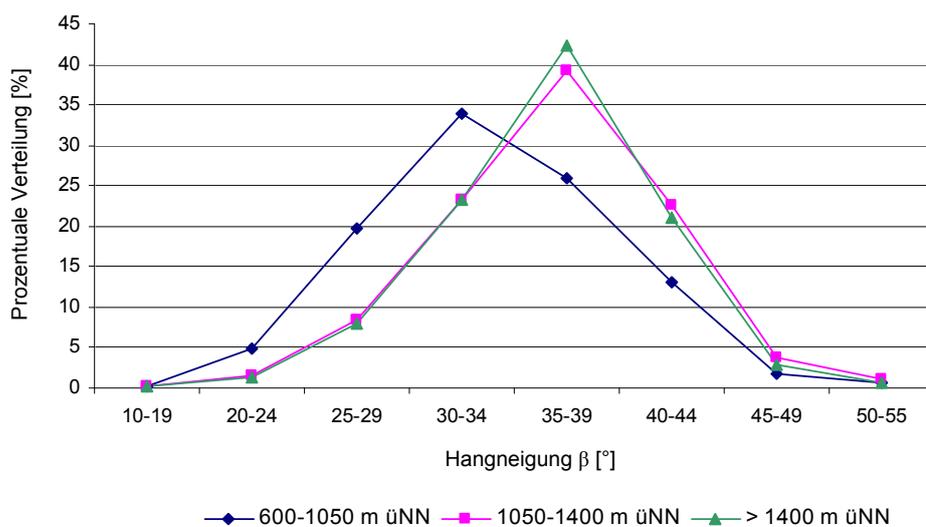
Generell zeigt sich ein korrelativer Zusammenhang der ereignisrelevanten Faktoren Hangneigung und Höhenlage. Wird die Höhenlage in die Betrachtung einbezogen, so erlaubt sie weitere Differenzierungen in der Ausscheidung von Gefahrenzonen.

Anhand der Punktwolkendarstellung in Abbildung 16 wird eine generelle Konzentration von Anrisszonen zwischen  $\beta \sim 27^\circ$  und  $\beta \sim 45^\circ$  deutlich. In niedrigen Höhenlagen (bis 1050 m üNN) treten Anrisszonen bei durchschnittlich  $\beta \sim 33,5^\circ$  (Abb. 17) auf. Anrisszonen mit Hangneigungen von  $\beta < 27^\circ$  betreffen vornehmlich Instabilitäten innerhalb der Molasse, die zu meist auf einen erhöhten Feinkornanteil (Verwitterungsprodukt tertiärer Mergel) innerhalb der Hangauflage zurückgehen. Im Höhensegment zwischen 1050 bis 1400 m üNN treten in Bereichen mit geringer Hangneigung weniger Hangmuren auf. Hier liegt die Konzentration von Anrisszonen bei  $\beta \sim 36^\circ$  (Abb. 17). Über 1400 m üNN fällt ein deutlicher Rückgang von

Hangmuren in schwach bzw. steil geneigten Bereichen mit einer Konzentration zwischen  $\beta \sim 32^\circ$  und  $\beta \sim 42^\circ$  auf. Auch in diesem Höhensegment beträgt die durchschnittliche Hangneigung  $\beta \sim 36^\circ$ .



**Abb. 16:** Punktwolke aus 1052 Einzelereignissen aus DP 1 (vgl. Anlage II), aufgetragen über Hangneigung und geodätischer Höhe



**Abb. 17:** Prozentuale Verteilung der Hangneigung, differenziert nach verschiedenen Höhenlagen. Datenbasis: 1052 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

### 4.3.2 Einfluss der Geologie

Zur Untersuchung des Einflusses der Geologie im Zusammenwirken mit der Hangneigung wurden alle Einzelereignisse aus DP 1 ihren geologischen Festgesteinseinheiten, wie Kalkalpin, Kristallin, Helvetikum, Flysch oder Molasse zugeordnet (s. Anlage I). Die jeweiligen Verteilungen sind Abbildung 18 zu entnehmen. Die Angaben zur mittleren Neigung  $\mu$  (Tab. 4) weichen nur geringfügig voneinander ab: zwischen  $\beta \sim 33^\circ$  und  $\beta \sim 36,5^\circ$ .

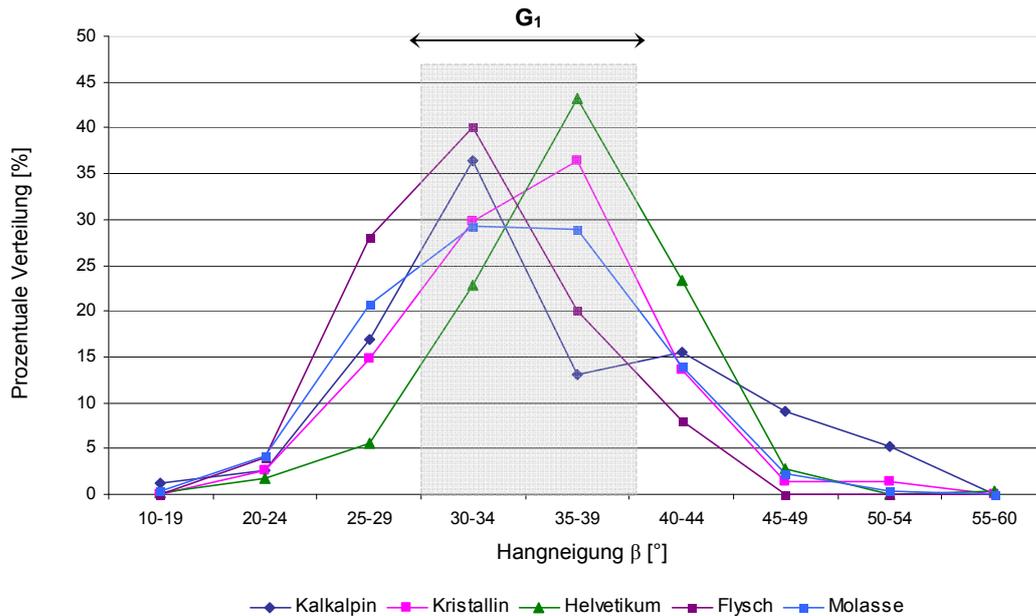
**Tab. 4:** Zuordnung von Anrisszonen zu bestimmten geologischen Festgesteinseinheiten mit Angabe mittlerer Hangneigungen  $\beta$ . Datenbasis: 1052 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

Geologie	Anrisszonen	
	Anzahl Einzelwerte	Mittlere Hangneigung $\beta$
Kalkalpin	77	35,03°
Kristallin	74	34,17°
Helvetikum	585	36,44°
Flysch	50	32,82°
Molasse	266	33,93°

Da die Mittelwerte innerhalb des zuvor definierten primären Gefährdungsbereiches  $G_1$  liegen (Abb. 18), ist der Einfluss der Geologie - im Sinne der Lithologie des Festgesteins - im Zusammenwirken mit dem Parameter Hangneigung nicht als limitierender Faktor zu erkennen und daher zu vernachlässigen<sup>6</sup>. Bereits RIEGER (1999) weist bei Hangmuren im Kalkalpin und Kristallin nur geringfügige Hangneigungsunterschiede zwischen  $\beta = 35,7^\circ$  ( $\emptyset$  für Kristallin) und  $\beta = 35,05^\circ$  ( $\emptyset$  für Kalkalpin) nach. Die Punktwolke in Abbildung 16 zeigt jedoch, dass in manchen lithologischen Einheiten auch deutlich schwächer geneigte Hangbereiche von Hangmuren betroffen sein können, z.B. Molasseeinheiten (s. Anlage I: Untersuchungsgebiet Entlebuch).

Ungeachtet Vorgenanntem ereignen sich flachgründige Hangmuranrisse zumeist in quartären Deckschichten bzw. am Übergang von Deckschicht zu Festgestein. Die Hangauflage stellt selten ein ungestörtes in-situ Verwitterungsprodukt der Festgesteinseinheit im Liegenden dar. Vielmehr handelt es sich um eine hoher Reliefenergie geschuldete Vermischung von Moränenmaterial, Hang- und Verwitterungsschutt und ggf. historischen Hangrutschmassen. Eine exakte Ansprache der Hangauflage zur Beurteilung ihrer Stabilität erfolgt zunächst über die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Reibungswinkel  $\varphi'$  und Hangneigung  $\beta$ .

<sup>6</sup> Zur Verifizierung der Ergebnisse ist für die Einheiten Kalkalpin, Kristallin, Flysch und Molasse ein mit Helvetikum vergleichbarer Datenumfang anzustreben.



**Abb. 18:** Prozentuale Verteilung der Hangneigung unter Berücksichtigung verschiedener geologischer Einheiten mit Angabe des Gefährdungsbereiches  $G_1$  gemäß Abb. 15. Datenbasis: 1052 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

### 4.3.3 Einfluss geotechnischer Parameter der Hangauflage

Das Verhältnis von Reibungswinkel  $\varphi'$  zu Hangneigung  $\beta$  gilt als eine Art Überschlagswert für die Bestimmung stabiler Hangneigungen: Übersteigt die Hangneigung  $\beta$ , die gemäß BUWAL (1998) die Abweichung der Falllinie eines Hanges von der Horizontalen definiert, den inneren Reibungswinkel  $\varphi'$  von trockenem Hang- und Verwitterungsmaterial, droht die Hangauflage instabil zu werden und abzugleiten. Dass Hänge jedoch bei Neigungsverhältnissen  $\beta > \varphi'$  nicht sofort instabil werden, liegt sowohl am Phänomen scheinbarer Kohäsion  $c_c$  - bewirkt durch konkav geformte Kapillarmenissen aus Wasser zwischen den Bodenpartikeln, die physikalisch durch Oberflächenspannungen verursacht werden und den teilgesättigten Boden zusammenhalten (Kézdi 1969) - als auch an stabilisierenden Einflüssen mittelbarer Faktoren, wie u.a. Vegetation. Mit Vollsättigung des Materials, z.B. bei Starkniederschlagsereignissen, wird die Scheinkohäsion  $c_c$  auf Null reduziert. Dies kann auch zum Abgleiten des Materials bei Neigungsverhältnissen von  $\beta < \varphi'$  führen (vgl. Kap. 2.4.1).

Der obere Grenzneigungswinkel definiert sich gemäß EPPLE (1981), MOSER (1997) und RICKLI ET AL. (2008) über gering mächtige Hangschuttdecken bei Neigungen von  $\beta > 50^\circ$ . SALCIARINI ET AL. (2006) versuchen, mit der exponentiellen Korrelation in Gleichung 4 die Abnahme der Mächtigkeit der Hangauflage  $d$  mit wachsendem Hangneigungswinkel  $\beta$  zu generalisieren.

$$d = 7,72 \cdot e^{-0,04 \cdot \beta} \quad [m]$$

Gl. 4

Dieser Zusammenhang beruht jedoch auf einem nicht nachvollziehbaren empirischen Ansatz. Auswertungen entsprechender Daten aus DP 1 bestätigen die Aussage der Gleichung 4 nicht.

In sehr steilen Hangbereichen baut sich infolge eines stärkeren Oberflächenabflusses zudem ein deutlich geringerer Strömungsdruck auf als in flacheren (Moser 1980, Rieger 1999). Neben einem generell geringen Flächenanteil stark geneigter Hänge an der Gesamtfläche (Epple 1981) ist unter vorgenannten Neigungsverhältnissen zudem auf eine Abnahme des horizontalflächenbezogenen äußeren Einflusses - wie z.B. Niederschlag - hinzuweisen.

Der untere Grenzneigungswinkel definiert sich über die Annahme einer hangparallelen Durchströmung mit Vollsättigung. Er kann anhand überschlägiger Standsicherheitsberechnungen (vgl. Gl. 1, Kap. 2.4.1) für Böden mit relativ niedrigem Reibungswinkel  $\varphi'$  - ohne Ansatz einer Kohäsion - mit  $\beta \sim 20^\circ$  angegeben werden.

Zuvor bestimmte Grenzwerte kritischer Hangneigung stimmen gut mit textlichen Beschreibungen aus DP 2 überein. Nach FLOSS (1985), WERLEN (2004) und FREHNER ET AL. (2005) liegen kritische Neigungswinkel  $\beta$  von schluffigen, sandigen bis kiesigen Hang- und Verwitterungsschuttböden zwischen  $35^\circ$  und  $40^\circ$ . MOSER (1997) sieht allgemein für gemischtkörnige Böden mit geringen Tongehalten die stärkste Gefährdung bei Hanglagen zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$ . In Gebieten mit feinkörnigerem Lockergestein sind Rutschungen bei deutlich geringeren Hangneigungen zu erwarten (Rickli et al. 2008, Riner 2009).

#### 4.3.4 Einfluss der Vegetation

Anrisszonen treten unter Wald an vergleichsweise steileren Hanglagen auf als Hangbewegungen im Freiland (Abb. 29). Der statistische Mittelwert ersterer liegt bei  $\beta \sim 37^\circ$ . Der Mittelwert im Freiland beträgt  $\beta \sim 35^\circ$ . Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch SCHOGER (1988) und HAMBERGER (2007), deren Untersuchungsergebnisse in DP 2 abgelegt sind.

Ausführliche Anmerkungen zum Einfluss der Vegetation auf die Hangstabilität sind Kapitel 4.7 zu entnehmen.

#### 4.3.5 Einfluss der Morphologie

Das Auftreten von hydrostatischen Porenwasserüberdrücken in Lockergesteinsschichten kann an schwach geneigten Unterhängen konkaver Hangformen zu Instabilitäten führen, obgleich die dort angetroffene Hangneigung für sich genommen nach obiger Definition ungefährlich ist. Hier können Rutschprozesse bereits bei Hangneigungen von  $\beta < 20^\circ$  auftreten.

Ausführliche Anmerkungen zum Einfluss der Morphologie auf die Hangstabilität sind Kapitel 4.5 zu entnehmen.

#### 4.3.6 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS

Geotechnische Charakteristika anstehender Lockergesteine haben eine primäre Bedeutung für die Ausweisung kritischer Hangneigungen. Hangmuren treten vornehmlich in gut durchlässigen Hang- und Verwitterungsschuttböden mit geringen Ton-/Schluffanteilen auf. Ihre materialspezifischen Reibungswinkel  $\varphi'$  bestimmen den gefährdeten Neigungsbereich zwischen  $\beta \sim 20^\circ$  und  $\beta \sim 50^\circ$  mit einem primären Gefährdungsbereich  $G_1$  zwischen  $30^\circ$  und  $40,9^\circ$  (Abb. 15, Tab. 5). Die Einbeziehung der Höhenlage in die Betrachtung ergibt ein noch differenzierteres Bild: Danach steigt mit zunehmender geodätischer Höhe die durchschnittliche Hangneigung in Anrisszonen.

**Tab. 5:** Grenzwerte der Hangneigung im primären und sekundären Gefährdungsbereich

Primärer Gefährdungsbereich $G_1$	Sekundärer Gefährdungsbereich $G_2$		Grenzneigungen
	unterer	oberer	
$\beta = 30^\circ - 40,9^\circ$	$\beta = 20^\circ - 29,9^\circ$	$\beta = 41^\circ - 50^\circ$	$20^\circ < \beta < 50^\circ$

Die Lithologie des Festgesteins beeinflusst die Hangneigungswirkung kaum. Für eine erste Gefährdungsbeurteilung kann daher angenommen werden, dass sich die Gefährdungspotentiale neigungsgleicher Hänge auch bei unterschiedlichen geologischen Einheiten nahezu gleichen. Nicht so bei Anrisszonen innerhalb der Molasse. Hier liegt der primäre Gefährdungsbereich bei Hangneigungen von  $\beta \sim 25^\circ$ .

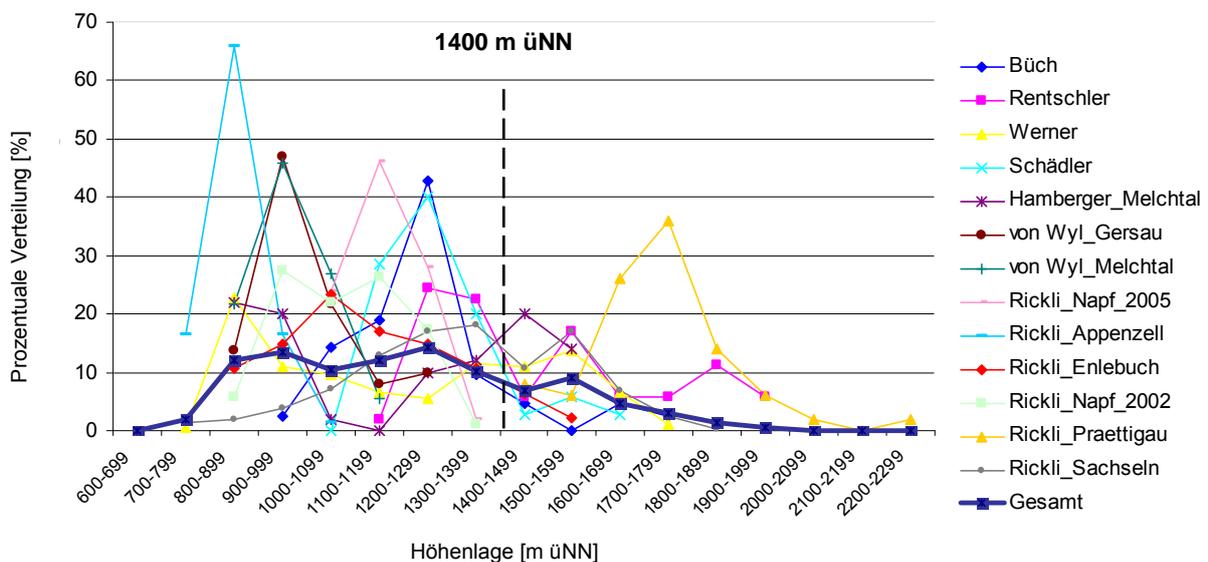
An schwach geneigten Unterhängen konkaver Hangformen können Instabilitäten bereits bei Hangneigungen von  $\beta < 20^\circ$  auftreten.

#### 4.4 Faktor Höhenlage

Die Höhenlage hat keinen funktionalen Zusammenhang mit der rechnerischen Hangstabilität. Mit der Höhenlage verändern sich jedoch einige Ortsverhältnisse, die indirekten Einfluss auf die Rutschaktivität haben (Rickli 2001). Die größte Anrisshäufigkeit ist in mittleren Höhenlagen zu beobachten. Die Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Ereignissen in 15 Untersuchungsgebieten (DP 1) unter Mitführung ihrer Höhen zeigt auf den ersten Blick ein konfuse Bild (Abb. 19). Dieses ergibt sich als Spiegelbild der willkürlichen Höhenstufung des jeweiligen Untersuchungsgeländes. Daher muss grundsätzlich Vorsicht bei der Übertragung

auf andere Lokalitäten walten (Rieger 1999). Natürlich können Untersuchungsgebiete z.B. zwischen 1000 und 1350 m üNN keine Anrisszonen aus 1500 m üNN liefern. Andererseits finden Untersuchungen aber auch nur in ereignisbetroffenen Gebieten statt, so dass mit den zur Verfügung stehenden großen Datenmengen durchaus repräsentative Verhältnisse nachgewiesen werden können.

Vor diesem Hintergrund zeigt die Darstellung 19 eine deutliche Konzentration von Anrisszonen unterhalb von ca. 1400 m üNN. Der Plot von Mittelwerten aus 1052 Messwerten des DP 1 weist in gleicher Abbildung zwei schwach ausgeprägte Peaks um 950 m und 1250 m üNN auf.



**Abb. 19:** Prozentuale Verteilung der Höhenlagen von Anrisszonen aus 15 Perimetern. Datenbasis: 1052 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

#### 4.4.1 Einfluss des Niederschlags

An die Höhe ist ein charakteristisches Niederschlagsregime gebunden, das eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Der Anteil des Wassers am Gesamtniederschlag ist in mittleren Seehöhen deutlich höher als in großen (Stiny 1934). Ab einer Höhe von ca. 1400 m üNN ändert sich in den Alpen insbesondere während des Frühjahrs und Herbstes die Art des Niederschlags: Oberhalb von 1400 m üNN fällt Niederschlag zumeist als Schnee, so dass zunächst ein verstärkter Oberflächenabfluss ausbleibt. Unterhalb von 1400 m üNN tritt er durchweg als Regen auf (freundliche telefonische Mitteilung des DWD München, Herr Hoffmann) und intensiviert destabilisierende Erosionsprozesse. LATELTIN ET AL. (1997) weisen zudem auf eine starke Infiltration von Schmelzwässern und einen damit verbundenen Anstieg des Hangwasserspiegels in Bereichen zwischen 1000 und 1500 m üNN hin. KARL UND HÖLTL (1974) bestätigen für den bayerischen Alpenraum vorgenannte Angaben und stellen eine maximale Anrisshäufigkeit zwischen 1200 und 1400 m üNN fest.

Selbst bei Annahme höhenunabhängiger Niederschlagsverhältnisse ist von einer Zunahme des Hangwasserandrangs in den Hangmitten durch zu Tal strömendes Wasser aus dem Oberhang auszugehen. Diskontinuitäten in der Durchlässigkeit der Schuttböden führen auf langen Hangstrecken bei lang anhaltenden Starkniederschlägen zu punktuellen Stauwirkungen, so dass Wasser in Vernässungszonen und an Quellhorizonten aus dem Lockergestein austritt (Schoger 1988).

#### 4.4.2 Einfluss geotechnischer Parameter der Hangauflage

Bereits STINY (1934) weist auf eine Zunahme der Kornfraktion  $> 0,1$  mm innerhalb der Verwitterungsböden mit steigender geodätischer Höhe hin. Ein großer durchflusswirksamer Porenraum  $n_{\text{eff}}$  der Böden reduziert den Aufstau von Sickerwasser und vergrößert die Standsicherheit eines Hanges. In mittleren Höhenlagen hingegen ist der Feinkornanteil vergleichsweise hoch, was auch durch die hier herrschende Dominanz thermischer gegenüber chemischer Verwitterung zu erklären ist. Besonders der Ton-Schluffanteil spielt aufgrund seiner bodenphysikalischen Eigenschaften im Zuge von Niederschlagseinwirkungen eine entscheidende Rolle. An S-exponierten Standorten wirkt die thermische Verwitterung verstärkt unterhalb von 1200 m üNN (vgl. Kap. 4.6.1). Eine Konzentration von Anrissflächen in diesem Bereich unterstreicht die Möglichkeit, hangmurgefährdete Höhenlagen auszuweisen.

Auswertungen von DP 1 weisen zudem auf einen Zusammenhang zwischen steigender Höhenlage, abnehmender Mächtigkeit der Hangauflage und - damit einhergehend - reduzierter Anrisshäufigkeit hin. Gemäß Tabelle 6 ist oberhalb von 1400 m üNN eine geringere mächtige Boden- und Schuttakkumulation zu erwarten als in mittleren und unteren Hanglagen, so dass hier Geschiebetransport seltener und mit geringerer Intensität auftritt. Die mächtigsten Schuttakkumulationen sind in mittleren Hanglagen zu verzeichnen.

**Tab. 6:** Zusammenhang zwischen geodätischer Höhe und Mächtigkeit der Hangauflage. Datenbasis: 817 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

Geodätische Höhe	Mächtigkeit der Hangauflage	Anzahl der Ereignisse
bis 1400 m üNN	1,257 m	559
über 1400 m üNN	1,047 m	258

#### 4.4.3 Einfluss der Vegetation

Eine detaillierte Darstellung von Anrisshöhen, differenziert nach Bewuchsarten erfolgt in Abbildung 31. Bewaldete Hänge zeigen besonders zwischen ca. 1150 und 1450 m üNN eine

erhöhte Anrisshäufigkeit. In dieser Höhenlage ist die Fichte die am weitesten verbreitete Baumart, die gemäß Kapitel 4.7.1 eine reduzierte, murhemmende Funktion zeigt.

Bei Freilandflächen kommt es zwischen 1350 und 1550 m üNN zu einer leicht erhöhten Anrisshäufigkeit.

#### **4.4.4 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS**

Unter Einbeziehung vorgenannter indirekter Einflüsse ergibt sich eine Häufung von Anrisszonen unterhalb von ca. 1400 m üNN. Die Ereignisdichte ist trotz willkürlicher Höhenstufung der Untersuchungsgebiete auf andere Regionen übertragbar. Der Grenzwert kann daher als repräsentativ für die Ausweisung hangmurgefährdeter Regionen betrachtet werden.

Die Einflüsse Niederschlag und geotechnische Parameter bestimmen vornehmlich die murfördernden Standorteigenschaften in kritischen Höhenlagen. Ein deutlich höherer Regenanteil in Hanglagen < 1400 m üNN - besonders während des Frühsommers und Herbstes - einhergehend mit dem Auftreten feinkornreicherer Böden, erhöht das Risiko eines Murabgangs in mittleren Höhen. Bezieht man die Einflüsse der Vegetation in die Betrachtung ein, so ergibt sich besonders für gehölzbestockte Hanglagen ein signifikantes Risiko in Höhenlagen zwischen ca. 1150 und 1400 m üNN. Dies ist u.a. auf das mangelnde Armierungspotential flachwurzelnnder Nadelbaumarten - insbesondere der in dieser Höhenlage häufig anzutreffenden Fichte - zurückzuführen.

#### **4.5 Faktor Hangmorphologie**

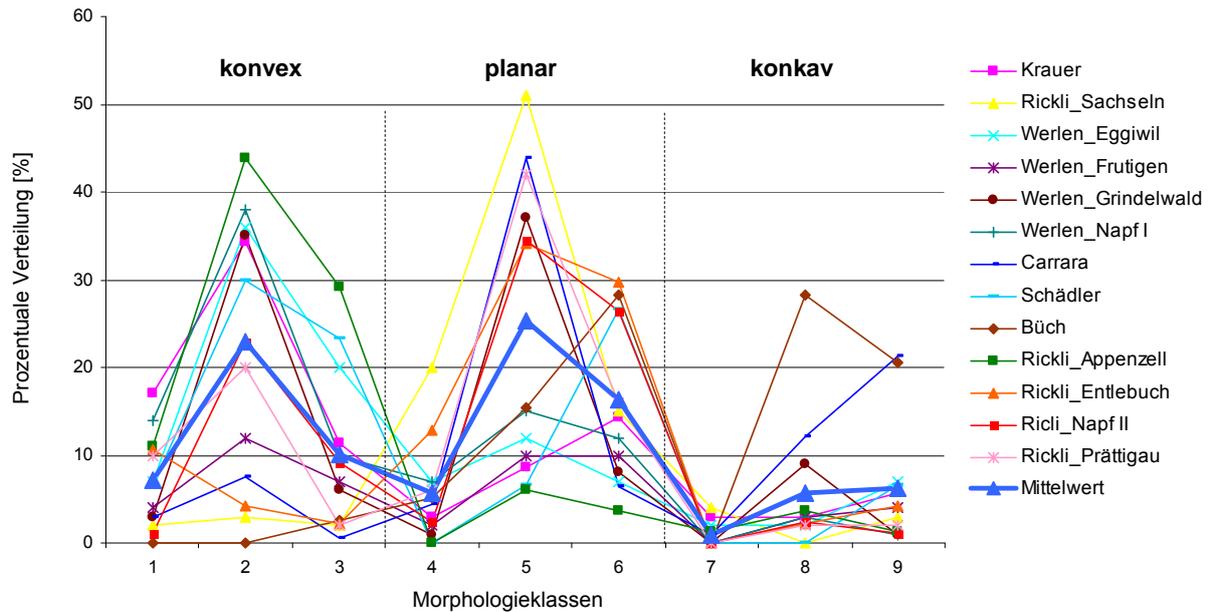
Morphologische Geländeformen bieten Einschätzungshilfen bezüglich der Standsicherheit eines Hanges, besonders unter Berücksichtigung des zu Tal strömenden Oberflächen- und Hangwassers. Die Morphologie wird nach Form des Längs- (Verlauf entlang Hangfalllinie) und Querprofils (Verlauf entlang Höhenlinie) beurteilt. Dabei ist zwischen den drei Grundformen eines Hanges konvex, konkav und planar zu unterscheiden. Als konvexer Hangneigungswechsel wird ein weitgespannter, kontinuierlicher Übergang von flacherem Oberhang zu steilerem Unterhang verstanden. Als konkaven Hangneigungswechsel bezeichnet man hingegen einen kontinuierlichen Wechsel von steileren Ober- zu flacheren Unterhängen (Baumhauer 2006, Geerken 1986). In der Natur treten häufig Kombinationen vorgenannter Grundformen in Längs- und Querprofilen auf, so dass nachfolgend zwischen neun Morphologieformen unterschieden wird (Abb. 20).

	In Hangfalllinie nach aussen gewölbt (konvex)	In Hangfalllinie ohne Wölbung (planar)	In Hangfalllinie nach innen gewölbt (konkav)
Im Querprofil nach aussen gewölbt (konvex)	 1	 4	 7
Im Querprofil ohne Wölbung (planar)	 2	 5	 8
Im Querprofil nach innen gewölbt (konkav)	 3	 6	 9

**Abb. 20:** Kombination konkav, konvex und planar geneigter Längs- und Querprofile zu neun Morphologieklassen mit Unterlegung der am häufigsten von Anrissen betroffenen Geländeformen. Datenbasis: DP 1 und DP 3 (vgl. Anlagen I, II & II), (Vorlage modifiziert nach Rickli 2001)

Die statistischen Häufigkeitsverteilungen der neun verschiedenen morphologischen Formen, basierend auf Mittelwerten aus 13 Untersuchungsgebieten (DP 3), zeigen das überwiegende Auftreten von Anrisszonen sowohl entlang planarer Längs- und Querprofile (Abb. 21, Morphologiek. 5) als auch entlang planarer Längsprofile mit konkaven Querprofilen (Abb. 21, Morphologiek. 6), sowie an (Terrassen-) Kanten (Abb. 21, Morphologiek. 2). Allen Verteilungen ist gemein, dass konkave Längsprofile seltener von Hangbewegungen betroffen sind als andere.

Mit Bezug auf die Morphologieklassen der Abbildung 20 werden in den nachfolgenden Kapiteln 4.5.1 bis 4.5.3 mittels geometrischer und mechanischer Analysen Ursachen für stabilisierende bzw. destabilisierende Wirkungen der Hangformen aufgezeigt. Sie bestätigen die vorgenannte statistische Häufigkeitsverteilung der Anrisszonen. Bei diesen Betrachtungen spielen vor allem die Einflussgrößen des Niederschlags und der Hangneigung eine bedeutende Rolle. Niederschlag bedingt das Auftreten von gefährdungsimmanentem Hang- und Oberflächenwasser. Dabei fließt das Hangwasser vornehmlich zwischen durchwurzelter Bodenaufgabe und undurchlässigem Untergrund und strömt zumeist nicht flächenhaft, sondern vornehmlich entlang hangabwärts gerichteter Reliefs (Laatsch & Grottenthaler 1972).



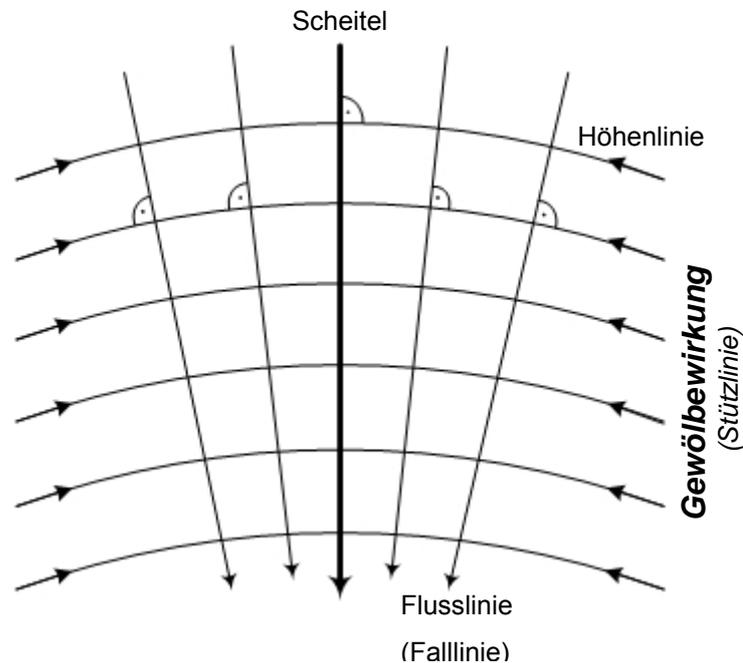
**Abb. 21:** Häufigkeitsverteilungen der neun Morphologieklassen (s. Abb. 20), basierend auf DP 3 (vgl. Anlage III). Die Angaben *konvex*, *planar* und *konkav* beziehen sich auf die Längsprofile des Hanges.

#### 4.5.1 Einfluss planarer Längsprofile

Planare Längsprofile ohne Wölbung des Querprofils (vgl. Morphologiek. 5) dominieren deutlich das Anrissrisiko aller neun Morphologieformen. Hier besteht das Gefährdungspotential der einflussstarken Parameter Neigung und Niederschlag gleichermaßen für die gesamte Hangfläche, ohne dass das zu Tal strömende Wasser eine Reduzierung seiner kinetischen Energie durch Umlenkungen infolge morphologischer Formen erfährt. Nach ZACHAR (1982) spielt die Länge des vom Abflussgeschehen betroffenen Hanges bezüglich der erodierten Volumina eine große Rolle. Danach treten auf kurzen Hängen geringere Erosionsleistungen auf.

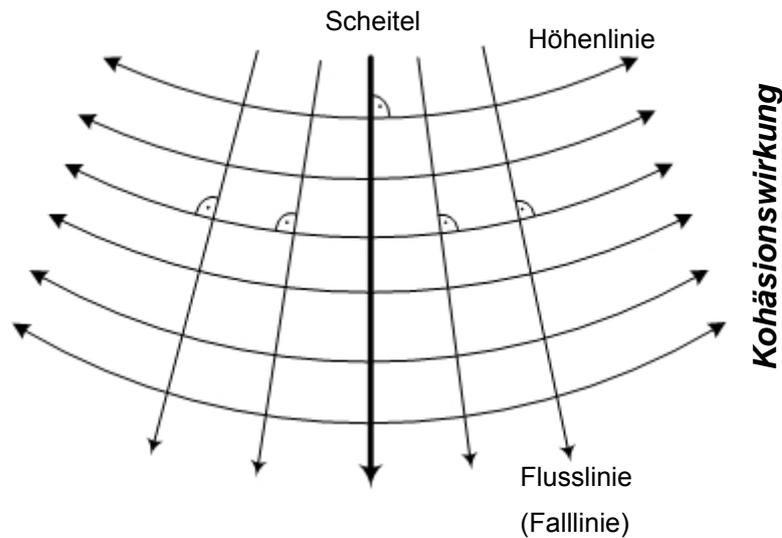
Planare Hangformen mit nach innen geneigten Querprofilen (vgl. Morphologiek. 6) werden gemäß AGN (2004) und RICKLI ET AL. (2008) ebenfalls als anfällig für Rutsch- und Fließprozesse beschrieben. Innerhalb des rinnenartigen Querprofils wird der Boden entlang der Scheitellinie durch konvergierendes Hang- und Oberflächenwasser stark aufgesättigt. Die Wasserphase bleibt dabei länger im umgelagerten Hang- und Verwitterungsmaterial bestehen als bei gestreckten bzw. konvexen Querprofilen. Des weiteren erfährt das Hang- und Oberflächenwasser entlang der Scheitellinie des konkaven Querprofils eine kinetische Energieaufhöhung, die eine Schwächung und Lösung des Korngerüsts hervorrufen kann. Gleichzeitig bewirkt aber die Ausbildung von Stützgewölben entlang der Höhenlinien eine nachhaltige Reduzierung der Massenflussneigung, die sich im Vergleich u.a. zur Morpholo-

gieklasse 5 in einer deutlich reduzierten statistischen Anrisshäufigkeit widerspiegelt (Abb. 21). Die Wirkung des Gewölbes ist mit der einer mechanischen Stützlinie vergleichbar (Abb. 22).



**Abb. 22:** Morphologiekategorie 6 (vgl. Abb. 20) unter dem Einfluss der Gewölbewirkung (Stützlinie)

Ein nach außen gewölbtes Querprofil wirkt sich bei planarem Längsprofil (vgl. Morphologiekl. 4) stark anrisshemmend aus. Das zu Tal strömende Hangwasser hat eine divergierende Grundtendenz (Abb. 23). Es verteilt sich auf deutlich größerer Fläche und erzeugt den gegenteiligen Effekt wie er für Morphologiekategorie 6 aufgezeigt wurde. Hinzu kommt - ebenfalls bedingt durch die konvexe Wölbung des Querprofils - die Ausbildung von fiktiven Zuggliedern infolge Kohäsion entlang der Höhenlinien, wodurch eine Mobilisierung der Hangaufgabe weiter eingeschränkt wird.



**Abb. 23:** Morphologiekategorie 4 (vgl. Abb. 20) unter dem Einfluss der Kohäsionswirkung in Form von fiktiven Zuggliedern entlang der Höhenlinien

#### 4.5.2 Einfluss konvexer Längsprofile

Konvexe Längsprofile ohne Wölbung des Querprofils (vgl. Morphologiekategorie 2) zählen entsprechend der statistischen Auswertung (Abb. 21) neben der Morphologiekategorie 5 zu den am häufigsten von Anrissen betroffenen Hangformen. Umfangreiche textliche Beschreibungen, u.a. Geländeaufnahmen von SCHÖGER (1988), WERLEN (2004), BEINSTEINER und MAYER (1971) sowie HAMBERGER (2000) unterstreichen dies.

Hang- und Oberflächenwässer können an Hangkanten (Neigung Oberhang < Neigung Unterhang) zu einer Unterbodenerosion (vgl. Kap. 2.3.2.2) mit nachfolgender Unterhöhlung der Bodendecke führen (Abb. 24 b). An langen Oberhängen mit großem Einzugsgebiet bedingt dies eine hangaufwärtsgerichtete Ausweitung von Schwächezonen (Laatsch & Grottenthaler 1972).

Bei katastrophalen Niederschlagsereignissen wird insbesondere im Bereich von Hangkanten eine deutliche Impulsänderung  $\Delta I$  des Hangwassers erforderlich, um das im Oberhang strömende Wasser in den steileren Unterhang umzulenken (Abb. 24 a). Da jedoch die geringmächtige Hangauflage durch zuvor beschriebene Erosionsprozesse grundsätzlich eine Schwächezone darstellt (Schoger 1988, Werlen 2004), vermag sie die vorgenannte Impulsänderung kaum zu bewirken. An entsprechenden Stellen kann es zu einem explosionsartigen Losbrechen von Lockergesteinmaterial, einer Hangexplosion (vgl. Kap. 2.2.1), kommen.

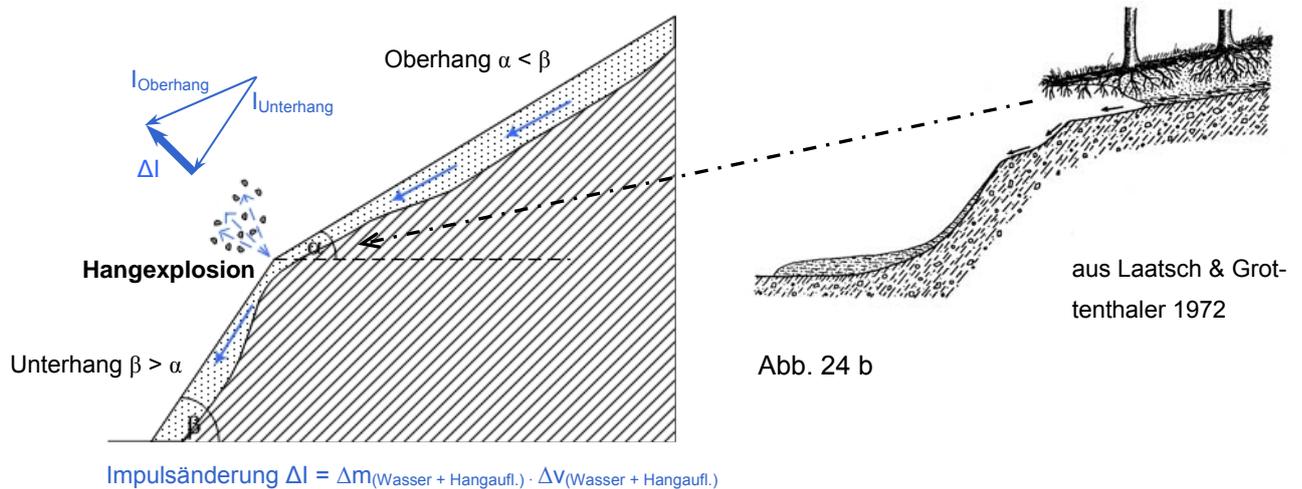
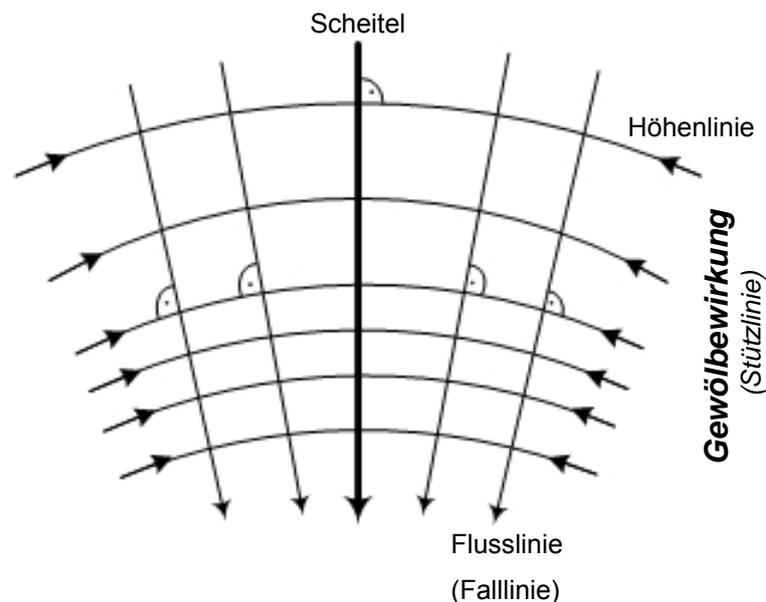


Abb. 24 a

Abb. 24 b

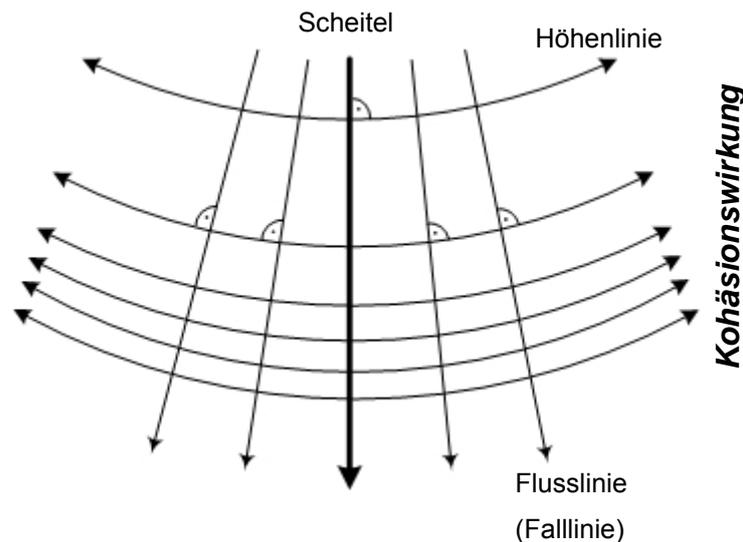
**Abb. 24:** Entstehung einer Hangexplosion an einem Hang mit konvexem Längsprofil (a) bei vorheriger, erosiver Schwächung der Hangkante (b)

Morphologiekategorie 3 zeigt eine im Vergleich zu Morphologiekategorie 6 (vgl. Kap. 4.5.1) leicht reduzierte Anrisshäufigkeit. Mit abnehmender geodätischer Höhe tritt ein konvergierender Massenfluss ein, dessen kinetische Energie mit zunehmender Neigung des Unterhanges wächst. Als hemmender Einfluss wirkt hier jedoch die Stützung des Bodens durch Gewölbewirkung entlang den Höhenlinien (Abb. 25).



**Abb. 25:** Morphologiekategorie 3 (vgl. Abb. 20) unter dem Einfluss der Gewölbewirkung (Stützwirkung)

Auf nach außen gewölbten Querprofilen, die durch Morphologiekategorie 1 repräsentiert sind, verhält sich das zu Tal strömende Wasser ähnlich wie bei Morphologiekategorie 4. Nur tritt hier mit abnehmender geodätischer Höhe ein divergierender Massenfluss ein, dessen kinetische Energie im Vergleich zu Klasse 4 durch eine größere Neigung des Unterhanges wächst. Als hemmender Einfluss ist, wie in Klasse 4, die fiktive Zuggliedwirkung des Bodens aus Kohäsion zu nennen (Abb. 26).



**Abb. 26:** Morphologiekategorie 1 (vgl. Abb. 20) unter dem Einfluss der Kohäsionswirkung

#### 4.5.3 Einfluss konkaver Längsprofile

Konkave Hangformen der Morphologieklassen 7 bis 9 sind statistisch bezüglich ihrer Anrisshäufigkeit - gemäß Abbildung 21 - von geringer Bedeutung. Bei ihnen wirken die hemmenden Einflüsse, die bereits für die Morphologieklassen 1, 3, 4 und 6 in den Kapiteln 4.5.1 und 4.5.2 aufgezeigt wurden, verstärkt. Das zu Tal strömende Wasser im Längsprofil wird in einen schwächer geneigten Unterhang umgeleitet, der die kinetische Energie des Hangwassers deutlich reduziert. Im übrigen hat der schwächer geneigte Unterhang mechanisch eine stützende Wirkung auf den Oberhang. Die Querprofile zeigen in der Reihenfolge planar, konkav und konvex eine abnehmende Anrissgefährdung.

Angelehnt an Überlegungen von SCHÖGER (1988) nach BLONDEAU ET AL. (1975) können sich bei Muldenstrukturen (Neigung Oberhang > Neigung Unterhang) innerhalb der wasserführenden Lockergesteinsschichten Schwächezonen einstellen. Diese beruhen sowohl auf Staueffekten als auch auf Turbulenzen, erzeugt am Übergang vom steileren Oberhang zum flacheren Unterhang.

Wenn die wasserführende Lockergesteinsschicht von einer bindigen, wasserundurchlässigen Deckschicht überlagert ist, entstehen bei starken Niederschlägen Porenwasserüberdrucke, die zu einem explosionsartigen Abgang der Hangauflage führen. Hierbei handelt es sich um

die augenblickliche Entladung hydrostatischer Kräfte. Die wirksamen Drucke sind abhängig von der Mächtigkeit der Deckschicht und der Stauhöhe. Den o.g. Phänomenen liegen Beobachtungen aus DP 2, u.a. von SASSA (1984), IIDA (1999), MOISMANN (1981) und MOSER (1980) zugrunde, die in ihren Untersuchungsgebieten konkave Längsprofile u.a. als Initial flachgründiger Hangbewegungen definieren.

#### **4.5.4 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS**

Die Häufigkeitsverteilungen in den vorgenannten Geländeuntersuchungen und Literaturbeiträgen ermöglichen eine wirklichkeitsnahe Ausweisung gefährdeter morphologischer Formen. Die Statistik zeigt für planare und konvexe Längsprofile ein hohes Gefährdungspotential. Bei konvexen Hangprofilen gilt besonders der Bereich der Hangkante bzw. -stufe als gefährdet. Konkave Längsprofile fallen hingegen kaum ins Gewicht und gelten als Gefährdungsirrelevant. Dennoch kann das Auftreten von Porenwasserüberdrücken in Lockergesteinsschichten auch an Unterhängen konkaver Hangformen zu Instabilitäten führen. Hier können sich Hangmurprozesse schon bei geringen Neigungen des Unterhanges von  $\beta < 20^\circ$  ereignen.

Das für Porenwasserüberdruckbildungen gefährdungsimmanente Infiltrationsgebiet liegt oberhalb des potentiellen Anrissgebietes (Hamberger 2000). Der Oberhang ist daher großräumig in die Untersuchung und anschließende Entscheidungsfindung einzubeziehen. Rissbildungen in diesem Bereich sind im DSS daher grundsätzlich negativ zu bewerten.

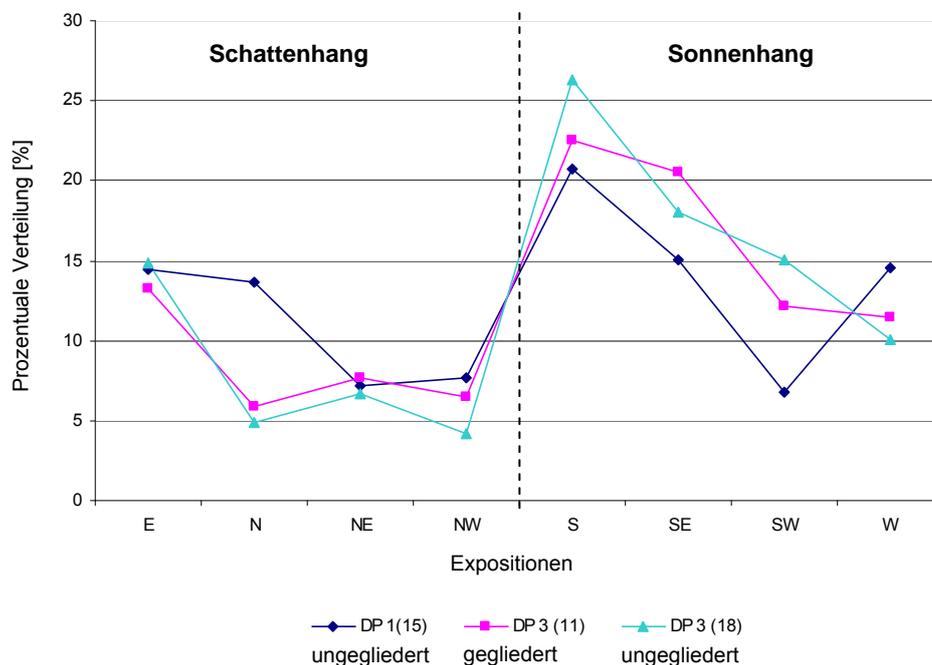
Unter den Querprofilen zeigen vor allem planare Formen eine hohe Anrisshäufigkeit. Die Morphologieklassen 5 und 2 gelten als besonders gefährdet. Eine verminderte Anrisshäufigkeit weisen konkave Querprofile in Form der Morphologieklassen 6 und 3 auf. Konvexe Querprofile tragen kaum zu Anrissbildungen bei.

#### **4.6 Faktor Exposition**

Der Alpenrand ist klimatisch vornehmlich von charakteristischen N-S-Stau- und Westwetterlagen betroffen (Bloetzer et al. (1998), Grieser und Beck (2002), Fricke (2002) und Raible et al. (2005)). Vor allem die atlantisch feuchten Westwetterlagen bedingen starke Niederschläge, die neben der Intensität des Oberflächenabflusses den Bodenwasserhaushalt bestimmen (vgl. Kap. 2.4.1). Dort, wo vorgenannte Einflüsse auf Schwächezonen in der Hangaufgabe bzw. ungünstig ausgerichtete, besonders hangparallele Trennflächen im Festgestein treffen, werden die niederschlagsimmanenten Effekte verstärkt (Moser 1980, Kany & Hammer 1985, Hamberger 2000, Rickli et al. 2008). Dies kann an W-orientierten Hanglagen eine erhöhte Anrisshäufigkeit bewirken (Schoger 1988, Stempel et al. 1996).

Die Häufigkeitsverteilung der acht möglichen Expositionen, basierend auf 783 Einzelereignissen aus 15 Perimetern (DP 1) und Mittelwerten aus 18 Untersuchungsgebieten (DP 3),

unterstreicht die Dominanz S- und SE-orientierter Anrissgebiete (Abb. 27). N-Orientierungen (N, NE, NW) verlieren dagegen an Bedeutung. Aussagen von MOSER (1980), wonach Untersuchungen zur Expositionsabhängigkeit nur dann sinnvoll erscheinen, wenn sie vornehmlich stark gegliederte Untersuchungsgebiete umfassen, in denen *alle* Expositionen vertreten sind, wurden in der Evaluierung berücksichtigt. Abbildung 27 wurde daher zum Vergleich durch Ereignishäufigkeiten ausschließlich gegliederter Untersuchungsgebiete (DP 3), die die von MOSER (1980) geforderten Voraussetzungen erfüllen, ergänzt. Dabei bestätigt sich grundsätzlich der zuvor aufgezeigte Trend, die Expositionen S und SE gewinnen jedoch bei Datengliederung zusätzlich an Gewicht. Bei Differenzierung in Schatten- und Sonnenhang überwiegen Anrisszonen auf Sonnenhängen.



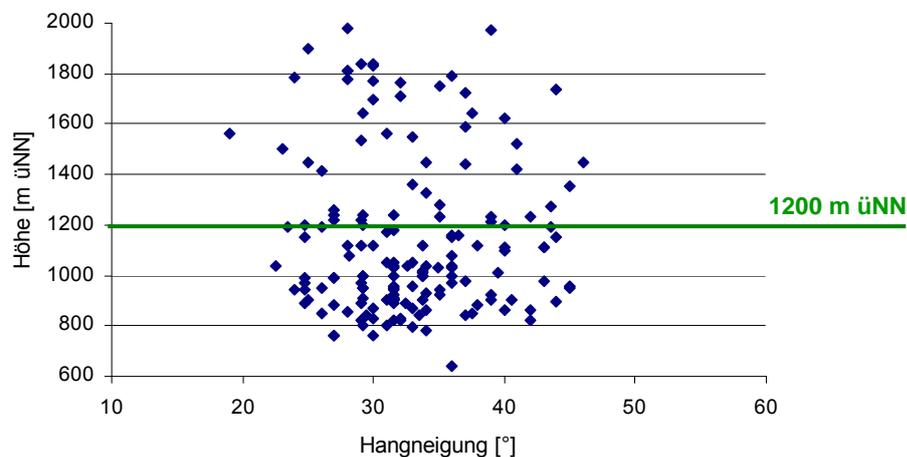
**Abb. 27:** Häufigkeitsverteilung für alle acht Expositionen basierend auf Mittelwerten aus DP 1 und 3 (vgl. Anlagen I, II & III). Die Klammerwerte der Legende entsprechen der Anzahl der berücksichtigten Perimeter. Bezeichnungen *Schatten- und Sonnenhang* aus BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (2005)

#### 4.6.1 Einfluss S- bzw. SE- exponierter Hanglagen

Frost-Tau-Wechsel treten zweifelsfrei am häufigsten in unbewaldeten S-exponierten Hanglagen mit Jahreszeitenfrost auf (Hohensinn 1979, Rieger 1999) und führen dort zu intensiver, plötzlich einsetzender Schneeschmelze und damit einhergehend zu einer alternierenden Bodenfeuchte (Moser 1980, Moser & Hohensinn 1982/83, Krauer 2004). Schmelzwasser begünstigt mit Eintritt ins Schicht- und Trennflächengefüge des Festgesteins unter Frostbedingungen eine fortschreitende, tiefgründige Verwitterung (Congelifraktion), (Schoger 1988). Diese Verwitterungsprozesse verstärken - besonders bei einer Gefügeorientierung orthogo-

nal zur Hangneigung - eine Schuttakkumulation, die als Ausgangsmaterial von Hangmuren gilt. Kalkalpine Gesteine - besonders Hauptdolomit (v. Poschinger 1992, Rieger 1999) und Wettersteinkalk (Rieger 1999) - gelten dabei als ergiebigerer Schuttlieferant als zentralalpine (SilvaProtect 2008), (vgl. Kap. 2.4.1). Aus diesen Korrelationen kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass grundsätzlich an S-orientierten Hängen die mächtigsten Verwitterungsschuttlagen auftreten (Rieger 1999).

Eine Häufigkeitsverteilung S-exponierter Anrisszonen zeigt, dass Frost-Tau-Zyklen vermehrt Hanginstabilitäten zwischen 800 und 1200 m üNN bewirken. Hier treten rund 75 % der dokumentierten Anrisszonen auf (Abb. 28). Ihre Konzentration in diesen Höhenlagen basiert auf relativ großen Temperaturamplituden mit deutlichen Frost- und Tauwechseln, vornehmlich im Frühjahr und Herbst (vgl. Kap. 2.4.2).



**Abb. 28:** Punktwolke S-exponierter Anrisszonen, aufgetragen über geodätischer Höhe und Hangneigung. Datenbasis: 162 Ereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

Detaillierte Analysen SE-, SW- und W-exponierter Hänge zeigen eine eher gleichmäßige Höhenverteilung der Anrisszonen. Geringere Temperaturamplituden unterhalb von 1200 m üNN lassen hier einen deutlich geringeren Einfluss von Frost-Tau-Zyklen vermuten.

#### 4.6.2 Einfluss N-exponierter Hanglagen

In der in Abbildung 27 aufgezeigten Häufigkeitsverteilung aus DP 3 (gegliedert und ungegliedert) spielen N-orientierte Hanglagen eine untergeordnete Rolle. Die statistische Auswertung der Einzelwerte in DP 1 unterstreicht jedoch eine deutliche Konzentration N-exponierter Anrisszonen. Dieser Peak ist auf nur schwach gegliederte Aufnahmegebiete zurückzuführen und daher, gemäß MOSER (1980), (vgl. Kapitel 4.2), nur bedingt repräsentativ. Generell kann eine geringere Vegetationsbedeckung bzw. deren schlechte Entwicklung (u.a. mangelhafte Verjüngung) auf Schattenseiten für ein erhöhtes Gefährdungspotential im Vergleich zu Son-

nenseiten verantwortlich sein (Coldea & Pop 2004). Spezielle Untersuchungen in silikatischem Gestein (östlich Veronas) zeigen zudem auf N-exponierten Hanglagen aufgrund hoher chemischer Verwitterungsintensität stärkere Auslaugung von Al- und Fe-Verbindungen als auf Südseiten (Egli et al. 2006), was langfristig eine höhere Verwitterungsintensität des Festgesteins bewirkt und zu einer Schuttakkumulation beiträgt. Dieses speziell im Kristallin beobachtete Phänomen konnte anhand der Daten aus DP 1 nicht bestätigt werden.

RIEGER (1999) weist des Weiteren auf eine in N-exponierten Lagen gefährdungsimmanente Überlagerung von Starkregenereignissen und Schneeschmelze hin. Die Schneeschmelze setzt hier erst im Frühsommer ein und korreliert zeitlich mit der höchsten Gewitter- bzw. Niederschlagshäufigkeit.

#### **4.6.3 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS**

Die Auswertungen gegliederter Daten aus DP 3 zeigen eine Häufung von Anrisszonen in sonnenexponierten, besonders in rein S-exponierten Hanglagen. Dies gilt vor allem dann, wenn sich das Untersuchungsgebiet in Höhenlagen unterhalb 1200 m üNN befindet. Eine mächtigere Schuttakkumulation generiert dort eine erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit.

Für SE-, SW- bzw. W-orientierte Hanglagen ist generell von einem reduzierten Gefährdungspotential gegenüber S-exponierten Hängen auszugehen. Für sie erübrigt sich eine weitere Differenzierung durch Mitführung der Höhe, da entsprechende Abhängigkeiten nicht nachweisbar sind.

N-exponierten Hanglagen wird entsprechend der prozentualen Häufigkeitsverteilung ein nur untergeordnetes Gefährdungspotential zugewiesen. Eine schlechtere Entwicklung der Vegetation und eine zeitliche Überlagerung von Starkregenereignissen und Schneeschmelze während des Frühjahrssommers können grundsätzlich auch an Nordhängen zu einer erhöhten Hanginstabilität beitragen. Des Weiteren führen Auslaugungsprozesse in kristallinen Einheiten zu einer erhöhten chemischen Verwitterungsintensität.

Vorgenannte Kriterien führen in der Konklusion zu einem an Sonnenhängen leicht erhöhten Hangmurepotential gegenüber Schattenhängen.

#### **4.7 Faktor Vegetation**

*Vegetation alleine kann eine Mure nicht aufhalten* (Rieger 1999), sie wirkt jedoch armierend im Bereich potentieller Anrisszonen. Ihre Hemmfunktion tritt besonders in oberflächennahen Deckschichten zutage, deren mögliche Scherflächen von Wurzelgeflecht durchdrungen werden (Frehner et al. 2005).

**Tab. 7:** Zusammenfassende Beurteilung des Einflusses der Vegetation auf die Hangstabilität (nach Greenway 1987, ergänzt durch Angaben weiterer Autoren)

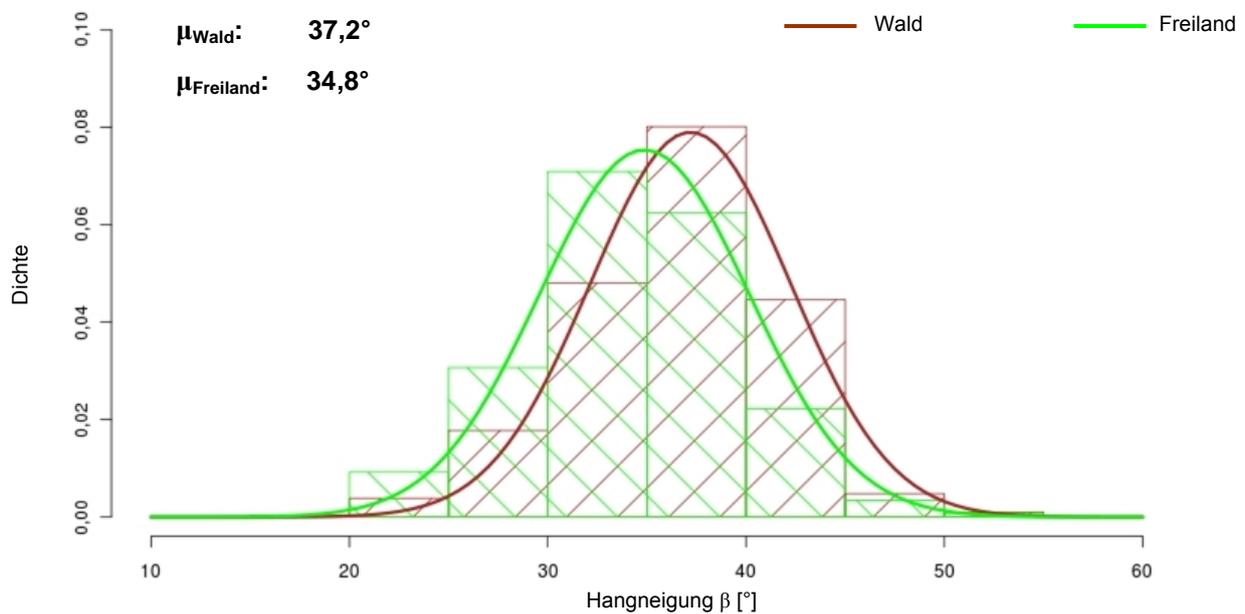
<b>Hydrologie</b>	<b>Einfluss auf Hangstabilität</b>
Blattwerk verringert die Infiltration von Niederschlag durch Absorption, Evaporation und Interzeption	positiv
Wurzeln erhöhen Rauigkeit und Durchlässigkeit im Oberboden und somit die Infiltrationskapazität	positiv/negativ
Wurzeln reduzieren Bodenfeuchte über Transpiration → Reduzierung von Porenwasserdrücken	positiv
Durch Bewuchs verringerte Bodenfeuchte verstärkt Trockenrissbildungen in kohäsiven Böden → hohe Infiltrationskapazität	positiv/negativ
Kahlschlag begünstigt Feststoffaustrag → Infiltrationskapazität und Erosionspotential erhöht	negativ
<b>Mechanik</b>	<b>Einfluss auf Hangstabilität</b>
Wurzeln armieren oberflächennahe Bodenschichten, erhöhen Scherfestigkeit → Erosionsreduktion	positiv
Artengleiche Durchwurzelungstiefe fördert die Ausbildung eines Gleithorizontes und damit die Reduzierung der Bodenscherfestigkeit (Schauer 1992).	negativ
Windbeanspruchung der Vegetation führt zu erhöhter dynamischer Belastung, besonders in wasserübersättigten Böden (Beinsteiner & Mayer 1971)	negativ
<b>Zustand des Waldbestandes</b>	<b>Einfluss auf Hangstabilität</b>
<i>Waldzustandskategorie W1</i> (BUWAL 1996): Mittelalterliche bis ältere oder stufige Bestände, hoher Deckungsgrad, Baumarten und Gefüge standortgemäß	positiv
<i>Waldzustandskategorie W2</i> (BUWAL 1996): Mittelalterliche bis ältere oder stufige Bestände	positiv/negativ
<i>Waldzustandskategorie W3</i> (Rickli 2001): Jungwald, Schadensflächen (Kahlhieb- und Sturmflächen), geringer Deckungsgrad	negativ

Wurzelwerk bindet den Boden zu einer *monolithischen* Masse (De Beats et al. 2008). Es unterstützt den Versickerungsprozess und reduziert damit den Oberflächenabfluss des Niederschlags (Wichmann 2006), (Tab. 7). Das elastische Geflecht sorgt zudem für eine Stabilisierung des Bodens durch Armierung. Dabei generieren hohe Wurzeldichten mit kleinen Durchmessern<sup>7</sup> nachvollziehbar eine wirksamere Stabilisierung als geringe Dichten mit größeren Wurzeldurchmessern (Gray & Sotir 1996, Genet et al. 2005) - vergleichbar der Mas-

<sup>7</sup> Der Anstieg der Zugfestigkeit bei Abnahme des Wurzeldurchmessers ist auf einen höheren Zelluloseanteil dünner Wurzel zurückzuführen (Genet et al. 2005).

senbetonbewehrung mit vielen kleinen Bewehrungsdurchmessern. Des weiteren wirkt Vegetation positiv auf die sich bedingenden physikalischen Bodeneigenschaften Durchlässigkeit und Dichte (Rickli et al. 2008).

KATZENBACH und WERNER (2007) weisen einen Zusammenhang von Durchwurzelung und Kohäsionseffekten im Boden an Dammmaterial nach. In ihrer Versuchsreihe zeigt undurchwurzelter Boden eine Kohäsion zwischen  $c = 0$  bis  $2,4 \text{ kN/m}^2$ . Nach Durchwurzelung steigt in Abhängigkeit von der Durchwurzelungsintensität bzw. dem Wassergehalt und der Körnung des getesteten Materials die Kohäsion auf  $c = 3,5$  bis  $6,3 \text{ kN/m}^2$  an.



**Abb. 29:** Empirische Dichte von Anrisszonen unter Wald und auf Freiland mit Angabe statistischer Mittelwerte. Datenbasis: 941 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II), dargestellt mit dem Statistikprogramm R.

Oberflächennahe Rutsch- und Fließbewegungen ereignen sich sowohl im Freiland<sup>8</sup> als auch unter Wald. Mit Bezug auf Abbildung 29 zeigt sich, dass Waldrutschungen statistisch gesehen in steileren Gebieten ( $\mu_{\text{Wald}}: 37,2^\circ$ ) abgehen als Freilandrutschungen ( $\mu_{\text{Freiland}}: 34,8^\circ$ ), u.a. auch, weil Wald flächennutzungsbedingt im Vergleich zum Freiland auf steileren Hängen stockt (Mößmer 2001, Rickli 2001). SCHÖGER (1988) vergleicht die Standsicherheit für bewaldete und nicht bewaldete Hänge: Ein mit Gehölz bestockter Hang ist bei Vollsättigung der Hangauflage in 4 - 5° steileren Hangbereichen standsicher als ein Wiesenhang.

<sup>8</sup> Die vegetationsbezogene Homogenisierung der Daten aus DP 1 führt zu folgender Zuordnung:

Freiland: Wiese, Weide, (sub)-alpiner Rasen, Kahlschlagflächen

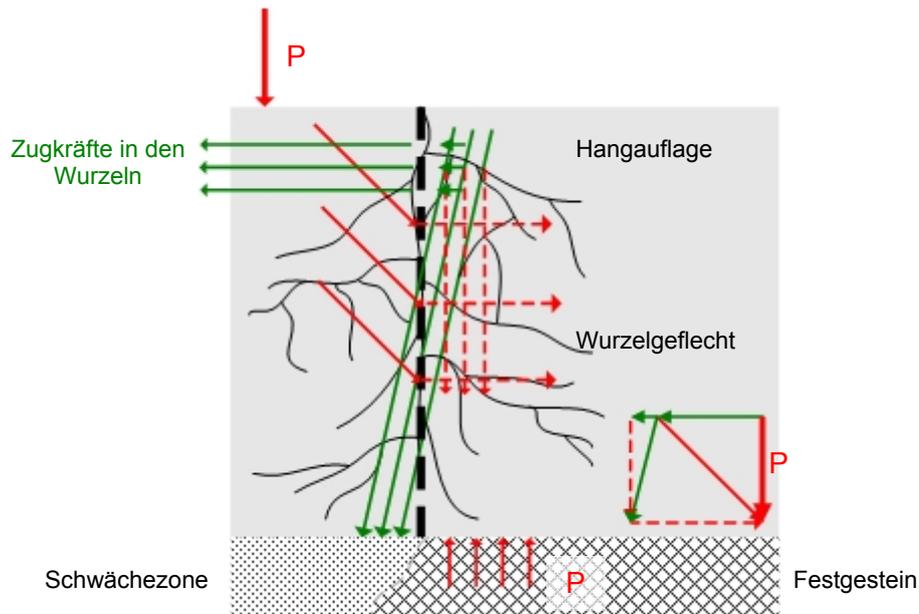
Wald bzw. Gehölz: Nadel- und Laubwald, Krummholz, Buschwerk

Hänge mit Wiesenvegetation sind nahezu unter allen Hangneigungsklassen anrissgefährdet (Schoger 1988). Die Daten aus DP 3 zeigen ein generell häufigeres Auftreten von Anrissen auf Freiflächen (64 %) als in bewaldeten Gebieten (36 %). Dabei können unter Wald z.T. deutlich größere Hangmuren auftreten als in freiem Gelände (Moser 1980). Dies mag u.a. auf ein durch Wurzelwirkung entstandenes, größeres Porenvolumen zurückzuführen sein, das Hangwasser schnell und tief einsickern lässt und zu Strömungsdrücken führt (Schoger 1988). Der Vegetationszustand bzw. sein Armierungspotential stehen dabei in direktem Zusammenhang mit der Exposition des Hanges (vgl. Kap. 4.6.2). An schattenexponierten Hanglagen tritt z.B. im Vergleich zu Sonnenseiten ein geringerer Verjüngungswuchs auf (Buck 2001), der zur Häufung von Anrisszonen unter Wald beiträgt (DP 1).

Ab Neigungen von  $\beta \sim 36^\circ$  (Niederschick 2007) bis  $\beta > 40^\circ$  (Epple 1981, Rickli 2001, Frehner et al. 2005) lässt die armierende Wirkung des Waldes nach. Daten aus DP 1 zeigen eine Angleichung der Anrisshäufigkeiten von Freiland und Wald etwa ab  $\beta > 45^\circ$ . Generell ist diese Erscheinung auf eine abnehmende Standfestigkeit von Gehölz mit zunehmender Hangneigung zurückzuführen. Kongruenzen sind auch für geringe Neigungen zu erkennen: Unterschiede zwischen Freiland und Wald werden erst ab Neigungswinkeln  $\beta > 22^\circ$  deutlich. Dies mag auch darauf zurückzuführen sein, dass bei so geringen Neigungen besonders Verhältnisse zu Abgängen am Hang führen, die von der Vegetation unbeeinflusst sind.

Textliche Beschreibungen aus DP 2, u.a. von MOSER (1980), SCHOGER (1988), RENTSCHLER (1992), BECHT (1995), HAMBERGER (2000 & 2007), MÖßMER (2001), RICKLI (2001), WERNER (2007), NORRIS und GREENWOOD (2006), RICKLI ET AL. (2008), RICKLI & GRAF (2009) etc. bestätigen vorgenannte Ergebnisse, unterstreichen aber generell eine armierende Wirkung von Gehölz mit einem murhemmenden Effekt.

Die mechanische Bodenarmierung durch Pflanzen geht hauptsächlich auf verholzte Wurzelzellen (Xylem-Elemente) zurück, die erst bei Gehölz vollständig entwickelt sind (v. Wyl 1987). Die Belastbarkeit ist u.a. abhängig von Art und Alter der Pflanze, Wurzeldurchmesser und Wachstums Umgebung bzw. -bedingung (Sidle & Terry 1992). Detaillierte Angaben zu Zugfestigkeiten alpiner Gehölze sind Tabelle 8 zu entnehmen. Es ist dabei jedoch von einer virtuellen Scherfestigkeit auszugehen, die durch mechanische Kraftumlagerungen entsteht - vergleichbar mit Scheransätzen im Stahlbetonbau. Dabei wirken die Wurzeln als Zugglieder und der Schotter als Druckkörper (Abb. 30). Die Mechanik stellt das Ergebnis als fiktive Scherfestigkeit dar. Sie wird jedoch durch die Zugfestigkeit der Wurzeln und nicht durch ihre Scherfestigkeit bewirkt.



**Abb. 30:** Mechanik-Modell virtueller Scherkräfte im wurzelarmierten Boden

#### 4.7.1 Einfluss von Gehölz

Generell erreicht die Durchwurzelung von Gehölz größere Tiefen (bis zu 4,0 m u GOK, Crow 2005) als bei Wiesen und Weiden und wirkt daher bei hohen Waldanteilen an der Untersuchungsfläche stabilitätsfördernd (Mößmer 2001). Am wirksamsten ist ein guter Waldzustand mit hoher Biodiversität und einer Kombination aus heterogenen Wurzeltiefen, wie sie bei stufigen Mischwaldbeständen vorzufinden sind (Tab. 7). Angaben zu Zugfestigkeiten von Gehölzwurzeln variieren zwischen  $\sigma = 0,5$  und  $\sigma = 7 \text{ kN/cm}^2$  (Genet et al. 2005, De Beats et al. 2008, Schiechl 1985, s. auch Tab. 8). Bei sehr kleinen Wurzeldurchmessern (0,4 mm) wurden u.a. für Fichten (*Picea abies*) Werte von  $\sigma \sim 20 \text{ kN/cm}^2$  (Genet et al. 2005) gemessen.

Vorgenannte Zugfestigkeitsangaben erscheinen unglaublich hoch. Sie wurden jedoch telefonisch von Thierry Fourcaud, Co-autor von GENET ET AL. (2005), für sehr kleine Wurzeldurchmesser  $< 1 \text{ mm}$  bestätigt. Zudem wurde von Monsieur Fourcaud auf eine sehr große Dehnungskapazität der Wurzelstränge unter Belastung hingewiesen. Es ist dabei von einem Mechanik-Modell virtueller Scherkräfte im wurzelarmierten Boden gemäß Abbildung 30 auszugehen.

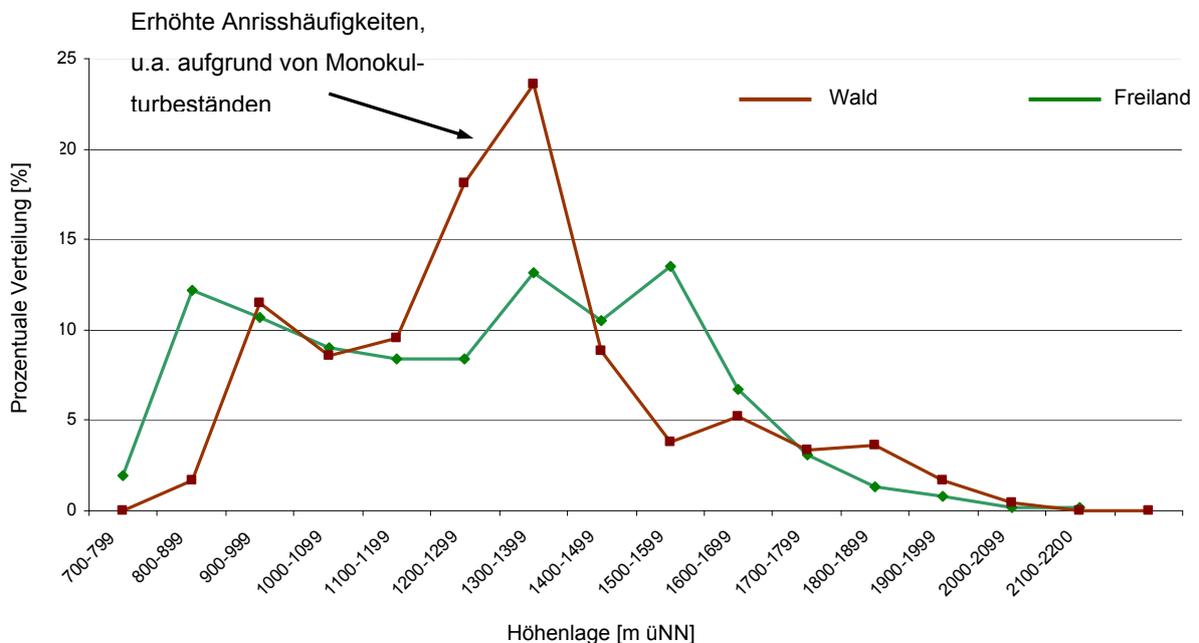
**Tab. 8:** Angabe zu Wurzeleigenschaften<sup>9</sup> und Drainagewirkung alpiner Gehölze (modifiziert nach Greenway 1987 bzw. Gray & Sotir 1996). Gehölzarten, die einen positiven Einfluss auf die Hangstabilität zeigen, sind grau hinterlegt (angelehnt an Angaben von Beinsteiner & Mayer 1971 bzw. Frehner et al. 2005)

Alpine Gehölzarten	Zugfestigkeit $\sigma$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	Wurzeleigenschaften	Wasserbedarf (Drainagewirkung)
Kiefer ( <i>Pinus sylvéstris</i> )	1-2	Flachwurzler	hoch
Zirbe ( <i>Pinus cembra</i> )	1,8	k.A.	k.A.
Tanne ( <i>Abies álba</i> )	1,9	Tiefwurzler	mäßig bis hoch
Fichte ( <i>Píceá ábies</i> )	2,8	Flachwurzler	mäßig
Eiche ( <i>Quercus sp.</i> )	2,0	Tiefwurzler	hoch
Sandbirke ( <i>Betula pendula</i> )	3,8	dichter Flachwurzler	mäßig bis hoch
Winter-Linde ( <i>Tília cordata</i> )	2,6	Flach- bis Tiefwurzler	mäßig bis hoch
Silberweide ( <i>Salix álba</i> )	k. A.	Tiefwurzler	hoch
Rotbuche ( <i>Fágus sylvática</i> )	5,5	Flachwurzler	gering
Lärche ( <i>Larix decidua</i> )	k.A.	Tiefwurzler	k.A.
Weiden ( <i>Sálíx helvetica</i> )	1,4	Mitteltiefwurzler (weit- und tiefreichend)	hoch
Weißerle / Grauerle ( <i>Álnus incána</i> )	3,2	dichter Mitteltiefwurzler	hoch
Grünerle ( <i>Álnus viridis</i> )	k.A.	Flachwurzler	hoch
Schwarzerle ( <i>Álnus glutinosa</i> )	k.A.	dichter Tiefwurzler	hoch
Ulmen ( <i>Ulmus glábra</i> )	k.A.	Tiefwurzler	hoch
Bergahorn ( <i>Acer pseudoplátanus</i> )	k.A.	Tief- bis Mitteltiefwurzler	mäßig bis hoch
Sanddorn ( <i>Hippophae rhamnoides</i> )	k.A.	Tiefwurzler (bis 1,20 m uGOK)	sehr gering bis gering
Eberesche ( <i>Sorbus aucuparia</i> )	k.A.	Tiefwurzler	mäßig bis hoch

Großflächig angelegte, flachwurzelnende Monokulturen von Fichten bzw. Kiefern sind mit zielgerichtetem Blick auf wirtschaftliche Wuchsleistungen zumeist nicht speziesgerecht und gelangen dabei häufig an ihre Überlebensgrenzen. Dies führt bei Schwächungen des Bestandes, z.B. durch lang anhaltende Hitzeperioden oder Sturm, u.a. zu Anfälligkeiten für Borkenkäfer (BMU 2008). In montanen Höhenlagen, zwischen 1100 und 1400 m üNN, in denen im besonderen Fichten zur bevorzugten Waldvegetation gehören (Koch 2004, Scholz 2005), sind unter vorgenannten Wuchsbedingungen Erosionsschutz und Armierung stark reduziert (BayLfU 2008b), (Abb. 31).

<sup>9</sup> Die Angaben zu Zugfestigkeiten alpiner Gehölze sind nur dann vergleichbar, wenn sie bei gleichen Wurzel-durchmessern bestimmt werden. Hiervon ist bei den Tabellenwerten aufgrund von Angaben unterschiedlicher Autoren nicht auszugehen.

Künstliche Starkregenversuche<sup>10</sup> unterstreichen, dass insbesondere unter Fichtenjungwuchs der Oberflächenabfluss bis zu 55 % des Gesamtniederschlags beträgt - mit stark negativem Einfluss auf die Hangstabilität. Zum Vergleich: Bei Bergmischwald liegt der Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtniederschlag bei max. 10 % (Bunza & Schauer 1989).

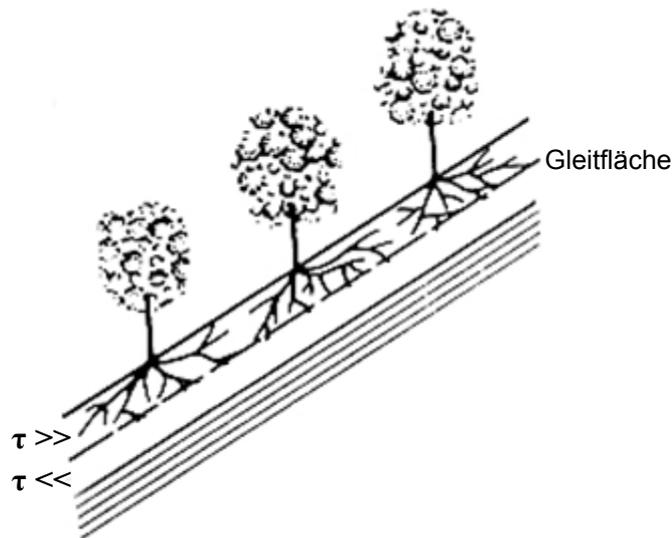


**Abb. 31:** Prozentuale Verteilung der Höhenlage von Anrisszonen unter Wald und auf Freiland. Datenbasis: 941 Einzelereignisse aus DP 1 (vgl. Anlage II)

Abbildung 32 zeigt, wie sich durch Existenz eines einheitlichen, scharf begrenzten Wurzelhorizontes innerhalb der Hangauflage zwei Bereiche mit unterschiedlich hohen Scherfestigkeiten ausbilden können. Hanganbrüche gehen zumeist auf Zonen mit den geringsten Scherfestigkeiten zurück. Derartige, potentielle Schwächezonen (Gleitflächen) liegen zumeist direkt unter dem scharf begrenzten Wurzelhorizont (Schauer 1999). Des weiteren können an der Untergrenze des Wurzelhorizontes erhöhte Sickerwassermengen auftreten, die auf den vordergründig positiven Rückhalt des Oberflächenwassers durch das Wurzelgeflecht zurückgehen, aber auch zu einer Tiefenerosion führen (Greenway 1987, Schauer 1998).

Versuche von BRANSBY ET AL. (2006) und POLLEN (2007) zeigen nachvollziehbar, dass der Armierungseffekt durch Wurzeln bei starker Bodenfeuchte und geringen Bodenschersfestigkeiten deutlich abnimmt.

<sup>10</sup> Die Beregnung erfolgte ca. 2 m üGOK, weit unter dem Kronendach, so dass der Deckungsgrad der Baumkrone auf die Oberflächenabflüsse keinen Einfluss hat.



**Abb. 32:** Ausbildung von Gleitflächen innerhalb der Hangauflage durch flachwurzelnde Monokulturen (modifiziert nach Greenway 1987)

#### 4.7.2 Einfluss von Wiesen- und Weideflächen

Der Feinkornanteil von Wiesen- und Weideböden ist oftmals höher als bei Waldböden. Dies bedingt geringere Infiltrationsraten, höhere Abflüsse und größere erosive Feststoffspenden, so dass agrarwirtschaftliche Nutzflächen häufig an feuchten Standorten zu finden sind. Die Ursache für einen erhöhten Feinkornanteil vermutet BECHT (1995) in der Eliminierung grober Komponenten durch anthropogene Nutzung.

Die Armierung alpiner Wiesen beruht auf einem dichten Wurzelfilz, der nur bis wenige Dezimeter unter die Bodenoberfläche reicht und einen homogenen Wurzelhorizont ausbildet. An dessen unterer Grenze nimmt die Armierung des Bodens abrupt ab (Schauer 1992 & 1999, BayLfW 1996). Häufig stellt sich auf Niveau des unteren Wurzelhorizontes mit Eindringen von Sickerwasser eine Gleitfläche ein (vgl. Kap. 4.7.1, Abb. 33). Zugfestigkeiten von Alpenwiesen-Vegetation sind durchaus vergleichbar mit denen einiger Gehölze. Literaturangaben zu Zugfestigkeiten von Gräsern variieren zwischen  $\sigma = 0,5$  und  $\sigma = 2$  kN/cm<sup>2</sup> (Schiechtl 1985, v. Wyl 1987), von Wiesenkräutern zwischen  $\sigma = 0,3$  und  $\sigma = 6$  kN/cm<sup>2</sup> (Schiechtl 1985). Auch für diese Vegetationsform gilt das Mechanik-Modell virtueller Scherkräfte im wurzelarmierten Boden in Abbildung 30.

#### 4.7.3 Rechnerischer Ansatz

RICKLI ET AL. (2008) geben mittels eines iterativen Rechenmodells die positive Gehölzwirkung auf die Stabilitätsverhältnisse eines beliebigen Hanges mit der Erhöhung des Reibungswinkels um 5° auf  $\varphi' + 5^\circ$  an. Ihre Berechnungen unterstellen, dass Hänge im trocken-

nen Zustand stabil sind und frühestens durch Niederschlagseinwirkungen rechnerisch instabil werden. Des Weiteren existieren Ansätze, den Gehölzeinfluss mittels einer Kohäsionskomponente  $c_{\text{Wald}}$  (Meisina & Scarabelli 2007, Norris & Greenwood 2006) zu berücksichtigen. Beide Ansätze beziehen zwar den positiven Einfluss der Vegetation auf die Standsicherheit eines Hanges mit ein, sie differenzieren jedoch nicht das Armierungspotential hinsichtlich Gehölzart, Zustand des Waldes und Deckungsgrad. Bei Beachtung einer zum Teil erheblich vergrößerten Hangstabilität unter Mitführung vorgenannter Einflüsse erscheinen die negierten Parameter jedoch essentiell. Sie können kaum durch eine fiktive Erhöhung der Scherfestigkeiten und Manipulation des Reibungswinkels  $\varphi'$  bzw. Kohäsion  $c$  kompensiert werden.

#### 4.7.4 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS

Generell ist von einer murhemmenden Wirkung des Waldbestandes gegenüber Freiflächen auszugehen. Das Armierungspotential von Gehölz wirkt jedoch reduziert an schattenexponierten Hanglagen. Vorgenannte Ergebnisse lassen zudem bei Hangneigungen von  $\beta > 40^\circ$  kaum einen Unterschied in der Stabilität zwischen Freiland und Wald erkennen.

In eine erste Beurteilung des Gefährdungspotentials sollte zunächst die Untersuchung des Waldzustandes Eingang finden. Ein stufiger, dichter, speziegerechter Bestand, bestehend aus tief- bis mitteltiefwurzelndem Gehölz, bietet eine nachhaltige Schutzwirkung vor Hangbewegungen in jeder Höhenlage unter jedem Neigungswinkel. Artenreiche Mischbestände aus Esche, Ulme, Eiche, Erle, Weide, Tanne und Lärche gelten dabei aufgrund ihrer tiefwurzelnden Eigenschaft als Gehölze mit hohem Armierungspotential und guter Resistenz gegenüber Schwächungen jeder Art. Durch ihren hohen Wasserbedarf sorgen sie an vernässeten Standorten für eine hangstabilisierende Wirkung.

Flachwurzelnde Monokulturen (Fichten, Kiefern) sind in ihrem murhemmenden Effekt negativ zu bewerten, da sie aufgrund ökonomischer Vorteile durch schnelle Wuchsleistungen zu meist nicht speziegerecht angelegt wurden und dabei häufig zu Anfälligkeiten jedweder Art neigen. Unter schlechten Wuchsbedingungen sind Erosionsschutz und Armierung reduziert. Bestandsschwächungen durch Kahlhieb, Sturm oder Waldbrand gelten als destabilisierend. Schadwirkungen an Vegetation durch anthropogene Einflussnahme werden in Kapitel 4.8.4 beschrieben.

Bei der Beurteilung des Vegetationseinflusses auf die Standfestigkeit sollte von dem Ansatz einer ausschließlichen Scherfestigkeitszunahme Abstand genommen werden, da Angaben hierzu in Abhängigkeit von Art und Alter der Pflanzen, Wurzeldurchmessern und Wuchsumgebung bzw. -bedingung (Sidle & Terry 1992) stark variieren können. Zudem zeigen Wurzeltiefe und Drainwirkung des Wurzelwerks einen deutlich höheren Stabilitätseffekt als die Scherfestigkeit des Wurzelwerks.

## 4.8 Faktor anthropogene Nutzung

Der Mensch nimmt mehr oder weniger stark gestalterischen Einfluss auf seine natürliche Umgebung. Seine Eingriffe können direkt oder indirekt Murrprozesse auslösen bzw. verhindern (Kienholz 1977). Im Alpenraum zählen Almbewirtschaftungen, Tourismus, Wege- und Straßenbau und Forstwirtschaft als besonders gefährdungsimmanent. Die mit diesen Aktivitäten einhergehenden Verdichtungen bzw. Verknetungen der Hangauflagen führen zu erhöhten Oberflächenabflüssen, die ihrerseits die Hangstabilität erosiv beeinflussen. Häufig treten daher Anrisszonen an Bewirtschaftungsgrenzen - die vielfach auch Grenzen im Oberflächenabflussverhalten darstellen - sowohl zwischen Wald und Freiland als auch zwischen Wiese und Weide oder kurz unterhalb intensiv genutzter Bewirtschaftungsgebiete auf (Rickli 2001, Rickli & Bucher 2003, Krauer 2004).

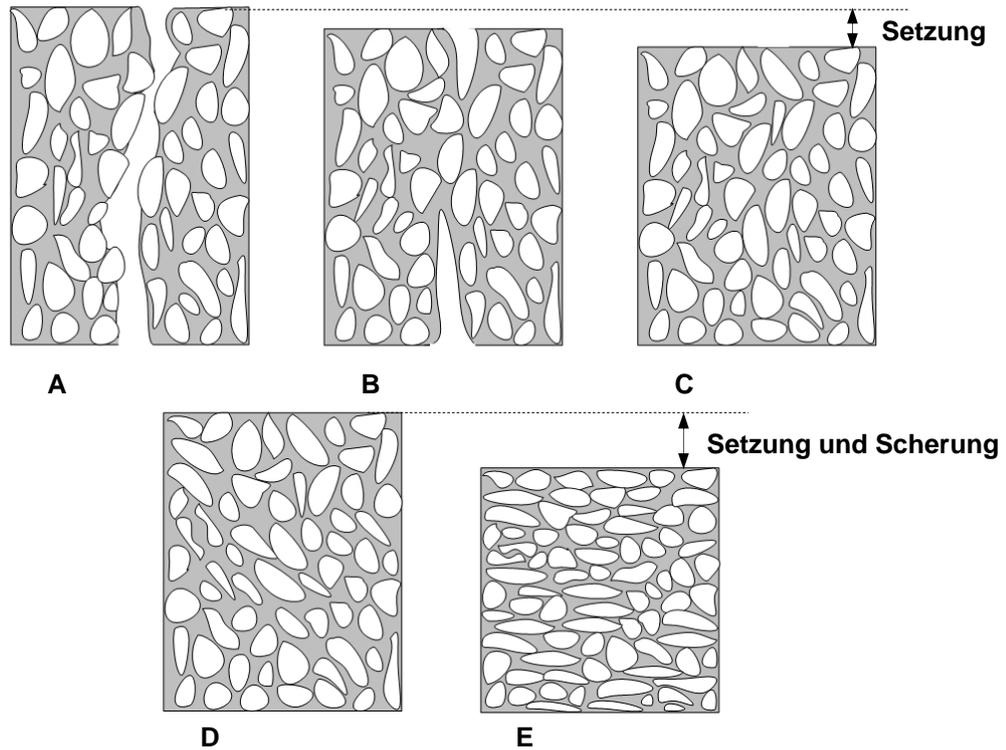
### *Einfluss der Bodenverdichtung*

Bodenverdichtungserscheinungen werden im Alpenraum vornehmlich durch Hufbelastungen von Weidetieren verursacht. Mäh- und Holzrückmaschinen aber auch alpiner Sporttourismus hinterlassen gleichartige Schäden. Scherbewegungen aus dynamischen Lasten initiieren eine Homogenisierung des Bodens bzw. eine Partikeleinregelung. Diese führt zu einem zunehmend horizontal ausgerichteten Porensystem mit verminderter vertikaler Durchlässigkeit (Scheffer & Schachtschabel 2002), (Abb. 33). Es schließen sich vornehmlich Makroporen<sup>11</sup>, die maßgeblich am raschen Eindringen von Niederschlags- und Oberflächenwasser in tiefere Bodenhorizonte beteiligt sind (Zhang & Horn 1996). Verdichtungen von Hangauflagen mit hohem Ton- und Schluffanteilen verhindern nachhaltig die Infiltration des Niederschlags, fördern einen erhöhten Oberflächenabfluss (Johannes 1995) - vgl. Kap. 4.10 - und damit einhergehend eine erhöhte Erosivität, insbesondere von horizontal eingeregelteten Bodenpartikeln. Zugleich können Verdichtungen gefährliche Porenwasserüberdrucke aufbauen und zu Hangexplosionen führen, wenn Niederschlag in die Hangauflage infiltriert (Schoger 1988, Krauer 2004).

Durch Verdichtung der Hangauflage wird zusätzlich die Bodendurchlüftung und damit die Zersetzung organischer Substanzen gehemmt. Dies wirkt sich negativ auf das Nährstoffangebot für die Vegetation aus (Graf et al. 2003) und führt im Pflanzenbestand zu einer Reduzierung der Artenvielfalt und des Deckungsgrades. Zudem mindert die Verdichtung ein tiefreichendes Armierungspotential des Wurzelwerks (Rickli 2001).

---

<sup>11</sup> Makroporen umfassen u.a. Wurm- und Wühltiergänge, Wurzelkanäle, Risse und Spalten.



Erläuterungen:

- A) Unbeeinflusster Zustand
- B) Setzung, Reduzierung der Gasdiffusion bei steigender Wassersättigung
- C) Setzung, die Infiltration wird verlangsamt
- D) Setzung und Scherung, Neuordnung der Bodenpartikel und/oder Bodenporen
- E) Setzung und Scherung, Anisotropie der Porenfunktion  $k_{hor} > k_{vert}$

**Abb. 33:** Bodendeformation durch Kompaktierung und Scherung (nach Scheffer & Schachtschabel 2002)

#### 4.8.1 Einfluss der Bewirtschaftung von Almflächen

Der Terminus *Almen* beschreibt Gebirgsweiden bzw. -wiesen, die zumeist innerhalb des natürlichen Waldgürtels liegen und durch Rodung entstanden sind (Karl & Danz 1969). Literaturhinweise lassen eine höhere Rutschaktivität auf bestoßenen Weideflächen im Vergleich zu Mähwiesen erkennen (Tab. 9). Als Hauptgrund hierfür gilt, dass Weideflächen häufiger auf steilen Hangflanken anzutreffen sind als Mähwiesen (Schoger 1988).

**Tab. 9:** Vergleich der Rutschungsaktivität zwischen Mähwiesen und bestoßenen Weideflächen

	<b>Rickli (2001) Perimeter Sachseln</b>	<b>Krauer (2004) Perimeter Surselva</b>	<b>Rickli &amp; Bucher (2003) Perimeter Appenzell/Napf</b>
<b>Mähwiesen</b>	6 %	10 %	10 %
<b>Bestoßene Weidefläche</b>	94 %	90 %	90 %

#### **4.8.1.1 Bestoßung von Gebirgsweiden**

Die Bestoßung (Viehbesatz) von Gebirgsweiden erzeugt intensiv vergangelte Hangoberflächen, deren Verdichtung u.a. zu erhöhten Oberflächenabflüssen führt (Rickli 2001). Durch den Schub der Tierhufe können Gangeln bereichsweise aufbrechen, wodurch die Almvegetation geschädigt und eine verstärkte lokale Erosion ausgelöst wird (Laatsch & Grotenthaler 1972).

Eine hohe Beweidungsintensität kann zudem zu einer Zunahme von Ton-Schluffgehalten im Oberboden führen. Letztere begünstigt u.a. vorgenannte Verdichtungsprozesse, die den Aufbau von Porenwasserüberdrücken im Boden fördern. Tritt eine Anreicherung von Ton und Schluff in tieferen Bodenhorizonten (> 0,5 m u GOK) auf, kann dies zudem zur Ausbildung potentieller Gleithorizonte beitragen (Herger 2005).

In Tauperioden, wenn die Schneedecke unter Wirkung ihres Eigengewichtes in Bewegung gerät, können an Kanten von Viehgangeln mehrere Meter lange, Zentimeter breite Zugrisse im Boden auftreten. Gangelrisse fördern unter Niederschlagseinfluss die Aufsättigung tieferer Bodenschichten. Zumeist werden entstandene Risschäden während der Weidesaison durch Hufdruck wieder verschlossen und entstandene Denudationen verkleinert (Schauer 1998, Herger 2005).

Intensive Sömmerung mit hohen Bestoßungsdichten und hohen Lebendgewichten des Weideviehs führt zu einer erheblichen Verdichtungen der Almböden. Während der letzten 20 Jahre verdoppelte (Herger 2005) sich die Bodenbelastung durch punktuelle Hufdrucke auf ca. 20 kg/cm<sup>2</sup> (Schoger 1988). Mittlerweile hat ein struktureller Wandel in der Nutztierhaltung stattgefunden: Von intensiver hin zu extensiver Beweidung, bei der steile, unwegsame Gebiete weniger intensiv bewirtschaftet werden. Extensive Beweidungsformen können jedoch postum zu einer höheren Anrisshäufigkeit als unter intensiver Nutzung führen. Hierfür sprechen Untersuchungsdaten u.a. von RICKLI (2001) und KRAUER (2004). *Vernarbungen* von Viehgangeln und vorgenannte Rissbildungen im allgemeinen lockern bei mangelnder, stabilisierender Trittwirkung des Weideviehs die Hangauflage nachhaltig auf und unterstützen eine ungehinderte Niederschlagsinfiltration (Niederschick 2007). Des weiteren führt mangelnde Beweidung zur Etablierung flachwurzelnder Alm-Monokulturen, die zumeist nur die Humus-

schicht armieren und oberflächennahe Gleitflächen entstehen lassen (Herger 2005), (vgl. Kap. 4.7.2).

Viehverbiss, der die Entwicklung wichtiger Assimilationsorgane hemmt, reduziert eine notwendige Naturverjüngung des Almbewuchses (Karl & Danz 1969, v. Wyl 1987). Hier sind vor allem Schafe und Ziegen zu nennen, die durch ihre hohe Beweglichkeit vornehmlich steile und exponierte *Kampfbzonen* des Waldes, den Latschen- und Krummholzgürtel (zwischen 1800 und 2200 m üNN), gefährden. Zudem führen Schaf- und Ziegenhufe zu hoher Bodendegradation (Schauer 1992). Ihren hohen oberflächennahen Verdichtungseffekt hat sich die Baumaschinenindustrie längst mit der Herstellung von *Schaffußwalzen* zunutze gemacht.

#### **4.8.1.2 Mähwiesen**

Vertikale Lasteinträge aus Befahrungen der Mähwiesen mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen führen zu einer Unterbodenverdichtung (Zink 2009), die sich jedoch über die Tiefe nicht linear verhält (Lamandé & Schjønning 2008). Geländeuntersuchungen von HERGER (2005) zeigen, dass die obersten 20 cm des Bodens durch den Einsatz von Mähfahrzeugen leicht verdichtet werden, aber bereits 30 cm u GOK keine Verdichtungserscheinungen mehr feststellbar sind. Generell hinterlässt der Einfluss von Mähfahrzeugen, im Vergleich zur Viehbestoßung auf Weiden, eine regelmäßiger Mikro- und Makrotopographie, die einen gleichmäßigen Abfluss von Oberflächenwässern zulässt, so dass sich kaum Stauhorizonte entwickeln (Krauer 2004).

Gemäß BUNZA und SCHAUER (1989) variieren die Oberflächenabflüsse für Wiesen zwischen ca. 17 und 38 % des Niederschlagswertes und sind bedeutend geringer als auf bestoßenen Almweiden mit max. 47 % des Niederschlags.

#### **4.8.1.3 Düngung**

Die Düngung von Gebirgsweiden erfolgt durch das Weidevieh. Auf bewirtschafteten Mähwiesen wird hingegen Gülle anthropogen ausgebracht. In beiden Fällen führt dies zu hohen Stickstoffbelastungen des Oberbodens, die zum Austausch mehrwertiger Ionen (insbesondere Ca-Ionen) gegen einwertige (vornehmlich Na-, K-Ionen) im Boden führen. Sie tragen damit zu einer erhöhten Wasseraufnahmefähigkeit und einer abnehmenden Festigkeit von Tonmineralen bei (Schoger 1988).

In feinteilreichen Böden führt der Einfluss des Düngers zu einem ungleichmäßigen Austrocknungsverhalten, das den Boden u.a. durch Bildung von Schrumpfrissen (Bader & Kunz 1998), (vgl. Kap. 4.9.1), schwächt. Ein besonderes Gefährdungspotential ist mit ungleichmäßigem Gülleeintrag, besonders in reliefreicher Morphologie, verbunden. Auf Magerwiesen bleibt der Boden dagegen auch nach langer Trockenzeit kompakt und elastisch (v. Wyl 1987).

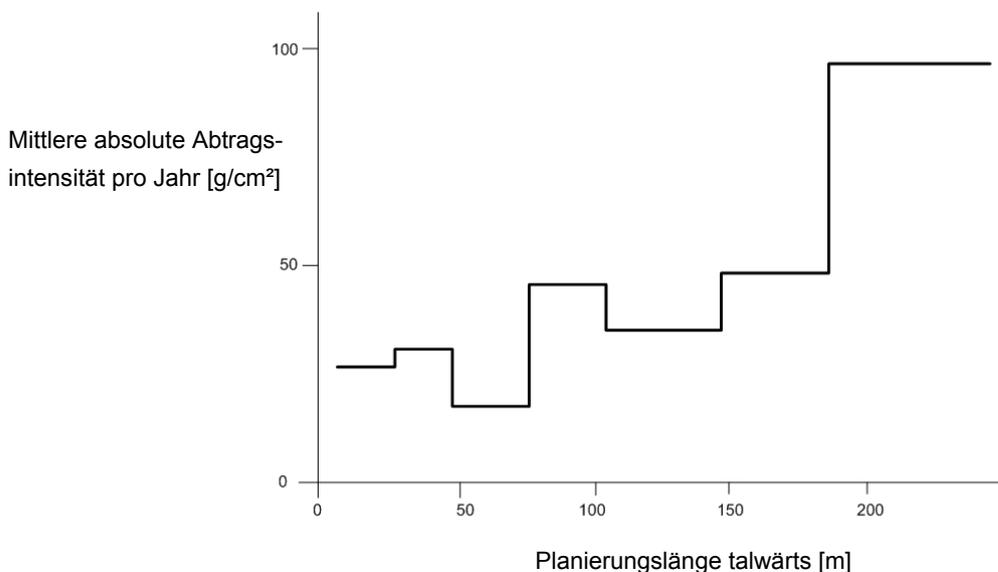
Schweinegülle (6 bis 18 % N, FNR 2006) beinhaltet gegenüber Rindergülle (2,6 bis 6,7 % N, FNR 2006) etwa die doppelte Menge pflanzlich direkt verwendbaren Stickstoffs. Auch Schafgülle erreicht ein höheres Nährstoffdargebot als die von Rindern (v. Wyl 1987).

Überdüngung führt zu einer Abnahme pflanzlicher Artenvielfalt (Bunza & Schauer 1989), zudem begünstigen Stickstoffemissionen flachwurzelnde Arten (Baumgartner 2007), so dass von einer nur oberflächennah wirksamen Armierung des Bodens auszugehen ist. Für Flächen mit vormals intensiver, aktuell extensiver Weidenutzung gilt aufgrund langfristiger Stickstoffspeicherung ein vergleichbares Armierungspotential wie zur Zeit intensiver Nutzung (v. Wyl 1987).

#### 4.8.2 Einfluss des Skitourismus

Negativeinflüsse des Tourismus betreffen in alpinem Gelände vornehmlich stark frequentierte Skipisten. Ein intensiver Skibetrieb, der zudem die Verwendung von Raupenfahrzeugen verlangt, schädigt die Vegetation nachhaltig - besonders in konvexen Hangbereichen. Zudem führt Skibetrieb zu einer Bodenverdichtung (Rentschler 1992), die die Speicherkapazität deutlich herabsetzt. Oberflächenabflusswerte liegen auf Almen mit Skipistennutzung zwischen ca. 45 % und 82 % des Niederschlags (Bunza & Schauer 1989).

Die planierte Pistenlänge hat dabei nachvollziehbar direkten Einfluss auf die Standfestigkeit des Hanges, die Planierungsbreite erweist sich hingegen als unbedeutender Faktor. Abtragsintensitäten auf planierten Pisten - länger als 150 m - sind dabei höher als bei Planierungslängen < 50 m. Pistenlängen > 180 m führen zu einem sprunghaften Anstieg der Erosion (Moismann 1981), (Abb. 34).



**Abb. 34:** Zusammenhang zwischen Länge eines planierten Hanges und Abtragsintensität (aus Moismann 1981)

### 4.8.3 Einfluss des Straßen- und Wegenetzes

Straßen und Wege in alpinem Gelände gefährden die Hangstabilität. Große Auf- und Abböschungen ober- und unterhalb von Güter- und Feldwegen stellen bei Starkregenereignissen ergiebige Geschiebeherde dar (Moser 1980, Werlen 2004). In den Untersuchungsgebieten Entlebuch, Prättigau und Napf treten zwischen 5 % und 18 % aller Rutschungen an Straßen- und Wegeböschungen auf (Rickli et al. 2008). Bei Geländeuntersuchungen von MOSER (1980) in den Westalpen gehen hingegen 36 % aller flachgründigen Hanganbrüche auf das Straßen- und Wegenetz zurück.

Gemäß RICKLI ET AL. (2008) gilt die Veränderung der Hanggeometrie durch die Ausbildung künstlicher Böschungen mit Übersteilung der Hangflanken als wesentliche Anrissursache. MOSER (1973) verweist in diesem Zusammenhang auf ein erhöhtes Gefährdungspotential an talseitigen, unbefestigten Böschungen bei in der Praxis zumeist üblichen Böschungsneigungen von minimal 2:3 (knapp  $> 30^\circ$ ) und maximal 4:5 (knapp  $< 40^\circ$ ).

Des Weiteren zählt die sekundäre Überlagerung von hang- oder talseitigen Böschungen zu wesentlichen Gefahrenherden. Müssen aus trassen- und/oder gradientenplanerischer Sicht Aufschüttungen entlang der Straße vorgenommen werden, beschreiben BEINSTEINER und MAYER (1971) ein häufig beobachtetes Phänomen: Durch sekundäre Überlagerung der Böschung mit Wegebaumaterial kommt es - abgesehen von einer Erhöhung treibender Gewichtskräfte bei kohäsivem Material - zunächst zur Verdichtung der bestehenden Hangauflage. Im Zusammenhang mit Starkregenereignissen kann eine unkontrollierte Wegentwässerung in vornehmlich talseitige Böschungen zum Aufbau von Porenwasserüberdrücken und zur Entstehung von Hangmuren führen.

Auch ungehinderte Versickerungen bzw. unzureichende Führungen von Oberflächenwässern bei Starkniederschlagsereignissen spielen eine gewichtige Rolle bei der Entstehung von Anbrüchen entlang von Forst- und Wirtschaftswegen (Rieger 1999, Schoger 1988, Rickli et al. 2008). Treffen Oberflächenwässer unkontrolliert und konzentriert auf vornehmlich talseitige Böschungen mit signifikant starken Hangneigungen, besteht eine erhöhte Gefahr für die Entstehung von Anbrüchen (Werlen 2004). Querschläge (im Weg eingelassene Rinnen) mit geringem Abstand und ausreichendem Auslaufquerschnitt helfen, Oberflächenwässer kontrolliert abzuleiten (freundliche telefonische Mitteilung, Herr Krummenacher, PLANAT - NATIONALE PLATTFORM NATURGEFAHREN, CH).

Bergseitige Anrisszonen entstehen sowohl durch Hangfußnahme bei entsprechender Trassen- und Gradientenplanung als auch durch Anschnitt des Hangwasserspiegels, der zu Sickerwasserströmungen entlang des Straßenverlaufes führt (Rieger 1999).

### *Wanderwege*

Die verhältnismäßig geringen Belastungen von Wanderwegen haben im Vergleich zu Wirtschaftswegen nachrangigen Einfluss auf die Anbruchswahrscheinlichkeit von Hangmuren (Hamberger 2000), obwohl alpine Humusaufgaben generell als trittempfindlich gelten und zu Schwunderscheinungen neigen. Weisen die Böden aufgrund niedriger Tongehalte eine geringe Aggregatstabilität auf, kommt es nach Verletzung der Humusaufgabe schnell zur Tiefenerosion (BayLfW 1996).

#### **4.8.4 Einfluss von Kahlschlag bzw. Rodung und Windwurf**

Entscheidend für eine gute Schutzwirkung des Waldes ist ein altersdifferenzierter Bestand möglichst hohen Deckungsgrades (Frehner et al. 2005), (vgl. Kap. 4.7.1). Kahl- und Rodungsflächen zeichnen sich in diesem Zusammenhang besonders negativ aus. Sie führen zu erhöhten Oberflächenabflüssen und verringerter Interzeption, die einen zunehmenden Feststoffaustrag hervorrufen. FLOSS (1985) sieht zudem eine Störung des unter der Saugwirkung der Gehölze entstandenen natürlichen Hangwasserhaushaltes. Durch vorgenannte anthropogene Eingriffe werden stabilitätsfördernde Kapillarspannungen im Boden abgebaut. BREITSAMETER (1996) gibt eine Verdoppelung des Feststoffaustrages bei Entnahme von 40 % der Holzmasse an. Nach GRAY und SOTIR (1996) führen Rodungen zu z.T. 5-fach höheren Erosionsraten als in ungestörten Vegetationsbereichen. Bei selektiver (gleichmäßiger) anthropogener Entnahme werden dagegen keine erhöhten Feststoffausträge beobachtet (Breitsameter 1996).

Durch Windwurf entstehen zumeist tiefe Trichter, durch die eine Infiltration von Oberflächenwasser stattfindet und die somit Ausgangspunkt von Erosions- und Rutschprozessen sein können (Frehner et al. 2005).

Positiv zu bewerten ist eine Belassung von Wurzelstöcken in den Kahlschlags- bzw. Windwurfflächen. Durch Erhaltung des Wurzel- und Porenraumes bleibt die stabilisierende Wirkung in Funktion (Bunza & Schauer 1989). Instabilitäten können dennoch zeitversetzt zum eigentlichen Kahlschlags- bzw. Windwurfereignis auftreten, wenn nach einigen Jahren die stabilisierende Wirkung der Wurzeln durch Verrottung abnimmt, und der nachwachsende Bestand noch im Jungalter ist (Frehner et al. 2005).

Der Einsatz schwerer Rückmaschinen bei der Holzernte führt zu einer z.T. extremen Verdichtung empfindlicher Waldböden (Graf et al. 2003, Scheffer & Schachtschabel 2002). Durch die anthropogene Einflussnahme wird der Wurzelraum über Jahrzehnte geschädigt (Frehner et al. 2005).

Im Zusammenhang mit Waldbränden ist auf die Entstehung kleiner Asche- und Kohlepartikel hinzuweisen, die als eine Art Gleitmittel im Boden fungieren und die Ausbildung einer Gleitfläche bzw. Oberflächenerosion begünstigen (ClimChAlp 2008).

#### **4.8.5 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS**

Übergänge von unterschiedlich bewirtschafteten Flächen - sowohl zwischen Wald und Freiland als auch zwischen Wiese und Weide - oder kurz unterhalb intensiv genutzter Bewirtschaftungsgebiete gelegene Flächen sind in der Gefährdungsanalyse besonders zu beachten. Ungenutztes Freiland gilt gegenüber anthropogen beeinflusstem als weniger gefährdet. In der Wichtung anthropogener Beeinträchtigung rangieren Weideflächen deutlich vor Mähwiesen. Unterschiede im Gefährdungspotential zwischen intensiver und extensiver Beweidung können nicht nachgewiesen werden.

Bodenverdichtungen stellen im Bereich anthropogener Einflüsse generell ein wichtiges Negativum dar. Sie führen zu einer Zunahme der Oberflächenabflüsse, die ihrerseits zu einer verstärkten Erosion der Hangauflage beitragen. Zudem begünstigen sie die Ansiedlung flachwurzelnder Vegetation und damit die Bildung oberflächennaher Gleitzonen (ca. 20 bis 30 cm uGOK). Bodenverdichtungen treten im Alpenraum vornehmlich als Folge der Hufbelastungen von Weidevieh auf. Mäh- und Holzrückmaschinen, aber auch alpiner Sporttourismus hinterlassen vergleichbare oder schwerer wiegende Spuren.

##### *Bestoßung von Almen*

Die Belastungen der Almflächen variieren mit vorherrschender Gattung des beweidenden Viehs. Schafe und Ziegen gelten aufgrund des hohen Verdichtungspotentials ihrer Hufe und hoher Stickstoffgehalte ihrer Gülle als besonders gefährdungsimmanent. Beeinträchtigungen durch Rinder sind deutlich geringer. Der Negativeinfluss von Düngung auf die Hangstabilität betrifft vornehmlich tonhaltige Böden.

##### *Straßen- und Wegebau*

Entlang von Bewirtschaftungswegen und alpinen Straßen führen nachfolgende Beeinflussungen zu einer erhöhten Anrissdichte:

- (1) Ausbildung künstlicher, unbefestigter Böschungen mit einer Übersteilung der Hangflanken - besonders bei Neigungen zwischen 30° und 40°
- (2) Ablagerung von Bodenmaterial auf hang- oder talseitigen Böschungen
- (3) Unkontrollierte, unsorgfältige Ableitung oberflächiger Straßenwässer in Böschungen

Wanderwege sind in der Gefährdungsbeurteilung zu vernachlässigen.

### *Skipisten*

Das Gefährdungspotential im Bereich von Skipisten ist ausschließlich über die Länge der geplanten Piste zu bestimmen. Pistenlängen von über 180 m führen zu einem sprunghaften Anstieg der Erosion.

### *Kahlschlag und Rodung*

Kahlschlag und Rodung beeinträchtigen den Waldzustand und wirken sich negativ auf die Anrisshäufigkeit aus. Eine Entnahme von 40 % der Holzmasse führt zu einer Verdoppelung des Feststoffaustrages. Nach Rodungen ist von zu z.T. 5-fach höheren Erosionsraten als in ungestörten Vegetationsbereichen auszugehen. Selektive (gleichmäßige) anthropogene Entnahmen sind in der Gefährdungsbeurteilung zu vernachlässigen. Als stabilitätserhaltend gilt die Belassung von Wurzelstöcken in den Kahlschlags- bzw. Windwurfflächen. Nach Verrottung der Wurzeln nimmt die Armierung jedoch schlagartig ab.

Infolge von Waldbränden können sich Gleitflächen ausbilden.

## **4.9 Faktor Schrumpfrissbildung**

Bodenphysikalische Ausführungen von SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) bzw. HARTGE und HORN (1999) fassen die Ursachen für die Entstehung von Schrumpfrissen zusammen:

Schrumpfsstrukturen werden sowohl durch Kohäsion und Oberflächenspannung des Wassers als auch durch Adhäsionswirkungen zwischen dem Medium Wasser und festen Bodenpartikeln begünstigt. Dabei werden Spannungen von bis zu  $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ N/cm}^2$  erreicht<sup>12</sup>. Risse entstehen dort, wo die Elastizität des Bodens eine gefügeneutrale Volumenreduktion nicht zulässt.

Eine Rissbildung im Boden unter Wasserentzug kann auch durch die bei Austrocknung noch existierende Kapillarwirkung ausgelöst werden. Der Meniskus in der Kapillare übt auf deren Achse gerichtete Kräfte aus, die sich aus der Gleichgewichtsbedingung in der Kapillare bestimmen lassen (Abb. 35). Es gelten die Gleichungen 5 und 6, wobei  $\sigma$  die hauptsächlich durch die Oberflächenspannung des Wassers generierte Zugkraft ist, die der Gravitation entgegen wirkt. Mit der Neigung  $\alpha$  des Meniskus am Rand wird die auf die Kapillare wirkende verformungsträchtige Horizontalkraft  $H$  in Gleichung 6 bestimmt.

---

<sup>12</sup> Diese Angabe gilt bei einer Temperatur von 20°C und Atmosphärendruck.

$$\sigma \cdot 2\pi \cdot r = h \cdot \rho_w \cdot g \cdot r^2 \cdot \pi \quad \text{Gl. 5}$$

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho_w \cdot g \cdot r}$$

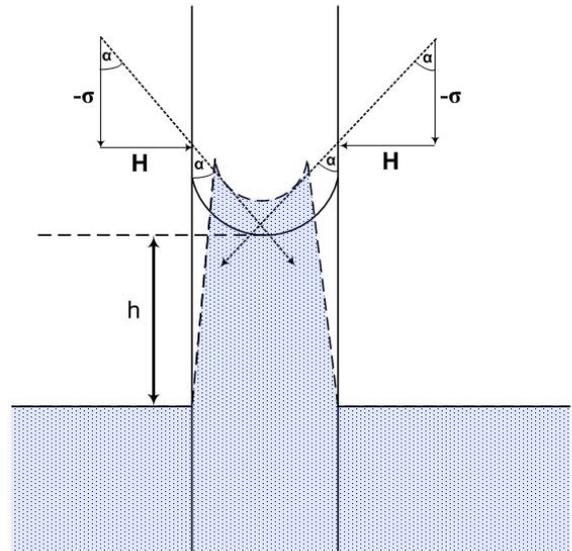
$$\sigma = \frac{h \cdot \rho_w \cdot g \cdot r}{2}$$

$$H = \sigma \cdot \tan \alpha \quad \text{Gl. 6}$$

$\rho_w \cdot g$       Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]

$\sigma$             Grenzflächenkraft [kN/m]

$H$              Horizontalkraft [kN/m]



**Abb. 35:** Gleichgewichtsbetrachtungen in einer Kapillare (angelehnt an Hartge & Horn 1999). Die Kontraktion innerhalb der Kapillare ist durch die gestrichelte Linie dargestellt.

Entsprechend Gleichung 5 ist der Kapillaranstieg umgekehrt proportional dem Kapillardurchmesser. Diese Relation erklärt den Schrumpfungsmechanismus wie folgt:

Der Boden ist von einer Vielzahl Kapillaren unterschiedlicher Durchmesser durchsetzt. Bei oberflächengleicher Sättigung gibt es die in den Gleichungen 5 und 6 beschriebenen Szenarien nicht. Innerhalb des an der Geländeoberfläche beginnenden Prozesses der Bodenaustrocknung erreichen die Kapillaren - entsprechend Gleichung 5 - in Abhängigkeit ihrer Durchmesser unterschiedliche Füllungsgrade, so dass sich die H-Kräfte der Gleichung 6 in benachbarten Kapillaren höhengleich nicht mehr zu Null ergeben. Die Kapillaren mit den kleinsten Durchmessern halten das Wasser am längsten und bewirken den in Abbildung 35 skizzierten Schrumpfungseffekt. Gleichung 5 ist - unter mehreren anderen - auch eine Erklärung für die Erfahrung, dass in feinkörnigen Böden eine stärkere Kontraktion und Schrumpfung auftritt als in grobkörnigen. Des weitern erlauben plattige Aggregatstrukturen von Tonmineralböden eine starke Kompaktion. Vor allem die quellfähigen Minerale Smectit und Vermiculit haben für die Standsicherheit quartärer Hangauflagen eine besondere Bedeutung (Mitchell & Soga 2005, Damm et al. 2008).

Unter Wasserentzug reduziert Boden durch Kompaktion fester Bodenpartikel sein Volumen und seine Oberfläche. Der Volumenverlust des vormals wassergesättigten Bodens entspricht dabei dem Volumen des entwichenen Wassers. Es tritt *Normalschrumpfung* ein. Unter anhaltender Verdunstung werden die Wassermenisken tief in die Bodenporen hineingezogen.

Dem Boden wird dabei mehr Wasser entzogen, als er volumengleich Bodenpartikel zu kompaktieren vermag. Es tritt *Restschrumpfung* ein, die zu hohen Bodenscherfestigkeiten führt. Ab einem bestimmten Wassergehalt findet keine weitere Volumenreduktion mehr statt - die Schrumpfungsgrenze  $w_s$  des Bodens ist erreicht.

Unter temporärer Aufsättigung des Bodens erfahren quellfähige Tonminerale eine erneute Volumenzunahme, wodurch sich zuvor entstandene Risse wieder verschließen. Tritt nach Rückquellung erneut eine Entwässerung ein, so wird diese als *Strukturschrumpfung* bezeichnet.

#### 4.9.1 Gefährdungspotential von Schrumpfrissen

In den Alpen treten vereinzelt feinstoffreiche Böden mit Tongehalten um 30 % und erhöhten  $C_{org}$ -Gehalten als Hangschuttdecken auf. Sie zeigen theoretisch ein niedriges bis mittleres Schrumpfpotential. Schrumpfrisse begünstigen generell über Infiltration von Oberflächenwasser den Aufbau von Strömungsdrücken, hydrostatischen Drücken und Porenwasserüberdrücken und können somit die Standfestigkeit von Hängen und Böschungen mindern. Erhöhter Oberflächenabfluss kann im direkten Umfeld von Schrumpfrissen zudem zu erheblicher Erosion führen.

Die Bildung von Schrumpfrissen unter Teilsättigung stabilisiert zunächst den Boden durch zunehmende Saugspannung. Vollsättigung und Rückquellung von Rissstrukturen führen jedoch über eine relativ hohe Anfangsscherfestigkeit  $\tau_A$  zu einer deutlich verminderten Endscherfestigkeit  $\tau_E$ . Rückquellprozesse lassen eine komplette Reversibilität des Schrumpfungsvorgangs in Bezug auf Standfestigkeit und Permeabilität nicht zu (Henning 2000). SHADUNTS (1998) berichtet von Abminderungen des Bodenreibungswinkels  $\varphi'$  um 40 % bis 50 % nach Durchlauf mehrerer Schrumpfung- und Quellzyklen. Zudem reduziert sich die Permeabilität des Bodens dauerhaft um eine zweifache Zehnerpotenz (Greenway 1987).

Volumenänderungen durch Schwinden gelten in der Theorie als isotrop und werden nach KRABBE (1958) als *triaxiales Schrumpfen* bezeichnet. Dennoch zeigt sich in der Vertikalen unter natürlichen Bedingungen eine bis zum Dreifachen höhere risspezifische Durchlässigkeit als in der Horizontalen.

Tabelle 10 schätzt das Schrumpfungspotential anhand des Plastizitätsindex  $I_p$  bzw. des Tongehaltes eines Bodens ab. Je höher der Plastizitätsindex  $I_p$  eines Minerals, desto höher ist sein Schrumpf- bzw. Quellpotential. Bei Rohtongehalten von  $< 9 \%$  ist keine Rissbildung zu erwarten (Koepf 1960).

**Tab. 10:** Schrumpfpotential von Tonböden (Greenway 1987)

Plastizitätsindex $I_p$ in %	Tonfraktion (< 0,002 mm) in %	Schrumpfpotential
> 35	> 95	sehr hoch
22 - 48	60 - 95	hoch
12 - 32	30 - 60	mittel
< 18	< 30	niedrig

Die Tonfraktion allein ist nicht ausschlaggebend für das Schrumpfpotential eines Bodens. Auch Humusgehalte ( $C_{org}$ -Gehalt) sind zu berücksichtigen. Sowohl KOEPF (1960) als auch MITCHELL und SOGA (2005) weisen eine positive Korrelation zwischen relativer Schrumpfung und Humusgehalt nach. Mit Reduzierung des Humusgehaltes im Boden nimmt auch das Schrumpfpotential über die Tiefe ab.

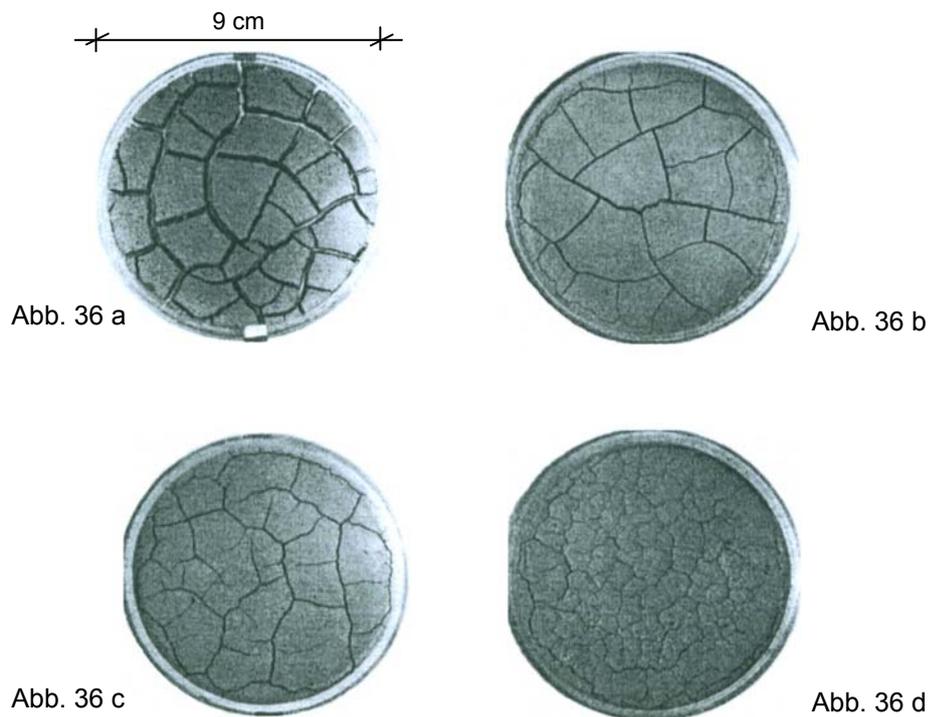
Bei alkali-, besonders natriumhaltigen Böden ist das Schrumpf- bzw. Schwellpotential höher als bei erdalkalihaltigen (Dolomit). Dies ist gemäß ANDERLE (1971) auf die Dicke der hygroscopischen Schicht in Gegenwart von Alkali und ihre reduzierte Mächtigkeit in Gegenwart von Kalkhydrat zurückzuführen.

KOEPF (1960) hat das Verhalten verschiedener Bodenarten unter Schrumpfbedingungen im Labor untersucht und Rissbilder erstellt (Abb. 36), die trotz der abbildungsbezogenen Anmerkung gut mit natürlichen Strukturmerkmalen im Gelände übereinstimmen und eine visuelle Vor-Ort Bestimmung des Schrumpfungspotentials ermöglichen:

*Abb. 36 a /36 b:* Starke Schrumpfungintensität: durchgehende, gerade oder geschwungene Risse, häufig parallel, auch orthogonal zueinander, Rissränder parallel, meist glatt oder wenig gezackt, zerlegt in 4-5-eckige Inseln. Risse breit oder schmal. Aus Abbildung 36 a bestimmte maximale Rissbreite: ~ 2,5 mm → dies entspricht einer mittleren Rissbreite gemäß Tabelle 11.

*Abb. 36 c:* Mittlere Schrumpfungintensität: keilförmige Einrisse in den Inseln, Hauptrisse nicht immer durchgehend, enden ebenfalls keilförmig

*Abb. 36 d:* Geringe Schrumpfungintensität: keilförmige Einrisse mit häufiger Richtungsänderung, verästelt, Ränder gezackt, Rissbreite meist gering, deutlich kleinteiligeres Rissbild als unter Abb. 36 a - c



Anmerkung: Kohäsion und Plastizität des Bodens sowie Adhäsion der Probe an der Petrischale bestimmen das Rissbild. Bei geringer Probenmächtigkeit ist die Kohäsion geringer, während die Adhäsion unabhängig von der Mächtigkeit gleich bleibt. Es treten daher bei kleiner Probenmenge mehr Risse auf.

**Abb. 36:** Visuelle Beurteilung von Rissbildern unter dem Einfluss starker (a & b), mittlerer (c) und schwacher (d) Schrumpfsintensität (Koeopf 1960)

Die Orientierung von Schrumpfrissen am Hang bestimmt ihre Wasserwegigkeit und damit ihr Kluftwasserpotential. Bei höhenlinienparalleler Orientierung ist von vernachlässigbar geringen Abflußmengen in den Rissstrukturen auszugehen. Bei sehr schmaler Rissöffnung (Tab. 11) schießt das Regenwasser bei Starkniederschlagsereignissen über die Risse hinweg und beeinträchtigt die Hangstabilität nicht (Seid 1998).

**Tab. 11:** Schrumpfrissbreiten und ihre Bezeichnung gemäß *BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (2005)*

Rissbreite in mm	Bezeichnung
< 1	sehr schmal
1 - 2	schmal
2 - 5	mittel
5 - 20	breit
20 - 50	sehr breit
> 50	äußerst breit

### *Hydrostatische Drucke*

Wie die Proben aus Abbildung 36 zeigen, ist bei Schrumpfungprozessen von dichten Rissmustern auszugehen. In extrem ausgetrockneten Böden führen kurze Starkniederschläge zu einer zeitverzögerten Aufsättigung (Bechtel et al. 1975). Hier spielt der sogenannte *Vorregenindex* (Bodenaufsättigung vor dem Starkregenereignis) eine wichtige Rolle (Löhmannsröben & Schauer 1996). Unter der Annahme eines kurzzeitigen Starkniederschlagsereignisses mit geringem Vorregenindex ist daher in einer ansonsten ungesättigten Hangauflage im oberflächennahen Bereichen von der Bildung allseitig horizontal wirkender hydrostatischer Drucke innerhalb der Schrumpfrisse auszugehen. Wird unterstellt, dass bei diesen Szenarien der Boden keinen Auftrieb erfährt, kann für die horizontalen Scherflächen in Abbildung 37 eine Sicherheit gegen Abscheren aus  $\Delta P = a \cdot \tan \beta \cdot \rho_w \cdot g$  von

$$\eta_R \approx \frac{\gamma_d \cdot \tan \varphi'}{\rho_w \cdot g \cdot \tan \beta} \text{ mit } \gamma_d = \text{Wichte des trockenen Bodens errechnet werden.}$$

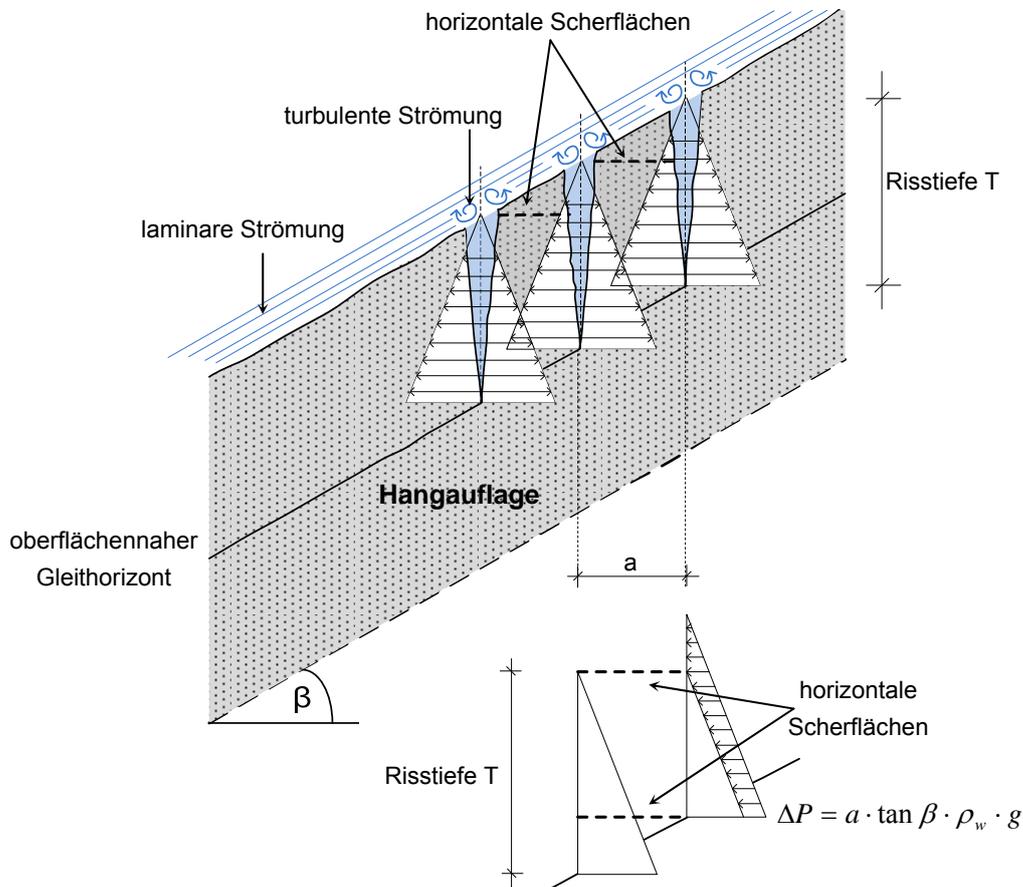
$$\text{Mit } \frac{\gamma_d}{\rho_w \cdot g} \gg 1 \text{ wird } \eta_R \gg \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \text{ (vgl. Gl. 1, Kap. 2.4.1).}$$

Für hangparallele Scherflächen gleichen sich die hydrostatischen Drucke in den Rissen zu Null aus. Von einer Hangdestabilisierung aus Aufsättigung von Schrumpfrissen ist also bis  $\frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \geq 1$  für trockene Hangauflage nicht auszugehen. Gleichwohl können bei rein theoretischer

Annahme eines singulären Risses in der Hangauflage die hangabwärtsgerichteten hydrostatischen Drucke des Wassers innerhalb des Risses nicht kompensiert werden, wodurch von einem Negativeinfluss auf die Stabilität oberflächennaher Hangpartien auszugehen ist.

Trotz der Vernachlässigbarkeit hydrostatischer Drucke innerhalb multipler Rissstrukturen stellen sie generell Schwächezonen innerhalb der Hangauflage dar. Turbulente Strömungen

des Oberflächenwassers entlang der Risse führen zu einer tiefgreifenden, dynamischen Entfestigung und nachhaltigen Schwächung der Hangauflage.



**Abb. 37:** Einflüsse hydrostatischer Drucke und turbulenter Strömung entlang von Rissbildungen auf die Stabilität der Hangauflage

#### 4.9.2 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS

Alpine Hangauflagen zeigen generell ein eher geringes Schrumpfpotential, das es im DSS dennoch zu berücksichtigen gilt. Durch oberflächennahe Rissbildungen erfährt der ausgetrocknete Boden aufgrund von Niederschlägen und Schneeschmelze eine alternierende, gefährdungsimplicite Aufsättigung, die Porenwasserüberdrucke initiieren kann. Zudem können turbulente Strömungen des Oberflächenwassers zu Erosionen führen. Porenwasserüberdrucke und Erosionsereignisse reduzieren mittelfristig die Standfestigkeit eines Hanges. Destabilisierungen der Hangauflage infolge hydrostatischer Drucke sind hingegen auszuschließen.

Schrumpf- und Quellzyklen führen generell zu einer Strukturschwächung des Bodens mit einem um 40 % bis 50 % verminderten Reibungswinkels  $\varphi'$  und einer dauerhaft reduzierten Permeabilität um eine zweifache Zehnerpotenz. Dabei zeigen sich in der Vertikalen bis zum

Dreifachen höhere Durchlässigkeiten als in der Horizontalen. Bei Rohtongehalten < 9 % ist keine Rissbildung mehr zu erwarten.

Besonderes Augenmerk ist in der Gefährdungsanalyse auf alkalische, besonders auf natriumhaltige Böden zu richten. Sie besitzen im Vergleich zu dolomitischen Verwitterungsböden ein deutlich höheres Schwindpotential. Auch humose Böden tendieren aufgrund ihrer Feinkörnigkeit zur Schrumpfrissbildung.

Bei höhenlinienparalleler Orientierung und geringer Öffnungsweite der Rissstruktur ist von einer vernachlässigbar geringen Infiltration und damit geringen Beeinflussung der Hangstabilität auszugehen.

#### **4.10 Faktor Oberflächenabfluss und Hydrologie**

Oberflächenabfluss beschreibt den Teil des Niederschlags eines Einzugsgebietes, der aufgrund überschrittener Infiltrationskapazität nicht in den Boden eindringen kann, sondern auf der Geländeoberfläche abfließt - zumeist in nächstgelegene Vorfluter (Schauer 1992). Dabei werden drei Mechanismen des Oberflächenabflusses unterschieden<sup>13</sup>: Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss, Sättigungsüberschuss und Returnflow. Bei fehlenden Rückhalteflächen sorgt abfließender Niederschlag - hangabwärts zunehmend - für einen erhöhten Wassereintrag in potentielle Anrisszonen (Löhmannsröben & Schauer 1996).

Geringe Oberflächenabflussströmungen erodieren vornehmlich schwach verfestigte Bodenhorizonte. Unter laminaren Strömungen kommt es nur zu geringer Flächenerosion. Hohe Abflussgeschwindigkeiten können hingegen in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit des Hanges turbulente Strömungen auslösen. Dabei wirken erosive Kräfte entlang der Strömungslinien. Sie erodieren rauhe, u.a. durch Rissstrukturen (Schwind- und Zugrisse) geschwächte, unebene Hangoberflächen tiefgreifend (Abb. 37) und nachhaltig.

Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Intensität des Oberflächenabflusses.

---

<sup>13</sup> Nähere Erläuterungen hierzu finden sich u.a. bei ANDERSON & BURT (1990)

**Tab. 12:** Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Intensität des Oberflächenabflusses, modifiziert nach SCHAUER (1992)

Faktoren	Oberflächenabfluss gering	Oberflächenabfluss hoch
Vernässungsgrad	gering	hoch
Bodenverdichtung	gering	hoch
Feinkornanteil	gering	hoch
Grobkornanteil	hoch	gering
Porenvolumen	hoch	gering
Klüftigkeit	hoch	gering
Wasserleitfähigkeit	hoch	gering
Verwitterung	flachgründig	tiefgründig
Lockergesteinsarten	grober Verwitterungs- und Hangschutt, Terrassenschotter	bindiges Lockergestein, Hanglehm, schluffreiche Moräne
Anthropogene Nutzung	keine	hohe Beweidungsintensität, Maschineneinsatz für Holzurückung und Pistenpflege

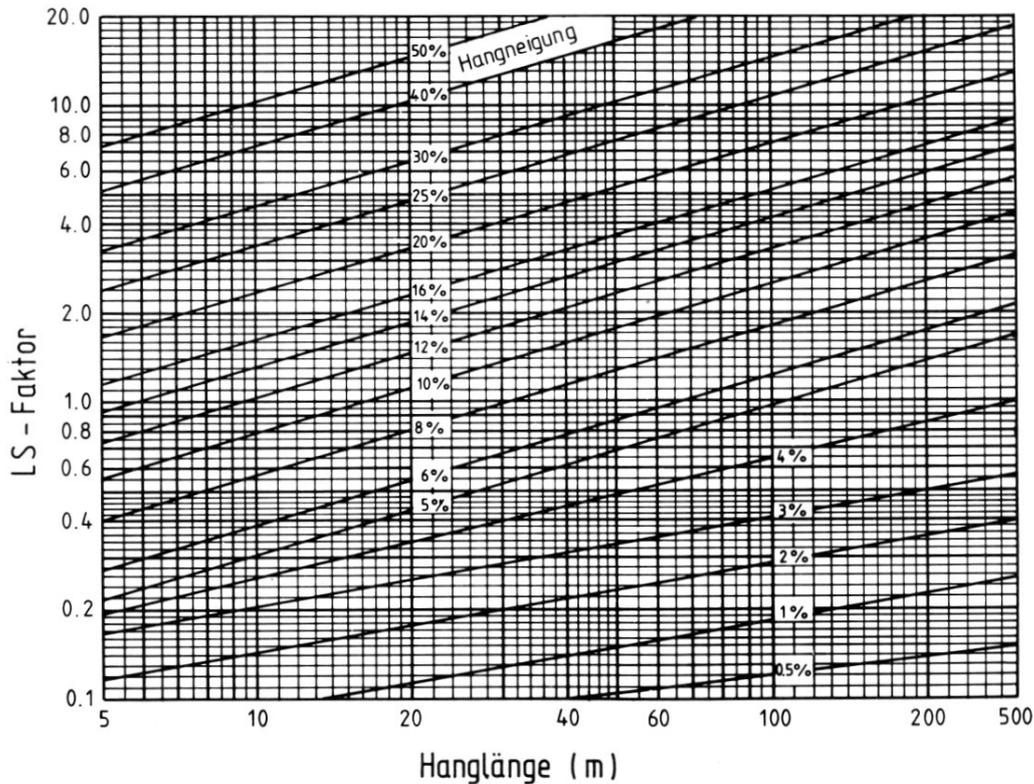
WICHMANN (2006) geht generell mit steigender Hangneigung - ohne Differenzierung bzgl. der Bestockung und/oder wirtschaftlichen Nutzung - von erhöhten Oberflächenabflüssen und damit einhergehender erhöhter Erosivität aus, obgleich BECHTEL ET AL. (1975) den reduzierenden Einfluss des Waldes auf den Oberflächenabfluss im Vergleich zu Freiland hervorheben. Auch innerhalb der Bodenabtragungsgleichung<sup>14</sup>, die an dieser Stelle im Detail nicht weiter erörtert werden soll, wird eine Zunahme der Bodenerosion (LS-Faktor) mit Zunahme der Hangneigung (S-Faktor) und der Hanglänge (L-Faktor) aufgezeigt (Abb. 38). Beide Faktoren beschreiben zusammen das energetische Erosionspotential von Oberflächenabflüssen im Vergleich zum Standardhang mit 22 m Länge und 9 % Hangneigung. Die Darstellung 38 berücksichtigt keine Hangneigungen über 50 % bzw. 22,5°. Untersuchungen<sup>15</sup> von LÖHMANN-RÖBEN und SCHAUER (1996) weisen hingegen für steile<sup>16</sup> Hanglagen einen nur geringen Einfluss der Hangneigung auf die Intensität von Oberflächenabflüssen nach. Bodenbildungen in diesen Bereichen erfahren durch hohe Reliefenergie eine stärkere Auflockerung und Vermi-

<sup>14</sup> Die Bodenabtragungsgleichung gibt den langjährigen, mittleren Bodenabtrag  $A$  [t/ha-a] aus dem Produkt der Faktoren *Erosivität der Niederschläge*, *Intensität der Bodenerosion*, *Hanglänge* und *Hangneigung*, sowie der Faktoren *Bewirtschaftungsweise* und *Erosionsschutz* an (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 2005).

<sup>15</sup> Basierend auf 380 alpinen Beregnungsversuchen

<sup>16</sup> Die Anmerkung lässt offen, welche Hangneigungen von den Autoren als steil bezeichnet werden. Aus dem Kontext ist jedoch zu vermuten, dass Neigungen von  $\beta > 22,5^\circ$  (max. Hangneigung in Abb. 38) gemeint sind.

schung mit humosen Horizonten. Dies führt zu hohen Bodenporenanteilen und Infiltrationskapazitäten. Zudem sind steile Hanglagen nur selten von anthropogener Verdichtung betroffen (Löhmannsröben 1999).



**Abb. 38:** Nomogramm zur Ermittlung der Hangerosivität - abgeleitet anhand des LS-Faktors - über die Verknüpfung von Hanglänge (L-Faktor) und -neigung (S-Faktor), (aus BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 2005).

Oberflächenabflüsse liegen bei Bergmischwäldern bei ca. 10 % des Niederschlags (Bunza & Schauer 1989). Berechnungsversuche von BEINSTEINER und MAYER (1971) weisen auf eine 3- bis 28-fache Einsickerungsverzögerung anthropogen beeinflusster Waldböden im Vergleich zu unbestockten, humusreichen Oberböden hin. Dennoch können auch naturbelassene Waldbereiche von gefährdungsimmanenten Oberflächenabflüssen betroffen sein. Liegt oberhalb des Waldes ein Freilandbereich, so kann dieser zu einer 60 %-igen Mehrbelastung der Waldfläche führen und die Anrisswahrscheinlichkeit unter dem Wald deutlich erhöhen.

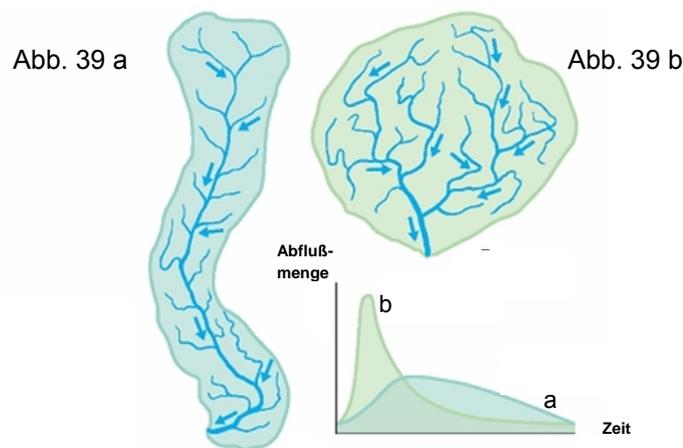
#### 4.10.1 Einfluss orographischer Einzugsgebiete

Die Gefährdungsimmanenz des Oberflächenabflusses wird u.a. durch die orographische Form des Einzugsgebietes bestimmt. In talförmigen Einzugsgebieten ist der Abfluss über das Einzugsgebiet verteilt (Abb. 39 a). Eine Konzentration findet hier zumeist zeitverzögert erst im Vorfluter statt (BayLfW 2004). Kesselförmige Einzugsgebiete begünstigen hingegen eine unmittelbare Konzentration des Abflusses - auch schon am Hang (Abb. 39 b). Je mehr das

u.a. von DYCK und PESCHKE (1995) entwickelte, nachstehende Kreisförmigkeitsverhältnis gegen den Wert 1 geht, desto größere Abflussspitzen sind innerhalb eines Einzugsgebietes zu erwarten.

$$\text{Kreisförmigkeitsverhältnis} = \frac{\text{Fläche des Einzugsgebietes}}{\text{Kreisfläche mit einzugsgebietgleichem Umfang}} \quad \text{Gl. 7}$$

Mitunter sind alpine Einzugsgebiete zu klein, um die zur Auslösung von Anrissen erforderlichen Wassermengen durch Oberflächenabfluss zu generieren. Unterirdische Hangwasserzuflüsse und Zuflüsse aus dem Felsuntergrund in das Gefährdungsgebiet sind aber stets in Betracht zu ziehen (Thali & Bollinger 2000).



**Abb. 39:** Abflusseigenschaften in talförmigen (a) und kesselförmigen (b) Einzugsgebieten (BayLfW 2004)

#### 4.10.2 Einfluss vernachlässigter Wassersysteme

Vernässte Standorte gelten als besonders gefährlich an Hängen mit Bewegungstendenzen. Anthropogen bedingte Vernässungszonen sind u.a. auf vernachlässigte Wassersysteme, wie ungenutzte Quellen, Bachgerinne und Drainagen zurückzuführen, wobei letztere unterdimensioniert bzw. verstopft sein oder Leckagen aufweisen können. Die größte Gefahr geht jedoch von einer unzureichenden Wasserführung entlang von Forst- und Wirtschaftswegen aus (Schoger 1988). Wasseraustritte auf bindigen Böden können zu einer deutlichen Reduzierung bzw. Auflösung der Kohäsion im Boden führen.

Auch geogene Einflüsse, wie z.B. die Morphologie des Hanges, spielen eine wichtige Rolle. Flächige Hangentwässerung fördert gefährliche Staunässebildungen. Standorte mit ausgeprägt linearen Entwässerungssystemen sind dagegen seltener gefährdet (Beinsteiner & Mayer 1971).

RICKLI (2001), RICKLI und BUCHER (2003) und WSL (2006) führen einen nur geringen Anteil (5 - 15 %) abgegangener Rutschungen auf den Einfluss vernässter Standorte zurück.

#### **4.10.3 Zusammenfassende Beurteilungskriterien für das DSS**

Die Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Entstehung von Oberflächenabflüssen werden in Tabelle 12 zusammengefasst. Ihre Auswirkungen auf die Hangstabilität wurden zuvor in den jeweiligen Faktorenanalysen vorangehender Kapitel aufgezeigt und flossen bereits dort in die Beurteilungskriterien für das DSS ein.

An dieser Stelle ist daher vornehmlich auf die Gefährdungsimmanenz orographisch kreisrunder Einzugsgebiete hinzuweisen, die eine unmittelbare Konzentration des Abflusses begünstigen. Generell sind vor allem Hangfußlagen von Erosionsprozessen aufgrund erhöhter Oberflächenabflüsse an Ober- und Mittelhang betroffen.

Die Beurteilung durch das DSS konzentriert sich in diesem Kapitel des weiteren auf Einflüsse infolge vernachlässigter Wassersysteme. Hier sind vor allem nicht gefasste Quellen, Bachgerinne und leckende Drainagen zu bewerten. Dies gilt insbesondere entlang von Forst- und Wirtschaftswegen. Flächige Hangentwässerung fördert im Vergleich zu linearen Entwässerungssystemen eher gefährliche Staunässebildungen.

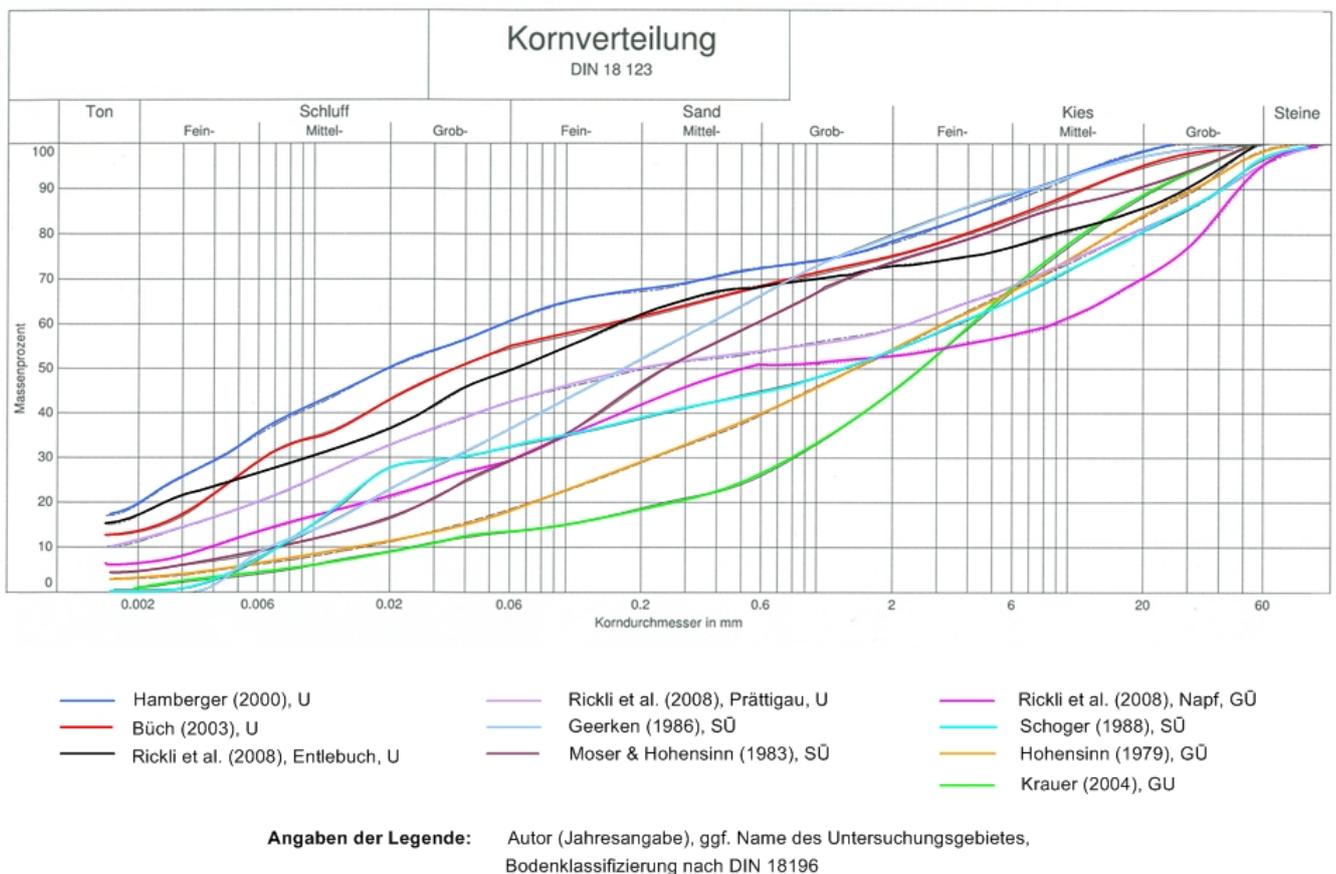
#### **4.11 Faktor geotechnische Parameter der Hangauflage**

Geotechnische Parameter bilden in der Naturgefahrenbeurteilung die Grundlage für Standsicherheitsberechnungen bzw. für Abschätzungen gefährdungsimmanenter Einflussfaktoren. Hier gilt es, die entscheidenden Faktoren zu benennen.

Als potentielle Ausgangsmaterialien von Hangmuren gelten vornehmlich heterogene, matrixgestützte Hang- und Verwitterungsschuttböden unterschiedlichen Basisgesteins mit langgestreckten Kornverteilungskurven und charakteristisch hohen Ungleichförmigkeiten von  $U \gg 20$ . Mehrheitlich handelt es sich um gemischtkörnige Böden, zumeist siltig-tonige Sande mit geringer Kohäsion und Plastizität oder siltig-tonige Kiese, für die Reibungswinkel  $\varphi'$  zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$  anzusetzen sind. Ganz vereinzelt treten Anrisszonen auch in feinkörnigeren Böden mit deutlich kleineren Reibungswinkeln und erhöhter Kohäsion bzw. mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften und (sehr) hohen natürlichen Wassergehalten auf (Hamberger 2000).

Abbildung 40 zeigt Körnungslinien aus zehn alpinen Untersuchungsgebieten in Bayern, Österreich und der Schweiz. Die Körnungslinien weisen darauf hin, dass in den untersuchten Gebieten sehr unterschiedliche Böden von flachgründigen Anrissen betroffen sind - obwohl die dargestellten Kornverteilungen nur Mittelwerte von Hüllkurven der jeweiligen Untersuchungsgebiete nachzeichnen. Dies führt zu einer generellen Untergliederung in die zwei am

häufigsten von Hangmuren betroffenen Böden: Zum einen mittel- und grobkörnige Böden, die zwischen Kies-Schluff- (GU und GÜ gemäß DIN 18196) und Sand-Schluff-Gemischen (SÜ gemäß DIN 18196) variieren, zum anderen feinkörnige, siltig-tonige (U gemäß DIN 18196). Innerhalb der feinkörnigen Bodengruppe zeigen einzelne Aufnahmen Deckschichten mit Tongehalten > 30 % (siehe u.a. Hamberger 2000 und Rickli et al. 2008). Diese *Extremwerte* bleiben jedoch in Abbildung 40 unberücksichtigt.



**Abb. 40:** Körnungslinien als Mittelwerte von Hüllkurven. Datenbasis: Hangaufnahmen aus zehn Untersuchungsgebieten. Detaillierte Informationen zu den jeweiligen Untersuchungsgebieten sind Anlage I zu entnehmen.

Die variierenden Kornverteilungen führen zu unterschiedlichen bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften: Generell zeigen mittel- bis grobkörnige Böden mit einem geringeren Tonanteil höhere Scherparameter, eine geringere Basissättigung und höhere Durchlässigkeiten. In vornehmlich granularen Böden wird aufgrund geringer bzw. nicht vorhandener Kohäsion die Scherfestigkeit durch intergranulare Reibung hervorgerufen. Scherfestigkeiten bindiger Böden gehen hingegen auf erhöhte Kohäsion zurück. Schon bei

geringen Wassergehaltsänderungen von  $\Delta w \sim 10\%$  neigen sie zu Verflüssigungen bzw. Trockenrissbildungen (Schultze & Muhs 1992).

Auch in der Analyse hydrologischer Eigenschaften der Hangauflage spielen die variierenden Kornverteilungen eine große Rolle. Die Eigenschaften hängen u.a. vom verwendeten effektiven Porenvolumen  $n_{\text{eff}}$  ab, das sich direkt über die Körnungslinie oder über den Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  - wiederum abhängig von der Körnungslinie - bestimmen lässt (vgl. Kap. 5.3.2.3). Für alpine Hangauflagen variieren die  $k$ -Werte zwischen ca.  $10^{-5}$  bis  $10^{-8}$  m/s (Prinz & Strauß 2006). Auch das Oberflächenabflussverhalten und das damit einhergehende Erosionspotential hängen in starkem Maße von der Kornzusammensetzung der Hangauflage ab. Dabei sind es vornehmlich feinklastische Bestandteile, die einen verminderten oberflächigen Wasserrückhalt bedingen bzw. zu erhöhten Porenwasserüberdrücken innerhalb der Hangauflage führen können.

Zur Erlangung aussagekräftiger geotechnischer Kennwerte für die Stabilitätsbetrachtungen von murgefährdeten Hängen ist die wirklichkeitsnahe Einschätzung der geologischen Gegebenheiten unerlässlich. Hierbei spielt u.a. die Lagebestimmung der Gleitfläche eine maßgebende Rolle, da sie eine definierte Schwächezone darstellen kann. Die Tiefenlage bzw. Ausprägung von Gleitflächen kann im alpinen Raum stark variieren. In Verwitterungsböden sind ebene Gleitflächen die Regel (Prinz & Strauß 2006).

Häufig entstehen am Übergang von Hangauflage zu Festgestein Gleithorizonte aus geringmächtigen Verwitterungstönen. Die Verwitterungstone zeigen zumeist geringere Reibungswinkel  $\varphi'$  als die Hangauflage, dafür aber eine höhere Kohäsion, einhergehend mit einer hohen Impermeabilität.

Vereinzelte können auch direkte Übergänge von Hangauflage zu Festgestein existieren - ohne die Ausbildung von Verwitterungstönen. Theoretisch wäre für entsprechende Standsicherheitsberechnungen die Verwendung des die Reibfläche und Hangauflage charakterisierenden Reibbeiwertes  $\mu$  erforderlich. Dieses Unterfangen scheint schwierig, da mit Idealisierungen umzugehen wäre, die die Klüftigkeit und den Verwitterungsgrad des Festgesteins nicht treffen können. Insoweit setzt man für den Reibbeiwert  $\mu$  auch hier die Scherfestigkeit  $\varphi'$  der rolligen Hangauflage an.

Mitunter treten translatorische Gleitflächen innerhalb der Hangauflage auf. Diese können auf Tonzwischenlagen innerhalb des Lockergesteinskörpers zurückzuführen sein. Vereinzelte werden Gleitflächen innerhalb der Hangauflage auch am Übergang von locker zu fest gelagerter Hangauflage beobachtet. An entsprechenden Horizonten ist mit Beginn der dichteren Lage eine sprunghafte Änderung geotechnischer Kennziffern zu verzeichnen (Hohensinn 1979, Marui 1984, Schoger 1988): der Porenanteil  $e$  wird geringer, die Wichte  $\gamma$  und die Scherfestigkeit  $\varphi'$  werden größer.

Von einer rotationsförmigen Gleitflächenbildung innerhalb der Hangauflage ist nicht auszugehen, zumal in Verbindung mit Hangmuren nur selten stark kohäsive Böden bzw. mächtige Hangauflagen zu erwarten sind.

## 4.12 Faktor Klimawandel

Das Weltklima wandelt sich aufgrund geogener Prozesse, deren Wirkung durch anthropogene Einflüsse verstärkt wird. Begleiterscheinungen des Klimawandels werden in Zukunft - besonders im Bereich des Alpenraums - zu starken Veränderungen natürlicher Abläufe führen und damit Korrekturen an bestehenden Beurteilungsgrundlagen zur Einschätzung von Naturgefahren erfordern.

Das Wetter des Alpenraums wird derzeit durch atlantische, kontinentale sowie mediterrane und polare Einflüsse bestimmt und u.a. in BLOETZER ET AL. (1998), GRIESER und BECK (2002), FRICKE (2002) und RAIBLE ET AL. (2005) ausführlich beschrieben.

### 4.12.1 Alpine Klimaszenarien

Nachfolgende Annahmen für den Alpenraum basieren vornehmlich auf Regionalisierungen des IPCC-Emissionsszenarios B<sub>2</sub><sup>17</sup> (2007), dem in Fachkreisen eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit eingeräumt wird (Beierkuhnlein 2008). Die Prognosen umfassen den Zeitraum bis zum Jahr 2100 und wurden u.a. vom Kooperationsprojekt *Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft* (KLIWA 2005) der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern, sowie des Deutschen Wetterdienstes erstellt und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU 2008) und vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (BAYLFU 2008b) dokumentiert.

Bis Ende des 21. Jahrhunderts wird eine hohe Saisonalität des Klimas prognostiziert (Tab. 13). Die Temperaturen der Sommermonate werden um 3°C bis 5°C, die der Wintermonate um 4°C bis 6°C ansteigen. Einhergehend mit einer künftig sich verstärkenden milden und feuchten Westwetterlage werden die Regenereignisse für den nordwestlichen Teil der Alpen zunehmen, besonders während des Frühjahrs (Bonnard et al. 2008, BMU 2008). Während der Sommermonate wird im Süden und Südwesten Bayerns ein Rückgang der Niederschläge um ca. 10 % bis 30 % (DMG 2007), lokal sogar um 40 % bis 50 % erwartet. Dabei wird sich vermehrt konvektiver Starkregen kurzer Dauer einstellen (Bonnard et al. 2008). Für das hydrologische Winterhalbjahr wird eine Zunahme der Niederschlagsereignisse um 20 % bis

---

<sup>17</sup> Das IPCC-Emissionsszenario B<sub>2</sub> geht von einem starken ökonomischen Wachstum und zunehmend ausgeglichenen Verhältnis zwischen Industriestaaten und Entwicklungsländern, einem Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des Jahrhunderts und einem gemäßigten, dafür vielfältigen technologischen Fortschritt aus. Die Entwicklungen werden lokal davon abweichend sein.

35 % (ClimChAlp 2008) prognostiziert, die vornehmlich die Höhenlagen zwischen 1000 und 1500 m üNN betreffen wird (Bader & Kunz 2000).

**Tab. 13:** Prognose des saisonalen Witterungsverlaufes in den Alpen (nach Bloetzer et al. 1998, Bonnard et al. 2008, ClimChAlp 2008)

	Temperatur	Niederschläge
<b>Frühling</b>	Kühler in den südlichen, wärmer in den nördlichen Alpentälern	Deutlich feuchter, v.a. in den Südalpen
<b>Sommer</b>	Anstieg um 3-5°C	Rückgang um bis zu 50 %
<b>Herbst</b>	Etwas wärmer, v.a. in den Südalpen	Deutlich feuchter, v.a. in den Nordostalpen
<b>Winter</b>	Anstieg um 4-6°C	Deutlich feuchter, Zunahme um bis zu 35 %

Neben einer generellen Zunahme flüssigen Niederschlags ist aufgrund mangelnder Zwischenspeicherwirkung durch reduzierte Schneedecken von erhöhten Oberflächenabflusswerten und Schmelzwasserpegeln auszugehen (KLIWA 2005). Für Fließ- und Rutschbewegungen ist daher bis zum Jahr 2100 von einer Zunahme ihrer Intensitäten bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten auszugehen (Keiler & Fuchs 2007).

Eine Zusammenfassung zu erwartender klimatischer Veränderungen ergebnisrelevanter Faktoren des DSSs und ihre fördernden bzw. hemmenden Einflüsse auf die Entstehung von Hangmuren ist nachfolgender Tabelle 14 zu entnehmen.

**Tab. 14:** Voraussichtliche klimatische Veränderungen gefährdungsimmanenter Faktoren und ihre fördernden bzw. hemmenden Einflüsse auf die Entstehung von Hangmuren, basierend auf Prognosen bis zum Jahr 2100

Faktoren	Fördernde und hemmende Einflüsse auf die Hangmurentstehung
<b>Niederschlag</b>	<b>fördernd:</b> Zunehmend Starkgewitter zwischen 1000 und 1500 m üNN (Bader & Kunz 2000).
<b>Exposition</b>	<b>fördernd:</b> Westwetterlage: stärkere Niederschläge und Oberflächenabflusswerte an W-, SW- und NW-orientierten Hanglagen (Bloetzer et al. 1998). S-Exposition: Zunehmend stabile Hochdrucklagen oberhalb von 800-1000 m üNN führen zu stärkeren Temperaturamplituden mit Anstieg von Frost-Tau-Zyklen (Raetzo-Brärlhart 1997).

Faktoren	Fördernde und hemmende Einflüsse auf die Hangmurentstehung
<b>Höhenlage</b>	<b>fördernd:</b> Schneegrenze steigt um 600 bis 750 m auf 3000 bis 3500 m üNN (BayLfU 2008b). Zunehmende Regenereignisse belasten den Hang durch erhöhte Oberflächenabflusswerte (s. <i>Oberflächenabfluss</i> ). Schlecht adaptierte Vegetation zwischen 400 bis 600 m üNN und 900 bis 1400 m üNN (s. <i>Vegetation</i> ).
<b>Oberflächenabfluss</b>	<b>fördernd:</b> Erhöhte Oberflächenabflüsse aufgrund mangelnder Zwischenspeicherung des Niederschlags durch Schneedecken, vornehmlich während des Frühjahrs (KLIWA 2005, BayLfU 2008b).
<b>Schrumpfrisse</b>	<b>fördernd:</b> Zunahme von Trockentagen (Niederschläge < 1l/m <sup>2</sup> -d) um 5-6 % (BayLfU 2008b). Reduzierte Bodenfeuchte führt in kohäsiven Böden zu verstärkter Trockenrissbildung mit erhöhter Infiltrationskapazität (Greenway 1987).
<b>Permafrost</b>	<b>fördernd:</b> Anstieg der Permafrostgrenze um bis zu 700 m (Haeberli 1999). Unterhalb von 2300 m üNN (bisherige Permafrostgrenze) erhöhte Mobilität der Hangauflage (Bloetzer et al. 1998).
<b>Vegetation</b>	<p><b>fördernd:</b> Verschiebung der Vegetationsgrenzen um bis zu 800 m. Standortfremde Arten (besonders Fichten, Kiefern etc.) aufgrund geringen Adaptionspotentials geschwächt durch u.a. Borkenkäferbefall, Windwurf (BayLfU 2008b). Dies betrifft ca. 50-60 % des alpinen Bestandes (Bloetzer et al. 1998). Größte Sensitivität bei Pflanzengesellschaften zwischen 900 - 1200 m üNN, aber auch zwischen 400 - 600 m üNN (Bloetzer et al. 1998). Beeinträchtigung der Vegetation durch zunehmende Sturmböen erhöht dynamische Belastung des Hanges (Greenway 1987). Verdrängung von Krummholz und Nadelwald durch Laubwald verändert Stabilitätsverhältnisse innerhalb hochmontaner bis tief subalpiner Vegetationsstufen (&gt; 1000 m üNN), (Moser 1980, Bloetzer et al. 1998).</p> <p><b>hemmend:</b> Temperatur- und Niederschlagsanstieg erhöhen das Wachstum (BayFORKLIM 1999, Grabherr et al. 1994). Heimische Laubbaumarten (gutes Erschließungspotential feuchter Standorte) sind kaum von Veränderungen betroffen. Sie rücken in Hanglagen &gt; 1000 m üNN vor (KLIWA 2005). Im Bereich der Baumgrenze vermehren sich u.a. Latschen und Immergrüne Kiefer, die von milderen Wintern profitieren (Coldea &amp; Pop 2004).</p>
<b>Erosion</b>	<b>fördernd:</b> Erhöhung des Bodenabtrags um < 5 % (BayLfU 2008b). Frost-Tau-Zyklen erhöhen Schuttakkumulation oberhalb von 800 - 1000 m üNN (s. <i>Exposition</i> ).
<b>Anthropogene Einflüsse</b>	<p><b>fördernd:</b> Wiesen fallen trocken, Weidevieh weicht auf höhere Hanglagen aus.</p> <p><b>hemmend:</b> Abnahme des alpinen Wintertourismus, vor allem in Höhenlagen &lt; 2000 m üNN (BayLfU 2008b)</p>

#### 4.12.2 Zusammenfassende Bewertungskriterien für das DSS

Klimatische Veränderungen führen in der Gefährdungsanalyse zu einem *Lastfall Klimawandel* (KLIWA 2005), der Einfluss auf alle Faktoren des DSSs hat. Viele Klimaprognosen für den Alpenraum erscheinen aufgrund komplexer Topographie und verschiedener Mikroklimata (BMU 2008) generell spekulativ. Ihre Übertragung auf Risikoprognosen für alpine Naturge-

fahren gilt als unsicher, da die Vorhersagen nur mit vagen Begrifflichkeiten zu umschreiben sind (Bloetzer et al. 1998). Dennoch ist es anhand verfügbarer Informationen und Prognosen möglich - nach Abwägung aller bekannten fördernden und hemmenden Einflüsse (vgl. Tab. 14) - relevante, durch den Klimawandel initiierte Veränderungen auszumachen. Dies gilt besonders für die Faktoren Exposition und relative Höhe. Entsprechend definierte Schwellenwerte sind bei Ausrichtung des DS-Systems auf das aktuelle Klimageschehen zu übernehmen.

Niederschlagsreiche Westwetterlagen werden auf Dauer zunehmen, so dass für W- bis SW-exponierte Hanglagen aufgrund erhöhter Oberflächenabflusswerte von stärkerer Bodendurchfeuchtung und einem erhöhten Gefahrenpotential auszugehen ist. Starkregen von kurzer Dauer impliziert dabei kaum Veränderungen. Vornehmlich lang anhaltende Niederschläge fördern Rutsch- und Fließbewegungen (Rickli et al. 2008). Durch Zunahme stabiler Hochdrucklagen werden sich besonders an S-orientierten Hanglagen Temperaturamplituden erhöhen und eine damit einhergehende Temperaturverwitterung in Höhenlagen oberhalb von ca. 900 m üNN verstärken. Höhenlagen zwischen 900 und 1500 m üNN werden durch zunehmende Niederschlagsereignisse und reduzierte Wurzelarmierung aufgrund mangelnder Vegetationsassimilation vermehrt von Anrisszonen betroffen sein.

Für Höhenlagen > 2300 m üNN ist durch Anstieg der Permafrost- und Schneegrenze eine erhöhte Mobilität der Hangauflagen zu erwarten. Dieses Ergebnis fällt jedoch nicht weiter ins Gewicht, da in diesen Höhenlagen vornehmlich Hangmurtyp 2 anzutreffen ist, der in vorliegender Arbeit unberücksichtigt bleibt (vgl. Kapitel 2.3.2.2).

## 5 Generierung der DSS-Schlussfolgerungskomponente

Das vorgelegte Decision-Support-System umfasst eine anwenderorientierte, normierte Schlussfolgerungskomponente zur Erfassung und Beurteilung potentiell durch Hangmuren gefährdeter Bereiche. Die Komponente evaluiert Gefährdungspotentiale dort, wo ein *Ab-schätzen von Hand* keine zuverlässigen Ergebnisse liefert (Beffa 2000). Das induktive DS-System stützt sich dabei auf relevante, logisch verkettete Angaben der Wissensbasis (vgl. Kap. 4.2). Es ist zeit-invariant und vermag daher nicht, den Zeitpunkt eines Hangmureinganges und seine Intensität, etwa gemäß der Gefahrenstufeneinteilung für Massenbewegungen von KIENHOLZ (1995), vorherzusagen. Es bestimmt lediglich das Gefährdungspotential für ein Mureignis an einem zu untersuchenden Hangabschnitt.

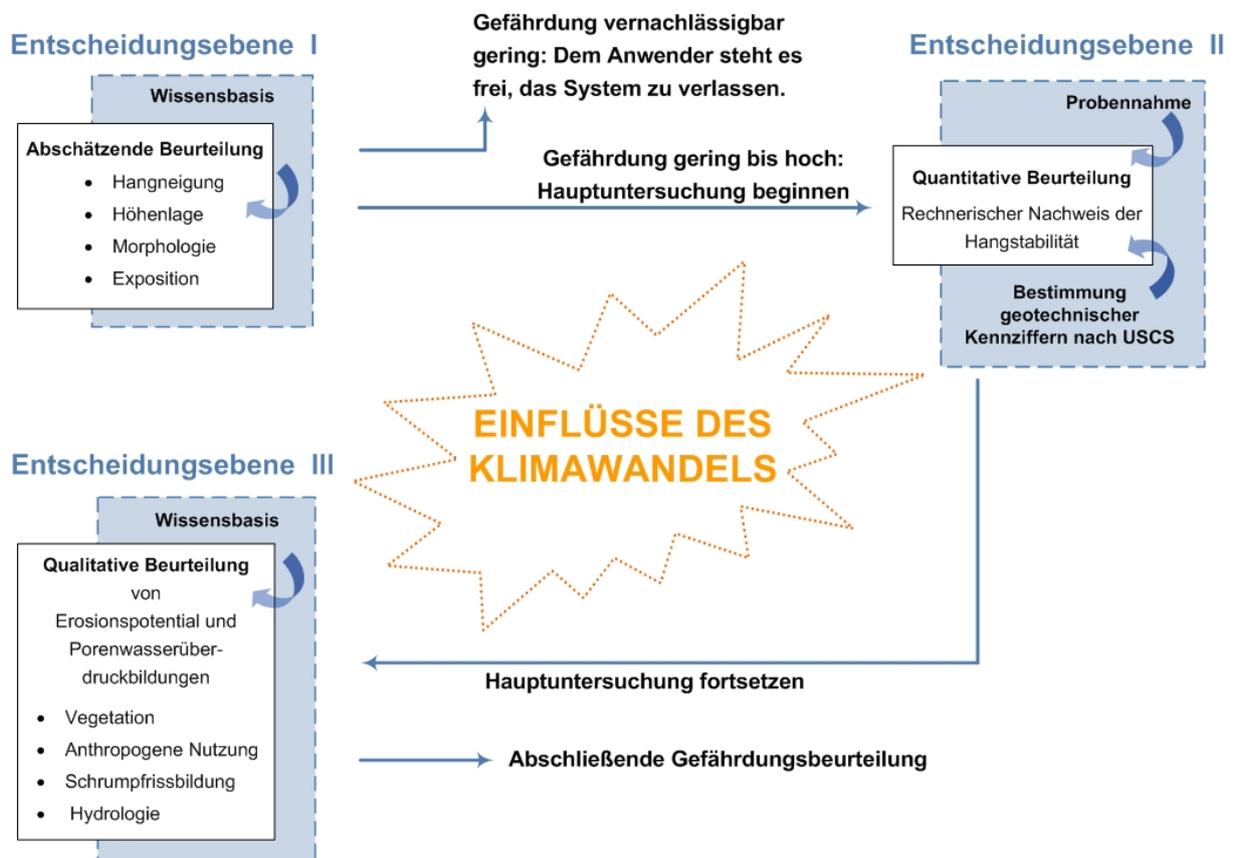
### 5.1 Aufbau der DSS-Schlussfolgerungskomponente

Das DS-System weist mit Hilfe einer umfangreichen Wissensbasis und darin enthaltener Schwellenwerte gefährdungsimmanenter Auslösefaktoren vorherrschende Murgefährdungen für ubiquitäre alpine Hangbereiche aus und gibt weiterführende Empfehlungen in Form von Algorithmen (Wagner 1992), (angelehnt an Abb. 12). Die Wirklichkeitsnähe der Schlussfolgerungskomponente wird durch Kombination von Beobachtungs- und Messergebnissen respektive durch Verknüpfung von Statistik und Standsicherheitsberechnung erreicht. Dabei erfolgt die Beurteilung und Wichtung einzelner Faktoren stets durch ihre Interaktion.

Die Wirklichkeitsnähe der Schlussfolgerung hängt generell auch vom Urteilsvermögen, der Kenntnis und Erfahrung des Anwenders ab (Hartge & Horn 2009). Der potentielle Anwender des vorliegenden Decision-Support-Systems wird ab ovo als fachfremd eingestuft. Er ist daher vom System mit präzisen Hinweisen durch den normierten Prozess der Gefährdungsanalyse zu führen. Gemäß HAMILTON ET AL. (1994) gilt eine Gefährdungsanalyse generell als zuverlässig, wenn sie bei wiederholter Anwendung bzw. bei Anwendung durch verschiedene Personen zu gleichwertigen Schlussfolgerungen kommt.

Die Schnittstelle zwischen Schlussfolgerungskomponente und Anwender bildet ein systematisches, leicht verständliches Auswertungsformular (Anlage IV), das gemäß Abbildung 12 für die Dialog- und Erklärungskomponente des DSSs steht. Es folgt in seinem Aufbau der Gliederung der Schlussfolgerungskomponente in Kapitel 5 und ermöglicht eine übersichtliche, nachvollziehbare Entscheidungsfindung. Der Anwender des DS-Systems bezieht die zur Beurteilung der im Formular abgefragten Einflussfaktoren und erforderlichen Informationen aus dem jeweiligen Untersuchungsgelände. Am Hang werden gezielt topographische, morphologische, geotechnische, anthropogene und (hydro-) geologische Merkmale aufgenom-

men und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Hangmurentstehung bewertet. Das Auswertungsformular sieht dabei von einer deskriptiven Texteingabe durch den Anwender als Beantwortungsmöglichkeit ab, um die verfälschende Wirkung subjektiver Interpretationen auszuschließen. Die Beschreibung der Hangeigenschaften mittels vorgegebener Variablen vereinfacht und präzisiert hingegen den Entscheidungsprozess wesentlich. Das Auswertungsformular ist in drei Entscheidungsebenen (EE I bis III) untergliedert (Abb. 41). Innerhalb der jeweiligen Entscheidungsebene ist nach dem „wenn (Bedingung) - dann (Schlussfolgerung)“ - Prinzip vorzugehen. Nach Durchlauf der Entscheidungsebene III hält der Anwender eine abschließende Beurteilung der Hangmurgefährdung in Händen.



**Abb. 41:** Aufbau der Schlussfolgerungskomponente, untergliedert in drei Entscheidungsebenen. Optional - abhängig von der angestrebten Ergebnishaltigkeit - sind die Entscheidungsebenen mit Einflüssen des Klimawandels zu beaufschlagen.

In EE I erfolgt - vergleichbar einer Voruntersuchung gemäß DIN 4020 - die Absteckung des Untersuchungsgebietes und eine Aufnahme (durch Geländebegehung) der Faktoren Hangneigung, Höhenlage, Exposition und Morphologie. Zudem sind Informationen über historische Hangmurerignisse und wirtschaftliche bzw. gesellschaftliche Risiken innerhalb des Untersuchungsbereiches zu recherchieren bzw. zu definieren und in die Beurteilung aufzu-

nehmen. Die sogenannte Breitensuche (Breadth First Search) in EE I beschreibt in einer ersten Abschätzung das Gefährdungspotential als *vernachlässigbar*, *gering*, *mittel* oder *hoch*. Wird das Risiko als *vernachlässigbar* eingestuft, steht es dem Anwender frei, u.a. vor dem Hintergrund wirtschaftlicher Erwägungen, die Entscheidungsfindung zu beenden oder mit einer umfassenderen Tiefensuche (Depth First Search), (Wagner 1992) bzw. einer Gefährdungsbetrachtung, vergleichbar einer Hauptuntersuchung gemäß DIN 4020, in EE II bzw. III fortzufahren.

Mit Implementierung von EE II wird den stark variierenden geotechnischen Eigenschaften quartärer Deckschichten und ihren Auswirkungen auf die Standsicherheit Rechnung getragen. Anhand des in EE I abgeschätzten Gefährdungspotentials erfolgt die Bestimmung der Dichte des Untersuchungsnetzes zur Beprobung der Beurteilungsfläche. Anhand des Probenmaterials werden die Klassifizierung des Bodens und die Bestimmung seiner geotechnischen Parameter vorgenommen. Diese Kennwerte bilden die Grundlage einer Standsicherheitsbetrachtung.

Mit den Standsicherheitsberechnungen in EE II bleiben zahlreiche, relevante Förder- und Hemmfaktoren zugunsten mathematisch übersichtlicher Ausdrücke unberücksichtigt. Es gilt aber, auch empirische Prozesse wie Erosionserscheinungen und Porenwasserüberdrucke als weitere mögliche Hangmurrinitiale in die Gefährdungsanalyse einzubinden. In EE III werden daher modifizierende Faktoren, wie Vegetation, Oberflächenabfluss, Schrumpfrissbildung und anthropogene Einflussnahme qualitativ beurteilt, da sie sich nicht hinreichend zuverlässig für eine Berechnung in EE II quantifizieren lassen. Abschließend erfolgt die Gesamtbeurteilung des Gefährdungspotentials als *vernachlässigbar* bzw. *beachtlich*.

## 5.2 Entscheidungsebene I - Abschätzende Beurteilung

Hangmuren treten in der Regel auf Flächen von wenigen Ar (Krummenacher & Tobler 2009) bis zu  $> 0,5$  ha (Frehner et al. 2005) auf. Bezug nehmend auf Problemstellungen aus Kapitel 1.1 ist von Beurteilungsgebieten mit bis zu 10 ha und größer auszugehen. Um innerhalb eines Gebietes dieser Größenordnung die Variabilitäten sämtlicher Faktoren der Entscheidungsebenen I bis III präzise erfassen zu können, ist das Untersuchungsgebiet mit  $\leq 1$  ha großen, quadratischen Zellen zu rastern. Die Absteckung ist dabei dergestalt großzügig vorzunehmen, dass mögliche Risiken angrenzender Hanglagen in die Analyse des eigentlichen Interessengebietes einbezogen werden, um die Gefährdungsbeurteilung möglichst wirklichkeitsnah zu gestalten. Vorgenannte Ausdehnung der Untersuchung über die eigentliche Beurteilungsfläche hinaus sollte bergwärts ca. 100 m (maximale Erstreckung von Hangmuren: 105 m, s. DP 1) und wegen der fächerförmigen Murausbreitung rechtwinklig zur Falllinie jeweils ca. 50 m betragen (Abb. 43).

### 5.2.1 Häufigkeitsverteilungen

Um aussagekräftige Interaktionen zu generieren, die in eine Häufigkeitsverteilung münden, werden die skalierten und nomenskalierten Daten entsprechend ihren in der Wissensbasis definierten Schwellenwerten bzw. Ausprägungen kategorisiert (Tab. 15). Als Datengrundlage werden 496 Einzelwerte historischer Hangmureignisse aus Datenpool 1 zusammengefasst, die Angaben zu den Faktoren Hangneigung, Höhenlage, Exposition und Morphologie enthalten. Die Daten stammen aus den Untersuchungsgebieten Appenzell, Entlebuch, Napf (2008) und Sachseln (s. Anlage II). Es handelt sich dabei vornehmlich um gegliederte Aufnahmegebiete.

Die Häufigkeitsanalyse der Mureignisse dient der visuellen Erkennung von Gefährdungszonen. Sie folgt der Einschätzung, dass die häufigsten Faktorenkombinationen mit der höchsten Murrelevanz zu versehen sind, und die seltensten Kombinationen mit dem geringsten<sup>18</sup> Risiko behaftet sind.

Die Konzentration auf 36 Faktorenkombinationen ist ein Kompromiss zwischen der Bildung möglichst weniger Kategorien zugunsten einer numerischen Stabilität des Systems und einer möglichst hohen Differenzierung der Ausprägungen. DIN 55302 T1 und STURGES (1926) schlagen eine Unterteilung der Daten in mindestens 10 Kategorien pro Faktor vor. Für die im vorliegenden Fall nahezu unendliche Anzahl unterschiedlicher Merkmalsausprägungen wurden ähnliche Ausprägungen wirkungsorientiert zusammengefasst, um die Anzahl der Kategorien auf maximal drei zu begrenzen (angelehnt an Degen & Lorscheid 2002). Dabei wurde darauf geachtet, charakteristische Strukturen der Merkmalsausprägungen einzelner Faktoren zu erhalten.

Die Zusammenfassung der Höhenlagen < 750 m üNN und > 1400 m üNN in einer Kategorie ist auf die geringen Häufigkeiten innerhalb beider Kategorien zurückzuführen. Nur durch ihre Zusammenfassung kann eine ausreichende numerische Stabilität der Häufigkeitsverteilungen erreicht werden.

Die Häufigkeiten der Hangmureignisse in EE I werden im folgenden als *Häufigkeitspunkte* bezeichnet, um eine Übereinstimmung der Schlussfolgerungskomponente mit dem Auswertungsformular herzustellen. Dies ist einer beurteilungsadäquaten Terminologie des Auswertungsformulars geschuldet.

---

<sup>18</sup> Bei vorliegender Datengrundlage kann bei 0 auftretenden Häufigkeitspunkten (vgl. Tab. 15) nicht mit statistischer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass keine Gefährdung besteht. Die Ergebnisse weisen lediglich darauf hin, dass diese Faktorenkombination in vorliegender Stichprobe nicht vorkommt bzw. mit einem geringen Gefährdungspotential einhergeht.

**Tab. 15:** Multivariate Häufigkeitsverteilung für die Relieffaktoren Neigung, Höhe, Exposition und Morphologie in EE I. Datenbasis: 496 Murereignisse aus DP 1

Neigung (°)	Höhe (m üNN)	Exposition	Morphologiekkl.	Häufigkeitspunkte
< 29,9	750 - 1400	Sch	I	4
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	I	45
> 41	750 - 1400	Sch	I	3
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	0
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	5
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	1
< 29,9	750 - 1400	So	I	3
30 - 40,9	750 - 1400	So	I	13
> 41	750 - 1400	So	I	6
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	2
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	3
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	I	1
< 29,9	750 - 1400	Sch	II	14
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	II	78
> 41	750 - 1400	Sch	II	18
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	0
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	30
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	11
< 29,9	750 - 1400	So	II	20
30 - 40,9	750 - 1400	So	II	68
> 41	750 - 1400	So	II	16
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	1
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	20
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	II	3
< 29,9	750 - 1400	Sch	III	9
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	III	31
> 41	750 - 1400	Sch	III	5
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	17
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1
< 29,9	750 - 1400	So	III	10
30 - 40,9	750 - 1400	So	III	35
> 41	750 - 1400	So	III	6
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	2
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	12
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	III	2

#### Legende

##### Exposition

So: Sonnenseite (S, SE, SW, W)

Sch: Schattenseite (N, NE, NW, E)

##### Morphologiekategorie

I: konvexes Längsprofil (Kl. 1, 2, 3, vgl. Abb. 20)

II: planares Längsprofil (Kl. 4, 5, 6, vgl. Abb. 20)

III: konkaves Längsprofil (Kl. 7, 8, 9, vgl. Abb. 20)

Die Häufigkeitsverteilungen aus Tabelle 15 führen durch das Konstanthalten von jeweils drei Faktoren und der Varianz eines vierten zu wichtigen Erkenntnissen über die Ereignisteilhabe

der einzelnen Faktoren. Sie sind hilfreich für die Einschätzung des Gefährdungspotentials eines Hanges (Tab. 16).

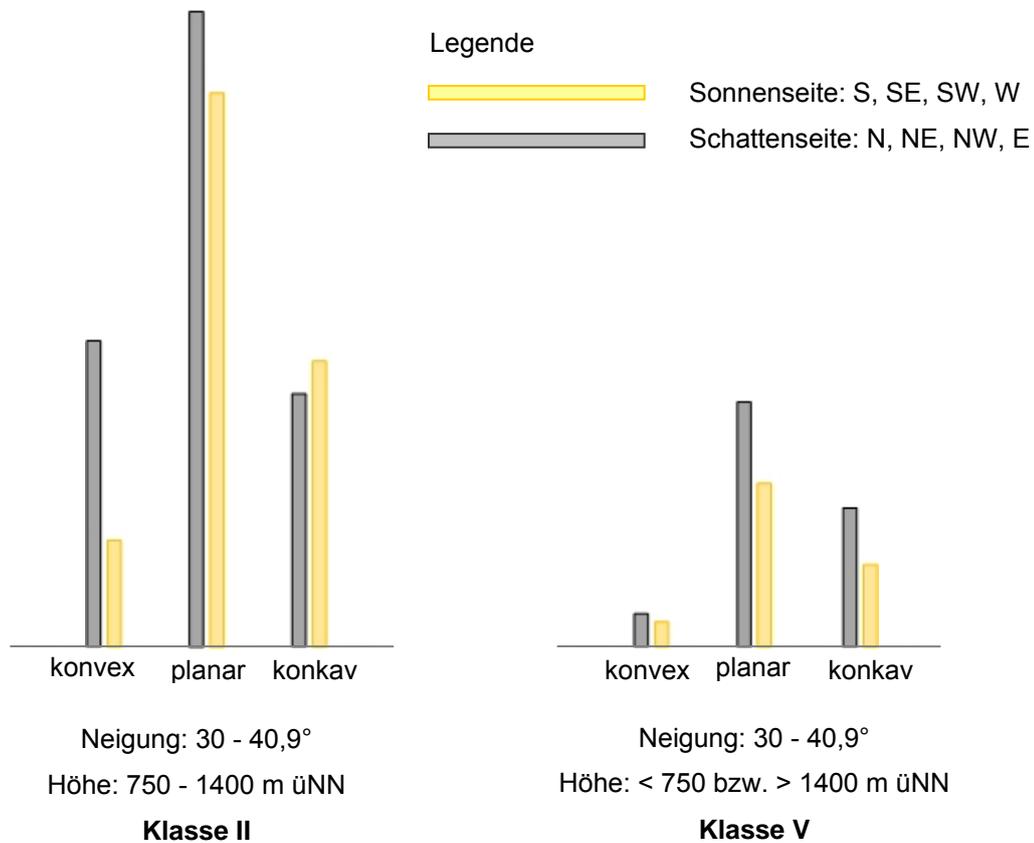
**Tab. 16:** Gegenüberstellung der Hangmürhäufigkeiten (Häufigkeitspunkte) an Sonnen- und Schattenseiten bei Konstanthalten der Relieffaktoren Neigung, Höhe, Morphologie, Legende s. Tab. 15

	Neigung (°)	Höhe (m üNN)	Morphologiekl.	Häufigkeitspunkte	
				Exposition Sch	Exposition So
Klasse I	< 29,9	750 - 1400	I	4	3
	< 29,9	750 - 1400	II	14	20
	< 29,9	750 - 1400	III	9	10
Klasse II	30 - 40,9	750 - 1400	I	45	13
	30 - 40,9	750 - 1400	II	78	68
	30 - 40,9	750 - 1400	III	31	35
Klasse III	> 41	750 - 1400	I	3	6
	> 41	750 - 1400	II	18	16
	> 41	750 - 1400	III	5	6
Klasse IV	< 29,9	< 750 bzw. > 1400	I	0	2
	< 29,9	< 750 bzw. > 1400	II	0	1
	< 29,9	< 750 bzw. > 1400	III	1	2
Klasse V	30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	I	5	3
	30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	II	30	20
	30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	III	17	12
Klasse VI	> 41	< 750 bzw. > 1400	I	1	1
	> 41	< 750 bzw. > 1400	II	11	3
	> 41	< 750 bzw. > 1400	III	1	2

Für Hänge mit Neigungen zwischen 30° und 40,9° wird eine besonders hohe Gefährdung bestätigt. Allein 72 % aller Muranbrüche gehen innerhalb dieses Neigungsspektrums ab. Eine Kombination vorgenannter Neigungen mit Höhenlagen zwischen 750 und 1400 m üNN weist auf eine hohe *Grundgefährdung* hin. 54 % aller Muranbrüche gehen alleine auf diese Kombination zurück. Die Analyse von Tabelle 16 zeigt deutlich, dass das Zusammenwirken von Höhe und Neigung den höchsten Einfluss auf das Gefährdungspotential hat. Die Faktoren Morphologie und Exposition verlieren in der Interaktion klar an Einfluss. Einige Autoren (u.a. Wichmann 2006, Rieger 1999) bezeichnen die Ausweisung der Parameter Exposition und Morphologie als ergebnisirrelevant. Doch diese Einschätzung trügt: Innerhalb der Klassen II und V (Tab. 16) zeigen die Faktoren Morphologie und Exposition sehr wohl einen respektablen Einfluss auf das Gefährdungspotential eines Hanges (Abb. 42).

Die Häufigkeitsverteilungen unterstreichen bezüglich der Morphologie generell eine Gefährdungsdominanz planarer Hänge. Dieses Bild wird besonders durch die Häufigkeitsverhältnisse der Klassen II und V unterstrichen, die im Hinblick auf die Hangneigung als besonders

gefährdet gelten. In diesen Klassen sind die Unterschiede zwischen planaren und konkaven bzw. konvexen Hangprofilen am stärksten ausgebildet.



**Abb. 42:** Vergleich der Hangmürhäufigkeiten bei Varianz von Morphologie und Exposition. Entsprechende Häufigkeitspunkte sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Die generell geringen Häufigkeitsdifferenzen zwischen Schatten- und Sonnenseiten lassen auch die Exposition zunächst als einen eher zu vernachlässigenden Faktor erscheinen. Fokussiert man aber auf die Klassen II und V, zeigen sich die Unterschiede in der Exposition vornehmlich an planaren, bedingt auch an konvexen und konkaven Hangprofilen.

Die bewusste Außerachtlassung von Exposition und Morphologie stellt vor allem vor dem Hintergrund der in Abbildung 41 dargestellten Entscheidungsprozesse eine nicht nachvollziehbare Einschätzung dar. Würde sie dort doch zu einem wirklichkeitsfernen Ergebnis führen. Gerade für Untersuchungsgebiete mit Neigungen zwischen 30° und 40,9° und in Höhenlagen zwischen 750 und 1400 m üNN gilt es, alle vier Faktoren in die Gefährdungsanalyse zu integrieren.

## 5.2.2 Wichtung des Gefährdungspotentials

Anhand des Auswertungsformulars bestimmt der Anwender vor Ort für jede Rasterzelle die Wertigkeiten der vier Relieffaktoren. Die Daten werden vor Eingabe in die Häufigkeitsverteilung den vorgegebenen Kategorien (Ausprägungen) zugeführt und ergeben nachfolgend eine bestimmte Häufigkeitspunktzahl.

Neben der Häufigkeitspunktzahl ist vom Anwender das historische Hangmurtpotential des Untersuchungsgebietes und seiner näheren Umgebung zu bestimmen. Dieses erschließt sich entweder durch sogenannte *stumme Zeugen*<sup>19</sup> im Gelände oder durch Hinweise auf historische Ereignisse aus der Bevölkerung und von zuständigen Stellen bzw. Archiven. Auswertungen von RICKLI und BUCHER (2003) zeigen, dass an 90 % aller untersuchten Ereignishänge in den Gebieten Napf und Appenzell Spuren früherer Abgänge vorhanden waren. Eine aufwendige Luftbildauswertung sieht das DSS jedoch explizit nicht vor.

Des Weiteren ist das wirtschaftliche und/oder gesellschaftliche Risiko entsprechend dem geplanten bzw. existierenden Investitionsvolumen und/oder den ideellen Werten der Rasterzelle in die Bewertung einzubeziehen. Die Untersuchungsfläche ist für den Nutzer des DSSs grundsätzlich mit einem erhöhten wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risiko belegt. Dennoch kann der Nutzer gezielt einzelne Rasterzellen des Untersuchungsgebietes individuell mit einem zusätzlichen Risiko belegen, um sie in der Gefährdungsanalyse einer höheren Wichtung zuzuführen. Das entsprechende Vorgehen ist Kapitel 5.3.1 zu entnehmen.

Nachstehende Kombination aus Häufigkeitspunkten, der Bewertung historischer Murtätigkeit und vorgenannter Risiken ermöglicht eine Abschätzung des Gefährdungspotentials in EE I (Tab. 17). Bei einem vernachlässigbaren Gefährdungspotential, bestehend aus < 10 Häufigkeitspunkten und nicht vorhandener historischer Murtätigkeit bzw. fehlendem wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risiko, steht es dem Anwender frei, die Gefährdungsanalyse nach Abschluss von EE I zu verlassen. Für geringe bis hohe Gefährdungspotentiale ist die Untersuchung mit EE II fortzuführen. Ab Häufigkeitspunkten > 60 liegt ab ovo eine so hohe Gefährdung der Rasterzelle vor, dass keine weitere Differenzierung bezüglich historischer Murtätigkeit und vorhandener Risiken vom Anwender vorzunehmen ist.

---

<sup>19</sup> Zu stummen Zeugen zählen u.a. betrunkenen Wald, stark wellige Morphologie, Sekundärrutsche, lokale Hangwasseraustritte.

**Tab. 17:** Abschätzung des Gefährdungspotentials in EE I mittels der Häufigkeitspunkte aus Tab. 15, der Bewertung des historischen Murpotentials und des wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risikos.

Gefährdungspotential	Häufigkeitspunkte	historische Murtätigkeit	wirtschaftliches und/oder gesellschaftliches Risiko
vernachlässigbar	< 10	nein	gering
gering	< 10	nein	hoch
	< 10	ja	gering
mittel	< 10	ja	hoch
	10 - 60	nein	gering
	10 - 60	nein	hoch
hoch	10 - 60	ja	gering
	10 - 60	ja	hoch
	> 60	zu vernachlässigen	

Die Verknüpfung normierter Häufigkeitspunkte aus Tabelle 15 mit Gefährdungspotentialen in Tabelle 17 erleichtert die Nachvollziehbarkeit der Abschätzung in EE I. Sie unterstützt die Effektivität des Verfahrens und dient dem Anwender zur Selbstkontrolle (angelehnt an Kienholz 1977 & 1995). Die Skalierung der Murrelevanz mittels vorgenannter Häufigkeitspunkte erfolgt dabei nach empirischen Aspekten. Die Abgrenzung zwischen geringem, mittlerem und hohem Gefährdungspotential beruht auf umfangreichen faktischen Analysen der Wissensbasis (vgl. Kap. 4.2). Eine Skalierung nach empirischem Ansatz wird im Zusammenhang mit einer approximierenden Voruntersuchung als gerechtfertigt und ausreichend zuverlässig erachtet.

Festzuhalten ist, dass einige Faktoren in einzelnen Untersuchungsgebieten konzentriert auftreten und damit eine Überbewertung erfahren. Diese Schwierigkeit wurde versucht zu minimieren, indem generell nur stark gegliederte Untersuchungsgebiete (vgl. Kap. 4.2) in die Analyse integriert wurden. Gleichwohl zeigt sich in Tabelle 15 bezüglich der Exposition eine Dominanz N-exponierter Hanglagen. Dieses Bild stimmt nur bedingt mit den Ergebnissen der Faktorenanalyse zur Exposition in Kapitel 4.6 überein, in der das Gefährdungspotential von Sonnenseiten leicht über dem von Schattenseiten liegt. Diese Abweichungen sind - trotz vorgenannter Datengliederung - auf eine Überzahl von Schattenhängen in der für die Häufigkeitstabelle maßgebenden Stichprobe zurückzuführen. Tabelle 15 zeigt aber auch, dass die Faktorenkombination mit der zweithöchsten Häufigkeit an sonnenexponierten Hängen anzu-

treffen ist. Aufgrund des Ansatzes eines breiten Punktespektrums gilt für beide Faktorenkombinationen ein hohes Gefährdungspotential.

Des Weiteren ist von einer Überlagerung von Einflussfaktoren auszugehen. Wie bereits in Kapitel 4.2 unter *Struktur der Wissensbasis* ausgeführt, zeigen wesentliche gefährdungsimmanente Faktoren eine multivariate Verknüpfung miteinander. So erfährt zum Beispiel in der Betrachtung der Exposition der Einfluss der Höhe eine hohe Gewichtung. Die Höhe zeigt wiederum deutliche Abhängigkeiten von der vorherrschenden Bodenart und deren geotechnischen Kennwerten. Die aufgezeigten Abhängigkeiten gelten natürlich vice versa. Eine bei üblichen statistischen Verfahren vorausgesetzte Unabhängigkeit der Daten kann für das Medium Boden nicht unterstellt werden (Alber & Floss 1983, DIN 4020).

### **5.3 Entscheidungsebene II - Quantitative Beurteilung**

Generell treten Hangmuren nur vereinzelt als Folge eines Scherbruches entlang klar entwickelter Gleitflächen auf. Obgleich Stabilitätsbetrachtungen des Untergrundes nur Aussagen zu dessen Bruchverhalten machen und Gleitflächenbewegungen allgemein nur selten Auslöser von Hangmuren sind, weisen u.a. BOLLINGER ET AL. (2008) darauf hin, dass die Beurteilung des Gefährdungspotentials von Hangmuren auf Standsicherheitsberechnungen abzustützen sei. Die so nachgewiesenen Instabilitäten stellen zwar vorderhand noch keine Murbewegungen im klassischen Sinne dar, gleichwohl bilden sie aber ein auslösendes Initial für murtypische Fließbewegungen, entstanden aus energetischer Aufhöhung des Murmaterials verbunden mit hoher Wasserzufuhr.

In Entscheidungsebene II des DSSs steht daher die Initiierung von Hangmuren ohne Porenwasserüberdruckwirkung, allein durch eine sättigungsbedingte Reduzierung der Standsicherheit entlang einer definierten Gleitfläche im Vordergrund. Hierfür wird eine überschlägige Standsicherheitsberechnung für die Hangauflage durchgeführt.

Auch der in den Kapiteln 4.3.3 und 4.4.2 aufgezeigte korrelative Zusammenhang zwischen den geotechnischen Kennwerten der Hangauflage und den Faktoren Hangneigung und Höhenlage unterstreicht die immense Bedeutung, geotechnische Lockergesteinseigenschaften mittels einer Standsicherheitsbeurteilung in die Gefährdungsbetrachtung aufzunehmen.

Als Hautproblem einer Standsicherheitsberechnung gilt die Generierung wirklichkeitsnaher geotechnischer Eingangsparameter. Nur sehr selten stellt die Hangauflage ein ungestörtes in-situ Verwitterungsprodukt des Ausgangsgesteins dar (Rickli 2001). Durch ständige Umlagerungsprozesse - besonders an steilen Hanglagen - findet sich u.a. Moränenmaterial eingeschaltet in Hang- bzw. Verwitterungsschutt (Löhmannsröben & Schauer 1996, Hamberger 2007). Eine exakte geotechnische Ansprache der Hangauflage kann daher nicht ausschließlich über die Petrographie des Festgesteins erfolgen. Selbst bei lokal begrenzter Betrachtung

nur eines Untersuchungsgebietes mit einheitlicher Petrographie kann die Korngrößenverteilung der Verwitterungsdecke stark streuen (Rieger 1999). Auch differenzierte, quartärgeologische Karten spiegeln nicht die engräumige Variabilität der Hangauflage und ihrer geotechnischen Parameter mit ausreichender Genauigkeit wider - vor allem dann nicht, wenn die Genauigkeit der Karten durch Beteiligung mehrerer Bearbeiter und das Auftreten nicht konformer Kartenblattgrenzen reduziert wird (BayLfU 2008a). Die Generierung geotechnischer Kennwerte - ohne Probennahme - alleine über Verlinkung quartärgeologischer Karten mit entsprechenden, in Wissensbasen hinterlegten, statistisch ausgewerteten, geotechnischen Bodenkennziffern (durchgeführt u.a. von Liener & Kienholz 2000, SilvaProtect 2008, BayLfU 2008a) wird der lokalmaßstäblichen Differenziertheit der Hangauflagen und ihren maßgeblichen Kennwerten nicht gerecht. Zudem sind oftmals - aufgrund eines nur unzureichend vorhandenen Stichprobenumfangs (Rieger 1999) - entsprechende, geotechnische Kenndaten nicht in ausreichendem Detaillierungsgrad in Wissensbasen hinterlegt (Rickli et al. 2008). Auch RINER (2009) verweist auf den Vorzug realistischer geotechnischer Input-Parameter gegenüber der Verwendung von Literaturdaten für eine wirklichkeitsnahe Berechnung von Anrissflächen.

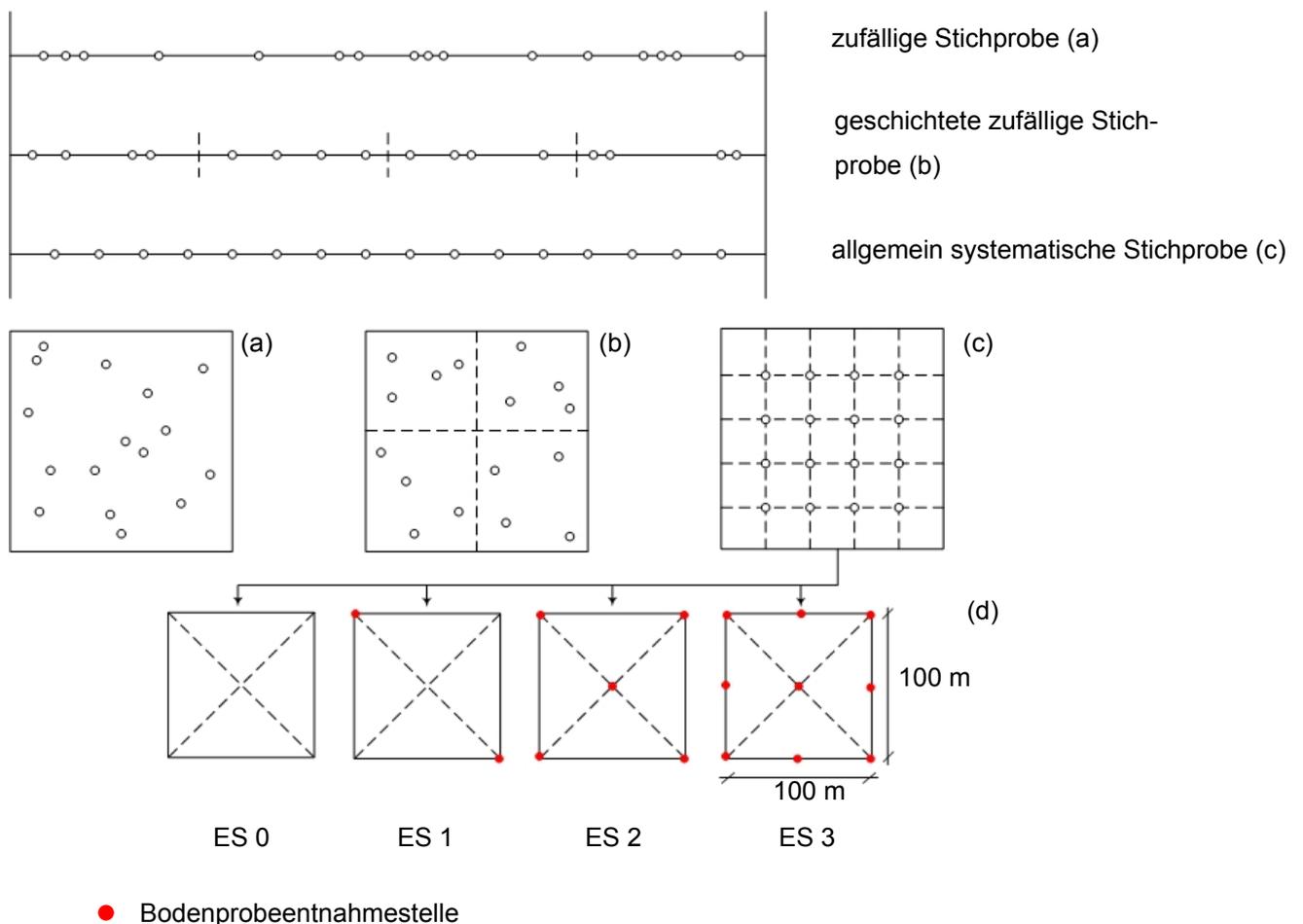
Die Unwägbarkeiten einer heterogenen Hangauflage stellen für eine wirklichkeitsnahe Gefährdungsbeurteilung daher eine ergebnisrelevante Hürde dar. Diese ist nicht - vergleichbar dem Vorgehen in EE I - mit einem vorgegebenen Bewertungskatalog und einem rein statistischen Ansatz zu überwinden. Während beim Einsatz von GI-Systemen Erhebungen im Gelände vornehmlich der Abklärung von Schlüsselstellen dienen und einen ergänzenden Charakter haben, werden in EE II des Decision-Support-Systems Bodenkennziffern *ausschließlich* über eine gezielte Entnahme und Untersuchung oberflächennahen Bodenmaterials generiert.

### **5.3.1 Erkundungskonzept**

Bodenaufschlüsse sind grundsätzlich als Stichproben zu bewerten. Sie lassen für zwischenliegende Bereiche nur Wahrscheinlichkeitsaussagen zu, so dass ein entsprechendes Beurteilungsrisiko verbleibt (DIN 4020). Dies gilt insbesondere für quartäre, heterogene Hangauflagen (vgl. Kap. 4.1.1). Eine analytische Beprobung des Untersuchungsgebietes ist daher die Voraussetzung für eine Optimierung des Investigationsprogramms bezüglich Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit. Sie ermöglicht wirklichkeitsnahe Aussagen zur räumlichen Variabilität geotechnischer Bodeneigenschaften.

Für eine möglichst hohe Signifikanz der Stichproben sind Autokorrelationen zu vermeiden, da beim Umgang mit Boden eine statistische Unabhängigkeit generell nicht vorauszusetzen ist (vgl. Kap. 5.2.1). Autokorrelationen sind von Bodenart und -eigenschaft abhängig. Bei heterogenen Böden sind gegenseitige Abhängigkeiten der Proben nachvollziehbar geringer

als bei homogenen (Peintinger & Reitmeier 1983, Alber & Floss 1983). LUMB (1974) verzeichnet eine abnehmende Autokorrelation für zufällige (Abb. 43 a) und geschichtete Stichproben (Abb. 43 b). Ein Untersuchungsnetz, das die Entnahmepunkte systematisch anordnet, schließt Autokorrelationen aus und führt zur Gleichberechtigung aller Teilbereiche des Untersuchungsgebietes (Abb. 43 c). Nach STANGE (1971) sollte zur Sicherstellung eines Ausschlusses des Autokorrelationseinflusses der Probenabstand in horizontaler Richtung mind. 10 m betragen.



**Abb. 43:** Stichprobenverfahren (a bis c), modifiziert nach ALBER & FLOSS (1983) mit Angaben zu Probenentnahmestellen (d) in Abhängigkeit von den Erkundungsstufen (ES), (vgl. Tab. 18)

In EE II ist eine systematische Beprobung durchzuführen. Angelehnt an Kapitel 5.2.1 hat der Anwender dabei in dem bereits in EE I gebildeten Untersuchungsraaster zu verbleiben. Das System bedient sich zur Festlegung der Probenpunkte der Abschätzung des Gefährdungspotentials in Tabelle 18, wohl wissend, dass nicht alle vier in EE I berücksichtigten Reliefparameter einen Einfluss auf die Gleitsicherheit haben. Der Faktor Morphologie initiiert zum

Großteil nur die Bewegungsprozesse Erosion und Porenwasserüberdruck. Dieses Verfahren ist jedoch der Vereinfachung des Systems geschuldet.

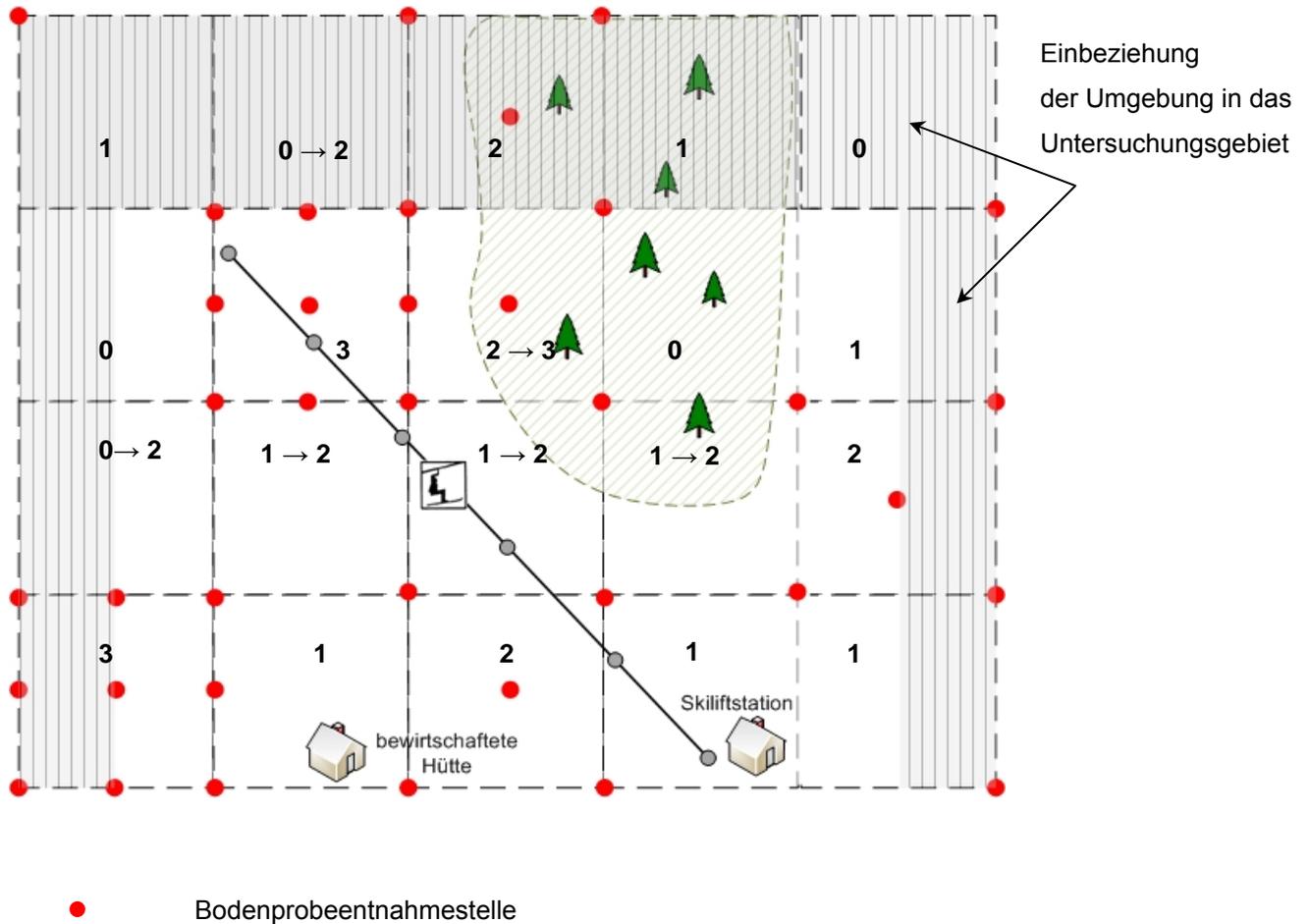
**Tab. 18:** Entwicklung des Erkundungsprogramms anhand des abgeschätzten Gefährdungspotentials aus EE I

Gefährdungspotential aus EE I	Erkundungsstufe (ES)	Anzahl Probenpunkte/ha
vernachlässigbar	0	0
gering	1	2
mittel	2	5
hoch	3	9

Das Erkundungsprogramm für vorgenannte Gefährdungsstufen ist ausgelegt für Zellengrößen von  $\leq 1$  ha (Abb. 43 d). Die direkten Aufschlüsse sind vornehmlich an den Ecken des Untersuchungsrastrers anzuordnen. Entsprechend der Morphologie des Geländes sind zudem Geländesprünge oder Übergänge bei unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen zu beachten, da hier von Änderungen der Bodenarten auszugehen ist (DIN 4020).

### **5.3.1.1 Einfluss des wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risikos**

Es ist darauf hinzuweisen, dass sich das Gefährdungspotential einer Rasterzelle auf die talseitige Nachbarzelle und - wegen einer generell fächerförmigen Murausbreitung - auch auf die seitlichen Nachbarzellen übertragen kann. Dies bedeutet, dass sich das Erkundungsprogramm einer hangseitigen Zelle um jeweils eine Stufe erhöht, falls die darunter liegende talseitige Zelle gemäß Kapitel 5.2.2 mit einem wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risiko behaftet ist. Ist für die untere Zelle die Erkundungsstufe ES 3 angezeigt und für die darüber liegende ES 0, so ist eine Erhöhung um 2 Erkundungsstufen für die obere Zelle vorzunehmen. Für die seitlich angrenzenden Nachbarzellen ist keine Erhöhung der Erkundungsstufen erforderlich (Abb. 44).



**Abb. 44:** Entwicklung eines Erkundungsprogramms mit Angaben der Erkundungsstufen (ES) pro Rasterzelle für eine ca. 20 ha große Beurteilungsfläche, belegt mit verschiedenen wirtschaftlichen Risiken.

### 5.3.1.2 Probennahme

Für Standsicherheitsberechnungen in EE II ist die Bestimmung charakteristischer geotechnischer Kennwerte mittels Beprobung der Hangauflage und nachfolgender Laboranalysen erforderlich. Gleichzeitig ist eine Lagebestimmung der potentiellen Gleitfläche vorzunehmen. Letztere ist besonders für kohäsive Hangauflage von Bedeutung, da es sich bei der effektiven Kohäsion  $c'$  nicht um eine reibungsbehaftete Größe handelt, so dass der Standsicherheitsbeitrag von  $c'$  generell mit zunehmender Mächtigkeit  $h$  der Hangauflage linear abnimmt.

Felduntersuchungen zeigen, dass die Tiefenlage der Gleitfläche im Gelände stark variieren kann. Neben relativ aufwendigen geophysikalischen Erkundungsmethoden wie Refraktionsseismik oder Inklinometermessungen sind weitere Feldmethoden zur ihrer Detektierung bekannt. Diese sind vornehmlich ausgerichtet auf Gleitflächen, die nicht am Übergang Locker- zum Festgestein, sondern innerhalb der Hangauflage vermutet werden. MARUI (1984) bestimmt die Tiefenlage der Gleitfläche über nur mit Hilfe des Körpergewichts eingebrachter

Gestänge (1,5 m Länge,  $\varnothing = 9$  mm). Die Gleitflächenlage ist dabei über die maximale Eindringtiefe des Gestänges definiert. OKIMURA (1989) ermittelt die Gleitfläche anhand sehr leichter Rammsondierungen (5 kg Auflast, 50 cm Fallhöhe) mit dem Auftreten von  $N_{10} = 12$  Schlägen. Beide Verfahren wurden ausschließlich für kristalline Verwitterungsböden entwickelt und sind daher nicht generell für alpine Hangauflagen anwendbar.

Das DSS sieht vom Einsatz vorgenannter Widerstandsmessungen zur Erkundung der Gleitfläche wegen einer fehlenden Datenbasis bezüglich der Korrelation von Rammwiderstand und Eindringtiefe für heterogene alpine Böden ab. Zudem können Blöcke rolligen Hangauflage für sehr leichte Rammsonden unüberwindbare Hindernissen darstellen und zu Ergebnisverfälschungen führen.

Das DSS geht von einer potentiellen Gleitfläche auf der Felslinie aus. Zur Erkundung der Tiefenlage der Gleitfläche sind Rammkernbohrungen mit Motorunterstützung (*Cobra*, *Wackerhammer*) vorgesehen. Die Gleitflächentiefe (Mächtigkeit der Hangauflage  $h$ ) wird über einen während des Bohrens deutlich wahrnehmbaren Widerstand beim Erreichen des Festgesteins ausgewiesen. Bei Verwendung eines geschlossenen Rammkernrohres mit Kernfänger können zudem nahezu ungestörte Proben aus dem Inneren der Hangauflage für Laboruntersuchungen extrahiert werden - auch unter Grundwassereinfluss. Maximal auf 4 m verlängerbare Entnahmerohre ermöglichen ein schnelles Arbeiten ohne Bohrlochverrohrung.

Mit einem Sondendurchmesser von 100 mm sind die mobilen Kleinbohrgeräte auch gut in rolligen Böden einsetzbar. Generell arbeiten die Kleinrammbohrer schnell und kostengünstig - besonders auch in alpinen Bereichen mit steilen Böschungen. Die mit der Bohrung gewonnene, relativ geringe Probenmenge ist negativ zu bewerten. Zur Gewinnung einer ausreichenden Probenmenge von insgesamt ca. 20 kg (gemäß DIN 18123 ca. 18 kg pro Probenpunkt; zusätzlich ca. 2 kg für Plastizitätsversuche und die Bestimmung des organischen Bodenanteils) sind Mischprobenbildungen im Abstand von 1 bis 2 m um den jeweiligen Probenpunkt anzustreben. Dabei ist darauf zu achten, Material gleicher Horizonte bzw. Tiefenlagen zu mischen. Anzustreben sind Entnahmen aus der Mitte der Hangauflage.

### **5.3.2 Bestimmung charakteristischer geotechnischer Kennwerte**

Die Klassifizierung der Bodenproben erfolgt im DSS mittels der Schweizer Normen SN 670 004-2a und SN 670 010-b. Beide beruhen auf Regelungen des UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEMS (USCS) und bilden u.a. die Grundlage für Standsicherheitsberechnungen.

Anhand der Korngrößenanalyse (DIN 18123), der Bestimmung der Plastizität (DIN 18122-1) und des organischen Anteils (DIN 18128) wird mit Hilfe der Norm SN 670 004-2a die Bodengruppe der Probe benannt. Die Bodengruppe ihrerseits weist - Bezug nehmend auf SN 670 010-b - zugehörige geotechnische Kenndaten des Bodens, wie u.a. Reibungswinkel  $\varphi'$ , effek-

tive Kohäsion  $c'$ , Feuchtraumgewicht  $\gamma$  und Wassergehalt  $w$  aus. SN 670 010-b beruht nicht auf Einzelwerten, sondern auf Verteilungsfunktionen statistisch ausgewerteter Bodenkennziffern, basierend auf ca. 6000 Bodenproben aus der Schweiz. In ihrer Präambel weist SN 670 010-b darauf hin, dass die von ihr angegebenen geotechnischen Kennwerte nur für Boden- gruppen gelten, deren Körnungslinien sich in die vorgegebenen Hüllkurve RICKLI ET AL. (2008) korrelieren davon abweichend in ihren Ereignisanalysen zu flachgründigen Rutschungen mittels SN 670 004-2a bestimmte, nicht normkonforme Bodengruppen mit geotechnischen Parametern aus SN 670 010-b und erzielen ungeachtet vorgenannten Hinweises wirklichkeitsnahe Ergebnisse.

SN 670 010-b kann auch als *Schnelltest* zur Kombi-Bestimmung von USCS-Bodengruppen und geotechnischen Kennwerten genutzt werden - und das allein mittels einer Korngrößenanalyse und Einpassung gewonnener Körnungslinien in die vorgegebenen Gültigkeitsbereiche. Falls möglich, ist dieser *Schnelltest* vom Anwender unter Anleitung des Auswertungsf formulars durchzuführen.

Nachfolgend werden für entscheidende Kennwerte der Standsicherheitsuntersuchung Bestimmungsmöglichkeiten aufgezeigt und Sensitivitätsanalysen bezüglich ihrer Genauigkeit durchgeführt. Gemäß FRANKE (1976) ist bei *extremen Niederschlägen kurzer Dauer* in einem daraus resultierenden kurzzeitigen Belastungsfall des Hanges generell die undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  anzusetzen. In vorliegender Arbeit steht jedoch die Gefährdung durch Hangmuren im Vordergrund, die vornehmlich auf lang anhaltende Regenfälle (vgl. Kap. 2.4.1) zurückgeht. Hierfür sind effektive Scherfestigkeiten zu bestimmen.

### 5.3.2.1 Reibungswinkel $\varphi'$

RINER (2009) vergleicht im Labor ermittelte Reibungswinkel  $\varphi'$  mit Angaben der SN 670 010-b. Unter Berücksichtigung normaler Streuung der Resultate stimmen die Laborwerte gut mit den Erfahrungswerten der Norm überein. Durchschnittliche Abweichungen zwischen Laborwert und Mittelwert<sub>SN</sub> betragen für den Reibungswinkel  $\varphi' \sim 2^\circ$ .

Gemäß einem häufig zitierten Ansatz (u.a. in Lang et al. 2007) ist die Ermittlung des Reibungswinkels  $\varphi'$  auch mit Hilfe der Körnungsanalyse nach DHAWAN möglich (Gl. 8):

$$\varphi' = A + B + C + D \quad [^\circ] \quad \text{Gl. 8}$$

$A = 1/7$  der Gew.-%  $< 0,002$  mm

$C = 1/3$  der Gew.-% 0,01 mm bis 0,2 mm

$B = 1/5$  der Gew.-% 0,002 mm bis 0,01mm

$D = 1/2,5$  der Gew.-%  $> 0,2$  mm

Zur Überprüfung ihrer Wirklichkeitsnähe wurde Gleichung 8 von der Autorin auf vorgenannte Körnungslinien von RINER (2009) angewendet. Es ergeben sich deutlich größere Abwei-

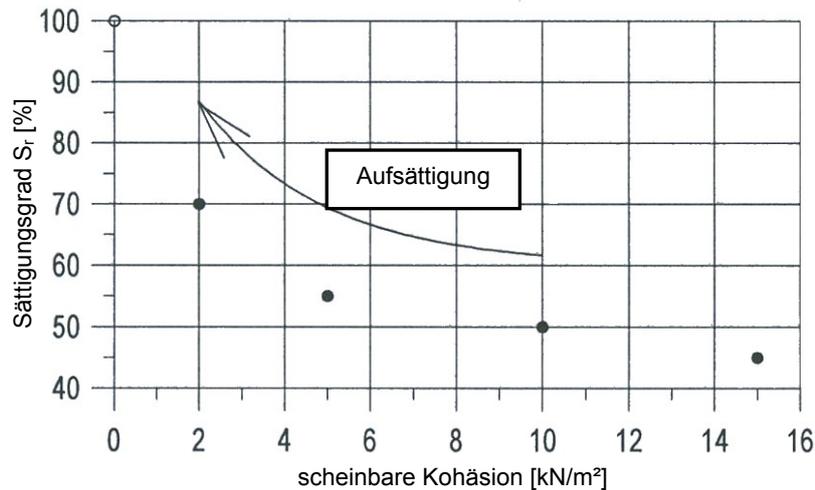
chungen zwischen DHAWAN- und Laborwerten als zwischen Norm- und Laborwerten. RICKLI ET AL. (2008) stellen Abweichungen von bis zu 5° zwischen der Bestimmung des Reibungswinkels  $\varphi'$  nach SN 670 010-b und der Methode nach DHAWAN fest. Als eine Alternative zur Bestimmung des Reibungswinkels  $\varphi'$  nach SN 670 010-b ist die Analyse nach DHAWAN daher nicht geeignet. Auch die korrelative Verknüpfung beider Ansätze mit doppelter Wichtung von  $\varphi'_{DHAWAN}$  und einfacher von  $\varphi'_{SN}$  in Gleichung 9, gemäß RICKLI und BUCHER (2003), führt dementsprechend zu keiner nennenswerten Präzisierung des Ergebnisses.

$$\varphi' = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \varphi'_{Dhawan} + \varphi'_{SN}) \quad [^\circ] \quad \text{Gl. 9}$$

Den geringen Abweichungen zwischen  $\varphi'$  (Laborwert) und  $\varphi'$  (SN 670 010-b) von durchschnittlich ca. 2° stehen generelle gerätespezifische Unsicherheiten in den Labordaten von +/- 1,5° (Riner 2009) gegenüber. Allein vorgenannter Vergleich und die mangelhafte Genauigkeit der DHAWAN-Gleichung rechtfertigen - auch unter dem Aspekt erhöhter Wirtschaftlichkeit - den Ansatz des *Schnelltestes* gemäß SN 670 010-b zur Bestimmung des Reibungswinkels  $\varphi'$ .

### 5.3.2.2 Kohäsion $c'$

Die Kohäsion des Bodens setzt sich grundsätzlich aus effektiver Kohäsion  $c'$  und kapillarer Kohäsion (scheinbare Kohäsion)  $c_c$  zusammen. Für nicht bindige Böden ist die effektive Kohäsion  $c' = 0$ . Die scheinbare Kohäsion hängt unmittelbar mit dem Sättigungsgrad des Bodens zusammen und geht infolge Vollsättigung der Hangaufgabe bzw. ihrer Austrocknung sukzessive verloren. Versuche von SPRINGMANN ET AL. (2003) zeigen, dass die Scherfestigkeit des Bodens mit Aufsättigung, aufgrund der Reduzierung scheinbarer Kohäsion, nicht linear abnimmt, aber mit Vollsättigung gegen 0 läuft (Abb. 45). Dies bedeutet eine hohe zeitliche Variabilität des Kennwertes. Die Kapillarkohäsion eines nicht bindigen Bodens ist daher gemäß DIN 1054 nur dann in Ansatz zu bringen, wenn sichergestellt werden kann, dass der Boden gegen vollständiges Austrocknen und Vollsättigung geschützt wird. Für Standsicherheitsberechnungen in EE II ist aufgrund der Annahme einer Vollsättigung des Hangprofils die Kapillarkohäsion  $c_c$  nicht in Ansatz zu bringen.



**Abb. 45:** Beziehung zwischen Sättigungsgrad  $S_r$  der Hangauflage und scheinbarer Kohäsion (Springmann et al. 2003)

Auch für die effektive Kohäsion  $c'$  bindiger Böden wird in der einschlägigen Literatur von einer Abnahme mit zunehmender Aufsättigung des Bodens gesprochen. Der Boden kann bei Vollsättigung eine breiige Konsistenz erreichen. Dann ist  $c' = 0$  (u.a. Schultze & Muhs 1992, Prinz & Strauß 2006). Generell ist die Kohäsion eines binidigen Bodens nur dann in Ansatz zu bringen, wenn er mindestens weiche Konsistenz hat (DIN 1054).

Selbst unter Annahme eines worst-case Szenarios mit Vollsättigung der Hangauflage ist jedoch unter natürlichen Bedingungen von einer verbleibenden, reduzierten Kohäsion  $c'$  auszugehen. Dieser Ansatz stützt sich u.a. auf die Tatsache, dass Hangauflagen, die durch Grundwassereinfluss bis zur Grundwasseroberkante permanent wassergesättigt sind, trotz allem eine historische Langzeitstabilität aufweisen. Gleichwohl berücksichtigt der Ansatz keine bei dynamischer Durchströmung der Hangauflage im Zusammenhang mit Starkregenereignissen auftretende, weitere Reduzierung der effektiven Kohäsion.

Einige Autoren berücksichtigen die Kohäsion  $c'$  aufgrund der aufgezeigten Unbestimmtheit gar nicht (Rickli & Bucher 2003, SilvaProtect 2008) bzw. formulieren Zweifel an ihrer Existenz unter Vollsättigung. Ergebnisse von RICKLI (2001), HAMBERGER (2007) und SILVAPROTECT (2008) zeigen jedoch, dass bei genereller Außerachtlassung der Kohäsion in Standfestigkeitsberechnungen keine realitätsnahen Ergebnisse erzielt werden können. Modellierungen von SLIDISP (Liener & Kienholz 2000) berücksichtigen aufgrund von Erfahrungswerten Kohäsionen bis  $c' = 3 \text{ kN/m}^2$ . Riner (2009) gibt - Bezug nehmend auf Erfahrungen von SLIDISP - zur Bestimmung wirklichkeitsnaher Kohäsion einen Reduktionsfaktor von  $R = 1/10$  an.

Vorgenannte Ansätze greift das DSS auf und hält auch bei Vollsättigung der Hangauflage an der Mitführung einer durch Abschlag reduzierten Kohäsion  $c_{al}$  fest. Das DSS wird nur dann seinen postulierten Zielen bezüglich Präzision und Realitätsnähe in der Gefährdungs-

bewertung gerecht, wenn es eine ausreichende Differenzierung seiner geotechnischen Eingangs-Parameter garantiert. Geschähe dies nicht, wären ein Großteil des Alpenraumes und auch Talbereiche des Vorlandes zumindest rechnerisch nahezu unbesiedelbar, da großflächig hohe Gefährdungspotentiale ausgewiesen werden müssten (v. Poschinger 1998). Unter diesen Aspekten ist auch die Berücksichtigung einer abschlägigen Kohäsion  $c'$  zu rechtfertigen.

In Standsicherheitsberechnungen der EE II wird daher für bindige Böden die bodengruppenabhängige Kohäsion  $c'$  nach SN 670 010-b abschlägig als  $cal\ c' = c'/5 \leq 3\text{ kN/m}^2$  eingeführt. Die Reduzierung auf  $c' \leq 3\text{ kN/m}^2$  folgt Erfahrungen von SLIDISP.

### **5.3.2.3 Durchflusswirksames Porenvolumen $n_{eff}$**

Das durchflusswirksame Porenvolumen  $n_{eff}$  ist, gleichbedeutend mit dem langfristig entwässerbaren Hohlraumvolumen (Langguth & Voigt 2004), ein bedeutender Parameter zur Bestimmung der Wichte unter Auftrieb und damit für Standsicherheitsberechnungen. Die Literatur bietet einige Ansätze zur Abschätzung des effektiven Porenanteils  $n_{eff}$  mittels bodenmechanischer Kenngrößen. In den meisten Fällen wird er auf dem Umweg über den Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  ermittelt.

SN 670 010-b macht Angaben zum Durchlässigkeitsbeiwert  $k$ . Die Normwerte weisen jedoch eine nicht tolerierbare Bandbreite von bis zu vier Zehnerpotenzen auf, so dass sie vor ihrer Weiterverwendung zu präzisieren sind. Kornverteilungen bieten generell eine schnelle und kostengünstige Möglichkeit, Orientierungswerte für den Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  zu generieren (Langguth & Voigt 2004), besonders dann, wenn es gilt, viele Einzelproben zu analysieren (Entenmann 1998). Bezüglich der Genauigkeit berichtet der VSS (VERBAND DER STRAßEN- UND VERKEHRSFACHLEUTE, CH) von nicht nennenswerten Ergebnisunterschieden zwischen laborermittelten  $k$ -Werten und aus Körnungslinien generierten - die Wahl einer richtigen Kornverteilungsanalyse vorausgesetzt (freundliche telefonische Mitteilung durch VSS Fachkommission V - Bautechnik). ENTENMANN (1998) beurteilt die Genauigkeit verschiedener Kornverteilungsanalysen zur Bestimmung des  $k$ -Wertes. Für sandige und kiesige Böden mit Ungleichförmigkeiten  $U \leq 20$  ist u.a. auf die genauen Ansätze von HAZEN (u.a. in Langguth & Voigt 2004) und BEYER und SCHWEIGER (1969) hinzuweisen. Hangmurböden zeichnen sich hingegen durch sehr große Ungleichförmigkeiten von  $U \gg 20$  aus (s. Kap. 4.11). Bei diesen Bodenverhältnissen kommen vorgenannte Ansätze nicht in Betracht. Für gemischtkörnige Geschiebeböden hat das *U.S. Bureau of Soil Classification* in den 1960-iger Jahren eine empirische Formel (Gl. 10) entwickelt, für die eine hinreichende Genauigkeit nachgewiesen wurde. Sie soll, trotz ihrer Ausrichtung auf ein sehr großes Körnungsspektrum (siehe Gültigkeitsgrenzen), in EE II zur Anwendung kommen.

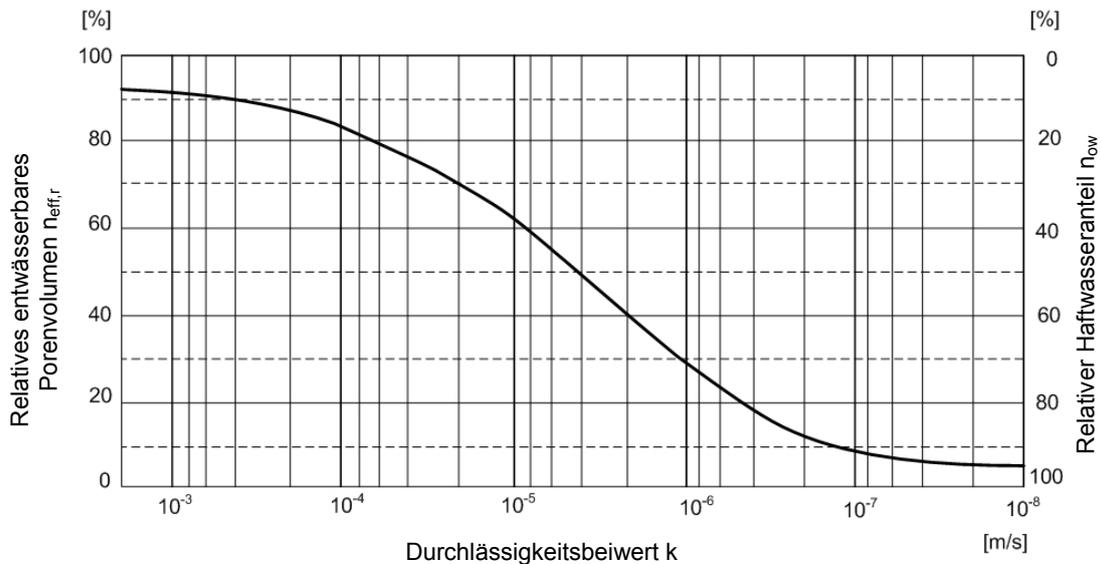
$$k = 0,0036 \cdot (d_{20})^{2,3} \quad [m/s] \quad \text{Gl. 10}$$

$d_{K,20}$  Korndurchmesser bei 20 % des Siebdurchgangs in mm

Gültigkeitsgrenzen:  $d_{K,10} < 0,02$  mm bzw.  $d_{K,20} > 0,002$  mm

Die Korndurchmesser  $d_{K,10}$  bzw.  $d_{K,20}$  sind zur Beschreibung hydrogeologischer Bodeneigenschaften sehr aussagekräftig. Ihre Bestimmung basiert auf einer umfassenden Sedimentationsanalyse.

Zur Ermittlung des entwässerbaren Porenvolumens  $n_{\text{eff}}$  entwickelten BEYER und SCHWEIGER (1969), gestützt auf Feld- und Laborversuche, dessen funktionale Abhängigkeit von zugehörigen k-Werten. Das aus der Graphik (Abb. 46) abgeleitete relative, entwässerbare Porenvolumen  $n_{\text{eff},r}$  ist mit dem Porenanteil  $n$  - bestimmbar aus der Anfangsporenzahl  $e_0$  der entsprechenden Bodengruppe aus SN 670 010-b - zum entwässerbaren Porenvolumen  $n_{\text{eff}}$  umzurechnen.



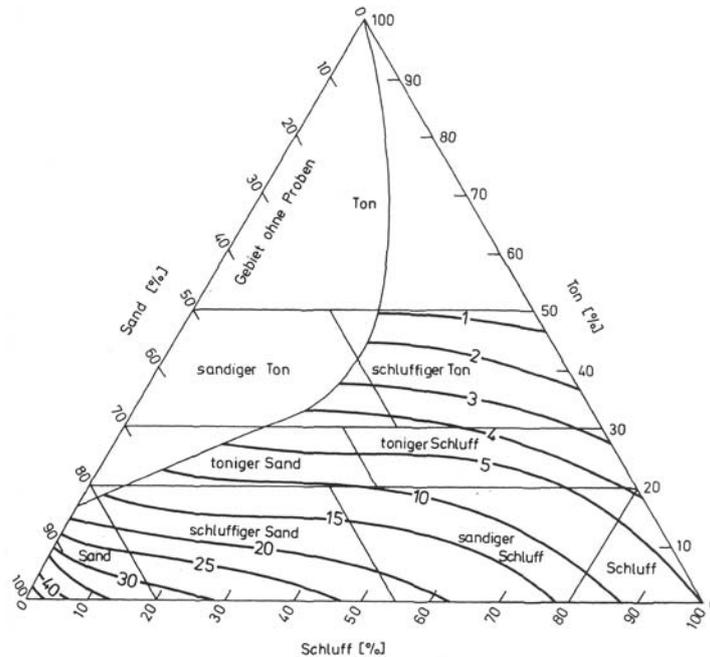
**Abb. 46:** Funktionaler Zusammenhang von relativem, nutzbarem Porenvolumen  $n_{\text{eff},r}$  und Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  (nach Beyer & Schweiger 1969)

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des nutzbaren Porenanteils mittels k-Wert stellt die empirische Gleichung von HENNING (aus Szymczak et al. 2009), (Gl. 11) dar.

$$n_{\text{eff}} = 100 \cdot (0,05 \cdot \lg(k) + 0,4) \quad [\%] \quad \text{Gl. 11}$$

Gültigkeitsgrenze:  $k > 1 \cdot 10^{-8}$  m/s

Für feinklastische Verwitterungsböden, die jedoch nur selten im Zusammenhang mit Hangmuren auftreten, ist der durchflusswirksame Porenanteil  $n_{\text{eff}}$  auch mittels der JOHNSON-Methode (1967) bestimmbar (Abb. 47). Sie ermittelt  $n_{\text{eff}}$  ohne vorausgehende Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k$  nur anhand der Kornverteilung.



**Abb. 47:** Bestimmungsmöglichkeit des nutzbaren Porenanteils  $n_{\text{eff}}$  in Abhängigkeit von der Kornverteilung für feinklastische Böden (nach Johnson 1967)

Angaben zu Durchlässigkeitsbeiwert und durchflusswirksamem Porenanteil können grundsätzlich beträchtlich variieren und dies nicht nur innerhalb verschiedener Bodengruppen, sondern auch innerhalb vermeintlich gleicher Korngemische. Diese Abweichungen von charakteristischen Werten gehen u.a. auf lokale Linsenbildungen zurück (Prinz & Strauß 2006). Vor dem Hintergrund der allgemein hohen Heterogenität der Böden liefern die in Rede stehenden Abschätzungen jedoch eine ausreichende Genauigkeit. Der Weg hin zu einer möglichst wirklichkeitsnahen Ermittlung der Kennwerte kann über Mischprobenbildung (vgl. Kap. 5.3.1.2) führen.

Anhand verschiedener Körnungslinien (aus Riner 2009, Rickli et al. 2008) wurde ein Vergleich der Methoden von BEYER/ SCHWEIGER und HENNING durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen z.T. Abweichungen, die keiner erkennbaren Tendenz folgen. Generell führt die Methode nach BEYER und SCHWEIGER zu niedrigeren  $n_{\text{eff}}$  - Werten.

Tabelle 19 gibt einen Vergleich beider Methoden. Daraus resultiert die Bevorzugung der Methode HENNING aufgrund ihrer besseren Übersichtlichkeit und Außerachtlassung eines eventuell ungenauen Porenanteils  $n$  gemäß SN 670 010-b. Generell problematisch erscheinen

die Gültigkeitsgrenzen beider Methoden, die bei  $k > 1 \cdot 10^{-8}$  m/s liegen. Abbildung 46 zeigt jedoch eine asymptotische Näherung von  $n_{\text{eff},r}$  für  $k < 1 \cdot 10^{-8}$  m/s an  $n_{\text{eff},r} \sim 0,05$ , gleichbedeutend mit  $n_{\text{eff}} \sim 5$  %. Dieser Wert kann für beide Methoden bei Durchlässigkeitsbeiwerten  $k < 1 \cdot 10^{-8}$  m/s angenommen werden.

Für feinklastische Verwitterungsböden ist auf die sehr übersichtliche Ermittlung des nutzbaren Porenanteils nach JOHNSON (1967) zurückzugreifen.

**Tab. 19:** Vergleich der Methoden von BEYER & SCHWEIGER (1969) und HENNING zur Bestimmung des nutzbaren Porenanteils  $n_{\text{eff}}$

	Pro	Contra
Methode von BEYER & SCHWEIGER GER	Zeigt Tendenzen außerhalb des angegebenen Gültigkeitsbereiches ( $k < 1 \cdot 10^{-3}$ m/s bzw. $k > 1 \cdot 10^{-8}$ m/s)	Zusätzlichen Unsicherheiten durch Einbeziehung des Porenanteils $n$ aus SN 670 010-b
	Angabe niedrigerer Werte als nach HENNING.	Gültigkeitsgrenzen bei $k < 1 \cdot 10^{-3}$ m/s bzw. $k > 1 \cdot 10^{-8}$ m/s
		Ungenauigkeiten durch Ablesefehler möglich, generell Ungenauigkeiten an Gültigkeitsgrenzen
Methode von HENNING	Übersichtlichkeit, präzise in der Wertangabe - auch nahe der Gültigkeitsgrenzen	Gültigkeitsgrenze bei $k > 1 \cdot 10^{-8}$ m/s
	Vermeidet zusätzliche Unsicherheiten durch Außerachtlassung des Porenanteils $n$ aus SN 670 010-b	

#### 5.3.2.4 Wichte $\gamma'$

Lastannahmen für treibende und rückhaltende Kräfte in Standsicherheitsberechnungen werden u.a. über die Wichte  $\gamma$  definiert. Der Parameter erfährt dadurch für Standsicherheitsberechnungen eine entsprechende Bedeutung. Ist die Hangauflage, wie bei worst-case Szenarien anzunehmen, bis zur Geländeoberkante aufgesättigt, ist die Wichte der Hangauflage unter Auftrieb  $\gamma'$  in Ansatz zu bringen.

Es gilt:  $\gamma' = \gamma - (1 - n_{\text{eff}}) \cdot \gamma_w$  (vgl. Gl. 1, Kap. 2.4.1).

Für die Standsicherheitsberechnungen in EE II wird zur Generierung einer aussagekräftigen Wichte  $\gamma$  auf bodengruppenabhängige Mittelwert-Angaben der Dichte  $\rho$  des adhäsiv feuchten Bodens aus SN 670 010-b zurückgegriffen. Die Angaben sind u.a. aufgrund geringer Standartabweichungen als ausreichend präzise zu erachten.  $\gamma$  berechnet sich über  $\rho_{\text{mean}} \cdot g$ . Wie im

Bauwesen üblich, wird die Erdbeschleunigung näherungsweise mit  $g = 10 \text{ m/s}^2$  in Ansatz gebracht. Die Wichte des Wassers beträgt  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ .

Das durchflusswirksame Porenvolumen  $n_{\text{eff}}$  wird gemäß Kapitel 5.3.2.3 bestimmt.

### 5.3.2.5 Sensitivitätsanalyse

Nach Ermittlung der Labordaten aus jeder (Misch-) Probe ist eine Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse für jede Rasterzelle durchzuführen mit Festlegung der charakteristischen, geotechnischen Kennwerte. Bei geringer Streuung der Messwerte kann der charakteristische Wert aus dem arithmetischen Mittelwert  $\mu$  bestimmt werden. Bei stark unterschiedlichen Bodengruppen ist in der Berechnung der jeweils ungünstigste Wert anzusetzen (Ziegler 2008). Dies gilt vor allem bei bindigen Böden mit effektiver Kohäsion  $c' > 0$ . Hier ist aufgrund der mit ihr verbundenen Unsicherheit über die Wirklichkeitsnähe ihrer Wirkung die Bodengruppe mit  $\ll \varphi'$  und  $\ll c'$  als charakteristisch anzusehen. Zudem ist  $c'$  auf  $\text{ca } c' = c'/5 \leq 3 \text{ kN/m}^2$  zu reduzieren.

Zur Bestimmung des effektiven durchflusswirksamen Porenvolumens char.  $n_{\text{eff}}$  ist die Bodengruppe mit  $\gg$  Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  anzusetzen.

### 5.3.3 Berechnung der Hangstabilität

Bei Standsicherheitsbetrachtungen an gestreckten Gleitflächen ist davon auszugehen, dass im Moment des Anrisses die Standsicherheit  $\eta < 1,0$  ist. Die Berechnung der Standsicherheit in EE II basiert auf Gleichung 1 (vgl. Kap. 2.4.1), angelehnt an Hangsicherheitsanalysen entsprechend dem Verfahren nach JANBU (u.a. in Lang et al. 2003). Grundlagen der Berechnung sind die in Kapitel 5.3.2 aufgezeigten geotechnischen Kennwerte  $\varphi'$ ,  $c'$ ,  $n_{\text{eff}}$  und  $\gamma'$  des im Untersuchungsgebiet anstehenden Bodens und Angaben zur Hangneigung  $\beta$  und Mächtigkeit der Hangauflage  $h$ .

Für eine wirklichkeitsnahe Standsicherheitsbestimmung sind theoretisch die geotechnischen Kennwerte der Hangauflage und die des Übergangs zwischen Locker- und Festgestein, der potentiellen Gleitfläche, zu differenzieren: Verhält sich  $c'_{\text{Gleitfläche}} \sim c'_{\text{Hangauflage}}$ , ist von einer potentiellen Schwächezone entlang der Gleitfläche auszugehen. Wie aus Gleichung 1 zu erkennen ist, spielt die Mächtigkeit der Hangauflage  $h$  oberhalb der Gleitfläche für Standsicherheitsberechnungen *ohne* Kohäsionseinfluss keine Rolle. Bei Mitwirkung von  $c'$  geht deren generell positiver Einfluss auf die Standsicherheit mit zunehmender Mächtigkeit der Hangauflage zurück (vgl. Gl. 12).

Ist am Übergang von Fest- zu Lockergestein kohäsives Verwitterungsmaterial (Gleitflächenmaterial) anstehend, so dass  $c'_{\text{Gleitfläche}} > c'_{\text{Hangauflage}}$ , ist im Bereich der Gleitfläche ein kohäsionsbedingter Klebeeffekt des Gleitflächenmaterials anzunehmen, der die Bildung einer

Schwächezone innerhalb des Schotterkörpers oder knapp oberhalb der vermeintlichen Gleitfläche wahrscheinlicher werden läßt.

Für die Abbildung auf der sicheren Seite befindlicher Standsicherheitsverhältnisse können trotz vorgenannter theoretischer Differenzierung in beiden Fällen die geotechnischen Kennwerte aus dem Inneren der Hangauflage für die Berechnung angesetzt werden.

Rückhaltend:

$$R = \gamma' \cdot d \cdot l \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi' + c' \cdot l \cdot \frac{d \cdot \gamma' \cdot \cos \beta}{d \cdot \gamma' \cdot \cos \beta}$$

$$R = \gamma' \cdot d \cdot l \cdot \cos \beta \cdot \left( \tan \varphi' + c' \cdot \frac{1 + \tan^2 \beta}{\gamma' \cdot h} \right)$$

Standsicherheitsnachweis:  $\eta = \frac{R}{T} \geq 1$

Für die treibenden Kräfte des Standsicherheitsnachweises gilt der Ansatz aus Gleichung 1

$$\eta = \frac{\tan \varphi' + c' \cdot \frac{1 + \tan^2 \beta}{\gamma' \cdot h}}{\left( 1 + \frac{\gamma_w}{\gamma'} \right) \cdot \tan \beta} \quad [-] \quad \text{Gl.12}$$

$c'$  effektive Kohäsion [kN/m<sup>2</sup>]

Die Bedeutungen weiterer Symbole sind Gl. 1, Kap. 2.4.1 zu entnehmen.

Die rein mathematische Grenzbetrachtung mit  $\beta \rightarrow \pi/2$  führt zum Grenzwert

$$\eta_{\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}} = \frac{c'}{d \cdot (\gamma' + \gamma_w)}$$

Die Standsicherheitsberechnung mit Gleichung 12 beruht auf gewissen Vereinfachungen gegenüber den komplizierten Vorgängen und Verhältnissen in der Natur (Lang et al. 2003). Dies führt in der Praxis häufig zum Ansatz einer Globalsicherheit ab  $\eta \geq 1,2$  (Schoger 1988). Dieses Vorgehen wird in EE II nicht verfolgt. Dem nicht zu widersprechenden Zweifel an der Nachzeichnungsgenauigkeit der natürlichen Hangbedingungen durch Berechnungen mit notwendigen Vereinfachungen wird durch ein umfassendes Erkundungskonzept mit Abschlägen im Ansatz charakteristischer geotechnischer Kennwerte und mit der Annahme ihrer jeweils ungünstigsten Konstellation Rechnung getragen. Dies führt zu einer ausreichenden Standsicherheitsreserve, die auch die rechnerischen Vereinfachungen der Gleichungen 1

und 12 kompensiert. Im übrigen gilt auch hier die in Kapitel 5.3.2.2 angemerkte Einschätzung VON POSCHINGERS (1998).

Der Anwender verlässt EE II mit einer abschließenden Gefährdungsbeurteilung anhand der Standsicherheitsberechnung.

#### **5.4 Entscheidungsebene III - Qualitative Beurteilung**

Anknüpfend an EE II bestimmt EE III das Gefährdungspotential hangmurtypischer Bewegungsprozesse, die nicht entlang definierter Gleitflächen entstehen und daher von idealisierten Standsicherheitsbetrachtungen in EE II abweichen. Hierbei handelt es sich um spontan auftretende Porenwasserüberdruckbildungen mit explosionsartigen Entladungen, die besonders oberflächennah durch (anthropogene) Bodenverdichtungen initiiert werden. Zudem wird das Potential geogen und anthropogen bedingter Erosionserscheinungen an Hangoberflächen abgeschätzt, zu deren Trigger hauptsächlich starke Oberflächenabflüsse zählen. Beide Bewegungsprozesse werden vornehmlich qualitativ bewertet. EE III versteht sich dabei generell als Appendix zu EE II und stützt sich in ihrer Analyse auf umfangreiche Metadaten der Wissensbasis (Kapitel 4.7 bis 4.10), die speziell in den Kapiteln *zusammenfassende Bewertungskriterien für das DSS* für jeden relevanten Faktor aufgezeigt sind.

Im Zusammenhang mit einer wirklichkeitsnahen Gefährdungsbeurteilung bezüglich vorgenannter Bewegungsprozesse - aber auch bei Gleitflächenbewegungen - spielt der Faktor Vegetation aufgrund seines Armierungseffektes eine bedeutende Rolle. Wegen seiner unsicheren Quantifizierbarkeit ist sein Einfluss mittels einer semi-quantitativen Analyse abzuschätzen.

Die Analyse der Vegetation und weiterer Einflussfaktoren führt zu einer qualitativen Unterscheidung zwischen großflächigen, die gesamte Rasterzelle betreffenden, und lokalen Gefährdungszonen. Lokal auftretende Gefährdungszonen werden in einer Rasterskizze kartiert. Ihre Darstellung ermöglicht dem Anwender, gefährdungsimmanente Prozesse einzugrenzen und gegebenenfalls gezielt das Gefährdungspotential durch geeignete Sanierungsmaßnahmen zu reduzieren oder zu beseitigen. Das Auswertungsformular von EE III leitet hierzu mit präzisen Vorgaben durch den Prozess der Geländeaufnahme. Hinweise zur Ausführung von Sanierungen werden nicht gegeben. Sie würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Bei der Beurteilung des Gefährdungspotentials von Erosionserscheinungen und Porenwasserüberdruckbildungen bedient sich das DSS der Ergebnisse verschiedener geotechnischer Parameterbestimmungen aus Entscheidungsebene II. Aber auch innerhalb der EE III ist eine dynamische Systementwicklung mit Rückkopplungen vorgesehen, so dass die Schlussfolgerungskomponente des DSSs eine optimale Wirtschaftlichkeit erreicht.

Die Abgrenzung zwischen beachtlichem und vernachlässigbarem Gefährdungspotential beruht auf wissenschaftlichen Fakten der Wissensbasis. Eine Skalierung nach empirischem Ansatz wird im Zusammenhang mit einer qualitativen Analyse natürlicher Prozesse als ausreichend erachtet. Die qualitative Analyse ermöglicht zudem die Einbindung bedeutender Faktoren, die in einem rein quantitativen Ansatz unberücksichtigt bleiben müssen und somit die Genauigkeit der Gefährdungsanalyse in Frage stellen.

Nach Durchlauf von EE III hält der Nutzer eine umfassende, wirklichkeitsnahe Beurteilung des Gefährdungspotentials innerhalb seines Untersuchungsgebietes in Händen. Das Potential ist dabei nicht *anonym*, mögliche Bewegungsszenarien können lagegenau auskartiert werden.

#### 5.4.1 Gehölzarmierung

Vegetation im allgemeinen und Gehölz im besonderen armieren den Boden und reduzieren durch Rückhalt des Oberflächenwassers die erosive Energie des Niederschlags und dessen unterirdischen Abfluss (vgl. Kap 4.7.1). Sie tragen zu einer erhöhten Hangstabilität - besonders in alpinen Bereichen - durch Verminderung von Hangaufbrüchen infolge Porenwasserüberdrücken bei. Bei Standsicherheitsbetrachtungen entlang von Gleitflächen hat Vegetation theoretisch nur dann eine hemmende Wirkung, wenn ihr Armierungseffekt großflächige Kontinua schafft, die bereichsweise Gefährdungen und Diskontinuitäten, z.B. in der Hangneigung, zu egalisieren vermögen. Die Durchdringung der Gleitfläche mit Wurzelwerk hat generell einen rutschhemmenden Einfluss, der jedoch bei Gleitflächen am Übergang Locker- zu Festgestein nicht zu unterstellen ist.

In der Literatur wird Gehölzeinfluss in Stabilitätsbetrachtungen häufig durch den Ansatz erhöhter Scherfestigkeiten  $\tau$  berücksichtigt. Eine zuverlässige Quantifizierung der Stabilitätszunahme durch Wurzelarmierung ist unter Berücksichtigung naturgegebener Unwägbarkeiten jedoch unmöglich. Des weiteren ist zur Generierung wirklichkeitsnaher Scherfestigkeiten eine Differenzierung des Gehölzbestandes bezüglich seiner Art, seines Zustandes und Deckungsgrades erforderlich. Entsprechende Differenzierungen bleiben in vorgenannten Betrachtungen aufgrund mangelnder Datengrundlage unberücksichtigt (vgl. Kap. 4.7.3). Dies führt in der Praxis zum Ansatz generalisierter Scherfestigkeiten, die zur Ausscheidung undifferenzierter Gefährdungsbereiche beitragen. Aufgrund ihrer mangelnden Verlässlichkeit erscheinen die Ansätze für Standsicherheitsberechnungen innerhalb des DSSs daher ungeeignet.

EE III wählt zur Bestimmung des Armierungspotentials eine mehrstufige, semi-quantitative Erhebungsmethodik, die u.a. den Zustand der Vegetation ausreichend berücksichtigt.

Eine multivariate Häufigkeitsverteilung bestimmt zunächst das Armierungspotential vorherrschender Vegetation aus der Differenz zwischen Murhäufigkeiten auf Freiland und unter Wald. Dieser Ansatz birgt jedoch Unsicherheiten, u.a. aufgrund zu kleiner Stichprobenhäufigkeiten und fehlender Aussagen zum Vegetationszustand. Er erlaubt daher lediglich die Herleitung erster Tendenzen bzgl. der Korrelation von Reliefparametern aus EE I und Armierungspotential. Verbunden mit einer gezielten, rein qualitativen Zustandsanalyse der Vegetation im Gelände liefern die semi-quantitativen Aussagen der Häufigkeitstabelle jedoch eine brauchbare Einschätzung des Armierungspotentials und erreichen damit eine größere Wirklichkeitsnähe als der Ansatz standardisierter Scherfestigkeitserhöhungen.

#### **5.4.1.1 Häufigkeitsverteilungen**

Als Datenbasis der Häufigkeitsverteilung in Tabelle 20 dienen, vergleichbar der bereits in Kapitel 5.2 durchgeführten Analysen, 496 Vegetationsaufnahmen historischer Hangmureignisse aus DP 1, die in Korrelation zu Relieffaktoren aus EE I stehen. In der Bildung aussagekräftiger Kategorien bezieht sich EE III auf Anmerkungen in Kapitel 5.2.1. Fehlende Zustandsbeschreibungen vorherrschender Vegetation erlauben es nicht, ihr tatsächliches Armierungspotential allgemeingültig zu bestimmen. In Tabelle 20 weisen häufiger auftretende Hanginstabilitäten unter Wald daher nicht automatisch auf ein generell vermindertes Armierungspotential bei entsprechenden Standortbedingungen hin. Sie können in einem schlechten Vegetationszustand begründet sein. Faktorenkombinationen mit besonders stark ausgeprägten Häufigkeitsunterschieden zwischen Freiland und Wald (mit geringeren Anrisshäufigkeiten unter Wald) weisen in jedem Fall auf einen positiven Gehölzeinfluss hin.

Trotz aller Unsicherheiten können aus Tabelle 20 einige bedeutende Tendenzen zweifelsfrei abgelesen werden:

- 1) Ein bereits in Kapitel 4.7 aufgezeigter Mur-reduzierender Einfluss von Gehölz wird durch größere Anrisshäufigkeiten auf Freilandflächen im Vergleich zu Wald bestätigt.
- 2) Die Ereignishäufigkeiten unter Gehölz nehmen mit zunehmender Hangneigung bis  $\beta < 41^\circ$  deutlich zu.
- 3) Der Armierungseffekt von Gehölz ist expositionsabhängig. Die Anrisshäufigkeit unter Gehölz ist an nordorientierten Hängen deutlich größer als an südexponierten.

**Tab. 20:** Tendenzielles Armierungspotential von Wald, hergeleitet anhand der Gegenüberstellung von Murhäufigkeiten auf Freiland und unter Wald. Datenbasis: 496 Murereignisse aus DP 1, Legende s. Tab. 15.

Standorteigenschaften				Häufigkeitspunkte		Tendenzielles Armierungspotential v. Wald
Neigung (°)	Höhe (m üNN)	Exposition	Morphologiekl.	Freiland	Wald	
< 29,9	750 - 1400	Sch	I	4	0	+
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	I	18	27	*
> 41	750 - 1400	Sch	I	0	3	-
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	0	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	3	2	-
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	0	1	-
< 29,9	750 - 1400	So	I	3	0	+
30 - 40,9	750 - 1400	So	I	10	3	+
> 41	750 - 1400	So	I	0	6	-
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	2	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	1	2	-
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	I	0	1	-
< 29,9	750 - 1400	Sch	II	12	2	+
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	II	33	45	*
> 41	750 - 1400	Sch	II	1	17	*
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	0	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	24	6	+
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	10	1	+
< 29,9	750 - 1400	So	II	19	1	+
30 - 40,9	750 - 1400	So	II	40	28	+
> 41	750 - 1400	So	II	2	14	*
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	1	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	16	4	+
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	II	0	3	-
< 29,9	750 - 1400	Sch	III	6	3	+
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	III	11	20	*
> 41	750 - 1400	Sch	III	1	4	*
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	16	1	+
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1	0	-
< 29,9	750 - 1400	So	III	7	3	+
30 - 40,9	750 - 1400	So	III	17	18	-
> 41	750 - 1400	So	III	0	6	*
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	2	0	-
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	9	3	+
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	III	2	0	-

Erweiterung der Legende:    +    positiver Einfluss des Waldes auf die Hangstabilität  
    -    kein erkennbarer Einfluss des Waldes auf die Hangstabilität  
    \*    häufigere Hanginstabilität unter Wald

Die Zunahme der baumeigenen Hangfläche lässt mit zunehmender Hangneigung eine Reduzierung der Durchwurzelungsdichte der Fläche mit dem unter 2) genannten Ergebnis vermuten. Die Dichte des Wurzelwerkes ist erkennbar abhängig von den Wachstumsbedingungen der Gehölze, was zu den unter 3) herausgestellten Verhältnissen führt. Für den Bereich der *Grundgefährdung* -  $\beta = 30 - 40,9^\circ$ , Höhe 750 - 1400 m üNN - ist tendenziell eine deutlich größere Ereignishäufigkeit unter Gehölzen mit Nordexposition als im ebenso exponierten Freiland zu erkennen. Diese Verhältnisse kehren sich bei Südexposition um.

Im Auswertungsformular (Anlage IV) werden für eine erste tendenzielle Beurteilung des Armierungspotentials nur jene multivariaten Verknüpfungen berücksichtigt, die armierende Wirkung zeigen. Nur Standorte mit entsprechenden Armierungseffekten erfahren eine nachfolgende Untersuchung des Gehölzzustandes.

#### **5.4.1.2 Gehölzzustand**

Die Vegetationsanalyse in EE III beruht auf dem direkten Zusammenhang zwischen Risikominimierung und optimalem Waldzustand. Eine stabilitätsfördernde Wirkung des Waldes wird gemäß BUWAL (1996) nur bei standortgerechtem, stufigem Bergmischwald hohen Deckungsgrades erreicht. Er reduziert nachhaltig die Häufigkeit und Ausdehnung von Hangbewegungen.

Der Ansatz von BUWAL (1996) zur Beurteilung des Gehölzzustandes bezüglich Dichte, Stufigkeit und Art wird durch Vorgaben des schweizer Projektes NAIS - NACHHALTIGKEIT IM SCHUTZWALD (Thormann & Schwitter 2004) - und Anmerkungen von OTT (1996) konkretisiert. Die Ansätze sind ausgerichtet auf flachgründige Hangrutschgebiete (Rutschhorizont  $< 2$  m u GOK) und Oberflächenerosionen. Im Fokus des Vorgehens steht die Formulierung differenzierter Zustandskategorien, die explizit auf den Bewegungstypus Hangmure ausgerichtet sind.

Unter Zustandskategorie Z1 (BUWAL 1996), gleichbedeutend mit dem *idealen* Waldzustand nach NAIS, ist von einer Erhöhung der Hangstabilität auszugehen. Zustandskategorie Z2, gleichbedeutend mit dem *minimalen* Waldzustand nach NAIS, zeigt keinen erkennbaren Einfluss auf die Stabilität eines Hanges. Die Kriterien von BUWAL und NAIS werden zudem um eine weitere Kategorie, Zustandskategorie Z3, erweitert (angelehnt an Rickli 2001). Ihr sind vornehmlich Schadensflächen und durch Rodungen bzw. Brand zerstörte Waldregionen (vgl. Kap. 4.8.4) zugeordnet, die hohe Erosionsraten aufweisen. Dieser Kategorie wird auch das flächenhafte Auftreten von Monokulturen, vor allem von Fichtenbeständen, zugewiesen. Flachwurzelnde Monokulturen führen zu stark abgemindertem Erosionsschutz, vor allem aber zur Ausbildung von Gleitflächen innerhalb der Hangauflage (vgl. Abb. 4.7.1). Selbst bei stufigem Bestand hohen Deckungsgrades zeigen diese Bestände eine deutlich reduzierte Armierung.

Freiland mit ausschließlicher Wiesen- und Weidevegetation wird Z2 zugeordnet.

**Tab. 21:** Kategorisierung des Armierungspotentials von Gehölz mittels der Zustandsbeschreibungen Deckung, Stufigkeit und Baumart (angelehnt an BUWAL 1996, Ott 1996, Rickli 2001, Thormann & Schwitter 2004)

Armierung	Kategorie	Beschreibung der Zustandskategorie
hoch	Z1	<p><i>Deckung:</i> Anteil Lücken &lt; 20 % bzw. Lückengröße max. 400 m<sup>2</sup></p> <p><i>Stufigkeit:</i> genügend entwicklungsfähige Bäume mit mind. 3 Durchmesserklassen/ha</p> <p><i>Baumarten:</i> gute Mischung zwischen Laub- und immergrünem Nadelwald</p> <p>Richtwert: Tannen und Lärchen &gt; 30 %, Laubbäume &gt; 40 %</p>
mittel	Z2	<p><i>Deckung:</i> Anteil Lücken &gt; 20 % bzw. Lückengröße max. 600 m<sup>2</sup></p> <p><i>Stufigkeit:</i> genügend entwicklungsfähige Bäume mit mind. 2 Durchmesserklassen/ha</p> <p><i>Baumarten:</i> gute Mischung zwischen Laub- und immergrünem Nadelwald</p> <p>Richtwert: Tannen und Lärchen &lt; 30 %, Laubbäume &lt; 40 %</p>
gering bis keine	Z3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rodungsflächen bzw. Kahlfächen</li> <li>• Waldbrandflächen</li> <li>• Flächenhaftes Auftreten von Monokulturen (Fichte, Kiefer)</li> <li>• keine Vegetation</li> </ul>

Für Stabilitätsanalysen bildet die Kategorisierung des Waldes eine wesentliche Grundlage zur Bestimmung gefährdeter Hangbereiche. Der in EE II berechnete Standsicherheitsbeiwert  $\eta$  (Gl. 12) ist daher mit dem qualitativ bestimmten Armierungspotential aus EE III zu einer abschließenden Stabilitätsbeurteilung zusammenzuführen. Die Standsicherheitsbetrachtungen in EE II gehen grundsätzlich von einer Gleitfläche am Übergang von Locker- zu Festgestein aus. Ein Rückhalteeffekt aus Armierung durch Vegetation ist nicht in Ansatz zu bringen. Dennoch führt dichter Gehölzbestand zu einer allgemeinen Stabilisierung der Hangauflage, insbesondere dann, wenn von einem natürlichen, nicht tiefenkonstanten Gleitflächenverlauf auszugehen ist. Auch bei kleinräumigen Diskontinuitäten der Förderfaktoren, wie wechselnden Neigungsverhältnissen, die in alpiner Morphologie fast immer vorherrschen, ergeben sich Sicherheitsreserven für Bereiche, die über der kritischen Hangneigung liegen. Durch Armierung gebildete Kontinua egalisieren punktuelle Schwachstellen in der Hangauflage.

Bezug nehmend auf vorgenannte Untersuchungen ist ausschließlich bei Vegetationszustandskategorie Z1 gemäß Tabelle 21 von einer ausreichend zuverlässigen Stabilitätsverbesserung des Hanges auszugehen, die erlaubt, die in EE II errechneten Standsicherheiten

$\eta$  um 0,1 zu erhöhen. Zustandskategorien Z2 bzw. Z3 haben hingegen keinen nachweisbar positiven Einfluss auf die Stabilität.

#### **5.4.2 Geogen und anthropogen bedingte Erosionsprozesse**

Der Oberflächenabfluss von Starkniederschlag kann zu hohem erosivem Abtrag führen. Konzentrierte Abflüsse mit hohen Geschwindigkeiten initiieren bei rauen Hangoberflächen gefährdungsimmanente Prozesse. Dabei bricht die konzentrierte Strömungsenergie das Gefüge der Hangauflage auf. Die nachfolgende Aufsättigung des Lockergesteins kann Hangmuren auslösen. Diese Zusammenhänge unterstreichen die Notwendigkeit, das Oberflächenabflussverhalten im Einzugsgebiet in die Gefährdungsanalyse erosiver Prozesse aufzunehmen. Das Gefährdungspotential von Erosionsprozessen im Oberflächenabflussgebiet wird ferner durch geogen und anthropogen initiierte Rissbildungen und konkave bzw. konvexe Hangprofile erhöht.

##### **5.4.2.1 Oberflächenabflussverhalten**

Die Bewertung des Oberflächenabflusses erfolgt mittels vier Faktoren in Tabelle 22, angelehnt an Tabelle 12 (vgl. Kap. 4.10). Die Aufnahme des bereits in EE II bestimmten Durchlässigkeitsbeiwertes  $k$  in der Beurteilung zielt auf die Erfassung der Bodeneigenschaften der Hangauflage ab. Feinteilreiche Böden begünstigen aufgrund geringer Durchlässigkeiten a priori einen verstärkten Oberflächenabfluss. Eine Erfassung des durchflusswirksamen Porenanteils  $n_{\text{eff}}$  wird außer Acht gelassen, da seine Wertigkeit in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  steht. Hohe Durchlässigkeiten des Bodens führen nur bei kurzzeitigen Starkniederschlägen in ansonsten schwach gesättigter Hangauflage (geringer Vorregenindex, vgl. Kap. 4.9.1) zu einer wirkungsvollen Reduzierung des Oberflächenabflusses. Bei lang anhaltenden, extremen Niederschlagsereignissen, wenn es zu einer Überschreitung der Infiltrationskapazität des Bodens kommt, verliert der Boden sein Rückhaltepotential (Mößmer 2001). Vegetation hingegen hält ihr Armierungspotential - wenn auch reduziert - bei starker Bodensättigung. Auch die Geometrie des Einzugsgebietes ermöglicht eine wirklichkeitsnahe Differenzierung zu erwartender Oberflächenabflüsse (vgl. Kap. 4.10). Vegetation und Geometrie des Einzugsgebietes sind daher mit einer höheren Wichtung im Vergleich zu übrigen Faktoren zu versehen.

Die Einbeziehung der Vegetation in die Beurteilung des Oberflächenabflusses beruht auf einer ihr zugeschriebenen generellen Dämpfung von Abflussspitzen. In EE III wird ein vereinfachter linearer Zusammenhang zwischen Armierung und Reduzierung des Oberflächenabflusses angenommen, so dass sich die Beurteilung auf die Vegetationsevaluierung der Wissensbasis (vgl. Kap. 5.4.1) stützen kann. Auch der Verdichtungsgrad des Bodens geht in die Beurteilung des Oberflächenabflussgeschehens ein. Die Bewertung konzentriert sich allein

auf eine großflächige, anthropogene Einflussnahme, die mehr oder weniger die ganze Rasterzelle betrifft. Hierzu zählen intensive Bestoßung durch Weidevieh und planierte Pisten (> 200 m Pistenlänge). Bei der Einschätzung der Bestoßungsintensität ist die in der Landwirtschaft gängige Aufnahme von Großvieheinheiten (GVE) pro ha Weidefläche wenig aussagekräftig. Vielmehr ist vom Anwender das Weidemanagement<sup>20</sup> der zu untersuchenden Alm abzufragen. Ein optimales Management dezentralisiert den Viehbestand und verhindert eine speziesspezifische Konzentration - letztere ist gleichbedeutend mit einer hohen Bodenverdichtung. Dennoch kann auch bei einem optimalen Weidemanagement eine lokale Konzentration in Einstandsbereichen nicht verhindert werden (freundliche telefonische Mitteilung durch Herrn M. Hinterstoisser, Bayerisches Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Zweigstelle Miesbach).

**Tab. 22:** Beurteilung der Intensität und des zeitlichen Verlaufes von Oberflächenabflüssen anhand verschiedener Einflussfaktoren <sup>(1)</sup>

Einflussfaktoren	Spalte I	Spalte II
	Oberflächenabfluss zeitverzögert & gering	Oberflächenabfluss unmittelbar & hoch
Durchlässigkeitsbeiwert $k$ <sup>(2)</sup> (1 Punkt)	sehr stark durchlässig bis durchlässig ( $k > 10^{-6}$ m/s)	durchlässig bis sehr schwach durchlässig ( $k < 10^{-6}$ m/s)
Anthropogen verursachte Bodenverdichtung (1 Punkt)	optimales Weidemanagement, planierte Pisten (< 180 m Länge)	schlechtes Weidemanagement, planierte Pisten (> 180 m Länge)
Vegetation (1 Punkte)	Zustandskategorie Z1 & Z2	Zustandskategorie Z3 & vetationslos
Geometrie des Einzugsgebietes (3 Punkte)	talförmig	kesselförmig
<b>Summe der Bewertungspunkte (Spalte II)</b>		$\Sigma =$

<sup>(1)</sup> Vorgehen: Für jeden Einflussfaktor wird die vorgesehene Punktzahl entweder Spalte I oder Spalte II zugeordnet, wobei der Anwender entsprechend seiner Geländeaufnahme verfährt. Nur die Punkte von Spalte II werden addiert.

<sup>(2)</sup> Beurteilung angelehnt an Angaben der DIN 18130, T1

<sup>20</sup> Optimales Weidemanagement: Viehbesatz ist dem Weidezustand angepasst (Beweidung in Camps, geringe Besatzzzeiten, Behirtung des Bestandes). Für Regentage sind ungedüngte Extensivweiden vorzusehen. [http://www.landwirtschaft-mlr.badenwuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1040723\\_1/index.html](http://www.landwirtschaft-mlr.badenwuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1040723_1/index.html), Zugriff: 12.11.2009)

Punktuelle Hangwasseraustritte in Form ungefasster Quellen bzw. unterdimensionierter resp. defekter Drainagerohre werden bei der Beurteilung des Oberflächenabflusses nicht berücksichtigt. Sie werden erst im Zusammenhang mit einer detaillierten Untersuchung von Oberflächenabflüssen entlang von Rissbildungen und konkaven bzw. konvexen Hangprofilen untersucht. Konzentrierte Hangwasserinfiltrationen spielen generell auch in der Beurteilung von Porenwasserüberdruckbildungen eine Rolle. Im Vergleich zu Erosionsprozessen ist hier jedoch nicht von einer oberflächigen Stabilitätsminderung auszugehen, sondern vielmehr von einer Infiltration in die Hangauflage, die im weiteren zu einer gefährdungsimmanenten Aufsättigung mit nachfolgendem Druckaufbau führt. Mit der in der Gefährdungsanalyse des DSSs vorausgesetzten Annahme einer Vollsättigung des Hangprofils ist ein zusätzlicher anthropogener Hangwassereinfluss an dieser Stelle jedoch zu vernachlässigen.

Die Evaluierung des Oberflächenabflusses erfolgt anhand Tabelle 22. Die Punktschnee aus Spalte II gibt Aufschluss über das Erosionspotential des zu erwartenden Oberflächenabflusses im Untersuchungsgebiet.

- 0 - 3 Punkte: Oberflächenabfluss gering, Erosionspotential vernachlässigbar
- 4 - 8 Punkte: Oberflächenabfluss hoch, Erosionspotential beachtlich

Bei einem vernachlässigbaren Erosionspotential steht es dem Anwender frei, die Analyse von Erosionsprozessen abzuschließen. Hier ist von einer generell vernachlässigbaren Hangmurgefährdung auszugehen. Bei einem beachtlichen Erosionspotential sind hingegen nachfolgende Untersuchungen entlang rauher Oberflächenstrukturen, wie geogen und anthropogen bedingte Rissstrukturen, die in ihrem Gefährdungspotential direkt an das Oberflächenabflussgeschehen des Hanges gekoppelt sind, anzuschließen. Dabei weist die Detailuntersuchung insbesondere auf lokal auftretende Wassersysteme hin, die im Zusammenhang mit Rissstrukturen ein hohes Gefährdungspotential implizieren. Aber auch konkave und konvexe Hangprofile zeigen im Bereich von Muldenstrukturen und an Hangkanten ein erhöhtes Erosionspotential. Ihre Kartierung ermöglicht die differenzierte Ausscheidung von Gefährdungsarealen und die Entwicklung geeigneter Sanierungskonzepte.

#### **5.4.2.2 Rissstrukturen**

Rissstrukturen tragen durch eine von ihnen ausgehende erhöhte Erosivität der Hangauflage indirekt zur Minderung der Hangstabilität bei. Dabei sind es vornehmlich turbulente Strömungen, die sich bei konzentrierten, schnellen Oberflächenabflüssen in direkter Umgebung von Schrumpf- oder Zugrissen bilden und zu hangmurartigen Fließbewegungen führen (vgl. Kap. 4.9.1). Risse, die Infiltrationen von Oberflächenwässern in die Hangauflage begünstigen, können bei entsprechend geogenen bzw. anthropogenen Eigenschaften der Hangauflage auch zur Bildung von Porenwasserüberdrücken führen. Diese Problematik wird im nachfol-

genden Kapitel 5.4.3 thematisiert. Vom Ansatz hydrostatischer Drucke gemäß Kapitel 4.9.1 innerhalb von Rissstrukturen ist unter Annahme eines worst-case Szenarios mit Vollsättigung der Hangauflage generell abzusehen.

Geogene Rissbildungen sind vornehmlich auf das Schrumpfverhalten bindiger Böden zurückzuführen. Aufgrund eines im Zusammenhang mit Hangmuren eher rolligen Charakters der Hangauflage ist der Ansatz einer Schrumpfrissbildung zumeist zu vernachlässigen. Dennoch werden alpine Hangauflagen mit bereichsweise bindigem Boden angetroffen, so dass ihr Schrumpfpotential als Teil einer umfassenden Gefährdungsanalyse zu berücksichtigen ist.

Eine rein visuelle Erfassung geogener Rissstrukturen ist nicht umfassend genug, da sie nur während extremer und lang anhaltender Trockenheit des Bodens objektiv aufzunehmen sind. Abbildungen von Rissstrukturen (vgl. Abb. 36) sind in der Einschätzung des Schrumpfpotentials demzufolge nur saisonal möglich. Daher ist das geogene Schrumpfrisspotential des Bodens über die bereits in Tabelle 10 aufgezeigte Korrelation von GREENWAY (1987) großflächig für die jeweilige Rasterzelle abzuschätzen: Die Hangauflage gilt als schrumpfgefährdet bei einem Tongehalte  $> 30\%$  und einem Plastizitätsindex von  $I_p > 18\%$ . Die in EE II ermittelte Körnungslinie gibt den Tongehalt des Bodens an. Zur Wahrung der Wirtschaftlichkeit des DSSs ist zunächst ausschließlich dieser zu bestimmen. Erst wenn der Tongehalt über  $30\%$  liegt, ist der Plastizitätsindex  $I_p$  anhand des Ablaufschemas in EE II mittels DIN 18122-1 zu ermitteln. Eine weitere Differenzierung des Schrumpfpotentials oberhalb von  $I_p > 18\%$  und einem Tongehalt  $> 30\%$  erscheint nicht erforderlich, da innerhalb alpiner Hangauflagen nicht von sehr viel höheren Plastizitätsindices und Tongehalten auszugehen ist. Aus den innerhalb eines Rasters entnommenen Bodenproben mit zugehörigen Kennwerten ist ein repräsentatives geogenes Schrumpfpotential abzuleiten: Der charakteristische Plastizitätsindex  $I_p$  und der charakteristische Tongehalt ergeben sich aus den faktisch höchsten Werten aller in einem Raster auftretenden Bodengruppen.

Mehrere Meter lange, Zentimeter breite, anthropoge Zugrisse bilden sich vornehmlich entlang von Fahr- bzw. Wirtschaftswegen und entstehen hauptsächlich durch das Eigengewicht von Bewirtschaftungsfahrzeugen. Ihr Auftreten ist - im Vergleich zu geogenen Rissstrukturen - nicht von der Bindigkeit der Böden abhängig und zumeist lokal begrenzt. Anthropogene Rissstrukturen sind vom Anwender des Auswertungsformulars in einer Rasterskizze aufzunehmen.

Neben Rissstrukturen sind zudem punktuelle Wasseraustritte in Form ungefasster Quellen bzw. unterdimensionierter resp. defekter Drainagerohre zu erfassen. Episodische und permanente Hangwasseraustritte führen zu einem konzentrierten Wassereinfluss und fördern eine erhöhte Hangerosion, unabhängig von einer Vollsättigung der Hangauflage infolge

Starkniederschlags. Die Aufnahme von Rissstrukturen im Zusammenhang mit oberflächigen Wassersystemen ermöglicht dem Anwender, das von ihnen ausgehende Gefährdungspotential zu lokalisieren und gezielt mittels geeigneter Sanierungsmaßnahmen zu minimieren.

#### **5.4.2.3 Morphologie**

Geogen und/oder durch sekundäre Überlagerung (vgl. Kap. 4.8.3) entstandene konkave Hangprofile stellen im Bereich ihrer Muldenstrukturen Angriffsflächen für eine erhöhte Erosivität durch Oberflächenabflussbildungen dar. Diese ist gemäß Kapitel 4.5.3 auf Verwirbelungsprozesse aus turbulenter Strömung zurückzuführen. Die Intensität des Erosionspotentials orientiert sich dabei ausschließlich am hydraulischen Gefälle, das bei einem stark geneigten Oberhang natürlich besonders groß ist. An konvexen Hangprofilen können im Bereich des Unterhanges Erosionsprozesse auftreten, aus denen sich Hangmuren entwickeln können. Bei starkem, gefährdungsimmanentem Oberflächenabfluss geben Muldenstrukturen und Unterhänge daher Hinweise auf lokale Schwächezonen - und dies besonders im Zusammenhang mit punktuellen Wasseraustritten.

Auf planaren Hängen sind erhöhte Erosionsleistungen auszuschließen. Dort, wo planare Hangabschnitte jedoch eine Gefälleänderung (z.B. am Hangfuß) erfahren, gelten vergleichbare Gefährdungspotentiale wie an vorgenannten konkaven oder konvexen Profilen.

#### **5.4.3 Porenwasserüberdrucke aufgrund geogener und anthropogener Einflussnahme**

Mit konzentriertem Eintrag von Oberflächenwässern in die Hangauflage können sich am Übergang von stark durchlässigen Lockergesteinskörpern zu gering durchlässigen Deckhorizonten lokal Porenwasserüberdrucke aufbauen, die sich als Hangexplosion entladen und den Abtrag der Hangauflage auslösen. Auch wirtschaftliche Nutzung kann lokal oberflächennahe Verdichtungen des Hanges initiieren, die in ihren Wirkungen durchaus mit den vorgenannten geogenen vergleichbar sind, wenngleich jene auf einen erhöhten Feinkornanteil zurückgehen.

Es sind vornehmlich schwer detektierbare unterirdische Hangwasserzuflüsse aus dem oberen Einzugsgebiet, die im Untersuchungsareal aufgrund lokaler Impermeabilitäten zu einem hydrostatischen Aufstau gezwungen werden. Die Verdichtungserscheinungen gehen auf Scherbewegungen dynamischer Lasten wie Hufbelastungen von Weidetieren und/oder den Maschineneinsatz zur Holzurückung und Pistenpflege vornehmlich auf bindigen Böden zurück. Sie führen zu einer Homogenisierung der Bodenpartikel mit einer verminderten vertikalen Durchlässigkeit  $k_v$  (vgl. Abb. 33).

EE III konzentriert sich in der Gefährdungsabschätzung lokaler Porenwasserüberdrucke daher ausschließlich auf reduzierte Durchlässigkeiten und großflächige anthropogene Verdich-

tungen der Hangaufgabe in Form von intensiven Alm- und Forstbewirtschaftungen und alpinem Sporttourismus.

Vegetation kann zur Anrissminimierung beitragen, wenn durch Wurzelarmierung ausreichend großflächige Kontinua geschaffen werden, die ein explosionsartiges Aufbrechen der Hangaufgabe verhindern. Dies ist vornehmlich nur bei Gehölzbestand mit hoher Deckung, optimaler Stufigkeit und einer bestmöglichen Mischung der Baumarten mit heterogenen Wurzeltiefen gewährleistet. Nur Waldzustandskategorie Z1 gemäß Tabelle 21 ist dieses Potential zuzuschreiben.

Zur Beurteilung vorgenannter Bodenverdichtungserscheinungen ist aus Gründen optimaler Wirtschaftlichkeit auf die vorangegangene Analyse zum Oberflächenabflussverhalten (vgl. Kap. 5.4.2.1) zurückzugreifen. Vor dem Hintergrund, dass das eigentliche Infiltrationsgebiet als Initial von Porenwasserüberdruckbildungen nicht bekannt ist, ist zunächst von einer großflächigen, die gesamte Ratserzelle betreffenden Gefährdung durch Überdruckbildungen auszugehen.

Eine vernachlässigbar geringe Gefährdung liegt bei gut durchlässigen Böden mit geringer anthropogener Verdichtung und dichter Waldbestockung vor. In diesem Fall ist von einer vernachlässigbaren Hangmurgefährdung durch Porenwasserüberdruck auszugehen. Dem Anwender steht es frei, die Analyse an dieser Stelle zu verlassen. Bei starker Bodenverdichtung und schlechtem Vegetationszustand sind hingegen lokal auftretende Einflussfaktoren in die Beurteilung zu integrieren und einer differenzierteren Gefährdungsanalyse zuzuführen. Hierzu zählen u.a. morphologische Makrostrukturen. Angelehnt an die Kapitel 4.5.2 und 4.5.3 zeigen konvexe und konkave Hangprofile eine erhöhte Gefährdung durch Hangexplosionen. Im Bereich stark ausgeprägter Muldenstrukturen (konkaves Profil) können Staueffekte einen Porenwasserüberdruck initiieren, insbesondere bei Existenz einer wasserundurchlässigen Deckschicht. Dabei wirkt der Strömungsdruck aus Änderung des Geschwindigkeitsvektors des Wassers umso stärker, je steiler der Oberhang ist. Auch konvexe Morphologie kann Hangexplosionen auslösen. Hier ist das Phänomen jedoch nicht auf Überdruckbildungen zurückzuführen, sondern vielmehr der Impulsänderung des strömenden Wassers im Bereich der Hangkante zuzuschreiben (vgl. Abb. 24, Kap. 4.5.2).

Des Weiteren sind lokale Böschungsaufschüttungen u.a. im Zusammenhang mit Wegebaumaßnahmen zu beachten. Durch sekundäre Überlagerung, besonders von bindigem Material, können hohe Porenwasserüberdrucke initiiert werden. Aber auch vorgenannte anthropogene Einflüsse, wie Hufbelastungen von Weidetieren und/oder Einsatz schwerer Maschinen, können zu bereichsweiser Verdichtung des Bodens beitragen und lokal hohe Porenwasserüberdrucke initiieren. Entsprechende Einflüsse sind durch den Anwender mittels Rasterskizzen lagegenau zu erfassen.

Die Schlussfolgerungskomponente kann im Zusammenhang mit der Beurteilung von Porenwasserüberdruckbildungen generell nur eine qualitative, abschätzende Beurteilung vornehmen. Sie differenziert dabei großflächig zwischen einer beachtlichen und vernachlässigbaren Gefährdung. Zudem zeigt sie mittels Kartierung lokale, anthropogen verursachte Gefährdungspotentiale, wie Hangversteilung bzw. -verflachung innerhalb einer Rasterzelle auf und ermöglicht damit eine gezielte Erfassung von Gefährdungsstellen.

## 5.5 Abschließende Gefährdungsbeurteilung

Nach Durchlauf der Entscheidungsebenen II bis III ergibt sich für den Nutzer auf Grundlage der Gefährdungspotentiale der drei für Hangmuren charakteristischen Bewegungsprozesse - Gleitflächenbewegung, erosions- und porenwasserüberdruck-initialisierte Bewegung - die abschließende Gefährdungsbeurteilung. Nur wenn für *alle* Bewegungsszenarien keine Gefährdung erkennbar ist, kann der Anwender sie als vernachlässigbar einstufen.

Wird hingegen auch nur für einen Bewegungsprozess ein Gefährdungspotential ausgewiesen, gilt die Rasterzelle als grundsätzlich gefährdet. Die Ansätze zur Lokalisierung der Erosions- und Porenwasserüberdruckpotentiale wirken sich vorteilhaft in der Analyse aus. Sie ermöglichen dem Anwender, lokal auftretende Gefährdungen einzugrenzen und sie einer gezielten Sanierung zuzuführen. Somit kann das Gefährdungspotential einer Rasterzelle bedingt für die zwei letztgenannten hangmurtypischen Bewegungen nachhaltig reduziert werden.

## 5.6 Berücksichtigung des Klimawandels

Sucht der Anwender eine gezielte Ausrichtung des DSSs auf durch Klimawandel bedingte Veränderungen, sind Modifikationen verschiedener Einflussfaktoren gemäß der Schwellenwertdiskussion in Kapitel 4.12 vorzunehmen. Der detaillierte Entwurf einer klimaimplementierten Schlussfolgerungskomponente sprengt jedoch den Rahmen dieser Arbeit. Die entwickelte Schlussfolgerungskomponente bietet in ihrer Struktur grundsätzlich ein effektives *Tool* zur wirklichkeitsnahen Analyse potentieller Hangmurgebiete - auch unter Einfluss des Klimawandels. Gleichwohl wäre eine gezielte Ausrichtung des DSSs auf klimabedingte Faktorenveränderungen vorzunehmen. Nachfolgende Anmerkungen geben hierzu Hinweise:

- Die Häufigkeitsverteilung von Reliefparametern aus EE I zur Abschätzung des Gefährdungspotentials verliert unter veränderten Klimabedingungen ihre Gültigkeit. Sie ist durch eine alternative Beurteilungsmethode zu ersetzen, die insbesondere für Exposition und geodätische Höhe auf die klimawandelorientierten Schwellenwerte aus Kapitel 4.12 ausgerichtet ist. Die für den Klimawandel prognostizierten Häufungen W-

SW orientierter Anrisszonen und die häufiger betroffenen Höhenlagen zwischen 900 und 1500 m üNN stimmen tendenziell mit bereits bestehenden gefährdungsimmanenten Standortbedingungen, wie Sonnenseite und Höhenlagen zwischen 750 und 1400 m üNN überein.

- Durch Probennahme und Einbindung der Analyseergebnisse in Standsicherheitsbetrachtungen findet mit EE II bereits eine ausreichend gezielte Ausrichtung auf die jeweils vorliegende Hangsituation statt. Des weiteren geht das vorliegende DSS in seiner Beurteilung von worst-case Szenarien und einer damit verbundenen Vollsättigung der Hangauflage aus. Ein zu erwartendes, intensiveres bzw. jahreszeitlich versetztes Niederschlagsregime gilt daher als ein zu vernachlässigender Einfluss auf die Gefährdungsbetrachtung in EE II.
- Mit vermehrten Starkniederschlägen kurzer Dauer bei gleichzeitiger Zunahme von Trockentagen und einer damit einhergehenden häufiger auftretenden Schrumpfrissbildung in kohäsiven Böden ist zukünftig von einem steigenden Gefährdungspotential durch Erosion und Porenwasserüberdruckbildungen auszugehen. In ihrer aktuellen Struktur kann EE III die entscheidenden Bewegungsprozesse auch unter veränderten Klimabedingungen wirklichkeitsnah erfassen. Der Faktor Vegetation wird zukünftig eine stärkere Wichtung in der Bewertung des Erosionspotentials erfahren. Insbesondere der Vegetationszustand wird künftig eine noch größere Rolle in der Beurteilung des Gehölzarmierungspotentials spielen. Durch die geringe Adaption standortfremder Arten, wie die im Alpenraum stark verbreiteten Fichten und Kiefern, wird Gehölz unter dem Einfluss zunehmender Erwärmung von einer deutlichen Schwächung betroffen sein. Die Häufigkeitsbetrachtungen zur Gehölzarmierung verlieren unter veränderten Klimabedingungen ihre Gültigkeit. Das Armierungspotential ist dann ausschließlich über den Gehölzzustand zu bestimmen.

Obige Schwellenwertdiskussion ist an heutige Klimaprognosen gekoppelt, die jedoch einer stetigen Nach- und Nejustierung unterliegen. In Kapitel 4.12 definierte Schwellenwerte sind daher vor ihrer Implementierung in das DSS auf ihre Aktualität hin zu überprüfen. Die Wissensveränderungskomponente des DSSs (vgl. Abb. 12) spielt daher in der wirklichkeitsnahen Ausrichtung des DS-Systems auf den Klimawandel eine bedeutende Rolle.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Decision-Support-System (DSS) erreicht mittels eines dreistufigen Workflows eine hohe Wirklichkeitsnähe in der Definition potentieller Hangmurgebiete. Dabei wird die Vielfältigkeit des Bewegungsprozesses *Hangmure* in die Entscheidungsfindung integriert.

Das DSS ist die lokalmaßstäbliche Präzisierung automatisierter Gefährdungsanalysen. Bestehende Systeme beziehen ihre Eingabedaten aus kleinmaßstäblichen Grundlagenkarten mit geringer Fortschreibungsaktualität. Geologische, geotechnische Heterogenitäten und schnelllebige morphologische Prozesse finden hierin nur unzureichend Berücksichtigung. Diesen Schwachstellen begegnet das DSS, indem es seine Entscheidungsgrundlage ausschließlich aus der faktorenorientierten Geländebegehung bezieht. Dabei werden lokale Besonderheiten sofort augenfällig und finden Eingang in die Gefährdungsbewertung. Rasterbildung ermöglicht für große wie für kleine Untersuchungsgebiete die gleiche Genauigkeit in der Risikoanalyse.

Das Auswertungsformular des DSSs ist klar strukturiert und gibt eine stetige Überprüfung der Eingaben und Schlussfolgerungen. Es ist damit speziell auf Anwender ausgerichtet, die keine Experten auf dem Gebiet der Hangmuranalyse sind. Zudem bestimmt das System nicht nur das Gefährdungspotential eines Hanges, sondern zeigt auch über die Struktur des Auswertungsformulars gezielt die Ursachen einer potentiellen Gefährdung auf. Mittels einer Kartieranleitung können lokale Gefährdungszonen aufgenommen und gezielt Sanierungskonzepte entwickelt werden. Das DSS macht jedoch, vergleichbar mit Gefahrenhinweiskarten, keine Angaben zur Intensität von Hangmureignissen.

Die Geländeaufnahmen sind in Vor- und Hauptuntersuchung unterteilt und ermöglichen ein effizientes Vorgehen. Innerhalb von Entscheidungsebene EE I wird mittels einer multivariaten Relieffaktorenanalyse eine approximierende Abschätzung des Gefahrenpotentials erzielt. Der Genauigkeitsanspruch, den die dem DSS zugrunde liegende Wissensbasis auszeichnet, kann in EE I nicht fortgeführt werden. Eine unzureichend differenzierte Ausprägung der Kategorien innerhalb der Häufigkeitsuntersuchungen zwingt vereinzelt zu Verallgemeinerungen, die jedoch im Rahmen einer Voruntersuchung als ausreichend zuverlässig erachtet werden.

Abschätzungen aus EE I ermöglichen, die in EE II und III folgende Hauptuntersuchung gezielt auf das Gefährdungspotential des Hanges auszurichten und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erzielen. Zur wirklichkeitsnahen Beurteilung stark heterogener Hangaufgaben bietet EE II ein umfangreiches, dennoch wirtschaftliches Beprobungskonzept. Es ermöglicht die Ausrichtung des DSSs auf ein alpin ubiquitäres Anwendungsgebiet. Die Dichte des Beprobungsrasters ist dabei auch ausgerichtet am wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen

Risikopotential des Untersuchungsgebietes. Den Abschluss von EE II bilden Standsicherheitsberechnungen für potentielle Gleitbewegungen. Mit äußerst differenzierten geotechnischen Berechnungsansätzen wird das DSS den Präzisionsansprüchen einer Hauptuntersuchung gerecht.

Zur Komplexität von Hangmurentersuchungen zählt die Berücksichtigung weiterer, von Gleitflächenbewegungen abweichender Bewegungsprozesse. Der Vorteil des DSSs besteht in der Implementierung von EE III. Hier werden all jene Faktoren beurteilt, die aufgrund mangelnder Quantifizierbarkeit nur qualitativ bzw. semi-quantitativ erfassbar sind, aber die Grundlage für hangmureinitialisierende Erosions- oder Porenwasserüberdruckprozesse bilden. Qualitative Entscheidungsunterstützungen tragen generell nicht zur Präzisierung von Prozessen bei. Sie ermöglichen jedoch die Einbindung *aller* gefährdungsimmanenter, lokalen Merkmale in die Modellbildung, die bei rein quantitativen Beurteilungen unberücksichtigt bleiben.

DS-Systeme stoßen hier und da auf Zweifel: Entscheidungsunterstützende Verfahren seien nur Abstraktionsversuche der Realität, die per se mit Unsicherheiten verbunden seien. Zudem führe die Verwendung nicht exakt definierter Schwellenwerte zu einer unpräzisen Entscheidungsfindung (Egli 1996, Keiler & Fuchs 2007). Dieser kritischen Beurteilung war sich die Autorin während der Entwicklung des vorliegenden Systems bewusst. Drei Entscheidungsebenen in Verbindung mit statistischen Ansätzen, gezielter Geländeansprache mittels eines faktorenorientierten Erkundungskonzeptes und Berechnungen schaffen jedoch eine hohe Wirklichkeitsnähe. Der generellen Schwellenwertproblematik begegnet das DSS mit der Implementierung einer umfangreichen, kritischen Wissensbasis, die statistisch ermittelte Schwellenwerte, basierend auf über 1000 historischen Hangmureignissen, mit wissenschaftlichen Expertenangaben abgleicht. Gleichwohl ergibt sich bei einigen Ansätzen Raum für höhere Präzision:

Für den Faktor Vegetation wäre es erstrebenswert, den in der Gefährdungsanalyse stark gewichteten Waldzustand zukünftig in die Analyse erfolgter Mureignisse aufzunehmen, um Korrelationen zwischen Gehölzzustand, -art bzw. -deckungsgrad und Armierungspotential zu ermöglichen. Eine generell höhere Genauigkeit von Schwellenwerten könnte durch die Implementierung eines für den Alpenraum einheitlichen Aufnahmemodus für historische Hangmureignisse erzielt werden. Hierfür wären bereits bestehende Ansätze aus *Dokumentation von Naturgefahren - Feldanleitung* von PLANALP (2006) zu präzisieren. Die u.a. von RICKLI und BUCHER (2003), RICKLI ET AL. (2008) und RINER (2009) vorgenommene Implementierung geotechnischer Kennwerte in die Aufnahme von historischen Mureignissen wäre in die normierte Dokumentation zu übernehmen. Die Verfügbarkeit großer Datenmengen würde die Integration entscheidender, geotechnischer Aspekte in multivariate Verknüpfungen ermöglichen und damit die Erarbeitung weiterer gefährdungsimpliciter Zusammenhänge erleichtern.

Das vorliegende Decision-Support-System bietet seinem Anwender ein für den Alpenraum ubiquitär einsetzbares, wirtschaftliches, leicht nachvollziehbares *Tool* für eine zeitnahe, lokalmaßstäbliche Gefährdungsanalyse für Hangmuren. Zudem bietet es mit der Implementierung einer umfassenden Wissensbasis einen Leitfaden zur Datenakquise und -evaluierung und leistet damit einen interdisziplinären Beitrag zur Präzisierung bestehender, regionalmaßstäblicher GI-Systeme. Eine Beaufschlagung aller Einflussfaktoren des DSSs mit heutigen Klimaprognosen gibt zudem wichtige Hinweise für eine zukünftige, wirklichkeitsnahe Gefährdungsanalyse.

## 7 Literaturverzeichnis

ALBER, D. & FLOSS, R. (1983): Stochastische Verfahren zur Schätzung von Bodenkennwerten. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, Hrsg.: Floss, R., München

ANDERLE, A. (1971): Zur Frage der hydrologischen und bodenkundlichen Ursachen der während der Hochwasserkatastrophe 1965 und 1966 in Kärnten ausgelösten Hangrutsche und Muren. *Interpraevent*, **1**, S. 11-21

ANDERSON, M.G. & BURT, T.P. (1990): *Process studies in hillslope hydrogeology*. Wiley & Sons, 539 S., Chichester

ANDRECS, P. & OBERNDORFER, S. (2008): Beurteilung von Naturgefahren - Gefahr, Risiko und Vulnerabilität. *BFW-Praxisinformation*, **15**, S. 5-6,  
[www.waldwissen.net/themen/naturgefahren/bfw\\_beurteilung\\_ng\\_2007\\_DE](http://www.waldwissen.net/themen/naturgefahren/bfw_beurteilung_ng_2007_DE), Zugriff: 10.01.2009

AGN - ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (Hrsg.) (2000): Ursachen der Hanginstabilitäten 1999. *Bull. Angew. Geol.*, **5/1**, S. 3-152, Zollikofen

AGN - ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE UND NATURGEFAHREN (Hrsg.) (2004): *GefahrenEinstufung Rutschungen i.w.S. - Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren*. Zollikofen

ARE - SCHWEIZER BUNDESÄMTER FÜR RAUMENTWICKLUNG, FÜR WASSER UND GEOLOGIE UND FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.) (2005): *Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren*. 48 S.

AUERSWALD, K. & SCHMIDT, F. (1986): *Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern - Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen*. GLA-Fachberichte, **1**, 74 S., Hrsg.: Bayerisches Geologisches Landesamt, München

ASCH, T. v.; BUMA, J.; BEEK, L. v. (1999): A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, **30**, S. 25-32

BADER, S. & KUNZ, P. (1998): *Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz*. Wissenschaftlicher Schlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms *Klimaänderungen und Naturkatastrophen* NFP 31, 312 S., vdf Hochschulverlag der ETH Zürich

BAUMGARTNER, H. (2007): Ganze Berghänge in Bewegung. *Umwelt*, **2 (7)**, S. 18-20

BAUMHAUER, R. (2006): *Geomorphologie*. 144 S., Wissenschaftliche Buchgesellschaft WBG, Darmstadt

BAYLFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2005): *Hangbewegungen/GEORISK*. <http://www.lfu.bayern.de/geologie/fachinformationen/hangbewegungen/index.htm>, Zugriff: 05.05.2007

BAYLFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2008a): Maßnahme 3.2a *Schaffung geologischer und hydrologischer Informationsgrundlagen* - Vorhaben Gefahrenhinweiskarte Oberallgäu. 73 S., [http://www.lfu.bayern.de/geologie/forschung\\_und\\_projekte/gefahrenhinweiskarte\\_oberallgaeu/vorgehensweise/doc/bericht\\_oa.pdf](http://www.lfu.bayern.de/geologie/forschung_und_projekte/gefahrenhinweiskarte_oberallgaeu/vorgehensweise/doc/bericht_oa.pdf), Zugriff: 15.10.2008

BAYLFU - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2008b): Bayerns Klima im Wandel - erkennen und handeln. 92 S., Augsburg

BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1996): Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten - Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, **27**, 90 S.

BAYLFW - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2004): SpektrumWasser 1, Hochwasser - Naturereignis und Gefahr. 91 S., München

BAYFORKLIM - Bayerischer Klimaforschungsverbund (Hrsg.) (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes. München

BECHT, M. (1995): Untersuchungen zur aktuellen Reliefbildung in alpinen Einzugsgebieten. Habilitationsschrift in: Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe A, **47**, 187 S, Hrsg.: Birkenhauer et al.

BECHTEL, H.M.; LEHNHARDT, F.; TOLDRIAN, H. (1975): Zur Problematik einer quantitativen Erfassung des Einflusses der Landnutzung auf Oberflächenabfluß und Bodenabtrag sowie auf oberflächennahe Abflüsse. *Interpraevent*, **1**, S. 127-139

BEFFA, C. (2000): Modellunterstützte Beurteilung von Hochwassergefahren. *Interpraevent*, **1**, S. 99-110, Villach

BEIERKUHNLEIN, C. & FOKEN, T. (2008): Klimawandel in Bayern - Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. *Bayreuther Forum Ökologie*, **113**, 501 S., ISSN 0944 - 4122

BEIERKUHNLEIN, C. (2008): Ökologische Auswirkungen des Klimawandels - Überraschungen sind sicher. *Marktrechwitzter Bodenschutztag, Tagungsband 5: Boden und Klima im Wandel*, S. 9-14, Marktrechwitz

BEINSTEINER, H. & MAYER, H. (1971): Waldbauliche Untersuchungen von Waldanbrüchen im Osttiroler Katastrophengebiet. *Interpraevent*, **2 (4)**, S. 295-310

BEYER, W. & SCHWEIGER, K.H. (1969): Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter. *WWT*, **19 (2)**, S. 57-60

BGR - BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hrsg.) (1998): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland - Informationen zur Kartenlegende. 15 S., Hannover

BILL, R. (1999): Grundlagen der Geoinformationssysteme - Hardware, Software und Daten. Band 1, Wichmann Verlag, Heidelberg

BLOETZER, W.; EGLI, T.; PETRASCHECK, A.; SAUTER, J.; STOFFEL, M. (1998): Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung: Methodische Ansätze und Fallbeispiele. Synthesenbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms *Klimaänderungen und Naturkatastrophen* NFP 31, vdf Hochschulverlag der ETH Zürich

BLONDEAU, F.; PERROT, A.; PILOT, G. (1975): Analyse de l'expression cartographique des risques de glissement. Dans les Argiles du Toarcien en Lorraine. I-47-158

BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.) (2008): Klimawandel in den Alpen - Fakten, Folgen, Anpassung. 92 S.

BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (2005). 5. Aufl., Hrsg.: BGR und GLAs der Bundesrepublik Deutschland, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung

BOLEY, C. & TRAUNER, F.X. (2009): GIS-gestützte Analysen von Rutschhängen als Komponente von Frühwarnsystemen. Christian Veder Kolloquium 2009 - Stabilisierungen von Rutschhängen, Böschungen und Einschnitten, Technische Universität Graz, 18 S.

BOLLINGER, D.; BONNARD, C.; KEUSEN, H.U. (2008): Beurteilung der Wirkung von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung - Teil D, Rutschungen. 42 S., Hrsg.: PLANAT ä Nationale Plattform Naturgefahren

BONNARD, C.; TACHER, L.; BENISTON, M. (2008): Prediction of landslide movements caused by climate change: Modelling the behaviour of a mean elevation large slide in the Alps and assessing its uncertainties. *Landslides and Engineered Slopes*, S. 217- 227, Hrsg.: Chen et al.

BRANSBY, M.F.; DAVIES, M.C.R.; MICKOVSKI, S.B.; SONNENBERG, R.; BENGOUGH, A.G.; HALLETT, P.D. (2006): Stabilisation of slopes by vegetation reinforcement. *Physical modelling in geotechnics*, 6<sup>th</sup> CPMG 2006. S. 317-323, Hrsg.: Ng, Zhang, Wang, ISBN: 0-415-41586-1

BRECHTEL, H.M. & HAMMES, W. (1985): Der Einfluss der Vegetation auf den Boden-Wasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung von Fragen der Bodenkonsistenz auf Böschungen und Hänge. *Ingenieurbiologie - Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen*. S. 108-133, Hrsg.: Pflug, W., Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Aachen

BREITSAMETER, J. (1996): Untersuchungen zum Feststoffaustrag aus unterschiedlich dicht bewaldeten Kleinzugsgebieten im Flysch und in den Kalkalpen der Tegernseer Berge. *Forstliche Forschungsberichte München*, **154**, Schriftreihe der forstwiss. Fak. der Universität München

BÜCH, F. (2003): Geologisch-geotechnische Untersuchungen gravitativer Massenbewegungen im Lahnenwiesgraben/Garmisch-Partenkirchen. Diplomarbeit, vorgelegt am Institut für Geologie und Mineralogie, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 107 S.

- BUCK, A. (2001): Aufbau, Optimierung und Anwendung eines forstlichen Geo-Informationssystems im Gebiet der Bayerischen Alpen - Implementierung eines wissensbasierten Systems zur Integration von Fernerkundung und GIS. Dissertation, vorgelegt der Fakultät für Ernährung, Landnutzung und Umwelt; Wissenschaftszentrum Weihenstephan der Technischen Universität München, München
- BULLINGER, H.J. & FÄHRNICH, K.P. (1988): Expertensysteme - wissensbasierte Systeme in der betrieblichen Anwendung. Kontakt & Studium, **236**, 198 S., Expert Verlag
- BUWAL - SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.) (1996): Minimale Pflegemaßnahmen für Wälder mit Schutzfunktion - Wegleitung. Reihe Vollzug Umwelt
- BUWAL - SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.) (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Arbeitspapier, 72 S., Bern
- BUWAL - SCHWEIZER BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (Hrsg.) (1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Methode. Umwelt-Materialien, **107 (I)**, Naturgefahren, Bern
- BVB - BUNDESVERBAND BODEN E.V. (Hrsg.) (2006): Bodenerosion durch Wasser - Bewertungsmethodik und Instrumente der deutschen Bundesländer. BVB-Materialien, **14**, Berichte aus dem Bundesland Bayern, S. 25-39, Erich Schmid Verlag, Berlin
- BUNZA, G. (1978): Vergleichende Messungen von Abfluss und Bodenabtrag auf Almflächen des Stubnerkogels im Gasteiner Tal. Ökologische Analysen von Almflächen im Gasteiner Tal - Veröffentlichung des Österreichischen MaB-Hochgebirgsprogramm Hohe Tauern, **2**, S. 315-334
- BUNZA, G. (1992): Die Erfassung des aktuellen Abtragsgeschens mit Hilfe geomorphologischer Kartierungen zur Beurteilung von potentiellen Gefahrenräumen. Interpraevent, **6**, S. 213-236, Bern
- BUNZA, G.; KARL, J.; MANGELSDORF, J. (1976): Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. Schriftreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde München, **11**, 128 S.
- BUNZA, G. & SCHAUER, T. (1989): Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen. Grundlagen des Wasserbaus - Aktuelle Beiträge. Informationsbericht 2/89 des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, S. 127-150, München
- CARRARA, A.; PUGLIESE CARRATELLI, E.; MERENDA, L. (1977): Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. Z. Geomorph. N. F., **21 (2)**, S. 187-222, Berlin
- CASADEI, M.; DIETRICH, W. E.; MILLER, N. L. (2003): Testing a model for predicting the time and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. Earth Surface Processes and Landforms, **28**, S. 925-950, [http:// www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com), Zugriff: 12.09.2007

CASCINI, L.; BONNARD, C.; COROMINAS, J.; JIBSON, R.; MONTERO-OLARTE, J. (2005): Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. International Conference on Landslide Risk Management. Hungr, S. 199-235, Hrsg.: Fell, Couture & Eberhardt, ISBN 04 1538 043 X

CIPRA - INTERNATIONALE ALPENSCHUTZKONVENTION: [www.cipra.org/de/alpenkonvention/folder.2006-01-24.7623270495/karte/karte-der-alpen/alpengebiet\\_gross.jpg](http://www.cipra.org/de/alpenkonvention/folder.2006-01-24.7623270495/karte/karte-der-alpen/alpengebiet_gross.jpg), Zugriff: 08.06.2009

CLIMCHALP (2008): Assessment of climate changes in the Alpine space - Synthesis Precipitation, working package: module climate change. 10 S., [http://www.risknat.org/projects/climchalp\\_wp5/](http://www.risknat.org/projects/climchalp_wp5/), Zugriff: 22.03.09

COLDEA, G. & POP, A. (2004): Floristic diversity in relation to geomorphological and climatic factors in the subalpine-alpine belt of the Rodan Mountains (Romanian Carpathians). *Pirineos*, **158-159**, S. 61-72

CORNFORTH, D.H. (2005): *Landslides in Practice - Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. Wiley & Sons

COSTA, J.E. (1984): Physical geomorphology of debris flows. In: Costa, J.E., Fleisher, P.J. (Hrsg.) *Development and applications of geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin

CROW, P. (2005): The influence of soils and species on tree root depth. Information note of forestry Commission, Edinburgh, 8 S., ISBN 0-85538-679-7, <http://www.forestry.gov.uk>, Zugriff: 10.5.2008

DAMM, B. (2000): Hangrutschungen im Mittelgebirgsraum - verdrängte Naturgefahren. *Standort - Zeitschrift für Angewandte Geographie*, **4**, S. 27-34

DAMM, B.; TERHORST, B.; KÖTTRITSCH, E.; OTTNER, F.; MAYERHOFER, M. (2008): Zum Einfluss bodenphysikalischer und bodenmechanischer Parameter in quartären Deckschichten auf Massenbewegungen im Wienerwald. *Abh. Geol. B.-A.*, **62**, S. 33-37

DE BEATS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K. (2008): Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and soil*, **305**, S. 207-226.

DEGEN, H. & LORSCHIED, P. (2002): *Statistiklehrbuch - mit Bevölkerungs- und Wirtschaftsstatistik*. 375 S., Oldenbourg Verlag, 2. Auflage, ISBN 3-486-27240-3

DEUTSCH, R.; GUSSMANN, P.; JÄGER, B.; KRAUER, E.; KUNTSCHKE, K.; LIPPOMANN, R.; MOSER, M.; MÜLLER, B.; PRINZ, H.; RYBÁR, J.; SCHUCK, W.; WALLRAUCH, E.; WICHTER, L. (1997): Empfehlungen zum Erkennen und Erfassen von Rutschungen - Arbeitskreis 4.2 der DGGT *Böschungen*. *Geotechnik*, **20 (4)**, S. 248- 259

DIKAU, R. & GLADE, T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau*, **54 (1)**, S. 38-45

DMG - Deutsche Meteorologische Gesellschaft (Hrsg.) (2007): IPCC 2007 - Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert. Mitteilungen DMG 01/2007, 44 S., <http://www.dmg-ev.de>, Zugriff: 19.02.2009

DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, 536 S., Berlin

EGLI, T. (1996): Hochwasserschutz und Raumplanung - Schutz vor Naturgefahren mit Instrumenten der Raumplanung, dargestellt am Beispiel von Hochwasser und Murgängen. ORL-Bericht 100/1996, 166 S., vdf Hochschulverlag der ETH Zürich

EGLI, M.; MIRABELLA, A.; SARTORI, G.; ZANELLI, R.; BISHOF, S. (2006): Effect of North and South exposition on weathering and clay mineral formation in Alpine soils. *Catena*, **67**, S. 155-174

EIDT, M. & LÖHMANNRÖBEN, G. (1996): Zusammenhänge zwischen bodenkundlichen Standortfaktoren und verschiedenen Abtragsformen. *Interpraevent*, **1**, S. 247-261, Garmisch-Partenkirchen

EIGENBERGER, K. (1972): Standsicherheit von Böschungen - Teil 1 & 2. Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Felsmechanik und Grundbau, Hrsg.: Veder, C.

EINSTEIN, H.H. (1988): Special lecture: Landslide risk assessment procedure. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on landslides, **2**, S. 1075-1090

ELFERS, H.; BOMBIEN, H.; FRANK, H.; SPORLEIN, T.; KRENTZ, O.; RAPPILBER, I.; SIMON, A.; SCHWEIZER, R. (2004) : Wege zur 3-D-Geologie, Personenkreis 3D der BIS Steuergruppe, 14 S., Krefeld

ENGESSER, H. (Hrsg.) (1993): Duden *Informatik* - Stichworte *Künstliche Intelligenz* und *Expertensysteme*. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim

FNR - FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2006): Handreichung Biogasgewinnung und Nutzung. Institut für Energetik und Umwelt; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 3. Aufl., Gülzow

ENTENMANN, W. (1998): Hydrogeologische Untersuchungsmethoden von Altlasten. 373 S, Springer Verlag

EPPLER, A. (1981): Eine Hang-Stabilitäts-Klassifikation für das Bayerische Flyschgebiet. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft München, **66**, S. 31-42

EYLES, R.J. (1971): Mass movement in Tangoio Conservation Reserve, Northern Hawkes Bay. *Earth Science Journal*, **5**, S. 79-91

FAB, T. (2004): Hydrogeologie im *Aguima* Einzugsgebiet in Benin/Westafrika. Dissertation, vorgelegt an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 137 S.

FELGENTREFF, C. (2006): Disasters and decision processes. Tagungsband zur ECI Conference on Geohazards, Hrsg.: Nadim et al., 12 S., <http://services.bepress.com/eci/geohazards/33>, Zugriff: 18.02.2008

- FINLAY, P.J.; FELL, R.; MAGUIRE, P.K. (1997): The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Can. Geotech. J.*, **34**, S. 811-824
- FLOSS, R. (1985): Zur Standsicherheit von Böschungen mit Lebendverbau aus der Sicht von Bodenmechanik und Grundbau. *Ingenieurbiologie - Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen*. Hrsg.: Pflug, W., Gesellschaft für Ingenieurbiologie, S. 35-49, Aachen
- FRANKE, E. (1976): Langzeitrutschungen. Drei Beispiele aus der Praxis und kritischer Überblick über die bisherige Entwicklung der Erkenntnisse. *Bautechnik*, S. 97-105
- FREHNER, M.; WASSER, B.; SCHWITTER, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion (Anhang 1). 28 S., Hrsg.: BUWAL & UVEK, [www.umwelt-schweiz.ch](http://www.umwelt-schweiz.ch), Zugriff: 10.11.2008
- FRICKE, W. (2002): Hängen vermehrte Starkniederschläge am Hohenpeißenberg mit veränderten Wetterlagen zusammen? *Klimastatusbericht 2002*, Deutscher Wetterdienst, S. 165-171, Offenbach
- GAU, C. & TIEDEMANN, J. (2005): Analyse und Bewertung des Benutzereinflusses bei der geostatistischen Modellierung. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband, S. 43-48
- GEERKEN, R. (1986): Ingenieurgeologische Untersuchung verschiedener Grundgebirgsserien und ihre Lockerüberlagerung südlich Mühlenbach/Mittelschwarzwald. Diplomarbeit, vorgelegt dem Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, 208 S., Karlsruhe
- GENET, M.; STOKES, A.; SALIN, F.; MICKOVSKI, S.B.; FOURCANA, T.; DUMAIL, J.F.; VAN BEEK, R. (2005): The influence of cellulose on tensile strength in tree roots. *Plant and soil*, **278**, S. 1-9
- GIANNECCHINI, R. (2006): Relationship between rainfall and shallow landslides in the Southern Apuan Alps (Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, **6**, S. 357-364, <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net>, Zugriff: 18.06.2008
- GLADE, T. (2005): Linking debris-flow hazard assessment with geomorphology. *Geomorphology*, **66**, S. 189-213; Amsterdam
- GLADE, T. & CROZIER, M.J. (2005): A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T.; Anderson, M.G.; Crozier, M.J. (Hrsg.): *Landslide hazard and risk*, S. 75-138, Chichester
- GLENDINNING, S.; HUGHES, P.N.; HUGHES, D.A.B.; CLARKE, D.; SMETHURST, J.; POWRIE, W.; DIXON, N.; DIJKSTRA, T.A.; TOLL, D.G.; MENDES, J. (2008): Biological end engineering impacts of climate on slopes - learning from full-scale. *Landslides and Engineered Slopes*. S. 1553-1558, Hrsg.: Chen et al.
- GÖTZ, A. (2004): Von der Gefahr zur Risikokultur. *Ingenieurvermessung 2004*, 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering Surveying, Zürich, Abstract
- GOUDIE, A. (Hrsg.) (1998): *Geomorphologie*. 645 S., Springer Verlag, Berlin

- GRABHERR, G.; GOTTFRIED, M.; PAULI, H. (1994): Climate effects on mountain plants. *Nature*, **369**, S. 448
- GRAF, C.; BÖLL, A.; GRAF, F. (2003): Pflanzen im Einsatz gegen Erosion und oberflächennahe Rutschungen. *Merkblatt für die Praxis*, **37**, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. ISSN 1422-2876
- GRAF, K. & KEUSEN H.R. (2000): Rutschung und Murgang Blatchi-Stigelschwand (Adelboden, BE). *Bulletin angewandte Geologie* **5 (1)**, S. 67-71
- GRANICA, K.; HIRSCHMUGL, M.; PROSKE, H.; WALLNER, H.; WURM, M.; SCHARD, M. (2007): Die Ableitung von Indikatoren aus sehr hochauflösenden Satellitendaten zur Erkennung von Massenbewegungen. *International Conference Managing Alpine Future*, 9 S.
- GRAY, D.H. & SOTIR, R.B. (1996): *Biotechnical and soil engineering slope stabilization - a practical guide for erosion control*. Wiley & Sons, 378 S.
- GREENWAY, D.R. (1987): *Vegetation and Slope Stability*. *Slope Stability*. Hrsg.: Anderson, M.G. & Richards K.S., Wiley & Sons, S. 187-230
- GRIESER, J. & BECK, C. (2002): Extremniederschläge in Deutschland. Zufall oder Zeichen? *Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht 2002*, S. 141-150
- HAEBERLI, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und PizGrialetsch (GR). *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich*, **17**, 221 S.
- HAEBERLI, W.; RICKENMANN, R.; ZIMMERMANN, M.; RÖSLI, U. (1991): Murgänge. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, *Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft*, **4**, S. 77-88
- HAEBERLI, W. (1992): Possible Effects of Climatic Change on the Evolution of alpine Permafrost. *Catena Suppl.*, **22**, S. 23-35
- HAEBERLI, W. (1999): Hangstabilitätsprobleme im Zusammenhang mit Gletscherschwund und Permafrostdegradation im Hochgebirge. *Relief Boden Paläoklima*, **14**, S. 11-30. Gebr. Borntraeger Verlag, Berlin
- HAMBERGER, M. (2000): *Geologisch-geotechnische Untersuchungen und Analyse von Hangbewegungen anlässlich der Starkniederschläge im Melchtal/Schweiz*. Diplomarbeit, vorgelegt der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 122 S.
- HAMBERGER, M. (2007): *Rutschungserkennung mit Klassifizierungssystemen am Beispiel Sachseln/Schweiz*. Dissertation, vorgelegt der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 138 S.
- HAMBERGER, M.; MOSER, M.; NÖTH, E.; LEVIT, M.; DEVENTER, R. (2005): Der Einsatz unterschiedlicher Klassifikationssysteme zur Rutschungserkennung. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband

- HAMILTON, D.L.; MACARTHUR, R.C.; VANONI, V.A. (1994): Reliability and validity of modelling sedimentation and debris flow hazards over initially dry areas. Proc. Conf. modelling of propagation over initially dry areas, Mailand.
- HANISCH, J. & STRUCK, W. (1985): Charakteristischer Wert einer Boden- und Materialeigenschaft aus Stichprobenergebnissen und zusätzlicher Information. Bautechnik, **10**, S. 338-348
- HARRIS, C.; REA, B. & DAVIES, M. (2001a): Scaled physical modelling of mass movement processes on thawing slopes. Permafrost and Periglacial Processes, **12**, S. 125-135
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 304 S., Enke Verlag, Stuttgart
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. 180 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, ISBN 978-3-510-65246-4
- HARTWICH, R.; BEHRENS, J.; ECKELMANN, W.; HAASE, G.; RICHTER, A.; ROESCHMANN, G.; SCHMIDT, R. (1995): Erläuterungen zur Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, M. 1: 1.000.000 (BÜK 1000). 15 S., Hrsg.: BGR, Hannover
- HEIM, A. (1931): Bergsturz und Menschenleben. 220 S., Fretz & Wasmuth Verlag, Zürich
- HENNING, A. (2000): Untersuchungen und Szenarien zum Einfluss der Schrumpfrissbildung auf die Stabilität einer flachen Hangrutschung. Geotechnik **23 (3)**, S. 185-195
- HERDEN, W. & HEIN, H.W. (Hrsg.) (1990): Kurzlexikon Wissenbasierte Systeme. 96 S., Oldenburg Verlag
- HERGER, U. (2005): Der Einfluss der Beweidung auf die Hangstabilität. Diplomarbeit, vorgelegt der philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 86 S., Bern
- HERRMANN, J. (1997): Maschinelles Lernen und Wissensbasierte Systeme. 272 S., Springer Verlag, Berlin
- HIKMET, A. & SIEMES, H. (1988): Praktische Geostatistik - eine Einführung in den Bergbau und die Geowissenschaften. Springer Verlag, Berlin
- HILLER, H. (1985): Zur Ausbildung des Wurzelwerkes von Strauchweiden und ihr Beitrag zur Böschungssicherung. Gesellschaft für Ingenieurbioogie, S. 93-107, Hrsg.: Pflug, W., Aachen
- HIRUMA, N.; NAITO, H.; TOBITA, Y. (1998): A quantitative evaluation of swelling behaviour of soft rocks. Problematic soils, S. 275-278, Hrsg.: Janagisawa et al.
- HOHENSINN, F. (1979): Bodenmechanische Analyse von Geländebrüchen bei Murenbildung in kristallinen Verwitterungsböden. Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur der Universität Innsbruck, **2**, 95 S., Hrsg.: Schober, W.

IIDA, T. (1999): A stochastic hydro-geomorphical model for shallow landslides due to rainstorm. *Catena*, **34**, S. 293-313

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group III, Summary of Policymakers, 24 S.

IRMLER, R. (2003): Seesedimente als natürliches Archiv zur Erstellung eines Murkalenders am Beispiel des Prager Wildsees (Norditalien). Dissertation, vorgelegt der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät der Friedrich Schiller Universität Jena, 96 S.

JUNG, L. & BRECHTEL, R. (1980): Messungen von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag auf verschiedenen Böden der Bundesrepublik Deutschland - Ergebnisse von 1956-1968. 139 S., Hrsg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Paul Parey Verlag, Hamburg, ISBN 3-490-04897-0

JOHANNES, B. (1995): Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen von Almweideflächen im Nationalpark Berchtesgaden. *Forstw. Cbl.*, **114**, S. 293-301

JOHNSON, A. (1967): *Specific Yield - Compilation of specific yields for various materials*. Geol. Survey Water-Supply Paper 1662-D, Washington

KANY, M. & HAMMER, H. (1985): Statistische Untersuchungen von Rutschungen im Nordbayerischen Deckgebirge. Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. S. 257-265, Hrsg.: Heitfeld, K.H., Springer Verlag, Berlin

KARL, J. & DANZ, W. (1969): Der Einfluss des Menschen auf die Erosion im Bergland. Schriftreihe der Münchner Landesstelle für Gewässerkunde, **11**, 98 S., München

KARL, J. & HÖLTL, W. (1974): Analyse alpiner Landschaften in einem homogenen Rasterfeld. *Schriftenr. Bayer. Landesst. f. Gewässerkde.*, **10**, 32 S., München

KATZENBACH, R. & WERNER, A. (2007): Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch Bewuchs. 1. Departmentkongress Bautechnik und Naturgefahren. S. 6-9, Ernst und Sohn Verlag, Berlin

KEILER, M. & FUCHS, S. (2007): Das Risikokzept in der Naturgefahrenforschung. 1. Departmentkongress - Bautechnik und Naturgefahren. Department für Bautechnik und Naturgefahren. S. 50-54, Ernst und Sohn Verlag, Berlin

KELCH, G.; DREXLER, O.; ZECH, W. (1977): Über den Bodenabtrag im Kampenwandgebiet - Versuch einer quantitativen Erfassung der Zusammenhänge zwischen Bodenabtrag und den Faktoren Höhenlage, Exposition, Hangneigung, Muttergestein und Bodennutzung. *Z. Geomorph. N. F.*, **28**, S. 134-147

KELLER, D.; HECKMANN, T.; MOSER, M. (2005): Felduntersuchungen und GIS-Analysen zu flachgründigen alpinen Schuttströmen bei Garmisch-Partenkirchen. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband, S. 189-199

- KÉZDI, A. (1969): Handbuch der Bodenmechanik, Band I Bodenphysik. VEB Verlag für Bauwesen, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest
- KHAKZADEH, L. (2007): Rechtliche Aspekte des Naturgefahrenmanagements. 1. Departmentkongress - Bautechnik und Naturgefahren. Department für Bautechnik und Naturgefahren. S. 55-58, Ernst und Sohn Verlag, Berlin
- KIENHOLZ, H. (1977): Kombinierte Geomorphologische Gefahrenkarte 1:10.000 von Grindelwald. *Catena*, **3**, S. 265-294, Giessen
- KIENHOLZ, H. (1995): Gefahrenbeurteilung und -bewertung auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, **146**, S. 701-725
- KLIWA (2005): Der Klimawandel in Bayern für den Zeitraum 2021-2050 - Kurzbericht. Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, <http://www.kliwa.de>, Zugriff: 3.10.2008
- 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). Dissertation, vorgelegt der Philosophischen Fakultät III der Universität Regensburg
- KOEPF, H. (1960): Zur Strukturbildung verschiedener Böden durch Schrumpfung. *Z. Pflanzener., Düngung, Bodenkunde*, **89**, S. 159-170
- KOLDES, G. & POP, A. (2004): Floristic diversity in relation to geomorphological and climatic factors in the subalpine - alpine belt of the Rodna Mountains (Romania). *Pirineos*, **158-159**, S. 61-72, Jaca
- KOLLMANN, W. (1986): Die Bestimmung des durchflusswirksamen Porenvolumens von Sedimenten und seine Bedeutung für den Grundwasserschutz. *Mitt. österr. geol. Ges.*, **79**, S. 63-76, Wien
- KRABBE, W. (1958): Über die Schrumpfung bindiger Böden. Dissertation, vorgelegt der Fakultät für Bauwesen der Technischen Universität Hannover, Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover, **13**, 342 S.
- KRAUER, B. (2004): Analyse rutschrelevanter Standortparameter in ausgewählten Einzugsgebieten der Surselva. Diplomarbeit, vorgelegt dem Departement Umweltwissenschaften der ETH Zürich, 116 S.
- KRUSE, B. & TIEDEMANN, J. (2003): Die Festlegung charakteristischer Werte von Bodenkenngrößen - Empirie oder Statistik? 14. Tagung für Ingenieurgeologie, Kiel, Tagungsband, S. 247-252
- KUDERNATSCH, T. (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Pflanzengemeinschaften im Nationalpark Berchtesgaden. Forschungsbericht 52/2006 Nationalpark Berchtesgaden, Hrsg.: Nationalparkverwaltung Berchtesgaden
- KRUMMENACHER, B. & TOBLER, D. (2009): Anwendung des Risikokonzeptes: Prozess Spontane Rutschung/Hangmuren - Teil B. Risikokonzept für Naturgefahren, 30 S., Hrsg.: PLANAT - Nationale Plattform Naturgefahren

- LAATSCH W. & GROTTENTHALER, W. (1972): Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation. Forstwirtschaftliches Centralblatt, **91**, S. 309-339
- LAMANDÉ, M. & SCHJØNNING, P. (2008): The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil-tyre interface. Journal of Terramechanics, **45 (4)**, S. 109-120
- LANG, H.-J.; HUDER, J.; AMANN, P. (2003): Bodenmechanik und Grundbau - Das Verhalten von Boden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 317 S., 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- LANGGUTH, H.R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. 1005 S., Springer Verlag
- LATELTIN, O. (1997): Empfehlungen - Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Hrsg.: Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- LATELTIN, O.; BEER, C.; RAETZO, H.; CARON, C. (1997): Landslides in Flysch terranes of Switzerland-causal factors and climate change. Ecologiae geol. Helv., **99**, S. 401-406
- LEONG, E.C. & RAHARDJO, H. (1998): A review on soil classification systems. Problematic Soils, Hrsg.: Yanagisawa et al, Rotterdam, ISBN 9054109971
- LIENER, S. & KIENHOLZ, H. (2000): Modellierung von flachgründigen Rutschungen mit dem Modell Sli-disp. Interpraevent, **1**, S. 259-269, Villach
- LINIGER, M. (2006): Die Herausforderung der Gefahrenprognose bei Massenbewegungen: Rutsch- und Sturzprozesse. Bull. angew. Geol., **11 (2)**, S. 75-88
- LÖHMANNSRÖBEN, G. (1999): Die Analyse von Abflussprozessen und ihr Zusammenhang mit beschleunigten Abtragsprozessen im Gebirge. Relief Boden Paläoklima **14**, S. 129-148, Gebr. Borntraeger Verlag, Berlin
- LÖHMANNSRÖBEN, G. & SCHAUER, T. (1996): Ableitung hydrologischer Eigenschaften zur Beurteilung des Abfluss- und Abtragsgeschehens aus boden- und vegetationskundlichen Kriterien. Interpraevent, **1**, S. 99-112, Garmisch-Partenkirchen
- LUBW - LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ BADEN WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (2005): Flussdeiche - Überwachung und Verteidigung. Leitfaden, **98**, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>, Zugriff: 4.11.2008
- LUMB, P. (1974): Application of statistics in soil mechanics. Soil Mechanics - New Horizons, Hrsg.: Lee, I.K., Newnes Butterworths, London
- MARUI, H. (1984): Die Mechanik oberflächennaher Bewegungen. Interpraevent, **3**, S. 141-156, Villach
- MAYER, K.; BAUMANN, J.; GALLEMANN, T. (2005): Ingenieurgeologische-geotechnische Untersuchungen zur Kinematik der Großrutschung Brechries südlich von Bad Feilenbach (Oberbayern). 15. Tagung der Ingenieurgeologie Erlangen

- MEIER, G. (2005): Risiko- und Gefahrenanalyse an Altbergbauanlagen unter Verwendung geotechnischer Untersuchungsverfahren. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband, S. 361-366
- MEIER, J. & SCHANZ, T. (2005): Parameteridentifikation für numerische Modellierungen am Beispiel von Trennflächen im Fels. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband
- MEIER, J.; SPICKERMANN, A.; RÜTZ, D.; MOSER, M.; SCHANZ, T. (2005): Geotechnisch-numerische Modellierung der Massenbewegung am *Faulen Schrofen* bei Reutte/Tirol. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband
- MEISINA, C. & SCARABELLI, S. (2007): A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*, **87**, S. 207-223, Amsterdam
- MEYER, F. & BOLEY, C. (2009): Development of Decision-Support-Systems for local scaled hazard quantifications of potential mudslide-areas. EUREGEO 2009, Tagungsband S. 375-378, München
- MEYER, F. & BOLEY, C. (2009): Entwicklung eines Decision-Support-Systems zur Generierung einer zuverlässigen, lokalmaßstäblichen Gefahrenbeurteilung potentieller Hangmurbereiche. 17. Tagung Ingenieurgeologie, Tagungsband S. 419-422, Zittau
- MITCHEL, J.K. & SOGA, K. (2005): Fundamentals of soil behaviour. Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> edition, USA
- MOISMANN, T. (1981): Geoökologische Standortindikatoren für die Erosionsanfälligkeit alpiner Hänge nach Geländeingriffen für Pistenlagen. *Geomethodica*, **6**, S. 143-174, Basel
- MOSER, M. (1973): Der Einfluss des Wirtschafts- und Güterwegebaus auf die Geschiebeherdentstehung (Bereich des mittleren Lesachtales/Kärnten). *Austrian Journal of Forest Science*, **90 (2)**, S. 102-116
- MOSER, M. (1980): Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. *Interpraevent*, **1**, S. 121-148, Bad Ischl
- MOSER, M. (1997): Zur Prognose von Massenbewegungen. *Ecologiae geol. Helv.*, **90**, S. 381-391
- MOSER, M. & HOHENSINN, F. (1982/83): Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, **19**, S. 185-211
- MOSER, M. & ÜBLAGGER, G. (1984): Vorschläge zur Erstellung von geotechnischen Karten und Erhebungen im Rahmen von Gefahrenzonenplänen im Hangbereich. *Interpraevent*, **2**, S. 275-287, Villach
- MÖßMER, R. (2001): Vorbeugender Hochwasserschutz im Wald - Umsetzung im praktischen Forstbetrieb. *LWF-Bericht*, **40**, S. 55-66
- NEULAND, H. (1976): A prediction model of landslips. *Catena*, **3**, S. 215-230

- NIEDERSCHICK, M.A. (2007): Erkennen und Beurteilen von Hangbewegungen. Diplomarbeit, vorgelegt am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien, 166 S., Wien
- NIX, T. (2005): Versagenswahrscheinlichkeit von Böschungen: Anwendbarkeit und Beschränkungen eines probabilistischen und eines extremwertstatistischen Ansatzes. 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Tagungsband, S. 201-207
- NORRIS, J. & GREENWOOD, J.R. (2006): Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. IAEG 2006 Paper number 744, The Geological Society of London, London
- O'LOUGHLIN, C.L. & PEARCE, A.J. (1976): Influence of Cenozoic Geology on mass movement and sediment yield response to forest removal, North Westland, New Zealand. Bulletin of the Intern. Ass. of Engineering Geology, **14**, S. 41-46
- OKIMURA, T. (1989): Prediction of slope failure using the estimated depth of the potential failure layer. Journal of Natural Disaster Science, **11 (1)**, S. 67-79
- OTT, E. (1996): Leitbilder zur Schutzwirkung des Waldes vor Lawinenbildung. Forstw. Cbl., **115**, S. 223-230.
- PAROTIDIS, M. (2001): Geomechanische Modellierungen von Massenbewegungen. Dissertation, vorgelegt an der Fakultät für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien, Wien
- PARESCI, M.T.; FAVALLI, M.; GIANNINI, F. (2002): May 5, 1998, debris flows in circum-Vesuvian areas (Southern Italy) - insights for hazard assessment. Geology, **28**, S. 639-642
- PEINTINGER, B. (1983): Auswirkung der räumlichen Streuung von Bodenkennwerten. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, S. 31-44, Hrsg.: Floss, R., München
- PEINTINGER, B. & REITMEIER, W. (1983): Die Wirkung der statistischen Unsicherheiten in den Parametern eines stochastischen Feldes zur Modellierung von Bodeneigenschaften auf die Böschungsstabilität. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, S. 75-86, Hrsg.: Floss, R., München
- PENG, X. & HORN, R. (2005): Modelling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. Soil Science Society America Journal, **69**, S. 584-592
- PFEFFER, S. (2007): Expertensystem in der Medizin. JurPC Web-Dok. 91/2002, Abs. 1-23
- PLAN, O.; MÄS, S.; REINHARDT, W.; KANDAWASVIKA, A.; WANG, F. (2004): Konzepte für die mobile Erfassung von Geodaten. Münsteraner GI-Tage - Tagungsband, IFGI prints
- PLANALP - PLATTFORM NATURGEFAHREN DER ALPENKONVENTION (Hrsg.) (2006): Dokumentation von Naturereignissen - Feldanleitung. 64 S., Innsbruck/Bern

- POISL, R. (2005): Geomechanics of hazardous landslides. *Journal of Mountain Science*, **2 (3)**, S. 211-217
- POLLEN, N. (2007): Temporal and spatial variability on root reinforcement of steep banks - accounting for shear strength and moisture. *Catena*, **69**, S. 197-205
- POLONI, G.; CERIANI, M.; CROSTA, G.; LAUZI, S.; PADOVAN, N. (1991): Rainfall and soil slipping events in Valtellina. *Landslides*, S. 183-188, ISBN 90 5410 032 X
- POSCHINGER, A. V. (1992): Georisk - Erfassung und Untersuchung von Massenbewegungen im Bayerischen Alpenraum. GLA Fachberichte, **8**, 33 S.; Hrsg.: Bayerisches Geologisches Landesamt, München
- POSCHINGER, A. V. (1998): Zur Vorhersage von Hangbewegungen. Festschrift Prof. Georg Spaun zum 60. Geburtstag, *Münchner Geologische Hefte, Reihe B*, **B7**, S. 23-30, München
- PRINZ, H. & STRAUß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. 674 S., 4. Aufl. Akademischer Verlag
- RACKWITZ, R. (1983): Können Vorinformationen über den Baugrund quantifiziert werden? Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, S. 45-60, Hrsg.: Floss, R., München
- RAETZO-BRÄLHART, H. (1997): Massenbewegungen im Grunigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Arbeitsbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag der ETH Zürich
- RAIBLE, C.; CASTY C.; LUTERBACH, J. (2005): Climate variability - observations, reconstructions, and model simulations for the Atlantic-European and Alpine region from 1500-2100 AD. *Climate Change*, Springer Verlag, Berlin, [http://www.climate.unibe.ch/~casty/Raible\\_etal\\_CCo6.pdf](http://www.climate.unibe.ch/~casty/Raible_etal_CCo6.pdf), Zugriff: 06.07.2009
- REITMEIER, W.; KRUSE, W.; RACKWITZ, R. (1983): Quantifizierung von Vorinformationen zur besseren Klassifizierung und Ableitung von klassenspezifischen Bemessungswerten für Bodenkenngrößen. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, S. 61-74, Hrsg.: Floss, R., München
- RENTSCHLER, K. (1992): Geologische und geotechnische Untersuchungen zum Gefahrenpotential des Stubnerkogel-Osthanges, Bad Gastein/Salzburg. Diplomarbeit, vorgelegt am Institut für Geologie und Mineralogie, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 148 S.
- RICKENMANN, D. (1999): Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, **19**, S. 47-77
- RICKLI, C. (2001): Vegetationswirkungen und Rutschungen - Untersuchungen zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. 81 S., Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, CH & Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Birmensdorf (CH)

RICKLI, C. & BUCHER, H. (2003): Oberflächennahe Rutschungen ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell, 96 S., Hrsg.: BWG & WSL - Bundesamt für Wasser und Geologie; Eidgenössische Forschungsanstalt

RICKLI, C.; ZIMMERLI, P.; BÖLL, A. (o. J.): Effects of vegetation on shallow landslides - an analysis of the Events of August 1997 in Sachseln. S. 575-584

RICKLI, C.; ZIMMERLI, P.; ZÜRCHER, K. (2000): Waldwirkungen auf oberflächennahen Rutschungen anlässlich der Unwetterereignisse vom August 1997 in Sachseln, Schweiz. *Interpraevent*, **1**, S. 305-316, Villach

RICKLI, C.; KAMM, S.; BUCHER, H. (2008): Flachgründige Rutschungen - Teilprojekt der Ergebnisanalyse Unwetter 2005. 95 S., Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) & Bundesamt für Umwelt BAFU

RICKLI, C. & GRAF, F. (2009): Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland. *For. Snow. Landsc. Res.*, **82**, S. 33-44

RIEGER, D. (1999): Bewertung der naturräumlichen Rahmenbedingungen für die Entstehung von Hangmuren - Möglichkeiten zur Modellierung des Murpotentials. *Münchner Geographische Abhandlungen, Reihe A*, **51**, Hrsg.: Institut für Geographie der Universität München, Fakultät Geowissenschaften

RINER, R. (2009): Geotechnische Analysen von Lockergesteinen zur Modellierung von Rutschdispositionen im Untersuchungsgebiet Niesen. Masterarbeit, vorgelegt an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, 105 S.

RUBD & ILFD - RAUMPLANUNG-, UMWELT- UND BAUDIREKTION; DIREKTION DER INSTITUTIONEN UND DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (2007): Karte der Boden- und Hanginstabilitäten - Erläuternder Bericht zum Kanton Freiburg, CH, Direktion der Institutionen und der Land- und Forstwirtschaft, Hrsg.: Amt für Wald, Wild und Fischerei

RUDOLF-MIKLAU, F. (2006): Aktive und passive Schutzmaßnahmen - Grenzen von Sicherheit, Schutz und Risiko. 3. alpS-Symposium 2006, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Abstractband, S. 92, Innsbruck

SALCIARINI, D.; GODT, J.W.; SAVAGE, W.Z.; CONVERSINI, R.; BAUM, R.L.; MICHAEL, J.A. (2006): Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the Eastern Umbria Region of Central Italy. *Landslides*, **3**, S. 181-194

SASSA, K. (1984): The mechanism to initiate debris flows as undrained shear of loose sediments. *Interpraevent*, **2**, S. 73-87, Villach

SCHÄDLER, W. (2004): Ingenieurgeologische und geomorphologische Kartierung im Bereich des Herrentischgrabens im Rahmen des SEDAG-Projektes, Landkreis GAP, Oberbayern. Diplomarbeit, vorge-

legt am Institut für Geologie und Mineralogie, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 141 S.

SCHAUER, T. (1992): Der Beitrag der Vegetationskartierung für die Abschätzung und Prognose des Abflusses, des Abtrags und der Belastung bei spezifischen Nutzungen in alpinen Wildbacheinzugsgebieten. *Interpraevent*, **6**, S. 251-272, Bern

SCHAUER, T. (1998): Steuerung verschiedener Abtragsprozesse durch die Standortfaktoren - Vegetation, Boden, Nutzung. Das Wildbachsystem, Prozesse - Bewertung - Maßnahmen. *Informationsberichte*, **2**, Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

SCHAUER, T. (1999): Beispiele von Erosionsprozessen im Zusammenhang mit den Standortfaktoren Nutzung und Vegetation im Bayerischen Alpenraum. *Relief Boden Paläoklima* **14**, S. 117-128, Gebr. Borntraeger Verlag, Berlin

SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 593 S., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 15. Aufl.

SCHEFFER, F.; KUNTZE, H.; NEUHAUS, H. (1964): Quellen und Schrumpfen - Faktoren der Bodenstruktur und ihre Beeinflussung bei Marschböden. *Z. Pflanzener., Düngung, Bodenkunde*, **103**, S. 210-219

SCHIECHTL, H.M. (1985): Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. *Ingenieurbiologie - Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen*. S. 50-62, Hrsg.: Pflug, W., Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Aachen

SCHILCHER, M. (Hrsg.) (2006): *GIS-Glossar, Version 1.5 - Eintragungen Data-Mining, Datenbank, Expertensystem, Fachdaten, GIS, Gitter, Grid, Griding, Künstliche Intelligenz, Redundanz, Semantische Fehler, Syntaktische Fehler, Vollständigkeit*. Fachgebiet Geoinformationssysteme TUM, <http://www.gis.bv.tum.de>, Zugriff: 12.06.2007

SCHMID, K. (2008): *Geologische Kartierung und Untersuchung zu flachgründigen Hangbewegungen im Gebiet von Vorderhindelang, Allgäu*. Diplomarbeit, vorgelegt der Fakultät für Bauingenieurwesen und Vermessungswesen der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, München

SCHOGER, H. (1988): *Analyse von Hangbewegungen anlässlich von Starkniederschlägen am Beispiel des Voldertales/Tirol*. Dissertation, vorgelegt der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 236 S.

SCHOLZ, M. (2005): *Naturverjüngung und Bodenschlusstheorie*. Diplomarbeit vorgelegt der UniBW München, Institut für Umwelttechnik und Chemie, 198 S.

SCHULZ, B.M.; GRIMMER, S.; LEMPP, C.; SCHULZ, M. (2008): Numerische Studien zum Sackungsverhalten von Lockergesteinen unter dem Einfluss eindringenden Grundwassers. *Geotechnik*, **3 (4)**, S. 288-300

- SCHULTZE, E. & MUHS, H. (1992): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. 722 S., 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin
- SEGALINI, A. & GIANI, G. P. (2004): Numerical model for the analysis of the evolution mechanism of the Grossgrufer Rock Slide. Aus: Rock Mechanics and Rock Engineering, **37 (2)**, S. 151-168
- SEID, A.H. (1998): Modelling the influence of shrinkage cracks on overland flow. Dissertation, vorgelegt dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, 169 S.
- SHADUNTS, K.SH. (1998): Analysis of interconnected indices of swelling and shrinkage of clay soils. Aus: Balkema, S. 341-344, ISBN 90 5410 997 1
- SIDLE, R.C. & TERRY, P.K.K. (1992): Shallow landslides analysis in terrain with managed vegetation - erosion debris flows and environment in mountain regions. Proceedings of the Cengdu Symposium, IAHS Publ. **209**
- SILVAPROTECT (2008): Schlussdokumentation. Projektbericht, 210 S., Hrsg.: Giamboni M., Abteilung Gefahrenprävention, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern
- SKEMPTON, A.W. (1953): Spoil mechanics in relation to geology. Proceedings Yorkshire Geol. Soc., **29**, S. 20-45, London
- SOOS, P. v. (1983): Zur Ermittlung der Bodenkennwerte mit Berücksichtigung von Streuung und Korrelation. Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik, **2**, S. 9-30, Hrsg.: Floss, R., München
- SPRINGMANN, S.M.; JOMMI, C.; TEYSSEIRE, P. (2003): Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction - a case history. Géotechnique, **53**, S. 3-10
- STANGE, K. (1971): Angewandte Stochastik (2. Teil) - mehrdimensionale Probleme, Springer Verlag
- STINY, J. (1910): Die Muren - Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. 139 S., Verlag der Wagner'schen Universitäts-Buchhandlung, Innsbruck
- STINY, J. (1934): Geologie und Bauen im Hochgebirge. Geologie und Bauwesen, **6**, S. 24-65
- STREMPER, K. VON; ZENKE, B; BELITZ, K.; FRISCH U.; MAUKISCH, M.; STÖTTER, J.; WILHELM, F. (1996): GIS-Analyse des Zusammenhangs zwischen Waldlawinen und Topographie. Int. Symposium Interpraevent, **2**, S. 113-124, Garmisch-Partenkirchen
- STURGES, H. (1926): The choice of a class-interval. J. Amer. Statist. Assoc., **21**, 65-66
- SZYMCZAK, P.; WASSILIEW, M.; BEHNKE, A. (2009): Bedienungshinweise zum Programm für die Auswertung von Korngrößenanalysen im Fachinformationssystem Hydrogeologie - Programm UK32, Version 1.1. 46 S., Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flows and their hazardous zones. Journal of natural disaster science, **3**, S. 57-89

- TEFERRA, A. (1975): Beziehung zwischen Reibungswinkel, Lagerungsdichte und Sondierwiderständen nichtbindiger Böden mit verschiedenen Kornverteilungen. Forschungsberichte aus Bodenmechanik und Grundbau (FBG), Technische Hochschule Aachen.
- TERZAGHI, K.; REDLICH, K.A.; KAMPE, R. (1929): Ingenieurgeologie. Verlag von Julius Springer, 708 S., Berlin
- TERZAGHI, K. (1950): Mechanism of landslides. Geol. Soc. Am. Berkeley, S. 83-123
- THALI, U. & BOLLINGER, D. (2000): Hangmuren Golzern im Maderanertal (Silenen, UR). Bull. Angew. Geol., **5 (1)**, S. 127-130
- THIELEN, A. (2006): Bodensättigung und Stabilität von potentiellen Rutschhängen. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, **153**, S. 25-31, Luzern
- THORMANN, J.J. & SCHWITTER, R. (2004): Nachhaltigkeit im Schutzwald (NaiS) - Nachhaltige Schutzwaldpflege und waldbauliche Erfolgskontrolle. Interpraevent, S. 331-341, Riva
- TIEDEMANN, J. & GRUNOW, R. (2000): Geostatistische Schätzmodelle des Baugrundes als objektivierte Planungsgrundlagen. Geotechnik, **23 (4)**, S. 289- 294
- TOBLER, D.; KRUMMENACHER, B.; ROHR, W. (2006): GIS-basierte Modellierung von Rutschungen und Hangmuren. Teilprojekt Kanton Graubünden im Rahmen des Interreg IIB Projektes Catch Risk. 46 S., Hrsg.: Kanton Graubünden - Amt für Raumentwicklung, Amt für Natur und Umwelt, Amt für Wald. Davos
- TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Mitteilungsheft der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Hochschule Zürich, **164**, S. 1-36, Hrsg.: Minor, H.E.
- TRAUNER, F.-X.; MEYER, F.; BOLEY, C.; ORTLIEB, E. (2007): Neue innovative Methoden zur Frühwarnung auf Basis von gekoppelten Informations- und Simulationssystemen am Beispiel gravitativer Massenbewegungen. 6. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, Tagungshandbuch, S. 433-439
- TURNER, A.K. & SCHUSTER, R.L. (Hrsg.) (1996): Landslides - Investigation and Mitigation, Special Report (247). National Academy Press, Washington, USA
- USGS (2004): Landslide types and processes. Fact sheet 2004-3072, 4 S., U.S. Department of the Interior & U.S. Geological Survey (Hrsg.), <http://pbs.usgs.gov/fs2004/3072/>, Zugriff: 13.09.2007
- VARNES, D. (1978): Slope movement, types and processes. National Academy of Sciences. Special Report **176**, S. 11-33, Washington
- VSS (Hrsg.) (1966): Grundlagen zur Berechnung und Konstruktion - Bemessungstabellen. Band 1, 692 S., Bauverlag GmbH, Wiesbaden

- WAGNER, P. (1992): Methodische Grundlagen und praktische Entwicklung eines Expertensystems für die Wirtschaftlichkeitsanalyse landwirtschaftlicher Betriebe - Kapitel 2: Expertensysteme. 55 S, Habilitation, vorgelegt an der Technischen Universität München, <http://www.wzw.tum.de/ui/veroeff/hab2.htm>, Zugriff: 31.01.2009
- WERLEN, S. (2004): Einflussfaktoren von Lockergesteinsrutschungen - Zusammenfassung. Diplomarbeit, vorgelegt am Geographischen Institut, Bereich Angewandte Geomorphologie und Naturrisiken, Universität Bern, Bern
- WERNER, D. (2001): Die Analyse der Hangbewegungen im Melchtal/Schweiz, anlässlich der Niederschlagskatastrophe vom 15. August 1997. Diplomarbeit, vorgelegt am Institut für Geologie und Mineralogie, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 71 S.
- WICHMANN, V. (2006): Entwicklung von prozessorientierten Modellen zur flächenhaften Abgrenzung und Klassifizierung der Wirkungsräume von Sturzprozessen und Muren mit einem GIS - Dargestellt am Einzugsgebiet des Lahnenwiesgrabens/Ammergebirge. Dissertation, vorgelegt der Universität Eichstätt-Ingolstadt, Mathematisch-Geographische Fakultät
- WILKINSON, P.L.; ANDERSON, M.G.; LLOYD, D.M. (2002): An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, S. 1285-1297
- WITT, J. (Hrsg.) (2008): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 814 S., 7. Aufl., Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- WSL - EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT (Hrsg.) (2006): Information zu: *Murgang* (Mure, Rufe), Birmensdorf
- WYL, B., v. (1987): Beitrag naturnaher Nutzungsformen zur Stabilisierung von Ökosystemen im Berggebiet, insbesondere zur Verhinderung von Bodenerosion. *Schweizerische landwirtschaftliche Forschung*, **26 (4)**, S. 405-464
- ZABEL, F. & HEMPEL, T. (2000): Expertensysteme. Seminar zur Didaktik, 15 S., Institut für Mathematik und Informatik, Ernst-Moritz-Arndt Universität, Greifswald
- ZACHAR, D. (1982): Soil Erosion. *Development in Soil Science* 10, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, ISBN 0-444-99725-3
- ZANGERL, C.; PRAGER, C.; BRANDNER, R.; BRÜCKL, E.; EDER, S.; FELLIN, W.; TENSCHERT, E.; POSCHER, G.; SCHÖNLAUB, H. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo. Alp.*, **5**, S. 1-51
- ZIEGLER, M. (2008): Sicherheitsnachweise in der Geotechnik nach der neuen DIN 1054. *Der Prüflingenieur*, S. 25-41

ZHANG, H.Q. & HORN, R. (1996): Einfluss der Beweidung auf die physikalischen Eigenschaften einer Salzmarsch im Deichvorland - Die gesättigte Wasserleitfähigkeit und das Bodengefüge. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, **37 (1)**, München

ZIMMERMANN, M. (1990): Debris flows 1987 in Switzerland. Hydrology in Mountainous Regions, II- Artificial Reservoirs; Water and Slopes, IAHS-Publ. No. 194, Hrsg.: Sinniger, R.O.; Monbaron, M., S. 387-393

ZIMMERMANN, M.; MANI, P.; GAMMA, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz.- vdf Hochschulverlag der ETH Zürich

ZINK, A.D. (2009): Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge und physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. Dissertation, vorgelegt der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät

#### **NORMEN**

DIN 1054	Baugrund - Sicherheitsnachweis im Erd- und Grundbau, 01/2005
DIN 1055, T2	Einwirkung auf Tragwerke, Teil 2: Bodenkenngrößen, 01/2007
EC 7:	Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1, 1997
DIN 18122-1	Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, 07/1997
DIN 18123	Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung, 11/1996
DIN 18128	Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes, 12/2002
DIN 18130, T1	Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche, 11/1989
DIN 18196:	Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, 06/2006
DIN 4020:	Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke - Anwendungshilfen, Erklärungen, 09/2003
DIN 4022	Baugrund und Grundwasser - Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, 09/1982

- DIN 4084-100: Baugrund - Böschungs- und Geländebruchberechnungen, Teil 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, 11/2002
- DIN 55302, T1 & T2 Statistische Auswertungsverfahren; Häufigkeitsverteilungen, Mittelwert und Streuung, Grundbegriffe und allgemeine Rechenverfahren, 02/1991
- SN 670 010-b: Bodenkennziffern, 12/1998
- SN 670 004-2a: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 2: Grundlagen von Bodenklassifizierung, 12/2005  
(*EN ISO 14688-2*)
- SN 670 004-2b-NA: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 2: Grundlagen von Bodenklassifizierung, Nationaler Anhang: Bodenklassifizierung nach USCS, 02/2006  
(*EN ISO 14688-2*)

## **8 Anlagen**

Anlage I: Übersicht über in der Wissensbasis des DSSs berücksichtigte Aufnahmegebiete historischer Hangbewegungsereignisse

Anlage II: Zusammenfassung von Einzelereignissen historischer Hangbewegungen - Grundlage für Datenpool 1 der Wissensbasis des DSSs

Anlage III: Zusammenfassung von gemittelten Relieffaktoren historischer Hangbewegungen - Grundlage für Datenpool 3 der Wissensbasis des DSSs

Anlage IV: Auswertungsformular des DSSs

## **Anlage I**

Übersicht über in der Wissensbasis des DSSs  
berücksichtigte Aufnahmegebiete historischer  
Hangbewegungsereignisse



# Anlage I: Übersicht über in der Wissensbasis des DSSs berücksichtigte historische Hangbewegungsereignisse

Autor	Untersuchungsgebiet	Art und Anzahl d. Ereignisse	Triggerereignis	Festgesteinseinheit	Beschreibung der Locker- und Festgesteine im Untersuchungsgebiet	Bewegungsform (gemäß Autor)
BEINSTEINER & MAYER (1971)	Osttirol (A)	6	Niederschläge Sommer 1965/66 178 bis 258 mm in 2-3 Tagen	Kristallin	Verwitterungsschutt aus Phylliten und Gneisen, Wechsellagerung von Silikatrohböden und feinerdreichem Hang- & Moränenschutt	Waldabbruch
BÜCH (2003)	Lahnenwiesgraben (Bay)	42	k. A.	Kalkalpin	Trias bis Kreide, quartäre Bildungen	gravitative LG-Hangbewegungen, Schuttströme
CARRARA ET AL. (1977)	Crati Basin (I)	∅	k. A.	k. A.	Mesoz.-tertiäre Karbonate, paläoz.-mesoz. metam. & magm. Gesteine (Gneise, Granite, Quarzphyllite) tertiär-quart. Sedimente (Sande, Tone, Konglomerate, alluviale Ablagerungen) Einteilung in 4 Einheiten	Hanginstabilitäten
EPPLE (1981)	Flyschgebiet (Bay)	∅	1977/1978	Flysch	Sandsteine, Mergel, Zementmergel und daraus hervorgehende Verwitterungsböden	Versatzdenudation
EYLES (1971)	Wellington City (Neuseeland)	∅	Niederschläge 1974 109 mm/72 h	k. A.	Grauwacken, Solifluktuionsmaterial	landslides
GRANICA ET AL. (2007)	Stanzertal/Paznauntal (A)	∅	Hochwasser August 2005	k. A.	k. A.	landslides
HAMBERGER (2000)	Melchtal (CH)	50	Niederschlag 15.08.1997 (150 mm/2 h)	Helvetikum	Kalk/Mergel- Wechselfolgen (Malm), Moränen-, Hang- & Verwitterungsschutt, Sackungsmassen, fluviatile Sedimente, Schwemmkegel, Murenmaterial, Blockschutt, Schuttstromablagerungen	flachgründige Hangbewegungen in Lockergestein
HAMBERGER (2007)	Sachseln (CH)	∅	Niederschlag 15.08.1997 (150 mm/2 h)	Helvetikum Flysch	Kalke, Mergelkalke sowie Wechsellagen (Malm), Moränenmaterial, geringmächtiger Verwitterungsschutthorizont, Hangschutt	flachgründige Rutschungen
HOHENSINN (1979)	Oberkärnten (A)	15	1975	Kristallin	Kristalliner Schiefer, fluvioglaziale Sedimente, Hang- und Verwitterungsschutt (schwankende Mächtigkeit)	Muren
KELCH ET AL. (1977)	Kampenwand (Bay)	∅	1961 - 1973	Kalkalpin	Schichtglieder der alpinen Trias bis zum Neokom. Kieselkalke, Kalke, Dolomite und Mergel, stellenweise quartäre Akkumulationen	Blaiken
KRAUER (2004)	Surselva, Graubünden (CH)	∅	Starkregen 14. - 16.11.2002 5-10 mm/h bzw. 243 mm/48 h	Kristallin	Hornblendegranit des Aaremassivs (Altkarbon), unterer Rand Tavetscher Zwischenmassiv aus Konglomeraten und Breccien (Perm), Glazialschutt, stellenweise Bergsturzmaterial	Rutschungen
MOSER 1 (1980)	N66, Oberkärnten (A)	∅	1966	Kristallin	Kristalline Schiefer, lehmig-sandige Verwitterungs- und Hangschuttdecken (Mächtigkeit max. 1-2 m)	Hangbewegungen
MOSER 2 (1980)	S75, Osttirol (A)	∅	Frühjahr 1975	Kristallin	Kristalline Schiefer, lehmig-sandige Verwitterungs- und Hangschuttdecken (Mächtigkeit max. 2-5 m)	Hangbewegungen
MOSER 3 (1980)	E66, Oberkärnten (A)	∅	1966	Kristallin	Kristalline Schiefer, lehmig-sandige Verwitterungs- und Hangschuttdecken (Mächtigkeit max. 1-2 m)	Hangbewegungen
O'LOUGHLIN & PEARCE (1976)	Notown Conservation Area (Neuseeland)	∅	k. A.	k. A.	Mio.- Pliozäne Sandsteine & Siltsteine mit geringmächtigen kieseligen Lagen, frühpleistoz. Konglomerate mit kieseligen Lagen & geringmächtigen schiefrigen Lagen, spätpleistozäne Tille und Schotter	landslides
POLLONI ET AL. (1991)	Valtellina (I)	∅	Mai 1983 & Juli 1987	Kristallin	Metamorphe Gesteine: Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite. Glaziale- und postglaziale Bildungen	soil slips, debris flows, debris avalanches
RENTSCHLER (1992)	Stubnerkogel, Salzburg (A)	62	k. A.	Kristallin	Tauernfenster: Zentralgneise, Quarzite, Schwarzphyllite, Marmore, Ganggesteine. (Post-)glaziale Bildungen	Muren
RICKLI (2001)	Sachseln (CH)	280	Niederschlag 15.08.1997	Helvetikum	Verfaltete und verschuppte Gesteinsserien, hauptsächlich mergelige Gesteine, teils in Wechsellagerung mit Kalkbänken oder Sandsteinen, Moränenmaterial in Talbereichen, Lockergesteinsdecken (Gehängeschuttdecken und Geschiebefächer)	oberflächennahe Rutschungen
RICKLI & BUCHER (2003)	Napf (CH)	50	15. - 16.07.2002 ( 60 mm/3-4 h)	Molasse	Nagelfluh, Sandstein und Mergel	oberflächennahe Rutschungen
RICKLI & BUCHER (2003)	Appenzell (CH)	82	31.08. - 1.09.2002	Molasse	Nagelfluh, Sandstein und Mergel	oberflächennahe Rutschungen
RICKLI ET AL. (2008)	Napf (CH)	87	Niederschläge/ Hochwasser 21. - 23.08.2005 (241 mm/6 d)	Molasse	OMM & OSM: konglom. Abfolgen (polygener bzw. bunter Nagelfluh) mit sandig/siltigen Zwischenlagen. Lockergestein v.a. Verwitterungsmaterial der Molasse und Gehängeschutt. Alluvium auf Talböden	mittelgründige Rutschungen/Hangmuren

Autor	Untersuchungsgebiet	Art und Anzahl d. Ereignisse	Triggerereignis	Festgesteinseinheit	Beschreibung der Locker- und Festgesteine im Untersuchungsgebiet	Bewegungsform (gemäß Autor)
RICKLI ET AL. (2008)	Prättigau (CH)	50	Niederschläge/ (Hochwasser) 21.-23.08.2005 118-155 mm	Flysch	Prättigauer Flysch bzw. Bündner Schiefer: Sandsteine bis Kieselkalke (teilweise geschiefert) mit Lagen von Mergelschiefern. Lockergestein v.a. Gehängeschutt & Gehängelehm, stellenweise Moränenmaterial	überw. mittelgründige Rutschungen/Hangmuren
RICKLI ET AL. (2008)	Entlebuch (CH)	47	Niederschläge/ Hochwasser 21.-23.08.2005 180-269 mm	Subalpine Molasse	Vornehmlich USM : Nagelfluh mit Sandstein- und Mergellagen, mittelstark verfestigte Konglomerate (Molassenagelfluh), stellenw. mergelreicherer Molassenagelfluh mit stärker verfestigtem Sandstein. Lockergestein haupts. Gehängeschutt, Alluvium; stellenweise Moränenablagerungen, Bergsturzmaterial	mittelgründige Rutschungen/Hangmuren
RIEGER (1999)	Stubai- und Lechtaler Alpen (A)	Ø	31.7.1992 19,1 mm/30min	Kalkalpin und Kristallin	Lechtaler Alpen: alpiner Muschelkalk, Partnach- Schichten, Wettersteinkalk, Raibler Schichten, Hauptdolomit, Plattenkalk, Kössener Schichten, Hornsteinkalk, Aptychenschichten, Gosauschichten; Stubai- Alpen: Plattenkalk, Kössener Schichten, Hornsteinkalk, Aptychenschichten, Gosauschichten; Stubai- Alpen: Biotitplagioklasgneis, Biotitschiefer, Quarzite, Glimmerschiefer, Aplit, Pegmatit, Biotitgranit, Migmatit, Granodioritgneis, Amphibolite und Hornblendeschiefer; Hang- und Bachschutt, Murenmaterial	Hangmuren (vornehmlich Typ 2, gemäß Zimmermann 1990 und Haeberli et al. 1991)
SCHÄDLER (2004)	Herrentischgraben (Bay)	35	21.06.2002	Kalkalpin	Hauptdolomit, Plattenkalk, Wechsellagerungen aus Kalk- & Mergelfolgen d. Kössener Schichten (post-) glaziale Bildungen, Moränenabl. & bindiges Murenmaterial, feinkörniger Hangschutt & Verwitterungsschutt	Blatt- und Muschelanbrüche
SCHMID (2008)	Vorderhindelang (Bay)	Ø	2007	Flysch Helvetikum	Rhenodanubischer Flysch, Helvetikum	flachgründige Hangbewegungen
SCHOGER (1988)	Voldertal/Tirol (A)	Ø	August 1985	Kristallin	Silurische Karbonat-Serizitphyllit-Serie, Quarzphyllit, Hangschuttdecke phyllitischer Gesteine, Verwitterungsschutt, schwach bindige bis rollige LG, fluvioglaz. Sedimente, teils Moränenmaterial	vornehmlich Blattanbrüche
VON WYL (1987)	Gersau (CH)	51	Gewitter Juli/August 1984	Helvetikum Flysch	Untergrund aus Nagelfluh, Kontaktzone zwischen subalpiner Molasse und Helvetikum, Flyschschichten als Zwischenlager, Wechsellagerungen aus mergeligen Lagen und grobkörnigem Nagelfluh, Gerölle aus Sandkalken, Mergelkalken u.a.	Erdrutsche
VON WYL (1987)	Grosses Melchtal (CH)	37	Gewitter Juli/August 1984	Helvetikum	Mächtige Schuttauflagen, Lehme (evtl. mergel. Verwitterungsprodukt) quartäre Erdrutsche & Schuttkegel, mächtige Schuttauflagen, Lehme (evtl. mergel. Verwitterungsprodukt)	Erdrutsche
WERLEN (2004)	Eggiwil (CH)	Ø	k.A.	Molasse	Molasseschichten v.a. Nagelfluh, untergeord. Sandstein- & Mergellagen, lokal Moränen & geringmächtiger Gehängeschutt	Hangmuren
WERLEN (2004)	Frutigen (CH)	Ø	k.A.	Helvetikum Flysch	Helvetikum, Ultrahelvetikum und Penninikum (darunter Niesendecke aus Flysch), stark verfaultet und verschuppt	Hangmuren
WERLEN (2004)	Grindelwald (CH)	Ø	k.A.	k. A.	Mesoz. & tertiäre Bildungen; Kalkgesteine & saure Gesteine, sandige bis sandig-schiefrige Kalke, Tonschiefer & schiefrige Eisensandsteine des Helvetikum, verfaultet, Moränen, Hang- & Blockschutt	Hangmuren
WERLEN (2004)	Napf (CH)	Ø	k.A.	Molasse	OSM: Wechsellagen aus Nagelfluh und sandig-siltigen Lagen, Verwitterungsmaterial der Molasse	Hangmuren
WERNER (2001)	Melchtal (CH)	167	15.08.1997	Helvetikum	Kreide (Diphyoideskalk- und Mergel, Kieselkalke, Drusberg- u Schrattenkalkformation, Gault, Seewerschichten), glaziale- und postglaziale Bildungen	Anbrüche im Lockergestein

\* Die Hangbewegungsereignisse werden entweder durch Einzelereignisse (Datenpool 1 der Wissensbasis) oder prozentuale Verteilungen bzw. Mittelwerte (Ø, Datenpool 2 der Wissensbasis) beschrieben.

Legende:

OSM: Obere Süßwassermolasse (Tertiär)

USM: Untere Süßwassermolasse (Tertiär)

OMM: Obere Meeressmolasse (Tertiär)

LG: Lockergestein

## **Anlage II**

Zusammenfassung von Einzelereignissen historischer  
Hangbewegungen - Grundlage für Datenpool 1 der  
Wissensbasis des DSSs

## Anlage II: Zusammenfassung von Einzelereignissen historischer Hangbewegungen - Grundlage für Datenpool 1 der Wissensbasis des DSSs

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe [müNN]	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
<b>Büch (2003)</b>																		
Büch 1	28	1250	80	E	gestreckt	konkav	6	Rasen										
Büch 2	34	1210	170	S	konkav	konkav	9	Rasen										
Büch 3	15	1230	140	SE	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 4	42	1230	150	SE	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 5	33	1230	150	SE	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 6	39	1230	160	S	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 7	42	1230	170	S	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 8	35	1220	170	S	gestreckt	konkav	6	Mischwald										
Büch 9	29	1260	180	S	gestreckt	konkav	6	Rasen										
Büch 10	27	1195	180	S	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 11	31	1775	74	E	gestreckt	konkav	6	Pionierpflanzen										
Büch 12	30	1195	80	E	konkav	Hangrippe	k.A.	k.A.										
Büch 13	30	1205	150	SE	gestreckt	gestreckt	5	Mischwald										
Büch 14	30	1205	150	SE	konkav	gestreckt	8	Mischwald										
Büch 15	30	1205	150	SE	konkav	gestreckt	8	Rasen										
Büch 16	33	1205	150	SE	konkav	gestreckt	8	Rasen										
Büch 17	33	1205	150	SE	konkav	gestreckt	8	Rasen										
Büch 18	30	1210	132	SE	konkav	gestreckt	8	Mischwald										
Büch 19	26	1620	195	S	konkav	gestreckt	8	Nadelwald										
Büch 20	32	1340	140	SE	konkav	gestreckt	8	Rasen										
Büch 21	25	1620	98	E	konkav	konkav	9	subalpiner Rasen										
Büch 22	23	1310	110	E	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 23	27	1150	215	SW	konkav	gestreckt	6	Nadelwald										
Büch 24	30	1250	135	SE	gestreckt	gestreckt	5	Mischwald										
Büch 25	32	1090	120	SE	gestreckt	gestreckt	5	Unterholz										
Büch 26	32	1090	120	SE	konkav	konkav	9	Unterholz										
Büch 27	31	1125	130	SE	konkav	gestreckt	8	Mischwald										
Büch 28	31	1125	140	SE	konkav	gestreckt	8	Mischwald										
Büch 29	32	990	70	E	gestreckt	Hangrippe	k.A.	Mischwald										
Büch 30	32	1050	135	SE	gestreckt	gestreckt	5	Mischwald										
Büch 31	30	1400	122	SE	gestreckt	gestreckt	5	Rasen										
Büch 32	29	1440	124	SE	gestreckt	gestreckt	5	Rasen										
Büch 33	30	1225	132	SE	gestreckt	konvex	4	Unterholz										
Büch 34	43	1310	90	E	konkav	gestreckt	8	Mischwald										
Büch 35	32	1090	42	NE	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 36	32	1050	65	NE	gestreckt	konkav	8	Rasen										
Büch 37	40	1110	165	S	gestreckt	konkav	8	Rasen										
Büch 38	32	1045	65	NE	gestreckt	konvex	6	Rasen										
Büch 39	32	1155	90	E	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 40	35	1180	130	SE	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 41	23	1305	110	E	konkav	konkav	9	Mischwald										
Büch 42	35	1205	115	SE	Hangkante	konkav	k.A.	Nadelwald										

### Rentschler (1992)

Rentschler 1	> 40	1185			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 2	37	1205			Geländstufe			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 3	37	1255			Geländstufe			Wald	> 2									
Rentschler 4	37	1230			Geländekante			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 5	30	1260			ungegliederter Hang			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 6	37	1315			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 7	28	1330			Geländekante			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 8	45	1315			Geländekante			Wald	>2									
Rentschler 9	50	1315			Geländekante			Wald	>2									
Rentschler 10	40	1305			Geländekante			Wald	>2									
Rentschler 11	33	1295			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 12	37	1285			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 13	33	1225			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 17	40	1260			Geländekante			Freiland	> 2									
Rentschler 18	35	1240			Geländekante			Freiland	> 2									
Rentschler 19	32	1240			Geländekante			Freiland	>2									
Rentschler 20	40	1240			Geländekante			Freiland	> 2									
Rentschler 21	36	1235			Geländekante			Freiland	>2									
Rentschler 22	35	1235			Geländekante			Freiland	> 2									

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Rentschler 24	24	1315			ungegliedert			Wald	>2									
Rentschler 25	30	1340			Geländekante			Wald	0,5 - 1									
Rentschler 26	40	1370			Geländekante			Freiland	>2									
Rentschler 27	32	1380			Geländekante			Freiland	1,0 - 2,0									
Rentschler 28	25	1390			Geländekante			Wald	>2									
Rentschler 29	34	1410			Geländekante			Wald	k.A.									
Rentschler 31	35	1465			Geländekante			Wald	k.A.									
Rentschler 32	26	1455			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 34	40	1390			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 35	37	1520			Geländekante			Wald	k.A.									
Rentschler 36	31	1500			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 37	35	1515			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 38	35	1515			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 39	34	1560			ungegliedert			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 40	41	1580			Geländekante			Wald	0,5 - 1									
Rentschler 41	40	1575			Geländekante			Wald	0,5 - 1									
Rentschler 42	34	1575			Geländekante			Wald	0,5 - 1									
Rentschler 43	37	1580			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 44	34	1615			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 45	25	1660			Geländekante			Freiland	> 2									
Rentschler 46	36	1680			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 47	22	1735			ungegliedert			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 50	35	1775			Geländekante			Wald	0,5 - 1									
Rentschler 51	35	1795			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 53	30	1830			ungegliedert			Freiland	> 2									
Rentschler 54	34	1820			ungegliedert			Freiland	> 2									
Rentschler 55	36	1815			ungegliedert			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 56	35	1840			Geländekante			Wald	1,0 - 2,0									
Rentschler 57	35	1885			Geländekante			Freiland	> 2									
Rentschler 58	25	1950			ungegliedert			Freiland	> 2									
Rentschler 59	29	1950			ungegliedert			Freiland	> 2									
Rentschler 60	28	1940			ungegliedert			Freiland	> 2									
Rentschler 61	38	1840			Geländekante			Wald	> 2									
Rentschler 62	38	1330			ungegliedert			Freiland	1,0 - 2,0									

Werner (2007)

Werner 1	38	910			Geländekante			Wiese	> 1		0,5	45	22	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 2	28	915			Geländekante			Wiese	> 1,5		1,5	200	300	translationsförmige Rutschung				
Werner 3	34	935			ungegliederter Hang			Wiese	k.A.		k.A.	300	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 4	35	990			ungegliederter Hang			Wald	1,5		1	120	120	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 5	40	1085			ungegliederter Hang			Schlagfläche	0,5		0,5	100	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 6	33	840			unruhiges Kleinrelief			Weide	> 1,5		1,5	80	100	translationsförmige Rutschung				
Werner 7	38	1110			Geländekante/ Hangmulde			Wald	>3		3	200	400	translationsförmige Rutschung				
Werner 8	35	1305			Geländekante			Wiese	< 2		1,5	250	350	translationsförmige Rutschung				
Werner 9	32	1310			Geländestufe			Wiese	1,0		1	80	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 10	35	1325			ungegliederter Hang			Wiese	> 1		1	200	200	translationsförmige Rutschung				
Werner 11	35	1310			Geländekante			Wiese	1,0		0,7	225	90	translationsförmige Rutschung				
Werner 12	34	1425			Hangmulde			Wiese	0,5		0,5	800	400	translationsförmige Rutschung				
Werner 13	38	1555			Hangmulde			Wiese	< 2		1	450	400	translationsförmige Rutschung				
Werner 14	36	1475			ungegliederter Hang			Wiese	1,0		1	300	180	translationsförmige Rutschung				
Werner 15	39	1440			Hangmulde			Wiese	1,5		1,5	130	120	translationsförmige Rutschung				
Werner 16	27	1230			Hangmulde			Weide	2,0		1	90	50	translationsförmige Rutschung				
Werner 17	33	1205			unruhiges Kleinrelief			Weide	1,0		0,7	100	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 18	39	1190			unruhiges Kleinrelief			Weide	1,5		0,8	250	100	translationsförmige Rutschung				
Werner 19	44	1060			ungegliederter Hang			Schlagfläche	0,1 - 0,8		0,4	70	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 20	39	1125			Geländestufe			Schlagfläche	1,0		0,5	180	75	translationsförmige Rutschung				
Werner 21	41	1080			Geländestufe			Schlagfläche	0,3		0,3	50	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 22	44	1115			ungegliederter Hang			Schlagfläche	1,0		0,8	50	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 23	40	1115			k.A.			Schlagfläche	1,0		0,6	400	160	translationsförmige Rutschung				
Werner 24	34	835			Geländestufe/ Hangrücken			Wiese	0,5		0,4	100	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 25	31	835			Geländekante			Wiese	k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 26	33	845			ungegliederter Hang			Wiese	k.A.		0,5	2300	1200	translationsförmige Rutschung				
Werner 27	38	815			ungegliederter Hang			Wald	< 2,5		1,5	240	110	translationsförmige Rutschung				
Werner 28	38	1335			unruhiges Kleinrelief			Weide	k.A.		k.A.	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 29	30	1340			Geländekante/ Hangmulde			Weide	2,5		2	170	170	translationsförmige Rutschung				
Werner 30	33	1375			unruhiges Kleinrelief			Weide	1,5		1,5	200	150	translationsförmige Rutschung				
Werner 31	38	1385			ungegliederter Hang			Weide	1,5		1,2	100	75	translationsförmige Rutschung				
Werner 32	35	1385			unruhiges Kleinrelief			Weide	> 2,5		2	150	200	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 33	34	1335			unruhiges Kleinrelief			Weide	2,0		1	210	125	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Werner 34	32	1325			unruhiges Kleinrelief			Weide	1,5		1,5	180	180	translationsförmige Rutschung				
Werner 35	41	1620			Hangrücken/ unruhiges Kleinrelief			Wiese	1,5		0,7	180	100	translationsförmige Rutschung				
Werner 36	35	1700			Hangmulde/ unruhiges Kleinrelief			Wiese	1,5		1,5	140	120	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 37	31	1695			Geländekante/ unruhiges Kleinrelief			Wiese	1,5		1,5	800	600	translationsförmige Rutschung				
Werner 38	41	945			Geländekante			Wald	1,0		1	25	12	translationsförmige Rutschung				
Werner 39	35	940			unruhiges Kleinrelief			Wald	1,0		1	40	16	translationsförmige Rutschung				
Werner 40	36	940			ungegliederter Hang			Wald	1,5		1	80	50	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 41	31	945			ungegliederter Hang			Wiese	k.A.		1	150	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 42	38	810			Geländekante			Wald	2,0		0,5	k.A.	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 43	30	985			Geländekante			Wiese	0,5		0,3	220	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 44	43	990			Geländekante			Wiese	0,5		0,3	120	35	translationsförmige Rutschung				
Werner 45	35	1000			ungegliederter Hang			Wiese	1,5		0,3	90	28	translationsförmige Rutschung				
Werner 46	27	1020			ungegliederter Hang			Wiese	2,0		1,5	420	600	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 47	39	1015			ungegliederter Hang			Wiese	< 1		0,5	65	30	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 48	25	1020			ungegliederter Hang			Wiese	> 0,5		0,5	150	50	translationsförmige Rutschung				
Werner 49	43	1020			Geländekante			Wiese	> 0,5		0,5	70	35	translationsförmige Rutschung				
Werner 50	43	1060			Geländekante			Weide	> 0,5		0,5	35	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 51	40	1030			Geländekante/ Hangrücken			Wiese	k.A.		0,5	20	10	translationsförmige Rutschung				
Werner 52	34	1495			Geländestufe			Weide	0,5		0,5	60	30	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 53	39	1550			Geländekante			Wiese	< 0,5		0,5	120	35	translationsförmige Rutschung				
Werner 54	35	1575			Geländekante/ Hangmulde			Wiese	1,5		0,5	75	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 55	34	1580			Geländekante			Wiese	1,0		0,7	75	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 56	37	1575			Geländekante			Wiese	1,0		1	135	60	translationsförmige Rutschung				
Werner 57	35	1630			Hangrücken			Wiese	1,0		1	55	35	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 58	36	1520			Hangmulde			Wiese	0,5		0,5	105	30	translationsförmige Rutschung				
Werner 59	36	1505			ungegliederter Hang			Wiese	0,5		0,5	140	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 60	41	1425			Geländestufe			Wiese	0,3		0,3	40	12	translationsförmige Rutschung				
Werner 61	38	1420			Geländestufe			Wiese	0,7		0,3	70	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 62	43	820			Geländekante/ Hangrücken			Wald	1,5		1	70	35	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 63	43	830			ungegliederter Hang			Wald	> 1		0,8	55	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 64	37	855			ungegliederter Hang			Schlagfläche	> 1		0,8	220	120	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 65	45	1440			Hangmulde			Wiese	1,0		0,7	17	7	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 66	45	1460			Hangmulde			Wiese	0,4		0,3	70	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 67	55	1520			Geländekante			Wiese	0,5		0,4	60	24	translationsförmige Rutschung				
Werner 68	34	1520			ungegliederter Hang			Wiese	< 1		1	200	70	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 69	41	845			Geländestufe			Wald	1,0		0,5	k.A.	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 70	38	915			ungegliederter Hang			Wald	1,0		0,8	225	120	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 71	48	915			Geländestufe/ Hangmulde			Wald	1,0		1	70	35	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 72	40	920			Geländestufe			Wald	0,4		0,4	45	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 73	37	870			ungegliederter Hang			Wald	0,4		0,4	50	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 74	35	1610			Geländestufe/ unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,4		0,4	380	115	translationsförmige Rutschung				
Werner 75	39	1645			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,5		0,5	130	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 76	49	1610			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,5		0,5	30	9	translationsförmige Rutschung				
Werner 77	44	1595			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,3		0,3	55	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 78	39	1590			Geländestufe			Wiese	1,2		1	90	35	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 79	32	1545			Geländestufe/ Hangmulde			Wiese	1,0		0,7	145	75	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 80	34	1545			Geländestufe/ Hangrücken			Wiese	1,5		1,5	750	600	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 81	35	1535			ungegliederter Hang			Wiese	1,0		1	210	70	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 82	32	1480			k.A.			Wiese	0,5		0,5	225	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 83	38	1480			ungegliederter Hang			Wald	1,0		1	310	125	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 84	36	1375			Geländestufe			Wiese	0,4		0,4	50	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 85	38	1385			Hangrücken			Wiese	1,0		0,5	55	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 86	38	1370			Geländestufe			Wiese	1,0		1	60	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 87	41	1360			Geländekante			Wiese	0,5		0,5	75	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 88	31	830			ungegliederter Hang			Wald	1,5		1,5	150	150	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 89	38	835			unruhiges Kleinrelief			Wald	1,5		1	70	50	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 90	42	880			Geländestufe/ Hangmulde			Wiese	2,0		1	90	55	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 91	38	890			Hangmulde			Wiese	1,5		1	80	70	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 92	38	880			Hangmulde			Wiese	1,0		0,5	45	20	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 93	48	840			Hangrücken			Wald	3,5		1	500	500	translationsförmige Rutschung				
Werner 94	35	835			Geländestufe/ Hangmulde			Wald	1,0		0,8	120	50	translationsförmige Rutschung				
Werner 95	41	840			Hangrücken			Wald	> 3		1	100	65	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 96	35	835			ungegliederter Hang			Wald	2,0		1	75	50	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 97	41	850			Hangmulde			Wald	1,5		0,5	60	24	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 98	38	845			Geländestufe			Schlagfläche	1,5		0,8	95	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 99	40	825			ungegliederter Hang			Wiese	2,0		1	170	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 100	34	815			ungegliederter Hang			Wiese	> 2		1	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 101	36	865			Hangmulde			Wiese	> 2		0,3	k.A.	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 102	44	865			Geländestufe			Wald	2,0		0,8	36	22	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 103	35	790			ungegliederter Hang			Wiese	1,0		0,8	160	70	translationsförmige Rutschung				

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe [müNN]	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Werner 104	39	875			Geländekante			Wiese	1,5		0,8	37	18	translationsförmige Rutschung				
Werner 105	35	1015			Hangmulde/ Hangrücken			Wiese	1,0		0,8	160	75	translationsförmige Rutschung				
Werner 106	44	830			ungegliederter Hang			Wald	0,3		0,3	65	17	translationsförmige Rutschung				
Werner 107	38	890			Hangmulde			Wald	1,5		0,5	50	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 108	37	910			k.A.			Wald	2,0		1	400	300	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 109	33	970			unruhiges Kleinrelief			Weide	> 2		0,1	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 110	30	1010			ungegliederter Hang			Weide	1,5		0,5	1950	480	translationsförmige Rutschung				
Werner 111	34	1100			Hangmulde			Wald	1,5		0,6	40	25	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 112	39	965			Hangrücken			Wald	0,8		0,5	30	10	translationsförmige Rutschung				
Werner 113	40	1165			unruhiges Kleinrelief			Wald	0,7		0,5	80	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 114	43	1180			Geländekante			Wiese	0,7		0,5	30	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 115	30	1040			Geländestufe			Wiese	0,8		0,5	50	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 116	34	1040			Geländestufe			Wiese	0,8		0,7	70	35	translationsförmige Rutschung				
Werner 117	31	1040			Geländestufe			Wiese	1,0		0,8	65	45	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 118	38	1075			Hangmulde			Wald	0,9		0,6	50	30	translationsförmige Rutschung				
Werner 119	38	885			Geländestufe/ Hangmulde			Wiese	0,1 - 1,2		1	110	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 120	33	880			Geländestufe/ Hangmulde			Wald	0 - 1,5		1,2	140	55	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 121	39	895			Geländestufe/ Hangrippe			Wiese	0,1 - 0,8		0,8	145	45	translationsförmige Rutschung				
Werner 122	42	920			ungegliederter Hang			Wald	0,3 - 0,8		0,7	45	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 123	36	920			unruhiges Kleinrelief			Wald	0,2 - 0,8		0,5	20	7	translationsförmige Rutschung				
Werner 124	37	895			ungegliederter Hang			Wiese	0,2 - 0,7		0,7	140	45	translationsförmige Rutschung				
Werner 125	46	845			Geländekante/ Hangmulde			Wiese	0,5 - 2,5		1,4	40	15	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 126	34	1450			Hangmulde			Wiese	0,2 - 0,8		0,5	320	100	translationsförmige Rutschung				
Werner 127	39	1450			Hangmulde			Wiese	0 - 0,6		0,6	200	80	translationsförmige Rutschung				
Werner 128	k.A.	1470			Hangmulde			Wiese	0,2 - 1,5		1,2	15	10	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 129	37	1570			Hangmulde			Wald	0 - 1,2		1,2	300	200	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 130	41	1525			Hangrücken			Wiese	0,2 - 1		0,8	220	65	translationsförmige Rutschung				
Werner 131	41	1535			Hangrücken			Wiese	0,3 - 0,8		0,8	140	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 132	41	1540			Geländestufe			Wiese	< 1,2		1	k.A.	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 133	41	1500			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,2 - 0,8		0,8	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 134	37	1525			Geländekante/ Geländestufe			Wiese	0,2 - 1,2		1	130	80	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 135	43	1520			Hangmulde			Wiese	0,1 - 1		1	80	30	translationsförmige Rutschung				
Werner 136	40	1540			Geländestufe			Wiese	0,3 - 0,8		0,7	170	70	translationsförmige Rutschung				
Werner 137	42	1510			Hangrücken			Wiese	0,3 - 1,5		1,5	k.A.	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 138	40	1415			Hangmulde			Wiese	0,1 - 0,5		0,4	35	7	translationsförmige Rutschung				
Werner 139	41	1170			Geländestufe			Schlagfläche	0,4 - 0,8		0,6	200	85	translationsförmige Rutschung				
Werner 140	39	1190			Hangrücken			Schlagfläche	0,4 - 1		1	75	50	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 141	41	1200			Hangmulde			Schlagfläche	0,3 - 0,8		0,7	55	27	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 142	36	1220			Hangmulde			Schlagfläche	0,1 - 0,5		0,5	400	125	translationsförmige Rutschung				
Werner 143	41	1255			k.A.			Schlagfläche	0,1 - 0,7		0,6	270	80	translationsförmige Rutschung				
Werner 144	36	1300			Hangmulde			Wiese	0,1 - 0,5		0,5	500	150	translationsförmige Rutschung				
Werner 145	48	1340			ungegliederter Hang			Wiese	0,2 - 0,8		0,8	300	80	translationsförmige Rutschung				
Werner 146	42	1350			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,3 - 0,7		0,7	320	120	translationsförmige Rutschung				
Werner 147	34	1290			Geländestufe			Wiese + Wald	0,2 - 1		0,8	40	20	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 148	38	1435			Hangmulde			Wiese	0 - 1,2		1	110	65	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 149	37	1415			unruhiges Kleinrelief			Wiese	0,5		0,5	40	16	translationsförmige Rutschung				
Werner 150	45	1660			k.A.			Wiese	0 - 0,5		0,6	70	25	translationsförmige Rutschung				
Werner 151	37	1705			k.A.			Wiese	0,2 - 0,7		0,5	40	10	translationsförmige Rutschung				
Werner 152	43	850			unruhiges Kleinrelief			Wald	0 - 0,3		0,3	180	35	translationsförmige Rutschung				
Werner 153	37	890			ungegliederter Hang			Wiese	> 0,8		0,7	60	k.A.	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 154	30	865			Hangmulde			Wiese	> 2		0,5	k.A.	k.A.	translationsförmige Rutschung				
Werner 155	39	1685			Hangmulde			erl	0,1 - 0,5		0,5	180	60	translationsförmige Rutschung				
Werner 156	41	1675			unruhiges Kleinrelief			erl + Wiese	0,1 - 0,5		0,5	33	10	translationsförmige Rutschung				
Werner 157	37	1695			unruhiges Kleinrelief			erl + Wiese	0,1 - 0,5		0,5	90	27	translationsförmige Rutschung				
Werner 158	41	1690			unruhiges Kleinrelief			erl + Wiese	0 - 0,3		0,3	50	10	translationsförmige Rutschung				
Werner 159	47	1140			ungegliederter Hang			Schlagfläche	0,2 - 0,6		0,5	65	20	translationsförmige Rutschung				
Werner 160	34	840			Hangmulde			Wald	0,2 - 2,0		1,5	120	80	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 161	36	1065			k.A.			Wiese	0,3 - 0,7		0,5	35	15	translationsförmige Rutschung				
Werner 162	43	1285			unruhiges Kleinrelief			Wald	0,1 - 0,7		0,4	80	30	translationsförmige Rutschung				
Werner 163	43	1310			unruhiges Kleinrelief			Wald	0,1 - 0,7		0,4	100	40	translationsförmige Rutschung				
Werner 164	38	1280			Hangmulde			Wald	0 - 1,0		0,5	60	30	translationsförmige Rutschung				
Werner 165	34	1430			k.A.			erl	0,6		0,5	90	45	translationsförmige Rutschung				
Werner 166	30	1470			ungegliederter Hang			Wald	0,1 - 1,5		1	90	90	Komb. v. transl. & rotationsf. Rutschung				
Werner 167	45	1215			Geländekante/ Hangmulde			Wiese + Wald	0,1 - 0,6		0,5	35	18	translationsförmige Rutschung				

Schädler (2004)

Schädler 1	45	1140	110	E	gestreckt	konkav	6	Pionierpflanzen	0,2	Hangschutt								
Schädler 2	40	1180	80	E	gestreckt	konkav	6	Pionierpflanzen	0,3	Hangschutt								
Schädler 3	45	1225	315	NW	konvex	konvex	1	Feuchtwiese	3,0	Moräne								

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Schädler 4	45	1110	188	S	gestreckt	konkav	8	Mischwald	2,0	Moräne								
Schädler 5	40	1120	180	S	konvex	konkav	3	Mischwald	3,0	Moräne								
Schädler 6	29	1220	170	S	konvex	konkav	3	Mischwald	3,0	Murmateriale								
Schädler 7	39	1215	120	SE	konvex	konvex	1	Mischwald	1,5	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 8	27	1115	160	S	konvex	gestreckt	2	Laubwald	7,0	Murmateriale								
Schädler 9	30	1200	165	S	konvex	konkav	3	Mischwald	2,0	Hangschutt mit Murmateriale								
Schädler 10	50	1260	40	NE	gestreckt	gestreckt	5	Mischwald	0,3	Murmateriale								
Schädler 11	49	1140	90	E	konvex	gestreckt	2	Laubwald	6,0	Murmateriale								
Schädler 12	51	1150	60	NE	konvex	gestreckt	2	Laubwald	6,0	Murmateriale								
Schädler 13	48	1150	240	SW	konvex	gestreckt	2	Laubwald	6,0	Murmateriale								
Schädler 14	50	1155	80	E	konvex	gestreckt	2	Laubwald	6,0	Murmateriale								
Schädler 15	35	1265	85	E	konkav	Hangrippe	k.A.	Mischwald	0,6	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 16	29	1255	70	E	konvex	gestreckt	2	Feuchtwiese	3,0	Murmateriale								
Schädler 17	44	1270	76	E	konvex	gestreckt	2	Mischwald	0,5	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 18	43	1270	60	NE	Hangkante	gestreckt	k.A.	Mischwald	0,3	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 19	27	1300	130	SE	konvex	konkav	3	Mischwald	0,3	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 20	44	1275	89	E	konvex	konkav	3	Nadelwald	0,5	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 21	31	1270	145	SE	konvex	Hangrippe	k.A.	Mischwald	1,1	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 22	35	1270	82	E	konkav	konkav	9	Mischwald	0,6	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 23	40	1230	170	S	Hangkante	konkav	k.A.	Mischwald	2,0	Murmateriale								
Schädler 24	27	1215	105	E	gestreckt	konkav	6	Mischwald	1,0	Murmateriale								
Schädler 25	39	1110	160	S	konvex	gestreckt	2	Laubwald	7,0	Murmateriale								
Schädler 26	33	1360	100	E	gestreckt	konkav	8	Feuchtwiese	0,6	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 27	38	1335	80	E	konvex	konkav	3	Mischwald	0,5	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 28	36	1300	50	NE	gestreckt	konkav	6	Mischwald	0,3	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 29	32	1300	150	SE	konvex	konkav	3	Mischwald	1,0	Murmateriale								
Schädler 30	27	1325	82	E	konkav	konkav	3	Mischwald	0,9	Hang- & Verwitterungsschutt								
Schädler 31	52	1530	110	E	Hangkante	gestreckt	k.A.	Latschen	2,0	Hangschutt								
Schädler 32	47	1510	240	SW	konvex	gestreckt	2	subalp. Rasen	1,5	Hangschutt								
Schädler 33	43	1420	160	S	gestreckt	gestreckt	5	Rasen	0,3	Hangschutt								
Schädler 34	49	1660	230	SW	gestreckt	konkav	6	subalp. Rasen	1,5	Hangschutt & Steinschlagmateriale								
Schädler 35	41	1330	170	S	gestreckt	konkav	6	Rasen	0,3	Hangschutt								

Hamberger (2000), Melchtal

Hamberger 1	38	915	140	SE	Hangmulde			Wiese	0,8	VS, HS	0,5				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 2	37	930	105	E	Geländestufe & Hangmulde			Wiese	0,5	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,25				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 3	38	930	120	SE	Geländestufe			Wiese	1,5	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,7				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 4	35	895	130	SE	Hangrücken			Wiese	0,5	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,3				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 5	35	895	144	SE	Hangmulde			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,4				Hangwasserabfluss m. Rinnenbildung			
Hamberger 6	30	900	140	SE	Hangmulde			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,15				k.A.			
Hamberger 7	39	905	123	SE	Geländekante			Wiese	0,5	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,3				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 8	33	910	157	SE	Geländekante			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,3				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 9	33	915	124	SE	Hangmulde			Wiese	0,5	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 10	37	910	127	SE	ungegliedert			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 11	37	900	114	SE	ungegliedert			Wiese	0,7	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,4				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 12	38	880	123	SE	Hangmulde			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,7				Hangwasserabfluss m. Rinnenbildung			
Hamberger 13	33	865	124	SE	unruhiges Relief			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,4				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 14	36	885	124	SE	Hangmulde			Wiese	1,0	VS, HS (Kalk & Mergel), Moräne	0,35				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 15	34	1040	128	SE	Hangmulde			Wiese	1,5	VS & HS von Kalk	0,65				Hangwasserabfluss m. Rinnenbildung			
Hamberger 16	38	890	117	SE	Hangmulde			Wiese	1,5	VS & HS von Kalk	0,8				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 17	37	905	110	E	ungegliederter Hang			Wiese	1,5	VS & HS von Kalk	0,55				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 18	46	860	110	E	künstl. Böschung			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk & Moräne	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 19	55	860	111	E	künstl. Böschung			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk & Moräne	k. A.				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 20	35	895	108	E	Geländekante			Wiese	1,5	VS & HS von Kalk & Moräne	0,6				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 21	42	865	109	E	künstl. Böschung			Wiese	2,0	VS & HS von Kalk & Moräne	k.A.				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 22	36	1200	120	SE	Hangmulde			Weide	1,8	VS & HS von Kalk & Moräne	0,95				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 23	35	820	100	E	Geländekante			LW	1,0	VS & HS von mergel. Kalk und Mergeln	0,45				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 24	38	1275	126	SE	Hangmulde			NW	1,0	VS & HS von kieseligem Kalk	0,5				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 25	38	1350	117	SE	ungegliederter Hang			Weide	0,7	VS & HS von kieseligem Kalk	0,3				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 26	40	1535	168	S	unruhiges Relief			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,25				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 27	35	1540	129	SE	Hangmulde			Wiese	0,6	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,4				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 28	41	1430	128	SE	Hangrücken			Wiese	0,7	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,4				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 29	41	1430	128	SE	ungegliederter Hang			Wiese	0,7	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,35				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 30	40	1235	130	SE	Hangmulde			NW	1,0	VS & HS von Kalk	0,3				Hangwasserabfluss m. Rinnenbildung			
Hamberger 31	39	1350	142	SE	Geländekante			NW	1,5	VS & HS von Kalk	0,7				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 32	42	1320	30	NE	Uferböschung			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 33	39	1365	15	N	Geländekante			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk	0,25				Hangwasserabfluss m. Rinnenbildung			
Hamberger 34	38	1430	117	SE	ungegliederter Hang			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,6				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 35	38	1460	128	SE	ungegliederter Hang			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,6				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Hamberger 36	45	1270	210	SW	Uferböschung			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 37	41	1210	35	NE	Geländekante			LW	>2	Moräne	0,85				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 38	34	1430	120	SE	Uferböschung			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 39	39	1465	130	SE	Geländekante			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,45				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 40	32	1415	136	SE	ungegliederter Hang			Weide	1,8	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,9				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 41	31	1435	143	SE	Geländekante			Weide	0,5	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 42	34	1400	109	E	unruhiges Relief			Weide	1,8	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,95				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 43	43	1355	160	S	Uferböschung			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 44	45	1360	175	S	Uferböschung			Wiese	0,5	VS & HS von Kalk	0,15				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 45	33	1520	169	S	Hangmulde			Weide	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,25				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 46	38	1520	125	SE	Hangmulde			Weide	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 47	41	1510	32	NE	Uferböschung			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 48	41	1445	185	S	Uferböschung			Wiese	0,4	VS & HS von Kalk	0,2				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 49	46	1505	168	S	Uferböschung			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,25				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			
Hamberger 50	38	1560	143	SE	Uferböschung			Wiese	1,0	VS & HS von Kalk und Mergeln	0,55				Hangwasserabfluss o. Rinnenbildung			

**Beinsteiner (1971)**

Edenmure (Lienzer Schlosswald)	36	1530		N	Steilhangmulde			Mittelhang										
Gassen (Deferegental, St.Veit)	36	1640		S	Hangrücken			Mittelhang										
Kristein (Burger Tal, Vergein)	36	1260		SW	Hangrücken			Unterhang										
Alkus (Oberalkus bei Lienz)	40	1470		SW	Hangrücken			Mittelhang										
Proßess (Matrei in Osttirol)	40	1200		E	Hangrücken			Oberhang										
Troger Reide (Glanz bei Lienz)	38	900		NE	Moränenhangschutt/ Wegbaumaterial			Unterhang										

**Hohensinn (1979)**

Loebenegger, Gem. Liesertal	34	960		N					ca. 3									
Egger, Liesertal; Gem. Eisenstratten	32	1050		S					ca. 1,5									
Altersberg, Liesertal	33	760		S					2 - 2,5									
Döbriach, Matzelsdorf	35	700		E					2,5									
Radenthein, Hintersteiner	27	820		S					3,0									
Kaning, Radenthein-Kaning	32	950		SE					2,0									
Westl. Radenthein-Kaning	34	970		SE					2,8									
Östl. Kaning	34	970		SE					2,8									
Kaning Neuwirt, Radenthein-Kaning	31	970		SE					2,0									
Grabenwirt, Loeben im Liesertal	31	930		SW					2,5									
Glawugga, Loeben-Liesertal	38	1020		W					3,0									
Trebesing	29	760		S					4,5									
Lendorf Raider	27	760		S					4,1									
St. Peter-Samer	29	980		SW					3,5									
Steinfeld, Steinfeld-Flattachberg	30	640		S					2,3									

**von Wyl (1987), Gersau**

Gurgeli Gu-1	27	1010		E	unregelmäßig													
Gurgeli Gu-2	31,5	980		E	flach													
Gurgeli Gu-3	31,5	990		E	sackförmig													
Obermatt 0-1	29,25	1150		S	sackförmig													
Obermatt 0-2	36	1190		S	sackförmig													
Obermatt 0-3	23,4	1180		S	unregelmäßig													
Obermatt 0-4	31,5	1240		S	unregelmäßig													
Obermatt 0-5	27	1200		S	unregelmäßig													
Obermatt 0-6	29,25	1200		S	unregelmäßig													
Obermatt 0-7	24,75	1240		S	k.A.													
Obermatt 0-8	29,25	1240		S	k.A.													
Obermatt 0-9	31,5	1150		S	sackförmig													
Biregg B-1	27	800		W	unregelmäßig													
Biregg B-2	31,5	890		SW	konkav													
Biregg B-3	31,5	930		SW	konkav													
Biregg B-4	36	930		SW	konkav													
Biregg B-5	42,75	940		SW	flach													
Biregg B-6	31,5	970		SW	unregelmäßig													
Biregg B-7	40,5	980		SW	unregelmäßig													
Biregg B-8	24,75	910		S	konkav													
Biregg B-9	29,25	890		S	k.A.													
Biregg B-10	24,75	890		S	k.A.													
Ruoplis Rs-1	31,5	1040		S	flach													
Ruoplis Rs-2	36	1030		S	flach													
Ruoplis Rs-3	34,88	1030		S	konvex													

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
RuoplisRs-4	36	1010		S	unregelmäßig													
Ruoplis Rs-5	33,75	1000		S	flach													
RuoplisRs-6	29,25	1030		S	flach													
Ruoplis Rs-7	31,5	950		S	unregelmäßig													
Gibel Gi-1	29,25	900		S	kanalförmig													
Gibel Gi-2	40,5	900		S	flach													
Gibel Gi-3	31,5	900		S	flach													
Gibel Gi-4	31,5	900		S	flach													
Gibel Gi-5	33,75	910		S	flach													
Gibel Gi-6	31,5	900		S	unregelmäßig													
Gibel Gi-7	31,5	880		S	konkav													
Gibel Gi-8	27	820		S	konkav													
Gibel Gi-9	31,5	800		S	konkav													
Gibel Gi-10	29,25	920		S	k.A.													
Wintermies W-1	31,5	950		S	k.A.													
Wintermies W-2	29,25	940		S	k.A.													
Wintermies W-3	31,5	950		S	sackförmig													
Wintermies W-4	31,5	940		S	sackförmig													
Rübi Rü-1	24,75	990		S	k.A.													
Rübi Rü-2	24,75	990		S	k.A.													
Rübi Rü-3	27	970		S	k.A.													
Rübi Rü-4	24,75	1000		S	k.A.													
Rübi Rü-5	27	990		SE	k.A.													
Rübi Rü-6	33,75	1040		S	flach													
Rübi Rü-7	32,63	1040		S	flach													
Rübi Rü-8	22,5	1000		S	flach													

von Wyl (1987), Großes Melchtal

Büel Bl-1	36	910		E	flach													
Büel Bl-2	27	900		E	etwas konkav													
Lehberg L-1	33,75	900		E	etwas konkav													
Lehberg L-2	34,88	890		E	konvex													
Lehberg L-3	31,5	900		E	flach													
Teufibach Tb-1	29,25	880		E	sackförmig													
Teufibach Tb-2	28,8	940		E	sackförmig													
Teufibach Tb-3	25,88	890		E	sackförmig													
Teufibach Tb-4	36	1000		E	sackförmig													
Turren Tu-1	29,25	1080		S	flach													
Turren Tu-2	28,125	1120		S	flach													
Turren Tu-3	33,75	1160		S	flach													
Huggeten H-1	24,75	1040		W	k.A.													
Huggeten H-2	23,625	1030		W	k.A.													
Huggeten H-3	31,5	930		W	keilförmig													
Buechi-Schwand Bs-1	29,25	970		SW	k.A.													
Buechi-Schwand Bs-2	36	1000		S	flach													
Buechi-Schwand Bs-3	33,75	1000		S	flach													
Buechi-Schwand Bs-4	31,5	1020		S	flach													
Buechi-Schwand Bs-5	31,5	1040		W	flach													
Buechi-Schwand Bs-6	33,75	1050		S	flach													
Buechi-Schwand Bs-7	31,5	1040		S	flach													
Buechi-Schwand Bs-8	36	960		W	sackförmig													
Steinacher S-1	31,5	970		S	flach													
Steinacher S-2	36	960		S	unregelmäßig													
Steinacher S-3	31,5	960		S	keilförmig													
Ried R-1	30,375	870		W	sackförmig													
Ried R-2	13,5	880		W	gewellt													
Ried R-3	36	920		W	flach													
Ried R-4	27	940		SW	sackförmig													
Ried R-5	31,5	970		W	konkav													
Ried R-6	27	910		W	flach													
Ried R-7	29,25	910		W	k.A.													
Ried R-8	31,5	890		W	k.A.													
Ried R-9	27	860		W	k.A.													
Ried R-10	29,25	830		W	k.A.													
Ried R-11	27	900		W	sackförmig													

Rickli (2003), Napf

Napf 1	27,5	1110						Freiland										
--------	------	------	--	--	--	--	--	----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Napf 2	29,5	1140						Freiland										
Napf 3	30	1110						Freiland										
Napf 4	31	1120						Freiland										
Napf 5	31	1080						Freiland										
Napf 6	31,5	1060						Freiland										
Napf 7	33,5	1050						Freiland										
Napf 8	33	1140						Freiland										
Napf 9	34	1160						Freiland										
Napf 10	34,5	1125						Freiland										
Napf 11	35	1110						Freiland										
Napf 12	36	1000						Freiland										
Napf 13	36	1050						Freiland										
Napf 14	37	1050						Freiland										
Napf 15	36	1270						Freiland										
Napf 16	36,5	1150						Freiland										
Napf 17	37	1100						Freiland										
Napf 18	37,5	1100						Freiland										
Napf 19	38	1120						Freiland										
Napf 20	39,5	1170						Freiland										
Napf 21	39	1060						Freiland										
Napf 22	28	1080						Wald										
Napf 23	32,5	1170						Wald										
Napf 24	34	1150						Wald										
Napf 25	35	1005						Wald										
Napf 26	36,5	1120						Wald										
Napf 27	37	1160						Wald										
Napf 28	37,5	1080						Wald										
Napf 29	37,5	1095						Wald										
Napf 30	38	1120						Wald										
Napf 31	40,5	1100						Wald										
Napf 32	42	1100						Wald										
Napf 33	42	1080						Wald										
Napf 34	38	1190						Wald										
Napf 35	44,5	1190						Wald										
Napf 36	45	1160						Wald										
Napf 37	37,5	1220						Wald										
Napf 38	39	1220						Wald										
Napf 39	39,5	1220						Wald										
Napf 40	47	1230						Wald										
Napf 41	44	1230						Wald										
Napf 42	40	1240						Wald										
Napf 43	44	1270						Wald										
Napf 44	44	1280						Wald										
Napf 45	42,5	1290						Wald										
Napf 46	41,5	1300						Wald										
Napf 47	43,5	1270						Wald										
Napf 48	40	1270						Wald										
Napf 49	38,5	1290						Wald										
Napf 50	37,5	1280						Wald										

**Rickli (2003), Appenzell**

Appenzell 1003	29	900	340	N			4	Freiland	1,2			130	130			16,5	16	sm
Appenzell 1005	29	910	330	NW			4	Freiland	1,4			800	800			26,5	42	sm
Appenzell 1006	25,5	900	325	NW			5	Freiland	1,6			255	255			18,5	15	sm
Appenzell 1007	30	905	100	E			6	Freiland	1,0			100	60			12,5	9,5	sm
Appenzell 1008	23	870	180	S			5	Freiland	1,2			364	255			30,5	15	cl-ml
Appenzell 1009	29,5	900	100	E			6	Freiland	0,7			65	32			6,5	10,5	sm
Appenzell 1010	30	890	180	S			8	Wald	1,6			80	80			13,5	9,5	sm
Appenzell 1011	32,5	850	190	S			5	Freiland	1,4			320	320			21	32,5	sm
Appenzell 1015	32	815	210	SW			6	Freiland	1,2			324	260			20	22	sm
Appenzell 1016	37,5	795	200	S			6	Wald	0,5			120	48			19	11,5	sm
Appenzell 1017	41	800	210	SW			6	Wald	0,5			105	41			15	9,5	sm
Appenzell 1019	33	900	180	S			6	Freiland	0,8			280	170			7	42,5	sm
Appenzell 1020	31,5	910	90	E			6	Freiland	2,2			900	1100			28	47	cl
Appenzell 1021	32,5	875	140	SE			6	Freiland	0,9			160	112			20,5	10,5	cl-ml
Appenzell 1022	25	880	140	SE			9	Freiland	0,8			140	84			18,5	11,5	cl
Appenzell 1023	31	850	180	S			6	Freiland	1,4			80	80			13,5	8,5	cl
Appenzell 1024	26	840	170	S			4	Freiland	0,8			200	120			17	25	sm
Appenzell 1025	30	820	130	SE			6	Freiland	1,1			80	40			9	12	sm

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Appenzell 1026	33,5	830	180	S			9	Freiland	1,2			60	70			15,5	8	cl-ml
Appenzell 1027	32	910	180	S			9	Freiland	0,5			140	55			14	14	cl-ml
Appenzell 1028	31,5	940	160	S			9	Freiland	1,3			396	315			49	22	sm
Appenzell 1029	35	930	200	S			3	Freiland	0,8			120	60			14,5	10	cl-ml
Appenzell 1030	37	920	150	SE			7	Freiland	1,4			160	80			18	15	sm
Appenzell 1031	34	890	190	S			9	Freiland	1,4			137	82			20	11,5	sm
Appenzell 1032	29	970	150	SE			9	Freiland	0,8			130	65			12,5	15	cl
Appenzell 1033	29	970	170	S			6	Freiland	0,8			160	96			10,5	23,5	sm
Appenzell 1034	29	855	180	S			8	Freiland	1,0			225	160			15,5	19,5	sm
Appenzell 1035	29	900	140	SE			6	Freiland	0,8			48	35			4,5	12,5	sm
Appenzell 1036	28	865	190	S			6	Freiland	0,8			135	81			25	20	sm
Appenzell 1037	29	870	140	SE			9	Freiland	1,0			360	180			41	14,5	sp
Appenzell 1038	34	880	150	SE			9	Freiland	0,8			100	60			11,5	15,5	gm
Appenzell 1039	31	870	110	E			9	Freiland	1,5			100	80			11,5	11,5	sm
Appenzell 1040	40	860	170	S			6	Wald	0,5			360	150			24	25	sm
Appenzell 1041	35	840	140	SE			5	Wald	1,2			500	220			24,5	26	sm
Appenzell 1042	30	810	140	SE			6	Freiland	0,7			640	320			45	62	cl-ml
Appenzell 1043	35	775	140	SE			6	Freiland	0,6			96	48			8	15	cl
Appenzell 1044	33,5	770	140	SE			6	Freiland	0,6			80	40			15,5	6	sm
Appenzell 1045	35	800	120	SE			9	Wald	1,2			425	210			40	15,5	sm
Appenzell 1046	34	830	180	S			6	Freiland	1,2			260	200			13	22,5	sm
Appenzell 1047	23,5	770	270	W			9	Freiland	1,0			620	370			40	30,5	sm
Appenzell 1048	30	800	170	S			9	Freiland	1,4			250	125			26,5	11	sm
Appenzell 1049	31	820	170	S			3	Freiland	1,0			120	70			17	10	cl-ml
Appenzell 1050	29	730	290	W			3	Freiland	1,8			400	320			43	11	sm
Appenzell 1051	26	730	290	W			3	Freiland	1,0			260	208			34	13	sm
Appenzell 1052	30	780	230	SW			9	Wald	0,8			250	125			29	14	sm
Appenzell 1053	32	780	190	S			3	Freiland	0,5			80	40			12	10	sm
Appenzell 1054	34	890	0	N			9	Wald	1,1			150	60			28,5	7	sp
Appenzell 1055	32	890	350	N			6	Wald	1,1			72	50			12	6	sm
Appenzell 1056	32	920	330	NW			6	Wald	0,7			160	80			21,5	9	sp
Appenzell 1057	35	900	340	N			6	Wald	1,0			300	150			24,5	17	sm
Appenzell 1058	30	900	260	W			9	Freiland	1,5			84	50			15	8,5	sm
Appenzell 1059	32	880	10	N			6	Freiland	1,4			80	80			13,5	9,5	sm
Appenzell 1060	26	850	10	N			6	Freiland	1,2			500	400			29,5	28	sm
Appenzell 1061	35	840	320	NW			3	Wald	0,6			96	40			13,5	10	sm
Appenzell 1062	31,5	800	0	N			9	Wald	1,6			120	120			11,5	16	sm
Appenzell 1063	33,5	780	330	NW			8	Wald	0,7			105	41			19,5	8,5	cl-ml
Appenzell 1064	29,5	780	330	NW			9	Wald	1,1			1200	720			71	24	cl
Appenzell 1065	32	800	340	N			3	Wald	1,2			100	50			12	13,5	sm
Appenzell 1066	35	850	340	N			6	Wald	0,7			390	200			30	15	sm
Appenzell 1067	31	870	330	NW			6	Wald	1,2			500	300			25	27	cl
Appenzell 1068	34	820	160	S			6	Freiland	1,7			169	140			15	14,5	sm
Appenzell 1069	33,5	820	240	SW			9	Wald	1,1			160	80			20	10,5	sm
Appenzell 1070	42	840	170	S			9	Wald	1,0			160	65			20	11	NA
Appenzell 1071	42	820	150	SE			1	Wald	1,1			80	40			14,5	10,5	sc
Appenzell 1072	33,5	840	150	SE			6	Wald	1,0			216	125			21	13,5	sm
Appenzell 1073	34	870	130	SE			9	Wald	0,9			112	48			18	8,5	gc
Appenzell 1074	50	790	270	W			6	Freiland	0,8			120	60			9	16	sm
Appenzell 1075	38	720	250	W			9	Wald	0,7			120	45			20	10	sm
Appenzell 1076	26	830	330	NW			9	Wald	0,9			144	60			16	14	cl
Appenzell 1077	37	845	180	S			9	Wald	0,8			72	43			8,5	9,5	sm
Appenzell 1078	35	970	300	NW			6	Wald	1,0			72	45			10	10	cl
Appenzell 1079	33,5	1040	150	SE			6	Wald	1,1			180	146			14	17	sm
Appenzell 1080	33	860	270	W			3	Freiland	2,1			140	100			12,5	14,5	sm
Appenzell 1081	29,5	880	170	S			9	Wald	0,8			132	60			14	12	cl
Appenzell 1082	38	900	190	S			6	Wald	1,1			64	40			8,5	10	sm
Appenzell 1083	39	895	170	S			6	Freiland	0,8			108	54			14	14	sp
Appenzell 1084	43	880	150	SE			6	Wald	1,2			132	66			15	12,5	sm
Appenzell 1085	44	860	200	S			6	Wald	0,9			100	50			11	13,5	cl
Appenzell 1086	48,5	860	210	SW			3	Wald	1,3			45	32			10	6,5	sp
Appenzell 1087	42	870	160	S			6	Wald	1,6			390	425			28,5	24	sp
Appenzell 1088	28	980	310	NW			6	Freiland	1,2			120	100			10	16	sm
Appenzell 1701	31	940	140	SE			5	Freiland	k.A.			100	k.A.			17	15	NA

Rickli (2003), Entlebuch

Entlebuch 3001	30	1140	130	SE			5	Freiland	1,5			378	378			23,2	19,7	sm
Entlebuch 3002	26	1050	110	E			8	Freiland	2,0			630	756			57,4	25,6	sm
Entlebuch 3003	28	880	250	W			5	Freiland	1,2			360	288			21,0	23,5	cl-ml

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Entlebuch 3004	32	885	290	W			5	Freiland	1,2			280	280			21,5	16,5	cl
Entlebuch 3005	36	920	260	W			5	Freiland	2,2			540	918			38,5	18,0	sm
Entlebuch 3006	37	880	100	E			3	Freiland	2,2			375	675			28,5	18,0	sc
Entlebuch 3007	27	940	120	SE			8	Wald	3,0			480	960			40,0	16,8	cl-ml
Entlebuch 3008	34	840	270	W			6	Freiland	2,0			240	384			23,5	16,0	cl
Entlebuch 3009	27	900	80	E			8	Freiland	0,8			144	86			20,0	11,0	cl-ml
Entlebuch 3010	24	930	80	E			2	Freiland	1,4			128	115			17,0	8,5	cl-ml
Entlebuch 3011	29	1130	190	S			5	Freiland	2,3			280	392			33,0	12,0	sm
Entlebuch 3012	33	1125	260	W			5	Freiland	1,2			120	96			17,0	10,5	cl-ml
Entlebuch 3013	26	1020	240	SW			3	Freiland	1,5			150	150			18,0	12,5	cl-ml
Entlebuch 3014	32	1020	300	NW			5	Freiland	1,2			42	38			8,0	8,5	cl
Entlebuch 3015	35	990	270	W			2	Freiland	1,9			160	175			24,0	12,0	cl
Entlebuch 3016	34	1290	120	SE			3	Freiland	1,2			170	136			18,5	13,5	sc
Entlebuch 3017	25	1270	110	E			3	Freiland	1,6			880	1050			53,0	35,0	gm
Entlebuch 3018	32	1220	150	SE			3	Freiland	0,9			88	53			12,0	9,0	gm
Entlebuch 3019	31	1170	70	E			8	Freiland	1,4			270	270			19,0	17,0	cl-ml
Entlebuch 3020	32	1190	80	E			8	Freiland	2,3			220	330			20,0	12,0	gm
Entlebuch 3021	25	1160	90	E			2	Freiland	1,2			170	153			19,0	12,0	gm
Entlebuch 3022	26	1030	100	E			8	Freiland	1,8			182	200			15,5	15,0	cl
Entlebuch 3023	39	1050	110	E			5	Freiland	0,7			56	34			9,0	8,0	gm
Entlebuch 3024	29	1340	150	SE			2	Freiland	1,8			315	347			30,0	15,5	gm
Entlebuch 3025	33	905	175	S			8	Freiland	1,0			126	75			16,0	12,0	cl-ml
Entlebuch 3026	36	1040	120	SE			9	Wald	0,8			200	120			24,0	12,0	cl-ml
Entlebuch 3027	25	1560	165	S			8	Freiland	0,9			90	63			11,0	11,0	cl
Entlebuch 3028	19	1450	170	S			8	Freiland	3,0			1400	2800			64,0	32,0	cl
Entlebuch 3029	22	1470	140	SE			4	Freiland	2,0			380	380			43,7	10,2	cl-ml
Entlebuch 3030	34	1415	190	S			7	Freiland	0,9			80	56			9,8	11,3	gc
Entlebuch 3031	21	1345	140	SE			8	Freiland	1,2			98	78			15,6	8,2	cl-ml
Entlebuch 3032	30	1235	110	E			5	Freiland	1,4			242	194			23,8	22,2	gm
Entlebuch 3033	26	1120	170	S			8	Wald	1,5			390	350			30,2	16,5	gm
Entlebuch 3034	38	990	160	S			6	Wald	0,9			90	60			14,1	10,0	gm
Entlebuch 3035	41	1010	140	SE			5	Wald	1,2			320	152			30,4	14,1	gm
Entlebuch 3036	32	1060	150	SE			5	Wald	1,3			190	152			19,9	14,9	cl
Entlebuch 3037	36	1190	110	E			2	Wald	1,5			465	528			46,5	13,0	gm
Entlebuch 3038	33	1280	150	SE			5	Wald	1,3			198	158			25,5	10,5	cl-ml
Entlebuch 3039	40	1350	130	SE			5	Wald	1,0			168	134			13,1	16,0	gm
Entlebuch 3040	37	1080	270	W			5	Freiland	0,6			75	30			10,3	10,4	gm
Entlebuch 3041	27	1310	50	NE			5	Freiland	0,7			117	47			10,8	13,9	gm
Entlebuch 3042	28	1345	20	N			7	Freiland	0,8			126	50			15,3	11,2	gm
Entlebuch 3701	29	1200	70	E			8	Freiland	1,2			352	282			33,0	12,5	gm
Entlebuch 3702	26	880	120	SE			5	Freiland	0,8			120	90			17,0	10,0	NA
Entlebuch 3703	27	1050	200	S			2	Freiland	k.A.			460	k.A.			48,0	10,0	NA
Entlebuch 3704	37	1090	90	E			8	Wald	3,5			420	840			31,0	13,0	NA
Entlebuch 3705	36	1230	30	NE			8	Freiland	k.A.			182	k.A.			13,0	17,5	NA

**Rickli (2008), Napf**

Napf 2001	36,5	1120	270	W			8	Wald	0,6			120	60			14	12	gm
Napf 2002	38	1120	270	W			8	Wald	0,8			80	40			11,5	10	gm
Napf 2003	31	1080	200	S			9	Freiland	0,8			88	44			13	11	sc
Napf 2004	39	1070	130	SE			6	Freiland	1,0			176	125			25	9	gm
Napf 2005	33,5	1050	130	SE			6	Freiland	0,9			80	48			8	12	sm
Napf 2006	31,5	1060	110	E			9	Freiland	0,8			120	48			14	12	cl-ml
Napf 2007	36	1000	180	S			3	Freiland	0,9			206	130			9	36,5	sm
Napf 2008	35	1110	130	SE			6	Freiland	0,7			160	65			14,5	18	cl
Napf 2009	37	1040	130	SE			6	Freiland	0,8			220	88			13	22	sm
Napf 2010	36	1040	190	S			6	Freiland	1,4			440	225			24,5	33	sm
Napf 2011	34	1160	180	S			6	Freiland	0,6			54	30			7,5	10,5	sm
Napf 2012	36,5	1150	180	S			5	Freiland	0,9			143	70			15	12	gm
Napf 2013	33	1140	205	SW			6	Freiland	0,8			112	56			10	20,5	gm
Napf 2014	27,5	1110	210	SW			9	Freiland	0,9			240	144			24	13,5	gm
Napf 2015	39	1220	240	SW			9	Wald	0,5			168	50			14	15	gm
Napf 2016	37	1160	130	SE			8	Wald	1,0			207	80			24,5	10	cl-ml
Napf 2017	44	1190	160	S			5	Wald	0,8			120	48			17	8	sm
Napf 2018	37,5	1080	110	E			8	Wald	0,8			221	55			16	19	gm
Napf 2019	37	1100	120	SE			6	Freiland	0,6			310	124			25,5	19,5	sm
Napf 2020	30	1110	250	W			9	Freiland	0,9			750	330			33	22,5	gm
Napf 2021	37,5	1100	210	SW			8	Freiland	0,7			150	80			18,5	13	sm
Napf 2022	41	1300	150	SE			8	Wald	0,8			240	72			40	8	gm
Napf 2023	38,5	1290	150	SE			8	Wald	1,1			96	60			15	9	sm

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe [müNN]	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Napf 2024	43,5	1270	180	S			8	Wald	0,4			156	45			14	15	NA
Napf 2025	40	1270	110	E			8	Wald	1,1			300	160			20	18,5	NA
Napf 2026	40	1240	110	E			8	Wald	1,1			136	84			21,5	10	sm
Napf 2027	43,5	1280	190	S			8	Wald	0,9			81	33			10,5	10	NA
Napf 2028	39,5	1220	120	SE			8	Wald	0,7			300	120			26	15	NA
Napf 2029	43	1270	30	NE			8	Wald	0,8			225	90			17	18	gm
Napf 2030	36	1270	110	E			8	Freiland	1,0			275	138			25,5	13,5	cl-ml
Napf 2031	34	1150	0	N			8	Wald	0,7			91	37			13	8,5	gm
Napf 2032	32,5	1170	40	NE			8	Wald	0,9			170	85			18	12	gm
Napf 2033	40,5	1100	150	SE			5	Wald	0,5			112	40			18	9	gm
Napf 2034	37,5	1095	160	SE			5	Wald	0,6			81	40			11,5	10	gm
Napf 2035	42	1070	10	N			9	Wald	0,7			160	64			18	13	gm
Napf 2036	38	1120	70	E			5	Freiland	0,5			80	32			8,5	11,5	cl-ml
Napf 2037	29,5	1140	130	SE			6	Freiland	1,4			192	140			18	15	sm
Napf 2038	28	1080	40	NE			6	Wald	0,5			230	115			19	16	cl
Napf 2039	35	1010	180	S			6	Wald	0,7			120	40			11,5	14	sm
Napf 2040	45	1160	30	NE			8	Wald	0,3			196	40			16	15,5	sp
Napf 2041	42	1100	40	NE			9	Wald	1,8			98	100			14,5	9,5	cl-ml
Napf 2042	39	1220	30	NE			8	Wald	0,8			200	50			23,5	13,5	gm
Napf 2043	47	1230	210	SW			5	Wald	0,7			375	64			34	12	gm
Napf 2045	43,5	1230	240	SW			5	Wald	0,4			210	42			23	11	cl
Napf 2046	37,5	1220	250	W			8	Wald	0,8			105	43			20,5	6,5	sm
Napf 2047	37,5	1280	220	SW			8	Wald	0,4			225	45			18	17	gm
Napf 2048	42	1290	210	SW			5	Wald	0,7			120	52			16,5	8	sm
Napf 2049	38	1190	100	E			8	Wald	0,9			140	56			15	12	gm
Napf 2701	39,5	1170	190	S			6	Freiland	k.A.			64	k.A.			8,5	10	NA
Napf 2702	34,5	1130	90	E			2	Freiland	0,8			180	72			21	16	cl-ml
Napf 2703	31	1120	180	S			8	Freiland	0,6			250	120			22	21	cl
Napf 5001	30	920	150	SE			5	Freiland	1,0			330	297			17	32	sm
Napf 5002	28	940	160	S			5	Freiland	0,8			192	115			14	18	sm
Napf 5003	24	920	160	S			5	Freiland	1,0			400	320			22	21	gm
Napf 5004	21	930	150	SE			5	Freiland	1,2			336	269			32	12	gm
Napf 5005	23	935	150	SE			5	Freiland	0,7			805	483			36	25	gm
Napf 5006	31	1000	90	E			7	Wald	0,9			88	62			14	8	sm
Napf 5007	26	1030	80	E			4	Wald	1,3			900	760			41	30,5	cl-ml
Napf 5008	24	990	230	SW			5	Freiland	1,7			390	468			18	31	gm
Napf 5009	32	1000	250	W			6	Freiland	0,9			234	117			20	15	gm
Napf 5010	29	1040	240	SW			6	Freiland	1,4			160	128			12	18,5	cl-ml
Napf 5011	27	910	300	NW			6	Freiland	2,5			700	840			25	39	gp
Napf 5012	39	880	290	W			6	Freiland	1,0			60	42			7	11,5	sm
Napf 5013	35	950	170	S			5	Freiland	1,1			135	108			10	17,5	cl
Napf 5014	33	980	130	SE			6	Freiland	1,0			330	230			26,5	20	cl
Napf 5015	31	975	140	SE			5	Freiland	0,5			192	77			18	13	cl
Napf 5016	26	920	180	S			5	Freiland	1,0			63	44			8	11	gm
Napf 5017	39	950	160	S			5	Wald	0,7			80	32			12	9,5	gm
Napf 5018	32	940	130	SE			4	Wald	1,5			290	260			21	18,5	gm
Napf 5019	25	930	220	SW			5	Wald	1,5			340	374			20	22	gm
Napf 5020	40	970	140	SE			5	Wald	0,8			310	150			20	25	gm
Napf 5021	45	980	190	S			5	Wald	0,8			104	62			13	10	gm
Napf 5022	43	980	160	S			5	Wald	0,7			143	57			14	15	gm
Napf 5023	37	960	160	S			5	Wald	0,9			52	31			9	7,5	gm
Napf 5024	23	965	110	E			5	Freiland	0,8			72	58			10,5	9,5	cl
Napf 5025	40	940	60	NE			5	Wald	1,1			67	47			14,5	7,5	gm
Napf 5026	39	920	100	E			6	Wald	0,9			108	54			14	15	cl
Napf 5027	41	890	110	E			5	Wald	0,9			112	56			17	8	gm
Napf 5028	27	860	110	E			5	Freiland	4,0			2016	5443			40	68	gm
Napf 5029	38	940	90	E			9	Wald	1,1			88	62			9	15	sw
Napf 5030	27	890	90	E			5	Freiland	1,0			75	60			11	10	cl
Napf 5031	24	900	90	E			5	Freiland	0,8			396	317			35	17	gm
Napf 5032	26	890	100	E			2	Freiland	0,7			96	67			13	10	cl
Napf 5033	29	970	300	NW			8	Wald	1,0			195	156			15,5	19	gm
Napf 5034	26	1040	270	W			6	Freiland	1,0			148	118			16,5	17,5	cl
Napf 5035	25	1030	270	W			5	Freiland	0,9			135	108			15	11	gm
Napf 5501	28	1025	250	W			6	Freiland	1,4			120	120			12	13,5	gc

Rickli (2008), Prättigau

Praettigau 4001	33	2260	180	S			5	Freiland	1,4			1610	1127			72	31	cl-ml
Praettigau 4002	34	1420	80	E			3	Freiland	0,9			200	100			12	22	sm
Praettigau 4003	30	1700	170	S			8	Freiland	1,9			720	936			60	17	gc

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
Praettigau 4004	30	1740	160	S			8	Freiland	1,1			800	560			44	24	gm
Praettigau 4005	44	1780	190	S			5	Freiland	1,2			72	58			6,5	12	gc
Praettigau 4006	28	1980	180	S			2	Freiland	1,2			117	82			11	15	gc
Praettigau 4007	32	2015	110	E			5	Freiland	1,7			112	112			17,5	9	cl-ml
Praettigau 4008	34	1425	130	SE			3	Freiland	0,9			225	135			18	17	gc
Praettigau 4009	28	1445	160	S			6	Freiland	1,4			120	120			13	11	cl-ml
Praettigau 4010	25	1440	170	S			6	Freiland	1,7			160	192			18	12,5	cl
Praettigau 4011	37	1590	170	S			5	Freiland	1,4			108	97			13,5	10,5	gc
Praettigau 4012	37	1565	190	S			2	Freiland	1,6			90	108			11,5	10,5	cl
Praettigau 4013	28	1630	140	SE			8	Freiland	1,5			2600	2260			116	37	cl-ml
Praettigau 4014	28	1655	230	SW			8	Freiland	1,2			808	566			42	30	cl-ml
Praettigau 4015	26	1745	210	SW			5	Freiland	1,8			286	343			23,5	14,5	cl-ml
Praettigau 4016	31	1782	200	S			5	Wald	1,0			162	97			20	10	gc
Praettigau 4017	24	1550	160	S			8	Freiland	0,9			220	132			24	13	cl
Praettigau 4018	42	1610	130	SE			3	Freiland	1,2			90	63			11,5	9,5	gc
Praettigau 4019	33	1765	200	S			5	Wald	1,3			230	160			22	12,5	cl
Praettigau 4020	37	1795	250	W			5	Wald	1,5			35	39			8	6	cl
Praettigau 4021	23	1655	230	SW			6	Freiland	0,6			64	32			10	10,5	gm
Praettigau 4022	32	1710	200	S			6	Freiland	1,8			958	912			25	44	gc
Praettigau 4023	25	1730	220	SW			7	Freiland	1,3			700	630			32	28	gm
Praettigau 4024	34	1780	220	SW			8	Wald	0,8			252	151			23	12,5	gm
Praettigau 4025	32	1780	210	SW			5	Wald	1,1			340	170			30	15,5	gm
Praettigau 4026	25	1810	210	SW			6	Wald	0,9			384	192			34	14	cl-ml
Praettigau 4027	32	1840	180	S			3	Wald	1,1			144	86			20	9,5	cl-ml
Praettigau 4028	29	1750	170	S			5	Wald	1,0			320	160			23	18	gm
Praettigau 4029	35	1830	200	S			5	Freiland	1,5			384	307			35	16	cl
Praettigau 4030	30	1840	190	S			5	Freiland	1,4			110	77			12,5	11	gm
Praettigau 4031	34	1860	220	SW			5	Freiland	0,7			55	33			11,5	7,5	gm
Praettigau 4032	30	1770	200	S			5	Wald	1,3			300	210			27	14,5	cl
Praettigau 4033	30	1975	170	S			8	Wald	1,2			156	94			34	8,5	cl
Praettigau 4034	39	1900	190	S			6	Wald	2,5			765	1377			50	21	gp
Praettigau 4035	25	1810	160	S			6	Wald	1,0			720	504			44	23	cl-ml
Praettigau 4036	28	1810	170	S			6	Wald	1,0			225	134			19,5	14	cl-ml
Praettigau 4037	28	1790	190	S			5	Wald	1,2			510	460			34,5	21,5	cl
Praettigau 4038	28	1660	230	SW			5	Freiland	0,8			175	105			23	8,5	gm
Praettigau 4039	36	1725	170	S			5	Wald	1,2			250	180			20,10	17,80	gc
Praettigau 4040	39	1620	130	SE			4	Wald	1,6			128	102			16,30	9,50	gc
Praettigau 4041	33	1670	240	SW			6	Wald	1,1			275	165			28	12	gc
Praettigau 4042	27	1690	250	W			5	Wald	0,8			230	138			23	18	cl-ml
Praettigau 4043	33	1700	240	SW			5	Wald	1,1			342	205			31	21	cl
Praettigau 4044	36	1685	220	SW			3	Wald	1,5			242	194			23	13	cl
Praettigau 4045	34	1660	220	SW			6	Wald	0,6			297	89			31	14	gm
Praettigau 4046	34	1620	260	W			2	Wald	0,8			104	62			15	9	gm
Praettigau 4502	39	1780	130	SE			9	Wald	0,8			56	34			9	8,5	NA
Praettigau 4503	44	1745	130	SE			8	Wald	0,8			120	72			14	14	NA
Praettigau 4504	37	1645	160	S			5	Wald	1,8			70	50			10	8	NA
Praettigau 4505	42	1670	220	SW			5	Wald	1,1			153	107			18	10	cl

**Rickli (1997), Sachseln**

sachs 605.29	28	710	320	NW			7	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	15,0	NA
sachs 605.30	29	760	350	NW			7	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			6,0	8,0	NA
sachs 607.09a	30	1080	10	N			2	Freiland	2,0			240	288			25,0	14,4	gc-gm
sachs 607.59c	30	1530	290	W			5	Freiland	1,0			120	72			11,4	13,6	cl
sachs 605.18a	32	1310	300	NW			6	Freiland	0,9			80	40			10,8	11,2	gc-gm
sachs 605.49	32	830	290	W			8	Freiland	1,1			240	144			18,6	25,5	gm
sachs 607.04a	32	910	300	NW			8	Freiland	1,0			144	86			15,3	14,9	gc-gm
sachs 607.28b	32	1300	30	NE			5	Freiland	1,0			120	60			16,9	11,1	cl-ml
sachs 607.55a	32	1410	250	W			5	Freiland	1,3			176	123			18,0	14,2	cl
sachs 607.55e	32	1460	0	N			7	Freiland	1,4			336	235			34,0	16,6	ol
sachs 624.14a	32	1680	110	E			5	Freiland	1,2			800	480			45,0	31,5	cl-ml
sachs 624.17c	32	1390	100	E			2	Freiland	1,1			187	112			19,3	13,5	cl-ml
sachs 624.18b	32	1320	90	E			2	Freiland	1,3			153	107			19,2	11,3	cl-ml
sachs 624.41x	32	1330	70	E			2	Freiland	1,0			135	81			16,7	12,0	cl-ml
sachs 605.07	33	1200	320	NW			1	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	10,0	NA
sachs 605.18e	33	1340	310	NW			2	Freiland	1,4			300	240			21,2	23,4	gc-gm
sachs 605.36	33	1340	300	NW			5	Freiland	1,5			252	201			22,3	15,7	gc
sachs 607.27a	33	1280	0	N			5	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	15,0	NA
sachs 607.54	33	1380	250	W			5	Freiland	0,9			140	56			21,5	8,9	cl
sachs 607.58	33	1570	270	W			5	Freiland	0,7			88	35			9,4	14,4	cl

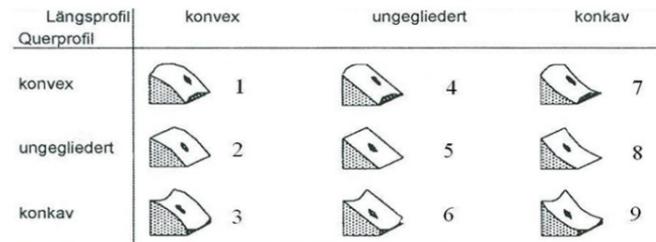
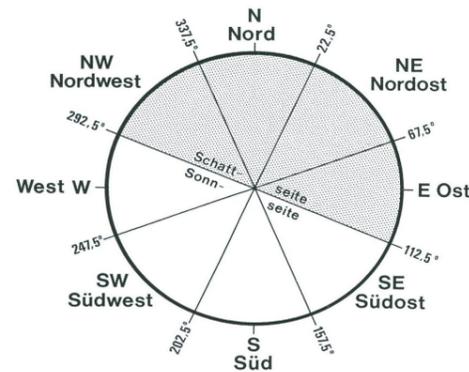
Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
sachs 607.60b	33	1660	270	W			5	Freiland	1,0			98	59			15,0	9,6	cl-ml
sachs 607.61	33	1670	290	W			8	Freiland	1,8			352	422			24,8	20,5	gc-gm
sachs 607.70x	33	1380	250	W			5	Freiland	0,9			70	42			11,3	7,9	cl
sachs 624.14b	33	1680	110	E			5	Freiland	1,0			180	90			16,0	15,1	cl-ml
sachs 624.18a	33	1340	90	E			2	Freiland	1,2			192	154			18,4	14,5	cl-ml
sachs 605.18f	34	1360	320	NW			2	Freiland	1,2			198	160			19,7	16,0	cl
sachs 605.23	34	1460	20	N			8	Freiland	1,0			144	100			20,2	9,3	cl-ml
sachs 605.41a	34	1280	340	N			5	Freiland	1,0			120	72			11,7	15,0	ol
sachs 605.44	34	1460	320	NW			7	Freiland	1,5			270	216			38,0	18,4	ol
sachs 605.45	34	1080	290	W			2	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			-99,0	-99,0	NA
sachs 607.06	34	880	280	W			8	Freiland	1,1			180	108			20,6	11,5	cl-ml
sachs 607.55gx	34	1510	270	W			5	Freiland	0,8			80	34			17,9	7,6	cl
sachs 607.56	34	1540	260	W			5	Freiland	1,2			384	307			35,2	15,8	cl-ml
sachs 607.60a	34	1660	270	W			5	Freiland	0,9			120	72			12,7	14,6	gm
sachs 607.63	34	1700	300	NW			8	Freiland	0,8			125	62			25,8	6,2	cl-ml
sachs 624.14c	34	1540	90	E			8	Freiland	1,7			900	810			33,9	36,0	cl-ml
sachs 624.14dx	34	1540	100	E			8	Freiland	0,9			120	72			19,1	9,2	cl-ml
sachs 624.46x	34	1520	80	E			5	Freiland	1,0			288	144			20,6	19,1	cl-ml
sachs 624.48x	34	1480	70	E			5	Freiland	1,0			198	79			14,8	20,4	cl-ml
sachs 604.18c	35	1600	290	W			8	Freiland	1,0			240	144			34,0	10,1	cl-ml
sachs 604.21a	35	1610	300	NW			8	Freiland	0,9			200	100			26,1	12,3	ol
sachs 604.22	35	1340	60	NE			5	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	22,0	NA
sachs 605.18b	35	1320	300	NW			5	Freiland	1,1			91	45			15,6	8,8	gc-gm
sachs 605.18c	35	1320	300	NW			5	Freiland	1,3			120	84			13,9	12,7	gc-gm
sachs 605.18d	35	1320	300	NW			5	Freiland	0,9			96	48			12,0	9,5	cl-ml
sachs 605.25d	35	1540	350	N			8	Freiland	0,6			90	27			11,0	12,9	NA
sachs 605.25e	35	1550	0	N			5	Freiland	0,8			72	36			12,1	11,1	cl-ml
sachs 605.25f	35	1540	0	N			8	Freiland	1,0			110	55			16,0	12,8	cl-ml
sachs 605.26b	35	1550	330	NW			4	Freiland	2,2			305	337			30,0	19,7	ol
sachs 605.27a	35	1460	290	W			8	Freiland	1,0			132	66			24,5	7,7	cl-ml
sachs 605.37	35	1360	320	NW			5	Freiland	1,6			200	200			20,6	13,6	gc-gm
sachs 605.40a	35	1290	350	N			5	Freiland	0,6			180	72			18,1	20,7	cl-ml
sachs 607.04b	35	900	260	W			5	Freiland	0,9			260	130			27,1	18,7	gc-gm
sachs 607.10c	35	1190	40	NE			5	Freiland	1,2			72	43			15,3	7,0	gc-gm
sachs 607.19	35	1270	0	N			6	Freiland	1,1			120	84			11,1	14,3	cl
sachs 607.22	35	1300	28	NE			2	Freiland	1,8			160	160			16,2	12,5	cl
sachs 607.28a	35	1300	40	NE			5	Freiland	1,2			144	125			12,9	12,0	cl
sachs 607.43b	35	1490	350	N			5	Freiland	0,8			130	52			17,4	12,5	ol
sachs 607.53	35	1300	230	SW			5	Freiland	1,0			88	44			11,3	8,7	cl
sachs 607.55f	35	1480	270	W			5	Freiland	1,7			112	112			16,7	9,9	cl-ml
sachs 607.62	35	1740	280	W			5	Freiland	1,1			156	94			15,0	14,9	cl-ml
sachs 607.83x	35	1340	310	NW			7	Freiland	0,6			140	42			13,2	15,2	ol
sachs 624.09a	35	1320	100	E			5	Freiland	1,1			160	128			17,0	11,3	gc-gm
sachs 624.09c	35	1300	110	E			5	Freiland	1,0			84	50			16,8	8,9	gm
sachs 624.17a	35	1400	100	E			2	Freiland	1,3			154	123			15,4	13,8	gc-gm
sachs 624.42x	35	1390	40	NE			2	Freiland	0,6			96	29			13,2	10,8	NA
sachs 604.12	36	1380	230	SW			8	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	20,0	NA
sachs 604.13	36	1440	260	W			8	Freiland	0,8			200	100			30,3	9,1	gc-gm
sachs 604.18a	36	1620	300	NW			8	Freiland	1,2			210	126			34,5	9,5	cl-ml
sachs 604.25f	36	1520	10	N			5	Freiland	0,7			360	144			33,5	16,9	cl-ml
sachs 604.31x	36	1660	340	N			5	Freiland	0,8			168	84			31,0	11,1	gc-gm
sachs 605.22	36	1480	300	NW			6	Freiland	0,6			288	115			37,0	13,1	cl
sachs 605.41c	36	1270	350	N			5	Freiland	1,5			150	135			17,2	14,7	gm
sachs 607.20	36	1280	0	N			5	Freiland	0,9			70	35			9,6	10,1	cl-ml
sachs 607.37	36	1330	30	NE			9	Freiland	1,2			60	42			11,9	8,9	gm
sachs 607.59d	36	1520	270	W			9	Freiland	1,2			75	60			14,9	7,2	cl-ml
sachs 607.59e	36	1540	290	W			5	Freiland	1,0			50	30			10,0	6,5	cl-ml
sachs 607.71x	36	1670	0	N			5	Freiland	1,1			120	72			14,2	12,4	gm
sachs 607.75x	36	1520	250	W			4	Freiland	1,4			100	80			15,6	9,9	gc
sachs 607.77x	36	1430	0	N			5	Freiland	1,5			64	58			10,9	10,8	gm
sachs 624.08	36	1420	90	E			8	Freiland	1,2			810	486			35,0	32,0	gc-gm
sachs 624.09b	36	1310	90	E			2	Freiland	0,9			286	172			25,9	15,2	cl-ml
sachs 624.13	36	1310	80	E			8	Freiland	0,7			800	320			55,0	21,5	cl-ml
sachs 624.25	36	1210	350	N			5	Freiland	0,7			112	45			19,2	8,5	cl-ml
sachs 624.40x	36	980	20	N			3	Freiland	0,7			90	36			12,9	10,9	gc-gm
sachs 624.47x	36	1520	80	E			5	Freiland	1,3			196	98			32,5	7,9	cl-ml
sachs 604.26	37	1520	300	NW			2	Freiland	0,6			162	49			20,5	11,3	cl-ml
sachs 605.25b	37	1570	350	N			7	Freiland	1,0			60	36			12,1	7,7	gc-gm
sachs 605.38	37	1310	350	N			6	Freiland	1,1			144	86			21,4	13,8	ol
sachs 605.40b	37	1270	330	NW			6	Freiland	0,8			112	56			15,4	9,3	cl-ml

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
sachs 605.41d	37	1280	350	N			5	Freiland	0,5			90	27			20,6	6,8	NA
sachs 605.41e	37	1280	350	N			5	Freiland	0,8			100	50			23,0	7,5	ol
sachs 605.48	37	1360	290	W			2	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	10,0	NA
sachs 607.39	37	1780	270	W			5	Freiland	1,4			244	170			23,1	18,2	gc-gm
sachs 607.59a	37	1550	270	W			8	Freiland	0,9			66	33			12,3	8,1	cl
sachs 607.59b	37	1540	290	W			5	Freiland	0,8			90	45			11,5	10,0	cl
sachs 607.59f	37	1530	290	W			5	Freiland	0,8			60	30			8,2	11,9	cl
sachs 624.43x	37	1520	10	N			7	Freiland	0,5			84	21			15,7	10,9	NA
sachs 604.38x	38	1740	330	NW			5	Freiland	0,4			108	22			10,8	13,0	NA
sachs 605.21	38	1380	350	N			4	Freiland	1,5			225	225			35,0	11,1	gc-gm
sachs 605.41b	38	1290	0	N			5	Freiland	1,1			60	36			12,7	8,3	cl-ml
sachs 607.38a	38	1720	280	W			8	Freiland	1,0			60	42			11,8	7,0	gc-gm
sachs 607.78x	38	1470	10	N			5	Freiland	1,2			180	90			15,8	18,1	gc-gm
sachs 624.16b	38	1470	50	NE			5	Freiland	0,7			290	145			32,5	14,5	cl-ml
sachs 624.17b	38	1400	100	E			2	Freiland	0,9			96	48			13,5	9,7	gc-gm
sachs 624.26	38	1200	350	N			2	Freiland	1,1			180	90			17,9	13,0	cl-ml
sachs 624.45x	38	1540	70	E			5	Freiland	0,4			140	28			15,9	11,9	NA
sachs 604.19	39	1640	310	NW			8	Freiland	0,9			126	63			11,3	15,8	cl-ml
sachs 604.25a	39	1540	50	NE			5	Freiland	0,7			384	154			22,0	28,5	cl
sachs 604.25b	39	1540	50	NE			5	Freiland	1,1			195	117			17,9	15,8	ol
sachs 604.25e	39	1520	30	NE			4	Freiland	0,6			270	81			35,0	11,6	gc-gm
sachs 605.01	39	990	330	NW			5	Freiland	1,1			54	33			11,3	7,7	gc-gm
sachs 607.46	39	1280	290	W			8	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			19,0	10,6	gc-gm
sachs 607.65	39	1350	270	W			4	Freiland	1,2			100	70			11,5	13,5	cl-ml
sachs 607.73x	39	1700	280	W			8	Freiland	0,8			144	72			20,4	12,6	gc-gm
sachs 607.76x	39	1530	260	W			5	Freiland	0,7			78	31			15,0	8,1	ol
sachs 624.09d	39	1300	80	E			2	Freiland	1,3			190	114			23,2	14,2	gc-gm
sachs 624.10	39	1360	110	E			2	Freiland	0,9			210	105			25,5	12,2	gc-gm
sachs 604.14b	40	1500	330	NW			8	Freiland	0,6			96	38			18,2	7,7	cl-ml
sachs 604.27d	40	1660	40	NE			4	Freiland	0,4			168	34			29,0	10,9	ol
sachs 604.34x	40	1580	350	N			5	Freiland	0,5			162	49			21,6	12,4	ol
sachs 605.39	40	1300	350	N			9	Freiland	0,9			140	70			24,8	11,2	gc-gm
sachs 607.72x	40	1850	280	W			2	Freiland	0,6			162	65			21,6	11,0	gm
sachs 624.11	40	1430	70	E			8	Freiland	0,8			108	65			19,6	7,1	gc-gm
sachs 624.12	40	1530	80	E			5	Freiland	1,6			352	352			35,5	15,2	cl-ml
sachs 624.15a	40	1560	80	E			2	Freiland	0,8			80	24			9,5	10,5	NA
sachs 624.15c	40	1560	80	E			5	Freiland	1,0			128	26			18,0	10,9	NA
sachs 624.44x	40	1550	50	NE			5	Freiland	0,7			54	22			7,6	9,8	NA
sachs 604.14a	41	1510	350	N			8	Freiland	1,1			225	112			38,0	12,9	cl-ml
sachs 604.25d	41	1530	40	NE			4	Freiland	1,0			345	173			18,7	26,4	gc-gm
sachs 604.32x	41	1670	350	N			5	Freiland	0,5			120	24			14,2	13,1	NA
sachs 607.43a	41	1490	350	N			5	Freiland	0,6			90	27			16,5	8,1	NA
sachs 607.48	41	1280	250	W			5	Freiland	k.A.			k.A.	k.A.			15,0	17,0	gc-gm
sachs 604.25c	42	1550	30	NE			4	Freiland	0,5			385	96			38,0	15,4	gc-gm
sachs 604.33x	42	1600	340	N			5	Freiland	0,5			180	45			23,3	15,9	ol
sachs 604.36x	42	1650	30	NE			5	Freiland	0,4			700	105			36,0	31,0	ol
sachs 604.39x	42	1470	50	NE			5	Freiland	1,2			420	210			36,0	16,2	gc-gm
sachs 607.27b	42	1320	0	N			9	Freiland	0,6			75	23			15,3	6,8	NA
sachs 607.55b	42	1420	250	W			8	Freiland	1,4			80	64			12,1	8,3	cl-ml
sachs 607.66	42	1660	270	W			7	Freiland	0,5			84	33			14,8	7,0	ol
sachs 624.15b	42	1560	80	E			5	Freiland	0,7			77	23			13,2	7,6	NA
sachs 604.37x	43	1720	330	NW			5	Freiland	0,6			144	57			21,6	10,2	gm
sachs 607.82x	44	1350	330	NW			5	Freiland	0,3			198	40			27,2	11,9	ol
sachs 604.27b	45	1660	50	NE			5	Freiland	0,4			110	22			14,6	13,6	NA
sachs 607.86x	30	1160	40	NE			5	Wald	1,0			169	85			15,1	16,2	cl-ml
sachs 607.17	32	1220	40	NE			5	Wald	3,5			1350	2500			51,0	49,0	cl-ml
sachs 604.07	34	1100	270	W			5	Wald	1,8			240	264			34,3	12,8	cl-ml
sachs 605.04d	34	1040	330	NW			5	Wald	1,4			143	114			15,2	13,6	cl-ml
sachs 605.09a	34	1180	310	NW			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	14,0	NA
sachs 605.19	34	1250	290	W			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			12,0	10,0	NA
sachs 605.20	34	1270	300	NW			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			15,0	15,0	NA
sachs 605.33	34	1230	30	NE			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	9,0	NA
sachs 605.34	34	1260	280	W			4	Wald	0,9			252	100			20,2	16,0	gc-gm
sachs 607.10a	34	1180	50	NE			6	Wald	0,6			120	48			14,9	13,9	cl-ml
sachs 607.25	34	1320	20	N			5	Wald	1,1			294	206			34,0	16,0	ol
sachs 607.85x	34	1150	0	N			5	Wald	0,7			375	113			29,0	17,2	gc-gm
sachs 607.87x	34	1140	20	N			5	Wald	1,6			200	200			31,8	10,2	gc-gm
sachs 604.16c	35	1460	270	W			8	Wald	1,1			240	144			48,0	8,6	cl
sachs 604.30x	35	1490	320	NW			2	Wald	0,6			180	54			17,9	16,5	cl-ml
sachs 605.04b	35	1080	330	NW			5	Wald	2,0			850	1100			53,0	22,0	gc

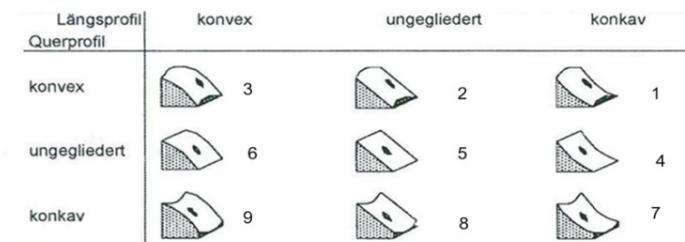
Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe (müNN)	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
sachs 605.04c	35	1060	330	NW			5	Wald	1,8			228	296			22,8	15,9	gc
sachs 605.04e	35	1060	330	NW			5	Wald	1,4			160	160			23,4	12,3	gm
sachs 605.04f	35	1060	330	NW			5	Wald	1,4			256	180			22,2	18,7	gc-gm
sachs 605.09b	35	1190	310	NW			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	20,0	NA
sachs 605.12b	35	1270	0	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			14,0	12,0	NA
sachs 605.35	35	1260	290	W			4	Wald	0,8			360	180			17,8	34,6	gc-gm
sachs 607.23b	35	1340	20	N			8	Wald	1,1			192	134			18,4	14,3	cl-ml
sachs 607.32	35	1240	350	N			2	Wald	1,8			390	390			31,6	19,6	cl-ml
sachs 607.40	35	1520	350	N			3	Wald	1,1			350	245			26,8	16,6	cl-ml
sachs 604.06a	36	1090	270	W			5	Wald	1,4			99	69			13,1	12,5	cl-ml
sachs 604.15b	36	1640	280	W			8	Wald	0,6			130	39			29,9	7,9	cl-ml
sachs 605.08	36	1090	330	NW			5	Wald	0,8			90	45			8,8	16,9	cl-ml
sachs 605.12c	36	1250	350	N			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			25,0	22,0	NA
sachs 605.13c	36	1260	10	N			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			25,0	10,0	NA
sachs 605.13d	36	1240	20	N			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	10,0	NA
sachs 605.25a	36	1560	340	N			5	Wald	1,6			140	98			23,6	9,7	ol
sachs 605.43b	36	1190	290	W			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	10,0	NA
sachs 607.01	36	1110	250	W			5	Wald	1,1			300	180			34,7	13,5	cl-ml
sachs 607.15	36	1090	240	SW			5	Wald	0,9			420	210			19,3	35,0	cl-ml
sachs 607.23a	36	1330	20	N			3	Wald	1,1			144	86			20,2	10,8	gc-gm
sachs 607.74x	36	1540	250	W			2	Wald	1,4			168	117			15,8	16,5	cl-ml
sachs 607.89	36	860	340	N			5	Wald	2,5			126	175			19,2	8,5	gc-gm
sachs 624.16a	36	1460	90	E			5	Wald	1,6			308	246			24,6	15,0	cl-ml
sachs 604.04	37	1510	280	W			5	Wald	1,3			150	120			23,4	9,1	gc-gm
sachs 604.06b	37	1120	270	W			5	Wald	1,7			350	280			38,0	16,7	cl-ml
sachs 604.09	37	1560	0	N			5	Wald	0,7			460	138			31,7	27,6	cl-ml
sachs 604.10	37	1370	300	NW			8	Wald	2,5			1250	1875			60,0	30,0	ol
sachs 604.17	37	1590	270	W			8	Wald	1,0			90	45			12,1	11,3	cl
sachs 605.05d	37	1215	340	N			5	Wald	1,4			242	218			25,1	12,2	gc-gm
sachs 605.05f	37	1220	340	N			5	Wald	0,8			77	31			12,7	9,7	gc-gm
sachs 605.10	37	1180	330	NW			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			12,0	9,0	cl-ml
sachs 605.14a	37	1280	20	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	30,0	NA
sachs 605.15b	37	1330	0	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			7,0	8,0	NA
sachs 605.24	37	1520	20	N			5	Wald	0,7			98	39			15,6	11,4	ol
sachs 605.26a	37	1560	340	N			5	Wald	1,0			80	48			13,4	11,6	cl-ml
sachs 605.50x	37	1070	350	N			2	Wald	1,2			192	154			19,7	14,0	gc-gm
sachs 607.41	37	1560	270	W			5	Wald	0,6			64	25			8,7	9,6	cl-ml
sachs 605.05e	38	1220	340	N			2	Wald	1,3			360	252			37,0	17,1	cl-ml
sachs 605.06b	38	1250	330	NW			2	Wald	1,8			198	236			26,6	13,4	gc
sachs 605.16b	38	1360	0	N			5	Wald	0,8			54	27			9,8	7,2	NA
sachs 605.28	38	1090	0	N			5	Wald	1,6			350	315			32,0	15,0	cl-ml
sachs 605.43c	38	1180	290	W			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	8,0	NA
sachs 607.16	38	1170	0	N			2	Wald	0,9			70	35			12,0	7,2	cl-ml
sachs 607.18	38	1240	350	N			3	Wald	0,5			72	22			12,0	10,9	NA
sachs 607.30	38	1170	330	NW			5	Wald	1,3			91	73			15,8	8,5	cl-ml
sachs 607.36	38	1230	0	N			2	Wald	1,5			110	99			11,5	12,0	cl-ml
sachs 607.47	38	1290	270	W			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			18,9	10,0	cl-ml
sachs 607.50	38	1210	250	W			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			40,0	16,0	NA
sachs 607.51	38	1190	250	W			2	Wald	1,2			240	168			24,4	15,4	cl-ml
sachs 624.05	38	1140	340	N			2	Wald	0,7			187	75			22,2	13,1	gc-gm
sachs 604.05e	39	1120	0	N			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			6,0	8,0	NA
sachs 604.08	39	1560	290	W			2	Wald	0,6			80	32			18,4	5,9	gc-gm
sachs 604.23	39	1350	70	E			5	Wald	0,8			720	288			25,2	42,0	gc-gm
sachs 605.05a	39	1240	340	N			5	Wald	1,2			135	95			11,7	17,9	gc-gm
sachs 605.05b	39	1250	340	N			5	Wald	0,8			90	45			10,9	11,3	gc
sachs 605.11	39	1160	340	N			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	23,0	gc-gm
sachs 605.12a	39	1270	350	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	8,0	NA
sachs 605.14c	39	1310	10	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			8,0	8,0	NA
sachs 605.17	39	1260	300	NW			5	Wald	1,5			400	280			20,2	24,8	cl-ml
sachs 607.21	39	1320	344	N			8	Wald	0,8			63	31			14,4	5,8	cl-ml
sachs 607.35	39	1210	350	N			5	Wald	1,0			170	102			19,2	15,4	cl-ml
sachs 607.45a	39	1500	280	W			5	Wald	0,6			63	25			11,4	7,6	NA
sachs 607.49a	39	1320	270	W			5	Wald	1,0			125	50			28,3	5,8	gm
sachs 624.06	39	1090	60	NE			5	Wald	1,4			190	171			24,8	11,5	cl-ml
sachs 604.02	40	1160	40	NE			2	Wald	1,2			192	134			18,9	13,1	cl-ml
sachs 604.03	40	1340	50	NE			5	Wald	0,5			60	21			11,9	6,9	NA
sachs 604.05a	40	1060	20	N			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			18,0	8,0	NA
sachs 604.05c	40	1090	20	N			5	Wald	1,0			63	32			9,3	11,9	cl-ml
sachs 604.05d	40	1110	10	N			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			12,0	12,0	NA
sachs 604.35x	40	1160	60	NE			5	Wald	0,7			286	143			28,4	18,6	cl-ml

Aufnehmer	Neigung [°]	Höhe [müNN]	Exposition [°]	Exposition als Richtung	Morphologie Längsprofil	Morphologie Querprofil	Morph.-Kl.	Vegetation	LG-Mächtigkeit [m]	Art des Lockermaterials	Tiefe [m]	Fläche [m²]	Volumen [m³]	Bewegungsart	Wasserführung (z.Zt. des Ereignisses)	Länge [m]	Breite [m]	Boden USCS
sachs 605.04a	40	1100	340	N			2	Wald	1,2			135	95			11,1	17,7	cl-ml
sachs 605.13a	40	1270	10	N			2	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			10,0	13,0	NA
sachs 605.14b	40	1280	10	N			5	Wald	0,5			80	20			11,1	12,5	NA
sachs 605.51x	40	1060	0	N			5	Wald	0,8			144	57			21,2	10,3	gc-gm
sachs 607.07a	40	900	310	NW			5	Wald	1,9			180	126			17,2	15,9	cl-ml
sachs 607.07b	40	860	280	W			5	Wald	1,4			175	122			28,4	8,0	gc-gm
sachs 607.08	40	900	40	NE			5	Wald	2,1			700	840			55,0	18,0	gc
sachs 607.09b	40	1070	20	N			5	Wald	1,0			70	35			12,7	8,8	gc-gm
sachs 607.11a	40	1020	40	NE			5	Wald	1,8			500	500			27,1	26,9	gc-gm
sachs 607.11e	40	990	40	NE			5	Wald	0,5			80	24			11,6	12,2	NA
sachs 607.13	40	1170	260	W			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			105,0	41,0	NA
sachs 607.24	40	1420	350	N			9	Wald	1,2			195	97			16,9	15,3	cl-ml
sachs 607.81x	40	1470	270	W			5	Wald	1,1			240	120			24,8	15,9	cl-ml
sachs 624.03	40	1100	350	N			2	Wald	0,8			300	120			40,0	13,0	gc-gm
sachs 604.05f	41	1140	30	NE			5	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			6,0	12,0	NA
sachs 605.04g	41	1110	330	NW			5	Wald	1,3			150	120			26,4	14,8	gc-gm
sachs 605.04h	41	1110	330	NW			4	Wald	1,6			350	315			28,1	16,9	ol
sachs 605.04i	41	1140	350	N			5	Wald	1,1			126	100			18,8	9,1	cl-ml
sachs 605.05c	41	1250	340	N			2	Wald	0,9			60	30			13,8	6,8	gc-gm
sachs 605.47	41	740	230	SW			5	Wald	1,5			500	500			38,0	29,0	gm
sachs 607.10b	41	1150	40	NE			5	Wald	1,2			176	106			24,9	10,8	gc-gm
sachs 607.11b	41	1020	40	NE			5	Wald	1,0			60	36			12,0	7,1	gc-gm
sachs 607.11d	41	990	40	NE			5	Wald	1,1			280	140			15,2	22,3	ol
sachs 607.12	41	1120	210	SW			3	Wald	1,1			88	53			12,4	15,8	cl-ml
sachs 607.33	41	1230	0	N			5	Wald	1,3			225	203			29,0	13,1	cl-ml
sachs 607.34	41	1220	340	N			5	Wald	1,2			80	56			8,3	10,2	ol
sachs 607.42b	41	1420	270	W			2	Wald	1,3			100	70			12,7	11,0	cl-ml
sachs 607.45b	41	1480	260	W			5	Wald	0,9			75	30			18,8	7,3	cl-ml
sachs 607.64	41	820	290	W			6	Wald	2,5			420	588			33,0	19,0	cl-ml
sachs 607.88x	41	1100	20	N			2	Wald	1,7			200	200			28,8	9,7	cl-ml
sachs 624.02	41	1100	350	N			2	Wald	0,7			54	22			10,2	7,5	NA
sachs 604.05b	42	1070	350	N			8	Wald	k.A.			k.A.	k.A.			20,0	16,0	NA
sachs 604.24a	42	1360	70	E			5	Wald	0,6			80	24			13,0	11,8	NA
sachs 605.42	42	1180	280	W			2	Wald	1,4			60	48			18,0	5,9	cl
sachs 605.43a	42	1180	290	W			2	Wald	0,5			120	24			18,9	10,2	NA
sachs 607.14a	42	1230	250	W			5	Wald	1,2			170	119			23,7	12,1	gc-gm
sachs 607.29	42	1180	0	N			5	Wald	1,0			60	30			13,9	5,7	cl-ml
sachs 607.31	42	1220	340	N			2	Wald	2,0			132	158			14,6	16,7	gc-gm
sachs 607.42a	42	1400	280	W			2	Wald	1,1			128	77			20,2	10,2	cl
sachs 607.80x	42	1480	260	W			5	Wald	1,0			405	160			18,0	24,7	cl-ml
sachs 624.29	42	1600	110	E			2	Wald	0,9			180	90			14,6	16,8	ol
sachs 605.06a	43	1300	320	NW			6	Wald	1,6			600	480			56,0	18,6	gm
sachs 607.05	43	900	280	W			8	Wald	1,4			180	144			21,4	11,1	gc-gm
sachs 607.14b	43	1240	260	W			8	Wald	0,8			100	50			13,9	10,5	cl-ml
sachs 607.84x	43	1350	320	NW			2	Wald	1,3			110	77			17,3	12,9	cl-ml
sachs 607.90	43	980	30	NE			5	Wald	1,0			132	79			16,4	13,1	gc-gm
sachs 607.91	43	990	30	NE			5	Wald	2,0			120	144			11,6	12,9	ol
sachs 605.46	44	750	10	N			5	Wald	1,8			240	288			20,0	18,5	ol
sachs 607.79x	44	1470	30	NE			5	Wald	0,7			91	36			16,4	9,8	cl-ml
sachs 607.49b	45	1300	250	W			6	Wald	1,2			300	150			35,0	12,0	ol

15 Perimeter  
1052 Einzeldaten  
durchschnittliche Hangneigung [°] 35,34  
durchschnittliche rel. Höhe [müNN] 1201,22



Morphologie, ausschließlich gültig für die Untersuchungsgebiete Napf 05, Appenzel 02, Sachseln, Praetigau und Entlebuch



Es ist nicht bekannt, ob es sich bei den vorhandenen Datenlücken (k.A.) um *echte* oder *unechte* Fehlerwerte gemäß Kapitel 4.1.3 handelt.

### **Anlage III**

Zusammenfassung von gemittelten Relieffaktoren  
historischer Hangbewegungen - Grundlage für  
Datenpool 3 der Wissensbasis des DSSs

## Relieffaktor Hangneigung

Autor (Untersuchungsgebiet)	gemittelte Hangneigung [°]
Beinsteiner & Mayer	37,75
Büch	31,35
Epple	32,97
Grancia	23,09
Hamberger (Melchtal)	38,14
Hamberger (Sachseln)	37,37
Hohensinn	31,83
Kelch	29,59
Krauer	39,41
Moser 1	34,36
Moser 2	29,98
O'Loughlin & Pearce	33,06
Polloni et al. (Valtellina-S. Antonio)	31,48
Polloni et al. (Valtellina-Sparse Slipis)	31,20
Polloni et al. (Valtellina-Trepalle)	31,90
Polloni et al. (Valtellina-Tresenda)	36,23
Rentschler	34,47
Rickli (Appenzell)	32,15
Rickli (Entlebuch)	30,68
Rickli (Napf 03)	37,39
Rickli (Napf 08)	34,69
Rickli (Prättigau)	32,28
Rickli (Sachseln)	37,34
Rieger	35,05
Schädler	39,42
Schoger	34,55
v. Wyl (Gersau)	34,03
v. Wyl (Melchtal)	30,86
Werlen (Eggiwil)	25,71
Werlen (Frutigen)	28,33
Werlen (Grindelwald)	28,89
Werlen (Napf)	28,67
Werner	37,52

Hinweise zum jeweiligen Untersuchungsgebiet bzw. zur Bewegungsform, auf die in Anlage III Bezug genommenen Hanginstabilitäten, finden sich in Anlage I.

## Relieffaktor Höhenlage

Autor (Untersuchungsgebiet)	gemittelte Höhenangaben [m üNN]
Beinsteiner & Mayer	1333,30
Büch	1232,50
Hamberger (Melchtal)	1181,80
Hamberger (Sachseln)	1255,50
Hohensinn	882,67
Moser 1	1526,00
Moser 2	980,00
Moser 3	1254,00
Rentschler	1272,02
Rickli (Appenzell 2003)	858,36
Rickli (Entlebuch 2008)	1127,13
Rickli (Napf 2003)	961,42
Rickli (Napf 2008)	1071,09
Rickli (Prättigau)	1728,04
Rickli (Sachseln)	1325,38
Schädler	1262,29
Schmid	989,10
Schoger	1083,73
v. Wyl (Gersau)	992,55
v. Wyl (Melchtal)	957,30
Werner	1199,01

## Relieffaktor Exposition

Exposition	Autor (Untersuchungsgebiet) - Häufigkeiten in %			
	Rickli (Napf 02)	Moser 1	Moser 2	Hamberger (Sachseln)
E	15,70	9,00	12,00	11,70
N	3,90	3,00	3,00	15,70
NE	11,80	1,00	15,00	15,30
NW	0,00	5,00	4,00	7,30
S	23,50	41,00	12,00	15,30
SE	21,60	28,00	15,00	7,30
SW	15,70	4,00	30,00	15,70
W	7,80	9,00	9,00	11,70

Exposition	Becht	Rickli (Appenzell)	Büch	Schädler
E	2,89	4,90	23,81	40,00
N	2,40	11,00	0,00	0,00
NE	7,21	0,00	7,14	11,43
NW	25,00	12,20	0,00	2,86
S	5,29	34,10	2,38	8,57
SE	7,69	23,20	47,62	11,43
SW	6,73	6,10	19,05	25,71
W	42,79	8,50	0,00	0,00

Exposition	Schmid	Kelch	Beinsteiner & Mayer	Hamberger (Melchtal)
E	1,00	20,10	16,67	18,00
N	2,00	15,40	16,67	4,00
NE	1,00	13,10	16,67	8,00
NW	2,00	8,90	0,00	3,00
S	57,00	6,10	16,67	15,00
SE	13,00	17,80	0,00	43,00
SW	19,00	16,30	33,33	6,00
W	7,00	2,30	0,00	3,00

Exposition	Hohensinn	v. Wyl (Gersau)	v.Wyl (Melchtal)	Rickli (Entlebuch)
E	6,67	5,89	24,32	29,79
N	6,67	0,00	0,00	2,13
NE	0,00	0,00	0,00	4,25
NW	0,00	0,00	0,00	2,13
S	40,00	78,43	29,73	17,02
SE	26,67	1,97	0,00	27,66
SW	13,33	11,74	5,41	2,13
W	6,67	1,97	40,54	14,89

Exposition	Rickli (Napf 05)	Rickli (Prättigau)
E	20,69	4,00
N	2,30	0,00
NE	8,05	0,00
NW	2,30	0,00
S	21,84	50,00
SE	21,84	12,00
SW	12,64	28,00
W	10,34	6,00

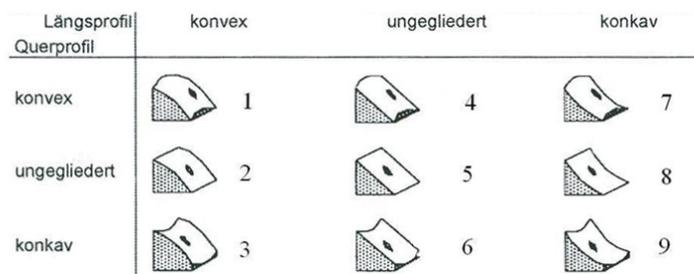
## Relieffaktor Morphologiekategorie

Morphologiekategorie gemäß Abb.	Autor (Untersuchungsgebiet) - Häufigkeiten in %			
	Krauer	Rickli (Sachseln)	Werlen (Eggiwil)	Werlen (Frutigen)
1	17,10	2,00	7,00	4,00
2	34,30	3,00	36,00	12,00
3	11,40	2,00	20,00	7,00
4	2,90	20,00	7,00	2,00
5	8,60	51,00	12,00	10,00
6	14,30	15,00	7,00	10,00
7	2,90	4,00	2,00	0,00
8	2,90	0,00	2,00	3,00
9	5,60	3,00	7,00	4,00

Morphologiekategorie	Schädler	Werlen (Grindelwald)	Werlen (Napf)	Carrara
1	6,67	3,00	14,00	3,00
2	30,00	35,00	38,00	7,50
3	23,33	6,00	10,00	0,60
4	0,00	1,00	7,00	4,40
5	6,67	37,00	15,00	43,80
6	26,67	8,00	12,00	6,50
7	0,00	0,00	0,00	1,00
8	0,00	9,00	3,00	12,10
9	6,67	1,00	1,00	21,20

Morphologiekategorie	Büch	Rickli (Appenzell)	Rickli (Entlebuch)	Rickli (Napf 08)
1	0,00	10,98	10,64	1,15
2	0,00	43,9	4,26	22,99
3	2,56	29,26	2,12	9,19
4	5,13	0,00	12,77	2,30
5	15,38	6,10	34,04	34,48
6	28,21	3,66	29,79	26,44
7	0,00	1,22	0,00	0,00
8	28,21	3,66	2,12	2,30
9	20,51	1,22	4,26	1,15

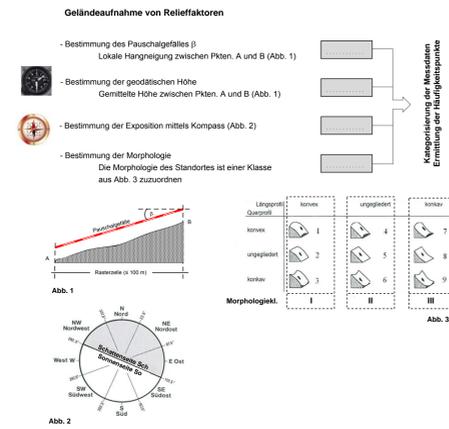
Morphologiekategorie	Rickli (Prättigau)
1	10,00
2	20,00
3	2,00
4	6,00
5	42,00
6	16,00
7	0,00
8	2,00
9	2,00



### Auswertungsformular des Decision-Support-Systems

Abdeckung der Beurteilungsfäche: Belegung des Untersuchungsgebietes mit quadratischen Rasterflächen von s 1 ha. Die eigentliche Beurteilungsfäche ist um ca. 100 m bergauf und auf beiden Seiten jeweils um 50 m - rechtswinklig zur Falllinie - zu erweitern. Alle entscheidungsgleitenden Faktoren sind für jedes Rasterfeld nach vorliegendem Aufnahmeformular zu evaluieren.

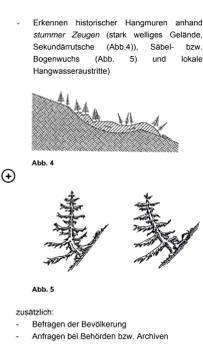
#### EE I Abschätzende Beurteilung



#### Häufigkeitsverteilung

Näigung (°)	Höhe (m üNN)	Exposition	Morphologie	Häufigkeitspunkte
< 29,9	750 - 1400	Sch	I	45
> 41	750 - 1400	Sch	I	3
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	0
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	5
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	I	1
< 29,9	750 - 1400	So	I	3
30 - 40,9	750 - 1400	So	I	13
> 41	750 - 1400	So	I	6
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	2
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	I	3
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	I	1
< 29,9	750 - 1400	Sch	II	14
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	II	78
> 41	750 - 1400	Sch	II	18
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	0
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	30
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	II	11
< 29,9	750 - 1400	So	II	20
30 - 40,9	750 - 1400	So	II	68
> 41	750 - 1400	So	II	16
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	1
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	II	20
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	II	3
< 29,9	750 - 1400	Sch	III	9
30 - 40,9	750 - 1400	Sch	III	31
> 41	750 - 1400	Sch	III	5
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	17
> 41	< 750 bzw. > 1400	Sch	III	1
< 29,9	750 - 1400	So	III	10
30 - 40,9	750 - 1400	So	III	35
> 41	750 - 1400	So	III	6
< 29,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	2
30 - 40,9	< 750 bzw. > 1400	So	III	12
> 41	< 750 bzw. > 1400	So	III	2

#### Identifikation der historischen Murtätigkeit



#### Wichtung des Gefährdungspotentials

Häufigkeitspunkte	historische Murtätigkeit	wirtschaftliches & gesellschaftliches Risiko <sup>10)</sup>	Gefährdungspotential
< 10	nein	gering	vernachlässigbar
< 10	nein	hoch	
< 10	ja	gering	gering
< 10	ja	hoch	
10 - 60	nein	gering	mittel
10 - 60	nein	hoch	
10 - 60	ja	gering	
10 - 60	ja	hoch	hoch
> 60		zu vernachlässigen	

Dem Anwender steht frei, das System zu verlassen.

weiter auf EEII

#### Anmerkungen zu EE I bis EE III

<sup>10)</sup> Das wirtschaftliche und/oder gesellschaftliche Risiko ist entsprechend dem geplanten bzw. existierenden Investitionsvolumen der Rasterzelle in die Abschätzung einzubeziehen. Die Wichtung des wirtschaftlichen und/oder gesellschaftlichen Risikos ist individuell vom Anwender bzw. Nutzer vorzunehmen. Er kann gezielt einzelne Bereiche seines Untersuchungsgebietes mit einer geringeren oder höheren Gewichtung versehen.

Das gesellschaftliche Risiko ist allein an der Gefährdung von Menschen zu orientieren.

<sup>11)</sup> Optimales Weidemanagement: Viehbesatz ist dem Weidestandard angepasst (Beweidung in Camps; geringe Besatzzeiten; Behirfung); Großflächige, anthropogene Einflussnahme schließt das Auftreten von Vegetationszustandskategorie Z1 aus.

<sup>12)</sup> Für jeden Einflussfaktor wird die vorgesehenen Gesamtpunktzahl entweder Spalte I oder Spalte II zugeordnet. Für eine Evaluierung des Oberflächenabflusses werden nur die Punkte der Spalte II addiert.

<sup>13)</sup> Der Tongehalt des Bodens ist aus EE I zu übernehmen. Erst wenn dieser über 30 % liegt, ist der Plastizitätsindex I<sub>p</sub> anhand von Probenmaterial aus dem Inneren der Hangaufgabe gemäß dem Ablaufschema in EE II zu bestimmen.

<sup>14)</sup> Die visuelle Beurteilung des anthropogenen Risopotentials beinhaltet die Aufnahme von Zugrassen entlang von Versorgungswegen.

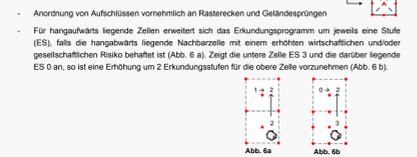
<sup>15)</sup> Großflächige, anthropogene Einflussnahme schließt die Existenz von Vegetationszustandskategorie Z1 aus.

<sup>16)</sup> Die visuelle Beurteilung anthropogener Verdichtung beinhaltet die Aufnahme von stark besiedelten Amdischen und von Versorgungswegen - befahren mit schweren Maschinen, u.a. zur Holzrückung.

#### EE II Quantitative Beurteilung

##### Probennahme

Gefährdungspotential aus EE I	Erkundungsstufe (ES)	Anzahl Probenpunktzaha
vernachlässigbar	0	0
gering	1	2
mittel	2	5
hoch	3	9

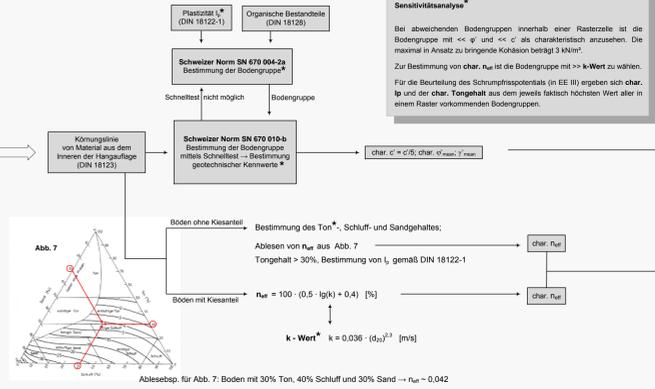


Herstellung von Aufschlüssen mittels motorgetriebenem Rammkornbohrer:

Bestimmung der Mächtigkeit h der Hangaufgabe

Entnahme von Probenmaterial aus dem Inneren der Hangaufgabe; Mischprobenbildung im Abstand von 1 - 2 m um den jeweiligen Probenpunkt. Es ist dabei auf die Entnahme in jeweils gleicher Profiltiefe zu achten. Entnahmemengen pro Probenpunkt ca. 20 kg, Komponenten > 63 mm sind aus der (Misch-) Probe zu entfernen.

##### Bestimmung charakteristischer, geotechnischer Parameter



##### Berechnung der Hangstabilität

Unter Annahme böschungparalleler Auflagerung der Hangaufgabe bis zur Geländeoberkante

$$q = \frac{\tan \alpha' + c' \cdot \frac{1 + \tan \beta}{\gamma' \cdot h}}{\left(1 + \frac{10}{\gamma'}\right) \cdot \tan \beta}$$

β ist der Geländeaufnahme in EE I zu entnehmen  
h = Mächtigkeit der Hangaufgabe

##### Beurteilung der Standsicherheit

η<sub>1</sub> < 1,0 nicht standicher → Gefährdung beachtlich  
 η<sub>1</sub> ≥ 1,0 standicher → Gefährdung vernachlässigbar

Bei Vorhandensein von Z1 kann η<sub>1</sub> um 0,1 erhöht werden.

##### Quellverzeichnis

- Normen**
- DIN 18122: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausfallgrenzen, 07/1997
  - DIN 18123: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Konglomeratverteilung, 11/1996
  - DIN 18126: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Gülterverlustes, 12/2002
  - SN 670 010-b: Bodenkenntlern, 12/1998
  - SN 670 004-2a: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Bestimmung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, Teil 2: Grundlagen der Bodenklassifizierung, 12/2005
- Abbildungen**
- Abb. 2: Bodenkundliche Kartieranleitung 2005
  - Abb. 3: Rickli 2001, modifiziert
  - Abb. 4: Nedisrck 2007
  - Abb. 5: Nedisrck 2007
  - Abb. 7: Langguth & Voigt 2004
  - Abb. 8: BayLW 2004

#### EE III Qualitative Beurteilung

##### Gehölzarmierung

Nur in nachfolgender Reliefaktorentabelle aufgeführte Standorte mit Armierungseffekten aus vorherrschendem Gehölz erfahren eine Gehölzstandsuntersuchung.



##### Geogen und anthropogen bedingte Erosionsprozesse

##### Oberflächenabflussverhalten

Einflussparameter	Spalte I Oberflächenabfluss zeitverzögert & gering	Spalte II Oberflächenabfluss unmittelbar & hoch
Durchlässigkeitbeiwert k (1 Punkt)	sehr stark durchlässig bis durchlässig (k > 10 <sup>-3</sup> m/s)	durchlässig bis sehr schwach durchlässig (k < 10 <sup>-3</sup> m/s)
Anthropogen verursachte Bodenverdichtung (1 Punkt)	keine anthropogene Einflussnahme bzw. geringe anthropogene Einflussnahme; optimales Weidemanagement <sup>17)</sup> ; planierte Pisten (< 180 m Länge)	Starke anthropogene Einflussnahme; schlechtes Weidemanagement <sup>17)</sup> ; planierte Pisten (> 180 m Länge)
Vegetation (3 Punkte)	Z1 oder Z2 Freiland	Z3 oder vegetationslos
Geometrie des Einzugsgebietes (3 Punkte)	talartig (s. Abb. 6 A)	kesselartig (s. Abb. 6 B)
Summe der Bewertungspunkte aus Spalte II <sup>18)</sup> :		Σ =

Oberflächenabfluss gering → 0 - 3 Punkte  
 Oberflächenabfluss hoch → 4 - 6 Punkte

Gefährdung vernachlässigbar  
 Dem Anwender steht frei, das System zu verlassen.

##### Aufnahme von Rissstrukturen

Geogene Schrupfrisse Tongehalt<sup>19)</sup> > 30%; I<sub>p</sub> > 18%

nicht vorhanden → Gefährdung vernachlässigbar  
 großflächig vorhanden → Gefährdung beachtlich (ggf. Wassersysteme kartieren)

Anthropogene Zugrisse - visuelle Aufnahme<sup>20)</sup>

lokal vorhanden → Gefährdung beachtlich (ggf. Wassersysteme kartieren)  
 nicht vorhanden → Gefährdung vernachlässigbar



##### Geogen und anthropogen bedingte Porenwasserüberdruckbildungen

##### Porenwasserüberdruckbildungen

Einflussparameter	Durchlässigkeitbeiwert k	Durchlässigkeit bis durchlässig (k > 10 <sup>-3</sup> m/s)	Durchlässigkeit bis sehr schwach durchlässig (k < 10 <sup>-3</sup> m/s)
Durchlässigkeitbeiwert k	sehr stark durchlässig bis durchlässig (k > 10 <sup>-3</sup> m/s)	durchlässig bis sehr schwach durchlässig (k < 10 <sup>-3</sup> m/s)	durchlässig bis sehr schwach durchlässig (k < 10 <sup>-3</sup> m/s)
Anthropogen verursachte Bodenverdichtung	keine anthropogene Einflussnahme bzw. geringe anthropogene Einflussnahme; optimales Weidemanagement <sup>17)</sup> ; planierte Pisten (< 180 m Länge)	keine anthropogene Einflussnahme bzw. geringe anthropogene Einflussnahme; optimales Weidemanagement <sup>17)</sup> ; planierte Pisten (> 180 m Länge)	keine anthropogene Einflussnahme bzw. geringe anthropogene Einflussnahme; optimales Weidemanagement <sup>17)</sup> ; planierte Pisten (> 180 m Länge)
Vegetation	Z1	Z2 bzw. Z3, vegetationslos oder Freiland	Z2 bzw. Z3, vegetationslos oder Freiland

Gefährdung vernachlässigbar  
 Dem Anwender steht frei, das System zu verlassen.

Lokalisierung der Gefährdung

##### Aufnahme lokaler Bodenverdichtungen

Anthropogen verursachte Bodenverdichtung<sup>21)</sup> - visuelle Aufnahme

lokal vorhanden → Gefährdung beachtlich (ggf. kartieren)  
 nicht vorhanden → Gefährdung vernachlässigbar

##### Aufnahme der Morphologie

Überhang α > β → Gefährdung beachtlich (ggf. kartieren)

Unterhang β < α → Gefährdung beachtlich (ggf. kartieren)

Überhang α < β → Gefährdung beachtlich (ggf. kartieren)

Unterhang β > α → Gefährdung vernachlässigbar

