

Gefährdungsanalyse für Hangbewegungen

von Michael Ruff, Markus Kühn und Kurt Czurda

Die Autoren

Dr. Michael Ruff, geboren 1972 in Füssen, Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe mit dem Schwerpunkt Ingenieurgeologie, Diplomabschluss 2000, als Diplomarbeit bearbeitete er eine Kartierung in der südlichen Vorarlberger Flyschzone (Schoppennau). Anschließend Promotion am Lehrstuhl für Angewandte Geologie über das Gebiet Hochtannberg und Arlberg (Projekt Georisikokarte Vorarlberg), zur Zeit Anstellung bei der Ingenieure Bart AG, St. Gallen.

Dipl.-Geol. Markus Kühn, geboren 1975 in Pforzheim, Studium der Geologie an der Universität Karlsruhe mit Schwerpunkt Ingenieurgeologie. Diplom 2004, Inhalt der Diplomarbeit war eine geologische Kartierung sowie eine GIS-gestützte Modellierung potenziell gefährdeter Rutschungsbereiche im Großen Walsertal. Zur Zeit Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität in Karlsruhe.

Prof. Dr. Dr. K. Czurda, Studium der Geologie und Mineralogie an der Universität Innsbruck und Heidelberg sowie Bauingenieurwesen an der TU Budapest. Promotion in Geologie an der Universität Innsbruck und Geotechnik an der TU Budapest. Habilitation in Angewandter Geologie an der Universität Innsbruck. Postdoktorale Aufenthalte in Kanada und Zürich, Gastprofessuren in Japan, Thailand und Salzburg. Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Geologie, Institutsleiter des Geologischen Instituts und Dekan der Fakultät für Bio- und Geowissenschaften an der Technischen Universität Karlsruhe.

Außer von den Autoren wurden die zahlreichen Fotos und geologischen Informationen von folgenden Diplomanden zusammengetragen: Matthias Leibing, Oliver Gast, Marcel Fulde, Nadine Hawelka, Georg Hils und Christian Schanz. Das Pilotprojekt im Bregenzerwald wurde von Dr. Wolf Kassebeer geplant und ausgeführt. Ihnen allen gilt ein besonderer Dank.

**VORARLBERGER
NATURSCHAU**

18

SEITE 5 – 96

Dornbirn 2005



Inhaltsverzeichnis

<i>Abstract</i>	8
<i>Kurzfassung</i>	9
<i>1. Einleitung</i>	10
<i>2. Was ist ein Georisiko?</i>	11
2.1 Definitionen	11
2.2 Risiko-Management	12
<i>3. Abriss der Geologie Vorarlbergs</i>	13
3.1 Eine kurze Geschichte der Alpen	14
3.2 Überblick der geologischen Einheiten in Vorarlberg	17
3.2.1 Silvretta Kristallin	17
3.2.2 Nördliche Kalkalpen (NKA)	17
3.2.2.1 Muschelkalk Gruppe	20
3.2.2.2 Hauptdolomit Formation	20
3.2.2.3 Kössener Formation	21
3.2.2.4 Lechtal Formation	24
3.2.3 Arosa-Zone	24
3.2.4 Rhenodanubischer Flysch	25
3.2.4.1 Reiselberger Sandstein	26
3.2.4.2 Planknerbrücke Formation	27
3.2.5 Feuerstätter-Zone (Wildflysch)	28
3.2.6 Helvetikum und Ultrahelvetikum	28
3.2.6.1 Schrattenkalk Formation	29
3.2.6.2 Quintner Kalk Formation	29
3.2.6.3 Zementstein Formation	31
3.2.7 Molasse	31
3.2.7.1 Konglomerate (Nagelfluh)	31
3.2.7.2 Bausteinschichten	32
3.2.7.3 Weissachsichten	33
3.2.7.4 Granitische Molasse	34
3.3 Quartär	34
3.3.1 Das Pleistozän (1,77 Mio. Jahre – 11000 Jahre)	35
3.3.2 Postglazial – Das Holozän (10.300 Jahre – heute)	36
3.3.2.1 Moränenmaterial	36
3.3.2.2 Postglaziale Schotter	37
3.3.2.3 Hangschutt	38
3.3.2.4 Schwemmfächer	40
3.3.2.5 Talfüllung	40
<i>4. Typische Massenbewegungen</i>	42
4.1 Fallen	42
4.2 Kippen	44
4.3 Rutschen	44
4.4 Fließen	47
4.5 Kriechen	48
<i>5. Datengrundlage der Gefährdungsanalyse</i>	49
5.1 Betrachtete Faktoren	49
5.2 Datenverarbeitung	49
5.2.1 Vektoren contra Raster	50

5.3 Eingabedaten	52
5.3.1 Lithologie	53
5.3.2 Abstand zu Störungen	55
5.3.3 Scheinbares Einfallen	56
5.3.4 Hangneigung und Exposition	57
5.3.5 Vegetation	58
5.3.6 Erosion	59
6. <i>Gefährdung Hangrutschungen</i>	60
6.1 Die Indexmethode	60
6.2 Indizierung der Ebenen	62
6.2.1 Hangneigung	62
6.2.2 Exposition	63
6.2.3 Lithologie	64
6.2.4 Abstand zu Störungen	66
6.2.5 Scheinbares Einfallen	66
6.2.6 Vegetation	67
6.2.7 Erosion	67
6.3 Indizierung innerhalb der Gruppen	68
6.3.1 Gruppe Morphologie	68
6.3.2 Gruppe Geologie	68
6.3.3 Gruppe Umwelt	68
6.4 Indizierung der Gruppen	69
6.5 Darstellung und Bewertung der Gefährdungskarte	70
7. <i>Gefährdung Felsstürze</i>	73
7.1 Theoretische Grundlagen	73
7.2 Ein GIS-Modell für Felsstürze	75
7.2.1 Bestimmung des Abbruchgebietes	76
7.2.2 Bestimmung der Trajektorien	77
7.2.3 Bestimmung des Ablagerungsgebietes	77
7.3 Bewertung des Modells	79
8. <i>Vulnerabilität</i>	80
8.1 Gefährdete Objekte in Vorarlberg	81
8.2 Indizierung und Darstellung der Vulnerabilität	82
9. <i>Risiko</i>	84
9.1 Inventarisierung	84
9.2 Erstellung der Risikokarten	84
9.3 Potenzielle Nutzer der Risikokarten	86
9.4 Möglichkeiten der Risiko-Minderung	87
9.5 Konzept für die landesweite Ausweitung von Georisiken in Vorarlberg	88
9.5.1 Schritt 1: Datenerfassung	88
9.5.2 Schritt 2: Erstellung der ersten Risikokarte	89
9.5.3 Schritt 3: Erfassung von Detailinformationen	89
9.5.4 Schritt 4: Erstellung der detaillierten Risikokarten	89
10. <i>Resümee</i>	90
11. <i>Danksagung</i>	90
12. <i>Literatur</i>	91

Abstract

The aim of the project «Geohazard Map Vorarlberg» was hazard and risk assessment using Geographic Information Systems (GIS) at a regional scale. A transparent method of hazard assessment should be documented, which is using mainly existing data and is applicable for other alpine regions.

Geological and geotechnical maps have been created to identify causes and mechanisms of active mass movements. The study areas lie within the geologic units of Molasse, Helvetikum, Rhenodanubian Flysch und Northern Calcareous Alps. Quaternary sediments, like slope debris and moraines, are of local importance. The active mass movements were gathered in a landslide inventory and digitised via ArcGIS together with the maps. For the hazard assessment the formations were classified according to their lithological behaviour. All data were analysed as grids with a cell size of 25 meters.

Two types of mass movements imply a geological hazard: sliding and falling. Because of the different mechanical behaviour, both types have to be considered separately at first. In reference to the regional scale, the susceptibility to landslides was divided into five categories (very low, low, medium, high, very high). The hazard assessment for slides was accomplished using an index method. Comparing the preparatory factors to the landslide inventory with bivariate statistics, susceptibility indices for the layers lithology, bedding, faults, slope angle, aspect, vegetation and erosion were estimated. In a three step iterative method the layers were combined into a susceptibility map. Hazard areas of rockfalls were estimated with a cost analysis of the movement of rolling rock samples. Potential source areas of falling material were extracted out of the Digital Elevation Model. A cost grid was calculated on the basis of slope angle and rolling friction. Interpreting the distribution of the cost calculation, a susceptibility map was constructed.

In relation to landuse and infrastructure a vulnerability map was created also according to five different classes. The overlay of susceptibility and vulnerability leads to the risk map. In this map, the areas of increased risk are exposed objectively on a regional scale. The constructed maps give an insight into the hazard situation for users without detailed knowledge about geology. Therefore these maps represent a useful tool for spatial planning. Local population can be informed about geologic hazards of their homelands, leading to a decrease of risk on the long run.

The studies were financed by the Federal Government of Vorarlberg and the Inatura Museum Dornbirn.

Key words: Landslides, rockfall, hazard assessment, GIS, index method, Vorarlberg, Austria

Kurzfassung

Ziel des Projektes «Georisikokarte Vorarlberg» war eine Gefährdungs- und Risikoanalyse von Massenbewegungen mittels Geographischer Informationssysteme (GIS) in einem regionalen Maßstab. Es sollte eine transparente Methode der Bewertung geologischer Risiken erarbeitet werden, die möglichst vorhandenes Datenmaterial nützt und für größere Regionen der Alpen anwendbar ist.

Um die Mechanismen aktiver Massenbewegungen zu erfassen wurden umfangreiche geologische und geotechnische Kartierungen durchgeführt. Die Untersuchungsgebiete lagen hierbei innerhalb der geologischen Einheiten von Molasse, Helvetikum, Rhenodanubischem Flysch und Nördlichen Kalkalpen. Dazu sind quartäre Lockergesteine wie Hangschutt und Moränenmaterial von lokaler Bedeutung. Die geologischen Formationen wurden für die Analyse nach ihren lithologischen Eigenschaften klassifiziert.

Alle Daten wurden als Raster mit einer Zellengröße von 25 Metern verarbeitet. Eine Gefährdung besteht hauptsächlich durch zwei Arten von Massenbewegungen: Rutschungen und Felsstürze. Wegen der unterschiedlichen Mechanik dieser Bewegungsarten musste die Analyse für beide Fälle zunächst getrennt erfolgen. Aufgrund der regionalen Betrachtung wurde die Suszeptibilität für Massenbewegungen in fünf Stufen unterteilt (sehr schwach, schwach, mittel, stark, sehr stark). Die Rutschungen wurden mit einer Indexmethode bearbeitet, in welcher die vorbereitenden Faktoren Lithologie, Störungen, Schichtlagerung, Hangneigung, Exposition, Vegetation und Erosion eingingen. Bivariate statistische Vergleiche der Ebenen mit der Ereigniskarte ergaben die Suszeptibilität für gleitende Bewegungen. In einem dreistufigen Verfahren wurden die Ebenen zu einer Suszeptibilitätskarte vereinigt. Die Gefährdung auf Grund von Felsstürzen bzw. Steinschlag konnte mit einer Kosten-Analyse der rollenden Bewegung eines Körpers realisiert werden. Dabei wurden potenzielle Abrissbereiche aus dem digitalen Höhenmodell extrahiert und ein Kostengrid aufgrund der Parameter Hangneigung und Rollreibungskoeffizient erstellt. Aus diesen Informationen können die Kosten für alle theoretisch möglichen Trajektorien beginnend von einer Quellzelle berechnet werden. Die statistische Analyse der Kostenverteilung führte zu der zweiten Suszeptibilitätskarte.

Die Vulnerabilität des Gebietes wurde unter Berücksichtigung der Landnutzung und der Infrastruktur ebenfalls qualitativ in fünf Stufen unterteilt. Die Überlagerung der Suszeptibilität mit der Vulnerabilität ergab eine Risikokarte. Dadurch wurden objektiv Bereiche mit erhöhtem Risiko regional ausgewiesen. Die so erstellten Karten ermöglichen Personen, die über wenig geologisches Hintergrundwissen verfügen, einen Einblick in die lokale Gefährdung. Damit geben sie eine wertvolle Hilfestellung bei der Raumplanung. Außerdem bieten sie die Möglichkeit, die ansässige Bevölkerung über die Gefahren zu informieren und so langfristig das Risiko zu mindern.

Das Projekt wurde finanziert vom Amt der Vorarlberger Landesregierung und der Inatura Dornbirn.

1. Einleitung

Vorarlberg ist ein wirtschaftlich hoch industrialisiertes Bundesland und eines der beliebtesten Wohn- und Urlaubsgebiete Österreichs. So werden die Talschaften Vorarlbergs entlang von Bregenzerache, Lech, Lutz, Alfenz und Ill intensiv als Siedlungs- und Tourismusraum genutzt. Diese Täler sind jedoch durch natürliche Denudationsprozesse gefährdet: Felsstürze, Steinschlag, Rutschungen, Muren und andere Arten von Massenbewegungen werden immer Teil des Lebens in den Alpen sein. Um die bestehenden Siedlungen zu schützen und die Bebauung gefährdeter Bereiche zu verhindern, ist eine räumliche Vorhersage von Massenbewegungen notwendig.

Der Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (AGK) arbeitete in Kooperation mit der Inatura Dornbirn und der Vorarlberger Landesregierung von 1999-2004 am Projekt «Georisikokarte Vorarlberg». Ziel des Projektes war ein flächendeckendes, geowissenschaftliches Kartenwerk der Vorarlberger Talschaften. Es wurden geologische Karten und Gefährdungskarten erarbeitet, die in das Geographische Landes-Informationssystem (VoGIS) integriert werden. Das Kartenwerk stellt ein Instrument für die regionale Siedlungs- und Raumplanung dar. Es soll nicht nur Ingenieuren und Raumplanern, sondern auch lokalen Behörden und der ansässigen Bevölkerung einen ersten objektiven Eindruck über Naturgefahren geben.

Das Verständnis der Naturgefahren an sich beginnt mit der genauen Beobachtung der Ereignisse und der dazu führenden Mechanismen. Da hierbei die Geologie des Untergrundes eine wichtige Rolle spielt, wird der Geologie Vorarlbergs ein ausführliches Kapitel gewidmet. Innerhalb der letzten fünf Jahre wurden zahlreiche Kartierungen im Bregenzerwald, im Hochtannberg/Arllberg Gebiet und im Großen Walsertal durchgeführt. Diese Feldarbeiten dokumentieren sowohl die Geologie als auch Massenbewegungen aktuell und detailliert. Die Ergebnisse dieser Geländearbeiten sollen hier für ein breites Publikum übersichtlich zusammengefasst werden.

Die vorliegende Arbeit ist ein Zwischenergebnis des Forschungsprojektes. Für eine umfassende Betrachtung des Landes fehlen noch die geologisch und wirtschaftlich besonderen Regionen des Klostertals und des Montafons. Es wird von uns eine Methode vorgeschlagen, wie die wichtigsten Naturgefahren – die ihren Ursprung in der Geologie des Untergrundes haben – in einem regionalen Maßstab erfasst und Risiko-Bereiche in Vorarlberg ausgewiesen werden können. In welcher Weise diese Methode für die Zwecke der Landesregierung angewendet wird, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch offen. Wir sind jedoch der Meinung, dass eine vollständige Bearbeitung des gesamten Bundeslandes langfristig für alle Bürger zu einer Verringerung des Risikos durch Naturgefahren und zu einem wertvollen Instrument der Raumplanung führt.

2. Was ist ein Georisiko?

Der Begriff Georisiko wird je nach Betrachtungsweise unterschiedlich verwendet. Deshalb soll zunächst eine Definition der in dieser Arbeit gebrauchten Begriffe erfolgen und danach ein mögliches Risiko-Management aufgezeigt werden.

2.1 Definitionen

Die Definitionen sind in *Tabelle 1* aufgeführt. Es wurden vor allem Begriffe verwendet, die international gebräuchlich sind (International Union of Geological Sciences 1997) und auch in den Planungen der Europäischen Union (EU-MEDIN) verwendet werden.

Begriff (dt.)	Begriff (engl.)	Definition
Gefahr	Danger	Der Begriff beschreibt das Phänomen (Ereignis) selbst, also die geometrischen und mechanischen Eigenschaften.
Gefährdung	Hazard Susceptibility	Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine potenzielle Gefahr zeitlich (hazard) oder räumlich (susceptibility) eintritt.
Wahrscheinlichkeit	Probability	Die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses innerhalb einer bestimmten Zeitspanne.
Intensität	Intensity	Das Ausmaß und die Reichweite des Ereignisses.
Gefährdete Objekte	Elements of risk	Alle Objekte (Gebäude, Straßen, Agrarflächen etc.) oder Personen, die von einer Gefahr bedroht werden.
Vulnerabilität	Vulnerability	Die Verletzbarkeit eines Objektes durch ein Ereignis in Relation zur Intensität.
Risiko	Risk	Ein Maß für die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkungen eines Unglücks auf Gesundheit, Besitz oder Umwelt.

Tab. 1: Definitionen der wichtigsten Begriffe rund um das Georisiko (RUFF 2005).

Eine Massenbewegung (z.B. ein Felssturz) stellt also eine Gefahr dar, welche durch ihre geometrischen Ausmaße bzw. durch ihre Geschwindigkeit beschrieben werden kann (siehe *Kap. 5*). Ein einzelnes, abgrenzbares Phänomen einer Gefahr wird auch als Ereignis bezeichnet.

Das Risiko für Personen oder Gebäude setzt sich somit aus mehreren Faktoren zusammen (*Tabelle 2*):

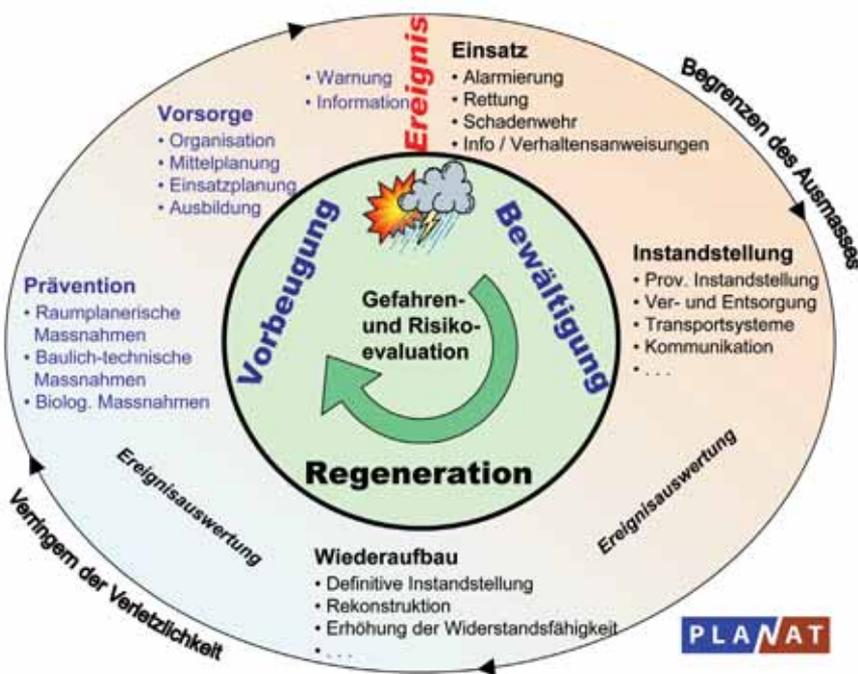
Tab. 2: Fragen zu Ereignis, Auswirkungen und Risiko.

Wo kann ein Ereignis auftreten? Wie weit reicht das Ereignis?	Gefährdung	Risiko
Wie oft kommt ein Ereignis vor?	Wahrscheinlichkeit	
Geschieht das Ereignis plötzlich oder langsam? Halten Baumaßnahmen das Ereignis auf?	Intensität	
Welche Objekte sind von dem Ereignis betroffen? Wie viele Personen befinden sich in dem Objekt?	Gefährdete Objekte	
Wie groß ist der Wert der Objekte? Wie groß ist der mögliche Grad der Zerstörung?	Vulnerabilität	

2.2 Risiko-Management

Es muss davon ausgegangen werden, dass Massenbewegungen ein natürlicher Prozess in den Alpen sind, der nicht verhindert werden kann. Deshalb muss versucht werden, das Risiko für Menschen so weit wie möglich zu reduzieren. Als Beispiel für das Leben mit dem Risiko kann die Schweiz herangezogen werden. Hier wurde von staatlicher Seite versucht, einen Risikokreislauf zu definieren, der die Verantwortlichen des jeweiligen Bereichs in eine Handlungskette einbinden soll. Das Konzept des Georisiko-Managements ist in *Abbildung 1* dargestellt.

Abb. 1: Der Risiko-kreislauf für Natur-gefahren in der Schweiz (Quelle: www.planat.ch).



In dieser Grafik ist ganz richtig dargestellt, dass in unserer Gesellschaft das Risiko in der Regel so lange ignoriert wird, bis ein Schadensereignis auftritt. So haben z.B. die extremen Niederschläge des Jahres 2002 – die in den Alpen zu zahlreichen Hangrutschungen und im weiteren Vorland zu einem Jahrhundert-Hochwasser geführt haben – deutlich gezeigt, dass Naturgefahren bestehen und Gegenmaßnahmen nur unzureichend geplant sind. Durch das Ereignis wird ein Kreislauf angestoßen, der aus drei Phasen besteht: Bewältigung, Regeneration und Vorbeugung. Die Aufgabe der Geologie sollte hierbei nicht nur im Einsatz und der Instandsetzung des Schadens bestehen (*Abbildung 1*). Vor allem im Bereich der Vorbeugung können durch eine sinnvolle Raumplanung Schäden deutlich vermindert werden.

Unter Vorbeugung versteht man einerseits die Nutzung gefährdeter Bereiche einzuschränken (Prävention) und andererseits konkrete Pläne für den Ernstfall zu entwerfen (Vorsorge). Die verantwortlichen Stellen für die Prävention sind in der Schweiz die Gemeinden und die Kantonverwaltungen, welche die Erstellung von Gefahrenzonenplänen zumeist an private Büros vergeben (BUWAL 1999). Auf der Grundlage dieser Pläne werden Flächennutzungspläne erarbeitet, die von den Gemeinden und Volksversammlungen geprüft und angenommen werden müssen. So soll sichergestellt werden, dass stark gefährdete Bereiche nicht bebaut, oder geeignete Auflagen zum Schutz der Personen beachtet werden. Hinzu kommen generelle Maßnahmen, wie z.B. die Aufforstung von Schutzwäldern, die in der Verantwortung der Forstverwaltung steht.

Das Beispiel der Schweiz zeigt, dass ein Risiko-Management von verschiedenen Behörden und Institutionen getragen werden muss. Die Risiko-Minderung beginnt jedoch einfach – mit der Information der anwohnenden Menschen. Zum Schluss dieser Arbeit soll aufgezeigt werden, welche Personengruppen ein Interesse an Gefährdungskarten haben und wie diese Information bereitgestellt werden kann.

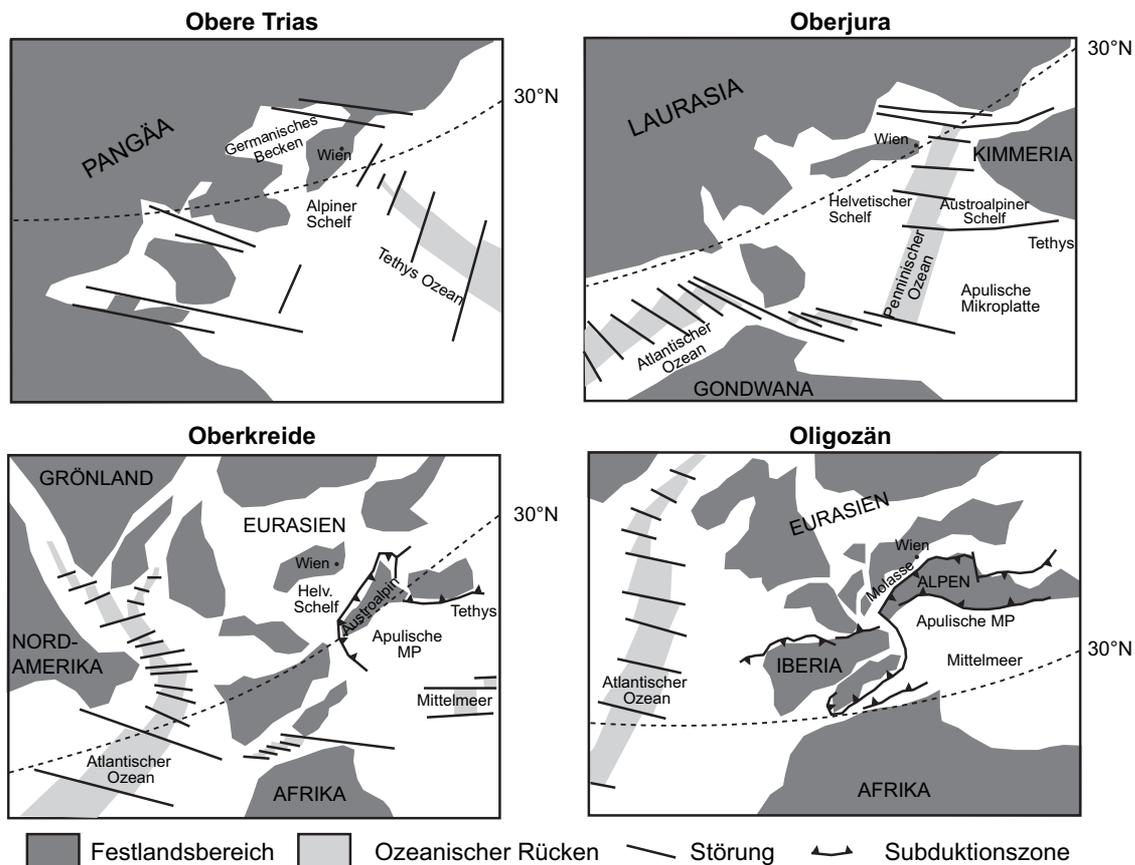
3. Abriss der Geologie Vorarlbergs

Die Alpen beschäftigen seit mehr als einem Jahrhundert die Geologen aller europäischen Länder. Eine Zusammenfassung der intensiven Forschungsgeschichte gibt HERM (1990). Bis heute dauern die Streitgespräche über die Paläogeographie und die Tektonik der Alpen an, aus denen auch humorvolle Arbeiten entstanden sind (SENGOR 1985). Eine detaillierte Übersicht aller Abfolgen in Vorarlberg gibt OBERHAUSER (1998). Auch für den Laien verständliche Zusammenfassungen bieten SCHOLZ & SCHOLZ (1995) und KRENMAYR (1999).

3.1 Eine kurze Geschichte der Alpen

Die Alpen sind das Ergebnis der Öffnung und Schließung zweier ozeanischer Bereiche, deren Entwicklung durch die Relativbewegung zwischen Afrikanischer und Europäischer Kontinentalplatte gesteuert wurde (*Abbildung 2*, z.B. LAUBSCHER & BERNOULLI 1977, FRISCH 1979, TRÜMPY 1981, NEUBAUER et al. 1999). Der erste Ozean war die Tethys, deren Spreizungszentrum sich von Ost nach West ausbreitete und im späten Perm mit zum Zerfall des Großkontinents Pangäa beitrug (FRISCH 1979). Der zweite Ozean war der Penninische Ozean, der als Folge der Öffnung des Atlantischen Ozeans im Jura als Übergangsstruktur zwischen Atlantik und Tethys angelegt wurde (PIFFNER 1992). In zwei Phasen wurde der Penninische Ozean während der alpinen Orogenese wieder geschlossen: der Eoalpinen Phase in der Kreide und der Meso- oder Neoalpinen Phase im späten Eozän (RATSCHBACHER et al. 1989, FRISCH et al. 1998, VON EYNATTEN & GAUPP 1999, FRISCH & GAWLICK 2003).

Abb. 2: Schematische Übersicht der Entwicklungsgeschichte des alpinen Ablagerungsraumes (verändert nach KRENMAYR 1999).



Im paläogeographischen Sinn unterscheidet man drei Bereiche (*Abbildung 3*): das Helvetikum als nördlich gelegener, europäischer Kontinentalrand; das Penninikum als zentraler, teilweise ozeanischer Beckenbereich und das Austroalpin (Kalkalpin) bzw. das Südalpin als südlicher Küste, dem afrikanischen Kontinentalrand. Da diese ehemaligen Faziesgürtel heute verschiedenen tektonischen Stockwerken angehören, verwendet man dieselben Begriffe auch für die entsprechenden tektonischen Einheiten.

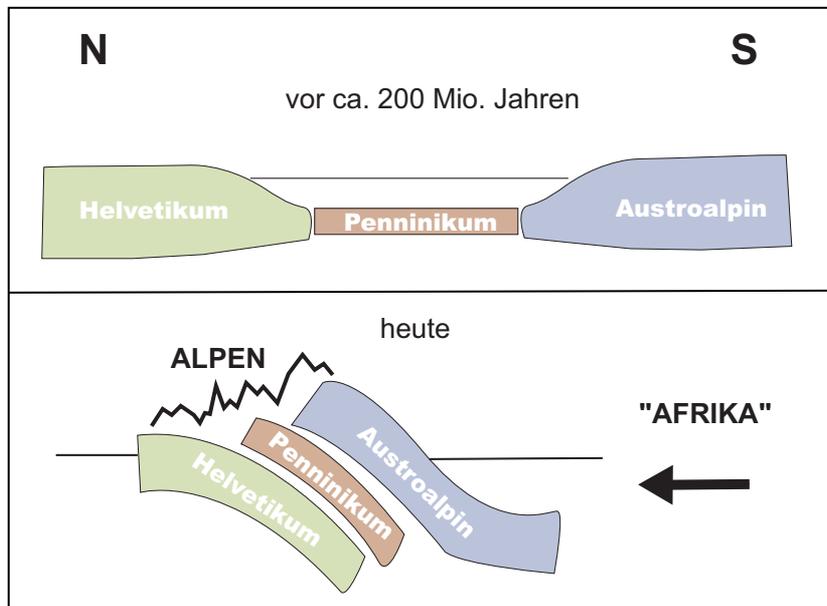


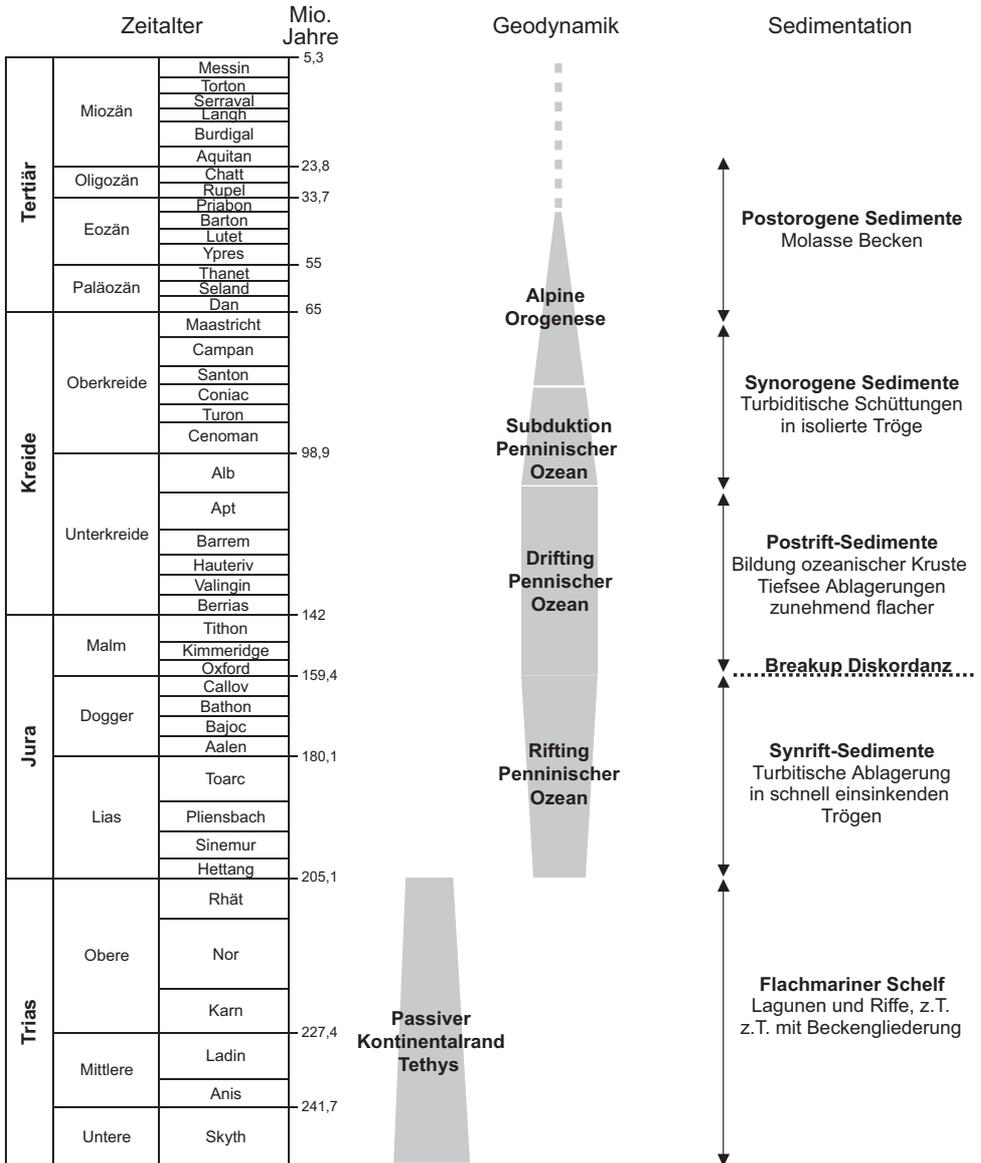
Abb. 3: Comic zur Entwicklung der Alpen aus den drei Faziesbereichen.

Die Gesteine, welche diese Einheiten aufbauen, sind hauptsächlich marine Sedimente. D.h. diese Ablagerungen entstanden unter Meeresbedeckung in einer Küsten- bzw. Tiefwasserregion. Die Sedimente des Helvetikum und Austroalpin wurden ab dem späten Perm als weit ausgreifende Karbonatplattform am passiven Kontinentalrand der nordwestlichen Tethys abgelagert (LEIN 1987). Die Sedimentation wurde durch die Absenkung des nach Osten hin offenen Ozeans gesteuert. Während der Zeit des Jura kam es zur Öffnung des Penninischen Ozeans als Übergangs-Struktur zwischen Tethys im Osten und Atlantik im Westen (PFIFFNER 1992). Das Austroalpin (Adriatische Mikroplatte) muss jetzt als unabhängige, kontinentale Mikroplatte am Rand von Apulischer- bzw. Afrikanischer Platte angesehen werden (CHANNELL et al. 1992).

In der Kreide begann sich der Penninische Ozean durch veränderte Relativbewegungen infolge der weiteren Öffnung des Atlantiks wieder zu schließen (PFIFFNER 1992). Dieser Wechsel von Extension zur Kompaktion führte zur alpidischen Orogenese. Die Deformationsfront begann im Süden und wanderte mit der fortschreitenden Gebirgsbildung weiter nach Norden (FRISCH 1979). Während der Eoalpinen Phase wurden die Sedimentgesteine des Austroalpin von ihrem Untergrund (Basement) abgetrennt und in Form von riesigen Decken nach Nordwesten geschoben (FAUPL & WAGREICH 1999). Der Bereich des Penninikum wurde

eingeengt und die ozeanischen Krustenanteile zum größten Teil subduziert. In der Nealpinen Phase erfolgte die Kontinent-Kontinent-Kollision, in der auch die penninischen und helvetischen Einheiten gefaltet und nach Norden verfrachtet wurden (COWARD & DIETRICH 1989). Der alpine Deckenstapel wurde über den Meeresspiegel gehoben. Im Norden und im Süden des Orogens entstanden im späten Eozän Molassetröge, in die der Erosionsschutt des Gebirgskörpers geschüttet wurde. Der nördliche Molassetrog wurde im Oligozän ebenfalls eingeengt und zusammen mit dem Schweizer Jura gefaltet (MÜLLER et al. 1988, PFIFFNER 1992).

Abb. 4: Schema zur Geodynamik des Ablagerungsraumes der Ostalpen (verändert nach STAMPFLI & BOREL 2004).



3.2 Überblick der geologischen Einheiten in Vorarlberg

Betrachtet man die heutige geologische Situation der Vorarlberger Alpen so fällt auf, dass die oben angesprochenen Einheiten in Vorarlberg in nahezu Ost-West-orientierten Bändern an der Oberfläche ausstreichen (*Abbildung 5*). Diese Lage ist durch den Decken- oder Lagenbau der Alpen bestimmt. Im Folgenden sollen die wichtigsten Einheiten besprochen werden, wobei die Reihenfolge mit den ältesten Gesteinen beginnt und dann von Süden nach Norden abgehandelt wird. Zunächst wird die gesamte Einheit besprochen und deren Lage zumeist mit einem geologischen Profil erläutert. Danach werden einige wichtige Gesteine dieser Einheit vorgestellt.

3.2.1 Silvretta Kristallin

Das Silvretta Kristallin entstand aus Gesteinen, die bereits lange vor der alpinen Orogenese abgelagert worden sind. Schon bei früheren Gebirgsbildungen, der kaledonischen und der variszischen Orogenese, wurden diese Gesteine durch Druck und hohe Temperaturen in metamorphe Gesteine umgewandelt. Zusätzlich wurden diese während der alpidischen Gebirgsbildung retrograd metamorph überprägt. Die Ausgangsgesteine waren wahrscheinlich klastische Sedimente (Sandsteine, Tonsteine), Vulkanite (Laven und Aschen) und Plutonite (Granite). Heute liegen diese Gesteine als Gneise und Schiefer vor, wobei in Vorarlberg vor allem Granat-führende Glimmerschiefer, Gneise, Hornblendeschiefer und Amphibolithe charakteristisch sind. Die Glimmerschiefer sind feinkörnig und zeigen einen silbrigen Glanz. Aufgrund der Einregelung plattiger Minerale weisen sie eine deutliche Schieferung und Kleinfaltung auf.

Innerhalb des Silvretta Kristallins kann ein Ost-West-streichender Faltenbau erkannt werden. Am Nordrand des Silvretta Kristallins nimmt die Phyllitgneiszone eine Sonderstellung ein. Ihre Gesteine sind stark zerklüftet und zerrüttet, da sie tektonisch besonders stark beansprucht worden sind.

3.2.2 Nördliche Kalkalpen (NKA)

Im Faziesbereich des Austroalpin entstanden die Sedimente der Nördlichen Kalkalpen zunächst an der Küste des Tethys Ozeans. Die in Vorarlberg bis zu 3 km mächtige Abfolge beginnt mit Sandsteinen, die z.T. noch terrestrisch (oberhalb des Meeresspiegels) abgelagert worden sind. Bei einer langsamen Absenkung des passiven Kontinentalrandes wurde dieser Bereich von der Tethys überflutet und es kam zur Bildung von marinen Kalksteinen bei zunächst geringen Wassertiefen. Durch tektonisch bedingte Absenkung und Bruchbildung kam es in der Trias zur Untergliederung der Küste in Becken- und Schwellenregionen. Während sich in den lichtdurchfluteten Schwellen Riffe mit einer entsprechenden Fauna aus Korallen und Muscheln entwickeln konnten, kam es in den Becken zur Ablagerung von feinkörnigen, bituminösen Mergeln und Tonen (FABRICIUS 1966). Im Jura öffnete sich der penninische Ozean was zu einer verstärkten Absenkung im Nordwesten (Rifting) und zu einer weiteren Vertiefung

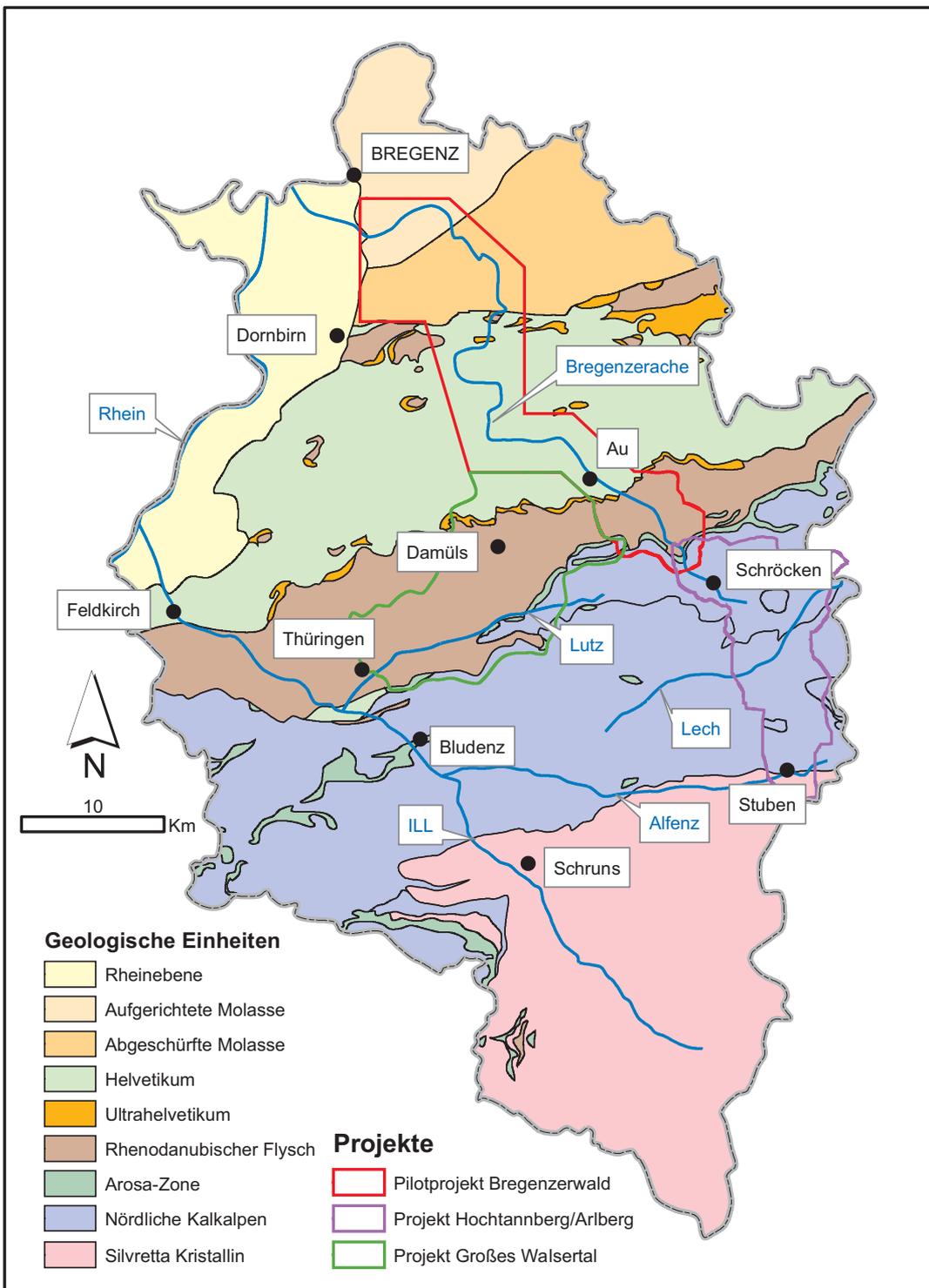


Abb. 5: Geologische Übersichtskarte Vorarlberg (RUFF 2005). Zusätzlich sind die Arbeitsgebiete der drei Teil-Projekte eingetragen.

der Beckenregionen führte. Die Ablagerungen wurden jetzt nicht mehr von der Entwicklung im Süden, sondern von dem neuen Ozean im Nordwesten gesteuert. Bei schnell zunehmender Wassertiefe kamen im Jura als Folge von Suspensionsströmen (Turbidite) alterierende bzw. rhythmisch entwickelte Sedimentsequenzen zur Ablagerung (JACOBSHAGEN 1965). Vereinzelt blieben jedoch Schwellen mit Riffkalken erhalten. Zum Ende des Jura und zum Höhepunkt des Penninischen Ozeans wurden als typische Tiefwasserbildung Radiolarite aus Kieselalgen sedimentiert. Der Wechsel zur Einengung und damit die beginnende Schließung des Ozeans führten danach wieder zu geringeren Wassertiefen und zur erneuten Bildung von Kalksteinen. Als letztes Stadium wurden bei der einsetzenden Deckenstapelung synorogene Klastika, d.h. Bruchstücke der älteren Sedimente neu abgelagert (GAUPP 1992).

In Vorarlberg sind die NKA intern in vier Decken gegliedert. Diese sind vom tektonisch Höchsten zum Tiefsten: Krabachjoch Decke, Inntal Decke, Lechtal Decke und Allgäu Decke. Diese Decken sind wiederum von komplizierten Systemen aus Falten und Störungen durchzogen und in Schuppen unterteilt (Abbildung 6). Insgesamt wird vermutet, dass der gesamte Deckenstapel bei der Deformation auf mindestens 60% verkürzt wurde (EISBACHER et al. 1990).

Abb. 6: Geologische Profile der Nördlichen Kalkalpen von Warth nach Stuben (verändert nach RUFF 2005).

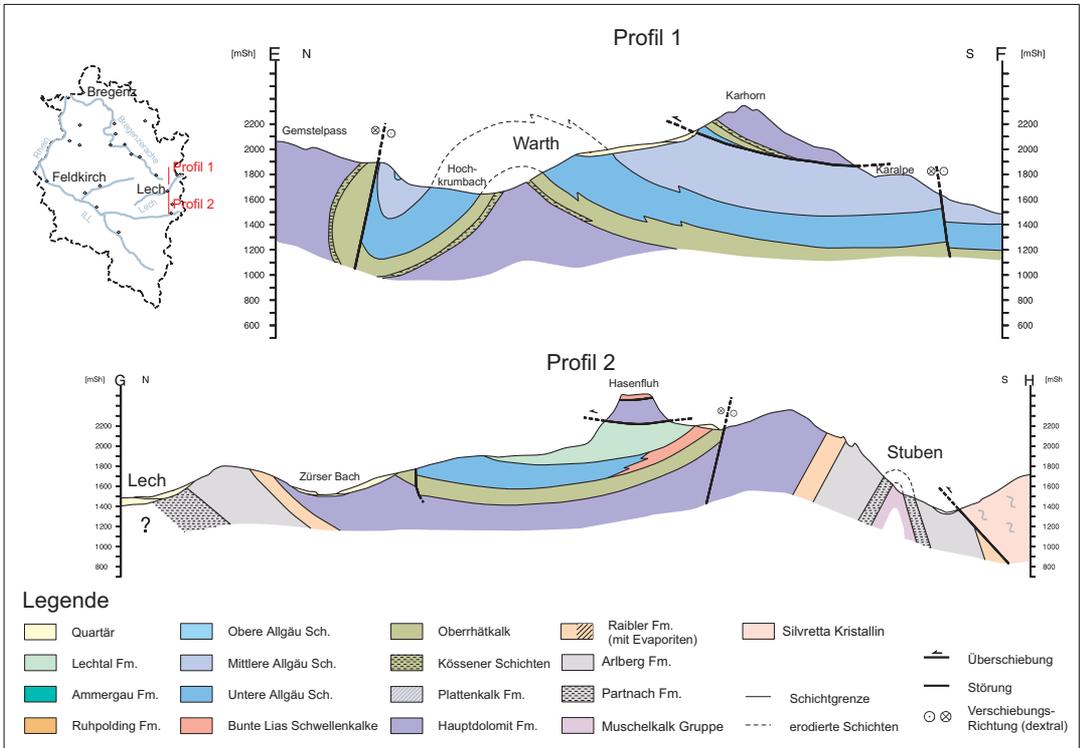




Abb. 7: Links: Typische Wechsellagerung der Muschelkalk Gruppe aus Kalksteinen (hell), Mergeln und Tonen (dunkel). Rechts: Häufig finden sich an den Schichtoberflächen braune bis schwarze Oxidlagen (Fotos: N. Hawelka).

3.2.2.1 Muschelkalk Gruppe

Die Muschelkalk Gruppe ist eine typische marine Flachwasserbildung. Sie besteht aus dunkelgrauen, feinkörnigen Kalksteinen, die aufgrund ihres hohen Eisengehaltes auffällig ockerfarben verwittern (*Abbildung 7*). Dazwischen kommen dünnere Bänke mit dunklen Mergeln vor. Charakteristisch sind außerdem Lagen aus Hornsteinen, die auf einen erhöhten Silikat-Gehalt des Wassers hindeuten (z.B. durch vulkanische Aktivität).

3.2.2.2 Hauptdolomit Formation

Die Hauptdolomit Formation ist der wichtigste Gipfelbildner der NKA. Sie besteht meist aus dunkelgrauem bis bräunlichem Dolomit, der massig ausgebildet ist oder eine leichte Bankung zeigt (*Abbildung 8*). Angewittert zeigt der Dolomit graubraune bis gelbliche Farben. Aufgrund von fein verteiltem Faulschwamm in dem Gestein ist beim Anschlagen häufig ein bituminöser Geruch zu bemerken. Seltener sind fein laminierte Stromatolithe aus Matten von Blau- und Grünalgen zu beobachten (CZURDA & NICKLAS 1970). Charakteristisch sind ebenfalls Mikroklüfte, die mit Calcit verfugt sind und dem Gestein z.T. ein zerbrochenes Aussehen geben. Durch Abgrusung entstehen unterhalb von Felswänden aus Hauptdolomit Formation oft mächtige Schuttfächer (*Abbildung 27*).



3.2.2.3 Kössener Formation

Die Kössener Formation ist ein gutes Beispiel für die verstärkte Gliederung des Ablagerungsraumes in Becken und Schwellen. Auf engem Raum zeigt diese Formation zwei unterschiedliche Ausbildungen: Die Kössener Schichten wurden in den Becken, der Oberrhätkalk auf den Schwellen abgelagert.

Die Kössener Schichten sind eine dünngebankte Wechsellagerung aus Kalen, Mergeln und Tonsteinen (*Abbildung 9*). Kalksteine sind bis wenige dm mächtig und keilen häufig lateral aus. Es dominieren dunkelbraune bis schwarze Tonsteine und dunkelgraue Mergel (Halb-Faulschwamm-Fazies nach TOLLMANN 1976). Es finden sich Bänke mit Anhäufungen von Muschelschill und Belemniten, die während eines Sturmereignisses abgelagert worden sind (Tempestitablagerungen, *Abbildung 10*). Die Schwellenfazies des Oberrhätkalk besteht hingegen aus eintönigen, massigen Kalksteinen (*Abbildung 9*). Die Kalke sind mittelgrau, verwittern aber mit auffälliger, nahezu weißer Farbe. Der Oberrhätkalk ist reich an Mikro- und Makrofossilien wobei Lammellibranchiaten, insbesondere Magalodus (auch als «Kuhtritt-Muschel» bezeichnet) und die Einzelkorallen Thecosmilia und Thamnasteria im Gestein häufig zu erkennen sind (RICHTER 1984; *Abbildung 10*).

Abb. 8: Hauptdolomit Formation am Gipfel des Widderstein (Foto: Ch. Schanz).



Abb. 9: Kössener Formation in verschiedener Ausbildung. Oben: Beckenfazies der Kössener Schichten. Unten: Schwellenfazies des Oberrhätkalk (Fotos: G. Hils).





Abb. 10: Häufige Fossilien in der Kössener Formation. Oben: Muschelschill, eine Anhäufung von Muschelschalen und Korallenrümern nach einem Sturmereignis (Tempestit). Unten: eine sog. Kuhtritt-Muschel *Megalodus* (Fotos: G. Hils).

Abb. 11: Die Lechtal Formation ist aufgrund des hohen Tonanteils meist stark zerschert.



3.2.2.4 Lechtal Formation

Die Lechtal Formation ist ein Beispiel für synorogene Sedimente, d.h. Ablagerungen, die während der Gebirgsbildung entstanden sind. Sie besteht zu 90% aus dunkelgrauen bis schwarzen Tonsteinen. Dazwischen kommen bis zu 1 m mächtige, mittelgraue Mergel vor, die lateral auskeilen (*Abbildung 11*). Vereinzelt treten sandige Bänke auf. Aufgrund des hohen Tonanteils ist diese Formation bei der Stapelung der Decken als Scherzone benutzt worden und zumeist stark deformiert (MAY & EISBACHER 1999).

3.2.3 Arosa-Zone

Die Arosa-Zone ist eine tektonische Melange aus zerscherten Gesteinen jurassischen bis kretazischen Alters (WINKLER 1996). Auffällig sind v.a. grün-rote Tonsteine und Mergel, in denen Linsen aus Quarziten und Kalksteinen «schwimmen» (*Abbildung 12*). An einzelnen Stellen – z.B. im Bachbett der Bregenzerache bei Bad Hopfreben – finden sich Ophiolithe (Reste ozeanischer Kruste) aus dem Penninischen Ozean.



Abb. 12: Die Arosa-Zone besteht aus Bruchstücken vieler Formationen, die in roten, grünen und schwarzen Mergeln «schwimmen» (Foto: Ch. Schanz).

3.2.4 Rhenodanubischer Flysch

Dem Faziesbereich des Penninikum entstammt der sogenannte Rhenodanubische Flysch (EGGER 1990). Der Name «Flysch» stammt ursprünglich aus dem Schweizerischen und bedeutet «fließen». Mit «Flysch» werden Sedimentfolgen bezeichnet, die in tieferem Wasser als Folge von Suspensionsströmen abgelagert wurden. Hierbei handelt es sich um Material, das zunächst am Kontinentalrand gesammelt wurde. Bei Erdbeben oder Sturmereignissen rutscht dieses Material über den Kontinentalhang in die Tiefsee und wird in rhythmischen Lagen am Meeresboden gesammelt. Typischerweise erzeugt jedes Ereignis eine Sedimentabfolge, die mit eher grobem Material beginnt (Grauwacken) und nach oben hin immer feiner wird (Sandsteine, Mergel). In der Ruhephase werden darauf dunkle Tonsteine abgelagert, auf denen oft die Spuren von grabenden oder fressenden Tieren zu finden sind (Ichnofossilien, *Abbildung 15*). Ansonsten sind die Sedimente frei von größeren Fossilien, es können jedoch – teilweise umgelagerte – Mikrofossilien (Foraminiferen, z.B. Globigerinen) in den Mergeln gefunden werden.

Aufgrund der vielen plastischen Tonhorizonte ist der Rhenodanubische Flysch i.d.R. nur kleinräumig gefaltet, dafür aber stark verschuppt (*Abbildung 13*). Die bis zu 3000 m mächtige Abfolge ist sprichwörtlich zwischen den härteren Einheiten von NKA und Helvetikum zerquetscht worden.

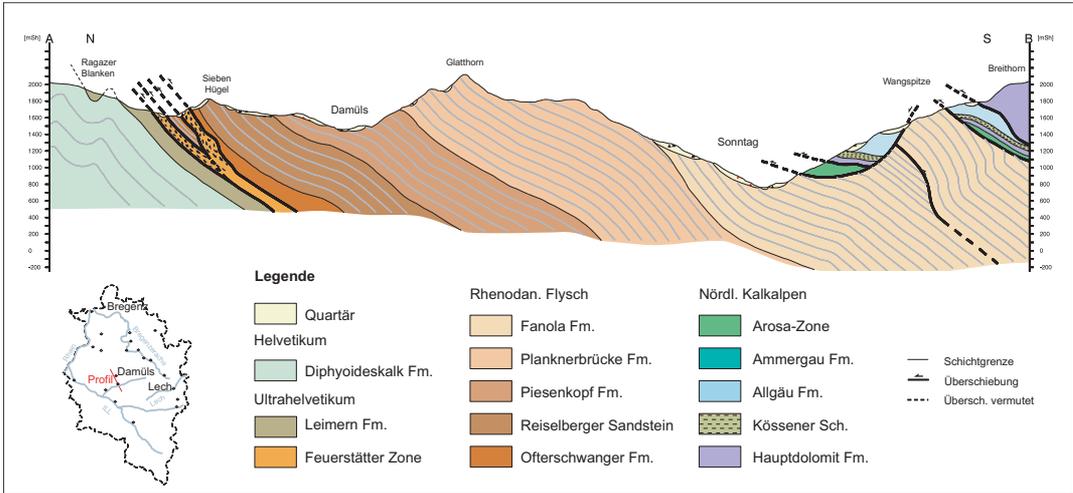
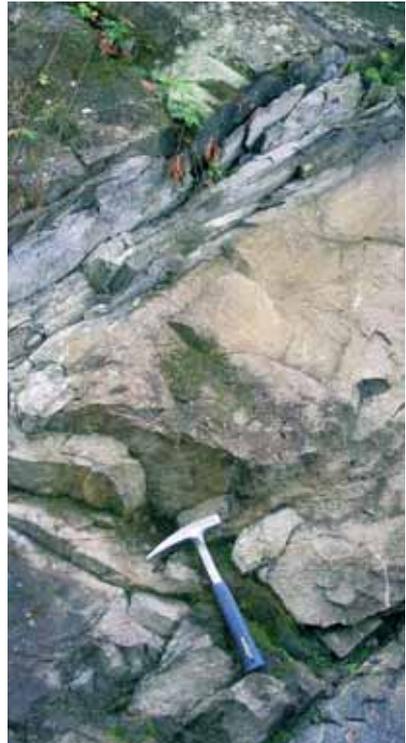


Abb. 13: Geologisches Profil des Rhenodanubischen Flysch durch Damüls und Sonntag.

3.2.4.1 Reiselberger Sandstein

Ein typischer Vertreter der Flyschgesteine ist der Reiselberger Sandstein. Er besteht meist aus einer mächtigen Bank aus braunen bis grauen, grobkörnigen Sandsteinen (Grauwacken) über der dünnere Lagen von Feinsandsteinen und Mergeln folgen (Abbildung 14). Ein Tonsteinhorizont schließt den Zyklus aus einem Suspensionsstrom ab. Darüber folgt wieder eine grobkörnige Bank, die für den Beginn eines neuen Zyklus steht.

Abb. 14: Typische Bank des Reiselberger Sandsteins. Links: An der Basis ist ein grobkörniger Sandstein, der nach oben hin feinkörniger wird (gradierte Schichtung). Rechts: Feinkörnige Mergel und Tonsteine (dunkelgraues dünnes Band) schließen einen Turbidit-Zyklus ab.



3.2.4.2 Planknerbrücke Formation

Flyschgesteine können je nach Art und Menge des an den Kontinentalrand angelieferten Materials auch feinkörniger sein. So besteht die Planknerbrücke Formation meist aus dünngebankten, dunkelgrauen, glimmerführenden Feinsandsteinen und Mergeln (*Abbildung 15*). Hier fehlte aufgrund relativer tektonischer Ruhe während der Gebirgsbildung das grobkörnige Material. Der hohe Anteil an silikatischen Komponenten verleiht den Gesteinen eine relativ hohe Festigkeit.



Abb. 15: Oben: Typisch dünngebankte Planknerbrücke Formation. Der Aufschluss zeigt außerdem eine enge Faltung. Unten: Auf den Schichtoberseiten der Tonsteine finden sich häufig fossile Grabspuren (Chondrites).



3.2.5 Feuerstätter-Zone (Wildflysch)

Ähnlich wie die Arosa-Zone ist die Feuerstätter-Zone stark tektonisch zerstört und es lassen sich nur vereinzelt Formationen identifizieren. Für diese Zone war früher der Begriff «Wildflysch» gebräuchlich. Grund hierfür ist die Zusammensetzung der Gesteine, die meist Flysch-Charakter zeigen, im Vergleich zum Rhenodanubischen Flysch jedoch grobkörniger sind. Außerdem führen sie exotische Gerölle, d.h. Bruchstücke aus weiter Ferne.

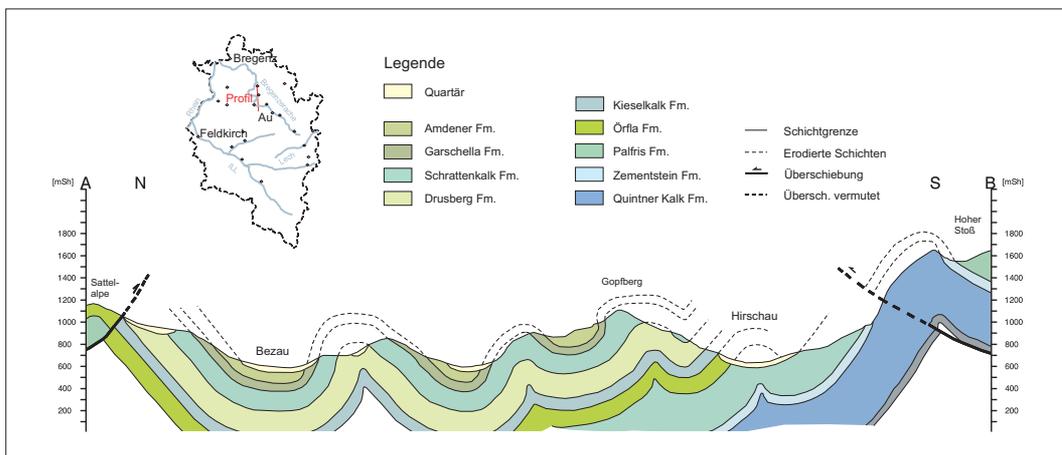
3.2.6 Helvetikum und Ultrahelvetikum

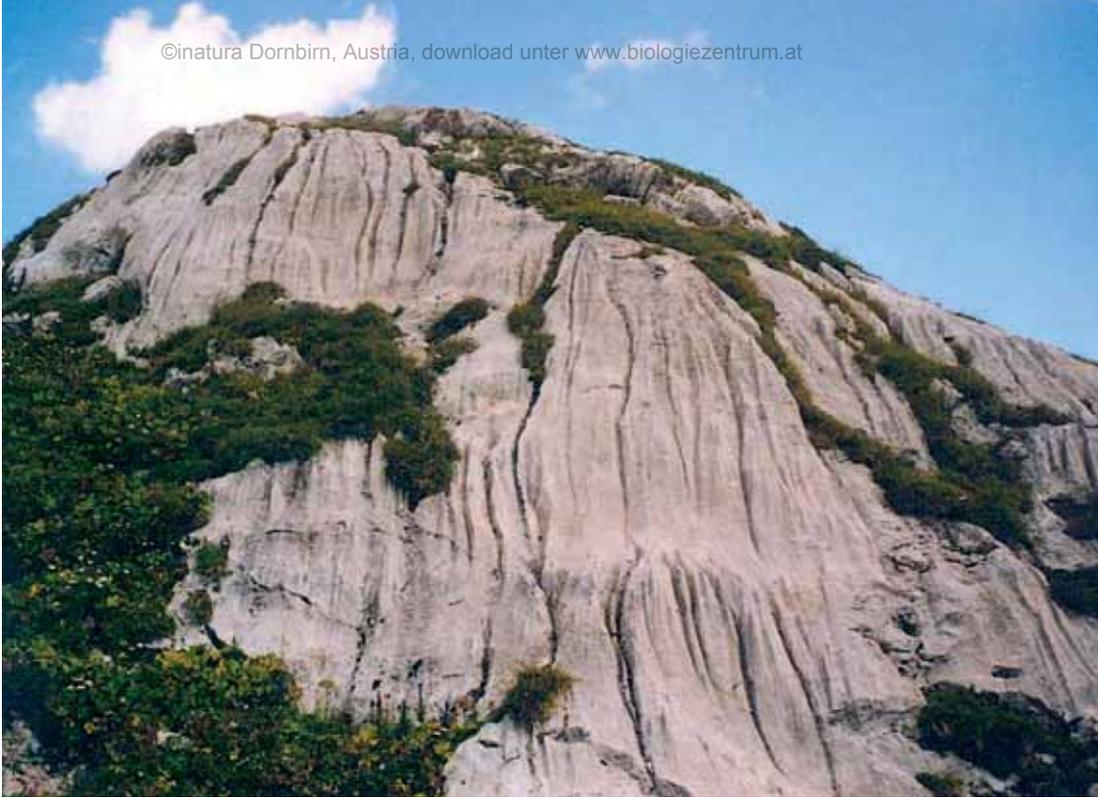
Das Helvetikum stellt den ehemaligen Küstenbereich des Europäischen Kontinents dar und zeigt große Analogien zu den NKA. Seinen Namen erhielt diese Einheit, weil sie hauptsächlich in der Schweiz ihre Verbreitung hat. Östlich von Vorarlberg taucht sie unter die überlagernden Einheiten ab und ist nur noch als schmales Band am Nordrand der Alpen vorhanden. Am Kontinentalrand bestand das Ultrahelvetikum als Übergangsbereich zum Rhenodanubischen Flysch.

Das Helvetikum war bis in den frühen Jura hinein noch festländischer Bereich, auf dem vor allem rotgefärbte Sandsteine abgelagert wurden. Ab dem mittleren/oberen Jura wurde das Helvetikum von Süden her überflutet und es bildete sich ebenfalls ein flaches Schelfmeer aus (OBERHAUSER 1980). Aufgrund dieser Entwicklung sind die Gesteine im Süden deutlich mächtiger als im Norden.

In Vorarlberg sind vor allem die Gesteine des oberen Jura, der Kreide und der unteren Trias aufgeschlossen. Das Helvetikum ist insgesamt in drei tektonische Decken gegliedert: die Säntis Decke, die Hohenemser Decke und die Liebensteiner Decke. Die größte Verbreitung in Vorarlberg hat die Säntis Decke, die Liebensteiner Decke repräsentiert das Ultrahelvetikum. Die Decken sind bei ihrer Entstehung in sich deformiert worden, wobei das Helvetikum aufgrund der mächtigen Kalkstein-Abfolgen großräumige Faltung zeigt (Abbildung 16), während das eher tonige Ultrahelvetikum verschuppt wurde.

Abb. 16: Geologisches Profil durch das Helvetikum von Bezau zur Kanisfluh.





3.2.6.1 Schrattenkalk Formation

Bei der Schrattenkalk Formation handelt es sich um einen mittel- bis grobbankigen, grauen, oolithischen Kalkstein mit hellgrauer Verwitterungsfarbe. Des Weiteren ist dieses Gestein gekennzeichnet durch eine große Anzahl biogener Schalenrümmer, die hauptsächlich von Riffbildnern wie Korallen und Stromatophoren, aber auch von Kalkschwämmen, Brachiopoden und Schnecken stammen. Die dem Gestein seinen Namen gebenden «Schratten» (Kluftkarren) sind daumendicke und messerscharfe Kalkgrate, die zwischen metertiefen Spalten nach intensiven Verkarstungsprozessen zurückbleiben (D. RICHTER 1984). Im Vergleich zu den ihn umgebenden Gesteinsfolgen ist der Schrattenkalk sehr widerstandsfähig. Deshalb gilt er als wichtigste landschaftsprägende Einheit des Helvetikums, in der sich hohe Gipfel und Steilwände gebildet haben (*Abbildung 17*).

Abb. 17: Typische Karsterscheinungen in der Schrattenkalk Formation. Die Lösung an der Oberfläche der Kalksteine führt zu rillenförmigen Vertiefungen (Karren).

3.2.6.2 Quintner Kalk (Formation)

Die Quintner Kalk Formation ist ein gut gebankter, hell verwitternder, mikritischer Kalkstein (*Abbildung 18*). Der leicht bituminöse Kalkstein ist im Allgemeinen arm an Fossilien, jedoch können vereinzelt Ammoniten und Belemniten vorgefunden werden. Das Gestein ist teilweise stark verkarstet, so dass im Gelände vor allem Karren, Dolinen und Trockentäler zu beobachten sind.



Abb. 18: Die Mittagsfluh besteht aus einer Antiklinale (Sattel) der Quintner Kalk Formation (Foto: W. Kassebeer).

Abb. 19: Typisch dünn gebankte Kalke und Mergel der Zementstein Formation (Foto: M. Leibing).



3.2.6.3 Zementstein Formation

Diese Formation wird aus einer Wechsellagerung von grauen, dichten Kalken bzw. Mergelkalken, die dem Quintner Kalk sehr ähnlich sind, und dunkelgrauen, geschieferten Mergeln (Bankmächtigkeit: ca. 10 bis 40 cm) aufgebaut (*Abbildung 19*). Die Zementstein Formation umlagert die Gesteine der Quintner Kalk Formation wie einen Gürtel. Bei der Einengung und Faltung des Helvetikums wurden die Gesteine der Zementstein Formation teilweise in die Stapelung der mächtigen Kalksteine miteinbezogen und fungierten dabei häufig als Gleitbahnen. Die Mergel und Kalke fanden vielfach in der Zementherstellung Verwendung, was dieser Formation auch ihren Namen gab.

3.2.7 Molasse

Die Molasse besteht aus dem Erosionsschutt der Alpen, der nach ihrer Heraushebung durch Flüsse nach Norden transportiert worden ist. So entstand am Nordrand der Alpen ein flaches Becken, in dem während des Tertiärs abwechselnd marine und limnisch-fluviatile oder terrestrische Verhältnisse herrschten. Die Gesteine der Molasse sind hauptsächlich Konglomerate, Sandsteine und Mergel, die z.T. schlecht verfestigt sind. Der nördliche Teil ist aufgerichtet und bildet die eigentlich Vorlandmolasse. Ein Teil dieser Gesteine wurde in die Alpenbildung miteinbezogen und gefaltet (Faltenmolasse oder abgeschürfte Molasse). Die Ausprägung der Gesteine ist relativ unabhängig von dem Salzgehalt des Wassers. Lediglich Austernbänke in der Meeresmolasse belegen die Wechsel vom Süß- zum Salzwasser. Man unterscheidet hauptsächlich die sehr grobkörnigen Nagelfluh-Sedimente von den feinkörnigen Gesteinen.

3.2.7.1 Konglomerate (Nagelfluh)

Als «Nagelfluh» bezeichnet man sehr grobkörnige Geröllschichten, in denen häufig Gerölle von der Größe eines Tennisballs zu finden sind (*Abbildung 20*). Es handelt sich hierbei nicht um eine stratigraphische Formation, da die Schüttung von Material in das Vorland je nach tektonischen Bewegungen zu verschiedenen Zeiten erfolgte. Da der Transport der Gerölle durch Wasser erfolgte, sammelte sich das meiste Material an den Ausgängen der tertiären Talschaften. Man spricht hierbei von Nagelfluh-Fächern, wie z.B. dem Bodensee-Fächer. Im Zentrum der Fächer sind die Mächtigkeiten der Konglomerate am größten während sie zu den Flanken immer geringer werden. Außerdem wurde das Molassebecken von Süden aus gefüllt, sodass am südlichen Rand der Molasse der größte Schutt abgelagert wurde und nach Norden hin immer feinkörnigere Molassesedimente auftreten (D. RICHTER 1984).



Abb. 20: Die sog. Nagelfluh besteht aus Konglomeraten gerundeter Gerölle mit wenigen cm Durchmesser.

3.2.7.2 Bausteinschichten

Bei den sogenannten «Bausteinen» handelt es sich um marin bis brackisch entstandene, blaugraue Kalksandsteine mit dünnen graugrünen Mergellagen. Die karbonatischen Sandsteine sind hauptsächlich fein- bis mittelkörnig ausgebildet und formen dicke Bänke mit plattigem Charakter. Typisch für die Bausteinschichten ist ein deutlich ausgeprägtes Trennflächengefüge. Vor allem die Schichtflächen bewirken eine exzellente Spaltbarkeit des Gesteins. Des Weiteren zeigen die Sandsteine häufig Kreuz- und Schrägschichtung, sowie Strömungsmarken. Diese geben Hinweise für eine erhöhte Wasserströmung. Ab Mitte des 17. Jahrhunderts bis zum Zweiten Weltkrieg wurde das Gestein in großen Steinbrüchen (z.B. Schwarzachtobel) intensiv abgebaut und als Baumaterial verwendet.



Abb. 21: Oben: Intensiv verwitterte Bank der Bausteinschichten mit deutlicher Schrägschichtung.
Unten: Häufig finden sich auf den Schichtoberseiten der Bänke fossile Blattreste (Fotos: O. Gast).

3.2.7.3 Weissachsichten

Typisch für die Lithologie der Weissachsichten ist ein schneller fazieller Wechsel von intensiv bunten, vor allem rotgefärbten Mergeln, Sandsteinen und Konglomeraten (*Abbildung 22*). Die meist dünngeschichteten Mergel zeigen häufig Kreuzschichtung, wobei der Abstand der Schichtflächen im mm- bis cm-Bereich liegt. Eine intensive Gesteinszerlegung, starke Klüftung, lokale Kleinfaltungen, sowie Scher- und Störungszonen deuten auf eine starke tektonische Beanspruchung der Gesteine hin.

Abb. 22: Am Bödele streichen neben der Bundesstraße bunte Mergel und Feinsandsteine der Weissachschichten aus.



3.2.7.4 Granitische Molasse

Die Granitische Molasse ist gekennzeichnet durch eine Wechsellagerung von gelblichen, bräunlichen und grauen Mergeln und fein- bis grobkörnigen, hell- bis blaugrauen Sandsteinen, die sehr mürbe sind und daher leicht verwittern. Die Sandsteine zeigen ebenfalls eine deutliche Schräg- und Kreuzschichtung. Der Name «Granitische Molasse» rührt von der Tatsache her, dass in den Sandsteinen neben Quarz und Glimmer charakteristische rote Feldspatkörner enthalten sind.

3.3 Quartär

Nach internationaler Übereinkunft wird der Beginn der Quartär-Periode vor 1,8 Mio. Jahren angesetzt. Als jüngstes System der Erdgeschichte wird es in die Epochen Pleistozän und Holozän unterteilt. Während des Pleistozäns kam es zu einer Absenkung der globalen Temperatur. Die Auswirkungen waren Eiszeiten mit großen Inlandeismassen in den höheren Breiten und in den Gebirgsregionen. In den Alpen fiel die Schneegrenze um 1200 m. Ein großer Teil des Gebirges lag somit unter einem bis zu 1000 m mächtigen Eisschild (VAN HUSEN 1999). Als Ursache der Vereisungen werden astronomisch induzierte Schwankungen im Strahlungshaushalt der Erde angenommen (Milankovic-Zyklus), die interstadial

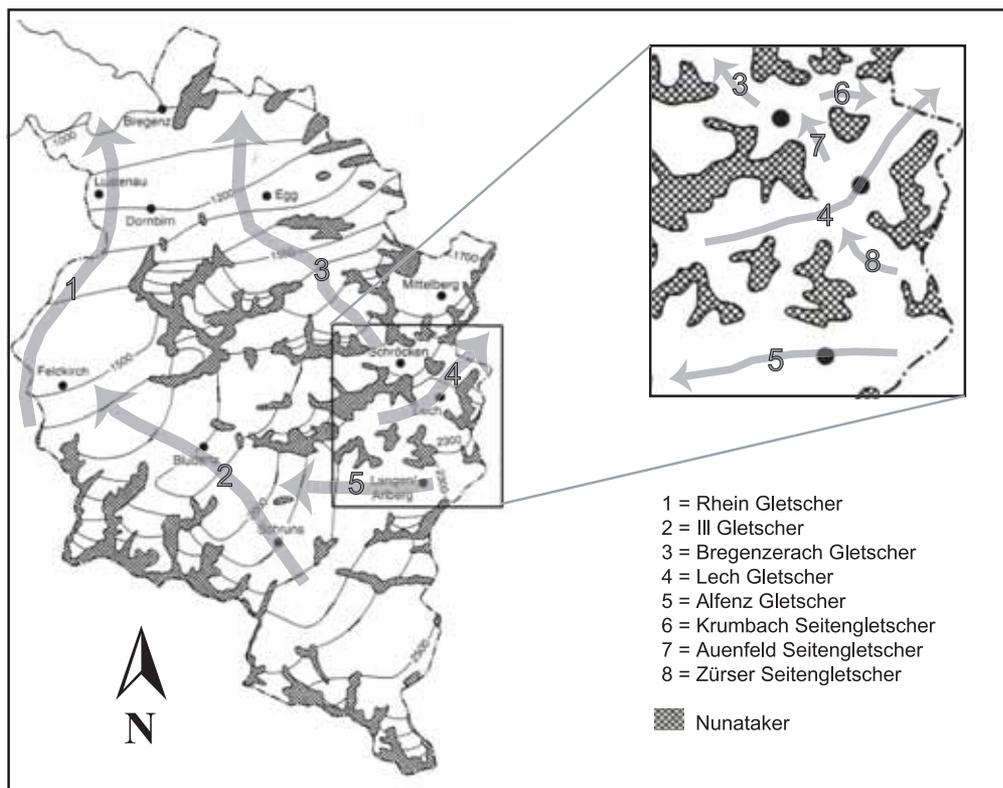
und interglazial auch zur beträchtlichen Erwärmung mit Mittelmeerklima in unseren Breiten geführt haben. Dieses Phänomen hat auch einen Anteil an der «derzeitigen» globalen Klimaerwärmung.

3.3.1 Das Pleistozän (1,77 Mio. Jahre – 11.000 Jahre)

Das Pleistozän ist durch relativ abrupt abwechselnde Glaziale und Interglaziale gekennzeichnet. Der Wechsel erfolgte im Frühpleistozän noch in Zyklen von rund 40.000 Jahren. Im Mittel- und Spätpleistozän hatten die Glazial-/Interglazialpaare eine Dauer von rund 100.000 Jahren und deutlich höhere Temperaturunterschiede.

Bis jetzt sind die Überreste aus vier Eiszeiten bekannt, welche durch PENCK & PRÜCKNER (1909) für die Alpen in die klassischen vier Zyklen von Günz, Mindel, Riss und Würm unterteilt wurden. Alle vier Eiszeiten liegen zeitlich im Mittel- bis Jungpleistozän und unterscheiden sich in Anzahl und Ausdehnung ihrer Gletschervorstöße. In Vorarlberg sind nur Ablagerungen des Würm erhalten, weil die hohe Relief-Energie und das lange Interglazial zwischen Mindel und Riß zur vollständigen Abtragung der älteren Sedimente geführt haben (VAN HUSEN 1999). Die Lage der Gletscher in Vorarlberg gibt *Abbildung 23*: Der Rhein Gletscher bekam Zufluss vom Ill Gletscher aus dem Silvretta Massiv. Dadurch wurde der Bregenzerache Gletscher nach Nordosten abgedrängt. Der Lech Gletscher reichte vom Lechquellengebirge westlich von Lech bis in das Allgäu.

Abb. 23: Die Lage der Gletscher in Vorarlberg zur Würm-Eiszeit (RUFF 2005, verändert nach VAN HUSEN 1999).



3.3.2 Postglazial – Das Holozän (10.300 Jahre – heute)

Das Abschmelzen der Eismassen der Würm-Eiszeit begann vor ca. 16.000 Jahren und dauerte im sog. Spätglazial bis 10.300 Jahre v.h. an. Die Gletscher schrumpften auf ihr heutiges Ausmaß zusammen. Innerhalb dieser Abschmelzphase wurden die durch die Gletscher ausgeschürften Täler und Becken freigelegt, und mit Wasser oder Schuttmaterial verfüllt. Unter anderem entstand so vor ca. 15.000 Jahren der Bodensee. Nach Abschmelzen der Eismassen blieb ein überhöhtes Relief zurück. Dies führte zur erhöhten Erosion und zur Bildung von zahlreichen großräumigen Massenbewegungen wie Rutschungen und Felsstürzen, welche sich wahrscheinlich zeitnah zum Abschmelzen ereigneten (z.B. Bergsturz Köfels vor 8700 Jahren, HEUBERGER 1994).

Das Holozän zeigt ein relativ konstantes Klima und ist das letzte wärmere Interglazial mit einer geschätzten Dauer von rund 10.000 – 20.000 Jahren. Die nunmehr isolierten Gletscher in den Ostalpen zogen sich bis 1850 während zwei Phasen zurück und blieben danach relativ ortstabil (VAN HUSEN 1999). In den letzten Jahrzehnten ist jedoch aufgrund der Klimaveränderungen wieder ein deutlicher Rückgang der Eismassen zu beobachten.

3.3.2.1 Moränenmaterial

Die Ablagerungen der Gletscher aus der Würm-Periode zeigen eine variable Ausbildung. Die Grund- und Seitenmoränen der Haupt- und Seitengletscher besitzen ein stark mergeliges Gefüge mit Geröllen von wenigen cm bis einigen dm (*Abbildung 24*). Als Gerölle finden sich meist Kalksteine, Dolomite und Mergel. Je nach Liefergebiet können auch metamorphe Gesteine aus dem Silvretta Massiv vorkommen. Die Ablagerungen wirken chaotisch und an den Oberflächen der größeren Komponenten sind oft Kratzer zu beobachten, die durch den Transport mit dem Eis über den felsigen Untergrund entstanden sind (gekritzte Geschiebe).

Abb. 24: Links: Sichel-
förmige Seitenmoräne
eines Nebengletschers
an der Fellalpe südlich
Schröcken.

Rechts: Durch Bauar-
beiten angeschnittene
Grundmoräne bei
Schröcken.

(Fotos: Ch. Schanz).





Morphologisch fallen Seitenmoränen durch wall- oder sichelförmige Erhebungen an den Ausgängen der Seitentäler auf (*Abbildung 24*). Durch den unterschiedlichen Eisdruck sind nur die Grundmoränen in den zentralen Tal-Abschnitten gut verfestigt. Diese wirken oft wasserstauend, was zur Bildung von Feuchtgebieten und Mooren führen kann (z.B. Körbersee und das Moorgebiet am Bürstegg bei Lech). Die Seitenmoränen an den Tal-Flanken sind schlechter kompaktiert und können durch Herauslösung der feinen Komponenten durch Regenwasser aufgelockert werden.

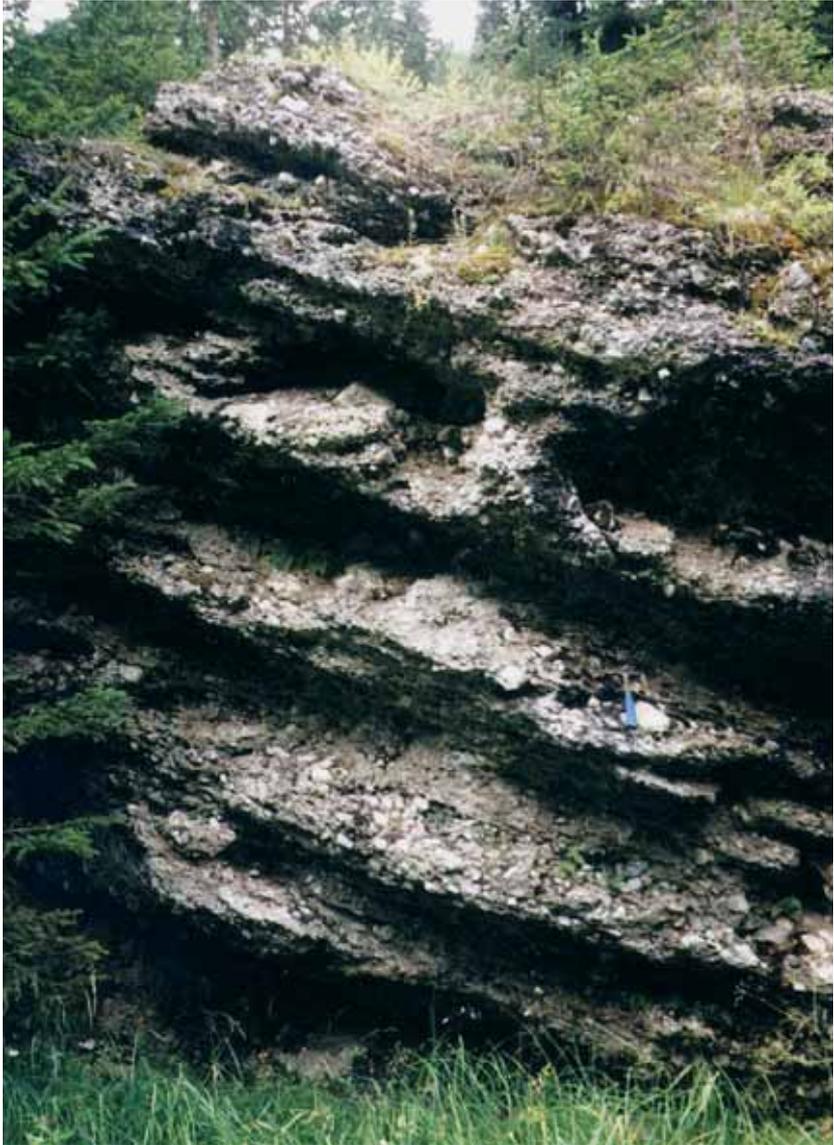
Abb. 25: In Bad Hopfreben bilden die postglazialen Schotter Verebnungsflächen in verschiedenen Niveaus, die von einer relativ steilen Terrassenkante begrenzt werden.

3.3.2.2 Postglaziale Schotter

Bei den postglazialen Schottern handelt es sich um fluvioglaziale Sedimente, die durch das Schmelzwasser der Gletscher transportiert wurden. Beim Rückzug der Eismassen wurden diese in mehreren Stadien abgelagert und bilden Verebnungsflächen in verschiedenen Höhengniveaus (Terrassen, *Abbildung 25*). Diese Schotter bilden aber nur einen Teil des ehemals abgelagerten Materials. Die Flüsse haben den größten Teil wieder abtransportiert und nur an den Tal-Flanken blieben einige Reste des ehemaligen Talbodens erhalten.

Die Schotter sind meist geschichtet und haben Komponenten mit einigen cm Durchmesser. Die Gerölle sind gut gerundet und werden von einer sandigen Matrix umschlossen. Die Ablagerungen sind mittel bis schlecht verfestigt und zeigen Schrägschichtung (*Abbildung 26*).

Abb. 26: Die postglazialen Schotter bei Lech zeigen eine deutliche Schrägschichtung. (Foto: N. Hawelka).



3.3.2.3 Hangschutt

Unter Hangschutt versteht man allgemein durch Stürzen, Kriechen oder Solifluktion umgelagertes Verwitterungsmaterial. Die Ausbildung hängt von der Art der Ablagerung ab. Ablagerungen, die durch rein stürzende Bewegungen entstehen, sind z.B. die Steinschlag-Fächer, die sich besonders augenfällig unter den Felswänden der Hauptdolomit Formation ansammeln (*Abbildung 27*). Innerhalb dieser Fächer sind zentrale Rinnen zu beobachten, welche die aktiven Bereiche mit regelmäßigen Ereignissen markieren. Daneben kommen eher diffuse Areale mit umgelagertem Material vor, deren Quellgebiete nicht mehr bestimmbar sind (*Abbildung 28*). Dieser Hangschutt ist meist mit Gräsern oder Wald bewachsen und zeigt eine eher sanfte Morphologie.



Abb. 27: Der sogenannte Riesen ist ein Steinschlagfächer unterhalb Hauptdolomit Formation an der Künzelspitze. Die tiefen Rinnen markieren Bereiche mit aktiven Ereignissen (Blick von der Üntschenspitze nach Westen).

Abb. 28: Anschnitt in Hangschutt an einem Forstweg bei Schoppernau. Bruchstücke der in unmittelbarer Nähe anstehenden Gesteine sind von einer tonigen Matrix umgeben.



Abb. 29: Am Ausgang des Seebergbaches bei Sonntag befindet sich ein rezenter Schwemmfächer. Holz und Gerölle wurden bei der Schneeschmelze im Frühling abgelagert.

3.3.2.4 Schwemmfächer

Als Schwemmfächer werden die Sedimente zusammengefasst, die nach der Eiszeit oder rezent an den Ausgängen größerer oder kleinerer Täler durch Wildbäche ausgeschüttet werden. In den z.T. tiefen Bacheinschnitten werden episodisch bei Starkniederschlägen oder einsetzender Schneeschmelze große Wassermengen zusammengeführt, die das anstehende Gestein an den Bachflanken erodieren und so große Mengen an Gesteins-Material sammeln. Am Ausgang der Tobel wird dieses Material aufgrund der abflauenden Strömungsgeschwindigkeit sedimentiert (*Abbildung 29*). Die Sedimente zeigen naturgemäß alle Korngrößen und die Komponenten sind nicht gerundet. Die postglazialen Schwemmfächer sind aufgrund der größeren Wassermenge weitflächig ausgebildet (z.B. in Thüringen). Aufgrund ihrer niedrigen Hangneigung werden diese oft zur Bebauung genutzt, allerdings können gerade hier bei extremen Wetterbedingungen Überschwemmungen auftreten.

3.3.2.5 Talfüllung

Als Talfüllung werden alle rezenten fluviatilen und limnischen Sedimente verstanden, welche sich in den zentralen Tal-Bereichen gesammelt haben und dort eine relativ ebene, sanfte Morphologie bilden. An natürlichen Seen (z.B. Körbersee) kommen Auenlehme vor, die aus dunklen Tönen und Schluffen mit hohem organischen Anteil bestehen. In der Umgebung der Seen besteht eine Verzahnung mit organisch gefällttem Kalk der Uferbereiche (Seekreide). Im Bereich mäandrierender Flüsse (z.B. der Bregenzerache in Bezau) finden sich feingeschichtete Sande und Kiese, mit vereinzelt auftretenden tonigen Zwischenlagen von einigen cm Mächtigkeit (*Abbildung 30*).



Abb. 30: Verschiedene Ausbildungen der Talfüllung. Oben: Die Bregenzerache lagert am Auenfeld zwischen Schräcken und Lech wegen der langsamen Strömungsgeschwindigkeit bituminöse Tone ab. Unten: Die Lutz führt bei Sonntag wegen der höheren Strömungsgeschwindigkeit auch grobe Gerölle mit sich.

4. Typische Massenbewegungen

Eine wissenschaftliche Beschreibung aller kartierten Ereignisse würde den Rahmen dieser Arbeit deutlich sprengen. Deshalb sollen die unterschiedlichen Mechanismen von Massenbewegungen kurz erläutert und dazu einige wenige Beispiele gegeben werden. Weitere Fallbeispiele in Vorarlberg sind den Veröffentlichungen RUFF et al. 2001 und HILS et al. 2003 zu entnehmen.

Man versteht unter einer Massenbewegung die gravitative Verlagerung von Gesteinmassen, d.h. die Bewegungen von Gestein aufgrund der Gewichtskraft vom Berg ins Tal. Es gibt zahlreiche Klassifikationen für die unterschiedlichen Bewegungsformen, die zu einer verwirrend grossen Zahl von Fachbegriffen geführt haben (z.B. Felssturz, Bergsturz, Talzus Schub, Bergzerreissung, Murengang, etc.). In dieser Arbeit wird die international gebräuchliche Unterscheidung nach CRUDEN & VARNES (1996) verwendet, welche eine Einteilung nach der Bewegungsart und dem beteiligten Material trifft (Tabelle 3).

Tab. 3: Einteilung der Massenbewegungen (verändert nach CRUDEN & VARNES 1996). Die Originalbegriffe wurden möglichst direkt übersetzt.

Bewegungsart	Material		
	Festgestein	Lockergestein Grobkörnig	Feinkörnig
Fallen	Felssturz	Steinschlag	–
Kippen	Felskippen	Schuttkippen	Erdkippen
Rutschen	Felsgleitung	Schuttrutschung	Erdrutsch
Spreizen	Felsspreizen	Schuttspreizen	Erdspreizen
Fließen	Felsfließen (Talzus Schub)	Schuttstrom	Schlammstrom
Kriechen	Felskriechen	Schuttkriechen	Erdkriechen

4.1 Fallen

Das Fallen beschreibt eine plötzliche Bewegung von Gesteinsmaterial an steilen bzw. übersteilten Hängen oder Felswänden. Dabei kommt es innerhalb eines kurzen Zeitraums zur Ablösung von Gesteinsblöcken, welche mit hoher Geschwindigkeit aus der Felswand herausfallen. Diese Art der Bewegung ereignet sich fast ausschließlich in Festgesteinen. Je nach der Menge des bewegten Materials kann eine weitere Unterteilung durchgeführt werden. So bezeichnet man Massenbewegungen mit einem Gesteinsvolumen kleiner 10^3 m^3 als Steinschläge, Volumina von 10^3 bis 10^6 m^3 als Felssturz und Massen größer 1 Mio. m^3 als Bergstürze.

Der Abriss des Felsmaterials erfolgt häufig an vorgegebenen Trennflächen, d.h. Störungen, Klüften und Schichtflächen. Hierbei spielt der Porendruck des Bergwassers eine bedeutende Rolle bei der Öffnung und Erweiterung von Rissen und Spalten im Gestein. Deshalb werden die meisten Sturzereignisse durch starke Regenfälle oder Frost ausgelöst.

Steinschläge wurden schon anhand des Riesen-Schuttfächers angesprochen (Abbildung 27). Als Beispiel für einen Felssturz kann ein älteres Ereignis am

Gehrner Berg nördlich von Warth herangezogen werden, das auf das Jahr 1840 zurück geht (HILS 2002). Grob geschätzt haben sich damals mehrere 10.000 m^3 Felsmaterial gelöst, die heute einen Schuttfächer an der Südflanke des Berges bilden. Die ca. 90 bis 110 m hohe Felswand mit der Abrisskante ist auf der rechten Seite der *Abbildung 31* zu erkennen. Die Blöcke der Felssturzmasse sind wegen der geringen Transportweite scharfkantig ausgebildet (HILS 2002). Sie besitzen größtenteils Durchmesser von 6 bis 100 cm, wobei einige Blöcke auch mehrere Kubikmeter erreichen. Der Schuttfächer selbst ist ca. 300 m lang und 90 m breit.

Eine Kluftfläche hat in diesem Fall zur Ablösung eines größeren Felsblockes geführt. Die Vorhersage eines solchen Ereignisses wäre nur möglich, wenn genaue Informationen über die Art und Raumlage aller Trennflächen eines Hanges vorliegen. Diese Daten liegen jedoch i.d.R. nicht vor. Da der Ablagerungsraum des Sturzmaterials ganz wesentlich durch die Hangmorphologie bestimmt wird, kann zumindest die Ausbreitung eines potenziellen Felssturzes abgeschätzt werden (*Kap. 7*).

Abb. 31: Links: Felssturz am Gehrner Berg bei Warth, Blick von Süden. Rechts: Detailausschnitt der Abrissfläche (Fotos G. Hils).

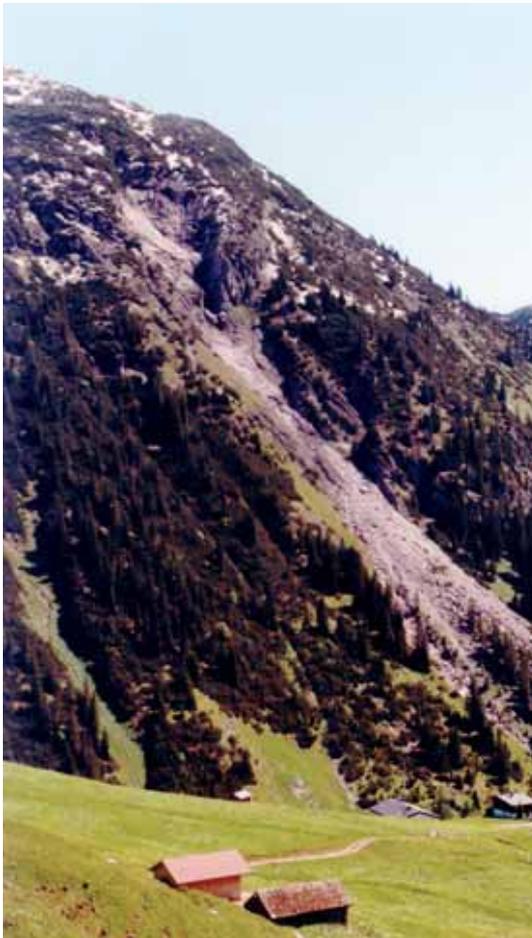




Abb. 32: Kippen am Beispiel von senkrecht stehenden Schichten der Piesenkopf Formation (Rhenodanubischer Flysch) am Schrecksbach bei Schoppernau (RUFF 2000).

4.2 Kippen

Unter Kippen wird eine hangauswärts gerichtete Rotation eines Blockes um eine Achse unterhalb seines Schwerpunktes verstanden (CRUDEN & VARNES 1996). Kippbewegungen kommen sowohl in Festgesteinen, als auch in Lockergesteinen vor. Bevorzugt werden diese Bewegungen durch engständige Trennflächen (v.a. Schichtung) und intensive Verwitterungs- oder Erosionsvorgänge. In Abhängigkeit von den morphologischen Gegebenheiten ergeben sich Übergänge zum Fallen.

4.3 Rutschen

Der Vorgang einer Rutschung bzw. Gleitung ist definiert als Bewegung zusammenhängender Massen entlang einer oder mehrerer Gleitflächen oder Gleitzonen (NEMCOK et al. 1972). Rutschungen bilden sich sowohl in Festgesteinen als auch in Lockergesteinen. Die Rutschmasse bewegt sich in der Größenordnung Meter/Sekunde von einer labilen in eine stabile Position. Die Scherflächen auf denen sich das Gesteinsmaterial bewegt können vorgegeben sein (Schichtung, Schieferung, Klüftung) oder durch den Bruchvorgang neu entstehen. Je nachdem wie die Gleitfläche der Rutschung ausgebildet ist, sind im Wesentlichen drei Arten von Rutschungen unterscheidbar (NEMCOK et al. 1972): Rotationsrutschungen, Translationsrutschungen und zusammengesetzte Rutschungen. Letztergenannte sind die häufigste Rutschungsart und vereinen sowohl translative als auch rotative Komponenten.

Wie bereits erwähnt sind Rutschungen in turbiditischen Gesteinen besonders häufig. Hier sind es die vielen Wechsel von harten und weichen Lagen, die zu Translationsrutschungen führen können. Ein gutes Beispiel für eine solche Rutschung ist die Straßenböschung an der Bodenalpe am nördlichen Ortsausgang von Lech (*Abbildung 33*). Im Bereich der B198 streicht die Allgäu Formation aus, deren Schichtflächen parallel zur Hangrichtung einfallen (HAWELKA 2001). Das Gestein weist bei Regen starke Wasserführung auf. Es handelt sich augenscheinlich um Hangwasser, das auf den Lockergesteinsauflagen im oberen Hangbereich gesammelt und dann an den tonigen Lagen gestaut wird. Somit steigt der Kluftwasserschub bei erhöhtem Niederschlag – und bei Frost – an und es werden Schollen aus der Böschung gelöst. An einer tiefer liegenden Gleitfläche hat sich ein etwa 100 m langer und 350 m breiter Bereich unter der Bundesstraße bewegt, der deutliche Schäden am Straßenbelag in Form von Rissen verursacht hat. Deshalb wurden im Jahr 2003 unterhalb der Straße Sicherungsmaßnahmen mit einer Stützmauer und einigen Ankern durchgeführt.

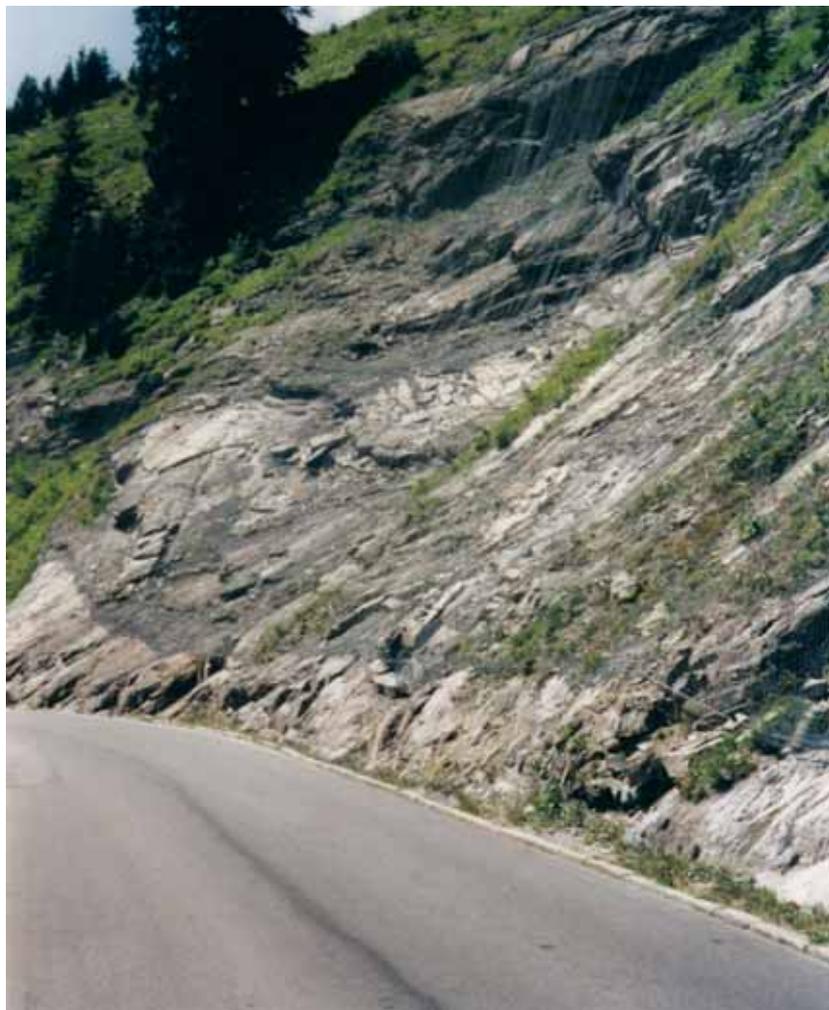


Abb. 33a: Felsrutschung an der Bodenalpe bei Lech (RUFF 2005). Die harten Lagen bewegen sich translativ auf den weichen. Hangwasser verstärkt diesen Effekt bei starken Regenfällen.

Abb. 33b: Schematisches Profil der Felsrutschung an der Bodenalpe.

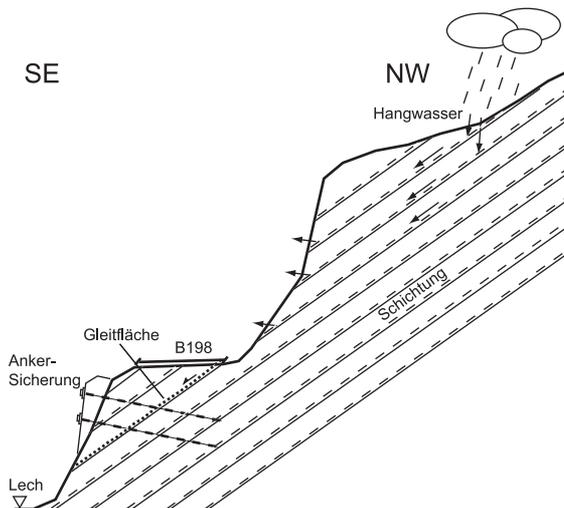


Abb. 34: Schuttrutschung im Hangschutt am Wiestobel. Die Rutschung zeigt im Abrissbereich eine gebogene Gleitfläche (rechts). Durch den hohen Wassergehalt ging das Material in eine Fließbewegung über und erreichte die Straße.

Ein Beispiel für Rotationsrutschungen ist die Schuttrutschung am Wiestobel bei Mittelberg/Fontanella aus dem Frühling 2004 (*Abbildung 34*). Die Rutschung ereignete sich in Hangschutt, der vermutlich durch Schmelzwasser vollständig wassergesättigt war. Weitere Regenfälle in den feuchten Frühlingswochen dieser Saison lösten die Bewegung aus.

Die Rutschung ist ca. 30 bis 40 m lang und bis zu 15 m breit. Es handelt sich um eine flachgründige Rotationsrutschung. Die Rutschmasse besteht aus schluffig-mergeligem Feinmaterial und enthält handgroße Sandstein- und Mergelsteinbrocken. Wie auf *Abbildung 34* zu erkennen ist, liegt die Rutschung



in einer Geländedepression, in der sich Lockermaterial angesammelt hat. In gleichem Maße fließt nach starken Niederschlägen der oberflächliche Abfluss konzentriert in diese Senke ab und sickert in den Hangschutt ein.

Die auslösenden Faktoren für diese Hangbewegungen sind die Lithologie, die relative Lage von Schichtung und Hang und die Morphologie. Gefährdete Bereiche könnten regional ausgewiesen werden, wenn die geologische Karte und die Hangneigung ausgewertet werden (Kap. 6).

4.4 Fließen

Das Fließen ist definiert als schnelle Bewegung von wassergesättigtem bzw. -übersättigtem Lockergesteinsmaterial, das aus Gesteinsschutt bzw. Geröllen aller Korngrößen besteht. Die Transportstrecken erreichen mitunter eine Länge von mehreren Kilometern. Die Geschwindigkeitsverteilung und das mechanische Verhalten der Rutschmasse ähneln der von Flüssigkeiten. Aufgrund der vorherrschenden Korngröße des transportierten Materials kann zwischen Schuttströmen mit hauptsächlich grobem Material und Schlammströmen mit weitestgehend feinem Material unterschieden werden. Ein Beispiel für einen Schuttstrom mit eher geringer Reichweite aus dem Jahr 1998 gibt *Abbildung 35*. Stark wasserhaltige Schutt- oder Schlammströme, die aufgrund ihrer hohen Dichte riesige Felsblöcke und Baumstämme mitreißen können, werden auch als Muren bezeichnet. Muren sind an die Bachläufe von Wildbächen gebunden und erreichen mit 40 bis 50 km/h sehr hohe Geschwindigkeiten.

Abb. 35: Während starker Regenfälle ereignete sich im Sommer 1998 bei Hinterhopfreben ein Schuttstrom aus stark mergeligem Material. Der Strom überdeckte in einer eher langsamen aber fließenden Bewegung einen Forstweg auf etwa 20 m Länge.



Auslöser für Fließbewegungen sind vor allem starke Niederschläge und die Schneeschmelze, die den Wassergehalt im Lockergesteinsmaterial schnell ansteigen lassen. An den Ausgängen der Wildbäche wird das mitgeführte Material in Schwemmfächern (Murkegel) abgelagert. Diese wurden bereits in *Abbildung 30* vorgestellt.

4.5 Kriechen

Unter Kriechen versteht man eine langsame, kontinuierliche Bewegung mit oder ohne ausgeprägte Gleitfläche, deren Ausmaß in die Tiefe rasch abnimmt. Die Geschwindigkeiten reichen von wenigen Millimetern bis einigen Zentimetern im Jahr. Kriechvorgänge treten sowohl in Fest- als auch in Lockergesteinen auf, beschränken sich aber vor allem auf die obersten Bodenschichten eines Hanges. Kriechende Bewegungen werden im Gelände oft durch eine wellige Morphologie, sogenannte Rutschbuckel angezeigt (*Abbildung 36*). Oftmals kann man durch einen deutlich ausgeprägten Sichelwuchs von Bäumen erkennen, dass Hangbewegungen stattfanden bzw. immer noch stattfinden. Kriechbewegungen leiten eine Rutschung ein. Der Hang verformt sich zunächst plastisch, ohne eine Gleitfläche auszubilden. Kommt es durch eine Änderung des Gleichgewichts (z.B. durch starke Niederschläge) zu einer Rutschungsbewegung, so tritt häufig nach dem Ereignis noch Kriechen entlang der Gleitfläche auf.

Abb. 36: Ein Kriechhang bei Oberboden/Schröcken. Die Oberfläche des Hanges ist durch eine Kriechbewegung deutlich gewellt (Rutschbuckel, Foto: Ch. Schanz).



5. Datengrundlage der Gefährdungsanalyse

In Kap. 4 wurden einige Fallbeispiele für Massenbewegungen in den Vorarlberger Talschaften vorgestellt. Die folgenden Untersuchungen haben sich auf die stürzenden und rutschenden Ereignisse konzentriert, weil diese die vorherrschenden Mechanismen darstellen. Es musste jetzt untersucht werden, welche Informationen in einem regionalen Maßstab herangezogen werden können.

5.1 Betrachtete Faktoren

Allgemein werden Faktoren, die zu einer Massenbewegung führen, in zwei Gruppen unterteilt:

- vorbereitende Faktoren
- auslösende Faktoren

Unter den vorbereitenden Faktoren versteht man die Eigenschaften eines Gebietes, vor allem die Morphologie und die Geologie des Untergrundes. Diese Faktoren bleiben über den Erlebniszeitraum von 50 bis 100 Jahren konstant. Auslösende Faktoren sind dagegen kurzzeitigen Schwankungen unterworfen und zeigen lokal sehr unterschiedliche Ausprägung. Dazu gehören z.B. Niederschlag oder Erdbeben.

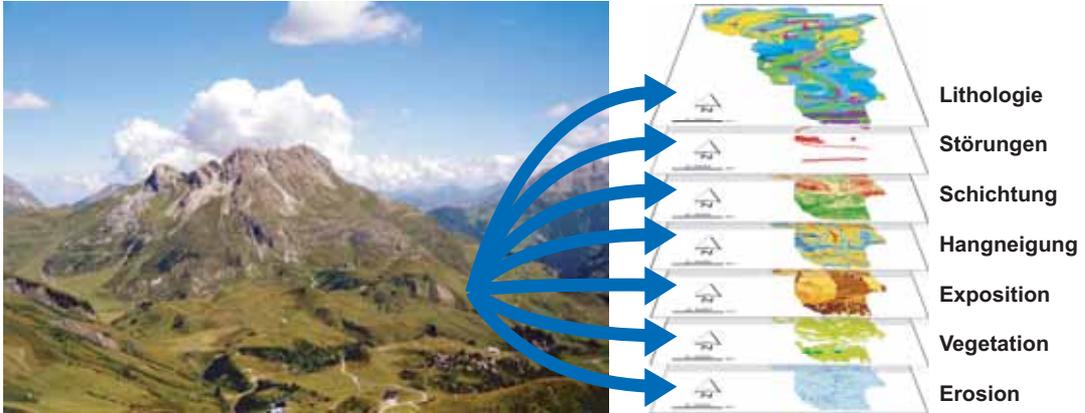
Für die Bildung eines Ereignisses ist immer das Zusammenspiel mehrerer vorbereitender und auch mindestens eines auslösenden Faktors verantwortlich. Eine Gefährdungsanalyse muss deshalb einen Kompromiss zwischen der notwendigen Genauigkeit – also der Anzahl der betrachteten Faktoren – und den vorhandenen Informationen finden. Je größer die Zahl der betrachteten Faktoren ist, desto größer wird die Zahl der notwendigen Faktoren und desto kleiner wird der Bereich, der in dieser Weise bearbeitet werden kann. Es muss auch beachtet werden, dass die Erhebung neuer Daten meist der langwierigste und damit teuerste Teil einer Analyse ist.

5.2 Datenverarbeitung

Für die weiteren Arbeiten wurde ein Geographisches Informationssystem (GIS) verwendet. Mit einem GIS können raumbezogene Daten erfasst, gespeichert, verarbeitet und verknüpft werden (BARTELME 1995). Die im GIS enthaltenen Daten beschreiben Objekte unserer Umwelt (z.B. Straßen, Gebäude, Gesteine). Die Vorteile eines GIS bestehen in der praktischen Aufbewahrung, Visualisierung und schnellen Verfügbarkeit der Daten.

Bei der Verarbeitung mit einem GIS werden die verschiedenen Daten in Klassen mit gleichen Eigenschaften (z.B. Lithologie, Störungen, Vegetation, usw.) eingeteilt und in unterschiedlichen Ebenen jeweils getrennt voneinander aufbewahrt (*Abbildung 37*). Sie können bei Bedarf miteinander kombiniert und überlagert werden, um ganz neue Datensätze zu erhalten. Dabei stehen in einem GIS mehrere Werkzeuge (Tools) zur Verfügung.

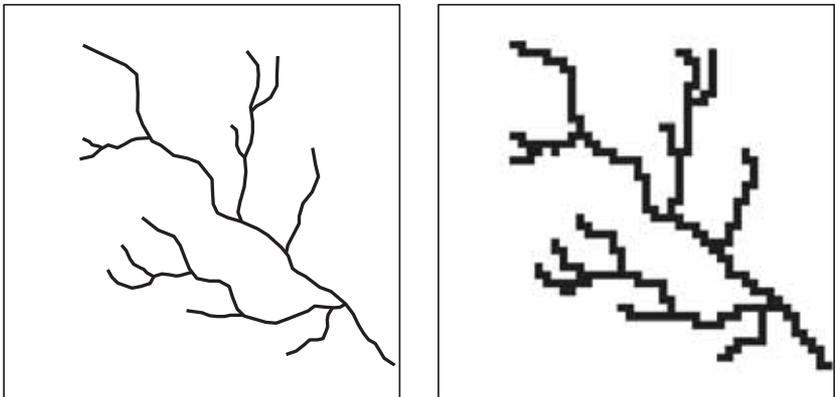
Abb. 37: Erfassung der Landschaftsinformationen in getrennten Ebenen.



5.2.1 Vektoren contra Raster

Ein GIS ist in der Lage, mit unterschiedlichen Datenmodellen zu arbeiten: sog. Vektor- und Raster-Daten (*Abbildung 38*). Die verschiedenen Datensätze können in die jeweils andere Datenstruktur konvertiert werden, jedoch können bei dieser Umwandlung Daten an Qualität verlieren oder ganz verloren gehen. Im Rahmen dieser Arbeit kamen beide Modelle zur Anwendung.

Abb. 38: Die Datenmodelle am Beispiel eines Fluss-Systems: links als Vektoren und rechts als Raster.

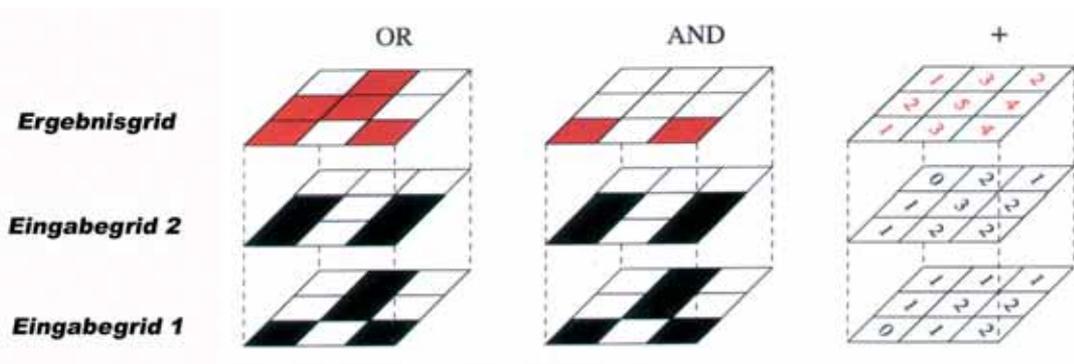


Vektormodelle enthalten Punkte (Elemente ohne Fläche oder Länge), die gegebenenfalls zu Linien (Elemente mit einer Länge, aber ohne Fläche) verbunden werden. Werden Linien zu einer Form geschlossen, entstehen Flächen (Polygone). Mit den Grundelementen Punkt, Linie und Polygon lassen sich beliebige Vektorgrafiken erstellen, denen Attribute (thematische Informationen) zugeordnet werden. Das Vektor-Datenmodell wurde hauptsächlich dazu benutzt, die Daten am Bildschirm zu digitalisieren und um die geologischen und geotechnischen Karten zu erstellen.

Bei einem Rastermodell wird das Arbeitsgebiet gleichmäßig in ein Gitter mit gleich großen Teilflächen aufgeteilt (Rasterzellen, Pixel), die meist aus Quadraten oder Rechtecken bestehen. Die verschiedenen Zellen sind nach Zeilen und Spalten geordnet. Satellitendaten, digitale Fotos und gescannte Karten sind Beispiele für Rasterdaten. Die Genauigkeit von Rasterdarstellungen ist abhängig von der in einer Zelle dargestellten Fläche. Je kleiner die Zellengröße, desto größer die Auflösung und die Genauigkeit der gezeigten Elemente. Jedoch steigt damit auch der Speicherplatzbedarf. Rasterdaten lassen sich allgemein gut in ein Layer-Konzept einbinden und überlagern, da die Zellen der einzelnen «Layers» gleich groß sind. Dies ist vorteilhaft für eine schnelle Modellierung.

Sowohl Vektor- als auch Rasterdaten haben ihre Vor- und Nachteile bei der Anwendung. Rastermodelle sind für die Beschreibung natürlicher, kontinuierlicher Übergänge – z.B. einer Geländeoberfläche – besser geeignet als Vektormodelle. Mathematische Berechnungen raumbezogener Daten sind einfach durchführbar, da jeder Zelle im Raster genau ein Wert pro Datenebene zugeordnet ist (Abbildung 39). Überlagerungen und Kombinationen verschiedener Datenebenen erfordern so einen geringen Aufwand. Ein weiterer Vorteil von Rasterdaten ist die im Vergleich zu Vektordaten einfachere Datenstruktur.

Abb. 39: Schema der Verarbeitung von Rasterdaten. Ebenen können durch Operatoren schnell verknüpft werden (z.B. Boolesche Operatoren UND bzw. ODER und mathematischer Operator SUMME; aus SCHANZ 2002)

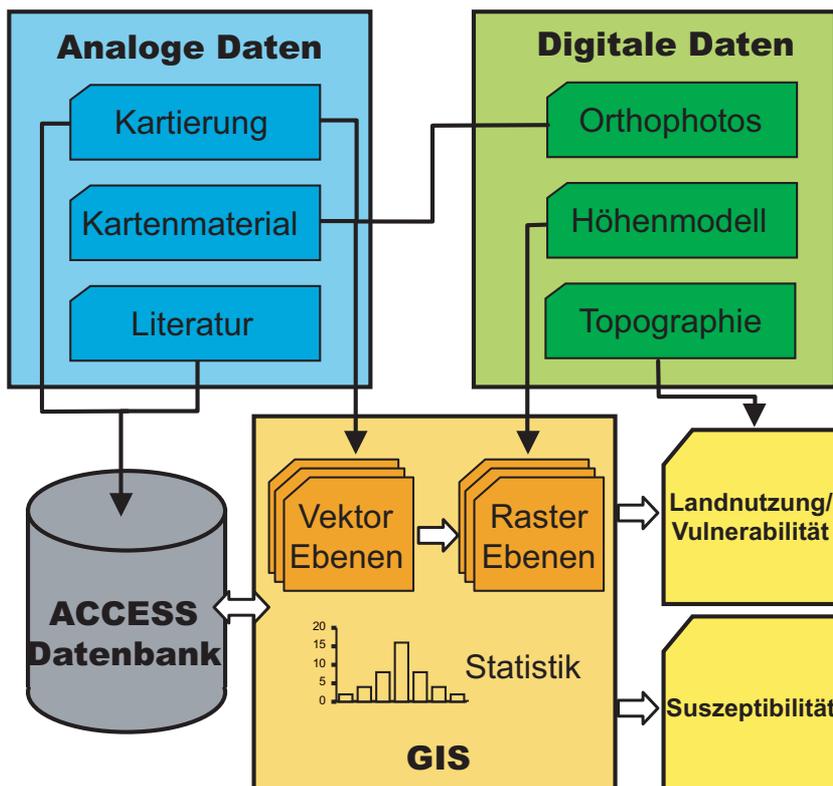


Vektormodelle haben ihre Stärke bei linearen Verbindungen, wie z.B. Straßen oder Flüssen. Vektormodelle verbrauchen in der Regel weniger Speicherplatz als Rastermodelle, weil bei Rastermodellen jede einzelne Rasterzelle abgespeichert wird, egal ob sie für die Berechnungen wichtige Daten enthält oder nicht. In Vektormodellen können Objekte naturgetreuer dargestellt werden, als in Rastermodellen. Wegen der komplexeren Datenstruktur ist aber die Verarbeitung und Kombination von Ebenen aufwändiger.

5.3 Eingabedaten

Die Informationen für die Risiko-Analyse lagen in analogem und digitalem Format vor (*Abbildung 40*). Alle im Gelände gesammelten Informationen (Geologie, Ereignisse, etc.) wurden mit der Software ArcGIS 8.2 digitalisiert. Ausschnitte kleinmaßstäblicher Karten wurden zum Vergleich ebenfalls mit dem GIS registriert. Dazu kamen Literaturangaben, die zusammen mit den Aufschlussbeschreibungen in einer Datenbank gesammelt wurden. Die Datenbank wurde mit dem GIS verknüpft, sodass alle Information über eine Formation auch von den Karten aus aufgerufen werden können. Bereits digital wurden vom Landesvermessungsamt Orthofotos, die topographische Karte und ein Höhenmodell zur Verfügung gestellt.

Abb. 40: Konzept der Datenverarbeitung mit dem GIS aus analogen und digitalen Ausgangs-Informationen.



Die Untersuchungen innerhalb des Projektes haben gezeigt, dass die Arbeit mit Rastern für die Gefährdungsanalyse geeigneter ist (KASSEBEER & RUFF 2003). Deshalb wurden auch die Vektordaten in Raster der Zellengröße 25m konvertiert. Diese Auflösung entspricht dem Digitalen Höhenmodell (siehe unten) und ist für regionale Betrachtungen gut geeignet.

Nach den Feldbeobachtungen und in Anlehnung an vorhandene Arbeiten in den Alpen (z.B. TURRINI & VISINTAINER 1998, REITERER 2000) wurden folgende vorbereitende Faktoren betrachtet:

- Lithologie
- Abstand zu Störungen
- Scheinbares Einfallen
- Hangneigung
- Exposition
- Vegetation
- Erosion

Im Folgenden sollen die Datenebenen und ihre Grundlage kurz vorgestellt werden.

5.3.1 Lithologie

Die Zahl der verschiedenen geologischen Formationen ist sehr groß und musste für die Analyse reduziert werden. Deshalb wurden die Formationen aufgrund ihrer lithologischen Eigenschaften in Anlehnung an MOSER & ÜBLAGGER (1984) in lithologische Klassen zusammengefasst.

Klasse	Beschreibung	Beispiele
Homogenes Festgestein	Gneise Sandsteine Kalksteine/Dolomite Radiolarite	Hauptdolomit Formation Raiselberger Sandstein Schrattenkalk Formation Quintner Kalk Formation
Heterogenes Festgestein kalkdominiert tondominiert	Wechsellagerungen	Kössener Schichten Planknerbrücke Formation Weissachsichten
Wechselfestes Gestein	Mergel oder Tonsteine	Lechtal Formation Arosa-Zone Zementstein Formation
Lockergestein	Erosions- bzw. Verwitterungsprodukte des Anstehenden	Hangschutt Fels-/Bergsturzmateriale Schwemmfächer Fluviatile Ablagerungen Limnische Ablagerungen Moränenmateriale Glazio-fluviatile Ablagerungen

Tab. 4: Lithologische Klassifikation der Gesteine (verändert nach MOSER & ÜBLAGGER 1984) und einige Beispiele aus Kap. 3.

Homogene Festgesteine zeichnen sich durch annähernd isotropes Verhalten aus, d.h. die Lage der Schichtung besitzt nur eine untergeordnete Bedeutung. Dagegen zeigen heterogene Festgesteine ausgeprägte Anisotropie durch Schichtung oder Bankung, bedingt durch Materialwechsel. Dabei spielt vor allem die Ausprägung von tonigen Schichten eine Rolle für das mechanische Verhalten. Deshalb wurden die heterogenen Festgesteine nochmals in kalk- und tondominiert unterteilt. Die wechselfesten Gesteine verändern ihre mechanischen Eigenschaften bei Zugabe von Wasser (DIN 4022), ein Verhalten, das vor allem auf die Quellung von Tonmineralen zurückzuführen ist. Diese Gesteine sind für die Geotechnik von entscheidender Bedeutung, da hier verstärkt Massenbewegungen auftreten können. Die Lockergesteine können aufgrund ihrer Genese weiter unterteilt werden. Ihre Eigenschaften lassen sich nach MOSER & ÜBLAGGER (1984) direkt aus den Ablagerungsbedingungen ableiten.

Um weitere Informationen über die Gesteine verwerten zu können, wurde eine ACCESS-Datenbank aller im Projekt bearbeiteten Formationen angelegt. Diese enthält neben den lithologischen auch stratigraphische Beschreibungen (Abbildung 41). Mit Hilfe der Kennzahl «GEOL» wurde die Datenbank mit dem GIS verknüpft. So sind aus der geologischen Karte durch die Polygon Attribute Table (PAT) alle Werte einer Formation abrufbar. Ziel dieser Verknüpfung war hauptsächlich die weitere Verwendung der gesammelten Informationen im VoGIS.

Abb. 41: Eingabemaske der Datenbank. Als Beispiel wurde die Hauptdolomit Formation gewählt.

Lithologie
Geozisokarte Vorarlberg

Eingabemaske Geotechnik

Stratigraphische Bezeichnung: Hauptdolomit Formation
 PAT GEOL: 112
 Lithologische Klasse: homogenes Festgestein

Klüftung

Großklüfte:	ja	Kleinklüfte (KK):	ja
GK Klüftlänge (m):	4	KK Klüftlänge (m):	0.2
GK Klüftabstand (m):	10	KK Klüftabstand (m):	0.3
GK Oberfläche:	gebogen	KK Oberfläche:	eben
GK Beschaffenheit:	glatt	KK Beschaffenheit:	glatt
GK Klüftfüllung:	keine	KK Klüftfüllung:	Calcit

Weitere Parameter

Bankung (cm): 20-120 Mittlere Bankmächtigkeit (m): 1

Durchtrennungsgrad (KK Klüftabstand/mittlere Bankmächtigkeit): 0.3

Festigkeit: hart
 Chemische Verwitterung: unverwittert
 Physikalische Verwitterung: mittel

Datensatz: 28 von 137



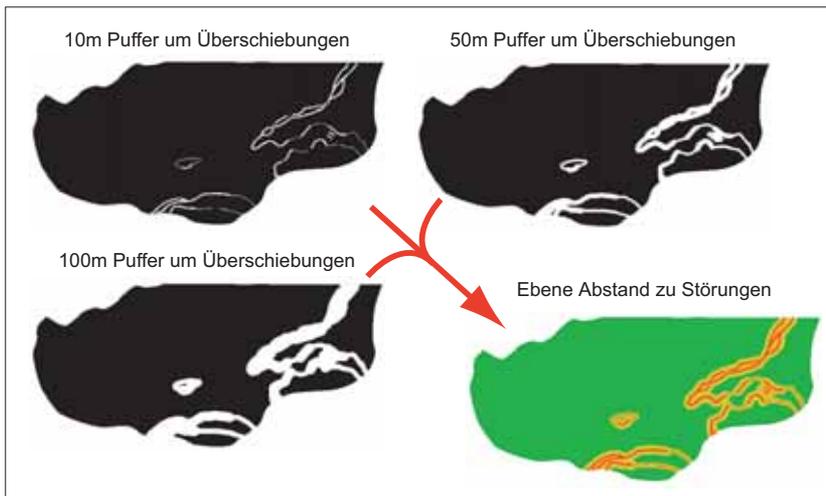
5.3.2 Abstand zu Störungen

Zahlreiche tektonische Störungen durchziehen die Arbeitsgebiete, die je nach Bildungsregime eine unterschiedliche Ausbildung zeigen. Zwischen den Deckenkörpern der Nördlichen Kalkalpen befinden sich Überschiebungen mit zahlreichen Zweig-Störungen, die den Gesteinsverband in bis zu 100 m mächtigen Zonen vollständig zerstört haben (*Abbildung 42*). Dazu kommen geringmächtigere Überschiebungszonen, welche die Decken in Schuppen unterteilen. Eine eher klar definierte Störungsfläche besitzen Blattverschiebungen, welche die laterale Komponente der Verschiebungen tragen.

Um die Linien-Information der tektonischen Störungen in eine Flächen-Information umzuwandeln, wurden die Störungen mit drei unterschiedlich großen Pufferzonen umgeben, zu einer Ebene vereinigt und danach gerastert (*Abbildung 43*). Die Größe der Pufferzonen ist abhängig von der Art der Störung und folgte aus der Geländebobachtung (*Kap. 6.2.4*).

Abb. 42: Beispiel für eine Störungszone. Das Bild zeigt die Deckenüberschiebung zwischen Nördlichen Kalkalpen und Rhodanubischen Flysch am Steintobel bei Lütze (Gr. Walsertal). Der Gesteinsverband ist völlig zerstört. Linienförmige Gesteinskörper sind von einer feinkörnigen, dunklen Matrix umgeben.

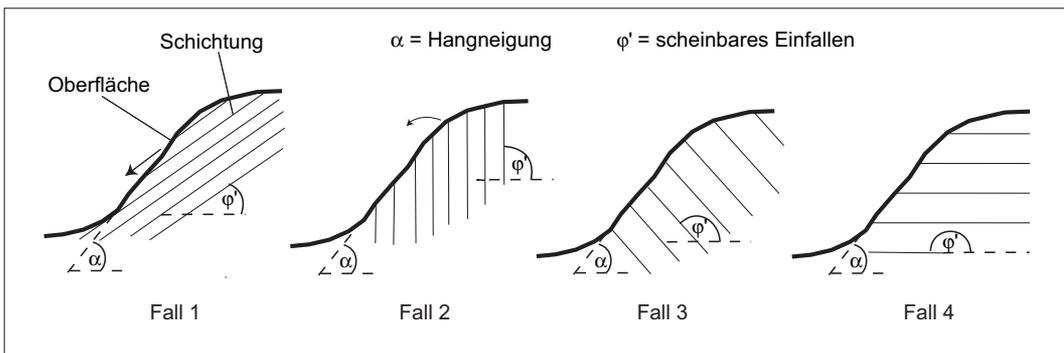
Abb. 43: Erstellung der Datenebene «Abstand zu Störungen» durch die Vereinigung von drei Pufferzonen (Beispiel Gr. Walsertal).



5.3.3 Scheinbares Einfallen

Kap.4 hat gezeigt, dass nicht die Schichtung an sich betrachtet werden muss, sondern die relative Lage von Schichtung und Hangneigung. Im Wesentlichen müssen hier vier Fälle unterschieden werden (Abbildung 44): Ein Potenzial für eine Hangrutschung ergibt sich, wenn die Schichten hangauswärts einfallen (Fall 1). Fall 2 kann zum Kippen der Schichtpakete führen. Fall 3 und 4 sind dagegen relativ stabil.

Abb. 44: Die relative Lage von Schichtung zu Hang führt zu Rutschen, Kippen oder stabiler Lagerung.



Messungen der räumlichen Lage der Trennflächen lagen als Punkt-Koordinaten vor, welche die Einfallrichtung (gegen Nord) und den Einfallswinkel (gegen die Horizontale) beschreiben. Obwohl viele Messwerte in den Arbeitsgebieten aufgenommen wurden, ist es unmöglich – im Gegensatz z.B. zu einer Grundwasseroberfläche – diese über die gesamte Fläche zu interpolieren. Dies hat zwei Gründe: Erstens ist an den Störungen eine Interpolation nicht möglich und zweitens sind die Messwerte nur an den zugänglichen Aufschlüssen aufgenommen worden. Die Werte sind also heterogen über das Gebiet verteilt. Für eine grobe Einschätzung wurden «per Hand» Homogenbereiche des Einfallens konstruiert, wobei eine Genauigkeit von Klassen zu 15° noch zu vertreten war.

Die Werte für Einfallsrichtung und Einfallswinkel wurden in zwei getrennten Ebenen erfasst. Das scheinbare Einfallen – der Einfallswinkel der Schichtung in Hangrichtung – wurde danach aus *Abbildung 45* konstruiert (GWINNER 1965).

$$\tan \varphi' = \tan \varphi \cdot \cos \beta$$

φ' : scheinbarer Einfallswinkel

φ : wahrer Einfallswinkel

β : Winkel zwischen Einfallsrichtung und Hangrichtung

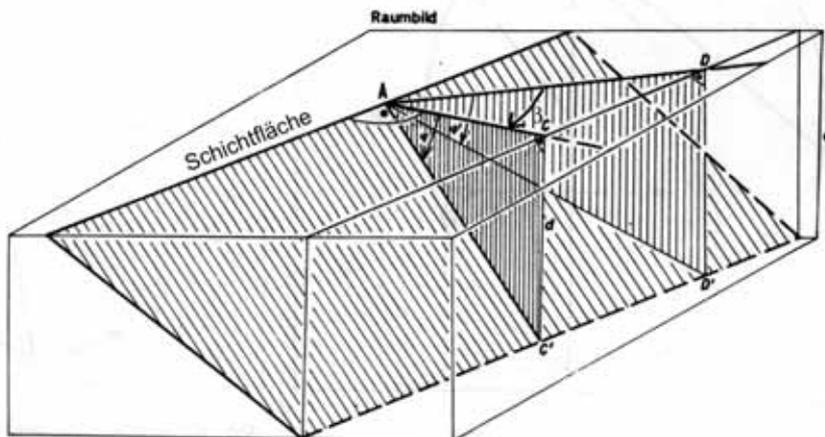
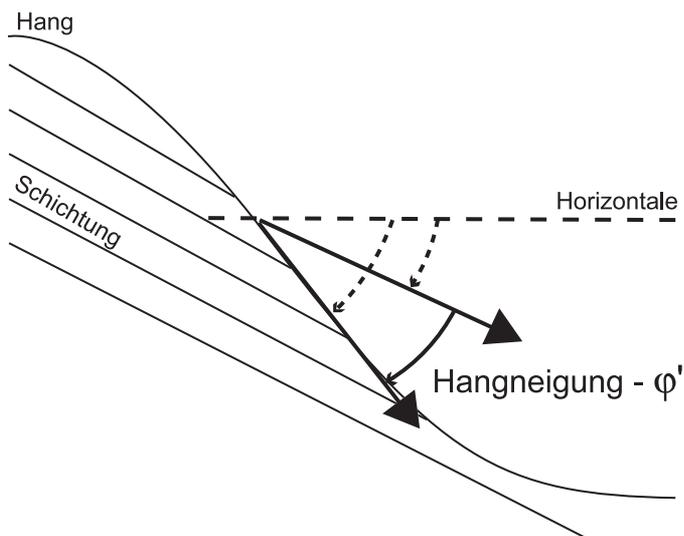


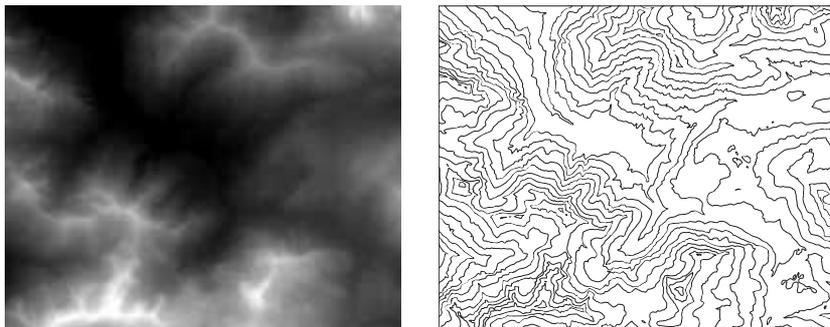
Abb. 45: Oben: Geometrie von wahrem und scheinbarem Einfallen einer Schichtfläche (verändert nach GWINNER 1965). Unten: Berechnung der Differenz von Hangneigung und scheinbarem Einfallen φ' .



5.3.4 Hangneigung und Exposition

Für die Arbeiten wurde durch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) ein sog. Digitales Höhenmodell (DHM) zur Verfügung gestellt. Ein DHM wird von den Vermessern aus lokalen Messpunkten und morphologischen Kanten konstruiert, die aus Luftbildern gewonnen werden können. Ein DHM kann auf verschiedene Arten dargestellt werden (*Abbildung 46*). Auf topographischen Karten wird die Höhe über einem Bezugspunkt (müNN oder mSh) als Isohypsen dargestellt.

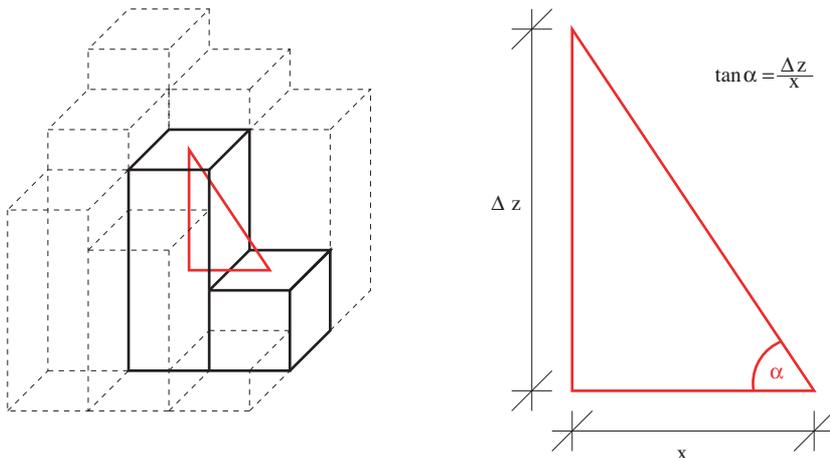
Abb. 46: Darstellung eines digitalen Höhenmodells als Raster (je heller der Grauton, desto höher der Punkt) und als Höhenlinien (aus SCHANZ 2002).



Natürlich ist ein DHM nur eine Annäherung der realen Geländeoberfläche. In Vorarlberg hat dieses Modell eine vertikale Genauigkeit von 1-2 m in flachem und 5-10 m in steilem Gelände (www.bev.at). Die Rastergröße von 25 m ist für regionale Untersuchungen ausreichend, es werden jedoch lokale Rinnen oder kleinere Geländerücken nicht aufgelöst.

Da jede Zelle des Rasters (25 mal 25 m gross) als Information einen Höhenwert trägt, kann das GIS für jede Zelle den Nachbarn identifizieren, der relativ am niedrigsten liegt (Abbildung 47). Dieser sog. «Lowest Neighbour»- oder D8-Algorithmus (JENSON & DOMINGUE 1988) führt zu den Informationen Hangneigung und Exposition (Hangrichtung).

Abb. 47: Die Analyse der 8 nächsten Nachbarn einer Zelle (D8) ergibt die Information Hangneigung (aus SCHANZ 2002).



5.3.5 Vegetation

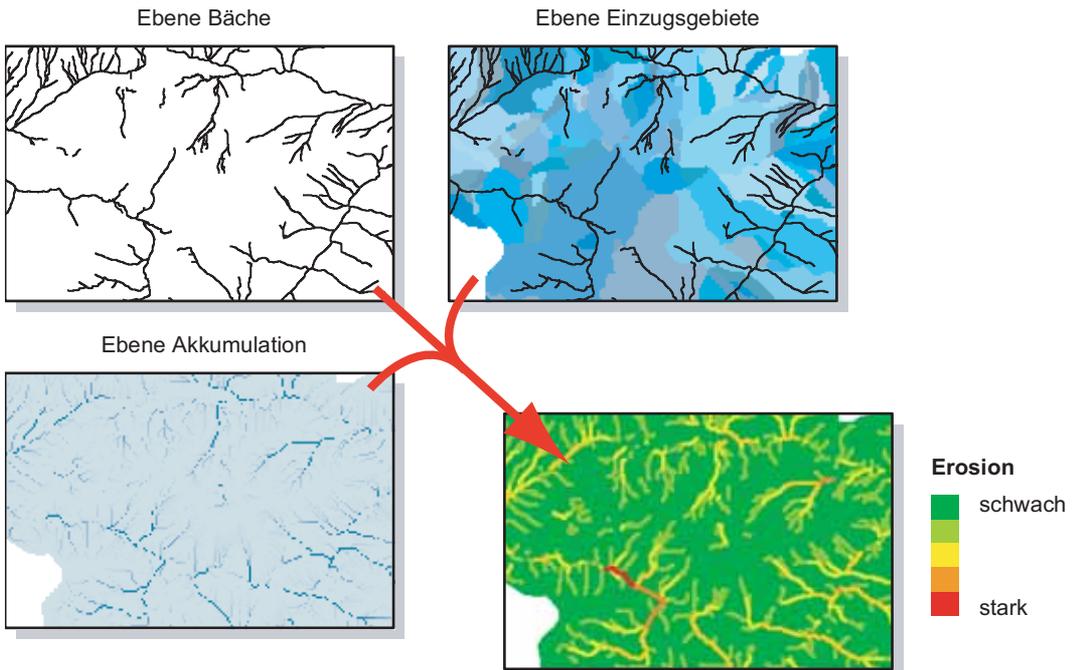
Der Bewuchs der Oberfläche stellt in vielen Fällen einen stabilisierenden Faktor dar. So wirkt das Wurzelwerk von Bäumen flachgründigen Bewegungen entgegen und das Rückhaltevermögen von Niederschlägen schützt vor Erosion (z.B. RICKLI et al. 2001). Deshalb ist die Gefährdung in bewaldeten Gebieten geringer als in unbewaldeten. Im Bereich von Wiesen (meist mit Almwirtschaft) kommt es durch Wegrarbeiten und Fahrzeuge zur Kompaktion der Oberfläche. Diese Stellen sind oft Ausgangspunkt von Rutschungen.

Die Schutzfunktion eines Waldes hängt von dem Alter und der Dichte des Baumbestandes ab. Liegen solche forstwirtschaftlichen Informationen vor, kann die Einteilung der Vegetation auf dieser Grundlage verfeinert werden. Auch Fernerkundungsdaten (CORINE Landcover) können hier eine Hilfestellung geben. Im Rahmen des Projektes wurde die Art der Vegetation aus den Orthofotos konstruiert. Da es sich um einen minder wichtigen Faktor handelt, war eine Einteilung in Felszone, Wald, Wiese und Besiedlung zunächst ausreichend (Kap. 6).

5.3.6 Erosion

Die Erosion ist ein destabilisierender Faktor. Für die Erosionswirkung eines Baches sind das Einzugsgebiet, die Hangneigung und der Untergrund von Bedeutung. Mit Hilfe des Höhenmodells wurden die Einzugsgebiete der Bäche abgegrenzt und die Sammelwirkung (Akkumulation) eines Bachabschnittes berechnet (FAIRFIELD & LEYMARIE 1991). Je größer das Einzugsgebiet, desto höher die Erosion und desto höher die Suszeptibilität. So konnte ein objektives Kriterium für die Erosionswirkung gefunden werden, das im Vergleich mit den kartierten Tobeln eine gute Übereinstimmung zeigt. Um die Erosionswirkung nicht auf das Bachbett zu beschränken, wurde das Raster mit der Akkumulation mit einer Nachbarschaftsanalyse in eine flächigere Information umgewandelt (Abbildung 48).

Abb. 48: Erstellung der Ebene Erosion aus den Einzugsgebieten und der Akkumulation in den Abflussrinnen.



6. Gefährdung Hangrutschungen

Aufgrund der grundlegend unterschiedlichen Mechanismen muss die Suszeptibilität für Rutschungen und Steinschlag zunächst getrennt bewertet werden. Danach erfolgt die Georisiko-Erfassung durch die Überlagerung dieser Informationen mit der Landnutzung (Kap. 8).

Für mittlere Maßstäbe (1:25.000 – 1: 50.000) sind sog. Indexmethoden gut geeignet. Im Projekt Georisikokarte Vorarlberg wurde eine solche Methode angewandt, weil die geringe Anzahl der Ereignisse und die schwierige tektonische Situation einen statistischen Ansatz unmöglich machten (KASSEBEER & RUFF 2003).

6.1 Die Indexmethode

In einer Indexmethode wird die Suszeptibilität qualitativ von schwach bis stark eingeteilt. Um eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Faktoren zu erreichen, wird sie mit Hilfe eines Index in fünf Stufen unterteilt (Tabelle 5).

Tab. 5: Die qualitative Einteilung der Suszeptibilität in 5 Stufen und deren Indizes.

Suszeptibilität				
Schwach	—————→			Stark
Sehr schwach	Schwach	Mittel	Stark	Sehr stark
0 – 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 – 1

Zu den Indexmethoden gibt es zahlreiche Beispiele (z.B. ANBALAGAN & SING 1996, GUPTA & ANBALAGAN 1997, REITERER 2000). Der Vorteil dieser Methoden liegt in einer relativ einfachen und standardisierten Datenerhebung. Dies führt zu schnellen und kostengünstigen Ergebnissen und die entstandenen Kartenwerke sind gut nachvollziehbar und weitestgehend vergleichbar. Die zu Rutschungen führenden Faktoren werden getrennt aufgenommen und mit einem Verzeichnis der aktuellen Ereignisse (sog. Ereigniskarte) verglichen. Hierbei hilft das GIS mit der Automation der Verarbeitung und bivariaten Statistiken.

Da ein GIS nur mit Flächendaten arbeitet, müssen die dreidimensionalen Hangbewegungen auf die Oberfläche projiziert werden. In dieser Arbeit wurden die auf *Abbildung 49* gezeigten Parameter einer Rutschung ausgewertet.

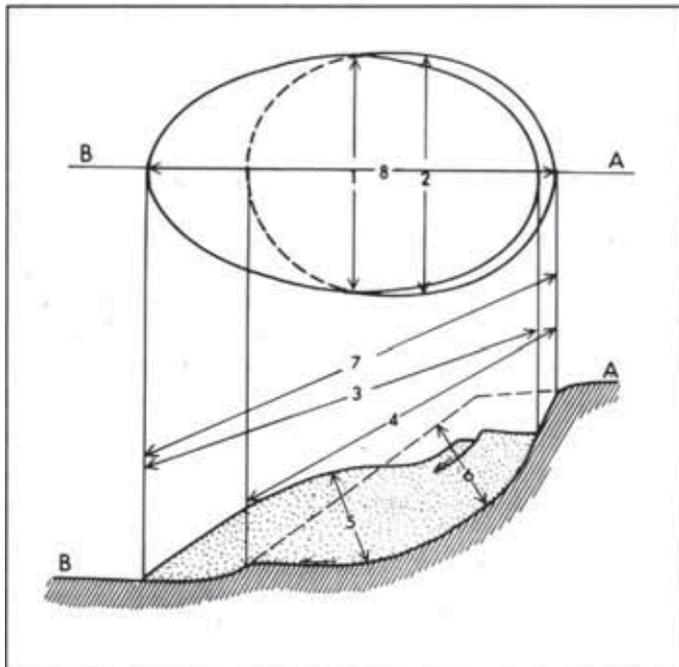
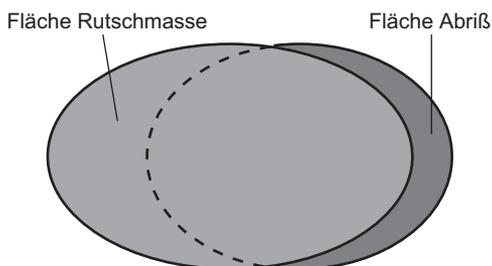


Abb. 49: Nomenklatur einer Rutschung (verändert nach IAEG 1990).

- 1=Breite der Rutschmasse,
- 2=Breite des Abrisses,
- 3=Länge der Rutschmasse,
- 4=Länge des Abrisses,
- 5=Tiefe der Rutschmasse,
- 6=Tiefe des Abrisses,
- 7=Absolute Länge,
- 8=Horizontale Länge.



Die Mächtigkeit der Rutschmasse und die Länge des Abrisses können im GIS nicht konstruiert werden. Deshalb wird zur Beschreibung der Rutschungen die (horizontale) Fläche der Rutschmasse und des Abrisses herangezogen. Beide Flächen zusammen ergeben die Gesamtfläche der Rutschung.

So werden zuerst die Datenebenen der einzelnen Faktoren mit der Ereigniskarte verglichen und nach ihrer Gefährdung in fünf Stufen eingeteilt (I_1). Die weitere Analyse erfolgt in einem dreiteiligen Entscheidungsbaum nach (Abbildung 50). Die Ebenen werden in Gruppen zusammengefasst und mit einem zweiten Index (I_2) nach ihrer Bedeutung innerhalb der Gruppe gewichtet. Die Summe dieser Indizes muss je Gruppe wieder Eins ergeben. Als letzten Schritt werden dann die Gruppen untereinander mit einem dritten Index (I_3) gewichtet und zur Gesamtgefährdung addiert. Dieses Ergebnis wird dann mit der Ereigniskarte verglichen und die Indizes I_2 und I_3 iterativ so lange angepasst, bis eine optimale Übereinstimmung mit der realen Situation erreicht ist.

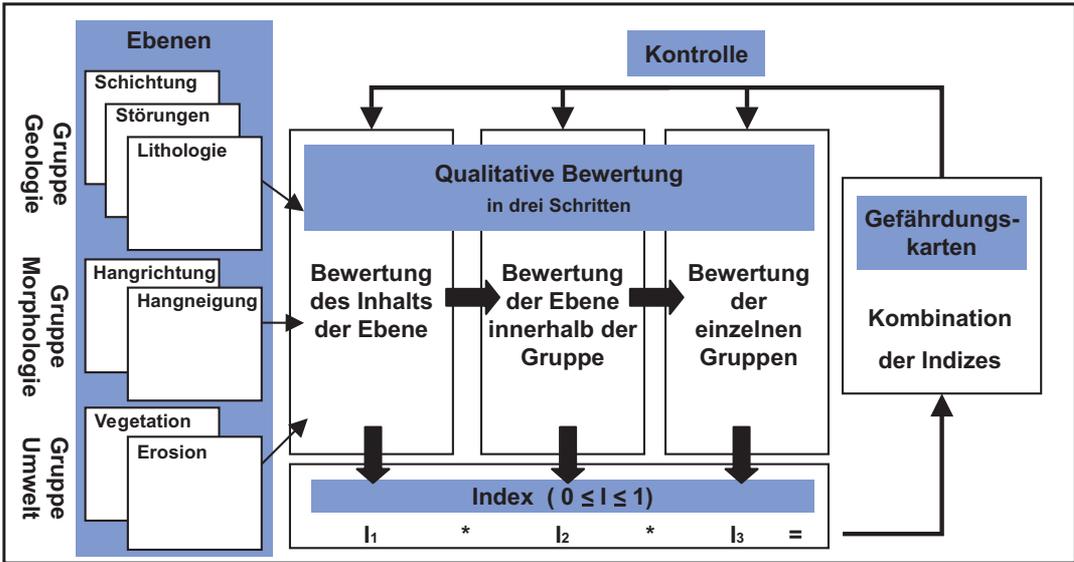


Abb. 50: Konzept der Indexmethode mit einer Bewertung in drei Schritten nach JUANG et al. (1992).

Rein rechnerisch ergibt sich die Suszeptibilität S_{Ebene} einer Faktoren-Ebene als Multiplikation der drei Indizes:

$$S_{\text{Ebene}} = I_1 * I_2 * I_3$$

Die Suszeptibilität jeder Zelle (Homogenbereich) des Arbeitsgebietes S_{Gesamt} ergibt sich dann aus der Addition der einzelnen Faktoren-Ebenen:

$$S_{\text{Gesamt}} = S_{\text{Ebene1}} + S_{\text{Ebene2}} + S_{\text{Ebene3}} + \dots$$

6.2 Indizierung der Ebenen

6.2.1 Hangneigung

Die Abrissflächen der Rutschungen im Arbeitsgebiet Hochtannberg/Arlberg verteilen sich nach *Abbildung 51* auf die Hangneigung, wobei zur besseren Übersicht 10° -Klassen gebildet wurden. Erwartungsgemäß kommen die meisten Rutschungen bei Hangneigungen zwischen 20° und 40° vor. Der überraschend hohe Anteil der Rutschungen bei 10 bis 20° geht auf die Rutschungen in den Terrassenschottern bei Lech zurück, deren Geländestufen im Höhenmodell abgeflacht sind.

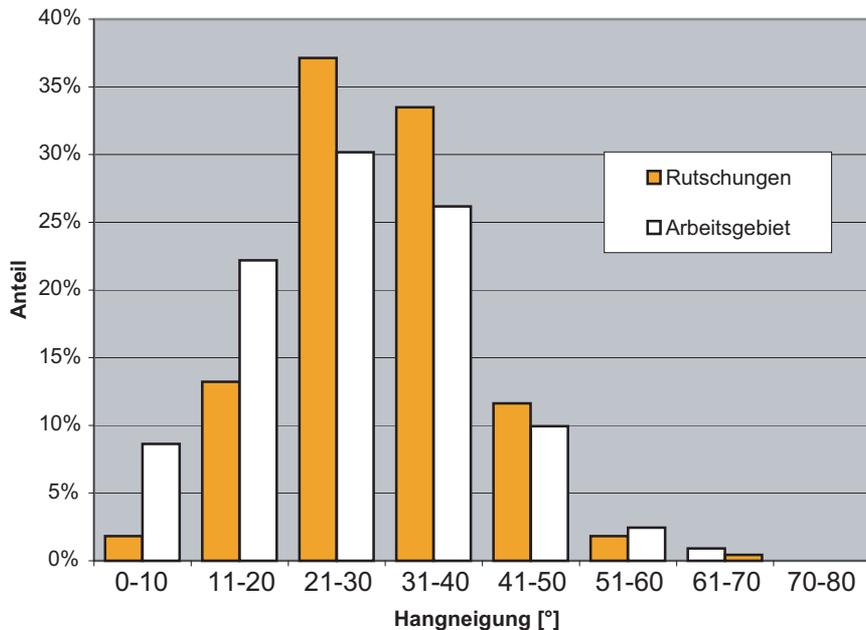


Abb. 51: Histogramm der Ereignisse (Fläche Abriss) im Arbeitsgebiet Hochtannberg Arlberg nach der Hangneigung.

Aus diesem Vergleich ergibt sich, dass Hangneigungen zwischen 20 und 40° stark gefährdet sind und damit einen hohen Index zugeteilt bekommen. Geringere Hangneigungen sind mittel bis schwach gefährdet (Tabelle 6). Der Bereich von 60 bis 90 Grad wurde als gering gefährdet eingestuft, weil hier Stürzen die vorherrschende Bewegungsart ist.

Hangneigung	I_1
0-10	0,1
11-20	0,4
21-30	0,8
31-40	1
41-50	0,6
51-60	0,2
61-90	0,1

Tab. 6: Indizes für die Hangneigung (RUFF 2005).

6.2.2 Exposition

Das Ergebnis der Untersuchung im Hochtannberg/Arlberg Gebiet nach der Exposition der Hangfläche zeigt *Abbildung 52*. Die Hänge des Arbeitsgebietes sind nicht signifikant auf eine oder mehrere Richtungen konzentriert. Betrachtet man die Rutschungen nach dem beteiligten Material, so zeigen sich in Lockergesteinen deutlich mehr Rutschungen an den Südhängen. Ähnliche Verhältnisse wurden auch bei den Untersuchungen im Großen Walsertal festgestellt. Dies kann durch indirekte Faktoren wie z.B. die Sonneneinstrahlung und den damit zusammenhängenden Frost-Tau-Wechseln begründet werden. Deshalb wurde die Gefährdung für Schuttrutschungen in südlichen Richtungen höher bewertet (*Tabelle 7*). An die anderen Richtungen wurden symmetrisch niedrigere Indizes vergeben.

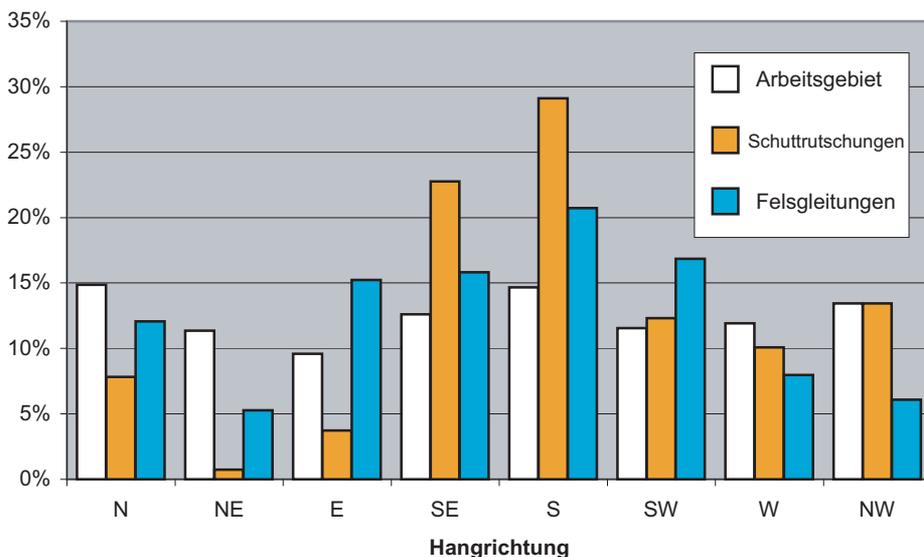


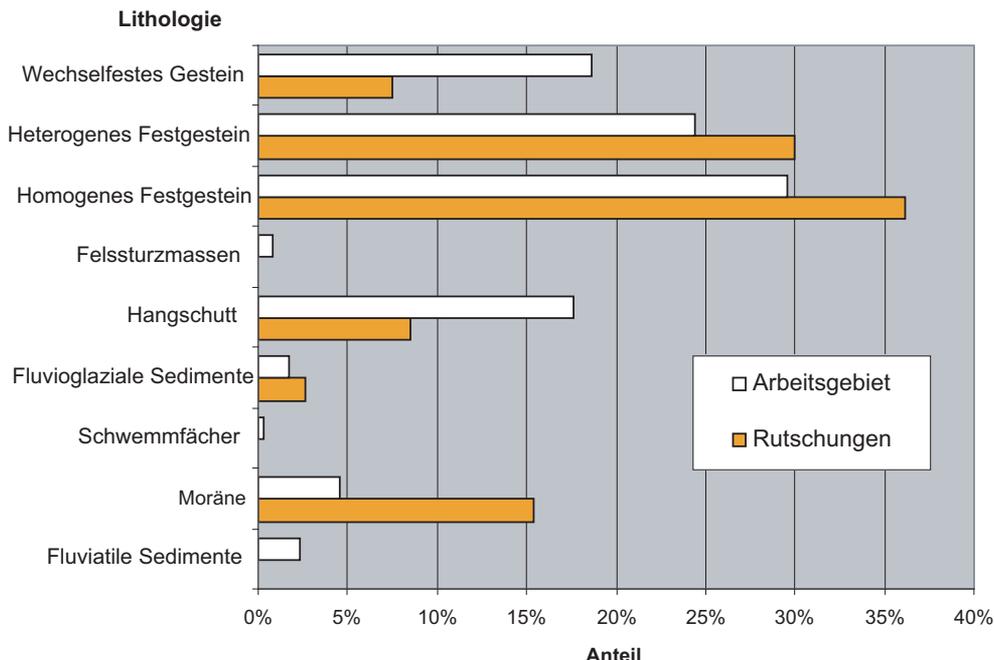
Abb. 52: Histogramm der Rutschungen (Gesamtfläche) nach der Exposition im Arbeitsgebiet Hochtannberg/Arlberg.

Tab. 7: Indizes für die Exposition (RUFF 2005).

Hangrichtung	I_1
Nord	0,2
Nordost	0,4
Ost	0,6
Südost	0,8
Süd	1
Südwest	0,8
West	0,6
Nordwest	0,4

6.2.3 Lithologie

Die Rutschungen verteilen sich im Hochtannberg/Arlberg Gebiet nach *Abbildung 53* auf die verschiedenen lithologischen Klassen. Hierbei kommt es zum einen darauf an, wie viele Rutschungen in einer Formation vorkommen und zum anderen, wie häufig diese Formation im Arbeitsgebiet ausstreicht. Außerdem handelt es sich um mechanisch unterschiedliche Rutschungsformen, die auch unterschiedliche Größen erreichen können. Die anfälligsten Lithologien sind die heterogenen Festgesteine, der Hangschutt und das Moränenmaterial. Das homogene Festgestein ist in der Statistik überbewertet, da die Rutschungen in dieser Klasse zumeist durch unterliegendes wechselfestes Gestein verursacht werden.



Es wurde versucht, Indizes für die allgemeine Anfälligkeit der Lithologien zu bestimmen. Obwohl in diesem Fall nur wenige Rutschungen in diesen Einheiten gefunden wurden, sind die tektonische Melange der Arosa-Zone und die wechselfesten Gesteine wegen des Tongehaltes sehr stark gefährdet. Stark gefährdet sind wegen der vielen potenziellen Gleitflächen die heterogenen Festgesteine und der Hangschutt aufgrund seiner Verbreitung und schlechter Kompaktion. Mittlere Indizes werden den homogenen Festgesteinen, Moränen und Terrassenschottern zugeordnet. Als schwach gefährdet werden fluviatile Ablagerungen, Felssturzmaterial und Schwemmfächer eingestuft (Tabelle 8).

Abb. 53: Histogramm der Gesamtfläche der Rutschungen im Arbeitsgebiet Hoch-tannberg/Arberg nach den beteiligten Lithologien.

Lithologie	I_1
Fluviatile Ablagerungen	0,1
Schwemmfächer	0,2
Hangschutt	0,7
Felssturzmaterial	0,3
Moränenmaterial	0,6
Glaziofluviatile Ablagerungen	0,4
Homogenes Festgestein	0,5
Inhomogenes Festgestein, kalkdominiert	0,7
Inhomogenes Festgestein, tondominiert	0,8
Wechselfestes Gestein	0,9
Tektonische Melange	1

Tab. 8: Indizes für die Lithologie (RUFF 2005).

6.2.4 Abstand zu Störungen

Im Bereich der Störungen ist das umgebende Gestein aufgelockert. Die Störungsflächen bilden Wasserwegsamkeiten. Mergelige Zerreibsel zwischen den Flächen können als Wasserstauer wirksam werden und es können sich erhöhte Porendrücke oder Quellen bilden. Dadurch kommt es im Bereich der Störungen zu einer erhöhten Gefährdung für Rutschungen. Als Kriterium für die Suszeptibilität wurde der Abstand zu einer Störung herangezogen, wobei die Gefährdung mit wachsendem Abstand geringer wird (*Tabelle 9*). Die Begrenzung der drei Pufferzonen wurde aus den Erfahrungen im Gelände festgelegt .

Tab. 9: Indizes für den Abstand zu Störungen (RUFF 2005).

Pufferzone	1	2	3
Abstand zu Decken-Überschiebungen [m]	30	100	200
Abstand zu Überschiebungen [m]	20	100	200
Abstand zu Blattverschiebungen [m]	20	50	100
I_1	1	0,8	0,5

6.2.5 Scheinbares Einfallen

Ein Hang wird meist als instabil angenommen, wenn das scheinbare Einfallen 10-15° geringer als die Hangneigung ist (z.B. TURRINI & VISINTAINER 1998). Hierbei muss beachtet werden, dass im Datensatz «Einfallswinkel» nicht unterschieden werden kann, ob das Einfallen mit oder entgegen der Hangrichtung orientiert ist (Fall 1 bzw. Fall 3 auf *Abbildung 44*). Diese Fälle können mit Hilfe des Cosinus unterschieden werden, denn es gilt

$\cos \beta > 0$	für	Einfallsrichtung in Hangrichtung
$\cos \beta < 0$	für	Einfallsrichtung entgegen Hangrichtung

Da der zweite Fall als relativ stabil angesehen werden kann, wird diesen Zellen der Wert Null (Differenz = 90°) nachträglich zugeordnet. Mit diesem neuen Datensatz kann die Differenz zur Hangneigung berechnet und nach *Tabelle 10* indiziert werden. Aufgrund der Ungenauigkeit der Ausgangsdaten wurde der Differenz bis -15° ebenfalls eine hohe Suszeptibilität zugeordnet. An sich gelten diese Werte nur für die Bereiche, in denen Festgestein ausstreicht. Sie sind aber auch für die anderen Gebiete nützlich, weil tiefgründige Rutschungen in Lockergesteinen auch das unterliegende Festgestein betreffen können.

Tab. 10: Indizes für die Differenz von Hangneigung und scheinbarem Einfallen (RUFF 2005).

Differenz Hangneigung – φ'	I_1
-90 – -15	0,2
-15 – 0	0,6
0	0,2
0 – 15	1
15 – 30	0,8
30 – 45	0,6
45 – 90	0,4

6.2.6 Vegetation

Innerhalb des Projektes wurde die Vegetation in vier Arten unterteilt und bewertet. Obwohl die theoretischen Überlegungen über die stabilisierende Wirkung der Vegetation eine Berechtigung haben, konnten überzeugende Beweise in den Arbeitsgebieten nicht gefunden werden. So gibt *Abbildung 54* einen Vergleich der Rutschungen in der Felszone (keine Vegetation) auf Wiesen und im Wald. Es kommen zwar im Verhältnis zum Flächenanteil innerhalb Waldgebieten weniger Rutschungen vor, aber die wenigsten Rutschungen zeigen die Wiesen und Weiden. Dies ist sehr leicht dadurch zu erklären, dass die Wiesen in deutlich flacherem Gelände vorkommen als die Wälder. Die bivariate Statistik kann also diesen Zusammenhang nicht ausreichend beschreiben. Für die Vegetation wurden die Indizes nach *Tabelle 11* vergeben.

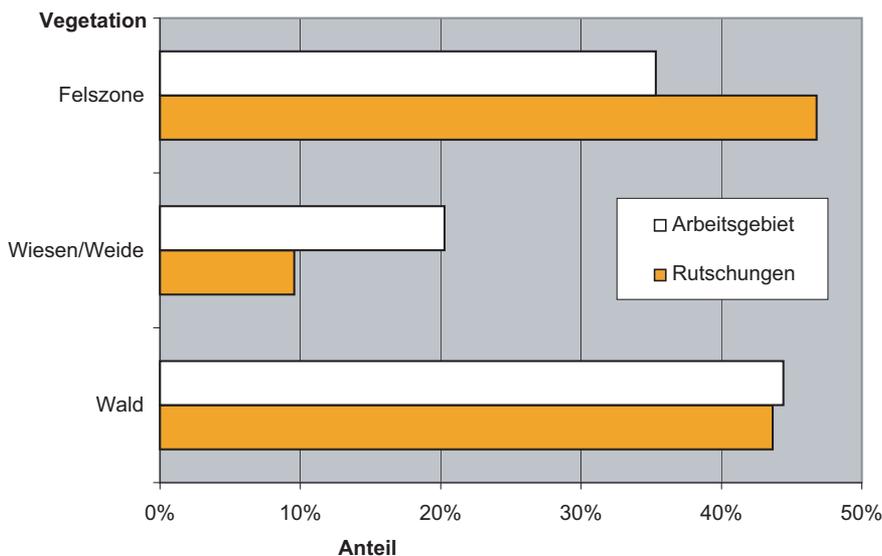


Abb. 54: Histogramm der Gesamtfläche der Rutschungen im Arbeitsgebiet Großes Walsertal nach der Vegetation.

Vegetation	I_1
Wald	0,2
Wiese	0,6
Felszone (keine Vegetation)	0,8
Siedlung	0,4

Tab. 11: Indizes für die Vegetation (RUFF 2005).

6.2.7 Erosion

Aufgrund der hohen Streuung der Ergebnisse aus der Akkumulations-Berechnung wurde die Klassifikation an Wendepunkten (Jenks Algorithmus) in deren Verteilung orientiert. Dadurch ergaben sich für das Hochtannberg/Arzlberg Gebiet orientiert an der Fläche der Einzugsgebiete sechs Gefährdungsklassen (*Tabelle 12*). Die einzelnen Werte müssen für andere Arbeitsgebiete eventuell angepasst werden.

Tab. 12: Indizes für die Erosionswirkung von Bächen anhand ihres Einzugsgebietes (RUFF 2005).

Einzugsgebiet [m²]	I₁
<30.000	0,2
30.000 – 160.000	0,4
160.000 – 600.000	0,6
600.000 – 3.100.000	0,8
3.100.000 – 5.460.000	1

6.3 Indizierung innerhalb der Gruppen

Da nicht jede Ebene gleich bedeutend zur Bildung einer Rutschung ist, werden die einzelnen Ebenen mit Hilfe des zweiten Indizes (I₂) in Gruppen zusammengefasst und gewichtet. Der Index reicht erneut von 0 bis 1, wobei die Summe der Indizes innerhalb einer Gruppe 1 ergeben muss. Die Indizes werden durch den Vergleich der Gruppe mit der Ereigniskarte iterativ angepasst.

6.3.1 Gruppe Morphologie

Zur Gruppe Morphologie gehören die Ebenen Hangneigung und Hangrichtung (= Exposition). Die Hangneigung wird stärker bewertet, weil die Hangrichtung nur ein indirektes Kriterium darstellt. Ein Vergleich der Gruppe mit der Ereigniskarte stützt diese Annahme.

6.3.2 Gruppe Geologie

Die drei Ebenen Störungen, Schichtlagerung und Lithologie werden in einer Gruppe kombiniert. Dabei wird die Lithologie als die wichtigste Ebene angenommen und deshalb mit dem höchsten Index bewertet. Der Vergleich dieser Gruppe mit der Ereigniskarte zeigte, dass die Störungen nur eine untergeordnete Bedeutung für die untersuchten Rutschungen haben. Trotzdem sollte diese Ebene aus den Geländefahrungen nicht vernachlässigt werden.

6.3.3 Gruppe Umwelt

Zur Gruppe Umwelt werden die beiden Ebenen Vegetation und Erosion zusammengefasst. Da die Vegetation ein stabilisierender Faktor und die Erosion hingegen ein destabilisierender ist, wird die Erosion stärker gewichtet. Das Ergebnis dieser Gruppe kann mit der Ereigniskarte nicht sinnvoll verglichen werden. Diese Information stellt jedoch eine sinnvolle Ergänzung dar.

6.4 Indizierung der Gruppen

Die Gewichtung der drei Gruppen Umwelt, Morphologie und Geologie durch den dritten Index (I_3) erfolgt iterativ. Die beste Übereinstimmung der Suszeptibilität mit der Ereigniskarte wurde erreicht, wenn die Gruppen Geologie und Morphologie in etwa gleich gewichtet wurden. Aufgrund der vielen geologisch induzierten Rutschungen im Arbeitsgebiet wurde die Gruppe Geologie am höchsten gewichtet. Die Gruppe Umwelt spielt nur eine ergänzende Rolle. Eine Zusammenfassung der einzelnen Indizes gibt *Tabelle 13*. Eine gute Übersicht über die Bedeutung der einzelnen Ebenen ergibt sich durch die Kombination $I_G = I_2 * I_3$. Demnach sind Lithologie und Hangneigung die wichtigsten Faktoren zur Bildung der Rutschungen. Danach folgen Hangrichtung und Schichtlage- rung. Eine untergeordnete Rolle spielen Störungen, Erosion und Vegetation.

Tab. 13: Aufstellung der Indizes zur Gewichtung der Ebenen (RUFF 2005).

Ebene	Gruppe	Bewertung der Ebene (I_2)	Bewertung der Gruppe (I_3)	Gesamtindex ($I_G = I_2 * I_3$)
Hangneigung	Morphologie	0,6	0,4	0,24
Exposition		0,4		0,16
Lithologie	Geologie	0,6	0,5	0,30
Scheinb. Einfallen		0,3		0,15
Störungen		0,1		0,05
Erosion	Umwelt	0,6	0,1	0,06
Vegetation		0,4		0,04
		Je Gruppe $\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 1$

Die Suszeptibilität für jede Zelle des Gebietes errechnet sich durch die Addition der einzelnen Ebenen:

$$\text{Suszeptibilität} = S_{\text{Hangneigung}} + S_{\text{Exposition}} + S_{\text{Lithologie}} + S_{\text{Einfallen}} + S_{\text{Störung}} + S_{\text{Erosion}} + S_{\text{Vegetation}}$$

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist ein Raster mit einer weiten Streuung von Gefährdungswerten. Als Beispiel wird das Ergebnis für das Hochtannberg/ Arlberg Gebiet dargestellt (*Abbildung 55*).

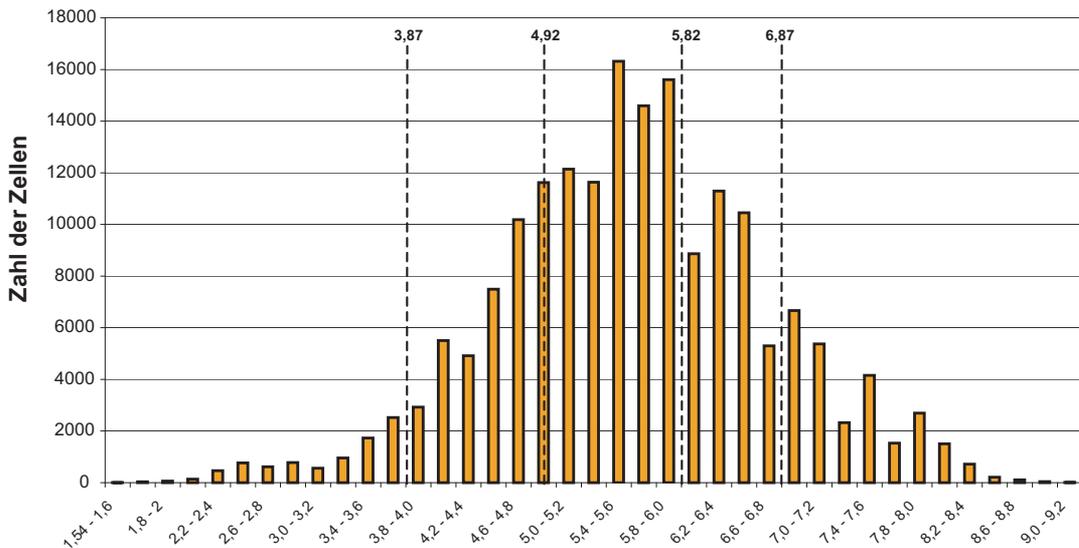


Abb. 55: Histogramm des Endergebnisses der Suszeptibilitätsberechnung im Hochtannberg/Arlberg-Gebiet mit den statistischen Wendepunkten (Jenks Algorithmus).

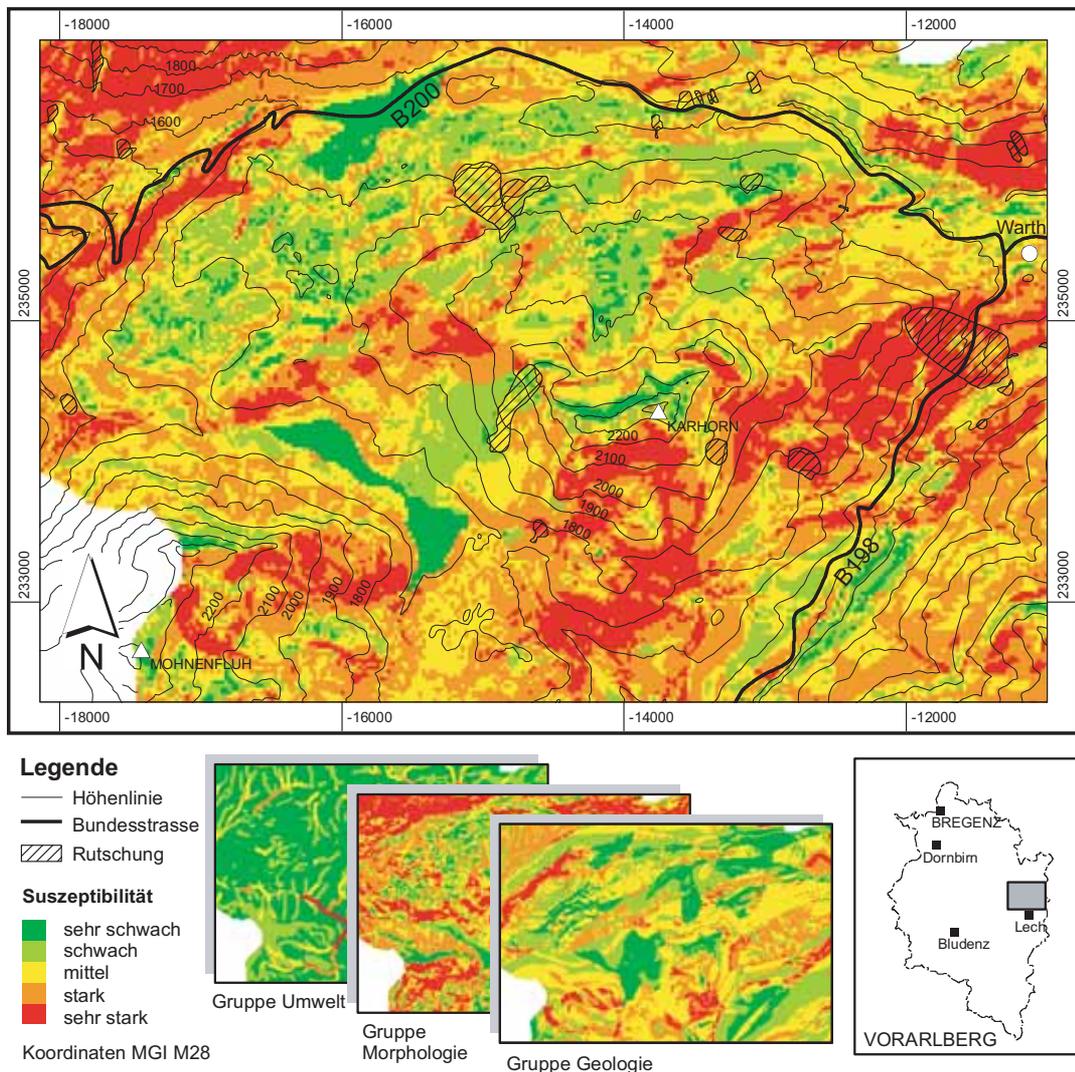
6.5 Darstellung und Bewertung der Gefährdungskarte

Für die Darstellung und Bewertung ist es sinnvoll, an der fünf-stufigen Gefährdungseinteilung festzuhalten. Um das Ergebnis zu verdeutlichen müssen jedoch die Wertebereiche der Stufen angepasst werden, denn die Wertebereiche 0-0,2 und 0,8-1 sind im Ergebnis unterrepräsentiert. Die Einteilung der fünf Stufen erfolgte deshalb nach Wendepunkten (Jenks Algorithmus) in der statistischen Verteilung. Für die Kartendarstellung wurden die Stufen in einer Farbfolge von Grün über Gelb nach Rot ausgewiesen (Tabelle 14). Diese Ampel-Farbfolge ist durch den Straßenverkehr gewohnt und deshalb leicht verständlich.

Tab. 14: Klassifizierung des Endergebnisses der Suszeptibilität nach statistischen Wendepunkten im Arbeitsgebiet Hochtannberg/Arlberg (RUFF 2005).

Suszeptibilität	Wertebereich	Farbe
Sehr schwach	1,45 – 3,87	Dunkelgrün
Schwach	3,87 – 4,92	Hellgrün
Mittel	4,92 – 5,82	Gelb
Stark	5,82 – 6,87	Hellrot
Sehr stark	6,87 – 9,2	Dunkelrot

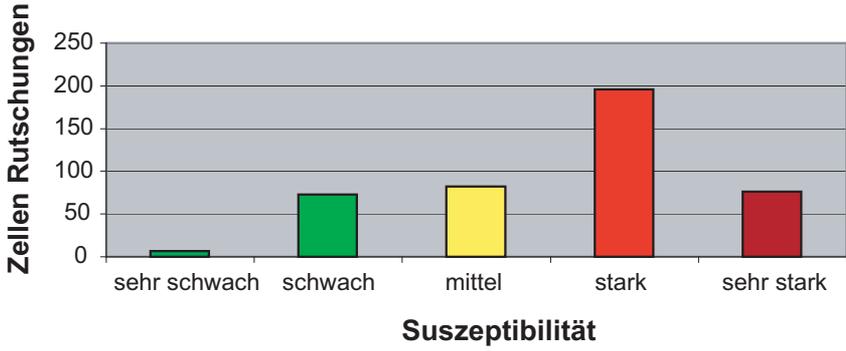
Abbildung 56 gibt das Endergebnis der Gefährdungsanalyse exemplarisch für das Hochtannberg Gebiet in Flächendarstellung wieder. Mit Hilfe einer weiteren Nachbarschaftsanalyse (Generalisierung, Majorityfilter) könnte die Darstellung noch übersichtlicher gestaltet werden. Die Darstellung des «Roh-Ergebnisses» zeigt, dass die Einschätzung nicht isolierte Punkte ausweist, sondern ganze Regionen mit ähnlicher Gefährdung.



Um dieses Ergebnis auch quantitativ bewerten zu können, gibt *Abbildung 57* den Vergleich der aktiven Rutschungen aus der Ereigniskarte mit der Gefährdungsanalyse. Von den ca. 430 Zellen, die ein Abrissgebiet einer Rutschung definieren, liegen etwa 270 in einem Bereich, der mit der verwendeten Methode als stark bis sehr stark gefährdet eingeschätzt wurde. Zieht man die starken Vereinfachungen in Betracht, ist dies eine Bestätigung für die verwendete Methode. Eine rein statistische Bewertung der Faktoren hätte zwar für die bekannten Rutschungen zu einem deutlicheren Ergebnis geführt, jedoch viele andere Fälle unberücksichtigt gelassen. Die vorliegende Methode kann als realistische Umsetzung angesehen werden.

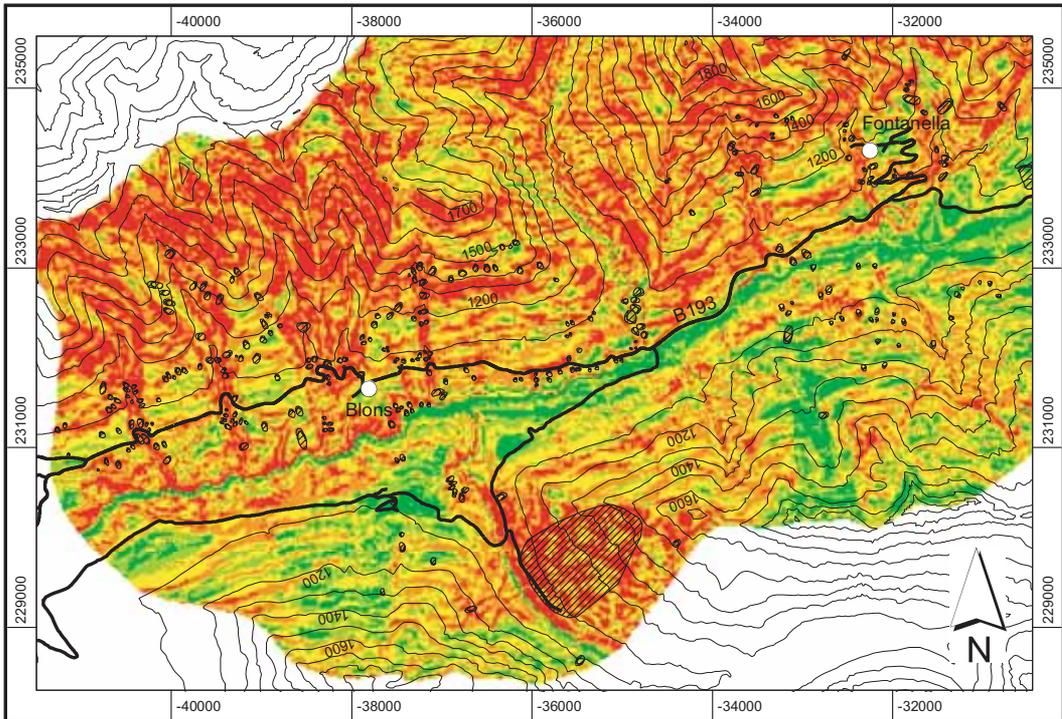
Abb. 56: Suszeptibilität Rutschungen im Hochtannberg Gebiet nördlich von Lech.

Abb. 57: Vergleich der aktiven Rutschungen (Fläche Abriss) mit der Gefährdungsanalyse im Hochtannberg/Arberg Gebiet (Abb. 56).



Die Suszeptibilitäts-Karte für das große Walsertal zeigt *Abbildung 58*. Dieses Gebiet liegt im Rhenodanubischen Flysch und ist deshalb allgemein stärker gefährdet für Rutschungen. Es fällt der Unterschied zwischen der Nord- und Süd-Flanke des Tales auf. Betrachtet man *Abbildung 13*, so wird der Grund hierfür klar: Die Schichten der Wechselfolgen fallen nach Süden hin ein. Das ergibt im Vergleich zur Hangneigung an den Süd-Hängen ein besonders ungünstiges scheinbares Einfallen (*Abbildung 44*).

Abb. 58: Suszeptibilität Rutschungen im Untersuchungsgebiet Großes Walsertal.

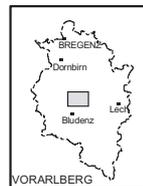


Legende

- Höhenlinie
 - Bundesstrasse
 - ▨ Rutschung
- Koordinaten MGI M28

Suszeptibilität

- sehr schwach
- schwach
- mittel
- stark
- sehr stark



7. Gefährdung Felsstürze

7.1 Theoretische Grundlagen

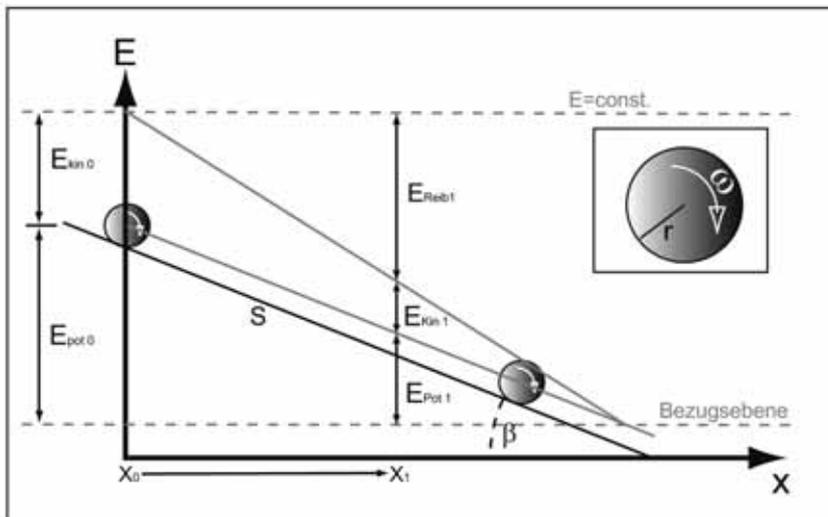
Da die Mechanik der stürzenden Bewegungen sich grundsätzlich von den rutschenden unterscheidet, muss diese Gefährdung mit einer anderen Methode analysiert werden. Das Stürzen eines Blockes besteht eigentlich aus mehreren Bewegungsphasen:

- Gleiten/Kippen
- Fallen
- Springen
- Rollen/Gleiten
- Stoppen

Alle diese Bewegungsphasen können durch physikalische Gesetze beschrieben werden (SCHEIDEGGER 1975): Durch den freien Fall nimmt der Sturzkörper kinetische Energie auf, die nach dem Aufprall auf den Hangfuß nach und nach in Stoß- bzw. Reibungsenergie umgewandelt wird. Beim Auftreffen des Körpers auf den Hang geht etwa 75% der Energie durch den Stoß (plastische Verformung des Untergrundes und des Körpers) verloren (MEIBL 1998). Ob der Körper auf dem Untergrund springt oder rollt, hängt von seiner Geometrie, der Hangneigung und der Oberfläche des Hanges ab (AZZONI et al. 1991). Sturz-Versuche haben gezeigt, dass bei Hangneigungen größer 45° das Springen die vorherrschende Bewegungsart ist, während bei geringeren Hangneigungen das Rollen überwiegt (HUNGR & EVANS 1988, CRUDEN & VARNES 1996).

Für die Bestimmung der Gefährdung durch stürzende Felsblöcke wurde im Projekt die ungünstigste Geometrie eines Sturzkörpers bei der reibungsärmsten Bewegungsart herangezogen. Dieser sog. «worst case» wäre ein kugelförmiger Körper in einer rollenden Bewegung, denn in diesem Fall sind die Reibungsenergien am niedrigsten (SCHEIDEGGER 1975). Rollen tritt vor allem an Hängen auf, die eine feinkörnige Schuttauflage besitzen und eine relative ebene Oberfläche zeigen. Um die Reichweite eines rollenden Körpers – und damit die Gefährdung – zu bestimmen, müssen die auftretenden Energien betrachtet werden (*Abbildung 59*).

Abb. 59: Ansatz zur Erklärung der Energieumwandlung bei rollenden Bewegungen (verändert nach MEIBL 1998).



Unter Vernachlässigung des Luftwiderstands kann ein Energieerhaltungssatz angewendet werden. Der Sturzkörper besitzt an einer beliebigen Stelle des Hanges x_0 eine Geschwindigkeit v_0 . Bis zu einem Punkt x_1 wird ein Teil dieser Energie in Reibungsenergie umgewandelt:

$$E_{Pot0} + E_{Kin0} = E_{Pot1} + E_{Kin1} + E_{Reib1} \quad (I)$$

mit E_{Pot} = Potenzielle Energie, E_{Kin} = Kinetische Energie, E_{Reib} = Reibungsenergie.

Die kinetische Energie des rollenden Körpers hat eine translative und eine rotative Komponente (SCHEIDEGGER 1975).

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} I\omega^2 \quad (II)$$

mit: m = Masse, v = Translative Geschwindigkeit, I = Trägheitsmoment, ω = Rotative Geschwindigkeit

Im Fall einer Kugel ergeben sich

$$E_{kin} = \frac{2}{5} r^2 m \quad \text{und} \quad \omega = \frac{v}{r}$$

mit: m = Masse, r = Radius der Kugel, v = Translative Geschwindigkeit

Somit ergibt sich für die kinetische Energie (SCHEIDEGGER 1975)

$$E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{5} r^2 m \right) \left(\frac{v}{r} \right) = \frac{7}{10} mv^2 \quad (III)$$

Die potenzielle Energie ist

$$E_{Pot} = mgh = mgs \sin \beta \quad (IV)$$

mit m = Masse, g = Erdbeschleunigung und h = Höhe über einem Bezugsniveau, β = Hangneigung

Die Reibungsenergie ist gegeben durch

$$E_{Reib} = \mu_R F_N s = \mu_R (mgs \sin \beta) s \quad (V)$$

mit μ_R = Rollreibungskoeffizient, F_N = Normalkraft, m = Masse, g = Erdbeschleunigung, s = zurückgelegte Wegstrecke, β = Hangneigung

Die Geschwindigkeit am Ablagerungspunkt ist Null. Setzt man die Formeln (III – V) in (I) mit $v_1 = 0$, dann ergibt sich für die zurückgelegte Wegstrecke s (Ruff 2005)

$$s = \frac{7v_0^2}{10g(\mu_R \cos \beta + \sin \beta)} \quad (VI)$$

Die wesentlichen Einflussgrößen auf die Reichweite eines kugelförmigen Sturzkörpers sind also die Anfangsgeschwindigkeit, die Hangneigung und der Rollreibungskoeffizient. Letzterer hängt nicht nur von der Art des Untergrundes sondern auch von den Oberflächeneigenschaften ab. Deshalb ist dieser Parameter im Prinzip nur an Ort und Stelle durch Fallversuche bestimmbar.

7.2 Ein GIS-Modell für Felsstürze

Analog zu den Rutschungen konnte im Projekt nur ein qualitativer Ansatz verwirklicht werden. Wie bei den meisten Modellierungen üblich (HEGG & KIENHOLZ 1995), wurde die Analyse in drei Schritte unterteilt:

- Bestimmung des Abbruchgebietes (Dispositionsmodell)
- Bestimmung des Sturzweges (Trajektorienmodell)
- Bestimmung des Ablagerungsgebietes

Von entscheidender Bedeutung für die 3-dimensionale Modellierung ist die Oberflächenform des Untersuchungsgebietes. Hier wird je nach Fragestellung mit hochauflösenden GRIDs oder TINs (Triangular Irregular Network) gearbeitet, auf denen die möglichen Sturzwegen berechnet werden. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde erneut mit dem 25m DHM gearbeitet. Obwohl inzwischen landesdeckend für Vorarlberg ein 10m Raster vorhanden ist, wurde dessen Qualität bisher nicht ausreichend getestet.

7.2.1 Bestimmung des Abbruchgebietes

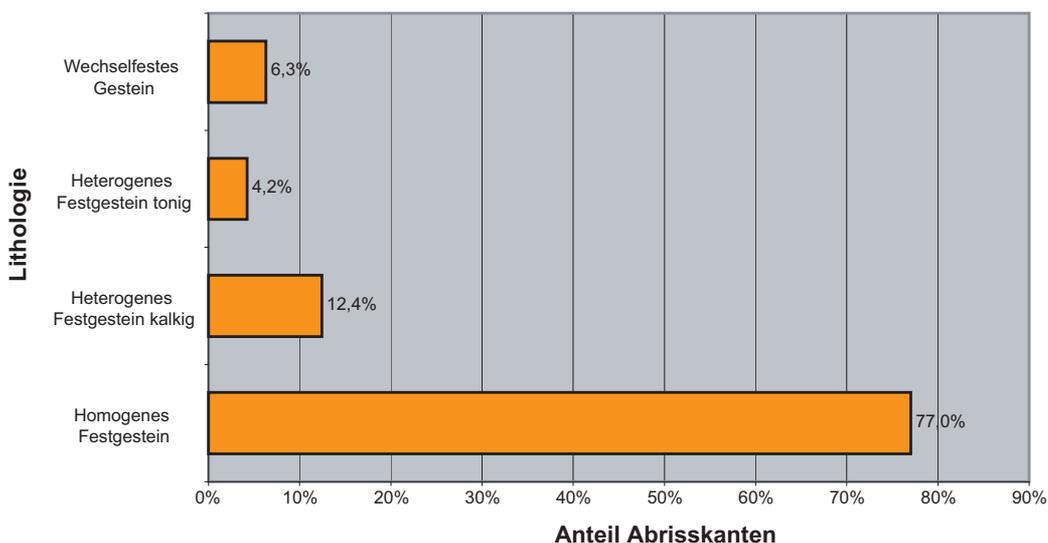
Analog zu den Rutschungen kann das Dispositionsmodell aus wenigen Informations-Ebenen entwickelt werden. So zeigte ein Vergleich der Abrisskanten kartierter Felsstürze (108 Ereignisse) im Hochtannberg/Arlberg Gebiet, dass sich die Abbruchgebiete im Wesentlichen auf homogene und kalkdominierte, heterogene Festgesteine beschränken (*Abbildung 60*).

Als zweiter wesentlicher Faktor für die Bildung eines Sturz-Ereignisses muss die Hangneigung betrachtet werden. Aufgrund der Geometrie kann eine anfangs gleitende und/oder kippende Bewegung nur in ein Fallen oder Rollen übergehen, wenn die Hangneigung mindestens 45° beträgt. Somit wurden die Abbruchgebiete aus den Datenebenen Lithologie und Hangneigung mit der Verknüpfung von zwei Bedingungen konstruiert:

Quellgebiet = Hangneigung > 45 UND Lithologie = Hom. Festgestein
 ODER Lithologie = Het. Festgestein kalkig

Abb. 60: Auswertung der Abrisskanten der Felssturz-Ereignisse nach der Lithologie im Hochtannberg/Arlberg Gebiet (Ruff 2005).

Sowohl die kartierten Abrisskanten (schwarze Linien), als auch die berechneten Quellzellen (blaue Zellen) sind in *Abbildung 63* eingezeichnet. Der Vergleich zeigt, dass der größte Teil der Abrisskanten durch das Modell erkannt wurde.



7.2.2 Bestimmung der Trajektorien

Die Ermittlung der Trajektorien erfolgt aus dem Geländemodell mit einer Nachbarschafts-Analyse. Bereits in *Kapitel 5.3.4* wurde erläutert, wie mit dem GIS der niedrigste Nachbar ermittelt werden kann. Wurde eine Zelle des Rastern als Abbruchzelle identifiziert, so kann von dort ein Weg über die jeweiligen niedrigsten Nachbarn hang abwärts berechnet werden (Funktion «flowdirection», *Abbildung 61*). Die Berechnung stoppt jedoch erst, wenn keine niedrigere Zelle mehr in der Umgebung festgestellt wird. Mit dieser Methode können sich unnatürlich lange Trajektorien ergeben, wenn der Weg z.B. in einen Fluss führt, der immer eine geringe Hangneigung aufweist. Deshalb wurde die Berechnung an einer Grenzbedingung abgebrochen (Hangneigung < 20°). Die Trajektorien sind aber nicht zwingend die einzigen gefährdeten Bereiche. Sie geben nur einen Eindruck, in welche Richtung sich ein rollender Block wahrscheinlich bewegen würde.

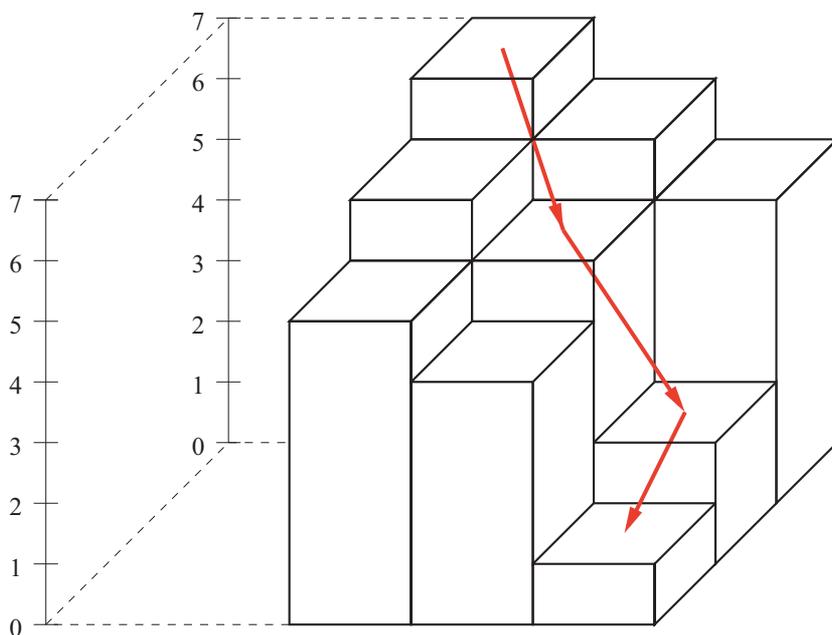
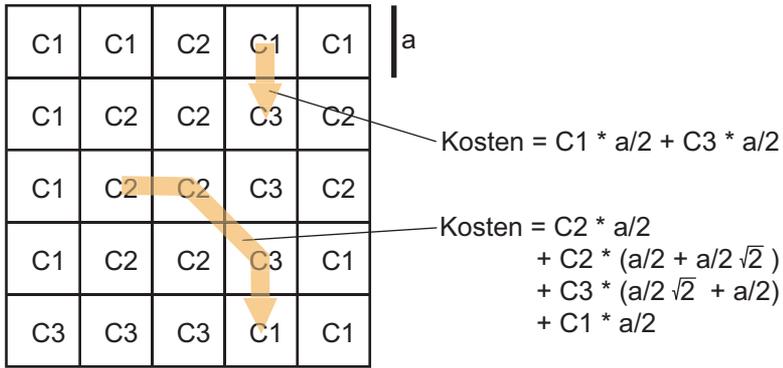


Abb. 61: Berechnung der Trajektorie beginnend von einer Abbruchzelle mit Hilfe des «niedrigsten Nachbarn» (aus SCHANZ 2002)

7.2.3 Bestimmung des Ablagerungsgebietes

Ausgehend von einer Abbruchzelle sind natürlich mehrere Wege hang abwärts möglich. Die Trajektorie zeigt lediglich den Weg an, der insgesamt die größte Hangneigung aufweist. Für eine Bewertung der übrigen Wege – und damit einer Gefährdungs-Einschätzung – kann eine sog. Kosten-Analyse verwendet werden. Kosten-Analysen in einem Raster haben die Aufgabe, von jeder Zelle den «billigsten» Weg hin zu einer bestimmten Quelle zu finden. Dafür muss in einem sog. Kostengrid für jede Zelle ein «Preis» definiert werden, den die Durchquerung dieser Zelle kostet. Der Preis wird dabei auf die Distanz umgerechnet (z.B. 5 pro Meter). Die Kosten für eine Trajektorie ergeben sich somit als Summe der Einzelkosten der beteiligten Zellen (*Abbildung 62*).

Abb. 62: Konzept der Kostenberechnung für zwei Trajektorien mit einem Kostengrid (RUFF 2005)



Für die rollende Bewegung kann Formel (VII) für die Kosten eines bestimmten Weges s herangezogen werden. Da die Anfangsgeschwindigkeit des Körpers nicht bekannt ist wird als Näherung angesetzt, dass der zurückgelegte Weg indirekt proportional zum Nenner der Formel ist (VII).

$$s = \frac{7v_0^2}{10g(\mu_R \cos \beta + \sin \beta)} \Rightarrow s \approx \frac{1}{(\mu_R \cos \beta + \sin \beta)} \quad (VII)$$

mit s = zurückgelegte Wegstrecke, μ_R = Rollreibungskoeffizient, β = Hangneigungswinkel

Die Hangneigung wurde für jede Zelle aus dem Geländemodell errechnet, Informationen über die Rollreibungskoeffizienten fehlen jedoch. Anlehnend auf Literaturwerte (AZZONI et. al. 1991) wurden für die lithologischen Klassen als Größenordnung die Werte von *Tabelle 15* angesetzt. Dies ist in unserem Fall möglich, da die Berechnungen keine absoluten Reichweiten von rollenden Körpern ergeben sollen, sondern lediglich relative Kosten abgeschätzt werden.

Tab. 15: Geschätzte Rollreibungskoeffizienten für die lithologischen Klassen (RUFF 2005).

Lithologische Klasse	Rollreibungskoeffizient geschätzt
Homogenes Festgestein	1.2
Heterogenes Festgestein	1
Wechselfestes Gestein	0.9
Felssturzmaterial	0.8
Hangschutt	0.7
Moräne	0.6
Fluviatile Ablagerung	0.5

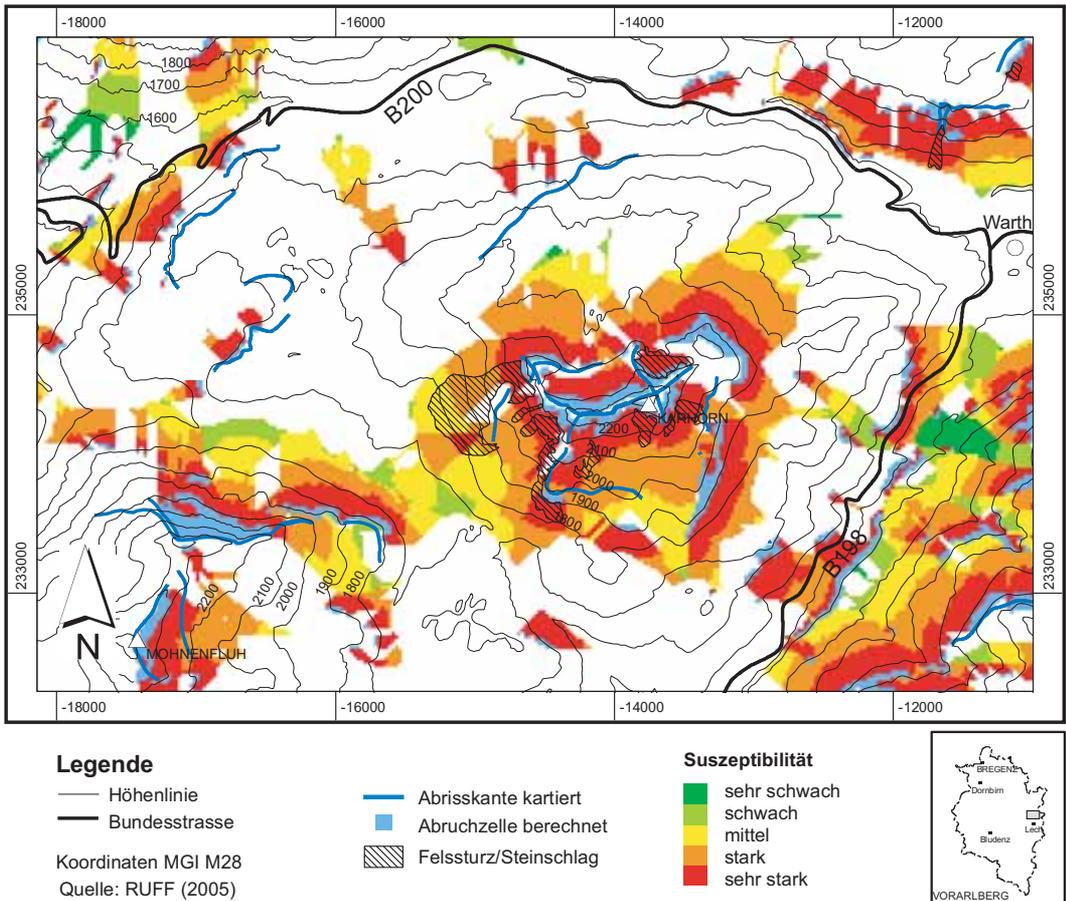
Mit der Hangneigung und den geschätzten Rollreibungskoeffizienten wurde nach Formel (VIII) ein **Kostengrid** errechnet. Es gibt geringe Kosten für Zellen an, die eine große Hangneigung und/oder eine geringe Rollreibung aufweisen. Hohe Kosten haben Zellen mit geringer Hangneigung und/oder hoher Rollreibung.

Jetzt können mit dem GIS die Gesamtkosten aller möglichen Trajektorien errechnet werden (Funktion «Pathdistance»). Dieser Befehl errechnet die potenziellen Kosten für jede Zelle des Rasters, um zu der nächstgelegenen Abbruchzelle zu gelangen. Dabei werden außer dem Kostengrid noch die Datenebenen geographische Höhe und Exposition verwendet, um die betrachtete Zelle der richtigen Quellzelle zuzuordnen. Das Ergebnis dieser Berechnung für das Hochtannberg/Arlberg Gebiet zeigt *Abbildung 63*. Analog zu den Rutschungen (*Kap. 6.5*) wurde das rechnerische Ergebnis der Kostenberechnung nach Wendepunkten in der statistischen Verteilung (Jenks Algorithmus) in fünf Suszeptibilitäts-Klassen unterteilt. Die Farbgebung der Klassen wurde ebenfalls beibehalten.

Abb. 63: Das Ergebnis der Kostenberechnung im Hochtannberg Gebiet nördlich von Lech. Die Kosten wurden mit Wendepunkten in der statistischen Verteilung (Jenks Algorithmus) in fünf Suszeptibilitäts-Klassen unterteilt.

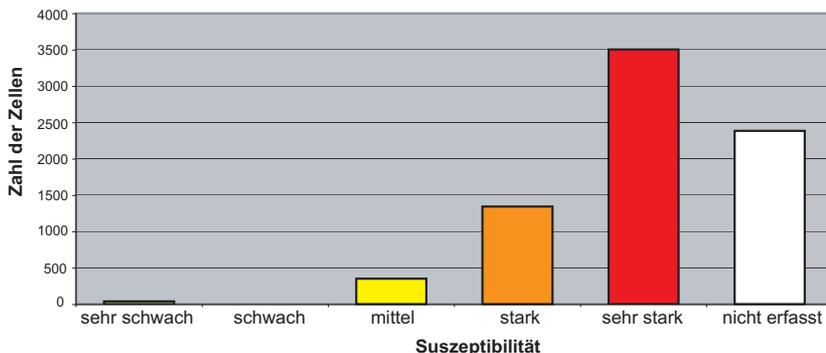
7.3 Bewertung des Modells

Rein optisch zeigt die Berechnung eine gute Übereinstimmung mit den kartierten Felsstürzen im Hochtannberg/Arlberg Gebiet. Allerdings zeigt das Modell bei näherer Betrachtung auch eine Schwäche (*Abbildung 64*): Ein Teil der kartierten Abrisskanten wurde nicht erkannt und somit auch die dazu gehörigen Trajektorien nicht berechnet. Es muss jedoch angemerkt werden, dass ein großer Teil der



nicht erfassten Felssturz-Gebiete auf einen postglazialen Bergsturz bei Zug zurückgeht. Die Abrisskante dieses Ereignisses ist aufgrund der Überprägung nach so langer Zeit morphologisch abgeflacht und deshalb – obwohl durch den Geologen erkannt – im DHM nicht feststellbar.

Abb. 64: Vergleich der aktiven Felssturz-Ereignisse im Hochtannberg/Arlberg Gebiet mit der Gefährdungskarte.



Die Qualität des Modells hängt sehr stark von der Qualität des Geländemodells ab. Obwohl das 25 m DHM in Vorarlberg allgemein eine sehr gute Präzision besitzt, sind nicht alle morphologischen Kanten in dieser Auflösung darstellbar. Das Modell könnte also durch die Anwendung des 10 m DHM entscheidend verbessert werden.

8. Vulnerabilität

Ganz unabhängig von der Gefährdung wird die Landnutzung in das GIS aufgenommen, welche die Vulnerabilität oder Verletzlichkeit eines Gebietes definiert. Die Vulnerabilität besteht zum einen aus der Zahl und Art der gefährdeten Objekte und zum anderen aus dem durch eine Massenbewegung verursachten Schaden. Die gefährdeten Objekte sind nicht nur Gebäude und die darin befindlichen Personen, sondern auch öffentliche Einrichtungen (z.B. Sportplätze, Naherholungsgebiete) und die Infrastruktur. Die Verletzbarkeit eines Objektes kann nach der Zahl der Personen gewichtet werden, die ein Gebäude bewohnen oder die eine bestimmte Straße pro Tag befahren. Die Schäden an einem Objekt hängen nicht nur vom Volumen und der Reichweite einer Massenbewegung ab, sondern auch von deren Geschwindigkeit. Steinschläge kleinerer Blöcke können Personen aufgrund der fehlenden Vorwarnzeit töten, während großräumige Kriechbewegungen rechtzeitig erkannt werden und oft durch geeignete Maßnahmen weitere Schäden verhindert werden können.

Viele Informationen über die Landnutzung werden innerhalb der Landesregierung bereits in digitaler Form verarbeitet (z.B. Katasterpläne). Diese könnten unter den oben angesprochenen Gesichtspunkten zu detaillierten Vulnerabilitätskarten zusammengefasst werden. Innerhalb des Projektes wurde ein vereinfachter, qualitativer Ansatz gewählt, um die Vulnerabilität mit der Suszeptibilität zu vergleichen.

8.1 Gefährdete Objekte in Vorarlberg

Die Art der Landnutzung ist aufgrund der landschaftlichen Vielfalt in Vorarlberg regional sehr unterschiedlich. Die Rheintalebene ist relativ dicht besiedelt und wird sowohl industriell als auch landwirtschaftlich flächig genutzt. Die Regionen von Bregenzerwald, Walsertal, Rhätikon, Walgau, Tannberg, Lechquellengebirge, Klostertal, Montafon und Silvretta werden aufgrund des Relief dagegen ganz unterschiedlich intensiv wirtschaftlich genutzt. Da gerade in den alpinen Landschaften Massenbewegungen auftreten, wurde innerhalb des Projektes gerade die durch den Tourismus geprägte Landnutzung beschrieben. Hinzu kommt die traditionelle Alpwirtschaft und die Transitrouten über die kleineren und größeren Pässstraßen.

Gebäude sind aufgrund ihres finanziellen Wertes und der Zahl der darin befindlichen Personen die wichtigsten Objekte. Die Untersuchungsgebiete sind relativ spärlich besiedelt und die Bevölkerung konzentriert sich auf wenige Siedlungen. Von den Wohnhäusern sind die Hotels zu unterscheiden, da sich die Zahl der bewohnenden Personen je nach Saison deutlich unterscheidet. Trifft man eine Unterscheidung nach der Zahl der durchschnittlich in dem Gebäude anwesenden Personen, so wäre z.B. ein Hotel hoch, ein Einfamilienhaus mittel und eine Jagdhütte schwach vulnerabel.

Ebenfalls wichtige Objekte sind die Bundesstraßen. Außer für den Schwerlastverkehr und den lokalen Tourismus werden diese Straßen intensiv als Transitroute (z.B. für Motorrad-Ausflüge) genutzt. Während der Saison verbinden außer den regionalen Busverbindungen noch spezielle Busse die Ausflugspunkte zwischen den Tourismus-Zentren. So ist während der Sommermonate das Verkehrsaufkommen auf einigen Bundesstraßen (z.B. B200) mit dem einer Stadt vergleichbar. Deshalb ist die Vulnerabilität entlang dieser Straßen sehr hoch. Langsame Bewegungen verursachen große finanzielle Schäden, da der Verkehr auf jeden Fall aufrecht erhalten werden muss. Schnelle Bewegungen können mit hoher Wahrscheinlichkeit Personenschäden zur Folge haben.

Die zahlreichen Forstwege, welche die Waldbestände und die Alpen mit den Siedlungen verbinden, besitzen eine mittlere Vulnerabilität. Das Verkehrsaufkommen für die Versorgung der Alpen oder durch Wanderer ist eher gering. Obwohl auch diese Wege z.B. für den Holztransport unerlässlich sind, sind Schäden an den geschotterten Wegen i.d.R. leicht zu beheben.

Vor allem im Winter haben die zahlreichen Liftanlagen und Seilbahnen der Skigebiete grosse Bedeutung. Abgesehen von dem finanziellen Wert der inzwischen hochtechnologischen Anlagen werden diese Bereiche während der Ferienzeit von Tausenden von Skifahrern und untergeordnet im Sommer auch von Wanderern genutzt. Da sich die Aufstiegshilfen i.d.R. auf offenem Gelände befinden, werden sie hauptsächlich durch langsame Bewegungen gefährdet. Die Bedrohung betrifft also mehr die Technik als die Personen. Deshalb sind die Anlagen als mittel vulnerabel einzustufen.

Außer den oben genannten punktuellen oder linearen Objekten verbleibt noch die eher flächige Landnutzung. Dazu gehören auch die befestigten Skipisten, die an einzelnen Stellen mit schwerem Gerät in steilem Gelände angelegt

wurden. Dieser anthropogene Eingriff verstärkt die Gefährdung durch Hangbewegungen, weil das ehemalige Gleichgewicht gestört wurde. Außerdem verdichten die Pistenfahrzeuge die obersten Bodenschichten, was die Versickerung von Niederschlägen verhindert und zu erhöhter Erosion führt. Hier müssten Hangbewegungen teuer saniert werden, um die weitere Gefährdung der Besucher auszuschließen. Deshalb ist die Vulnerabilität innerhalb der Pistenstrecken als schwach bis mittel zu bezeichnen.

Etwa ein Drittel der Fläche Vorarlbergs ist bewaldet, von der etwa die Hälfte auch wirtschaftlich genutzt wird. Die andere Hälfte dient als Schutzwald vor allem vor Lawinen-Gefährdungen. Eine Hangbewegung innerhalb des Waldes kann ebenfalls großen finanziellen Schaden verursachen, da umgestürzte Bäume aus dem Forst entfernt werden müssen, um einen Schädlingsbefall zu verhindern. Dieser sekundäre Effekt einer Hangbewegung führt innerhalb der Wälder zu einer schwachen Vulnerabilität.

Ähnlich wie bei den Wäldern verhält es sich mit den Wiesen und Weiden der Alpwirtschaft. Hier ist zum einen die direkte Bedrohung der Tiere (Kühe, Schafe oder Pferde) zu nennen und zum anderen die Behinderung der Milchwirtschaft, z.B. durch eine Blockierung der Versorgungswege. Während der Geländearbeiten wurde z.B. beobachtet, wie der Bau eines schmalen Zugangs zu einer entfernten Alphütte die Bildung einer Rutschung auslöste, die den soeben angelegten Weg komplett zerstörte. Ähnliches kann durch die Nutzung von größeren Maschinen bei der Mahd der Futterwiesen verursacht werden. Aus diesem Grund müssen die Almbereiche ebenfalls als schwach vulnerabel bezeichnet werden.

Damit verbleibt der Bereich, der nicht genutzt wird. Weil eine Hangbewegung in diesem Bereich keinen Schaden verursachen würde ist die Vulnerabilität hier sehr schwach.

8.2 Indizierung und Darstellung der Vulnerabilität

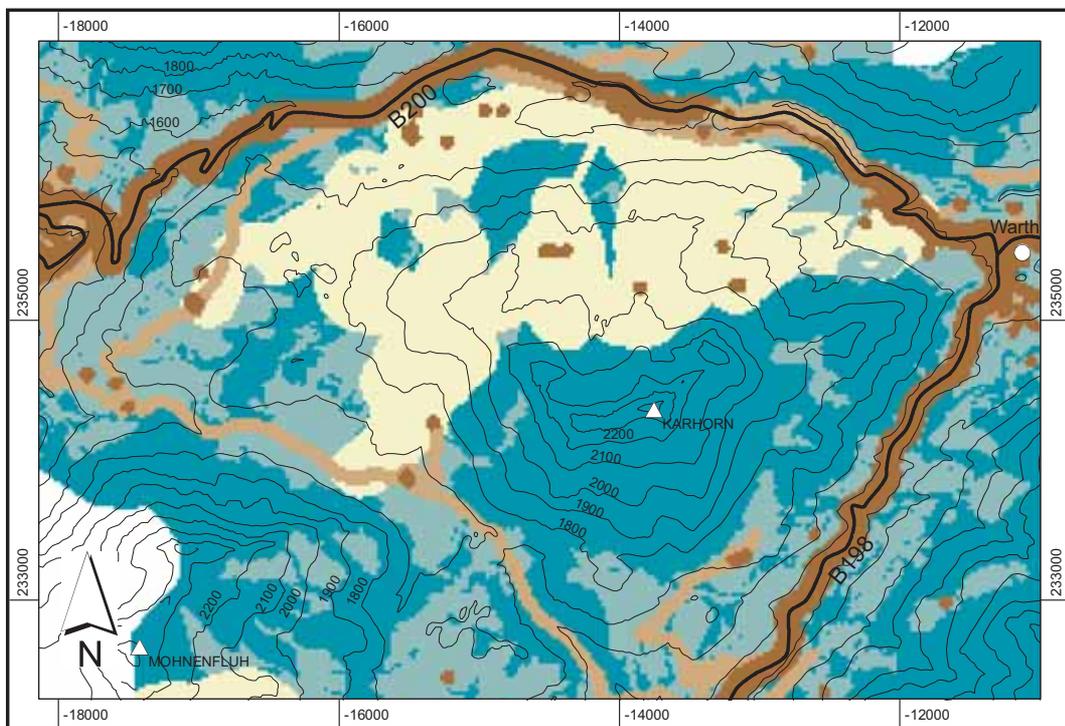
Analog zu der Beschreibung der Gefährdung wurde die Vulnerabilität qualitativ in fünf Stufen eingeteilt. Damit diese Information direkt mit den Gefährdungskarten überlagert werden kann, wurden ebenfalls Indizes von 0 bis 1 vergeben (*Tabelle 16*). Innerhalb des Projektes lagen keine Informationen über den Wert einzelner Gebäude oder die Zahl deren Bewohner bzw. Besucher vor. Deshalb wurde als Maß für die Vulnerabilität zunächst nur deren Lage verwendet. Bei den Bundesstraßen wurden solche Bereiche unterschieden, die bereits baulich durch Galerien oder Tunnel gesichert sind. Die punktuellen und linearen Objekte wurden mit einem Puffer umgeben, um Sie in eine Flächeninformation zu verwandeln. Um einzeln stehende Gebäude und Liftanlagen wurde ein Puffer von 40 m gelegt, um Forstwege 50 m, um Bundesstraßen 100 m und um die eher weitläufigen Skipisten 200 m.

Landnutzung	Index Vulnerabilität
Siedlung (Alle Wohnhäuser, Hotels und Alphäuser)	0,9
Bundesstraße unbefestigt	0,8
Bundesstraße befestigt (Tunnel oder Galerien)	0,6
Forstwege	0,7
Lifanlagen/Seilbahnen	0,5
Skipisten	0,4
Forst	0,3
Wiesen und Alpfächen	0,3
Felszone und ungenutzter Bereich	0,1

Tab. 16: Qualitative Einteilung der Vulnerabilität nach der Landnutzung mit einem Index (RUFF 2005).

Abbildung 65 zeigt die Kartendarstellung der Vulnerabilität im Hochtannberg Gebiet nördlich von Lech. Zur optischen Abgrenzung von den Gefährdungskarten wurde eine andere Farbgebung gewählt.

Abb. 65: Vulnerabilität (nach Tab. 16) im Hochtannberg Gebiet nördlich von Lech.



Legende

- Höhenlinie
- Bundesstrasse
- Koordinaten MGI M28
- Quelle: RUFF (2005)

Vulnerabilität

- sehr schwach
- schwach
- mittel
- stark
- sehr stark



9. Risiko

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff Risiko die Wahrscheinlichkeit und die Heftigkeit eines Schadenfalles auf Gesundheit, Besitz oder Umwelt verstanden (Kap. 1). Im Fall der Hangbewegungen ist das Risiko die Synthese aus der Art der Gefahr, der Art und Anzahl der potenziell betroffenen Gebäude bzw. Personen und das Ausmaß des potenziellen Schadens. Es handelt sich also um die Bewertung der Gefahr und der daraus entstehenden Konsequenzen. Dies wird oft mit folgender Formel beschrieben:

Risiko = Suszeptibilität x Wahrscheinlichkeit x Intensität x Gefährdete Objekte

Wie in Kap. 1 ausgeführt, sollte ein Risiko-Management nicht nur die Reaktion auf ein Ereignis sein, sondern auch eine Vorsorge für potenzielle Ereignisse treffen. Diese Vorsorge sollte aus drei Schritten bestehen:

- Datensammlung, Bewertung und Inventarisierung bekannter Bewegungen
- Ausweisung der Risiko-Zonen
- Bereitstellung verschiedener Informations-Ebenen für die Nutzung

9.1 Inventarisierung

Ein Anfang der zentralen Erfassung von Massenbewegungen in Vorarlberg ist im Rahmen dieses Projektes gemacht. Es bestehen GIS-basierte Ereigniskarten des Bregenzerwaldes, des Hochtannberg/Arlberg-Gebietes und des Großen Walsertales, die in das Landes-GIS aufgenommen werden können. In einer Datenbank sind weitere Informationen über die Ereignisse (Profile, Fotos, etc.) erfasst. Diese Struktur könnte ausgebaut und durch Landesbeauftragte stetig ergänzt werden. Für eine sinnvolle Auswertung dieser Ereignisse ist eine standardisierte Datenerfassung notwendig. Hierzu wäre eine Art Task-Force um den Landesgeologen denkbar, ein oder zwei Ansprechpartner pro größerer Gemeinde, die aktuelle Hangbewegungen möglichst kurz nach dem Ereignis dokumentieren. Es gibt auch die Möglichkeit, die Datenbank über eine Internet-Anwendung für Laien zu öffnen. Mit Hilfe einer kommentierten Eingabemaske könnten so interessierte Bürger ihre Beobachtungen festhalten. So wären für Vorarlberg nach wenigen Jahren sinnvolle Zeitreihen gegeben, welche die Basis für Schutzmaßnahmen – z.B. durch Frühwarnsysteme – geben könnten.

9.2 Erstellung der Risikokarten

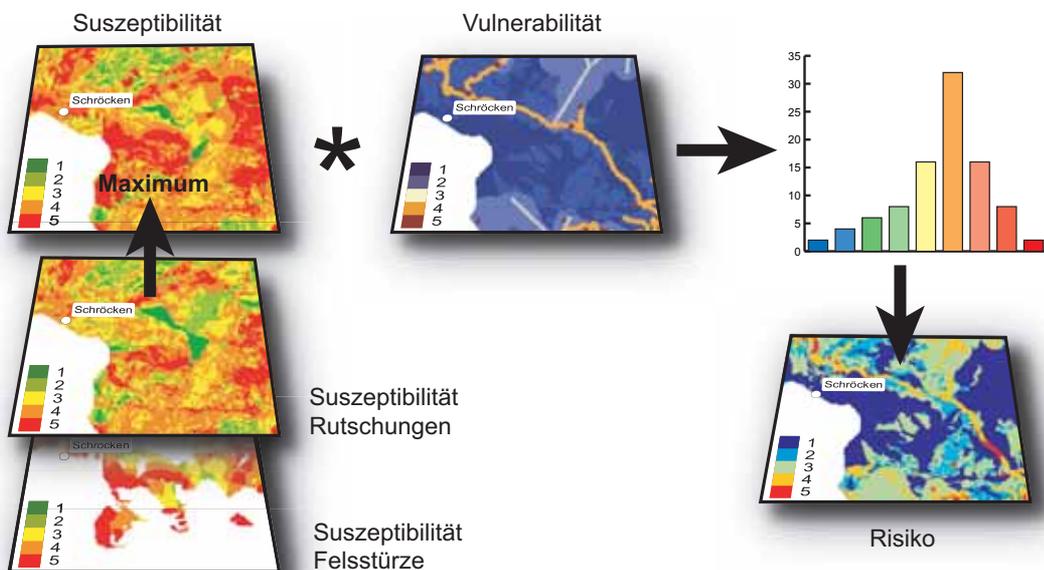
Innerhalb des Projektes sollten Risikokarten entwickelt werden, die auf möglichst objektiven Kriterien beruhen. Damit sollte gewährleistet werden, dass die Karten unterschiedlicher Bearbeiter vergleichbar sind. Deshalb wurde innerhalb des Projektes der Faktor Wahrscheinlichkeit ausgeklammert, da eine objektive

Datengrundlage fehlt. Die Intensität und die gefährdeten Objekte wurden als Vulnerabilität zusammengefasst. Damit ergibt sich das Risiko zu:

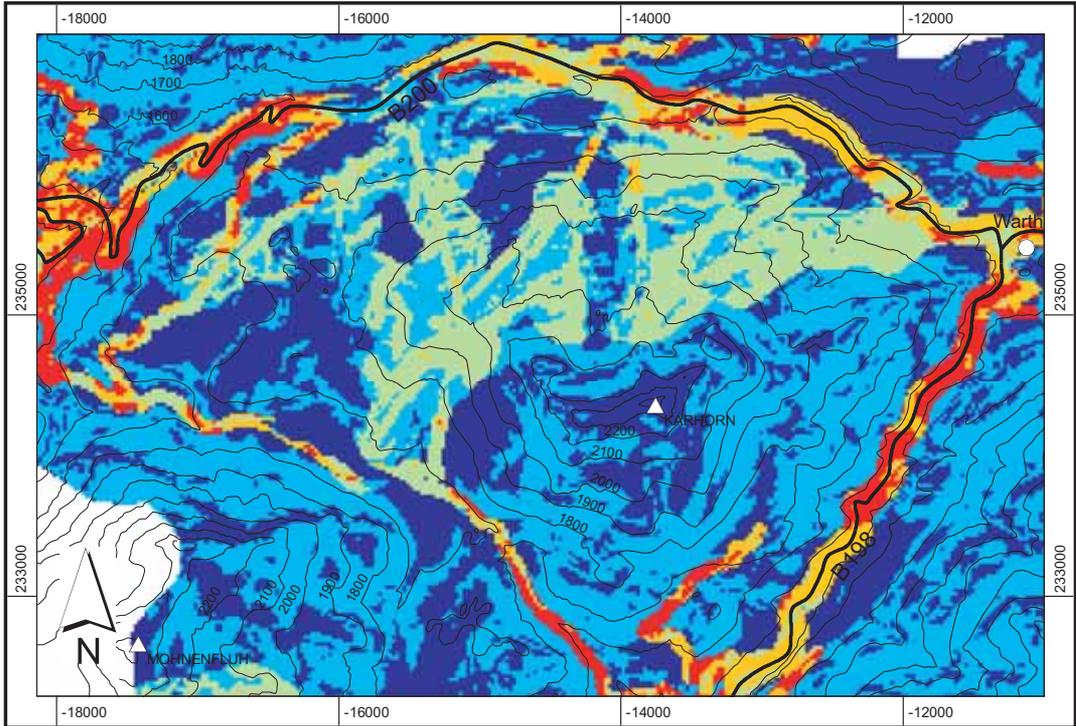
$$\text{Risiko} = \text{Suszeptibilität} \times \text{Vulnerabilität}$$

In diesem Sinn kann aus den Datenebenen der Kapitel 6, 7 und 8 eine Risikokarte konstruiert werden (Abbildung 66).

Abb. 66: Schema zur Erstellung der Risikokarte aus den Datenebenen Suszeptibilität Rutschungen, Suszeptibilität Felsstürze und Vulnerabilität.



Zunächst werden die Gefährdungskarten für Rutschungen und für Steinschlag vereinigt. Dafür werden beide Ebenen in die Suszeptibilitäts-Stufen 1-5 reklassifiziert und so überlagert, dass für jede Zelle der Maximalwert aus beiden Ebenen herangezogen wird (Funktion «Maximum»). Danach wird diese Ebene mit dem Raster der Vulnerabilität multipliziert und es ergibt sich wiederum eine statistische Verteilung von Risikowerten (Abbildung 63). Dieses Ergebnis kann ebenfalls in fünf Klassen unterteilt und in Form einer Karte dargestellt werden (Abbildung 67). Die Risikokarte weist somit Bereiche aus, in denen durch eine Massenbewegung ein erheblicher materieller oder personeller Schaden entstehen könnte («Hot Spots»). Erwartungsgemäß besteht das größte Risiko entlang der Verkehrswege. Allerdings fallen im Detail unterschiedliche Intensitäten auf, die vor allem in der verschiedenen Suszeptibilität begründet sind. Damit ist der Risiko-Zustand der Untersuchungsgebiete objektiv und regional erfasst.



Legende

- Höhenlinie
 - Bundesstrasse
- Koordinaten MGI M28
Quelle: RUFF (2005)

Risiko

- sehr schwach
- schwach
- mittel
- stark
- sehr stark



Abb. 67: Die Risikokarte des Hochtannberg Gebiets nördlich von Lech. In roter Farbe sind die «Hot Spots» deutlich zu erkennen.

9.3 Potenzielle Nutzer der Risikokarten

Je nach Vorwissen und Art der Verwendung ist der Grad der nutzbaren Georisiko-Information unterschiedlich. Deshalb sollten die Daten für die Nutzer unterschiedlich aufbereitet werden. Die potenziellen Nutzer von Gefährdungs- und Risikokarten gibt *Tabelle 17*.

Tab. 17: Potenzielle Nutzer der Gefährdungs- und Risikokarten (RUFF 2005).

Private Nutzer	Betroffene Bürger (Anwohner, Bauherren, Grundbesitzer) Freiwilligen Verbände (z.B. Naturschützer) Baufirmen/Ingenieurbüros Konzerne/Großfirmen Versicherungen Medien
Kommunale Nutzer	Bürgermeister, Ortsvorstände, Planungsausschüsse Öffentliche Berater und Planer (z.B. ARGES) Schulen/Universitäten Wildbach- und Lawinenverbauung Tourismus-Büros
Öffentliche Nutzer	Wasserbauamt Umweltamt Raumplanung/Straßenbau Katastrophenschutz Landesgeologe (Bundesanstalt)

Private Nutzer sind zumeist nur am Endergebnis interessiert, da die Zusammenhänge von ihnen oft nicht beurteilt werden können. Hier haben sich in vielen Anwendungen die Farbfolgen Grün-Gelb-Rot und Blau-Gelb-Rot bewährt. Diese sind für private Nutzer besonders eingängig, weil sie aus dem alltäglichen Leben vertraut sind. Hier wäre eine Veröffentlichung von Übersichtskarten via Internet möglich und sinnvoll. Kommunale Nutzer benötigen meist einige Spezialkarten für ihre jeweiligen Anwendungen. Die Suszeptibilitäts-Karten können für diese Anwender für die Planung zukünftiger Bauvorhaben eine Hilfestellung geben und je nach Nachfrage können noch weitere Spezialkarten erstellt werden. Öffentliche Nutzer sollten vollständigen Zugriff auf alle Rohdaten bekommen. Dazu könnten alle Informations-Ebenen in das Landes-GIS eingegliedert werden.

Insgesamt gilt, dass nur bekannte Daten genutzt werden können. Die Karten sollten also möglichst vielen Nutzern vorgestellt und öffentlich vorgeführt werden.

9.4 Möglichkeiten der Risiko-Minderung

Die Bereiche mit erhöhtem Risiko (Stufe 4 und 5) können auf verschiedene Arten geschützt werden (RUFF 2005):

- Eine Bebauung wird ganz untersagt
- Es wird nur eine bestimmte Dichte von Gebäuden zugelassen, d.h. das Risiko wird verteilt
- Bei einer Bebauung wird eine bestimmte Anzahl von Voruntersuchungen/Gutachten und ggf. Sicherungsmaßnahmen vorgeschrieben
- Die Risikokarten werden öffentlich gemacht und die Bauherren entscheiden selbst
- Es werden langfristige Untersuchungen aller Gefahren und bekannter Bewegungen flächendeckend in Auftrag gegeben

- Evakuierungspläne werden erarbeitet
- Wie bereits erwähnt, ist die einfachste Maßnahme der Risiko-Minderung die Information der Bevölkerung. Aber auch innerhalb der Landesregierung könnte die Objektivität der Planungen durch solche landesweiten Kartenwerke verbessert werden. Davon würden letztendlich auch die Bürger profitieren.

9.5 Konzept für die landesweite Ausweitung von Georisiken in Vorarlberg

Die *Kapitel 3* und *4* haben gezeigt, wie komplex die Geologie Vorarlbergs und die damit zusammenhängenden Massenbewegungen sind. Eine landesweite Analyse kann deshalb nur die wichtigsten Faktoren berücksichtigen. Um die vorhandenen Informationen effektiv zu nutzen und den Kostenaufwand für die Beschaffung weiterer Daten möglichst gering zu halten, ist ein stufenweises Vorgehen von groben zu feinen Informationen ratsam (*Abbildung 68*). Deshalb wird ein Konzept in vier Schritten vorgeschlagen (RUFF & CZURDA 2004):

9.5.1 Schritt 1: Datenerfassung

Die wichtigsten Faktoren als Verursacher von Massenbewegungen im Alpenraum sind die Lithologie des Untergrundes und die Hangneigung (*Kap. 6*). Dazu kommt noch die Lage der Störungszonen. Diese Informationen lassen sich relativ schnell für ganz Vorarlberg aus einer geologischen Übersichtskarte und dem Digitalen Höhenmodell extrahieren.

Dazu werden Informationen über die Landnutzung benötigt. Da die meisten Daten innerhalb der Behörden schon in digitaler Form vorliegen, können diese ebenfalls unkompliziert in einer Flächenkarte vereinigt werden. In dieser Vulnerabilitätskarte sollten alle Verkehrswege, Industrie- und Siedlungsflächen sowie Forst- und Agrargebiete unterschieden werden.

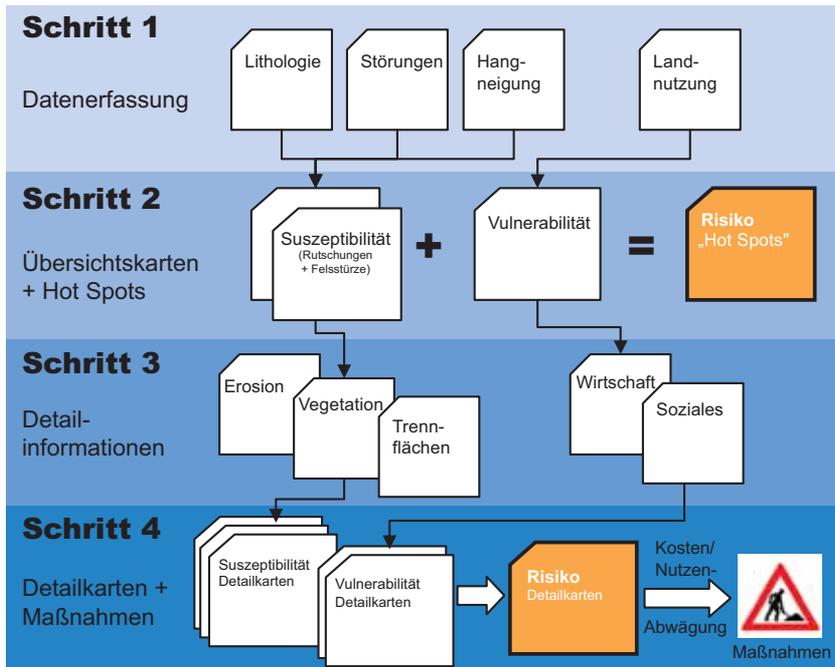


Abb. 68: Konzept der landesweiten Risikoanalyse in vier Schritten (RUFF & CZURDA 2004).

9.5.2 Schritt 2: Erstellung der ersten Risikokarte

Aus den Daten des ersten Schrittes wird eine Risikokarte konstruiert, in dem die Datenebenen Suszeptibilität Rutschungen und Suszeptibilität Felsstürze mit der Vulnerabilität verglichen werden. Die Risiko-«Hot Spots» werden somit erfasst.

9.5.3 Schritt 3: Erfassung von Detailinformationen

An den «Hot Spots» werden detailliertere Informationen ausgewertet. Hierzu zählen genauere geologische Karten und die Erfassung der Raumlage Trennflächen (v.a. Schichtung), aber auch weitere Faktoren wie die Erosion durch Wildbäche oder die stabilisierende Wirkung der Vegetation.

Dazu sollten die gefährdeten Objekte (z.B. Wohngebäude, Hotels, Straßen, etc.) nach ihrer wirtschaftlichen und sozialen Nutzung unterschieden werden (z. B. Hotel contra Jagdhütte).

9.5.4 Schritt 4: Erstellung der detaillierten Risikokarten

Aus diesen zusätzlichen Informationen können dann Risikokarten in größeren Maßstäben (bis 1:5.000) konstruiert werden. Die Landesregierung kann nun zusammen mit den örtlichen Behörden prüfen, ob an den einzelnen Stellen aktive oder passive Sicherungsmaßnahmen ausgeführt werden müssen.

10. Resümee

Ziel des Projektes Georisikokarte Vorarlberg war eine Risikoanalyse durch Massenbewegungen in alpinen Talschaften. Auf einem möglichst objektiven Wege und unter Berücksichtigung des vorhandenen Datenmaterials wurde eine Methode erarbeitet, die gefährdete Bereiche auf der Landesebene ausweist.

Die Arbeiten konzentrierten sich bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt auf die wichtigsten Massenbewegungen: Rutschen und Stürzen. Grundsätzlich erwiesen sich die verwendeten Methoden als geeignet, einen regionalen Überblick über die Gefährdung zu geben. Für das Land Vorarlberg konnte eine Analyse in vier Schritten vorgeschlagen werden, die unter Verwendung relativ einfacher Datenebenen bereits wertvolle Informationen über die aktuelle Risiko-Situation schafft. Potenzielle Nutzer der Risikokarten wurden vorgestellt und Möglichkeiten der Information der Bevölkerung und der Risikominderung aufgezeigt.

Landesweite Suszeptibilitäts-Karten können bei zukünftigen Projekten eine wertvolle Hilfestellung geben, denn sie ermöglichen einen Einblick in die Situation auch ohne geologisches Hintergrundwissen. Die Risikokarten unterstützen eine objektivere Raumplanung und eine Sensibilisierung der Bevölkerung für Naturgefahren.

Die Autoren sind der Meinung, dass die Erstellung landesweiter Suszeptibilitäts- und Risikokarten einen effektiven Neuwert schafft. Deshalb empfehlen wir dringend, die von uns erarbeitete Methodik – oder eine vergleichbare – in naher Zukunft umzusetzen.

11. Danksagung

Wir möchten uns bei Frau Dr. Margit Schmid und Herrn Dr. Georg Friebe von der Inatura Dornbirn für die finanzielle Unterstützung des Projektes und die gute Kooperation über fünf Jahre Zusammenarbeit bedanken.

Außerdem war die Abteilung für Raumplanung und Baurecht im Amt der Vorarlberger Landesregierung an den Arbeiten beteiligt. Hier gebührt ein Dank für die unbürokratische Hilfe vor allem Herrn Dr. Walter Bauer und Herrn Gerhard Selb.

Für die Bereitstellung der GIS-Daten bedanken wir uns bei dem Landesvermessungsamt in Feldkirch in Vertretung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV).

12. Literatur

- ALEOTTI, P. & CHOWDHURY, R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. – Bull. Eng. Geol. Env., **58**: 21-44
- AMMAN, A. (1992): Metamorphoseuntersuchung im nördlichen Silvrettkristallin mit Berücksichtigung der Phyllitgneiszone. – Arbeitstagung Geol. B.-A., Schwerpunkt Blatt Landeck, 113-119
- AMT DER VORARLBERGER LANDESGREGIERUNG (HRSG.) (2001): Klima von Vorarlberg. Eine anwendungsorientierte Klimatographie. – Band I - III; Bregenz
- ANBALAGAN, R. & SING, B. (1996): Landslide hazard and risk assessment mapping in mountainous terrains – a case study from Kumaun Himalaya, India. – Eng. Geol. **43**: 237-246; Elsevier
- AZZONI, A., ROSSI, P.P., DRIGO, E., GIANI, G.P., ZANINETTI, A. (1991): In situ observation of rockfall analysis parameters. – in: BELL, H. (Hrsg.): Landslides, Proceedings of the 6th Int. Symp. Landslides in Christchurch, New Zealand, Bd. 1, S. 307-314; Balkema
- BACHMANN, G. H. & MÜLLER, M. (1981): Geologie der Tiefbohrung Vorderriss 1 (Kalkalpen/Bayern). – Geol. Bavarica, **81**: 17-53
- BARTELME, N. (1995): Geoinformatik . Modelle, Strukturen, Funktionen. 414 S.; Springer
- BUWAL (Hrsg.)(1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Reihe Umwelt-Materialien 107/I Methode; 115 S.; Bern
- CHANNELL, J.E.T., & KOZUR, H.W. (1997): How many oceans? Meliata, Vardar and Pindos Oceans in the Mesozoic Alpine paleogeography. – Geology **25**: 183-186
- CHANELL, J.E.T., BRANDNER, R. SPIELER, A., STONER, J. (1992): Paleomagnetism and paleogeography of the Northern Calcareous Alps (Austria). – Tectonics **11**: 792-810
- COWARD, M. & DIETRICH, D. (1989): Alpine Tectonics – an overview – in: COWARD, DIETRICH & PARK (eds.): Alpine Tectonics, Geol. Soc. Spec. Pub. No. 45, S. 1-29
- CRUDEN, D.M. & VARNES, D.J. (1996): Landslide types and processes. – in: TURNER, A.K. & SCHUSTER, R.L. (eds.): Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 257, Transportation Research Board, National Research Council, S. 36-75; National Academic Press
- CZURDA, K. (1972): Parameter und Prozesse der Bildung bituminöser Karbonate (Bituminöser Hauptdolomit). – Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. 21: 235-250
- CZURDA, K. (1978): Paläographische Entwicklung der Gesteine der Klostertaler Alpen. – Jb. Vorarlberger Landesmuseumsverein; Bregenz
- CZURDA, K. & NICKLAS, L. (1970): Zur Mikrofazies und Mikrostratigraphie des Hauptdolomites und Plattenkalk-Niveaus der Klostertaler Alpen und des Rätikon (Nördliche Kalkalpen, Vorarlberg) – Festband Geol. Inst. 300-Jahr-Feier Univ. Innsbruck, S. 165-253; Innsbruck
- DONATI, L., TURRINI, M.C. (2002): An objective method to rank the importance of the factors predisposing landslides with the GIS methodology – application to an area of the Apennines (Valneria; Perugia, Italy). – Eng. Geol. **63**: 277-290

- EGGER, H. (1990): Zur paläogeographischen Stellung des Rhenodanubischen Flysches (Neokom-Eozän) der Ostalpen. – Jb. Geol.B.-A. **133**: 147-155
- EISBACHER, G.H., LINZER, H.-G., MEIER, L. & POLINSKI, R. (1990): A depth-extrapolated structural transect across the Northern Calcareous Alps of western Tirol. – Ecl. Geol. Helv, **83/3**: 711-725
- EISBACHER, G.H. & BRANDNER, R. (1996): Superposed fold-thrust structures and high-angle faults, Northwestern Calcareous Alps, Austria. – Ecl. Geol. Helv. **89/1**: 553-571
- FABRICIUS, F.H. (1966): Beckensedimentation und Riffbildung an der Wende Trias/Jura in den Bayrisch-Nordtiroler Kalkalpen. – Intern. Sedimentary Petrographical Series **IX**: 1-143
- FABRICIUS, F., FRIEDRICHSEN, H., & JACOBSHAGEN, V. (1970): Paläotemperaturen und Paläoklima in Obertrias und Lias der Alpen. – Geol. Rdsch. **68**: 93-120
- FAIRFIELD, J. & LEYMARIE, P. (1991): Drainage networks from grid digital elevation models. – Water Resources Research, **27/5**: 709-771
- FAUPL, P. & WAGREICH, M. (1999): Late Jurassic to Eocene Palaeogeography and Geodynamic Evolution of the Eastern Alps – Mitt. Österr. Geol. Ges. **92**: 79-94
- FRISCH, W. (1979): Tectonic Progradation and Plate Tectonic Evolution of the Alps. – Tectonophysics **60**: 121-139
- FRISCH, W., KUHLEMANN, J., DUNKL, I. & BRÜGEL, A. (1998): Palinspastic reconstruction and topographic evolution of the Eastern Alps during late Tertiary tectonic extrusion. – Tectonophysics, **297**: 1-15
- FRISCH, W. & GAWLICK, H.J. (2003): The nappe structure of the central Northern Calcareous Alps and its disintegration during Miocene tectonic extrusion – a contribution to understanding the orogenic evolution of the Eastern Alps. – Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rdsch.) **92**: 712-717
- FULDE, M. (2001): Geologische und geotechnische Kartierung im Bereich Zürs am Flexenpass (Österreich). – 98 S., unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- GAUPP, R. (1982): Sedimentationsgeschichte und Paläotektonik der Kalkalpen Mittelkreide (Allgäu, Tirol, Vorarlberg). – Zitteliana **8**: 33-72
- GAUPP, R., VON EYNATTEN, H., ORTNER, H. & SANDERS, D. (1997): From passive to active margin; Cretaceous synorogenic deposition in the Northern Calcareous Alps. – Gaea Heidelbergensis **4**: 53-77
- GUPTA, P. & ANBALAGAN, R. (1997): Slope stability of Tehri Dam Reservoir Area, India, using landslide hazard zonation (LHZ) mapping. – Quart. Jour. Eng. Geol. **30** : 27-36
- GWINNER, M.P. (1965): Geometrische Grundlagen der Geologie. – 154 S.; Schweizerbart
- HAWELKA, N. (2001): Geologische und geotechnische Risikokartierung in den Nördlichen Kalkalpen, Vorarlberg, Österreich (Blatt Lech). – 90 S.; unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- HEGG, CH. & KIENHOLZ, H. (1995): Determining paths of gravity-driven slope processes: the 'Vector Tree Model'. – in: CARRARA, A. & GUZZETTI, F. (eds.): Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, S. 79-92; Kluwer

- HERM, D. (1999): Bayern und Österreich – 150 Jahre Geologische Forschung im gemeinsamen Alpenstreifen. – Abh. Geol. B.-A., **56/1**: 29-44
- HEUBERGER, H. (1994): The giant landslide of Köfels, Ötztal, Tyrol. – Mountain Research and Development, **14**, No. 4: 290-294
- HILS, G. (2002): Geologische und Geotechnische Kartierung des Hochtannberggebiets (Warth am Arlberg). – 112 S.; unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- HILS, G., RUFF, M. & CZURDA, K. (2003): Massenbewegungen im Hochtannberg-Gebiet - Geologie, Ursachen, Beispiele. – Vorarlberger Naturschau **12**: 31-52
- HUNGR, O., EVANS, S.G. (1988): Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. – in: BONNARD, CH. (Hrsg.): Landslides, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne, Bd. 1, S. 685-690; Balkema
- IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES (1990): Suggested Nomenclature for Landslides. – Bull. Int. Ass. Eng. Geol. **41**: 13-16
- IUGS WORKING GROUP ON LANDSLIDES, COMMITTEE ON RISK ASSESSMENT (1997): Quantitative risk assessment for slopes and landslides - the state of the art. – in: CRUDEN, D.M. & FELL, R. (eds.): Landslide Risk Assessment, Proc. Int. Ws. Landslide Risk Assessment Honolulu, USA; S. 3-12
- JACOBSHAGEN, V. (1965): Die Allgäu-Schichten (Jura-Fleckenmergel) zwischen Wettersteingebirge und Rhein. – Jb. Geol. B.-A. **108**: 1-114
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. (1988): Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **54**, Nr. 11: 1593-1600
- JUANG, C. H., LEE, D. H. SCHEU, C. (1992): Mapping slope failure potential using fuzzy sets. – J. Geot. Eng. **118**: 475-494
- KASSEBEER (2002): Georisikokarte Vorarlberg – Pilotprojekt Bregenzer Wald. GIS-gestützte Gefährdungskartierung einer alpinen Region. – Dissertation Lehrstuhl Angew. Geologie; Universität Karlsruhe (TH)
- KASSEBEER, W. & RUFF, M (2003): Georisikokarte Vorarlberg – Analyse geogener Gefährdungen mit GIS im regionalen Maßstab. – in: STROBL, J., BLASCHKE, TH. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XV; Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2003: 186-195; Wichmann <http://www.agit.at/papers/2003/1559.pdf>
- KRENMAYR, H.G. (Red.)(1999): Rocky Austria. Eine bunte Erdgeschichte von Österreich. – 63 S., Geol. B.-A.; Wien
- KÜHN, M. (2004): Geologische Kartierung des Großen Walsertales (Vorarlberg/Österreich) und GIS-gestützte Modellierung potenziell gefährdeter Rutschungsbereiche. – 122 S.; unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- LAUBSCHER, H. & BERNOULLI, D. (1977): Mediterranean and Tethys. – in: NAIRN, A.E.M, KANES, W.H. & STEHLI, F.G. (Eds.), The Ocean Basins and Margins, Vol 4A, The Eastern Mediterranean: S. 1-28, Plenum
- LEIN, R. (1987): Evolution of the Northern Calcareous Alps in Triassic times. – in: FLÜGEL, H.W. & FAUPL, P. (eds.): Geodynamics of the Eastern Alps, S. 85-102; Deuticke

- MAY, T. & EISBACHER, G.H. (1999): Tectonics of the synorogenic «Kreideschiefer basin», northwestern Calcareous Alps, Austria – *Ecl. geol. Helv.* **92**: 307-320
- MEIBL, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen, Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. – *Innsbrucker Geogr. Studien* **28**, 249 S.; Innsbruck
- MOSER, M. & ÜBLAGGER, G. (1984): Vorschläge zur Erstellung von geotechnischen Karten und Erhebungen im Rahmen von Gefahrenzonenplänen in Hangbereichen. – *Int. Symp. Interpraevent Villach, Band II*: 275-287
- MÜLLER, M., NIEBERDING, F., WANNINGER, A. (1988): Tectonic style and pressure distribution at the northern margin of the Alps between Lake Constance and the River Inn. – *Geol. Rdsch.*, **77/3**: 797-814
- NEMCOK, A., PAJEK, J. & RYBAR, J. (1972): Classification of Landslides and other Mass Movements. – *Rock Mechanics* **4**: 71-78
- NEUBAUER, F., GENSER, J. & HANDLER, R. (1999): The Eastern Alps: result of a two stage collision process. – in: NEUBAUER, F. & HÖCK, V. (eds.): *Aspects of Geology in Austria*; *Mitt. Österr. Geol. Ges.* **92**: 117-134
- ÖBERHAUSER, R. (Red.) (1980): *Der geologische Aufbau Österreichs* – 1122 S., Geol. B.-A.; Springer
- ÖBERHAUSER, R. (1995): Zur Kenntnis der Tektonik und der Paläogeographie des Ostalpenraumes zur Kreide-, Paläozän-, und Eozänzeit. – *Jb. Geol. B.-A.*, **138**: 369-432
- ÖBERHAUSER, R. (1998): *Geologisch Tektonische Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200.000; mit Erläuterungen.* – Geol. B.-A.; Wien
- PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): *Die Alpen im Eiszeitalter.* – 1199 S.
- PIFFNER, A. (1992): Alpine orogeny – in: BLUNDELL, D., FREEMAN, R. & MUELLER, S. (eds.): *A Continent Revealed - The European Geotraverse.* – S 180-190; Camb. Univ. Press
- PLÖCHINGER, B. (1980): Die Nördlichen Kalkalpen. – in: ÖBERHAUSER, R. (Hrsg.) *Der Geologische Aufbau Österreichs*; S. 218-264; Springer
- RATSCHBACHER, L., FRISCH, W., NEUBAUER, F., SCHMID, S.M. & NEUGEBAUER, J. (1989): Extension in compressional orogenic belts: the Eastern Alps. – *Geology*, **17**: 404-407
- REITERER, I. (2001): Gefahrenbeurteilung von Rutschungsbereichen; Versuch der Ausweisung rutschungsgefährdeter Bereiche im südlichen Salzkammergut mittels Geographischer Informationssysteme (GIS). – in: STROBL, J., BLASCHKE, TH. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIII; Beiträge zum AGIT-Symposium 2001*: S. 387-399; Wichmann
- RICHTER, D. (1984): *Allgäuer Alpen – Sammlung geol. Führer 77*, 253 S.; Borntraeger
- RICHTER, M. (1978): *Die Vorarlberger Alpen – Sammlung geol. Führer 49*, 171 S.; Borntraeger
- RIKLI, CH., ZIMMERLI, P. & BÖLL, A. (2001): Effects of vegetation on shallow landslides: an analysis of the events of August 1997 in Sachseln, Switzerland. – in: KÜHNE, M., EINHORN, H.H., KRAUTER, E., KLAPPERICH, H. & PÖTTLER, R. (eds.): *Landslides - Causes, Impacts, Countermeasures.* – *Proc. Int. Conf. on Landslides; Davos, June 2001*, S. 575-584; Glückauf

- ROTHPLETZ, A. (1883): Zum Bau Gebirgsbau der Alpen beiderseits des Rheines. – Zt. Dtsch. Geol. Ges., 1883: 401-470
- RUFF, M. (2000): Geologische und geotechnische Kartierung in der Südlichen Vorarlberger Flyschzone 1:10.000 (Bregenzer Ach / Schoppernautal). – 96 S.; unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- RUFF, M., KASSEBEER, W. & CZURDA (2001): Die Geologie in der Umgebung von Schoppernautal und ihre Bedeutung bei der Entstehung von Hangbewegungen. – Vorarlberger Naturschau **11**: 59-72
- RUFF, M. & CZURDA, K. (2003): Georisikokarte Hochtannberg/Arlberg - Analyse der Rutschungsgefährdung mit GIS. – Rheticus Jg. 25, Heft 3: 61-66
- RUFF, M. & CZURDA, K. (2004): Konzept für eine landesweite Ausweisung von Georisiken. – Rheticus Jg. 26, Heft 3, 59-64
- RUFF, M. (2005): GIS-gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich). – 144 S., Dissertation Fakultät Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH); <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2005/46/>
- RUFF, M. & CZURDA, K. (2005): Risikoanalyse für Massenbewegungen in den Ostalpen (Vorarlberg). – in: MOSER, M. (Hrsg.): Veröffentlichungen 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Erlangen 2005, 85-89
- SCHANZ, CH. (2002): Geologische und geotechnische Kartierung im Hinteren Bregenzerwald (Schrócken, Österreich) und GIS-gestützte Modellierung potenzieller Steinschlagwege. – 88 S.; unveröff. Diplomarbeit; Univ. Karlsruhe (TH)
- SCHIEDEGGER, E. (1975): Physical Aspects of Natural Catastrophes. – 289 S.; Elsevier
- SCHOLZ, H. & SCHOLZ, U. (1995): Bau und Werden der Allgäuer Landschaft. – 305 S.; Schweizerbart
- SENGOR, A.M. (1985): The story of Tethys; how many wives did Okeanos have? – Episodes, **8**, no.1: 3-12
- STAMPFLI, G.M. & BOREL, G.D. (2004): The TRANSMED Transects in Space and Time: Constraints on the Paleotectonic Evolution of the Mediterranean Domain. – in: CAVAZZA, W., ROURE, F. SPAKMAN, W. STAMPFLI, G.M. & ZIEGLER, P.A. (Eds.): The TRANSMED Atlas - The Mediterranean Region from Crust to Mantle. 141 S.; Springer
- TOLLMANN, A. (1976): Der Bau der Nördlichen Kalkalpen. – 449 S. + Tafelband; Deuticke
- TRÜMPY, R. (1998): Die Entwicklung der Alpen: Eine kurze Übersicht. – Z. dt. Geol. Ges., **149/2**: 165-182
- TURRINI, M.C. & VISINTAINER, P. (1998): Proposal of method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy. – Eng. Geol., **49**: 255-265
- VAN HUSEN, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten – Populärwiss. Veröff. Geol. B.-A.; Wien
- VAN HUSEN, D. (1999): Geological Processes during the Quaternary. – Mitt. Österr. Geol. Ges. **92**: 135-156

- VON EYNATTEN, H. & GAUPP, R. (1999); Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. – Sediment. Geol. **124**: 81–111
- WINKLER, W. (1988): Mid- to Early Late-Cretaceous Flysch and Melange Formations in the Western Part of the Eastern Alps. Paleotectonic Implications. – Jb. Geol. B.-A. **131**: 341-389
- WINKLER, W. (1996): The tectono-metamorphic evolution of the Cretaceous northern Adriatic margin as recorded by sedimentary series (western part of the Eastern Alps). – Ecl. Geol. Helv. **89**/1: 527-551

Anschrift der Autoren

Dipl.Geol.
Michael Ruff
Ingenieure Bart AG
Waisenhausstraße 15
CH-9000 St. Gallen

Dipl.-Geol.
Markus Kühn
Universität Karlsruhe (TH)
Lehrstuhl f. Angewandte
Geologie (AGK) Karlsruhe
Kaiserstraße 12
D-76128 Karlsruhe

Prof. Dr. Dr.
Kurt Czurda
Universität Karlsruhe (TH)
Lehrstuhl f. Angewandte
Geologie (AGK) Karlsruhe
Kaiserstraße 12
D-76128 Karlsruhe
www.agk.uni-karlsruhe.de
e-mail:
czurda@agk.uni-karlsruhe.de

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Vorarlberger Naturschau - Forschen und Entdecken](#)

Jahr/Year: 2005

Band/Volume: [18](#)

Autor(en)/Author(s): Czurda Kurt, Ruff Michael, Kühn Markus

Artikel/Article: [Gefährdungsanalyse für Hangbewegungen. 5-96](#)