



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Gefährdungsanalysen für gravitative Massenbewegungen

Logistische Regressionsmodellierung
mittels verschiedener geologischer
Einflussparameter

Verfasserin

Christine Gassner

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, Juni 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt: Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuerin / Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

DANKSAGUNG

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade für die Betreuung der Diplomarbeit und Dr. Rainer Bell, der durch seine GIS Lehrveranstaltung mein Interesse am Modellieren von gravitativen Massenbewegungen geweckt hat und ebenfalls mit Rat und Tat zur Seite stand. Die Geländeaufenthalte und die Möglichkeit an Diskussionen mit den Fachleuten teilhaben zu können, sind keine Selbstverständlichkeit.

Helene möchte ich ganz besonders danken. Sie hat mir die Daten zusammengestellt und immer ein offenes Ohr gehabt. Sie schien meine Probleme und den Entwicklungsprozess immer genau zu kennen.

Bei Stefan und insbesondere Hannah, meinen beiden Weggefährten, die im gleichen Projekt ihre Diplomarbeiten schrieben, möchte ich mich bedanken. Sie waren wichtige Diskussionspartner. Es waren vor allem die kleinen, unscheinbaren Inputs, welche mich weiterbrachten.

Dem geologischen Dienst der Baudirektion, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung möchte ich für die Bereitstellung der Geodaten und der Geologischen Bundesanstalt für das zur Verfügung stellen der Geologischen Karten danken.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Leuten im „Diplomandenzimmer“ bedanken, wo stets eine ideale Arbeitsstimmung herrschte, Wissen zwischen verschiedensten Fragestellungen und Disziplinen zirkulierte und immer auch Zeit zum Scherzen blieb.

Ohne die Unterstützung meiner Eltern, Anita und Karl wäre ich nicht so weit gekommen. Ihnen gebührt mein aufrichtigster Dank.

Diese Diplomarbeit ist der Abschluss einer wunderbaren Studienzeit an der Universität, wo ich nicht nur Wissen, sondern auch Freunde gefunden habe, meinen Studienkolleginnen und – Kollegen danke ich ebenfalls von Herzen.

ZUSAMMENFASSUNG

Massenbewegungen im Gebirge gehören zu den Naturgefahren wie Lawinen, Hochwasser und Erdbeben, die Mensch und Infrastruktur bedrohen, sowie nicht selten Menschenleben fordern und enorme Schäden an Infrastruktur und Wirtschaft beifügen können. Um die dahinterstehenden Prozesse besser verstehen zu können und künftige Ereignisse zu verhindern, werden unter anderem Gefahrenhinweiskarten herangezogen. Darin sollen Gefährdungen für Massenbewegungen möglichst exakt lokalisiert werden.

Die Entstehung von Massenbewegungen wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Es gibt mehrere Methoden Gefährdungen für Massenbewegungen darzustellen. Als Untersuchungsgebiet wurde die Region südlich von Scheibbs (Niederösterreich) gewählt, weil dazu sehr umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung steht. Zwei verschiedene Datensätze wurden auf ihre Eignung zur Modellierung verglichen, indem die geologische Karte 1:200.000 der höher aufgelösten geologischen Karte 1:50.000 gegenübergestellt wurde. Der Fokus wurde dabei auf die logistische Regression, einem statistischen Ansatz, gelegt.

Die Arbeitsschritte sind in drei Hauptkomponenten gegliedert und am Ende jeweils validiert. In einem ersten Schritt wurden rund 440 Rutschungen in einem Untersuchungsgebiet südlich von Scheibbs kartiert und im Gelände verifiziert. Das Gebiet ist landschaftlich von der Flyschzone und den angrenzenden Kalkalpen geprägt. Im nächsten Schritt wurde für die logistische Regressionsmodellierung der Datensatz in einen Test- und einen Trainingsdatensatz unterteilt und über den AUROC Wert als statistisches Gütemaß bewertet. Als letztes wurden die klassifizierten Gefahrenhinweiskarten nach der Anzahl richtig beziehungsweise falsch klassifizierter Pixelzahl evaluiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die beiden Datengrundlagen statistisch nur gering unterscheiden. In der Visualisierung aber vermehrt Unterschiede, besonders in Tälern und am Hangfuß zu Gunsten der geologischen Karte 1:50.000 auftreten. Die GK 200 hat zudem abruptere Wechsel zwischen der höchsten und niedrigsten Gefährdungsstufe. Diese Beobachtungen bestätigten sich auch in verschiedenen Klassifizierungsverfahren. Es folgt daraus, dass sich beide Datensätze für Modellierungen eignen, jedoch genauere geologische Gutachten notwendig sind. Diese Ergebnisse dienen als Basis für weitere Untersuchungen und liefern einen Beitrag für umfangreiche Forschungsansätze wie zum Beispiel eines Multihazard Ansatzes.

ABSTRACT

Mass movements in mountainous areas are caused by natural hazards such as flooding, snow avalanches or earthquakes. People and infrastructure are strongly affected by these events. Susceptibility maps help to understand the processes behind this issue and try to forecast further possible events.

Thus, the aim of this study is to investigate how using lithological data at different scales affects the results of landslide susceptibility modelling and to analyse spatial differences in the resulting maps of a region south of Scheibbs, Lower Austria. In this study logistic regression (a statistical approach) is used to model landslide susceptibility, focusing on the consequences deriving from the use of two different lithological datasets (mapping scale 1:200,000 and 1:50,000).

This study is structured in three steps and three different techniques are applied to evaluate the output performance. First, 440 landslides were mapped and verified in the field. Secondly, the resulting modelling output from the logistic regression was verified through statistical parameters such as AUROC values. For this purpose the data was divided into a test dataset and a training dataset. Then, the results were classified and visualized in susceptibility maps. The performance was evaluated from the percentages of terrain units that each model correctly classifies and the number of landslides falling within the area classified as unstable (true positives). Different classification methods (e.g. quartiles, jenks) were tested.

The results show that using a scale of 1:50,000 results in slightly better AUROC values, but the differences are very small. Test results on geomorphological value show that the data at 1:50,000 performed better on valleys and at small scale landforms, due to better resolution. The data at 1:200,000 leads to abrupt changes between the highest and lowest susceptibility class. We conclude that both datasets are suitable for modelling mass movements in mountainous areas, but this does not eliminate the requirement for more precise geological surveys. Using lithological data leads to initial results which are suitable as a foundation for further investigation by more extensive approaches, e.g. in a multi-hazard context.

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG	I
ZUSAMMENFASSUNG.....	II
ABSTRACT	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VII
TABELLENVERZEICHNIS.....	IX
VERWENDETE ABKÜRZUNGEN	X
1. EINLEITUNG	1
2. THEORIE	4
2.1. Gravitative Massenbewegungen	4
2.2. Prozesstypen, Klassifikation.....	5
2.3. Risikomanagement.....	8
2.4. Naturereignis versus Naturgefahr	9
2.4.1. Risiko.....	9
2.4.2. Vulnerabilität und Frequenz.....	10
2.5. Gefahrenhinweiskarten.....	11
2.5.1. Geomorphologische Kartierung	12
2.5.2. Inventaranalysen	12
2.5.3. Heuristischer Ansatz.....	13
2.5.4. Deterministische Ansätze	13
2.5.5. Statistische Analysen	13
2.6. Modellvalidierung.....	14
2.6.1. Zeitliche Differenzierung	14
2.6.2. Räumliche Differenzierung.....	14
2.6.3. Zufällige Differenzierung	15
3. METHODEN	16
3.1. Rutschungskartierung.....	17
3.2. Logistische Regression.....	17
3.3. Frequency Ratio	20
3.4. Klassifizierung der Gefahrenhinweiskarte	20
3.5. Validierung der Ergebnisse in der Gefahrenhinweiskarte.....	21

3.6.	Geomorphologische Güte	21
4.	DATEN UND DATENAUFBEREITUNG	22
4.1.	Basisdaten.....	22
4.2.	Digitales Geländehöhenmodell (DGM) und entsprechende Derivate	23
4.2.1.	Datenaufbereitung für die Rutschungskartierung	24
4.2.2.	Datenaufbereitung Exposition	24
4.3.	Landbedeckungsklassifikation.....	25
4.4.	Geologische Karten.....	26
4.5.	Gefahrenhinweiskarte - Klassifizierungsmethoden in der Darstellung der Gefahrenhinweiskarten	28
5.	UNTERSUCHUNGSGEBIET	29
5.1.	Lage	29
5.2.	Bevölkerung und Landnutzung	30
5.3.	Klima.....	31
5.4.	Geologie.....	31
5.4.1.	Entstehung der Alpen.....	31
5.4.2.	Geologie Niederösterreichs.....	33
5.4.3.	Die Flyschzone	33
5.4.4.	Die Kalkalpen	34
5.4.5.	Quartär	34
5.4.6.	Profil durch das Untersuchungsgebiet	34
5.5.	Boden	35
5.6.	Ereignisse im Untersuchungsgebiet	36
5.6.1.	Rutschung am Bundesoberstufenrealgymnasium in Scheibbs	36
5.6.2.	Extremereignisse in Niederösterreich im Jahr 2009	37
6.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	39
6.1.	Ergebnisse Rutschungskartierung.....	39
6.2.	Diskussion der Rutschungskartierung	41
6.3.	Ergebnisse Datenaufbereitung	41
6.3.1.	Lithologie.....	41
6.3.2.	Dummy Variable „Entfernung zu Störungslinien“ (Tektonik)	42
6.3.3.	Exposition	43
6.3.4.	Wölbung (Krümmung).....	43

6.3.5.	Diskussion zur Datenaufbereitung	43
6.4.	Häufigkeitsverteilung der Rutschungen.....	44
6.5.	Frequency Ratio	47
6.5.4.	Diskussion zu den Häufigkeitsverteilungen und der Frequency Ratio	51
6.6.	Ergebnisse aus der Modellierung	52
6.7.	Ergebnisse aus der Modellierung AIC- und AUROC Werte	54
6.8.	Gefahrenhinweiskarten.....	55
6.8.1.	Gefahrenhinweiskarten - Beschreibung des Modelle 25 und 26	55
6.8.2.	Gefahrenhinweiskarten - Beschreibung der Modelle 9 und 10	59
6.9.	Diskussion Modellierung und Statistik	60
6.9.1.	Diskussion zur Stichprobengröße	60
6.9.2.	Diskussion zur Wahl der erklärenden Variablen	61
6.9.3.	Diskussion der Lithologischen Einheiten in der Modellierung	61
6.9.4.	Anmerkungen zur Kartographie und Farbgebung.....	62
6.10.	Validierung der klassifizierten Gefahrenhinweiskarten.....	62
6.10.1.	Validierung am Beispiel der Modelle 9 und 10	63
6.10.2.	Vergleich GK 200 mit GK 50 (Modelle 9 und 10).....	64
6.10.3.	Validierung am Beispiel der Modelle 25 und 26	64
6.10.4.	Diskussion zur Validierung der Gefahrenhinweiskarten	65
6.11.	Geomorphologische Güte	66
6.11.1.	Geomorphologische Güte - Quartile	66
6.11.2.	Geomorphologische Güte – Equal interval.....	67
6.11.3.	Diskussion zur Geomorphologischen Güte	68
6.12.	Modellierung mit Frequency Ratio Werten (gewichtete Lithologie und Landbedeckung) .	69
7.	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND PERSPEKTIVEN	73
7.1.	Hypothesen - Fazit.....	73
7.2.	Perspektiven und Ausblick.....	74
8.	LITERATURVERZEICHNIS.....	76
ERKLÄRUNG		83

Lebenslauf

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 Hangstabilität (Factor of Safety) Beispiel für die Veränderung der Sicherheit über die Zeit Quelle WL/WPLI (1994) in (Mölk <i>et al.</i> , 2011) S. 95.	8
Abb. 2 Ablaufschema der Modellierung mit drei Validierungsszenarien.	16
Abb. 3 Digitales Geländemodell 1m Auflösung, Datenquelle © Land Niederösterreich.	24
Abb. 4 Klassifizierung der Expositionsdaten (nach ESRI Help)	25
Abb. 5 Landbedeckungskarte Region Scheibbs, 2010 Datenquelle Joanneum Research.	26
Abb. 6 Lage und Topographie des Untersuchungsgebietes (AMap, BEV, 2011).	29
Abb. 7 Entstehung der Alpen. Entstehung der Flyschzone im Tiefseewasser (KRENMAYR, 2002).	32
Abb. 8 Entstehung der Alpen. Auffaltung und Überprägung der Deckenschichten (KRENMAYR, 2002).	32
Abb. 9 Geologische Überblickskarte Niederösterreich, 2011 Quelle GBA.	33
Abb. 10 Geologisches Querprofil durch die Alpen von Ybbs bis zum Gr. Zeller Hut (WESSELY, 2006) mit eingezeichnetem Untersuchungsgebiet.	35
Abb. 11 24-h-Summen des Niederschlags in Österreich vom 23., 24., 25. sowie 27., 28. und 29. Juni 2009 jeweils 06:00 UTC für die 24h zuvor (Quelle: ZAMG, INCA – Analyse) ergänzt.	38
Abb. 12 Rutschungskartierung 2011, Datenquelle Topographie, Gemeindegrenzen und Namengut	40
Abb. 13 Vergleich der GK 200 mit der GK 50, Überblicksdarstellung, Quelle GBA.	42
Abb. 14 Häufigkeitsverteilungen der Rutschungen und des Gesamtgebietes nach a) Höhe, b) Himmelsrichtung (Exposition), c) Landbedeckung und d) Hangneigung.	45
Abb. 15 Frequency Ratio der zehn häufigsten Einheiten der GK 200 oben a) und der zehn rutschungsrelevanten Klassen der GK 200 unten b).	46
Abb. 16 Frequency Ratio der zehn häufigsten Einheiten der GK 50 oben a) und der zehn rutschungsrelevanten Klassen der GK 50 unten b).	47
Abb. 17 AUROC Kurve und zugehöriger Wert des Modells 27a und 28a (gewichtete Modellierung) aus Hangneigung, Wölbung, geologische Karte, Tektonik mit Abstand 100m Landbedeckung für Test und Trainingsdatensatz. Im Modellnamen sind die einzelnen Komponenten abgekürzt aufgeführt. Exemplarisch in der GK 50 Variante.	55
Abb. 18 Gefahrenhinweiskarte (scgtn) auf Basis der GK 50 (oben) und auf Basis der GK 200 (unten). Gefährdung aufgeteilt in 4 Klassen mit den Modellierungsparametern: Hangneigung, GK, Tektonik (unklassifiziert), Landbedeckung und der Wölbung.	57
Abb. 19 Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 und 10 (sdplcgkeu100n) auf Basis der GK 50 (oben) und auf Basis der GK 200 (unten). Gefährdung aufgeteilt in 4 Klassen mit den Modellierungsparametern: Hangneigung, Höhe, Lithologie, Tektonik (100m Puffer), Landbedeckung und der Wölbung.	58
Abb. 20 Ausschnitt aus den Gefahrenhinweiskarten der Modelle 10a (GK 50) links; und 9a (GK 200) rechts.	59

Abb. 21 Geomorphologische Güte des Modells scgtkn klassifiziert nach Quartilen.	
a) Gefährdungen der GK 200, b) Gefährdungen der GK 50 und c) die Differenz der beiden Modelle.....	67
Abb. 22 Geomorphologische Güte des Modells scgtkn klassifiziert nach Equal Interval.	
a) Gefährdungen der GK 200, b) Gefährdungen der GK 50 und c) die Differenz der beiden Modelle.....	68
Abb. 23 Vergleich zwischen den gerechneten Modellen. a) Modell 26a GK 200 (gewichtete Werte).	
b) Modell 25a GK 50 (gewichtete Werte). c) Modell 26 GK 200 und d) Modell 25 GK 50. ..	71

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1 Zusammenhang von Prozesstyp und Material von Massenbewegungen (aus BELL, 2007)	5
Tab. 2 Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren bei gravitativen Massenbewegungen (DIKAU und GLADE, 2002) in (BELL, 2007).....	6
Tab. 3 Teilschritte der Risikobetrachtung ergänzt aus ((STÖTTER und ZISCHG, 2008) nach (CROZIER und GLADE, 2005) (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2002)	10
Tab. 4 Ausgangsdaten für die Rutschungskartierung und die Modellierung	22
Tab. 5 Überblick über Zahl und Größe der Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet.....	40
Tab. 6 Frequency Ratio der Rutschungen im Landbedeckungsdatensatz.....	48
Tab. 7 Auschnitt aus Frequency Ratio GK 50. (vollständige Tabelle siehe Anhang)	49
Tab. 8 Auschnitt aus Frequency Ratio GK 200. (vollständige Tabelle siehe Anhang)	50
Tab. 9 Erläuterung zu den verwendeten Abkürzungen in Tabelle 10.	52
Tab. 10 Überblick über die in R gerechneten Modelle (Auswahl)	53
Tab. 11 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 & 10 (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.....	63
Tab. 12 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 & 10 (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.....	65
Tab. 13 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der mit der Frequency Ratio erstellten Modelle 26a und 25a (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.	70

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

AIC	Akaike Information Criterion
AUROC	Area Under ROC Curve (ROC = Receiver Operating Characteristic)
BEV	Bundesamt für Eich – und Vermessungswesen
DGM	Digitales Geländemodell
FoS	Factor of Safety
GBA	Geologische Bundesanstalt
GIS	Geoinformationssystem
GK 50	Geologische Karte 1:50.000 (auch als Synonym für Lithologie)
GK 200	Geologische Karte 1:200.000 (auch als Synonym für Lithologie)
MoNOE	Methodenentwicklung für Gefährdungsmodellierungen von Massenbewegungen in Niederösterreich
WLV	Wildbach und Lawinenverbauung

1. EINLEITUNG

Massenbewegungen im Gebirge sind meist natürlichen Ursprungs und Teil eines natürlichen Abtragungsprozesses. Sie gehören zu den Naturgefahren wie Lawinen, Hochwasser und Erdbeben, die Mensch und Infrastruktur bedrohen, sowie nicht selten Menschenleben fordern und enorme Schäden an Infrastruktur und Wirtschaft beifügen können.

In den Medien wird meist nur von den größten Ereignissen berichtet. So ereignete sich nach langanhaltenden Niederschlägen in La Paz, Bolivien am 27. Februar letzten Jahres ein Erdbeben, welches 400 Häuser in einem Armenviertel komplett zerstörte und über 4000 Menschen obdachlos machte. (SÜDDEUTSCHE ZEITUNG)

Als Folge der heftigen Erdbeben in Christchurch Neuseeland im September 2010 und die folgenden im Februar und an Pfingsten 2011 traten immer wieder Hangrutschungen auf (PETLEY, 2011). Die beiden Beispiele zeigen, dass Rutschungen einhergehen mit anderen Naturgefahren und diese als vorbereitende oder auslösende Mechanismen für gravitative Massenbewegungen stehen.

Extremereignisse mit katastrophalem Ausgang sind seltener, Ereignisse kleinerer Magnituden sind dagegen umso häufiger und richten in Summe sehr hohen volkswirtschaftlichen Schaden an. In Europa sind es vor allem die Gebiete der Alpen, Voralpen und Küstenregionen, die zu Hangrutschungen neigen. Zwei verheerende Ereignisse in Österreich erreichten internationale Beachtung. Zum einen die Hangrutschung von 1999 in der Vorarlberger Gemeinde Sibratsgöll, welche als „die größte Hangrutschung Mitteleuropas“ betitelt wurde (ORF, 2009). Durch heftige Niederschläge im Herbst und den darauf folgenden großen Schneemassen mit einer schnellen Schneeschmelze, wiederum gefolgt von hohen Niederschlägen, wurden 250ha Wald und Wiese mit relativ hoher Geschwindigkeit verschoben. Rund 20 Häuser und 25 Personen waren betroffen (GEMEINDE SIBRATSGÖLL). Dieses Ereignis schlug in der Bevölkerung und medial hohe Wellen. Laut ORF, 2009 wurden allein für die Trockenlegung einiger Hangareale 1,6 Millionen Euro investiert. Auch zehn Jahre danach, einige Forschungsarbeiten und einem Roman weiter sind die Wogen noch nicht ganz geglättet.

Der „Gschlifgraben“ am Traunsee Ostufer, in Oberösterreich, als zweites österreichisches Beispiel erregte ein ähnlich hohes Interesse im In- und Ausland. Der Erdstrom setzte 2007 rund 3,8 Millionen m³ Masse in Bewegung. In der Folge mussten zahlreiche Häuser evakuiert und Straßen gesperrt werden. In die Sanierung des Gschlifgrabens wurden in der Zwischenzeit über 10 Mio. Euro von der Wildbach- und Lawinenverbauung („die Wildbach“ WLV) investiert (WEIDINGER, 2009). Wissenschaftler und Ingenieure setzten alles daran, die Bewegungen einzudämmen und den Objektschutz voranzutreiben.

Sowohl in Gmunden als auch in Sibratsgfall sind Hanginstabilitäten schon seit Generationen bekannt, sogar in deren Eigennamen integriert und weisen so auf die Naturgefahr hin. Dennoch kommen solche Ereignisse überraschend, weil sie in Vergessenheit geraten. Es wird Land bebaut, wo man es nicht tun sollte.

Diskussionen um den Gefahrenzonenplan werden nach solchen Vorkommnissen angeheizt und treffen auf unterschiedlichste Interessensvertreter. Anwohner fürchten um ihren Besitz, Wertanlage und Gesundheit, Versicherungen wollen ihre Leistungen und Risiken abschätzen und die Gemeinde möchte möglichst viel als Bauland widmen, sowie attraktiv für neue Bürger und Wirtschaftsbetriebe sein. In diesem Spannungsfeld bewegt sich die Wissenschaft, welche versucht Informationen zu liefern, was, wann und mit welcher Wahrscheinlichkeit passieren wird. In dieser Diplomarbeit steht die Entwicklung einer Gefahrenhinweiskarte im Vordergrund. Die Gefahrenhinweiskarte kann als Instrument für die Gefahrenzonenpläne in der Raumplanung gesehen und eine Entscheidungsgrundlage im politischen Diskurs bilden.

Das Land Niederösterreich lancierte 2009 das Projekt „Methodenentwicklung für Gefährdungsmodellierungen von Massenbewegungen in Niederösterreich“ (MoNOE), an dem eine Kooperation aus der Universität Wien (Institut für Geographie und Regionalforschung), dem Austrian Institute of Technology (AIT), sowie dem Joanneum Research beteiligt sind.

Dies bietet die Gelegenheit, neben eigenen Erhebungen auch vorhandene Daten zu nutzen und statistische Gefährdungsmodellierungen von Hangrutschungen mit Fokus auf geologische Einflussparameter zu testen. Die Berechnungen werden mittels logistischer Regression durchgeführt.

Folgende Forschungsfragen und Hypothesen ergeben sich aus dem Zusammenhang für die vorliegende Arbeit:

Mit den Modellen werden verschiedene Eingabeparameter auf ihren Einfluss auf Hangrutschungen getestet. Unter anderen stehen zwei Datensätze mit Informationen über die Geologie zur Verfügung. Die Geologische Karte 1:50'000 und die Geologische Karte 1:200'000.

Das Landschaftsbild beziehungsweise die Morphologie ist im Wesentlichen durch die Geologie geprägt. Die sanften Hügelformen der Flyschzone unterscheiden sich augenscheinlich von der schroffen, steilen und felsigen Berglandschaft der Kalkalpen. Daraus entsteht die erste Hypothese:

H1: Die Geologie ist der maßgebende Faktor in der Gefährdungsmodellierung.

Lassen sich beobachtete Unterschiede im Landschaftsbild auch auf Hangrutschungen und deren statistische Modellierung übertragen? Reagiert das Modell sensibel, wenn die beiden geologischen Karten ausgetauscht werden?

Wie verändert sich der Regressionswert der beiden Modellinputparameter?

Neben der allgemeinen Fragestellung zur Modellierung sollen auch die Unterschiede der beiden Datensätze herausgearbeitet werden.

H2: Die GK 50 liefert bessere Ergebnisse als die Daten der GK 200.

Kann davon ausgegangen werden, dass höher aufgelöste Daten auf einer regionalen Skala automatisch bessere Ergebnisse bieten? Lassen sich aus statistisch validen Modellierungsergebnissen auch für die Praxis sinnvolle Gefahrenhinweiskarten erzeugen?

Die Diplomarbeit ist in mehrere Blöcke gegliedert. Der Theorieteil gibt eine Einführung in die Thematik, der Stand der Forschung wird dargelegt und es werden Fachtermini erklärt. Der praktische Teil umfasst einerseits eine Kartierung der Hangrutschungsereignisse im Untersuchungsgebiet und andererseits die Modellierung mittels logistischer Regression. Daran anschließend werden die Ergebnisse präsentiert und diskutiert. In den Perspektiven wird auf künftige Anschlussarbeiten hingewiesen und die Arbeit nochmals in den Gesamtkontext gestellt.

2. THEORIE

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen erläutert, worauf sich die in der Diplomarbeit verwendete Methode stützt. Definitionen im Bereich der Massenbewegungen und Risikoforschung sollen einen Überblick verschaffen und den Leser in die Thematik einführen. Die für die gesamte Arbeit geltenden zentralen Begriffe werden erläutert und die wichtigsten Einflussparameter und auslösenden Faktoren für gravitative Massenbewegungen verdeutlicht.

2.1. Gravitative Massenbewegungen

Im deutschen Sprachraum wird für den Begriff „gravitative Massenbewegung“ oft auch das Synonym „Hangrutschung“ verwendet, selbst wenn damit andere Prozesstypen, als Fließen oder Gleiten gemeint sind (GLADE und DIKAU, 2002). GLADE, 2005 S.80 definiert gravitative Massenbewegungen wie folgt: *„Die gravitativen Massenbewegungen sind unter dem Einfluss der Schwerkraft hangabwärts gerichtete Fließ-, Kipp-, Gleit- oder kombinierte Prozesse, die Festmaterialien wie Boden, Schutt oder Fels aus einem Quellgebiet über eine bestimmte Strecke bis zur Ablagerung transportieren.“*

Auch im angelsächsischen Sprachraum werden mehrere Bezeichnungen für gravitative Massenbewegungen verwendet. Am häufigsten liest man in der Fachliteratur „landslides“ und „mass movements“. Die Definition von CRUDEN, 1991 S. 26 lautet: *„Landslide is a movement of a mass rock, earth or debris down a slope.“* und wird von der Arbeitsgruppe „UNESCO Working Party on World Landslide Inventory“ (WP/WLI (INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES' UNESCO WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY), 1993) unterstützt. Seit 1988 koordiniert die UNESCO Arbeitsgruppe der Internationalen Geotechnischen Gesellschaft zur Inventarisierung von Hangrutschungen die Vereinheitlichung der verschiedensten Definitionen von Massenbewegungen. Dies hat zur Standardisierung von Definitionen von Massenbewegungen und ihrer Eigenschaften geführt (DIKAU und GLADE, 2002).

Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen, Definitionen und Klassifizierungen von Massenbewegungen aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen. Die meist zitierten sind jene von (HUTCHINSON, 1977), (CROZIER, 1989), (CRUDEN und VARNES, 1996) und (DIKAU *et al.*, 1996). Obwohl sich die eben erwähnten Definitionen durchgesetzt haben, wird in Arbeiten jeweils das Verständnis eines Wissenschaftlers vom Begriff „gravitative Massenbewegungen“ mit aufgeführt. Diese stete Auseinandersetzung mit diesen Begriffen ist wichtig, solange sie bewusst durchgeführt wird. (CROZIER, 1986) schreibt dazu, dass Klassifizierung ein mächtiger Prozess im Transfer von Gedanken ist. Klassifizierungen sind institutionalisierte Konzepte, die sehr wertvoll aber auch gefährlich sein

können. Sie lenken das Denken in eine Richtung, lassen Strukturen erkennen, können aber dazu verleiten, Wichtiges auszublenden.

2.2. Prozesstypen, Klassifikation

Um unterschiedliche Massenbewegungen einordnen zu können und sie zu beschreiben, gibt es verschiedene Ansätze. International durchgesetzt hat sich die Klassifikation von DIKAU *et al.*, 1996 und CRUDEN und VARNES, 1996, die den Prozesstyp und die Art des betroffenen Materials in Zusammenhang stellen, wie in Tabelle 1 dargestellt ist. Es sind neben den deutschen auch die englischen Begriffe mit aufgeführt. Oft sind die Übergänge der verschiedenen Typen fließend und Mischtypen sind keine Seltenheit.

Tab. 1 Zusammenhang von Prozesstyp und Material von Massenbewegungen (aus BELL, 2007).

Process Prozess	Material Material		
	Rock <i>Festgestein</i>	Debris <i>Schutt</i>	Earth <i>Erde/Boden</i>
Fall <i>Fallen</i>	Rock fall <i>Bergsturz, Felssturz, Steinschlag</i>	Debris fall <i>Schuttsturz</i>	Earth fall <i>Erdsturz</i>
Topple <i>Kippen</i>	Rock topple <i>Felskippping</i>	Debris topple <i>Schuttkippung</i>	Earth topple <i>Erdkippping</i>
Slide (rotational) Gleiten (rotationsförmig)	Rock slide <i>Bergrutschung, Felsrutschung</i>	Debris slide <i>Schuttrutschung</i>	Earth slide <i>Erdrutschung</i>
Slide (translational) Gleiten (translatorisch)	Rock block slide <i>Felsblockgleitung</i> Rock slide <i>Felsgleitung</i>	Debris block slide <i>Schuttblockgleitung</i> Debris slide <i>Schuttgleitung</i>	Earth block slide <i>Erdblockgleitung</i> Earth slide <i>Erdgleitung</i>
Spread Driften	Rock spreading <i>Felsdriften</i>	Debris spreading <i>Schuttdriften</i>	Earth spreading <i>Erddriften</i>
Flow Fließen	Rock flow <i>Sackung, Talzus Schub</i>	Debris flow <i>Schuttfließen, Mure, Murgang</i>	Earth flow <i>Erdfließen, Mure, Murgang</i>
Complex Komplex	e.g. Rock avalanche z.B. Sturzstrom, Steinlawine	e.g. flow slide z.B. plötzliche und schnelle Fließbewegung in kohäsionslosem Lockergestein	e.g. rotational slide-earthflow z.B. kombinierte Rotationsrutschung mit Erdfließen

In dieser Arbeit wird der Fokus auf Rutschungen gelegt. Sie zählen zu den gleitenden bis fließenden Prozessen. Die Typen „Kippen“ und „Fallen“ werden in der Studie kaum berücksichtigt.

Rutschungen ereignen sich häufig an mäßig bis steil geneigten Hängen zwischen 10° und 40°. Die Erscheinungsformen (Tiefe, Größe und Art der Gleitfläche) können sehr unterschiedlich sein. Beeinflusst wird dies von der Untergrundstruktur, der Gesteinsbeschaffenheit und Beteiligung von Wasser (BAFU, 2009).

Massenbewegungen sind Teil eines Systems im Relief und im weiteren Sinne mit dem Kreislauf von Entstehen und Abtragung von Gebirgen verbunden. Die Matrix in Tabelle 2 aus BELL, 2007 zeigt nach Ursachen aufgelistete Faktoren, welche Massenbewegungen beeinflussen. Vorbereitende

Faktoren sind meist langsame Prozesse, die einen Hang in Bezug auf seine Stabilität negativ beeinflussen. Eine durch die Topographie ungünstige Lage und ein zusätzlicher Auflagedruck (beispielsweise durch ein Gebäude) schaffen Vorbedingungen, welche die Wahrscheinlichkeit zur Auslösung einer Massenbewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt erhöhen. Je nach Vorbelastung bringt ein mehr oder weniger starkes Ereignis den Hang ins Rutschen (zum Beispiel ein starkes Gewitter). Eine negative Rückkoppelung im Hangsystem kann unter Umständen durch kontrollierende Faktoren initiiert werden, beispielsweise immer größer werdende Risse im Hang. Dies spielt besonders in der Prävention von gravitativen Massenbewegungen eine wichtige Rolle. Dem Niederschlag fällt in dieser Betrachtung eine besondere Rolle zu. Der Niederschlag ist in allen drei Faktorenklassen vertreten. Bei der Zuordnung kommt darauf an, ob der Niederschlag konzentriert über eine kurze Zeit fällt, oder ob das Niederschlagsereignis sich über einen längeren Zeitraum erstreckt und so die Vorfeuchte des Bodens beeinflusst. Zu den auslösenden Faktoren zählen neben Niederschlagsereignissen auch Erdbeben, wie im zweiten Fallbeispiel in der Einleitung bereits erwähnt.

Tab. 2 Vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren bei gravitativen Massenbewegungen (DIKAU und GLADE, 2002) in (BELL, 2007).

Ursache	Vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	kontrollierende Faktoren
Geologie	Diskontinuität ¹ (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität ¹ (z.B. Streichen/Fallen, tektonische Störungen) Verwitterung Isostasie	Erdbeben Vulkanausbrüche	Gesteinstypen Diskontinuität ¹ (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität ¹ (z.B. Streichen, Fallen, tektonische Störungen)
Klima	Lang anhaltender Vorregen Schneeschnmelze Frost-Tau Zyklen	Niederschlag ¹ (Intensität, Menge) Schnelle Schneeschnmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)
Boden	Verwitterung Geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen Subterrane Erosion (z.B. Tunnelerosion)	Nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
Vegetation	Natürliche Vegetationsänderung ¹ (z.B. Waldbrand, Trockenheit)	Nicht zutreffend	Vegetation
Hydrologie	Schmelzender Permafrost	Schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauigkeit Weitertransport bewegter Massen
Topographie	Hangexposition ¹ Hanghöhe ¹	Nicht zutreffend	Hangneigung ¹ Hangwölbung ¹ Tiefenlinien ¹
Anthropogen	Entwaldung Staudambau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhangs Bewässerung Bergbau Künstliche Bewegung (z.B. Sprengung) Undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte ¹ Hangunterschneidung ¹ Auflast ¹	Künstliche Verbauungen Dämme Gerinnebegradigung, -verkleinerung, -vergrößerung

¹ diese Faktoren können, je nach Stabilitätszustand des Hanges, sowohl vorbereitend, auslösend als auch kontrollierend wirken

Physikalisch lässt sich der Auslösemechanismus durch das Mohr – Coulombsche Gesetz erklären. Das Mohr - Coulombsche Gesetz beschreibt die Beziehung zwischen Scherfestigkeit und Normalspannung. Je steiler der Hang, umso niedriger ist die Grenzscherspannung (AHNERT, 1996). Die auslösenden Faktoren wie zum Beispiel der Niederschlag setzen den Scherwiderstand herab. Dabei verändert sich das Gleichgewicht zwischen kohäsiven Kräften, dem Gewicht und demnach auch dem Auflagedruck. Die Kohäsion sorgt für den Zusammenhalt von einzelnen Partikeln und ist die bindende Kraft innerhalb eines Stoffes, welche vor allem vom Wassergehalt beeinflusst wird. Trockenes Material hat eine Kohäsion gleich 0. Im feuchten Bodenmaterial tragen Haftwasser und Porenwinkelwasser zum Zusammenhalt durch Kapillarkräfte bei (ZEPP, 2004). Niederschlag beeinflusst die Stabilität einer potentiellen Gleitschicht. Eine übermäßige Durchnässung verringert die Kohäsion. Daher wird die Scherfestigkeit auch durch den vergrößerten Auflagedruck verringert. Treibendes Moment ist die Scherfestigkeit τ . Die bremsende Kraft hängt von der Normalspannung σ , dem Reibungswinkel φ und von der Kohäsion c ab.

$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi \quad (1)$$

$\tau =$	Scherfestigkeit beim Bruch
$\sigma =$	Normalspannung
$c =$	Kohäsion
$\varphi =$	Reibungswinkel

Die Hangstabilität ist also im wesentlichen abhängig von der Scherfestigkeit und der Normalspannung.

Abbildung 1 zeigt einen standardisierten Ablauf eines Rutschungsereignisses anhand der Hangstabilitätskurve, des „Factor of safety“ (FoS). Dieser Faktor zeigt das Verhältnis zwischen rutschungsfördernden und stabilisierenden Kräften. Auf der y-Achse ist die Hangstabilität in Form FoS aufgetragen und der Zeitablauf eines schematisierten Prozesses auf der x-Achse. Voraussetzung für gravitative Massenbewegungen (insbesondere Muren) ist das Vorhandensein von genügend Material und ein gewisses Gefälle. Anfangs bleibt der Hang selbst bei einem heftigen Niederschlagsereignis stabil. Durch Änderungen der Grunddisposition (beispielsweise durch die Entfernung der Vegetation) setzt anfänglich Erosion ein. Immer wieder wird die Stabilität des Hanges durch Niederschlagsereignisse herabgesetzt. In dieser Phase ist er nur noch marginal stabil. Es braucht demnach nur noch ein kleines Event, welches eine Rutschung auslösen kann. Bei einem FoS Wert unter 1 kollabiert der Hang (strichlierte Linie). Manche deterministische Modelle geben Gefährdungen in FoS Werten an.

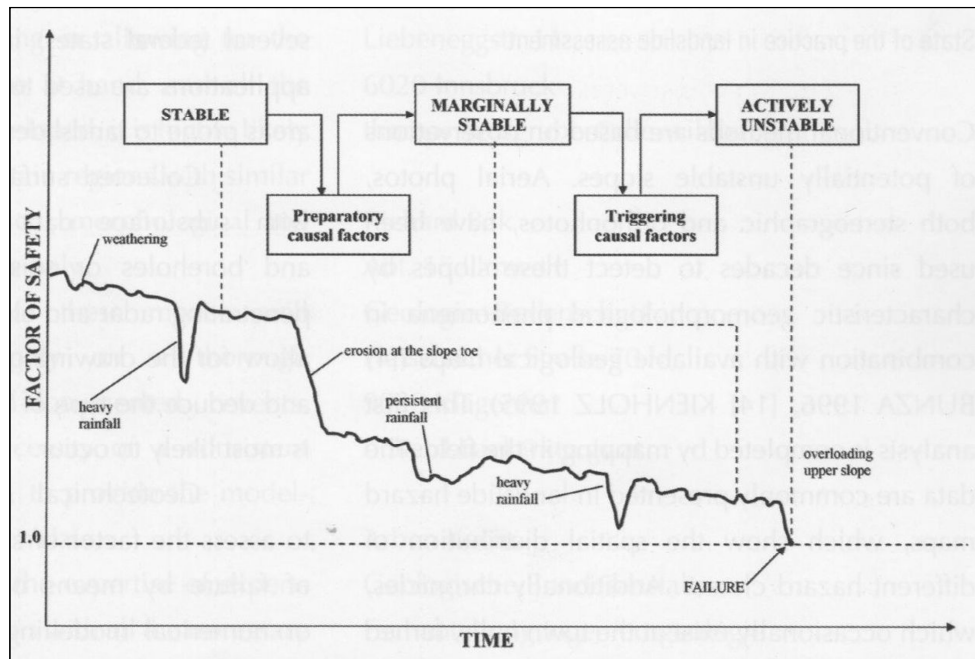


Abb. 1 Hangstabilität (Factor of Safety) Beispiel für die Veränderung der Sicherheit über die Zeit Quelle WL/WPLI (1994) in (Mölk *et al.*, 2011) S. 95.

2.3. Risikomanagement

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit Begriffen aus der Risiko- und Naturgefahrenforschung, die einerseits in der Literatur verschieden definiert und andererseits in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen unterschiedlich aufgefasst werden. Über die Entwicklung der Begriffe kann man auch den Sinnwandel des Risikobegriffs in der Forschung und in der Gesellschaft erkennen.

Risiko wurde in den verschiedensten Fachdisziplinen erforscht. Bis vor ein paar Jahren geschah dies sehr eigenständig und kaum im Austausch zwischen den unterschiedlichen Fachrichtungen. In den 1990er Jahren begann man das „Risiko“ interdisziplinär zu verstehen und als Risikomanagement weiter auf das „Mensch-Umwelt- System“ auszudehnen (VON ELVERFELDT *et al.*, 2008). Die vermehrte Wahrnehmung von „Risiko“ wird in der breiten Bevölkerung und in der Politik vor allem durch Medienberichte von Ereignissen und Schäden gefördert. Die folgenden Abschnitte gehen kurz auf den Risikobegriff ein und erläutern wichtige für diese Arbeit relevante Ausdrücke.

2.4. Naturereignis versus Naturgefahr

Der Begriff „Gefahr“ bezieht sich in den Naturwissenschaften auf ein Ereignis. Aber nicht jedes Naturereignis ist eine Gefahr. VON ELVERFELDT *et al.*, 2008 S. 31 definiert Naturereignis und Naturgefahr folgendermaßen: „*Natürliche Prozesse wie Erdbeben, Vulkanismus, Muren, Steinschläge, Lawinen etc. werden als **Naturereignis** angesehen, wenn sie keine Bedrohung für Menschen oder ihr Eigentum darstellen. Stellen sie eine Bedrohung für Gesellschaftssysteme dar, werden sie als **Naturgefahren** bezeichnet*“.

Es gibt zahlreiche Definitionen des Begriffs „Risiko“. Sei es in der Finanzwelt als Gegenbegriff von „Chance“ oder in der Ingenieurwissenschaft als Gegenbegriff von „Sicherheit“. Bei der Definition der Vereinten Nationen aus der „International Strategy for Disaster Reduction“ wurde versucht verschiedene Forschungstraditionen mit zu berücksichtigen.

2.4.1. Risiko

“The probability of harmful consequences or expected losses (deaths, injuries, property, livelihoods, economic activity disrupted or environment damaged) resulting from interactions between natural or human - induced hazards and vulnerable conditions.

*Conventionally risk is expressed by the notation **Risk = Hazards x Vulnerability**. Some disciplines also include the concept of exposure to refer particularly to the physical aspects of vulnerability...”*

Diese Formel ist die einfachste Form der Berechnung von Risiko und eignet sich gut für naturwissenschaftliche Fragestellungen, die sich physikalisch berechnen lassen.

Die oben erwähnte Gleichung, als Aneinanderreihung von Faktoren wurde erweitert und als Funktion dargestellt, um zu zeigen, dass die einzelnen Risikoelemente sich nicht so einfach in eine Dimension pressen lassen und die Risikoelemente verschieden auf unterschiedliche Begebenheiten in einem komplexen System reagieren können. So beschreibt VON ELVERFELDT *et al.*, 2008 die Risikogleichung als Funktion:

$$\text{Risiko} = f(H,C)$$

H = Naturgefahr

C = Konsequenzen

Risiko ist eine Funktion aus Naturgefahr (hazard) und den daraus resultierenden Konsequenzen (consequences) (VON ELVERFELDT *et al.*, 2008, S. 37).

Dabei wird Risiko definiert als zu erwartende Todesfälle oder Verletzte, aber auch bauliche, ökonomische Schäden, wie Einbußen in der ökonomischen Produktivität (zum Beispiel Firmen, die ihre Waren wegen einer unterbrochenen Straße nicht ausliefern können). **Naturgefahr** „ist die

Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines potentiell schadenbringenden Ereignisses zu einer spezifischen Zeit, an einem bestimmten Ort und mit einer vorgegebenen Stärke.“ (GLADE und DIKAU, 2001, S. 43). **Konsequenzen sind Kausalitäten**, „die sich aus dem Schadenspotential der betroffenen Risikoelemente (zum Beispiel maximaler ökonomischer Wert), sowie deren **Vulnerabilität** zusammensetzen.“ (VON ELVERFELDT et al. 2008).

2.4.2. Vulnerabilität und Frequenz

Aus naturwissenschaftlicher Sicht versteht man unter **Vulnerabilität** den Erwartungswert eines Schadens in Bezug zur Intensität des Ereignisses. Mit anderen Worten formuliert, bedeutet Vulnerabilität, die Wahrscheinlichkeit, dass mit einem Naturereignis einer bestimmten Stärke die komplette Zerstörung des Risikoelementes (zum Beispiel Menschenleben oder Unbewohnbarkeit eines Hauses) eintritt.

Ein weiterer Begriff in diesem Zusammenhang ist die **Frequenz**, also die Häufigkeit, wie oft ein bestimmtes Schadensausmaß in welcher Stärke (Magnitude) zu erwarten ist. Der Wert aus der oben aufgeführten Formel wird in Form von Todesfallwahrscheinlichkeiten oder monetärem Wert pro Jahr ausgedrückt. VON ELVERFELDT et al., 2008 unterstreicht, dass die Gleichung relativ leicht zu berechnen ist, diese aber die „soziale Verantwortung“ außer Acht lässt. Hier beginnt die Notwendigkeit, der interdisziplinären Zusammenarbeit, denn Risiko ist immer auch direkt mit der Gesellschaft verknüpft. Tabelle 3 zeigt einen möglichen Weg, wie die unterschiedlichen Disziplinen mit Risiko-Fragestellungen umgehen und welche Rolle sie bei Entscheidungsfragen einnehmen. Die Risikoanalyse konzentriert sich darauf, Prozesse zu untersuchen und Risikoelemente zu quantifizieren. Die Risikobewertung beschäftigt sich mit der Frage „Was darf passieren?“ und setzt sich mit der Risikowahrnehmung und – Akzeptanz auseinander. Das Risikomanagement ist transdisziplinär angelegt und schließt alle Prozesse mit ein. Im Rahmen des Risikomanagements wird nach Lösungen gesucht, um das Risiko zu minimieren.

Tab. 3 Teilschritte der Risikobetrachtung ergänzt aus (STÖTTER und ZISCHG, 2008) nach (CROZIER und GLADE, 2005) (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2002).

Baustein	Frage	Konkrete Schritte	Wissenschaftl. Heimat
Risikoanalyse	Was kann passieren?	Gefahren identifizieren Prozesse/Ereignisse abschätzen Schadenspotential ermitteln Auswirkungen abschätzen	Naturwissenschaften
Risikobewertung	Was darf passieren?	Mit anderen Risiken vergleichen Mit Nutzen vergleichen an Wertsystemen messen über Akzeptierbarkeit entscheiden	Sozialwissenschaften
Risikomanagement	Was ist zu tun?	Zielsetzungen festlegen Lösungskonzepte entwickeln Maßnahmen planen Lösungen umsetzen	Transdisziplinär

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Risikoanalyse, die den Naturwissenschaften zugeordnet wird. Ein Produkt daraus ist die Gefahrenhinweiskarte.

2.5. Gefahrenhinweiskarten

Gefahrenhinweiskarten (Gefährdungskarten, Suszeptibilitätskarten) zeigen auf, wo gravitative Massenbewegungen auftreten können. Sie basieren auf geowissenschaftlichen Grundlagen und Modellrechnungen und schließen Informationen zur Intensität aus. (BÄK *et al.*, 2011). Sie sind rechtlich nicht bindend. Als Ziel einer Gefahrenhinweiskarte sollte das Maximum der Rutschungen in der höchsten Gefährdungsklasse liegen, aber gleichzeitig sollte die ausgewiesene, gefährdete Fläche so klein wie möglich sein (FELL *et al.*, 2008).

Die **Gefahrenkarte** steht über der Gefahrenhinweiskarte und ist nicht mit jener zu verwechseln. Sie gibt detaillierte Informationen zur räumlichen Ausdehnung, Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit. Sie dient als Grundlage für das Ausweisen von Gefahrenzonen und für die Festlegung von Nutzungsaufgaben (FELL *et al.*, 2008).

In Österreich sind Gefahrenzonenpläne durch einen Verfassungsgerichtsentscheid als „flächenhafte Gutachten mit Prognosecharakter“ zu verstehen und erst nach dem Eintrag in den Flächenwidmungsplan rechtswirksam (SCHMID, 2011).

Für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten gibt es einige Modelle und Methoden, die hier kurz vorgestellt werden. Davor aber wird auf einige Grundannahmen hingewiesen, welche vor der Arbeit mit Massenbewegungen angenommen werden müssen.

Ein Leitsatz, der wesentlich für alle Methoden ist, lautet: „The past is the key to the future“ ((VARNES, 1984); (CARRARA *et al.*, 1991); (HUTCHINSON, 1995)). Ein Gebiet, welches einmal instabil war, neigt dazu wieder instabil zu werden. Weitere Grundannahmen für die Gefahrenforschung haben GUZZETTI *et al.*, 1999 und GUZZETTI, 2005 zusammengetragen. Die erste Annahme konstatiert, dass Rutschungen „Zeichen“, hinterlassen, die im Gelände oder auf Orthofotos festgemacht werden können. In manchen Aufsätzen spricht man von „Stummen Zeugen“ (RUDOLF-MIKLAU, 2011). Bei Massenbewegungen sind diese Zeichen meist morphologischer Natur. Zweitens können Experten Massenbewegungen durch ihre „morphologische Handschrift“ bestimmten Gruppen zuordnen und drittens entstehen Massenbewegungen niemals zufällig. Sie sind Teil eines komplexen Systems und unterliegen physikalischen (deterministischen) Prozessen (GUZZETTI *et al.*, 1999).

Die meisten Ansätze gehen von einem kartierten Grundinventar aus. Dabei weisen GUZZETTI, 2005 und ARDIZZONE *et al.*, 2002 darauf hin, wie sehr sich die Kartierung von verschiedenen Experten unterscheiden.

Welche Methode verwendet wird, hängt entscheidend davon ab, welche Daten schon vorhanden sind, wie viel die Anschaffung zusätzlicher Daten kostet, auf welcher Skala die Untersuchungen stattfinden und welche Art von Ergebnis erzielt werden soll. Darüber hinaus spielen bei der Auswahl des Verfahrens geologische, geomorphologische, sowie tektonische und

morphogenetische Eigenschaften von Massenbewegungen eine Rolle. Die Verfügbarkeit von Software und Hardware beeinflusst nicht zuletzt auch die Wahl des Ansatzes. (JEMEC und KOMAC, 2011; VAN WESTEN, 1993).

Wiederum lassen sich die Methoden nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Einerseits in qualitative und quantitative Methoden und andererseits in direkte und indirekte Methoden. Qualitative Methoden sind subjektiv und geben Gefährdung in einfachen, deskriptiven Termen (wie zum Beispiel Gefährdung *gering, mäßig, stark*) wieder. Quantitative Methoden geben numerische Werte an. Die direkte Methode beschreibt die Aufnahme der Ereignisse im Gelände, bei der indirekten erfolgt die Aufnahme meist aus Orthofotos oder Satellitenbildern. Die Eignung der jeweiligen Methoden ist zudem skalenabhängig (GLADE und CROZIER, 2005).

Im nächsten Kapitel werden Ansätze zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten vorgestellt, die in der Literatur häufig zur Anwendung kommen.

2.5.1. Geomorphologische Kartierung

Die geomorphologische Kartierung ist eine direkte und wie die Heuristische Analyse (vgl. übernächster Abschnitt) eine qualitative Methode. Unter einer direkten Methode versteht man, dass Ereignisse direkt im Gelände von Experten aufgenommen werden. Der Experte stellt die Ereignisse im Gesamtzusammenhang der Umgebung dar, hält die Ergebnisse in Kartenform fest und beschreibt die dazugehörigen Prozesse.

2.5.2. Inventaranalysen

Anhand eines umfassenden Aufnahmekataloges werden gravitative Massenbewegungen erfasst und Informationen zu deren zeitlichen und räumlichen Verteilung mit aufgenommen. Sie sind die Basis der meisten Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Je genauer die Angaben zum Ereigniszeitpunkt, der Art der Massenbewegung und die genaue Abgrenzung im Gelände sind, desto mehr Auswertungsoptionen hat man bei späteren Analysen (JEMEC und KOMAC, 2011).

Diese Methode versucht aus vergangenen Ereignissen direkt auf künftige zu schließen. Aus der Dichte und Größe der kartierten Ereignisse werden die Eigenschaften bewertet und für künftige angewandt. Das Ergebnis wird als Eintrittswahrscheinlichkeit angegeben. Der Modellinput ist indirekt und das Resultat quantitativ. (GUZZETTI, 2005, S.120). Bei der Erstellung von Inventaren können unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Ein Beispiel hat ARDIZZONE *et al.*, 2002 publiziert, wo drei Teams von Geomorphologen je ein Inventar erstellten und dabei große Abweichungen festgestellt wurden.

2.5.3. Heuristischer Ansatz

Bei dieser Methode handelt es sich um einen qualitativen Ansatz. Dabei steht das Expertenwissen im Zentrum. Basierend auf dem Inventar (zum Beispiel Rutschungen) erstellen die Experten eine Liste von möglichen vorbereitenden und auslösenden Faktoren. Diese werden einzeln betrachtet und nach einem speziellen Bewertungssystem gewichtet. In der Zusammenschau aller gewichteten Faktoren ergibt sich ein Gefährdungswert. RUFF, 2005 verfolgte diesen Ansatz für seine Arbeit in Vorarlberg sehr umfassend und fundiert. VAN WESTEN *et al.*, 1997 schreibt einer qualitativen Einschätzung, wenn sie denn von einem Experten stammt, eine bedeutende Rolle zu. Diese hat jedoch den Nachteil, dass der Weg zur Entscheidungsfindung nicht genau nachvollzogen werden kann.

2.5.4. Deterministische Ansätze

Neben der statistischen Analyse werden in vielen Arbeiten deterministische Ansätze verwendet. Diese beziehen sich auf hydrologische Modellierungen und Hanginstabilitätsmodelle, die auf physikalischen Gesetzen beruhen, welche die Stabilität eines Hanges beeinflussen. Diese Methode wird für spezielle Fragestellungen einer jeweils bestimmten Art von Rutschung herangezogen. Oder es werden mittels Niederschlagsdaten beziehungsweise mittels Daten von Erdbeben mögliche Auslöseszenarien modelliert. Diese Form von Modellierung wird vorwiegend für geotechnische Fragen angewandt (GUZZETTI, 2005). Dabei geht es meist um den „Factor of Safety (FoS)“, der die Berechnung der Standsicherheit eines Hanges oder von Hängen eines Gebietes angibt, wie teilweise schon am Anfang des Kapitels erwähnt wurde.

FELL *et al.*, 2008 kritisiert an dieser Methode, dass geologische und geotechnische Modelle zu stark vereinfacht würden und weist auf Schwierigkeiten im Modellieren des hydrologischen Systems hin. Die Beziehung von Grundwasserporendruck zu Niederschlag und Schneeschmelze ist hoch komplex und selten in einem guten Modell reproduzierbar.

2.5.5. Statistische Analysen

Die statistische Analyse ist die am häufigsten eingesetzte Methode. Sie arbeitet quantitativ und kann sowohl quantitative, als auch qualitative Ergebnisse erzielen. Dabei kommen unterschiedliche statistische Methoden zum Einsatz. Diese Methoden eignen sich besonders im Zusammenhang mit Geoinformationssystemen (GIS). Rechnerleistungen wurden in den letzten Jahren immer besser, sodass auch größere Gebiete analysiert werden können. Als Basis steht immer das Rutschungsinventar unter der Annahme, dass vergangene Massenbewegungen in Zukunft unter gleichen Bedingungen wiederkehren (GUZZETTI, 2005).

Neben dem Kartieren der Rutschungen werden weitere Faktoren erfasst und anschließend durch statistische Methoden in Beziehung gesetzt und ausgewertet. Diese Methode basiert auf rein mathematischen Konzepten und ist frei von subjektiven Eingriffen des Forschers, birgt jedoch den

Nachteil, dass das Resultat wesentlich von der Qualität der Kartierungen und Inputvariablen, aber auch von Kartierungsfehlern abhängt. FELL *et al.*, 2008 fügt hinzu, dass die Resultate nicht auf eine andere Region übertragen werden können. VAN WESTEN, 2007 oder auch LEGORRETA PAULIN *et al.*, 2010 zeigen in ihren Arbeiten, welche Unterschiede durch verschiedene Auflösungen der Grundlagen (Eingangsdaten) wie zum Beispiel das DGM und auch deren Auswertemethoden erzielt werden. ARDIZZONE *et al.*, 2002 beschreibt im Vergleich dazu (wie oben schon erwähnt) die unterschiedlichen Kartierungsweisen von verschiedenen Arbeitsgruppen in der Geomorphologie .

2.6. Modellvalidierung

Validierung ist nach CHUNG und FABBRI, 2003 unerlässlich für jedes Modell und wird bis dato nicht immer angewandt. Die Validierung eines Modells hat den Zweck, das erstellte Modell zu beurteilen, dessen Güte zu bewerten und auch zu zeigen, wie viel Erklärungsanteil das Modell bietet. Dies führt meistens zu einer Aufteilung des Datensatzes in einen Test- und einen Trainingsdatensatz. Die beiden getrennten Datensätze müssen voneinander unabhängig sein.

2.6.1. Zeitliche Differenzierung

Der Datensatz mit den kartierten Massenbewegungen wird aufgeteilt in zwei Zeiträume (Zeitscheiben). Die älteren Daten werden als Trainingsdatensatz genutzt, um das Modell aufzubauen und die jüngeren Daten werden zum Testdatensatz, um die Güte des Modells zu bestimmen, indem im Testdatensatz untersucht wird, wie groß der tatsächliche Rutschungsanteil in der höchsten Klasse ist. Die zeitliche Aufteilung der Datensätze lässt sich nicht immer umsetzen, da oft keine genaue zeitliche Abgrenzung der Ereignisse durchgeführt werden kann, beziehungsweise die Datenlage schon zu klein ist um noch eine Unterteilung vornehmen zu können. Unter den Validierungsmethoden ist diese als die Beste anzusehen, da hier der zeitliche Aspekt dem Satz „The past is the key to the future“ am nächsten kommt und diese je nach Kenntnisstand des Auftretens mit konkreten Ereignissen in Zusammenhang gebracht werden kann. Hierzu gibt es wenige Arbeiten, die diese Methode wählten, wie zum Beispiel GUZZETTI *et al.*, 2006.

2.6.2. Räumliche Differenzierung

Diese Methode verfährt gleich wie die zeitliche Validierung mit dem Unterschied, dass der Datensatz räumlich unterteilt wird. Wichtig ist, dass in beiden Regionen ähnliche Bedingungen herrschen. CARRARA *et al.*, 2008 steht dieser Methode kritisch gegenüber. Denn bei einer räumlichen Aufteilung muss die Verteilung der Modellinputparameter sehr genau zusammenpassen. Dies bedeutet, dass in Bereichen wo zum Beispiel eine spezifische lithologische Einheit vorkommt und welche allenfalls auch Rutschtendenzen aufweist, diese auch im anderen Testgebiet mit einer ähnlichen Gewichtung vorhanden sein soll.

2.6.3. Zufällige Differenzierung

Dieses Verfahren entspricht den beiden oben erwähnten Verfahren in ihrem Ablauf, mit dem Unterschied, dass zweimal oder mehrmals eine gewisse Anzahl an zufallsverteilten Punkten aus demselben Gebiet ausgewählt und miteinander verglichen werden. Das heißt, aus der gleichen Grundmenge werden zufallsverteilte Punkte ausgewählt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass dieses Verfahren unzählige Male wiederholt und dadurch auch statistisch eine Aussage über die Qualität der Auswahl gemacht werden kann.

Für diese Arbeit wurde die zufällige Validierungsmethode gewählt, da die Rutschungen erst im Rahmen dieses Projekts kartiert wurden und keine Informationen zum Ereignis selbst verfügbar sind. Eine räumliche Unterteilung macht in diesem sehr heterogenen Gebiet keinen Sinn, wie im folgenden Kapitel genauer erläutert wird.

3. METHODEN

Die Methoden und der praktische Teil lassen sich in drei Gruppen gliedern. Jeder Schritt beinhaltet seine eigene Qualitätskontrolle, dargestellt in Abbildung 2.

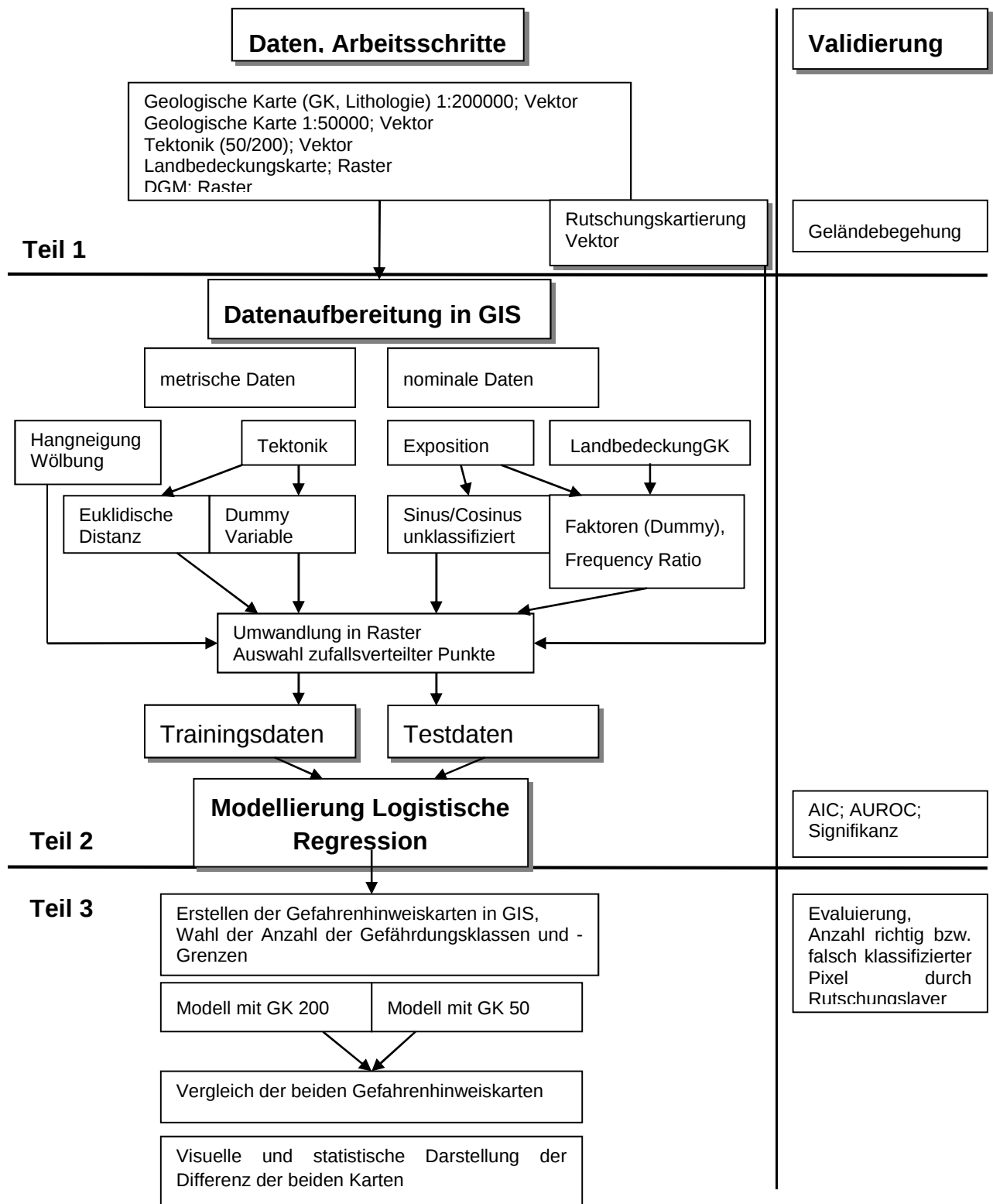


Abb. 2 Ablaufschema der Modellierung mit drei Validierungsszenarien.

Zum einen wird die Datenerhebung beziehungsweise die Kartierung der Rutschereignisse besprochen. Als zweiter Punkt wird die statistische Modellierung mittels logistischer Regression mit ihren statistischen Gütekriterien vorgestellt. Im dritten Teil werden die Gefahrenhinweiskarte und deren Qualitätsangaben erläutert, worauf jeweils in den Ergebnissen beziehungsweise in der Diskussion näher eingegangen wird. Abbildung 2 gibt einen Überblick über den gesamten Ablauf der praktischen Arbeit.

3.1. Rutschungskartierung

Die Kartierung der Rutschungen basiert auf Derivaten aus dem Digitalen Geländemodell (DGM). Hillshades wurden unter Verwendung des „Spatial Analyst“ der Software ESRI GIS in den Beleuchtungswinkeln von 45°, 135°, 225° und 315°, also in einem Abstand von 90° berechnet. Diese Beleuchtungswinkel ermöglichen das Betrachten der Morphologie aus verschiedenen Perspektiven und vermeiden das Übersehen von im Schatten liegenden Flächen. Feinere Einstellungen in den Eigenschaften zum Beispiel das Verändern der Standardabweichung lässt einen silbermetallischen Eindruck erzeugen und glättet Sprünge in den Helligkeiten etwas ab. Auch eine inverse Darstellung kann über Unsicherheiten hinweg helfen.

Die Auflösung der Hillshades wurde für die Kartierung bewusst bei einem Meter belassen. Kartierungsmaßstab (Zoom) bei maximal 1:1800.

Es wurde das gesamte Gebiet nach gravitativen Massenbewegungen mit Ausnahme von Steinschlag abgesucht und deren Umrisse digitalisiert (vom Anriss- bis und mit Auslaufbereich). Es wurde weder zwischen verschiedenen Rutschungstypen (Rotations- respektive Translationsrutschungen, flach- oder tiefgründig), noch nach Mutmaßungen zu sehr alten, möglicherweise heute nicht mehr direkt relevanten Rutschungen unterschieden.

Ein Orthofoto aus dem Jahre 2003 stand ebenfalls zur Verfügung. Zwar ist durch die Vegetation der Blick auf die Morphologie oftmals versperrt, jedoch werden kleine fast unscheinbare flachgründige Ereignisse durch Anrisse in der Grasnarbe sichtbar. Es wurde versucht, die Ereignisse einzeln und nicht mehrere Rutschungen durch Verschachtelungen in einem Polygon zu erfassen.

3.2. Logistische Regression

Ein gutes Modell hat mindestens drei Kriterien zu erfüllen: „...its adequacy (conceptual and mathematical) in describing the system behaviour, its robustness to small changes of the input data (i.e. data sensitivity), and its accuracy in predicting the observe data“ (FRATTINI *et al.*, 2010 S. 62). Als das wichtigste Kriterium befindet FRATTINI *et al.*, 2010, die Treffsicherheit (accuracy), indem man die Modellresultate mit den beobachteten Werten vergleicht.

Die in dieser Arbeit angewandte Methode, wird gerade in der Modellierung von Massenbewegungen sehr häufig angewandt. Wesentlich zur Popularität dieser Methode

beigetragen hat die Arbeit von CHUNG und FABBRI, 2005, wie auch jene von DAI et al., 2002 und DAI et al., 2004.

Für die vorliegende Studie wurde die logistische Regression gewählt, sowie zur Gewichtung von kategorischen Datensätzen auf die Frequency Ratio zurückgegriffen. In den folgenden Kapiteln wird zunächst der mathematisch theoretische Hintergrund erläutert. Anschließend wird die Datenaufbereitung in ESRI ArcGIS 9.3.1. sowie die Modellierung in R (Version 2.11.1) besprochen. Schließlich wird die Klassifizierung und Erstellung der Gefahrenhinweiskarte, welche wiederum in ArcGIS erstellt wurde, vorgestellt. Das für die logistische Regression in „R“ verwendete Package stammt von Alexander Brenning, Universität Waterloo, Kanada, welches hier am Institut zur Verfügung stand.

Die logistische Regression bietet die Möglichkeit, kontinuierliche, binäre und kategoriale Variablen gleichzeitig zu verwenden (GUZZETTI, 2005). Diese Methode eignet sich gut, weil die Wahrscheinlichkeiten auf Rasterbasis in einem GIS System berechnet werden können.

Bei der multiplen logistischen Regression wird die Beziehung zwischen einer binären abhängigen Variable und einer Anzahl von unabhängigen erklärenden Variablen analysiert. Die abhängige Variable Y steht in diesem Falle für das Vorhandensein ($Y=1$) einer Massenbewegung und respektive das Nicht-Vorhandensein einer Massenbewegung ($Y=0$). Dies bedeutet einen Vorteil gegenüber anderen multivariaten Statistikmethoden, da die abhängige Variable nur zwei Werte (0 und 1) annehmen kann (DAI et al., 2001).

Im Ergebnis erhält man die Wahrscheinlichkeit, die für jedes Pixel (Punkt) im Untersuchungsgebiet den Wert zwischen 0 und 1 (beziehungsweise 0% und 100%) angibt (HOSMER und LEMESHOW, 2000).

$$P(Y_i = 1) = \frac{e^{Z_i}}{1 + e^{Z_i}} = \frac{1}{1 + e^{-Z_i}} \quad (2)$$

Z hat den Wertebereich von $-\infty$ bis $+\infty$, die Wahrscheinlichkeit P variiert von 0 bis 1 ausgedrückt in einem S-förmigen Graphen. „ e “ definiert die Eulersche Zahl. (Formel 2). Der Logit der multiplen Regression wird wie folgt ausgedrückt.

$$Z_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m, i = 1, \dots, N \quad (3)$$

In Formel 3 beschreibt Z die lineare Kombination und „ m “ definiert die unabhängigen Variablen (zum Beispiel Hangneigung, Exposition, Wölbung etc.) mit dem Vektor „ X “. Vorausgesetzt wird ein Skalenniveau von mindestens intervallskalierten Daten. Die Regressionskonstante wird als β_0 definiert.

Gibt es Daten, welche unterhalb diesem Skalenniveau liegen, werden diese durch „Dummy Variablen“ ersetzt. Dummy Variablen definieren eine wahr/falsch Situation und teilen den Datensatz in 0 für falsch (oder nicht vorhanden) beziehungsweise in 1 für wahr ein. Nach dieser Umwandlung werden diese Dummy Variablen in die Gleichung eingesetzt. Man beachte, dass für jede Klasse eine eigene Dummy Variable erstellt werden muss.

Nun werden die einzelnen Parameter in der Praxis angewendet und in R in ein *generalised linear model* (GLM) eingestzt:

```
sact2n= glm(ru3 ~Hangneigung+Exposition+Wölbung+Tektonik+Landbedeckung, data =
train, family = binomial)

summary(sact2n) (4)
```

„ru3“ definiert die abhängige Variable und alle weiteren die unabhängigen Variablen. Data = train bedeutet, dass sich diese Formel auf den Trainingsdatensatz bezieht. Durch die Summary bekommt man die statistischen Werte, die für die Regressionsgleichung einzusetzen sind, sowie den AIC Wert und die jeweilige Signifikanz. Der Regressionskoeffizient misst den Einfluss der unabhängigen Variablen auf die Zielvariable, in diesem Fall die Rutschung.

Der AIC Wert (Akaike Information Criterion) eignet sich für den Vergleich von verschiedenen Modellen. Je kleiner der Wert, umso besser das Modell. Wenn die Zahl der erklärenden Variablen zu hoch wird, steigt der AIC Wert, d.h. der AIC „bestraft“ die Anzahl der Parameter (BRENNING, 2005). Um die Qualität des Modells an sich zu bewerten, wird in der Regel die sogenannte „Area under ROC Curve“ (AUROC) herangezogen. Die Receiver Operating Characteristic (ROC) berechnet die Sensitivität (Richtig-Positiv-Rate) und Spezifität (Falsch- Positiv-Rate). Eine ROC-Kurve hat einen Wertebereich zwischen 0,5 und 1. Die Werte um 0,5 und nahe bei 1 deuten auf ein zufälliges Ergebnis hin. In der Literatur werden für Rutschungsmodellierungen AUROC Werte über 0,6 und unter 0,9 präsentiert. Die genauen statistischen Zusammenhänge werden unter HOSMER und LEMESHOW, 2000 umfassend erläutert. Sowohl für Test- und Trainingsdatensatz wird der AUROC-Wert berechnet, das heißt eine zufällige Kreuzvalidierung durchgeführt. In dieser Arbeit werden für die Modellierung je 500 Punkte für Rutschungen und Nicht-Rutschungen zufällig ausgewählt. Für den Testdatensatz wird das gleiche Verfahren wiederholt.

In R werden die Modelle für die Testdatensätze erstellt und geprüft, ob die Inputparameter signifikant sind. In einer Tabelle werden dann die Regressionswerte und ihre statistischen Gütemaße, wie der Standardfehler und die Signifikanz ausgewiesen. Das Modell greift in einem weiteren Schritt auf die Testdatensätze zu und rechnet den AUROC-Wert sowohl für Test- als auch für Trainingsdatensätze aus.

3.3. Frequency Ratio

Diese Methode kann als eigenständige Methode zum Modellieren von Gefahrenhinweiskarten verwendet werden, oder wie hier für diese Arbeit als Teil davon. BAI *et al.*, 2009, LEE und DAN, 2005 sowie OH *et al.*, 2009 beschreiben diese Methode eingehend. Die „frequency ratio“ basiert auf der Beziehung zwischen einem Faktor und dem Vorhandensein einer Rutschung, d.h. aus dem Rutschungsdatensatz werden die betroffenen Eigenschaften der Einflussfaktoren (zum Beispiel Hangneigung, Exposition, Wölbung etc.) abgeleitet (LEE und DAN, 2005) oder einfach durch eine Formel (5) ausgedrückt:

$$\text{Rutschungsdichte} = \frac{B_i}{A_i} / \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{A_i} \quad (5)$$

Wobei A_i die Fläche eines bestimmten Parameters, B_i die Rutschungsfläche des i -ten Parameter, und N die Anzahl der Parameter ist.

Nimmt die Frequency Ratio den Wert 1 an, so ergibt sich kein Zusammenhang; weder im Rutschungsgebiet, noch in der rutschungsfreien Zone dominiert ein Faktor. Liegt der Wert >1 , zeigt dieser einen positiven Zusammenhang mit Rutschungen. Ein Wert <1 zeigt entsprechend, dass der Einfluss auf die Rutschungstendenz kleiner ist.

Um den Landslide Susceptibility Index zu berechnen, summiert man alle Frequency Ratio Ergebnisse jedes Parameters im Trainingsdatensatz auf und validiert danach die Ergebnisse im Testdatensatz mittels der AUROC-Werte, wie ausführlicher beschrieben in LEE und DAN, 2005.

Es ist eine sehr einfache Methode, die auch schnell einen Überblick über die Situation im Gelände verschafft. CARRARA, 1983 nennt dies „Previous knowledge of landslide susceptibility“ (zitiert in BAI *et al.*, 2009). Sie ist ein gutes Mittel, die vielen Dummy Variablen der nicht metrischen Datensätze zu vermeiden. Denn wie bei der logistischen Regression erwähnt, straft der AIC-Wert zu viele Eingabeparameter. Diese Methode kann aber auch, je nach Fragestellung ganz bewusst den Fokus auf einzelne thematische Einheiten legen und als einzelne Information ins Modell einfließen wie in GUZZETTI *et al.*, 2006 beschrieben.

3.4. Klassifizierung der Gefahrenhinweiskarte

FELL *et al.*, 2008 beschreibt das Hauptziel einer guten Klassifizierung der Gefahrenhinweiskarte folgendermaßen: Die höchste Gefährdungsklasse soll das Maximum an Rutschungspixel enthalten, aber gleichzeitig soll diese Fläche möglichst klein sein.

Welche Klassenanzahl für eine Gefahrenhinweiskarte sinnvoll ist, hängt in erster Linie vom Nutzer ab. In der Wissenschaft gibt es eine Fülle von Möglichkeiten von möglichst vielen Klassen bis hin zu

keinen Klassengrenzen. Denn die Wahl der Klasseneinteilung (Quantile, Standardabweichung, Natural breaks etc.) beeinflusst wiederum das Ergebnis. BAI *et al.*, 2009 wandte die Standardabweichung an und generierte daraus 5 Klassen. OH *et al.*, 2009 ermittelte 5 Klassen mit je gleichem Flächenanteil. DAI *et al.*, 2001 erwähnte keine statistische Methode der Klassenbildung, die Werte sind jedoch aufgeführt. Dies wird bei BELL, 2007 unter der Expertenmeinung eingeordnet, also wo die Wissenschaftler auf ihren Erfahrungsschatz zurückgegriffen haben. Die Nutzer in Raumplanung, Politik oder Betroffene selbst können mit reinen Wahrscheinlichkeitsangaben sehr wenig anfangen. Diese interessiert, ob ein Haus gebaut werden darf, oder ein geologisches Gutachten eingeholt werden muss, oder ob keine Maßnahmen ergriffen werden müssen. Die gerade erwähnten Argumente gilt es bei der Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte zu beachten und in den Prozess einzubauen.

3.5. Validierung der Ergebnisse in der Gefahrenhinweiskarte

Wird die Gefahrenhinweiskarte klassifiziert dargestellt, so ist diese einer erneuten Validierung zu unterziehen, da die in der Statistik ausgewiesenen (AUROC) Werte nicht mehr stimmen.

Um die fertige, also klassifizierte Gefahrenhinweiskarte zu validieren, wird diese nach FELL *et al.*, 2008 mit der ursprünglichen nicht klassifizierten Karte verschnitten und in Flächenprozent aufkumuliert. Dabei wird auf eine Graphik mit der Gefährdungswahrscheinlichkeit auf der x-Achse und der Flächenanteil in Prozent auf der y-Achse eingetragen.

3.6. Geomorphologische Güte

Dieser Ansatz setzt sich damit auseinander, wie gut die finale Gefahrenhinweiskarte tatsächlich ist. Wie oben erwähnt, wird für verschiedene Zwecke, wie für Behörden, Betroffene etc. die Gefährdung mit mehr oder weniger Klassen ausgewiesen. In BELL, 2007 wird die geomorphologische Güte ausführlich beschrieben. Der Ansatz untersucht die qualitativen Anforderungen an die Ergebnisse einer Gefahrenhinweiskarte und unterscheidet zwischen sehr geringer bis sehr hohe Qualität. Wo Hangrutschungen stattgefunden haben und eine geringe Gefährdung prognostiziert wird, ist die geomorphologische Güte gering. Ebenso, wenn in flachen Gebieten hohe Gefährdungen ausgewiesen werden. Dies kann auch bedeuten, dass das beste statistische Modell mit den besten AIC- und AUROC-Werten nicht unbedingt der besten geomorphologischen Güte entspricht. Statistiker kritisieren an diesem Ansatz den Verlust an Objektivität und das Vermischen von statistischen und heuristischen Methoden.

4. DATEN UND DATENAUFBEREITUNG

Bei der Datenaufbereitung ist es unumgänglich die Auflösung und Projektion einheitlich zu machen und die Daten nach ihren Skalenniveaus weiter zu verarbeiten, wie es in der Abbildung 2 im Theorieteil aufgelistet ist. Der zweite Block vor der eigentlichen Modellierung in „R“ wird hier näher erläutert.

4.1. Basisdaten

Durch die Zusammenarbeit im MoNOE Projekt war viel an Datenmaterial bereits vorhanden, musste jedoch noch für die Modellierung aufbereitet werden (Tabelle 5). Einige benötigte Parameter ließen sich aus dem DGM ableiten und andere aus einem Vektordatensatz entnehmen. Für die Modellierung wurden alle Datensätze als Raster in einer Auflösung von zehn Metern aufbereitet.

Tab. 4 Ausgangsdaten für die Rutschungskartierung und die Modellierung.

Name	Inhalt	Format	Maßstab/ Auflösung	Projektion	Quelle	Anmerkung
lilife_dgm	Bezirk Lilienfeld	Raster, ESRI GRID	16251, 11001 (Cols and rows); 1m Auflösung	Bessel 1841 Tranverse Mercator	Land NÖ	Mosaik zu einem Datensatz für das Untersuchungsgebiet zusammengefasst.
sbbs_dgm	Bezirk Scheibbs	Raster, ESRI GRID	20970, 30066 (Cols and rows); 1m Auflösung	Bessel 1841 Tranverse Mercator	Land NÖ	
stp_dgm	Bezirk	Raster, ESRI GRID	7501, 15001 (Cols and rows); 1m Auflösung	Bessel 1841 Tranverse Mercator	Land NÖ	
geop	Geologische Karte Nr. 72 Blatt Mariazell	Vektor Shapefile, Polygon	1:50'000	MGI_Austria_GK_M34	GBA	Verwendung der geologischen Grundlagen mit Genehmigung der geologischen Bundesanstalt © GBA-2009-Zl. 383/1-09
tekt	Tektonik, GK Nr. 72 Blatt Mariazell	Vektor Shapefile; Linie	1:50'000	MGI_Austria_GK_M35	GBA	
geop_nied	Geologische Karte Niederösterreichs	Vektor Shapefile, Polygon	1:200'000	MGI_BMN_M34	GBA	
tekt_nied	Tektonik, Geologische Karte Niederösterreichs	Vektor Shapefile; Linie	1:200'000	MGI_BMN_M35	GBA	

lc_mariaz	Landbedeckungskarte 12 Klassen	Raster, ESRI GRID	4221, 6013; 10 m Grid	Bessel 1841 Tranverse Mercator	Joanneum Research	
of_mariaz 2003	Orthofoto	ECW File	84414, 120263, 0,25m Grid	MGI_BMN _M33	Land NÖ	
oek_s	ÖK 50 Situation	Raster, ESRI GRID	1:50'000	MGI_BMN _M34	Land NÖ	

4.2. Digitales Geländehöhenmodell (DGM) und entsprechende Derivate

Neben den geologischen Daten ist ein digitales Höhenmodell eine weitere unverzichtbare Datengrundlage für die Gefährdungsanalyse. Es beschreibt die Erdoberfläche ohne deren Bewuchs in Form eines Höhenrasters. In der Literatur werden die Begriffe Digitales Höhenmodell (DHM) und Digitales Geländemodell (DGM) als Synonyme verwendet. BARTELME, 2005 unterscheidet aber zwischen einem digitalen Höhenmodell und einem digitalen Geländemodell. Das DHM ist eine Menge von digital gespeicherten Höhenwerten (Punkte), welche die Höhenstruktur eines Objektes (beziehungsweise der Erdoberfläche), aber auch den Höhenwert eines Temperaturgradienten oder von Niederschlag wiedergeben kann. Bei einem DHM muss immer angegeben werden, um welchen Höhenwert es sich handelt. Das DGM hingegen enthält Informationen über das Gelände, Geländekanten und Bruchlinien und bezieht sich immer auf die topographischen Höhenwerte. Das in dieser Arbeit verwendete digitale Geländemodell (DGM) liegt im Original als GRID – Mosaic in 1m Auflösung vor, welches aus einer Airbone Laserscanning Befliegung entstanden ist und vom Land Niederösterreich zur Verfügung gestellt wurde (Abbildung 2). Aus drei Dateien (stp_dgm1, lilife_dgm1 und sbbs_dgm1) wurde das Gebiet ausgeschnitten und über „Raster Mosaik“ zu einer Datei zusammengefügt. Aus diesen Daten wurden die Hangneigung, die Exposition und die Wölbung für die Modellierung, sowie die Hillshades für die Kartierung generiert.

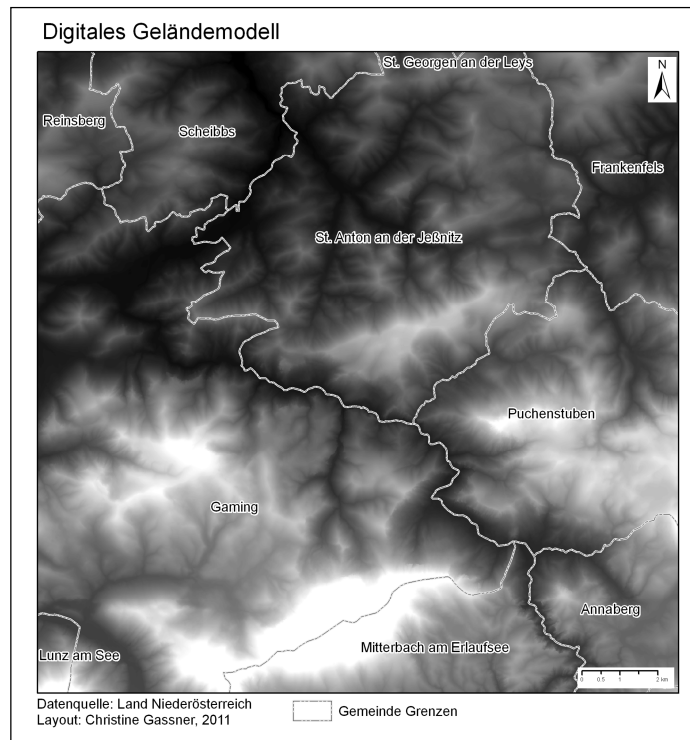


Abb. 3 Digitales Geländemodell 1m Auflösung, Datenquelle © Land Niederösterreich.

Das Hillshade ist für die visuelle Interpretation der allgemeinen topographischen Grundvoraussetzungen beziehungsweise für die Rutschungskartierung bestimmt und wird für die Modellierung nicht gebraucht. Die metrischen Daten, also Hangneigung und Wölbung können direkt und ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte ins Modell integriert werden.

4.2.1. Datenaufbereitung für die Rutschungskartierung

Für die Rutschungskartierung werden Orthofotos und vor allem verschiedenste Schummerungslayer (Hillshade) mit unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen verwendet. Während die Orthofotos einen Überblick über das Gelände und der Landnutzung geben, bietet die Schummerung Einblick auf die Oberflächenstruktur auch mit Vegetation bedeckter Gebiete. Das Hillshade beziehungsweise die Schummerung wird aus dem digitalen Geländehöhenmodell generiert. Für die Kartierung wurde auf Beleuchtungsrichtungen von 45°, 135° und 225° zurückgegriffen. Schatten werden aus einem anderen Beleuchtungswinkel belichtet, so dass alle Bereiche abgedeckt werden können.

4.2.2. Datenaufbereitung Exposition

Als einziger nichtmetrischer Datensatz generiert aus dem DGM brauchen die Expositionsdaten einen weiteren Bearbeitungsschritt. Da der Hangexposition zirkuläre Daten entsprechen (mit

Werten zwischen 0 und 360° und -1 für flache Gebiete), können diese Werte nicht direkt in die Modellierung eingeflochten werden. Es gibt in der Literatur verschiedene Herangehensweisen, wie man die Exposition gewichten kann. BORRADAILE, 2003 und BRENNING (2005) beschreiben einen Algorithmus, welcher die Werte in einen Nord- und einen Südteil teilt und mittels der Sinusfunktion auf Werte zwischen -1 und +1 bringt, während die Cosinus-Transformation eine Ost- West Exposition repräsentiert. LEE und DAN, 2005 klassifiziert die Werte in die acht Haupthimmelsrichtungen und gewichtet diese durch die Frequency Ratio. Um für die Frequency Ratio die Klassen bestimmen zu können, muss zuerst geklärt werden, wie die Software die Werte interpretiert (Uhrzeigersinn, Gegenuhrzeigersinn). ESRI teilt das Spektrum im Uhrzeigersinn ein (vgl. Abb. 4).

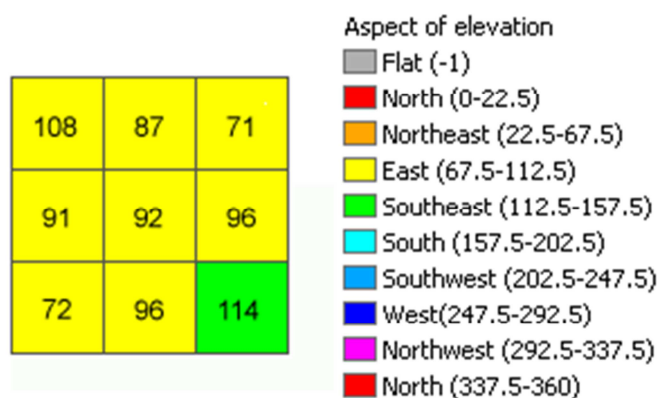


Abb. 4 Klassifizierung der Expositionsdaten (nach ESRI Help)

4.3. Landbedeckungsklassifikation

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Landbedeckung beziehungsweise die Landnutzung als Modellparameter einzubeziehen. Das Joanneum Research Institut hat eigens für das MoNOE Projekt Daten bereitgestellt. Diese Daten wurden mittels einer überwachten Klassifikation aus Satellitendaten (ASTER, Landsat TM, ALOS / AVNIR) gerechnet. Dabei wurden die einzelnen Bilddaten in Streifen über ganz Niederösterreich gelegt und miteinander verschnitten (mosaikiert). Die Satellitenaufnahmen stammen von verschiedenen Aufnahmezeitpunkten aus den Jahren 2007 und 2008. Anschließend wurden aus Orthofotos und Geländebegehungen Referenzgebiete festgelegt, welche die Grundlage für die semiautomatische Berechnung der Landbedeckung dienen. Es wurden zwölf Klassen festgelegt, ähnlich der Landbedeckungsgrundlagen des „Land Information System Austria“ (LISA) Projektes. Das LISA Projekt kann als Folgeprojekt zu den Corine Landcover Daten angesehen werden, mit dem Ziel räumlich und zeitlich höher aufgelöste Daten generieren zu können.

Dennoch sind in der Visualisierung einige Artefakte sichtbar. In der Modelleinzelparameterdarstellung ist das Bild zweigeteilt. In Abbildung 5 sind im Westen die Klassen gröber und mit einer höheren Gefährdung ausgedrückt als im Osten. Eine klare Trennlinie durchzieht das Bild dort, wo zwei verschiedene Aufnahmen aneinandergrenzen. Über die Genauigkeit der Landbedeckungsdaten liegen keine genaueren Informationen vor. Die Grundaufösung dieser Daten wird vom Joanneum mit 10m angegeben, im Vergleich zu den etwas älteren und frei zugänglichen Corine Landcover Daten mit 100m Auflösung eignen sich diese dementsprechend besser für kleinregionale Fragestellungen.

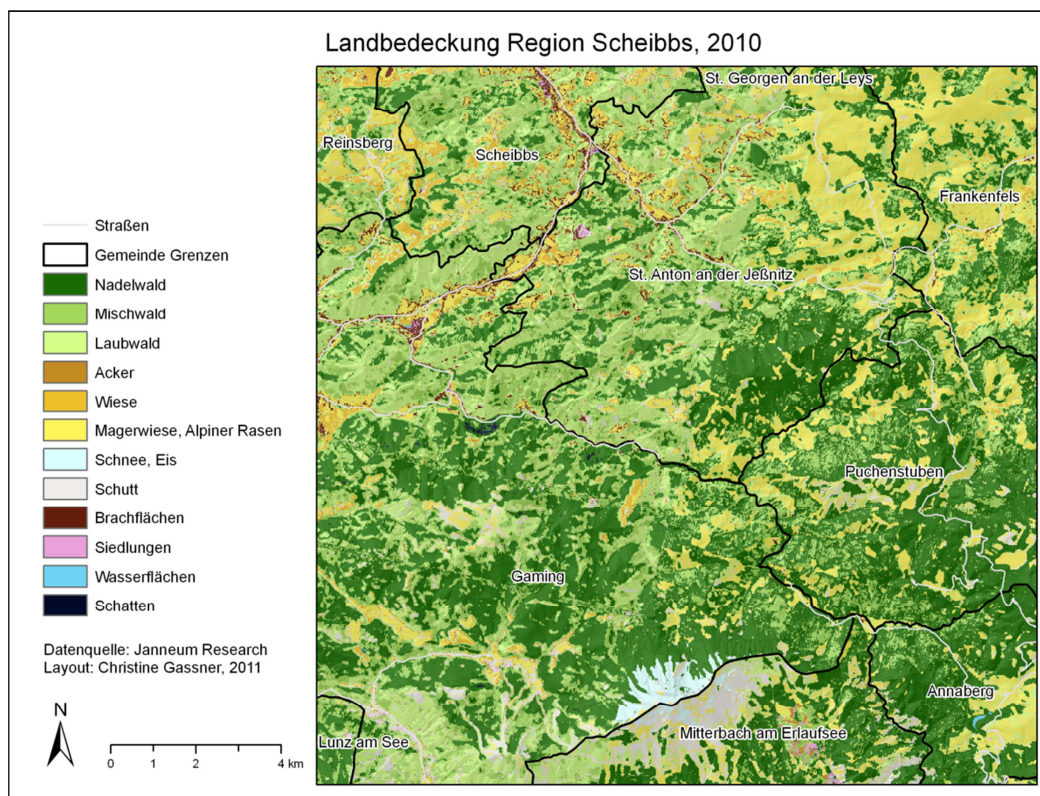


Abb. 5 Landbedeckungskarte Region Scheibbs, 2010 Datenquelle Joanneum Research.

4.4. Geologische Karten

In diesem Kapitel werden die Hintergründe der Entstehung von Geologischen Karten erläutert und im Zusammenhang mit anderen Produkten der Geologischen Bundesanstalt in Beziehung gesetzt. Im Kapitel Untersuchungsgebiet werden die eigentlichen geologischen Inhalte, die direkt im Zusammenhang mit den Analysen stehen, besprochen.

Geologische Landesaufnahmen und heutige Abdeckung

Seit über 150 Jahren wird die geologische Landschaft in Österreich durch die Geologische Bundesanstalt aufgenommen und in geologischen Karten publiziert. Seit 1977 wird die Geologische Landesaufnahme standardisiert in Spezialkarten als "Geologische Karte der Republik Österreich 1:50'000" herausgegeben. 2001 waren es ca. 30% der Fläche Österreichs, die in digitaler Form und im Maßstab 1:50'000 vorlagen und etwa die Hälfte in Printversion. Die Geologische Karte 1:200'000 (GK 200) deckte im Jahr 2000 etwa 50% ab. Vorhandene Karten werden laufend digitalisiert und laut Jahresbericht 2001 der GBA (2003), ältere, nicht mehr zeitgemäße Ausgaben durch eine neue Aufnahme verbessert. Bis jetzt sind rund Zweidrittel Österreichs abgedeckt. Die Plattform „GEOFaST“ trägt alle vorhandenen, sowohl neue, als auch archivierte Informationen zusammen. An Blatträndern kann es immer wieder zu unstimmigen Übergängen kommen, da keine zusätzlichen Geländebegehungen stattfinden und die Handschrift des Autors (vorerst) erhalten bleiben soll GBA (2003).

Die Erstellung einer geologischen Karte ist sehr aufwändig. Ein Geologe kartiert auf einer topologischen Karte im Maßstab 1:10'000 und überträgt diese in eine Manuskriptkarte im Maßstab 1:25'000. Er schafft im Gelände durchschnittlich 1-2km² pro Tag. Diese Geländebegehungen finden im Sommer statt. Dazu fließen Erkenntnisse aus Bohrungen und Laborwerten mit ein. So ist es nicht verwunderlich, dass die geologische Landesaufnahme seine Zeit braucht (persönliche Information von DR. W. SCHNABL).

Das Projekt GEOFaST hat das Ziel, in einem landesweiten geologischen Informationssystem eine lückenlose geologische Karte digital zur Verfügung zu stellen und dem Nutzer ein blattschnittfreies Arbeiten zu ermöglichen. „Geologische Karten sind immer auch Ausdruck der subjektiven Betrachtungsweise ihrer Urheber in stark abstrahierter Form, also Modelle, die auf zahlreichen theoretischen Voraussetzungen beruhen.“ (HOFMANN und SCHÖNLAUB, 2007) „Diese subjektive Betrachtungsweise wird dabei nicht nur von sich wandelnden Interessen und neuen Untersuchungsmethoden beeinflusst, sondern ist vor allem durch aktuelle Modellvorstellungen in den Köpfen der jeweiligen Wissenschaftler geprägt.“ (HOFMANN und SCHÖNLAUB, 2007 S. 31). Wie bei HOFMANN und SCHÖNLAUB, 2007 beschrieben, sind für den Nutzer auch ausformulierte Begleithefte zur geologischen Karte sehr wichtig, um die Gedanken und die Modelle des Erstellers erst verstehen zu können. Eine weitere Herausforderung der GBA ist die Umstellung des Bundesmeldenetzes auf das UTM Netz, um an die neuen Kartenwerke des Bundesamt für Eich- und Vermessungswesens anzuknüpfen.

Die Geologische Karte 1:200'000 (GK 200) Niederösterreichs wurde 2002 von der GBA herausgegeben. Ähnlich, wie beim GEOFaST Projekt wurde sie aus Spezialkarten und z.T. älterem Material generalisiert und bildet als ein Modellparameter die Datengrundlage für die praktische Arbeit. Damit ein Vergleich der Maßstäbe erst möglich wird, wurde die Geologische Karte 1:50'000 (GK 50) mit in den Katalog der Modellparameter aufgenommen.

Die GK 50 Blatt 72 „Mariazell“ zählt zu denjenigen Gebieten, wo neben dem Printprodukt auch die Daten in digitaler Form erhältlich sind. In der niederösterreichischen Flyschzone ist dies das einzige

Gebiet, wo Daten in digitaler Form zur Verfügung stehen. Jedoch ist in diesem Bereich nicht der gesamte Übergang der Flyschzone in die Molassezone enthalten, welches für Fragestellungen in Bezug auf gravitative Massenbewegungen sehr interessant wäre. Ebenso interessant wäre das Gebiet um Neulengbach, wo leider auch keine Printversion der GK 50 existiert.

4.5. Gefahrenhinweiskarte - Klassifizierungsmethoden in der Darstellung der Gefahrenhinweiskarten

Nach der Berechnung der Modelle stellt sich die Frage nach der Visualisierungsmethode. Hierbei gehen die Meinungen sehr weit auseinander. Die Modellierungsergebnisse liegen im Wertebereich zwischen 0 und 100. In der Wissenschaft werden manchmal keine klassifizierten Darstellungen vorgenommen, sondern die Werte kontinuierlich dargestellt (wie zum Beispiel in BRENNING, 2005). Bilden die Karten aber Entscheidungsgrundlagen für Behörden oder werden sie einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht, ist eine Klassifizierung zur Interpretation notwendig. Die richtige Klassifizierungsmethode, die Zahl der Klassen und die passende Farbgebung zu wählen, ist nicht zu unterschätzen.

In dieser Arbeit kommt eine eigene Interpretation aus verschiedenen Ansätzen zum Zug. Die Entstehung der Gefahrenhinweiskarte und ihre Modelle sind im Aufbau sehr stark durch den statistischen Ansatz geprägt. Dadurch soll die Klassifizierung nicht durch manuelle Anpassung der Klassengrenzen „optimiert“ werden (heuristische Arbeitsweise), sondern die Klassen durch gleiche Intervalle eingeteilt werden. Dies hat den Vorteil, dass alle Modelle untereinander vergleichbar sind. Die Zahl der Klassen soll so gewählt sein, dass sie für den Leser unterscheidbar und qualitative Fragen auf den ersten Blick beantwortbar sind. Zum Beispiel „Wo ist die Gefährdung hoch und wo ist sie niedrig?“

Das Kurzzeitgedächtnis kann rund sieben Informationen gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten. So ist bei der visuellen Wahrnehmung von Information durch Karten die Aufnahmefähigkeit ebenfalls beschränkt (MACEACHREN, 2005). Es sei denn, man gruppiert Informationen zu übergeordneten Einheiten. Im einfachen Fall wird in der thematischen Kartographie von ca. sechs Klassen ausgegangen. Neben den physiologischen Überlegungen der Wahl der Klassengrenze, spielt auch der kulturelle Hintergrund für Zahlensysteme und Werteinheiten eine Rolle. Wenn man von dem in der mitteleuropäischen Kultur üblichen dezimalen Zahlenverständnis ausgeht, bietet sich eine Klassenzahl von 10 an (in diesem Fall 10% Abschnitten). Weitere im Alltag gebräuchliche Klassenunterteilungen sind Viertel oder Fünftel.

Die in dieser Arbeit verwendeten vier Klassen wurden in den vorgestellten Karten mit den Worten „geringe“, „mäßige“, „hohe“ und „sehr hohe“ Gefährdung ausformuliert.

5. UNTERSUCHUNGSGBIET

Die folgenden Seiten geben Überblick über die Lage, das Klima und die Geologie des Untersuchungsgebiets. Die Niederschlagsereignisse von 2009 sollen als Beispiel für die Anfälligkeit für Massenbewegungen in der Region und dem Problemverständnis dienen.

5.1. Lage



Abb. 6 Lage und Topographie des Untersuchungsgebietes (AMap, BEV, 2011).

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten von Niederösterreich, im Mostviertel und umfasst 10 Gemeinden in den Bezirken Scheibbs, Lilienfeld und St. Pölten Land. Die Region gehört zum größten Teil der NUTS-3 Region Mostviertel – Eisenwurzen an, welche 93 Gemeinden umfasst. Das Mostviertel verdankt seinen Namen dem Anbau von Obst, vor allem im hügeligen Alpenvorland südlich der Donau. Typisch für diese Region sind groß angelegte Landwirtschaftsbetriebe, die Vierkanthöfe.

Das Untersuchungsgebiet umfasst um die 311km², dazu einen großen Teil des Naturparks Ötztal Tormäuer. Markant sichtbar ist der Ötztal mit 1893m über Meer, dessen Fuß das Gebiet im Süden abgrenzt und zugleich die höchste Erhebung des Untersuchungsgebiets ist. Die Erlauf durchzieht das ganze Untersuchungsgebiet von Annaberg im Südosten bis nach Scheibbs (339m ü. M.) im Norden. Die Landschaft ist vom Fluss stark geprägt. In der Ötztalgegend herrschen steil abfallende Hänge vor. In Richtung Mündung in die Donau ist das Landschaftsbild geprägt durch die

für den Flysch typischen weichen Hügel. Die Karte in Abbildung 6 gibt einen groben Überblick über das Untersuchungsgebiet.

5.2. Bevölkerung und Landnutzung

Die gesamte Region hatte schon frühzeitig große wirtschaftliche Bedeutung. Die „Eisenwurzten“ schließt Gebiete in Teilen Oberösterreichs, der Steiermark und Niederösterreichs ein, wo früher Erzgewinnung und Erzverarbeitung der dominierende Wirtschaftsfaktor war. Die Eisenindustrie erreichte im 16. Jahrhundert ihren Höhepunkt mit einem 15 %igen Anteil an der europäischen Eisenproduktion (HEINTEL, 1999). Scheibbs wurde damals zu einer der wohlhabendsten Städte in der Region. Die Förderung von Eisen und deren Verarbeitung in schwierigen naturräumlichen Voraussetzungen, wie unter anderem die Gebirgslage und schmalen Tälern, verlangte ein komplexes System von Transportindustrie, sowie Land- und Forstwirtschaft. Hohe Bevölkerungsdichte und großflächige Entwaldung zu jener Zeit, sowie Abwanderung nach dem Niedergang der Eisenindustrie prägten das Gebiet. Das ländliche Gebiet ist Teil des LEADER Förderprogramms als Region „Niederösterreichische Eisenstraße“ und investierte in Projekte zur Wiederentdeckung regionaler Kultur und Geschichte, die wiederum den Tourismus ankurbeln sollten. Die Region ist ebenfalls im Förderzeitraum 2007 – 2013 als Region 6 „Kulturpark Eisenstraße Ötscherland“ beziehungsweise Region 9 „Mostviertel Mitte“ beteiligt. Heute ist es der Tourismus, der die wirtschaftliche Leistung der Region ausmacht. In Lackenhof auf der Südseite des Ötschers befindet sich ein Skigebiet mit 9 Lifтанlagen. Die Ötscher Skiregion hat den Einfluss, dass die Nächtigungszahlen der umliegenden Gemeinden winterdominiert sind (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG, 2010).

In den 10 Gemeinden des Untersuchungsgebiets wohnten 2010 rund 16500 Personen. In den meisten Gemeinden ging die Bevölkerung im Vergleich zu 1991 zurück, mit -25,86% in Annaberg und -18,83% in Puchenstuben ist der Rückgang besonders stark. Einzig Reinsberg (+6,83%), St. Georgen an der Leys (+4,57%) größere Zuwächse verzeichnen. Die Bevölkerungsdichte schwankt sehr stark von gut 9 Einwohner/km² in Annaberg bis 92 Einwohner/km² in Scheibbs (AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG, 2010).

„Die Agrarquote zeigt den Anteil der Erwerbstätigen am Arbeitsort, die in der Land- und Forstwirtschaft tätig sind, an der Gesamtzahl der Erwerbstätigen am Arbeitsort an.“ (ÖROK, 2011). Die Agrarquote zeigt den seit Jahren anhaltenden Strukturwandel und die regionale Wirtschaftsstruktur auf. Für Österreich beträgt die Agrarquote 4,1% im Jahr 2001. In allen Gemeinden im Untersuchungsgebiet liegt sie darüber und in einzelnen Gemeinden wie zum Beispiel in St. Anton an der Jeßnitz bei 53%. Der durchschnittliche Waldanteil im Untersuchungsgebiet liegt bei ca. 60%.

Ein kurzer Abschnitt der II. Wiener Hochquellenwasserleitung streift das Untersuchungsgebiet. Diese Wasserleitung versorgt die Stadt Wien seit 1910 mit Wasser aus den Wildalpen in der Steiermark. Dieses gigantische Bauwerk liefert eine Reihe von geologischen Untersuchungen des

Gebiets. TRAUTH, 1948 beschreibt den Abschnitt der Leitung vom Quellgebiet bis Scheibbs und gibt wichtige Informationen über die Lagerung der Schichten. Die Ingenieure waren sich damals wie heute der ungünstigen geologischen Begebenheiten dieser Region durchaus bewusst. Am rechten Erlaufufer bei der Eisenbahnstation Neustift wurde die Leitung wegen „...Starken (Flysch-) Hangrutschungen...“ nach technisch-geologischen Gutachten verlegt (TRAUTH, 1948, S.70).

5.3. Klima

Bezieht man sich auf die Naturraumgliederung der forstlichen Wuchsgebiete Österreichs von (KILIAN, 1994), so entspricht das gesamte Untersuchungsgebiet dem Wuchsgebiet 4.2 „Nördliche Randalpen – Ostteil. KILIAN, 1994 definiert die Wuchsgebiete nach forstökologischen Gesichtspunkten in Großlandschaften mit weitgehend einheitlichem Klimacharakter und geomorphologischen Grundeinheiten. Der dem Untersuchungsgebiet angehörenden Region wird ein humides Stauklima mit Zunahme der Niederschläge gegen das Gebirgsinnere zugeschrieben. Im Vergleich zum benachbarten Westteil werden hier weniger Niederschläge verzeichnet, jedoch nicht unter 1000mm Jahresniederschlag. Der Niederschlagsverlauf weist zwei Maxima auf, einerseits im Juli und ein sekundäres, schwächeres im Winter. Lokal treten extrem kalte Beckenlagen auf (zum Beispiel Lunz am See).

Die Bedeutung des Niederschlags für Massenbewegungen ist enorm und wird in der Literatur für Niederösterreich meist als Hauptfaktor herausgestrichen. Jedoch stehen für Modellierungen oft zu gering aufgelöste Niederschlagsdaten oder zu kurze Zeitreihen zur Verfügung. Für Niederösterreich sind momentan einige Diplomarbeiten am Institut für Geographie und Regionalforschung in Wien im Entstehen, die sich mit dem Zusammenhang von Hangrutschungen und Niederschlag befassen.

5.4. Geologie

Dieses Kapitel widmet sich etwas ausführlicher dem geologischen Überblick und geht von der Entstehung der Alpen über, in die Großeinheiten, welche für Niederösterreich und für das Untersuchungsgebiet im Besonderen prägend sind.

5.4.1. Entstehung der Alpen

Die Geologie des Untersuchungsgebietes ist eng mit der Entstehungsgeschichte der Alpen verknüpft und die Problematik der Flyschzone kann nur in ihrem Gesamtzusammenhang verstanden werden.

Drei Deckensysteme gliedern die Alpen tektonisch: das Helvetikum, Penninikum und Ostalpinum und geben einen zeitlichen Ablauf wieder, in dem neben den Bewegungen der afrikanischen auf die europäische Platte die Öffnung und Schließung zweier ozeanischer Bereiche wesentlich beteiligt waren (KRENMAYR, 2002).

Das in den Westalpen dominierende Helvetikum, wurde von ostalpinen Decken überschoben und tritt in den Ostalpen nur noch in Form von geologischen Fenstern an der Oberfläche auf. Das Penninikum war die Geburtsstätte des Flyschs, ein Meer am Kontinentalrand.

Im Penninischen Ozean entstand ein Tiefseegraben, welcher der Subduktionszone vorgelagert war. (Abb. 7) Aus dem Sedimentmaterial entstanden Sandsteine, die aus schiefrigen Peliten und Mergelkalken bestehen. Während der Unter-Kreide bis ins Ober-Eozän wurden diese Sedimente bei Erdbeben oder Meeresspiegelschwankungen vom Meeresschelf lawinenartig in die Tiefe verfrachtet und nach Größenkomponenten sortiert. Diese zyklisch vorkommenden Sedimentschichten werden in der Literatur oft als Turbidite bezeichnet (WESSELY, 2006).

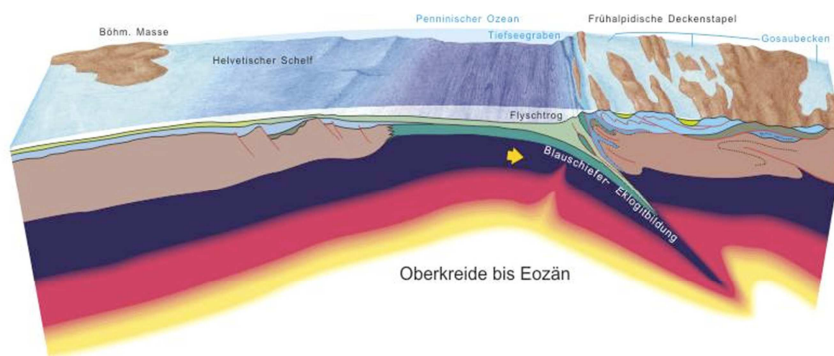


Abb. 7 Entstehung der Alpen. Entstehung der Flyschzone im Tiefseewasser (KRENNMAYR, 2002).

Die Abbildung 8 zeigt das Aufeinandersteuern der afrikanischen auf die europäische Platte im Oligozän, wo sich der Penninische Ozean nach und nach schloss. Etwa 1000 Kilometer Landmasse wurde so nach Norden geschoben, die einerseits in der Subduktionszone abgedrängt und andererseits aufgefaltet und als Decke übereinander gestapelt wurde.

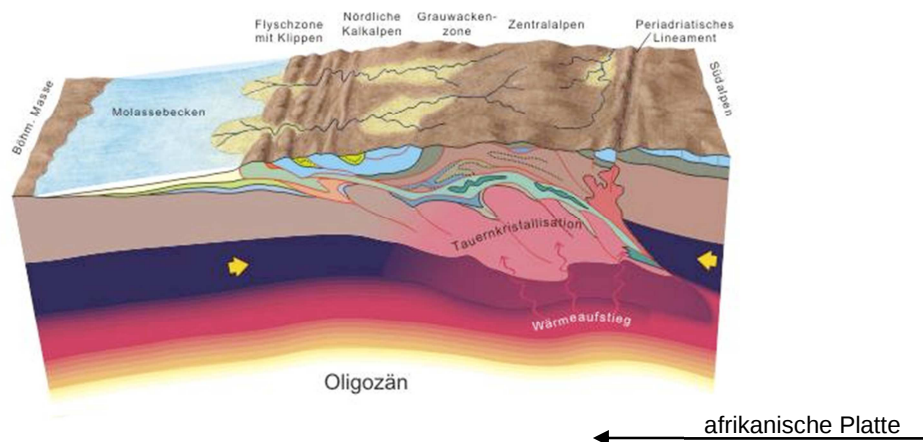


Abb. 8 Entstehung der Alpen. Auffaltung und Überprägung der Deckenschichten (KRENNMAYR, 2002).

5.4.2. Geologie Niederösterreichs

Von der Entstehungsgeschichte der Alpen wird nun auf die einzelnen für die im Untersuchungsgebiet wichtigen Einheiten eingegangen. Die Geologische Karte in Abbildung 9 gibt einen Überblick über die Hauptzonen in Niederösterreich.

Geologische Überblickskarte
Niederösterreichs
- auf der Basis der GK200

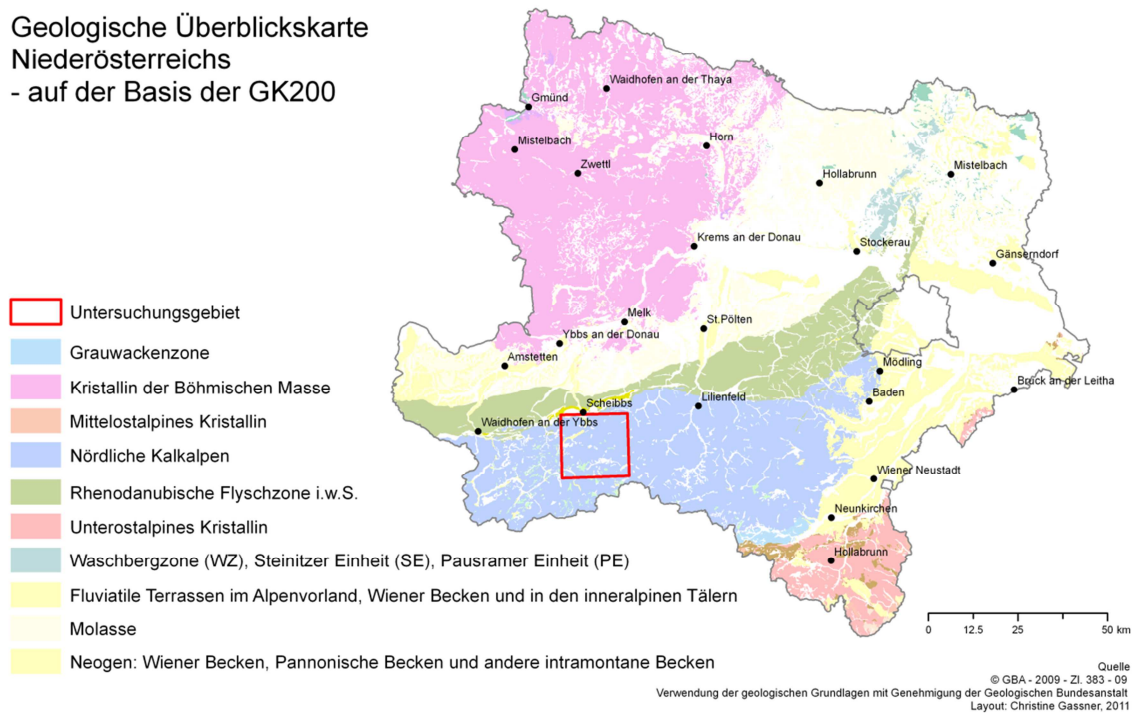


Abb. 9 Geologische Überblickskarte Niederösterreich, 2011 Quelle GBA.

5.4.3. Die Flyschzone

Die Flyschzone, in der Abbildung 9 grün dargestellt, erstreckt sich als West-Ost gerichtetes Band vom Rheintal ostwärts bis nach Wien. Durchschnittlich ist sie zwischen 10 und 15 km breit, ihre breiteste Stelle in Niederösterreich wird im Wienerwald erreicht und beträgt um die 20km. Die schmalste Stelle liegt im Untersuchungsgebiet, in der Region Scheibbs. Geomorphologisch äußert sich die Flyschzone in sanften hügeligen Formen ähnlich wie in der Molassezone. Es konnten sich keine steileren Formen bilden, da Gesteine aus leicht verwitterbaren Mergel-, Ton- und Sandsteinfohlen dies kaum zulassen. (WESSELY, 2006)

Tektonisch beschreibt PARLOW, 1950 generell ein SE – SW Fallen der Schichten von 30° – 45°. Die Flyschzone taucht demnach immer wieder unter die Schlierzone der Grestener Decke. Eine genaue Beschreibung der Flyschzone mit ihren tektonischen und lithologischen Formen in der Region

Scheibbs ist in PARLOW, 1950 nachzulesen, wo auch auf die Lagerung (Streichen und Fallen) der Schichten eingegangen wird. Die Lagerung der Schichten ist bei Hangrutschungen nicht zu unterschätzen. Eine entsprechende Schichtung kann eine Gefährdung unterstützen.

5.4.4. Die Kalkalpen

Der tektonische Bau der Kalkalpen ist in der Abbildung 9 blau dargestellt und lässt sich in drei Haupteinheiten, das Bajuvarikum, das Tirolikum und das Juvavikum, gliedern. Dem Bajuvarikum, als unterste Schicht, werden die Frankenfelsen und die Lunzer Decke zugeordnet. Beide Decken sind durch den geringeren Anteil an Hauptdolomit stark verformbar, was sich in der Ausbildung von Falten und Scherkörpern äußert (WESSELY, 2006). Durch die Tektonik wurden die Kalkalpen über die Flyschzone geschoben, in zwei bis drei Falten aufgefaltet und besonders im Untersuchungsgebiet stark verschuppt.

5.4.5. Quartär

Die beschriebene Entstehung der Alpen mit ihren Decken liegt erdgeschichtlich weit zurück. Die jüngste Zeitepoche wird dem Quartär zugeschrieben, wobei die Geologen mit der Abgrenzung dieser Epoche Schwierigkeiten haben. FUCHS, 1980 zieht die Grenze zwischen Tertiär und Quartär um die 2,5 Millionen Jahre vor heute. Im Quartär liegen die Wechsel von Kalt- und Warmzeiten und prägten das heute sichtbare Landschaftsbild maßgeblich. Die Vergletscherung in den Alpen war bei allen Eiszeiten sehr ausgeprägt. Dies macht es schwierig einzelne Ereignisse zu rekonstruieren, da die späteren Eiszeiten die vorhergehenden Akkumulationsformen wieder ausräumten. Dafür weist der periglaziale Raum umfangreiches Material zu den vergangenen Kalt- Warmwechseln, zum Beispiel Terrassenschottervorkommen entlang der Donau, auf. Nicht zuletzt begann in diesem Zeitraum der Mensch Einfluss auf die Landschaft zu nehmen. Die quartären Gebiete sind in der geologischen Übersichtskarte weiß dargestellt.

Das Untersuchungsgebiet war mit Ausnahme des Ybbstaales und einzelner lokaler Gletscher eisfrei. Die Risshochterrasse folgt dem Erlaufstal bis südlich von Scheibbs (WESSELY, 2006). Deshalb sind in der geologischen Karte viele Gebiete als Quartär eingezeichnet, die gerade in Bezug auf Massenbewegungen einen Einfluss haben. Bei jedem starken Niederschlagsereignis wird Kies, Sand und Schlamm verfrachtet, Hänge unterschritten und das Material wieder an anderen Orten abgelagert (SCHNABEL, 2002).

5.4.6. Profil durch das Untersuchungsgebiet

Den Deckenaufbau mit den komplexen Überschiebungen und Faltungen zeigt folgender Profilschnitt von Ybbs an der Donau über Wieselburg, Purgstall, Scheibbs bis zum Ötscher in Abbildung 10. Die böhmische Masse als unterste Einheit, darüber schiebt sich die Molassezone. In

der Grestener Klippenzone (im Ultrahelvetikum) eingekeilt liegt die Flyschzone. Weiter südlich schiebt sich schließlich die Kahlenberger Decke und die Frankenfeser Decke über die Klippenzone. Im Bereich der den Kalkalpen zugeordneten Lunzer Decke werden die Formen unruhiger verschuppt und gefaltet. Davon sind besonders die Kössener, Lunz (braun) und Opponitz (violett) Formationen sowie der Jura (rot) betroffen.

Untersuchungsgebiet

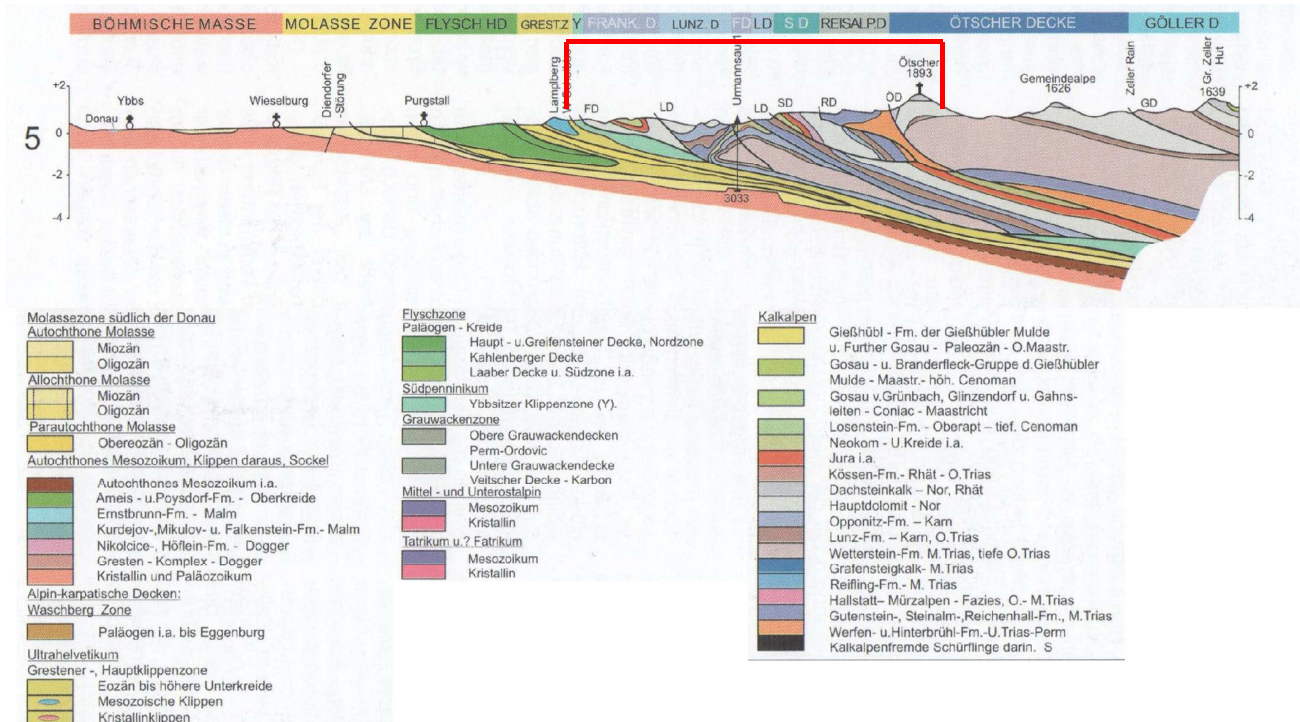


Abb. 10 Geologisches Querprofil durch die Alpen von Ybbs bis zum Gr. Zeller Hut (WESSELY, 2006) mit eingezeichnetem Untersuchungsgebiet.

5.5. Boden

Die Böden in den Alpen sind oft sehr kleinräumig strukturiert. Die bodenbildenden Prozesse werden klimatisch durch die Wechsel von Warm- und Kaltzeiten im Quartär beeinflusst. Das Relief der Alpen ist stark ausgeprägt und beeinflusst durch die Höhenunterschiede diese Prozesse ebenfalls. VEIT, 2002 schreibt, dass der Zeitfaktor im Gebirge eine größere Rolle spielt als im Vorland. Im Untersuchungsgebiet überdecken Ablagerungen beziehungsweise Deckschichten wie Hangschutt, Schwemmfächer, periglaziale Sedimente und Rutschungen oft das anstehende Gestein, so dass kleinräumig ganz verschiedene Entwicklungsstadien der Böden vorliegen. Aber auch die Nutzung der Böden übt einen Einfluss auf dessen (Neu-)Bildung. So nimmt der pH-Wert mit der Höhe ab, welche durch den Vegetationswechsel von Laubwäldern zu Nadelwäldern

gefördert wird. Dieser Vorgang kann durch die forstwirtschaftliche Nutzung, z.B. Fichtenanbau in tieferen Lagen unterstützt werden.

Generell sind für die Flysch und Werfener Schichten schwere Pseudogleye, und Gleye typisch. Diese Bodentypen sind geprägt von Staunässe, welche auf die hohen Adhäsionskräfte der Tone zurückzuführen sind, sowie oft von hohen Grundwasserspiegeln. Auf Greifensteiner Sandstein ist die sandige, podsolige Braunerde üblich. Dieser Bodentyp ist nährstoffarm und steht häufig, aber seltener als der Pseudogley, unter Staunäseeinfluss. (WESSELY, 2006)

Für Rutschungen spielt die Vorbefeuchtung der Böden eine große Rolle und ist bei den vorbereitenden sowie auslösenden Faktoren von gravitativen Massenbewegungen von Bedeutung. Je nach Bodentyp ist die Wasserspeicherkapazität mehr oder weniger groß. Gleye und Pseudogley sind besonders vom Wasser beeinflusst und haben eine erhöhte Rutschanfälligkeit. (SCHWENK *et al.*, 1992)

5.6. Ereignisse im Untersuchungsgebiet

Die nächsten beiden Abschnitte sollen die Problematik von gravitativen Massenbewegungen des gewählten Untersuchungsgebietes verdeutlichen und den Bezug zur Praxis herstellen. Zum einen geht es um die Reaktivierung einer fossilen Hangrutschung in Scheibbs und im zweiten Fall um die Extremereignisse im Jahr 2009. Diese Erläuterungen dienen dem Überblick über die Risiken und zeigen auf, wie sehr das Klima, insbesondere der Niederschlag als vorbereitender und auslösender Faktor, eine Rolle für Massenbewegungen spielen.

5.6.1. Rutschung am Bundesoberstufenrealgymnasium in Scheibbs

WESSELY, 2006 schreibt, dass Mitte der 1970er Jahre die Gemeinde Scheibbs einen Standort für ein Gymnasium suchte und am Hangfuß 300m südlich des Stadtzentrums fündig wurde. Am Hang sind zahlreiche Einfamilienhäuser angesiedelt und die II. Wiener Hochquellwasserleitung quert das Gebiet durch einen Stollen. Gutachten ergaben zahlreiche Sickerwasseraustritte und sehr weit in die Tiefe reichende lehmig-tonige Verwitterungsschichten. Dennoch wurde mit dem Bau im Jahre 1977 begonnen. Kurz nach Baubeginn traten trotz Hangsicherungsmaßnahmen Risse im darüber liegenden Hang auf. Die Stollen der Hochquellwasserleitung bekamen Sprünge und Risse, ließen die Rohre undicht werden, sodass dem Hang dadurch zusätzlich Wasser zugeführt wurde. Auch zahlreiche Einfamilienhäuser wurden in Mitleidenschaft gezogen. Verstärkte Sicherungsmaßnahmen wie Entwässerungs- und Stützbrunnen, sowie Tiefendrainagen und Stützmauern brachten die Bewegungen zum Stillstand. WESSELY, 2006 folgert daraus, dass hier eine großräumige fossile Rutschung durch die Bebauung wieder aktiviert wurde und sich die Bewegungen bei starken Niederschlägen jederzeit wieder in Gang setzen können.

5.6.2. Extremereignisse in Niederösterreich im Jahr 2009

Das Jahr 2009 war ein sehr folgenreiches Jahr, was Hochwasser und Rutschungen in Niederösterreich betrifft. Es wurden beim Niederösterreichischen geologischen Dienst offiziell 59 Schadensmeldungen von Rutschungen gemeldet. Von einer Vielzahl an stattgefundenen, jedoch nicht gemeldeten Ereignissen kann ausgegangen werden. Die Gründe dafür sind unterschiedlich. Manche Rutschungen ereigneten sich in landwirtschaftlich nicht genutzten Gebieten oder es waren keine Gebäude betroffen oder der Schaden war nicht groß genug, dass die Geschädigten vom Katastrophenfonds unterstützt würden. Laut HAIDEN, 2009 war in den Tagen von 22. – 27. Juni 2009 eine klassische „Hochwasserwetterlage“ für die starken Niederschläge verantwortlich, obwohl der „Vb- Aspekt“, der Verlagerung eines Bodentiefs vom Golf von Genua an den Alpenostrand, gefehlt hat, wie es zum Beispiel im August 2005 der Fall war. Ein Höhentief über dem Mittelmeerraum steuerte warme und sehr feuchte Luft über den Balkan um die Alpen herum, wo sich die Luft mit einer Kaltfront eines Grönlandtiefs traf. Durch die Staulage konnte sich die Luft kaum verlagern und brachte lokal immer wieder durch konvektive Zellen enorme Niederschläge. In Abbildung 11 sind die Tagesniederschlagssummen österreichweit an den Tagen vom 23.-25. Juni 2009 und vom 27.-29. Juni 2009 abgebildet. Anhand dieser Bilder werden die von sehr starken Niederschlägen betroffenen Zonen in pink und rot besonders im Mostviertel deutlich (schwarzer Rahmen). Die rote Skala weist einen Tagessummenwert von bis zu 130l/m² aus. Anhand der Bilder lässt sich schon abschätzen, dass in den 6 Tagen an einigen Orten 300mm und mehr Niederschlag gemessen wurde.

GODINA und MÜLLER, 2009 schreiben Lunz am See einen gemessenen Wert von 340mm Niederschlag zu, dies entspricht einem Viertel der ortsüblichen Jahresniederschlagssumme. Laut HYDROGRAPHISCHER-DIENST, 2009 bedeuteten die Niederschläge im Zeitraum vom 23. bis 29. Juni 2009 für die Stationen St. Anton an der Jeßnitz (314,9mm) und St. Georgen an der Leys (290,2 mm) ein hundertjähriges Ereignis und ein 80-jähriges Ereignis für Scheibbs (264,8mm) (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2009).

Diese Niederschlagsperiode führte nicht nur zu Hochwasser, sondern löste zahlreiche Muren und Hangrutschungsereignisse aus.

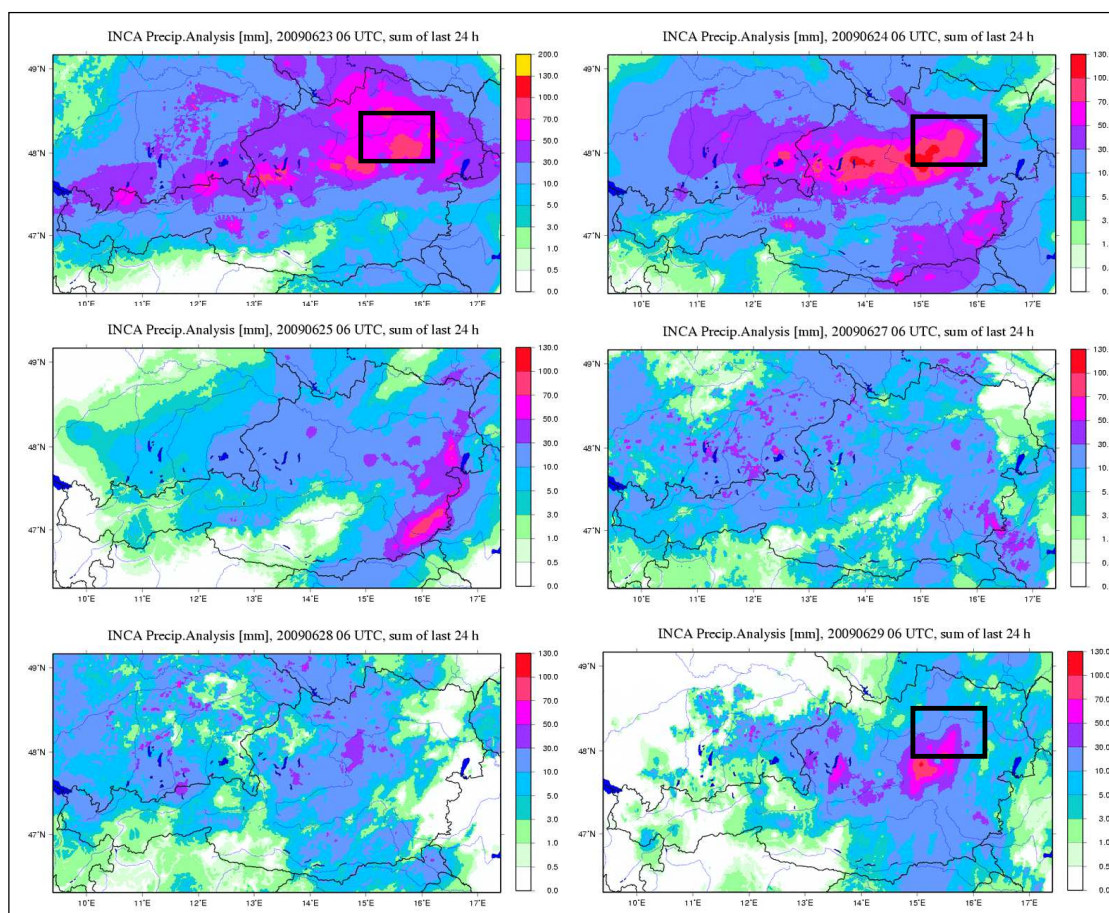


Abb. 11 24-h-Summen des Niederschlags in Österreich vom 23., 24., 25. sowie 27., 28. und 29. Juni 2009 jeweils 06:00 UTC für die 24h zuvor (Quelle: ZAMG, INCA – Analyse) ergänzt. Der schwarze Rahmen schließt das Untersuchungsgebiet mit ein.

6. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Ergebnisse werden in folgendem Kapitel in der Reihenfolge ihrer Bearbeitung präsentiert. Im Anschluss an die Ergebnisdarstellung folgt jeweils ein kurzer Diskussionsteil.

Manche Karten und Tabellen werden im Text nur angesprochen und im Anhang genauer dargestellt. Dies dient der Übersicht und der besseren Lesbarkeit der Arbeit. In Fällen, wo die verschiedenen Maßstäbe der geologischen Karten und der Tektonik eine Rolle spielen, werden die Ergebnisse einzeln aufgeführt und anschließend kurz miteinander verglichen.

Zunächst werden die Ergebnisse der Kartierung präsentiert. Danach werden die kartierten Rutschungen mit den aufbereiteten Daten mittels einer Häufigkeitsstatistik und der Frequency Ratio verglichen. Dies soll einen ersten Überblick über die Beziehungen der kartierten Rutschungen zu den verwendeten Inputparametern geben. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse aus der Modellierung vorgestellt. Bei der Visualisierung der Gefahrenhinweiskarten werden erst zwei Modelle mit gleicher Klassifizierung dargestellt und deren Validierung präsentiert und diskutiert. In einem nächsten Schritt werden Gefahrenhinweiskarten gleicher Modelle aber mit unterschiedlichen Klassifizierungen einander gegenüber gestellt und deren geomorphologische Güte diskutiert. Alle drei Hauptergebnisse (Kartierung, Modellierung und Visualisierung in den Gefahrenhinweiskarten) bilden die Grundlage in der übergeordneten Diskussion im nächsten Hauptkapitel.

6.1. Ergebnisse Rutschungskartierung

Im gesamten Untersuchungsgebiet (Abb. 12) wurden 440 Rutschungen kartiert. Die Rutschungen konzentrieren sich auf die nördliche Hälfte des Untersuchungsgebietes. Die Annahme, dass dort, wo Rutschungen bereits aufgetreten sind, wieder welche zu erwarten sind, bestätigt sich. Im untersuchten Gebiet treten Massenbewegungen selten isoliert auf.

In der Größe variieren die Rutschungen stark, wie aus Tabelle 5 zu entnehmen ist. Jedoch sind alle kartierten Rutschungen größer als 100m².

Rutschungskartierung

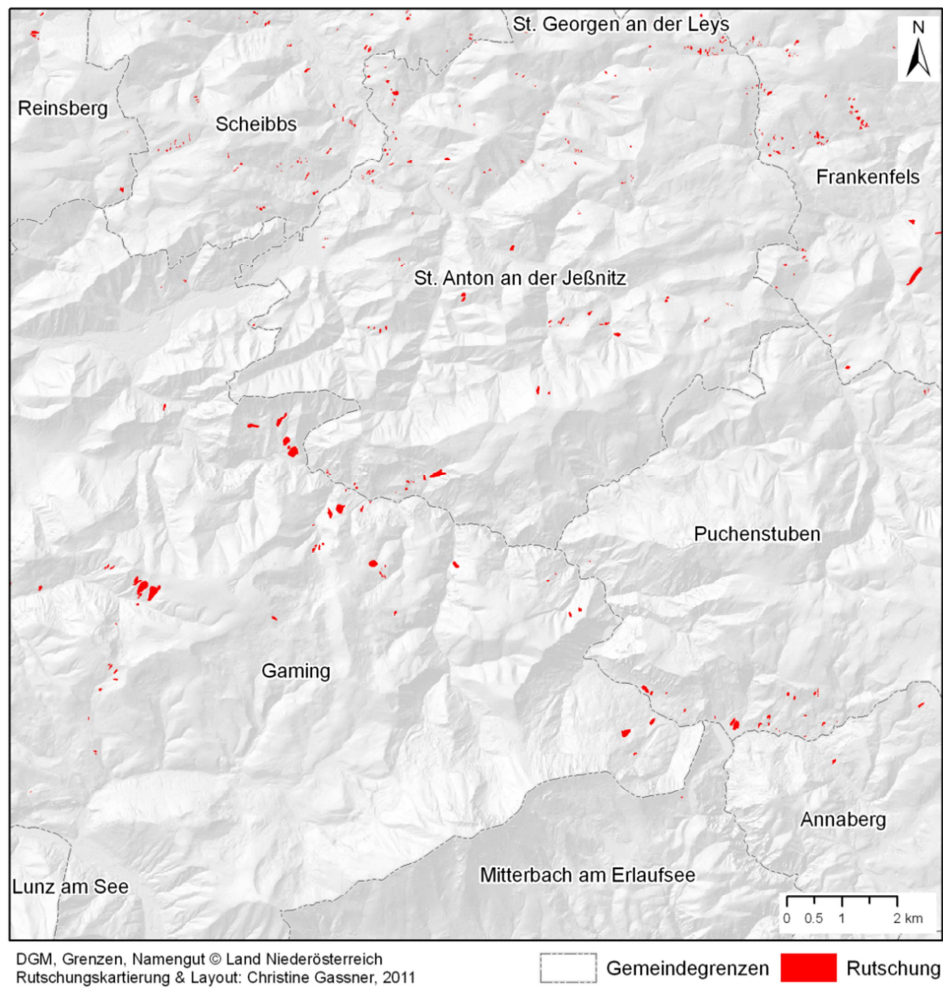


Abb. 12 Rutschungskartierung 2011, Datenquelle Topographie, Gemeindegrenzen und Namengut © Land Niederösterreich, Rutschungskartierung Ch. Gassner.

Es wurden bei der Kartierung keine Unterscheidungen nach Prozesstypen getroffen (Rutschen, Fließen, tiefgründig oder flachgründig). Stürzende und murenähnliche Prozesse wurden jedoch ausgeklammert. Das Alter der einzelnen Rutschungen ließ sich aus den Daten nicht ablesen. Es wurde auch nicht zwischen alten und rezenten Massenbewegungen unterschieden.

Tab. 5 Überblick über Zahl und Größe der Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet.

Anzahl MB	440
Gesamtfläche aller MB	942'627 m ²
Fläche des gesamten Untersuchungsgebiet	311,43 km ²
Kleinste MB	106,5 m ²
Größte MB	64.384,3 m ²
Mittelwert	2.142,3 m ²
Standardabweichung	4.579,9 m ²

Bei der Kartierung wurde sehr deutlich, dass Rutschungen im Norden häufiger auftreten, wo die Flyschzone an die Oberfläche tritt. Hier sind die Flächen etwas kleiner. Größere Flächen, welche dem Kalk angehören sind in der südlichen Hälfte des Untersuchungsgebietes angesiedelt. Die Rutschungen wurden durch eine Geländebegehung stichprobenartig verifiziert.

6.2. Diskussion der Rutschungskartierung

Nicht nur die Datengrundlage mit möglichst hoch aufgelösten Hillshades verhilft zu einem guten Ergebnis, sondern auch Kartier- und Geländeerfahrung. Es ist schwierig die Qualität einer Kartierung zu messen. Wie ARDIZZONE *et al.*, 2002 schon bei der heuristischen Methode beschrieben hat, trägt jede Kartierung eine individuelle Handschrift. Man kann auch davon ausgehen, dass eine Kartierung in dieser Größenordnung und Zeitaufwand kaum vollständig sein kann, obwohl dies bei der Modellierung vorausgesetzt wird. Es stellte sich heraus, dass die Tagesverfassung und der Zoomfaktor beim Kartieren ebenso einen Einfluss hatten. Bei starken Vergrößerungen kann man Umrisse besser definieren, läuft aber auch Gefahr, dass zwar kleine Rutschungen erkannt werden, aber vielleicht das größere Rutschereignis auf dem die kleinere liegt, übersehen wird. Diese Unsicherheiten können durch eine Überarbeitung zu einem späteren Zeitpunkt gemindert werden. Je nach Art der Massenbewegung liegt auch ein anderes hydrologisches System zu Grunde. Flachgründige Hangrutschungen unterscheiden sich in der hydrologischen Struktur und bodenphysikalischen Eigenschaften von tiefgründigen Massenbewegungen. Oftmals lassen sich solche Unterscheidungen durch die geringe Datenmenge nicht durchführen, obwohl die Modellierung wahrscheinlich andere Ergebnisse liefern würde.

Es wurden Rutschungen in ganzen Umrissen kartiert. Dies kann bei der Modellierung auch ein Nachteil sein, wenn durch die zufällig ausgewählten Punkte einmal eine Stichprobe aus dem Anrissbereich oder ein anderes Mal eine aus dem Auslaufgebiet gezogen wird. Dies wird hier bewusst in Kauf genommen und durch die Zahl der Stichproben ($n=500$) wieder relativiert.

6.3. Ergebnisse Datenaufbereitung

In den folgenden Absätzen werden die einzelnen Inputdatensätze für die Modellierung vorgestellt, die sich einerseits aus den geologischen Karten und andererseits aus den Derivaten aus dem DGM zusammensetzen.

6.3.1. Lithologie

Betrachtet man die beiden Karten (Abb. 13), so fällt auf, dass im Norden in der durch den Flysch geprägten Region die Unterschiede zwischen der GK 200 und GK 50 zunehmen. Die GK 50 wird detaillierter und auch der Wechsel der Klassen wird kleinräumiger - das Bild erscheint unruhiger.

Der Süden deckt sich in weiten Bereichen mit der GK 200, nur kleinere Einschlüsse werden in der GK 50 ergänzt und detaillierter dargestellt. In der GK 200 sind die Tektonik und Deckengrenzen gut sichtbar, besonders die Diagonale von Nordwest bis Südost, welche die Grenze des Hauptdolomits markiert (dunkel violett in der GK 200).

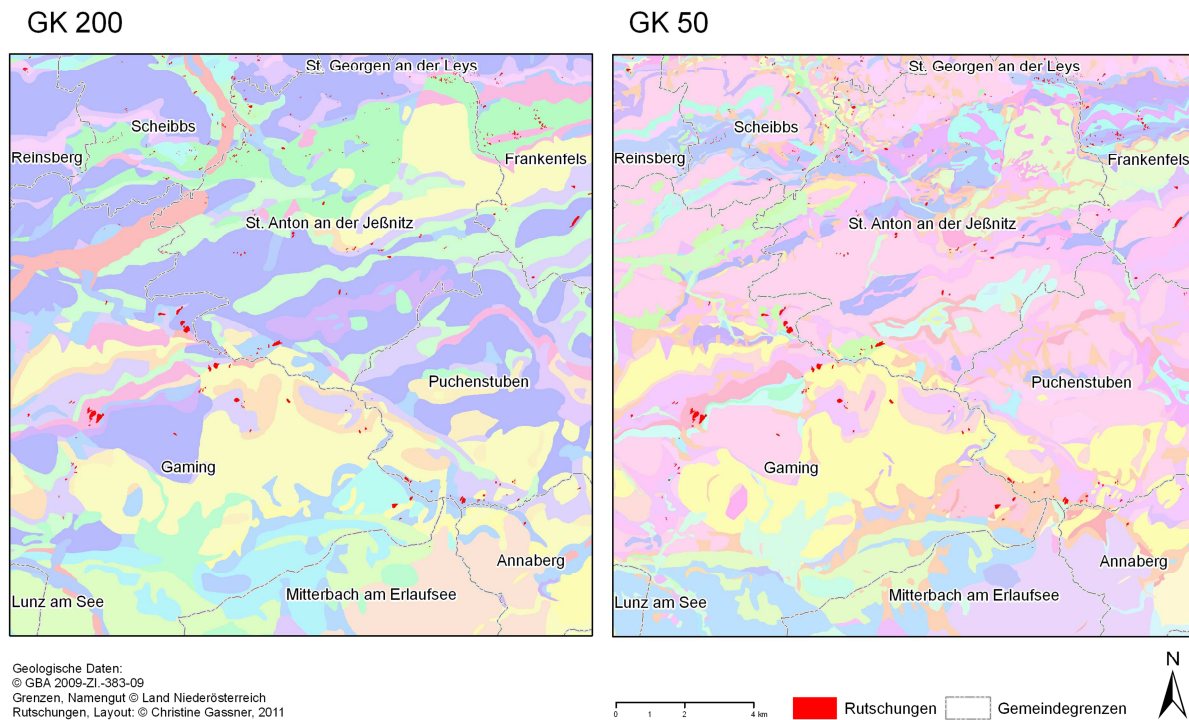


Abb. 13 Vergleich der GK 200 mit der GK 50, Überblicksdarstellung, Quelle GBA.

6.3.2. Dummy Variable „Entfernung zu Störungslinien“ (Tektonik)

Der ursprüngliche Vektordatensatz bei beiden Auflösungen (GK 50 und GK 200) enthält drei unterschiedliche Gruppen von Attributen (Störung, Deckengrenze und Teildecken sowie Schuppengrenzen) jeweils gesichert und ungesichert. In der Modellierung wurden alle Attribute als gleichwertig erachtet. Um die Zahl der Modellinputparameter in Grenzen zu halten, wurde in dieser Arbeit das Erstellen von „Dummy Variablen“ einerseits und andererseits die unklassifizierte, euklidische Distanz gewählt.

Da für dieses Untersuchungsgebiet noch keine Erfahrungswerte vorliegen, wurden drei Varianten über die euklidische Distanz gerechnet. Erstens ein Abstand von 100m von der Tektonik als Schätzung, zweitens ein Abstand von 313m, welcher dem Medianwert aller euklidischen Distanzen entspricht und drittens der unklassifizierte Ausgangsdatensatz mit allen euklidischen Distanzen.

6.3.3. Exposition

Wie in der Methode bereits beschrieben, wurden in dieser Studie zwei Möglichkeiten der Expositionsberechnung angewandt. Einerseits wird die Exposition durch klassifizierte Himmelsrichtungen und Frequency Ratio angegeben und andererseits nach dem Sinus – Cosinus Ansatz berechnet. Bei beiden Methoden waren die Modellergebnisse nicht signifikant und werden in dieser Arbeit fortan außer Acht gelassen.

6.3.4. Wölbung (Krümmung)

Rutschungen weisen meist ein typisches Hangmuster von konkav unterhalb des Abrissbereiches zu konvex im Auslaufgebiet auf. Oftmals wurde das Rutschmaterial nach dem Ereignis weggeräumt, sodass im DGM nur das fehlende Material im konkaven Hang sichtbar bleibt.

Es gibt zwei Arten von Wölbungsberechnungen: die Vertikalwölbung, die sich in Richtung der maximalen Neigung orientiert und die Horizontalwölbung, die sich senkrecht zur Richtung der maximalen Neigung ableiten lässt. Die Krümmung gibt Aufschluss über die physischen Merkmale eines Wassereinzugsgebietes. Die Ausrichtung bestimmt die Fließrichtung. Die vertikale Krümmung beschreibt die Beeinflussung der Fließbeschleunigung (Erosion beziehungsweise Ablagerung). Die horizontale Wölbung beschreibt Fließkonvergenz oder –divergenz und ist für Fragen der Bodenhydrologie relevant.

In der Datenaufbereitung wurde die Zellgröße auf 10m belassen und daraus die beiden Wölbungsarten berechnet. Diese Datensätze werden als metrische Daten verwendet und keine Klassifizierung vorgenommen, wie es in der Literatur manchmal zu lesen ist. Für die Modellierung wurde nur die horizontale Krümmung verwendet, da die vertikale Wölbung nicht signifikant ist.

6.3.5. Diskussion zur Datenaufbereitung

Für die Kartierung von Massenbewegungen sind hochaufgelöste DGM sehr wertvoll. Bei den Derivaten für die Modellierung an sich, wurde die Pixelgröße zum Beispiel bei RUETTE ET AL., 2011 von einem Meter auf zehn Meter angepasst. Bei der Wölbung wird dieser Effekt besonders deutlich. Die Auflösung der Wölbungsdaten beeinflusst die Modellierung wesentlich. In dieser Studie wird von einem 10m-Raster ausgegangen, also werden kleinräumige Bodenwellen miterfasst, die für Rutschungen nicht unbedingt relevant sein müssen. Würde die Pixelgröße höher gewählt, läge das Augenmerk vermehrt auf der allgemeinen Hangstruktur, was wiederum zu besseren Modellierungsergebnissen führen kann. Jedoch würde durch eine solche heuristische Herangehensweise, den hier angewandten mathematisch statistische Ansatz in den Hintergrund rücken.

Die geologischen Karten und die Tektonik unterscheiden sich nicht nur durch Generalisierung, beziehungsweise durch Zusammenfassen von Klassen in der GK 200, sondern auch speziell in der besseren Abgrenzung der Täler durch die GK 50. Die GK 200 basiert auf ein Zusammenfügen

mehrerer Kartengrundlagen. Eine besondere Herausforderung sind die Blattschnittgrenzen; einerseits vorgegeben von den verschiedenen Kartengrundlagen der Österreichischen Kartenwerke und andererseits durch die individuelle Handschrift des Kartierers. Nach SCHWENK, 1992 gehören zu den geologischen Voraussetzungen für gravitative Massenbewegungen auch die Art der Lagerung beziehungsweise die Art der Anordnung der einzelnen Schichten. Diese Informationen sind in den geologischen Gutachten enthalten, nicht aber in der hier zur Verfügung stehenden Tektonik vermerkt. Es wäre sicher interessant, den Einfluss dieser Information aufs Modell zusätzlich zu testen.

6.4. Häufigkeitsverteilung der Rutschungen

Um einen Überblick über alle Modellierungsparameter und deren Verteilung im Zusammenhang mit Rutschungen zu erhalten, eignen sich Kurvendiagramme für metrische Daten und Säulendiagramme für kategorische Datensätze besonders gut.

Auf der x-Achse werden die Kategorien oder die Einheiten der metrischen Daten abgebildet und auf der y-Achse werden entweder die Anteile der einzelnen Klassen im Gesamtgebiet in Prozent oder die Rutschungsdaten als Prozentanteil gemessen an allen Rutschungen aufgetragen. Diese Werte wurden über den „Spatial Analyst“ in ArcInfo ermittelt und in Excel weiterverarbeitet. Eine genaue Auflistung der Werte ist zusammen mit der Frequency Ratio in Anhang aufgeführt.

Da die Datensätze der geologischen Karten sowohl bei der GK 50 als auch bei der GK 200 sehr viele Klassen haben, beschränkt sich die Visualisierung derselben auf die häufigsten 10 Klassen. Dies bedeutet, dass beide Ergebnisse jeweils zweimal dargestellt werden. Zum einen die zehn häufigsten Klassen im gesamten Untersuchungsgebiet und zum anderen die zehn häufigsten Klassen, wo Rutschungen vermehrt auftreten. Die Gesamtauflistung mit den Prozentanteilen und der Frequency Ratio sind wiederum im Anhang zu finden.

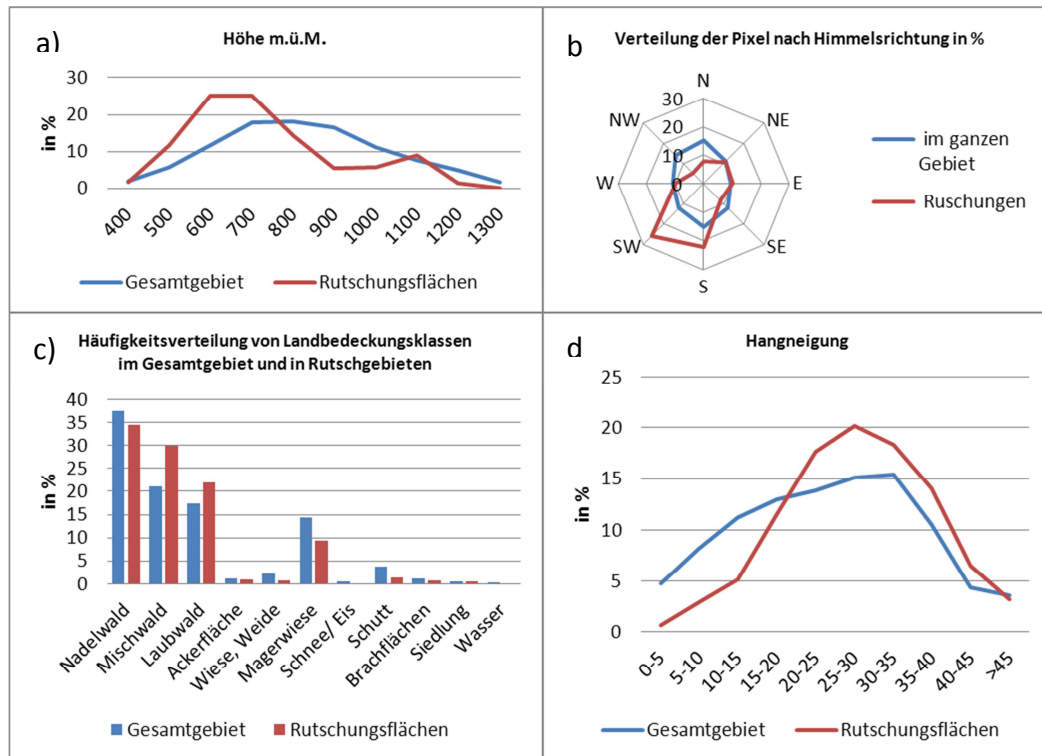


Abb. 14 Häufigkeitsverteilungen der Rutschungen und des Gesamtgebietes nach a) Höhe, b) Himmelsrichtung (Exposition), c) Landbedeckung und d) Hangneigung.

Die meisten Rutschereignisse sind zwischen 500 und 800 Metern über Meer zu finden. Bei der 1100m Marke ist nochmals ein kurzer Anstieg der Rutschungshäufigkeit vermerkt (Abb. 14).

Bei der Himmelsrichtung (Exposition) zeigt die Windrose eine leicht Nord-Süd lastige Verteilung der Hänge des Gesamtuntersuchungsgebietes. Die Rutschflächen sind vermehrt süd- südwestlich orientiert. Rund die Hälfte der Rutschfläche liegt auf diese Art exponiert. Nur 5% der Rutschungen sind nordöstlich ausgerichtet.

Um einen Überblick über die Rutschanfälligkeit der **Hangneigung** zu bekommen, wird sie in Abbildung 14 klassifiziert dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass für die Modellierung die unklassifizierten Rasterwerte verwendet wurden. Die Zahl der Rutschungsflächen nimmt mit der Hangneigung zu und erreicht einen Höhepunkt zwischen 25° und 30°. Rund ein Fünftel der Rutschfläche liegt in dieser Klasse. Ab einer Neigung von über 45° treten kaum mehr Rutschungen auf.

Die **Landbedeckung** zeigt einen sehr hohen Waldanteil von zusammengefasst fast 70% des Gesamtgebietes. Wiese- Weide- und Ackerflächen bedecken rund ein Fünftel des Gebietes. Rutschungsrelevant zeigen sich vor allem die Waldflächen.

Geologie GK 200 und GK 50

Die Klassenzahl der geologischen Daten ist sehr hoch. Die GK 200 umfasst 30 Klassen und die GK 50 deren 85. Eine Darstellung und Besprechung aller geologischen Klassen macht wenig Sinn. In je

zwei Darstellungen werden jeweils die zehn häufigsten Klassen des Untersuchungsgebiets sowie die zehn rutschungsrelevanten Klassen dargestellt und diskutiert (Abb. 15 und 16). Diese Betrachtungsweise hat den Zweck aus den vielen Klassen diejenigen herauszufiltern, welche einerseits das Untersuchungsgebiet dominieren und andererseits um herauszufinden, ob die dominierenden Klassen auch rutschungsrelevant sind. Die Darstellung der Frequency Ratio im folgenden Abschnitt (6.5.) trägt weitere Werte für die Diskussion der Rutschungsrelevanz bei.

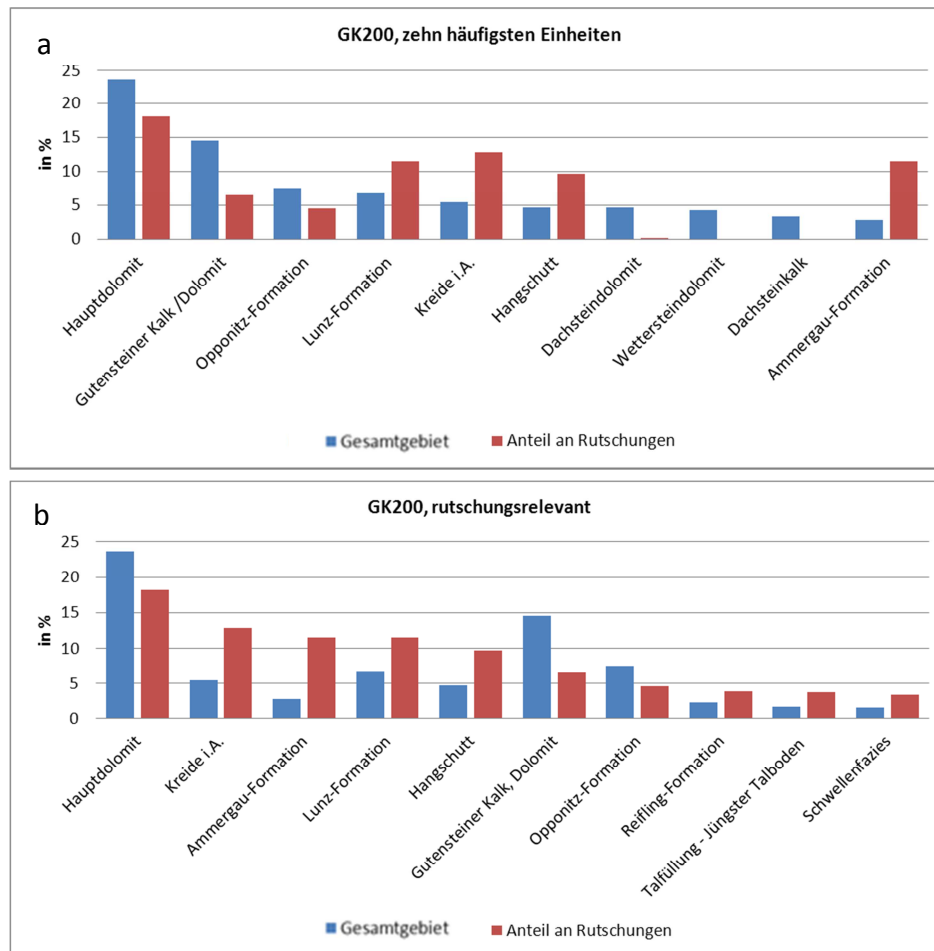


Abb. 15 Frequency Ratio der zehn häufigsten Einheiten der GK 200 oben a) und der zehn rutschungsrelevanten Klassen der GK 200 unten b).

Den größten Flächenanteil des Untersuchungsgebietes machen Klassen der Kalkalpen aus. Hauptdolomit, Greifensteiner Kalk und Opponitzformation. In der GK 200 sind in den hinteren Rängen Klassen von Dolomit, die kaum Rutschungen auslösen. Reiht man nun die Flächen mit den höchsten Rutschungsanteilen, werden die hinteren Ränge neu besetzt mit Schwellenfazies, Talboden und Gesteinen der Reifling- Formation.

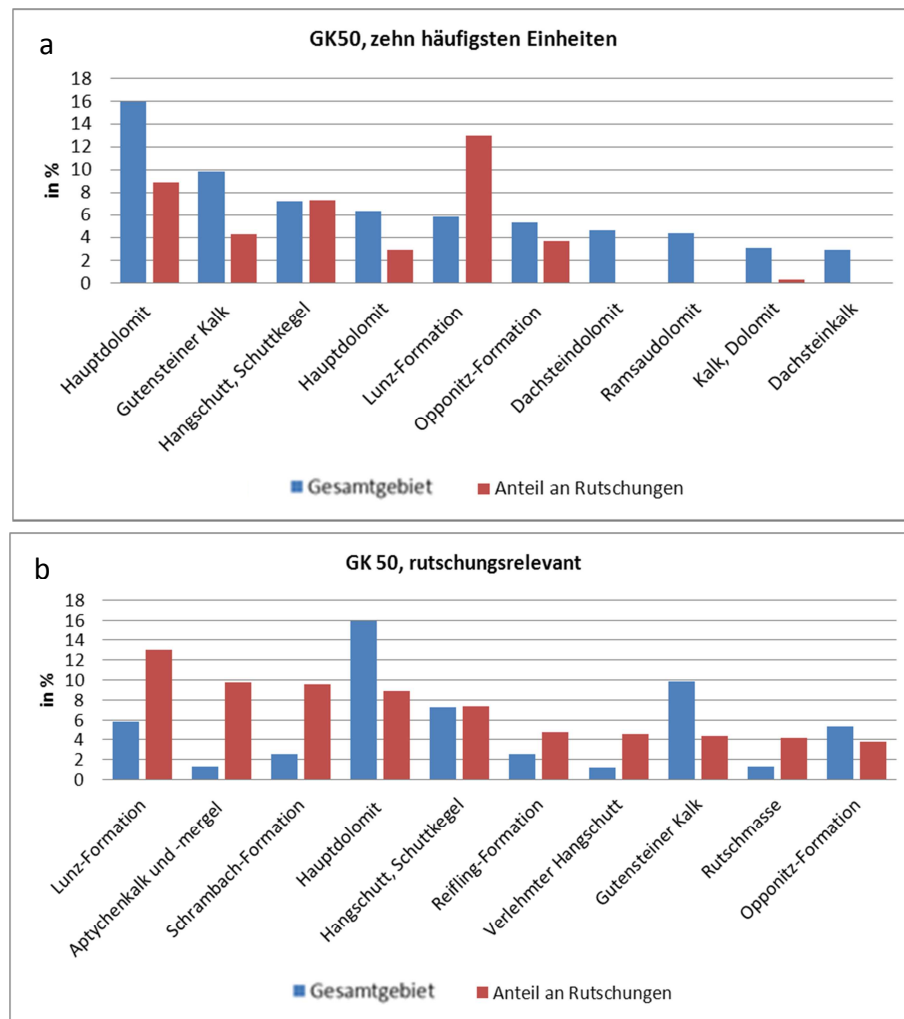


Abb. 16 Frequency Ratio der zehn häufigsten Einheiten der GK 50 oben a) und der zehn rutschungsrelevanten Klassen der GK 50 unten b).

Die GK 50 zeichnet hier ein ähnliches Bild. Die Klasse des Hauptdolomits ist zweimal aufgeführt, da intern zwischen Hauptdolomit der Frankenfels- beziehungsweise der Lunzerdecke unterschieden wird. Wiederum fallen die älteren Schichten aus der Trias Zeit (Dachsteinkalke) aus der rutschungsrelevanten Liste und werden durch quartäre Schichten wie „verlehnter Schutt“ und „Rutschmasse“ ergänzt.

6.5. Frequency Ratio

Die Frequency Ratio setzt sich aus den, bei den Häufigkeitsverteilungen, erhobenen Daten fort. Die Frequency Ratio gewichtet nun das Vorkommen der Rutschungen am tatsächlichen Anteil im Gesamtgebiet. D.h. aus der Frequency Ratio kann man erkennen, wie stark der Einfluss eines Faktors auf Massenbewegungen sein kann. Werte einer Klasse >1 weisen auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Massenbewegungen hin. Werte kleiner als 1 verweisen dementsprechend auf einen kleineren Zusammenhang mit Rutschungen.

Diese Methode wird in dieser Arbeit für die nichtmetrischen Daten genutzt, um einen ersten Überblick über den Einfluss der einzelnen Klassen zu erhalten. Es werden hier nicht alle Werte aufgelistet. Die vollständigen Tabellen zur Frequency Ratio sind im Anhang zu finden.

6.5.1. Frequency Ratio Landbedeckung

Laut der Statistik in Tabelle 6 befinden sich über 80% der kartierten Rutschungen im Waldgebiet. Dies sind auch jene Klassen, die im Untersuchungsgebiet selbst den höchsten Anteil ausmachen. Die Frequency Ratio ist beim Mischwald mit 1.4 besonders hoch. Bei den Siedlungs- und Ackerflächen liegt sie jeweils auf 0.8. Schnee und Wasserflächen werden als Kontrolle mitgeführt und zeigen bei beiden jeweils keine Rutschungen an.

Tab. 6 Frequency Ratio der Rutschungen im Landbedeckungsdatensatz

Klasse	Zahl der Pixel im gesamten Gebiet	% Anteil im gesamten Gebiet	Pixel in Rutschungen	% Anteil an Rutschungen	Ratio
Nadelwald	1172063	37.63	3039	34.58	0.919
Mischwald	656199	21.07	2632	29.95	1.421
Laubwald	540518	17.36	1932	21.98	1.267
Ackerfläche	37136	1.19	86	0.98	0.821
Wiese, Weide	72791	2.34	68	0.77	0.331
Magerwiese	444985	14.29	817	9.30	0.651
Schnee/ Eis	17057	0.55	0	0.00	0.000
Schutt	116096	3.73	113	1.29	0.345
Brachflächen	38528	1.24	62	0.71	0.570
Siedlung	16483	0.53	39	0.44	0.839
Wasser	705	0.02	0	0.00	0.000
Gesamtsumme der Pixel					3114338
Summe der von Rutschungen betroffenen Pixel					8788

6.5.2. Frequency Ratio GK 50

Vergleichsweise hohe Ratio Werte sind in der GK 50 zu finden. Spitzenreiter ist der „Aptychenkalk, Fleckenmergel“ mit einem Frequency Ratio Wert von 31.38. Jedoch nimmt diese Klasse nur rund ein Hundertstel des Untersuchungsgebietes ein. In der GK 50 gibt es noch zwei weitere Klassen mit Aptychenkalk, die flächenmäßig etwas größer sind und Ratio Werte von 1.17 und 8.12 aufweisen. Die nächsttieferen Ratio Werte liegen um den Wert 14. Flyschsandstein hat einen Ratio Wert von 14.64 und die Grestenformation liegt bei 14.42, wobei eine zweite Klasse, welche ebenfalls zur Grestenformation gehört, einen Wert von 9.75 zeigt. Die Grestenformation wird der Kahlenberger

Decke zugeordnet, die wiederum zur Flysch- beziehungsweise der Klippenzone gehört. 20% der Rutschungen fallen in die Rauhwackenzone und haben einen Ratiowert von 11.6.

Die „Rutschmasse mit Abrisskante“ hat einen Ratio Wert von 3.31. Die geologische Karte weist 1.23% des Untersuchungsgebietes als Rutschmasse aus. 4.07% der kartierten Rutschungen befinden sich in der GK 50 ausgewiesenen Kategorie „Rutschmasse“. „Vernässung, Niedermoor“ weist einen Ratio Wert von 6.07 aus. Danach fallen die Ratio Werte schnell ab und verlieren an Gewicht. Der Hauptdolomit als dominierendes Gestein nimmt 16% der Fläche des Untersuchungsgebietes ein und hat einen Ratio Wert von 0.56.

Tab. 7 Ausschnitt aus Frequency Ratio GK 50 (vollständige Tabelle siehe Anhang).

GK 50	Zahl der Pixel im ganzen Gebiet	% Anteil im ganzen Gebiet	Pixel in Rutschungen	% Anteil an Rutschungen	Ratio
Aptychenkalk und -mergel (geschichtet, z.T. mit Hornstein; Tithon - Unterkreide)	37498	1.20	859	9.77	8.12
Aptychenkalk, Fleckenmergel (Tithon-tiefere Unterkreide)	41413	1.33	137	1.56	1.17
Aptychenkalk, Fleckenmergel (Tithon-Unterkreide)	5306	0.17	42	0.48	2.81
Aptychenkalk, Fleckenmergel (vorw. Tithon)	192	0.01	17	0.19	31.38
Flysch-Sandstein	581	0.02	24	0.27	14.64
Gresten-Formation (sandiger Kalk, Mergel, Mergelkalk; Lias-?Dogger)	109	0.00	3	0.03	9.75
Gresten-Formation, inkl. Posidonienschichten (sandiger Kalk, Mergel, Mergelkalk; Lias-Dogger)	762	0.02	31	0.35	14.42
Rauhwacke	550	0.02	18	0.20	11.60
Rutschmasse mit Abrisskante	38274	1.23	358	4.07	3.31
Vernässung, Niedermoor	4557	0.15	78	0.89	6.07

6.5.3. Frequency Ratio GK 200

Die höchsten Ratio Werte können der Flyschzone und den nördlichen Kalkalpen zugeordnet werden. Im Begleitheft der GK 200 steht zur Flyschzone: „Die Flyschzone ist eine walddreiche Mittelgebirgslandschaft mit meist tiefen Verwitterungsböden und oberflächlichem Gekriech. Die Gesteinsfolgen sind weitgehend wasserundurchlässig, mergelreiche Partien sind rutschanfällig, bei Starkregen besteht Hochwassergefahr“ (SCHNABEL, 2002 S. 34). Mit 4.48 trägt die Zementmergelserie, welche zur Flyschzone gehört den höchsten Ratio - Wert, dicht gefolgt von einer weiteren Flyschschicht „Höhere Flyschschichten“ mit 4.13. Beide Klassen bedecken nicht

einmal ein Prozent des Untersuchungsgebietes. Die Aptychenschichten in der GK 200 hier „Ammergau-Formation“ genannt, haben mit 4.06 ebenfalls eine hohe Rutsch tendenz. Diese Klasse nimmt 2.84% des Untersuchungsgebietes ein. Den Ratio Wert um 2 haben Kalksteine aus Kreide und Jura, sowie Talfüllungen (2.16) und Hangschutt (2.06) aus dem Quartär. SCHNABEL, 2002 schreibt über die Kreidezone, dass die tonig mergeligen Gesteine in der Schichtfolge die Ausbildung tiefer Verwitterungsböden begünstigen, wasserstauende Wirkung haben und bei entsprechender Hanglage zu Rutschungen neigen.

In der GK 200 ist eine Klasse „Rutschhang, Massenbewegung, Sackungsmasse“ aufgelistet. Diese bedeckt 1.21% des Untersuchungsgebietes. 2.25% der kartierten Rutschungen fallen in diese Klasse, was einem Ratio Wert von 1.85 entspricht.

Hauptdolomit (23.66%) und Gutensteiner Kalk und -Dolomit (14.58%) sind die am stärksten vertretenen Klassen im Untersuchungsgebiet.

Tab. 8 Ausschnitt aus Frequency Ratio GK 200 (vollständige Tabelle siehe Anhang).

GK 200	Zahl der Pixel im ganzen Gebiet	% Anteil im ganzen Gebiet	Pixel in Rutschungen	% Anteil an Rutschungen	Ratio
Hauptdolomit; Norium (Dolomitstein, bankig)	736812	23.66	1594	18.14	0.77
Kreide i.A.	171031	5.49	1129	12.85	2.34
Ammergau-Formation (Aptychenschichten, z.T. inkl. Schrambach-Formation); Ober-Jura - Unter-Kreide (Mergelkalkstein, hell, dünnbankig)	88480	2.84	1014	11.54	4.06
Lunz-Formation; Unterer Karnium (Sandstein, feinkörnig, Steinkohle)	212489	6.82	1013	11.53	1.69
Hangschutt	146702	4.71	854	9.72	2.06
Gutensteiner Kalk + Dolomit; Anisium (Kalkstein, Dolomitstein, bankig, dunkel)	454105	14.58	571	6.50	0.45
Talfüllung - Jüngster Talboden (Kies, Auelehm)	53830	1.73	328	3.73	2.16
Schwellenfazies; Unter - Ober-Jura (Kalkstein, überwiegend rot, z.T. spätig)	49576	1.59	298	3.39	2.13
Höhere Flyschschichten i.A.; Obere Ober-Kreide - Paleozän	21539	0.69	251	2.86	4.13
Allgäu-Formation; Unter-Jura (Fleckenmergelkalk)	36245	1.16	218	2.48	2.13
Rutschhang, Massenbewegung, Sackungsmasse	37727	1.21	198	2.25	1.86
"Klippen"; Mittel-Jura bis Unter-	8944	0.29	64	0.73	2.54

Kreide (Kalkstein, Mergelstein, z.T. bankig)					
Zementmergelserie und Perneck-Formation; Santonium - Campanium (Kalksandstein und Mergelstein, hellgrau)	3478	0.11	44	0.50	4.48

6.5.4. Diskussion zu den Häufigkeitsverteilungen und der Frequency Ratio

Die Häufigkeitsverteilungen alleine zu betrachten, würde nur ein unvollständiges Bild ergeben. Denn die Frequency Ratio bezieht den Einfluss der einzelnen Klassen auf das Gesamtgebiet mit ein. So verliert der Hauptdolomit in beiden Karten GK 50 und GK 200 in beiden Häufigkeitsdiagrammen an Bedeutung. In der Literatur gilt der Hauptdolomit durch seine bankige Struktur als eher stabil. Als ebenso stabil wird der Gutensteiner Kalk betrachtet (SCHNABEL, 2002).

Bei beiden Karten nimmt der Aptychenkalk eine besondere Stellung ein. In Bezug auf das Gesamtgebiet macht dieser nur einen kleinen Teil aus, wird dort aber überdurchschnittlich oft mit Rutschungen kartiert. Betrachtet man das Hillshade, so sind dort besonders weiche Formen zu beobachten. WESSELY, 2006 S. 141 bestätigt die Rutschungsanfälligkeit der Ammergau Formation durch die interne Brekzienbildung und intensive Faltung. Die feingliedrigere Unterteilung der GK 50 bringt dies noch mehr zum Ausdruck. Trotzdem ist bei der Interpretation Vorsicht geboten, denn bei der GK 50 umfasst die Aptychenschicht, mit einer Ratio von 31.38, gerade einmal 192 Pixel, was theoretisch in einer einzigen Rutschung Platz finden kann. Eine durchschnittliche Rutschung hat einen Flächenanteil von 2142m² und die kleinste Rutschungsfläche 106m². So können sehr kleine Flächen von einem einzelnen Ereignis erfasst werden, was wiederum eine Verallgemeinerung auf das Gesamtgebiet problematisch werden lässt.

Neben den geologischen Einheiten sind die beiden signifikant herausragenden Landbedeckungseinheiten der Wald- und Siedlungsflächen eingehender zu diskutieren. FREHNER *et al.*, 2005 arbeiteten die Schutzwirkung des Waldes in Bezug auf Naturgefahren aus. Dabei differenzieren sie die Ausgangslage je nach Naturgefahr und im Bereich der Massenbewegungen in flachgründige und tiefgründige Rutschungen. Bei flachgründigen Rutschungen trifft dies den Wurzelbereich eines Waldes. Insofern haben tiefwurzelnende Bäume eine Schutzwirkung in Bezug auf die Rutschanfälligkeit.

In forstwirtschaftlich intensiv genutzten Wäldern wird die Schutzwirkung des Waldes hinabgesetzt, wenn zum Beispiel vorwiegend die für Windwurf anfällige Fichte angepflanzt wird oder es zu Bodenverdichtungen durch unsachgemäße Waldbewirtschaftung kommt (FREHNER *et al.*, 2005, *Anhang 1*). Leider geht aus den Landbedeckungsdaten nicht hervor, welche Baumarten die jeweilige Klasse umfasst. Bei den Laubbaumarten gibt es auch Unterschiede in der Verwurzelung. So eignen sich laut FREHNER *et al.*, 2005 besonders die Esche, Schwarzerle oder die Ulme für Schutzfunktionen. Da in der Rutschungskartierung keine Altersangaben gemacht werden können, ist die Deutung von Zusammenhängen auch in Bezug auf den Wald heikel. Es ist nicht klar, ob die

Massenbewegungen während einer gerodeten Phase aufgetreten sind, oder ob etwa die Gewichtslast der Bäume Rutschungen auszulösen vermochte.

6.6. Ergebnisse aus der Modellierung

In der Modellierung mit R werden die nicht metrischen Daten nun als Faktoren (Dummy Variablen) weiter geführt.

Tabelle 9 erklärt die im Modellnamen befindlichen Abkürzungen. Diese Abkürzungen führen durch sämtliche Modellierungsschritte und finden sich auch im Namen der Gefahrenhinweiskarten wieder. Wenn die Modelle gerechnet wurden, wo die kategorialen Datensätze durch die mittels Frequency Ratio gewichteten Datensätze gerechnet wurden, so sind diese jeweils mit einem „a“ gekennzeichnet.

Tab. 9 Erläuterung zu den verwendeten Abkürzungen in Tabelle 10.

Modellparameter	Erklärung
s	Hangneigung
d	Höhe
plc	horizontale Wölbung
prc	vertikale Wölbung
n	Landbedeckung
tk200	Tektonik (GK 200) nicht klassifiziert
tk50	Tektonik (GK 50) nicht klassifiziert
g*	GK 200
g*	GK 50
eu200_313	Tektonik 313m GK 200
eu200_100	Tektonik 100m GK 200
eu50_313	Tektonik 313m GK 50
eu50_100	Tektonik 100m GK 50

*GK 200 oder GK 50 meist in der Tektonik angegeben

Tabelle 10 zeigt einen Überblick über die einzelnen Modelle und deren statistische Gütemaße. Im Modellnamen sind die einzelnen Inputparameter angegeben. Die Liste ist bei weitem nicht vollständig. Es wurde der Fokus auf die besten Ergebnisse gelegt. In den kommenden Absätzen und in der Diskussion wird immer wieder auf diese Tabelle Bezug genommen. Die rot markierten Modelle werden in den Ergebnissen eingehend präsentiert.

Tab. 10 Überblick über die in R gerechneten Modelle (Auswahl)

Modell	Modellname	s	d	plan_curv	prof_curv	gk50	gk200	tk50	tk200	eu50_100	eu200_100	eu50_313	eu200_313	n	AIC	AUROC Train	AUROC Test
1	sdprcgtn50	x	x		x	x		x						x	1083	0.85	-*
2	sdprcgtn200	x	x		x		x		x					x	1115	0.82	-
3	sdprcgeu50_100n	x	x		x	x				x				x	1049	0.87	-
4	sdprcgeu200_100n	x	x		x		x				x			x	1099	0.83	-
5	sdprcgeu50_313n	x	x		x	x						x		x	1083	0.85	-
6	sdprcgeu200_313n	x	x		x		x						x	x	1110	0.82	-
7	sdplcgtn50	x	x	x		x		x						x	1079	0.85	-
8	sdplcgtn200	x	x	x			x		x					x	1110	0.82	-
9	sdplcgeu50_100n	x	x	x		x				x				x	1046	0.87	-
10	sdplcgeu200_100n	x	x	x			x				x			x	1095	0.83	-
11	sdplcgeu50_313n	x	x	x		x						x		x	1080	0.86	-
12	sdplcgeu200_313n	x	x	x			x						x	x	1104	0.82	-
13	sdplcgtk50	x	x	x		x		x							1075	0.85	-
14	sdplcgtk200	x	x	x			x		x						1113	0.81	0.77
15	sdplcgeu50_100	x	x	x		x				x					1041	0.86	-
16	sdplcgeu200_100	x	x	x			x				x				1095	0.82	0.77
17	sdplcgeu50_313	x	x	x		x						x			1076	0.85	-
18	sdplcgeu200_313	x	x	x			x						x		1107	0.81	0.76
19	splcgtk50	x		x		x		x							1103	0.84	-
20	splcgtk200	x		x			x		x						1150	0.79	0.75
21	splcgeu50_100	x		x		x				x					1068	0.85	-
22	splcgeu200_100	x		x			x				x				1127	0.80	0.76
23	splcgeu50_313	x		x		x						x			1104	0.84	-
24	splcgeu200_313	x		x			x						x		1141	0.79	0.75
25	splcgtk50n	x		x		x		x						x	1112	0.84	-
26	splcgtk200n	x		x			x		x					x	1155	0.80	-
27	splcgeu50_100n	x		x		x				x				x	1075	0.86	-
28	splcgeu200_100n	x		x			x				x			x	1133	0.81	-
29	splcgeu50_313n	x		x		x						x		x	1112	0.84	-
30	splcgeu200_313n	x		x			x						x	x	1147	0.80	-

*AUROC Werte für den Testdatensatz konnte nicht berechnet werden, die beiden Stichproben haben unterschiedliche Klassen.

6.7. Ergebnisse aus der Modellierung AIC- und AUROC Werte

Grundsätzlich hatten alle Modelle mit der Geologie GK 200 höhere, also schlechtere AIC Werte als die zu vergleichenden Modelle mit der GK 50 als Inputparameter. Die AUROC Ergebnisse sind erwartungsgemäß für die Trainingsdatensätze besser als für die Testdatensätze. Es fehlen einige AUROC Werte für die Testdaten, weil die beiden Stichproben unterschiedliche Klassen beinhalten. Dies führt dazu, dass R den AUROC Wert nicht berechnen kann, wenn die Klassen nicht ident sind. Bei der Landbedeckung schließt der Testdatensatz zwei Punkte der Klasse „Schatten“ mit ein, wo eine Darstellung eines AUROC Wertes ebenso unmöglich ist.

Die Unterschiede in den AUROC Werten zwischen den beiden lithologischen Grundlagen beträgt um 0.5, dies entspricht auch dem Unterschied zwischen den Test- und Trainingsdatensätzen. Der höchste AUROC Wert beträgt 0.87 (Modell 9, GK 50) und der niedrigste Wert 0.79 wird dem Modell 24 (GK 200) zugeordnet. Diese Werte sind alle sehr gut. In der Literatur werden Werte zwischen 0.7 und 0.9 als gut beschrieben. Werte über 0.9 werden als zufällige Werte gewertet und Werte unter 0.7 deuten auf eine schlechte Qualität hin. Je weiter die Werte Richtung 0.5 zurückgehen, desto zufälliger sind sie.

Der AIC Wert gilt als relatives Maß und wird nur innerhalb gleicher Gruppen betrachtet. In allen Modellen waren alle Formen der Exposition (Klassifizierte Exposition bzw. Sinus oder Cosinus modifiziert) nicht signifikant. Die Hangneigung und die Geologie wurden immer als hoch signifikant ausgewiesen, so auch in den meisten Fällen alle Formen der Tektonik. Große Schwankungen in der Signifikanz zeigt die Landbedeckung.

Erwähnenswert ist auch, dass die AUROC Werte in den Modellen auf der Basis der GK 200 in den Trainingsdatensätzen meist niedriger sind, als jene in den GK 50 Modellen. Sie können sich um bis zu vier Zähler unterscheiden. Der schwächste AUROC Wert in den hier vorgestellten Modellen beträgt 0.79 und der höchste Wert liegt sehr hoch bei 0.87.

In Abbildung 17 ist die AUROC Kurve exemplarisch für das Modell 27a und 28a dargestellt. Sie zeigt die Werte jeweils für den Test- und den Trainingsdatensatz. Die „Sensitivity“ zeigt den Prozentsatz an korrekt klassifizierten Rutschungen (True positive rate) an und die „Specitivity“ (False positive rate) drückt das Maß an korrekt ausgewiesenen Nicht-Rutschungspunkten aus. Eine Diagonale würde den AUROC von 0.5 beschreiben, so dass alle Werte zufällig verteilt wären. Ein Wert über 0.9 deutet ebenfalls auf eine zufällige Verteilung beziehungsweise auf eine Überbewertung hin. Die beiden Kurven sind einander auf den ersten Blick sehr ähnlich. Beim Testdatensatz hat die Kurve nach 0.8 einen Knick, beim Trainingsdatensatz fällt dieser weg. Dafür ist ein deutlicher Knick knapp unter 0.8 zu sehen. Dies bedeutet, dass die Modellwerte bei unterschiedlichen Schwellenwerten mit einem Gefährdungsanstieg reagieren. Vereinfacht erklärt: Eine AUROC Kurve mit nur wenigen Klassen würde eine treppenartige Struktur aufweisen. Die visualisierten Kurven wurden hier lediglich dazu genutzt, um allfällige Modellierungsfehler aufzudecken.

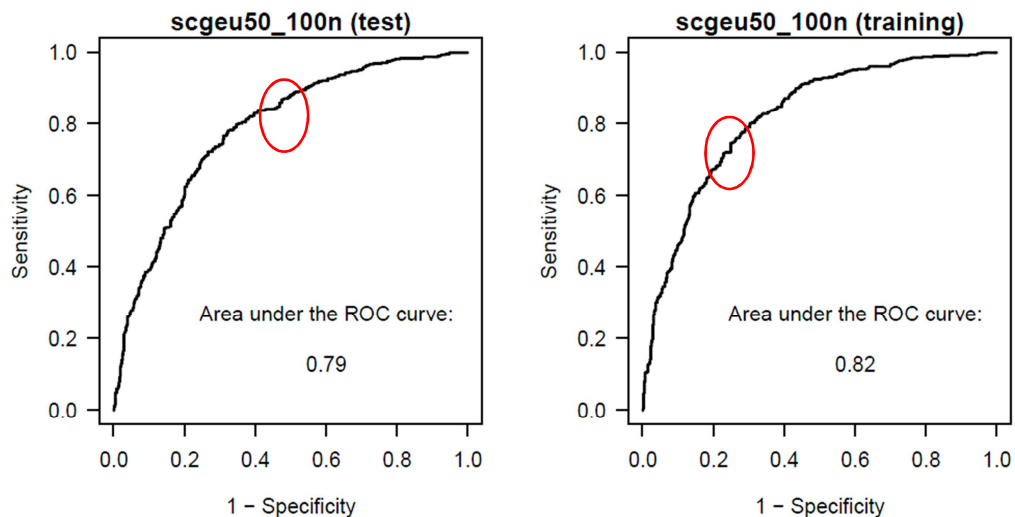


Abb. 17 AUROC Kurve und zugehöriger Wert des Modells 27a und 28a (gewichtete Modellierung) aus Hangneigung, Wölbung, geologische Karte, Tektonik mit Abstand 100m Landbedeckung für Test und Trainingsdatensatz. Im Modellnamen sind die einzelnen Komponenten abgekürzt aufgeführt. Exemplarisch in der GK 50 Variante.

6.8. Gefahrenhinweiskarten

Nun werden exemplarisch zwei Modelle miteinander verglichen um einen Überblick zu erhalten, wie sich die Modellierungsergebnisse visuell unterscheiden und auch wie sich die Unterschiede zwischen den beiden Kartengrundlagen der GK 50 und GK 200 von einander abheben.

Die in R ermittelten Regressionswerte wurden mit dem Rastercalculator in ArcMap berechnet, um die Gefährdungen pro Pixel zu ermitteln. Diese werden nun in der Gefahrenhinweiskarte klassifiziert dargestellt. In den Gefahrenhinweiskarten sind jeweils im oberen Ausschnitt die Ergebnisse der GK 50 visualisiert und darunter die der GK 200.

Die in diesem Kapitel gezeigten Gefahrenhinweiskarten wurden nach gleichen Gefährdungsintervallen (equal interval) in vier Klassen unterteilt, um gleiche Bedingungen für alle Ausgangskarten zu schaffen und diese so untereinander vergleichbar zu machen. Durch die Wahl von vier Klassen nach gleichen Intervallen sind keine Vorannahmen oder Vorwissen von Nöten und dadurch ergibt sich eine möglichst objektive Herangehensweise.

6.8.1. Gefahrenhinweiskarten - Beschreibung des Modelle 25 und 26

Die Modelle 25 und 26 beinhalten die Inputparameter Hangneigung, horizontale Wölbung, die Lithologie, die Landbedeckung, sowie die unklassifizierte Tektonik als metrischen Datensatz. Die beiden Modelle sind in Abbildung 18 dargestellt.

Die Klassen der Geologie scheinen in ihrer Form besonders im Modell 25 durch. Diese sind besonders gut sichtbar im westlichen Bereich der Karte, wo ein dunkles Violett mit klaren Grenzen

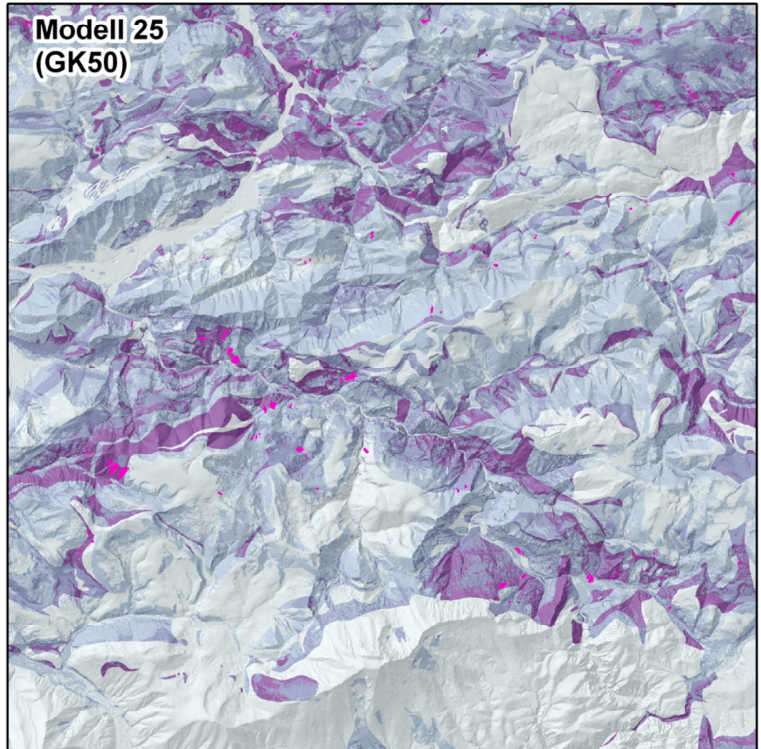
dominiert, welches den Aptychenkalk repräsentiert. Auch im Nordnordosten sieht man ein ähnliches Bild mit durchscheinenden Grenzen der einzelnen geologischen Einheiten. Einen raschen Wechsel von Gefährdungsklassen ist im Norden deutlich sichtbar. Allgemein hohe Gefährdungen sind im Norden zu finden, wo die Flyschzone die Kalkalpen langsam ablöst und die Tektonik besonders aktiv ist. Es sind auch einzelne Artefakte von hohen Gefährdungen dargestellt, als Inseln in mitten des niedrig gefährdet eingestuften Hauptdolomits. Es ziehen sich auch kurze, schlangenförmige Artefakte durchs Bild. Besonders deutlich ist dies im Südwesten der Karte wiederum inmitten des Hauptdolomits sichtbar. Flache Gebiete, insbesondere Täler werden durch eine niedrige Gefährdung ausgedrückt. Die höchsten Gefährdungen zeigen sich eher in tieferen Lagen. Eine dreieckförmige Fläche im südlichen Teil der Karte ist mit hoher Gefährdung ausgezeichnet. Die Klassengrenzen entsprechen der Geologischen Klasse „Rutschmasse mit Abrisskante“. Im Modell 26 kommt diese Klasse nicht vor. In diesem Gebiet gibt es kaum höchste Gefährdungsstufen.

Im Modell 26 ist es ähnlich wie im Modell 25 (GK 50). Es scheinen hier die Aptychenkalke sehr deutlich durch. Diese sind durchgängig als sehr hoch gefährdet klassifiziert und weisen innerhalb der Klasse kaum eine Abstufung auf. Die oben erwähnten Artefakte scheinen, wenn auch in etwas abgeänderter Form, auch hier auf. Die schlangenförmigen länglichen Artefakte verblassen, dafür sind die inselförmigen Gebiete (Bunter Kalk) innerhalb des Hauptdolomits, im südlichen Teil der Karte stärker ausgeprägt. Es gibt sehr wenige Gebiete mit einer geringen Gefährdung. Die mittleren Gefährdungsklassen überwiegen. Die Klassengrenzen sind vor allem im nördlichen vom Flysch geprägten Gebiet fließender als im Modell 25.

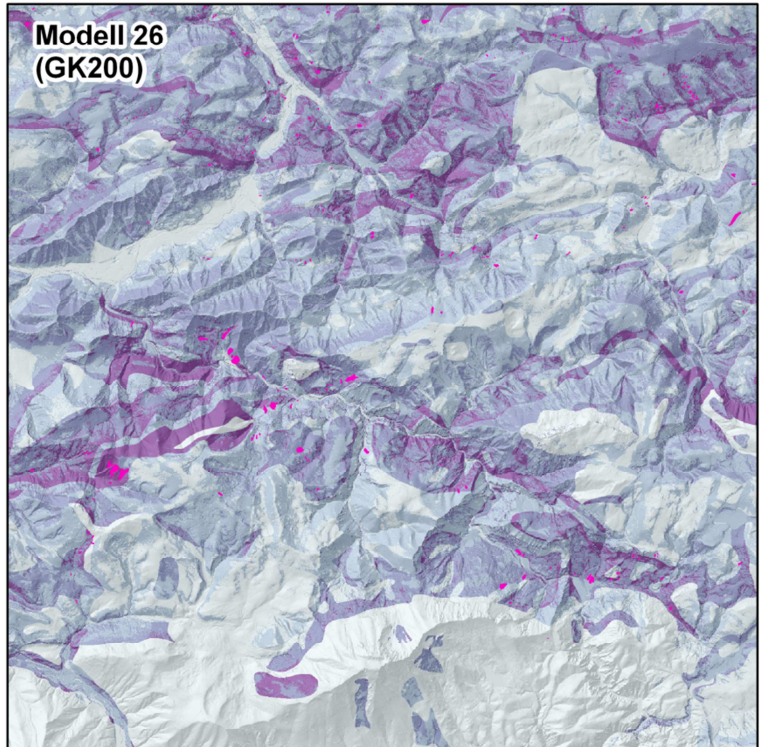
Gefahrenhinweiskarte (scgktn) "Equal interval"

Gefahrenhinweiskarte mit
4 Klassen;
Einteilung Equal interval.

**Modell 25
(GK50)**



**Modell 26
(GK200)**



Modellparameter

Hangneigung
GK200 / GK50
Tektonik 200 / 50
Landbedeckung
Wölbung

Gefährungsklassen

- Massenbewegungen
- gering (0 - 0.25)
- mäßig (0.25 - 0.5)
- hoch (0.5 - 0.75)
- sehr hoch (0.75 - 1)

Modellinput:
DGM, Situation, Grenzen:
© Land Niederösterreich
Geologische Daten:
© GBA 2009-ZI.-383-09
Modell, Layout, Rutschungskartierung:
© Christine Gassner, 2011

0 1 2 4 km



Abb. 18 Gefahrenhinweiskarte (scgktn) auf Basis der GK 50 (oben) und auf Basis der GK 200 (unten). Gefährdung aufgeteilt in 4 Klassen mit den Modellierungsparametern: Hangneigung, GK, Tektonik (unklassifiziert), Landbedeckung und der Wölbung.

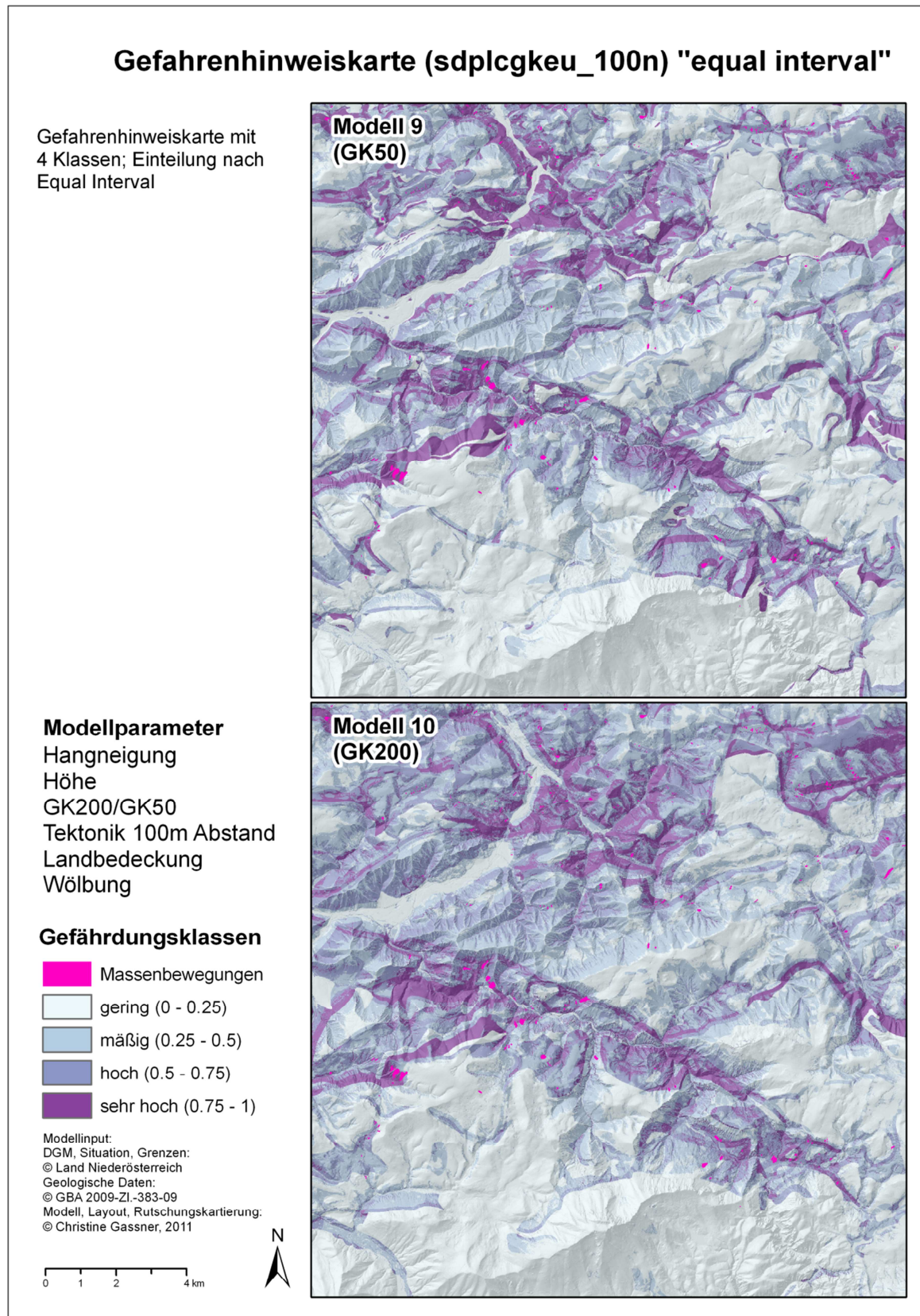


Abb. 19 Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 und 10 (sdplcgkeu100n) auf Basis der GK 50 (oben) und auf Basis der GK 200 (unten). Gefährdung aufgeteilt in 4 Klassen mit den Modellierungsparametern: Hangneigung, Höhe, Lithologie, Tektonik (100m Puffer), Landbedeckung und der Wölbung.

6.8.2. Gefahrenhinweiskarten - Beschreibung der Modelle 9 und 10

Die Modelle 9 und 10 (vollständig abgedruckt in Abb. 19) lieferten die höchsten AUROC Werte. Auf den ersten Blick fallen die schlauchförmigen Artefakte auf, die sich quer durch beide Karten ziehen. Die Tektonik als Dummy Variable hat die beiden Modelle stark beeinflusst. Die Gebiete mit geringer Gefährdung haben bei beiden Modellen einen hohen Anteil. Hohe Gefährdungen ziehen sich hauptsächlich entlang tektonischer Grenzen durch das gesamte Gebiet, welches die Dummy Variable mit einem 100 Meter Puffer deutlich markiert. Die beim Modell 25 erwähnte „Rutschmasse mit Abrisskante“ wird im Modell 9 stärker durch die tektonischen Einflüsse überlagert. Dies ist durch den schmalen, waagrechten Streifen ersichtlich.

Im Norden der Karten zeigen sich die Unterschiede zwischen den beiden Modellen deutlich. Das Modell 9 (GK 50) hat hohe Gefährdungen bis zum Hangfuß. Beim zweiten Modell sind es hohe Gefährdungen in Bänderform in der Mitte eines Hanges. Ein Ausschnitt in Abbildung 20 verdeutlicht diese Zusammenhänge. In Abbildung 20 b) fallen einige Rutschungen nicht in hoch gefährdetes Gebiet. Dies deckt die Datengrundlage der GK 50 in Abbildung 20 a) besser ab. Andererseits sind im Modell 10 (GK 200) Gebiete mit hoher Gefährdung nicht pauschal über den Hang, sondern abgestuft dargestellt. In Modell 9 werden diese Gebiete eher pauschal als ausgefüllte, dunkel gefärbte Gebiete reproduziert. Im vergrößerten Ausschnitt ist in Abbildung 20 a) am ostexponierten Hang im Zentrum der Karte ein schmales Band nicht als hoch gefährdet ausgewiesen, dafür sind die Gebiete bis zum Hangfuß als hoch gefährdet eingetragen. Beim Beispiel in Abbildung 20 b) sind diese Gefährdungswerte genau konträr.

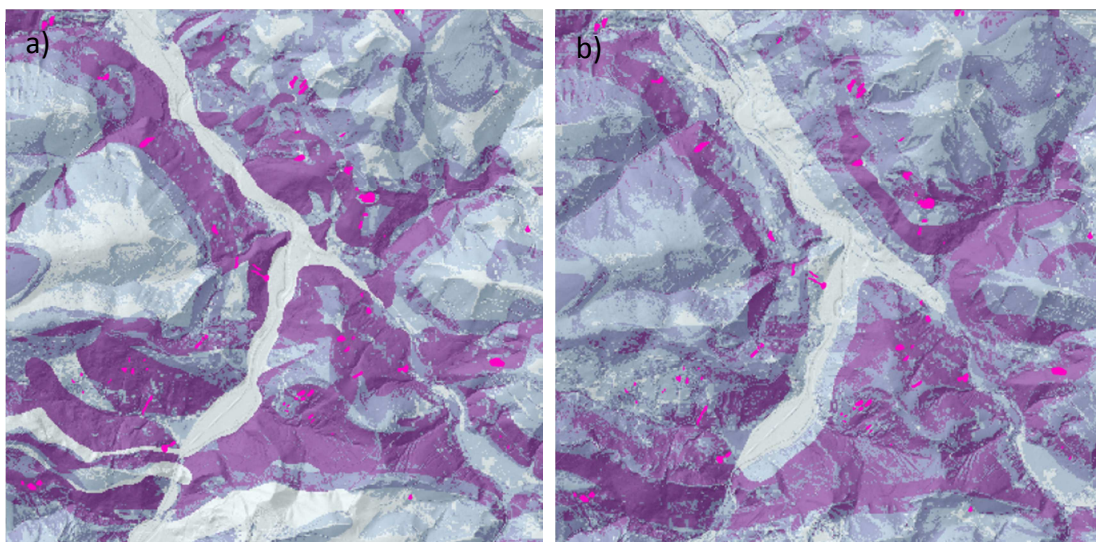


Abb. 20 Ausschnitt aus den Gefahrenhinweiskarten der Modelle a) 10a (GK 50) links; und b) 9a (GK 200) rechts.

6.9. Diskussion Modellierung und Statistik

Die logistische Regressionsanalyse ist im Bereich der Forschung an Hangrutschungen eine beliebte Methode. Ein Vorteil der logistischen Regression ist, dass die Werte nicht normalverteilt sein müssen. Aber zu einer Bedingung gehört die Unabhängigkeit der erklärenden Variablen. Für manche Fragestellungen mag es ein Nachteil sein, wenn die abhängige Variable nur dichotome Werte zu lässt (BAI *et al.* 2010).

Dieser Methode gehören einige weitere Grundannahmen an, welche in der Diskussion der Ergebnisse wesentlich sind. So geht man davon aus, dass die erklärenden Variablen alle unabhängig sein müssen und nicht autokorrelieren. Es können unterschiedliche Datenniveaus ins Modell aufgenommen und auch kombiniert werden. Als grundsätzlicher Vorteil dieser Methode gegenüber anderen ist anzuführen, dass die zugrundeliegende Statistik einfach nachvollziehbar ist. Bei komplexen Verfahren, wie zum Beispiel neuronalen Netzwerken, wo ein System sich selber weiterentwickelt besteht die Gefahr, dass man die Fehler nicht mehr klar den einzelnen Komponenten zuordnen kann, beziehungsweise eine Interpretation der Zwischenschritte komplexer würde.

6.9.1. Diskussion zur Stichprobengröße

Über die Anzahl der Stichprobe für die Modellierung gibt es verschiedene Ansichten. ATKINSON und MASSARI (1998) wählten die Anzahl Rutschung zu rutschfreien Gebieten proportional zu deren Vorkommen im gesamten Untersuchungsgebiet. BRENNING, 2005 wählte die Anzahl 1:1. Da man in dieser Arbeit nicht davon ausgehen kann, dass alle Rutschungen erfasst wurden, wurde die Methode von BRENNING, 2005 angewandt. Die Stichprobe an sich kann nicht wirklich zufallsverteilt sein. Denn die kleine Anzahl an Rutschungen gibt ja genau die Auswahl vor, in dem mindestens ein Punkt pro Massenbewegung in die Stichprobe einfließt. GUNS und VANACKER, 2012 haben dieses Problem auch in ihrer Publikation angesprochen. Sie haben eine Vielzahl an Stichproben aus den rutschungsfreien Gebieten gezogen, damit sie den Datensatz für die Validierung nicht zusätzlich unterteilen und zugleich ihre Stichprobe schmälern mussten.

Wie bereits erwähnt, ist eine weitere Bedingung für die Durchführung einer logistischen Regression, dass die Datensätze nicht autokorreliert sein dürfen. Sowohl der Test Moran's I (räumliche Korrelation), als auch der Durbin Watson Test („lmtest“ Package, zeitliche Korrelation) waren in diesem Falle positiv. Dies bestätigt TOBLER, 1970 first law of geography: "Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things." Dies trifft auch auf das Auftreten von Hangrutschungen zu.

6.9.2. Diskussion zur Wahl der erklärenden Variablen

Ein weiterer Grund für den Ausschluss von Variablen ist die Korrelation mit einer anderen erklärenden Variable. Es wurde auf Multikollinearität getestet (Variance Inflation Factor, „car“-package). Keine Variable überschritt den Wert 4. Über die Höhe eines zulässigen VIF Wertes gibt es in der Literatur verschiedene Angaben. LIN, 2008 lässt einen Wert bis 10 zu. GUNS und VANACKER (2012) setzen den Wert auf <2 an. Im Vergleich zu den anderen Inputvariablen hatte jedoch die Lithologie den höchsten Wert. VAN DEN EECKHAUT *et al.* (2010) kamen bei der Lithologie auf ein ähnliches Ergebnis ihrer VIF Werte. Auch sie hatten darauf hingewiesen, dass die lithologischen Einheiten mit der Hangneigung und der Höhe zusammenhängen. Hieraus wird auch deutlich, wie sehr die Topologie durch die Geologie geprägt wird. Trotz dieser Modellannahmeverletzung wurden diese Variablen beibehalten, weil sie den AIC Wert tief halten.

6.9.3. Diskussion der Lithologischen Einheiten in der Modellierung

Bislang wurden die eigentlichen Werte aus der Modellierung für die einzelnen lithologischen Klassen außer Acht gelassen. Regressionswerte aller Inputparameter untereinander zu vergleichen, ist nicht zulässig. Eine Standardisierung der einzelnen Elemente wäre notwendig. Um aber dennoch eine Aussage machen zu können, wäre die Odds Ratio der Regressionswerte (β -Werte) zu berechnen. Diese kann direkt durch den Exponenten der Regressionswerte ermittelt werden. Die Odds Ratio gibt keinen Absolutwert als Grundlage, sondern die Stärke eines Zusammenhangs von zwei Merkmalen wieder. Dies entspricht der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens des zweiten Merkmals in Bezug zum ersten (MÜHLENDahl, 1998), wobei die „Referenzklasse“ in der Interception enthalten ist. Für die Modellierung der lithologischen Faktoren (und auch diejenigen der Landbedeckung) bedeutet dies, dass eine Klasse nicht in der Tabelle aufgeführt wird, weil ebendiese in der Steigung enthalten ist. (siehe Anhang)

Beide Lithologien beinhalten Klassen „Rutschhang, Massenbewegung, Sackungsmasse“ beziehungsweise „Instabiler Hangbereich mit Rutsch tendenz und Rutschmasse mit Abrisskante“. Dies bedeutet, dass als Rutschung kartierte Werte in der erklärenden Variable integriert sind. Dies ist eigentlich nicht zulässig. Da aber Grundlagen zum Untergrund fehlen, wurden diese beiden Klassen dennoch als eigene Kategorie mitgeführt.

Im Ergebnis sind die Werte der „Massenbewegungskategorien“ in der Lithologie weder in den Modellen 9 und 10, noch in den Modellen 25 und 26 signifikant. Es ist darauf hinzuweisen, dass die kartierten Rutschungen nicht, beziehungsweise nur zum Teil, mit den in den geologischen Karten als Massenbewegungen ausgewiesenen Klassen übereinstimmen. Strenggenommen müssten diese Klassen aus der Wertung entfernt werden. Es ist zu diskutieren, ob in einer geologischen Karte, Massenbewegungen als eigene Kategorie flächendeckend einzutragen sind. Viel eher würde ein

Ringpolygon mit darunterliegenden lithologischen Informationen einen Mehrwert bringen, auch wenn die Lesbarkeit dadurch eingeschränkter würde.

6.9.4. Anmerkungen zur Kartographie und Farbgebung

Nach kartographischen Gesichtspunkten spielt die Farbe als graphische Variable eine bedeutende Rolle. Durch die Fülle an Möglichkeiten, die Karten medial aufzubereiten, gilt es auch technische Rahmenbedingungen zu beachten. Es eignen sich nicht alle Farbkombinationen für die Drucklegung. Auch die Farbpalette für Bildschirmanzeigen ist begrenzt. Die Karten dieser Arbeit stützen sich auf die Empfehlungen von MACEACHREN *et al.*, 2005 oder BREWER und HARROWER, 2002. Es wurde sowohl auf eine Printer freundliche Ausgabe, als auch auf die Bildschirmtauglichkeit der Farben geachtet.

6.10. Validierung der klassifizierten Gefahrenhinweiskarten

Neben den Validierungsverfahren für die Modellierung, wie dem AUROC Wert, besteht noch eine weitere Möglichkeit, die Qualität der Gefahrenhinweiskarten zu untersuchen. Um die Ergebnisse der (**klassifizierten**) Gefahrenhinweiskarten bewerten zu können, werden die Übereinstimmungen der Gefährdungen mit den tatsächlichen (kartierten) Rutschungen einander noch einmal gegenübergestellt. Es soll nicht nur überprüft werden, wie viele Rutschungen in die höchste Gefährdungsklasse fallen, sondern auch umgekehrt, wie oft die Karte Gefährdungen anzeigt, wo keine Rutschungen vorhanden sind. Diese Auswertung erfolgte über eine Neuberechnung im Spatial Analyst (Arc GIS) und in Anschluss daran durch eine Weiterverarbeitung in Excel.

Die grün unterlegten Felder markieren den Anteil an richtig klassifizierten Anteilen und unterstreichen damit die Aussagkraft der Gefahrenhinweiskarte hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials. Das sind sowohl Gebiete mit hoher Gefährdung, wo tatsächlich auch eine Rutschung kartiert (und grün markiert) wurde, als auch jene Werte, wo keine Gefährdung ausgewiesen wurde und bisher auch keine Rutschung stattfand. Je größer der richtig klassifizierte, grün markierte Bereich ist, desto besser ist die Qualität der Gefahrenhinweiskarte. Orange unterlegt sind jene Werte, die als hoch gefährdet ausgewiesen sind, jedoch (noch) nicht durch eine Rutschung verifiziert wurden. Die roten Felder sind die falsch klassifizierten Werte der Karte. Hier wurden keine, beziehungsweise nur ganz geringe Gefährdungen ausgewiesen, wo jedoch Rutschungen registriert wurden. Je kleiner dieser Wert ist, umso besser ist die Karte. Als Beispiele dienen erneut die oben erwähnten Modelle 9 und 10, sowie 25 und 26.

6.10.1. Validierung am Beispiel der Modelle 9 und 10

Diese Ergebnisse nehmen Bezug auf die Tabelle 11. Gemessen an der Gesamtfläche der Gefahrenhinweiskarte der GK 200 wurden 10.46% als hoch gefährdet ausgewiesen, die jedoch keine kartierten Rutschungen enthalten. In 21.71% der Gesamtpixelanzahl haben keine Rutschungen stattgefunden, obwohl sie in der zweithöchsten Gefährdungsstufe angesiedelt sind. Rund ein Fünftel der Fläche sind laut Modell 10 gering gefährdet und enthalten gleichzeitig keine Rutschungsanteile. Dem gegenüber stehen 77.82% der gesamten Rutschungsfläche, die den beiden höchsten Gefährdungsklassen zugeordnet sind. 3.65% der kartierten Rutschungspixel werden in der Gefahrenhinweiskarte der GK 200 als nicht gefährdet eingestuft. Für die GK 50 stehen 11.53% in der höchsten beziehungsweise 16.27% in der zweithöchsten Gefährdungsklasse, ohne einen kartierten Rutschungsanteil aufzuweisen. 79.89% der Rutschungsfläche wird in der Gefahrenhinweiskarte (Modell 9, GK 50) als sehr hoch und hoch gefährdet angezeigt. 6.17% der Rutschungspixel werden als nicht gefährdet ausgewiesen, obwohl gleichzeitig eine Rutschung kartiert wurde.

Tab. 11 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 & 10 (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.

Modell**	Modell 10 (GK 200)			Modell 9 (GK 50)		
Übereinstimmungsklasse	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB* =0 und Gefährdung = 4	325647	10.46		358957	11.53	
MB =0 und Gefährdung = 3	676167	21.71		506687	16.27	
MB =0 und Gefährdung = 2	848425	27.24		764260	24.54	
MB =0 und Gefährdung = 1	1255311	40.31		1475646	47.38	
Zwischensumme	3105550	99.72		3105550	99.72	
	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB =1 und Gefährdung = 1	321	0.01	3.65	542	0.02	6.17
MB =1 und Gefährdung = 2	1628	0.05	18.53	1225	0.04	13.94
MB =1 und Gefährdung = 3	3461	0.11	39.38	2837	0.09	32.28
MB =1 und Gefährdung = 4	3378	0.11	38.44	4184	0.13	47.61
Zwischensumme	8788	0.28	100.00	8788	0.28	100.00
Gesamtsumme	3114338	100.00	100.00	3114338	100.00	100.00

*MB= Massenbewegungen, Gefährdung 1= 0-0.25, Gefährdung 2= >0.25-0.5, Gef. 3= >0.5-0.75 Gef. 4= >0.75-1

** Eingabeparameter: Höhe, Hangneigung, Wölbung (horizontal), Lithologie und Tektonik als 100m Puffer, sowie die Landbedeckung.

6.10.2. Vergleich GK 200 mit GK 50 (Modelle 9 und 10)

In den beiden höchsten Gefährdungsklassen ohne Rutschungspixel hat die GK 200 einen um rund 2% höheren Wert. Umgekehrt liegt der Anteil der Rutschungspixel ohne Gefährdungsausweisung bei der GK 200 um 2.51 Prozentpunkte niedriger. Der Anteil an Übereinstimmung zwischen Rutschungen und Klassen mit hoher und sehr hoher Gefährdung liegt bei der GK 200 um 2.44 Prozentpunkte höher als bei der GK 50. Betrachtet man die beiden höchsten Gefährdungsstufen mit kartierten Massenbewegungen, so liegen beide Werte sehr nahe. Bei der GK 200 liegt er bei rund 78% und bei der GK 50 um 2 Prozentpunkte höher. Die Zwischen- und Gesamtsumme dienen jeweils zur Kontrolle. So ist auch abzulesen, dass die kartierten Rutschflächen nicht einmal ein halbes Prozent der Gesamtfläche ausmachen, oder anders formuliert fallen nur 8788 Pixel von rund 3.1 Millionen Pixeln in die Kategorie Massenbewegungen.

6.10.3. Validierung am Beispiel der Modelle 25 und 26

Die in der Tabelle 12 eingetragenen Werte ähneln teilweise den oben beschriebenen Modellen. Hier liegt die Anzahl der niedrig gefährdeten Pixel mit einer vorkommenden Rutschung bei 3.22 % (Modell 26) und bei 5.29% (Modell 25). Diese liegen etwas tiefer als bei den beiden beschriebenen Modellen 9 und 10. Und wiederum zeigt hier die GK 200 bessere Ergebnisse. Betrachtet man die höchste Gefährdungsklasse mit Rutschungsanteil, schneidet der Wert des Modell 26 um über 12 Prozentpunkte schlechter ab, als das Modell 25. Nimmt man jedoch die beiden höchsten Gefährdungsstufen zusammen, so heben sich diese Unterschiede praktisch auf (73.5 % in Modell 26 und rund 72% in Modell 25). Bei der geringsten Gefährdungsklasse ohne Rutschungsereignisse liegt der Wert des Modells 25 um rund 6% höher als beim Modell 26 mit der GK 200 als Grundlage. Das Modell 26 weist rund 8 Prozentpunkte mehr hoch gefährdete Flächen aus als das Modell 25, wo gleichzeitig keine Rutschungen festgestellt worden sind.

Tab. 12 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der Modelle 9 & 10 (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.

Modell**	Modell 26 (GK 200)			Modell 25 (GK 50)		
Übereinstimmungsklasse	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB* =0 und Gefährdung = 4	263757	8.47		314098	10.09	
MB =0 und Gefährdung = 3	835599	26.83		535757	17.20	
MB =0 und Gefährdung = 2	1006114	32.31		1053344	33.82	
MB =0 und Gefährdung = 1	1000080	32.11		1202351	38.61	
Zwischensumme	3105550	99.72		3105550	99.72	
	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB =1 und Gefährdung = 1	283	0.01	3.22	465	0.01	5.29
MB =1 und Gefährdung = 2	2044	0.07	23.26	1987	0.06	22.61
MB =1 und Gefährdung = 3	3853	0.12	43.84	2635	0.08	29.98
MB =1 und Gefährdung = 4	2608	0.08	29.68	3701	0.12	42.11
Zwischensumme	8788	0.28	100.00	8788	0.28	100.00
Gesamtsumme	3114338	100.00	100.00	3114338	100.00	100.00

*MB= Massenbewegungen, Gefährdung 1= 0-0.25, Gefährdung 2= >0.25-0.5, Gef. 3= >0.5-0.75 Gef. 4= >0.75-1

** Eingabeparameter: Hangneigung, Wölbung (horizontal), Lithologie und Tektonik unklassifiziert, sowie die Landbedeckung.

6.10.4. Diskussion zur Validierung der Gefahrenhinweiskarten

Nun lassen sich sowohl die Werte zwischen der GK 200 und der GK 50, als auch diejenigen zwischen den beiden Modellen (Tabelle 11 und 12) vergleichen. Die Abweichungen sind innerhalb eines Modells sehr gering, beziehungsweise unterscheiden sich die Modelle mit unterschiedlichen Eingabeparametern um einige Prozentpunkte stärker als die Vergleiche der GK 200 mit der GK 50. Die Gefahrenhinweiskarten beider Validierungen weisen vom statistischen Standpunkt (AIC und AUROC) aus, gute Werte auf. Alle Validierungen zeigten einen Fehler von unter 5% (MB =1 und Gefährdung =1) an. Die GK 50 hat bei beiden Modellen einen höheren Prozentanteil an Rutschungen, die in die niedrigste Gefährdungsklasse fallen. Betrachtet man die Rutschungsklassen mit der höchsten Gefährdung, so liefert die GK 50 stets den höheren Wert - im Modell 25 sogar um über 12% höher als in der GK 200 (Modell 26). Fasst man aber die beiden höchsten Gefährdungsklassen zusammen, so relativieren sich die Unterschiede zwischen der GK 200 und der GK 50. Beide Modelle decken gut zwei Drittel der Rutschungspixel durch die beiden höchsten Gefährdungsstufen ab.

Vergleicht man die beiden validierten Modelle miteinander, so liefert das zweite Modell (25 und 26) bei der höchsten Gefährdungsklasse mit tatsächlichen Rutschungen sowohl in der GK 200, als auch in der GK 50 eher schlechtere Ergebnisse.

6.11. Geomorphologische Güte

Neben der statistischen Validierung von Gefahrenhinweiskarten bietet der von BELL, 2007 geprägte Begriff der „Geomorphologischen Güte“ eine Möglichkeit, die Gefahrenhinweiskarten visuell zu interpretieren und die Ergebnisse auf Plausibilität im Gelände durch ein geschultes Auge zu prüfen. Es handelt sich hierbei zwar um eine qualitative Methode, ist aber unerlässlich nicht nur in der Interaktion zwischen der Wissenschaft und dem praktischen Nutzer.

Diese Methode wird hier angewandt, um die unterschiedliche Klassifizierung der Wahrscheinlichkeiten für Gefahrenhinweiskarten exemplarisch aufzuarbeiten. Ferner soll auch gezeigt werden, dass allein eine statistische Aufarbeitung in diesem Falle nicht unbedingt die beste Lösung sein muss. Und vor allem bietet diese Methode eine zusätzliche Möglichkeit, die Unterschiede der GK 200 und der GK 50 herauszuarbeiten. Folgend werden nun zwei Karten vorgestellt (Abb. 21). Sie stammen beide von den Modellen 25 und 26, welche bereits im vorhergehenden Kapitel (Abb. 20) vorgestellt wurden. Der Ausschnitt zeigt einen Teil der Flyschzone südlich von Scheibbs.

Die Karten unterscheiden sich in der Klassifizierung der Gefährdungswahrscheinlichkeiten in „Quartile“ und wie im letzten Kapitel durch „gleiche Intervalle (equal interval)“. Neben den beiden Kartenausschnitten der GK 200 und der GK 50 zeigt die dritte Darstellung die Differenz der beiden Karten, um die räumlichen Unterschiede beider Varianten aufzuzeigen. Auf eine Darstellung einer Karte mit „natural breaks“ wird verzichtet, weil die Unterschiede zur equal interval Klassifizierung zu gering sind.

6.11.1. Geomorphologische Güte - Quartile

Diese Klassifizierungsmethode teilt alle vorhandenen Pixel in vier Klassen ein. Jede Klasse enthält ein Viertel der Gesamtfläche (Abb. 21). Am deutlichsten werden die Unterschiede in den Tälern und am Hangfuß. Die GK 50 grenzt diese besser ab. In der GK 200 ragen die als „niedrig gefährdet“ eingestuften Täler weit den Hang hinauf. In der Differenz sind sie als orange-rote Fläche deutlich sichtbar. Die dunkelblaue Fläche zeigt eine hohe Gefährdung in der Karte mit der GK 200 als Basis, wohingegen auf derselben Fläche in der GK 50 nur eine geringe Gefährdung ausgewiesen wird. Hier kommt die bessere Auflösung der GK 50 in kleinräumigeren Gebieten zum Tragen. Betrachtet man die Rutschungsumrisse, so wird deutlich, dass die GK 50 (Modell 25) Bereiche mit hoher Gefährdung nicht überall abdeckt. In beiden Karten sind die Abgrenzungen von hoher zu niedriger Gefährdung im Tal und am Hangfuß sehr hart, in höheren Lagen sind die Wechsel weitaus abgestufter. Es stimmen auch die beiden Karten untereinander über weite Flächen überein (erkennbar an der blässeren Einfärbung in der Differenz).

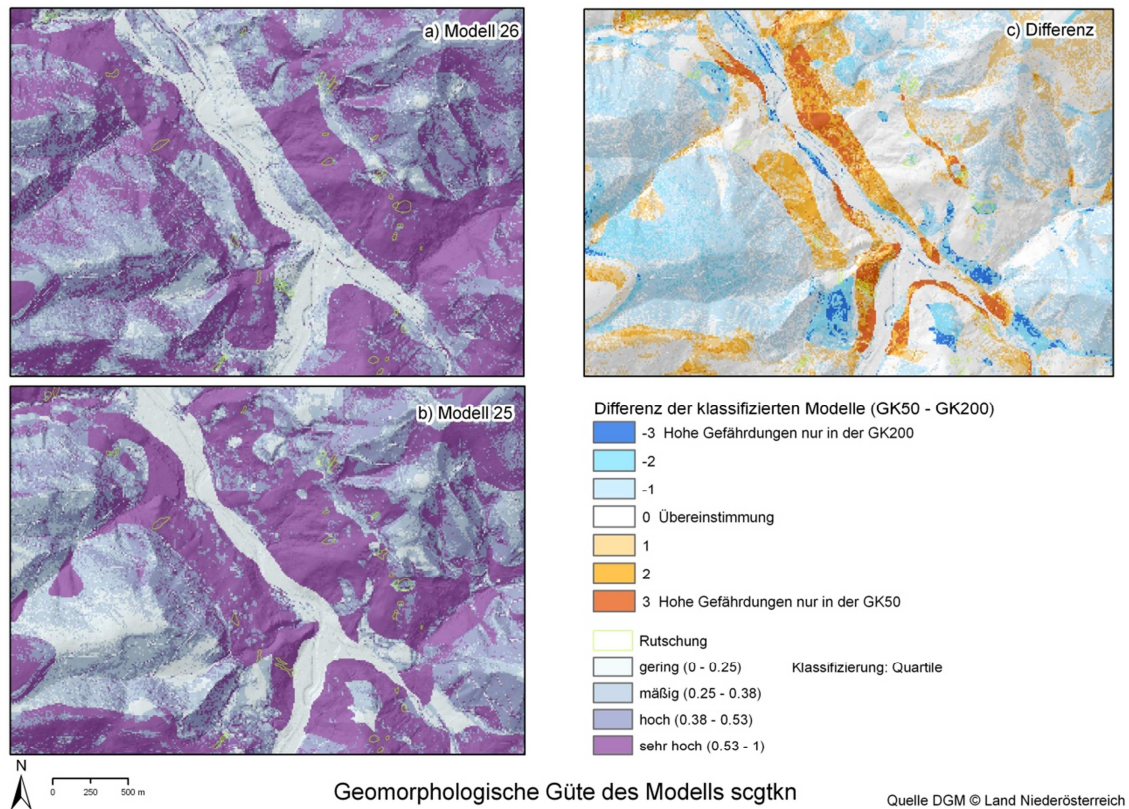


Abb. 21 Geomorphologische Güte des Modells scgtn klassifiziert nach Quartilen. a) Gefährdungen der GK 200, b) Gefährdungen der GK 50 und c) die Differenz der beiden Modelle.

6.11.2. Geomorphologische Güte – Equal interval

Als drittes Beispiel wird nun dieselbe Klasseneinteilung, wie sie auch bei den Gefahrenhinweiskarten angewandt wurde hinzugezogen, nämlich die der gleichen Abstände zwischen den Gefährdungsgrenzen (Abb. 22).

Das Modell 25 ist viel kleinräumiger strukturiert, als das Modell 26 mit der GK 200 als Grundlage.

Diese beiden Versionen der GK 50 (Modell 25) unterscheiden sich stark. Die Zonen mit höchster Gefährdung sind viel eingeschränkter und dominieren nicht mehr den ganzen Ausschnitt. Aber auch die kartierten Rutschungsbereiche liegen kaum mehr in der höchsten Gefährdungsklasse. Die größten Abweichungen sind wiederum am Hangfuß zu finden.

Vergleicht man die beiden Klassifizierungsmethoden, so sind in der Differenz die dunklen Bereiche bei den Quartilen (Abb.21) verstärkter ausgeprägt. Also sind die beiden Karten beim „equal interval“ (Abb. 22) ausgewogener. Auch wird die höchste Gefährdungsklasse entlastet, also weniger starke Dominanz in der „equal interval“ verteilten Version. Dies führt aber auch dazu, dass augenscheinlich weniger Rutschungen als höchst gefährdet eingestuft werden.

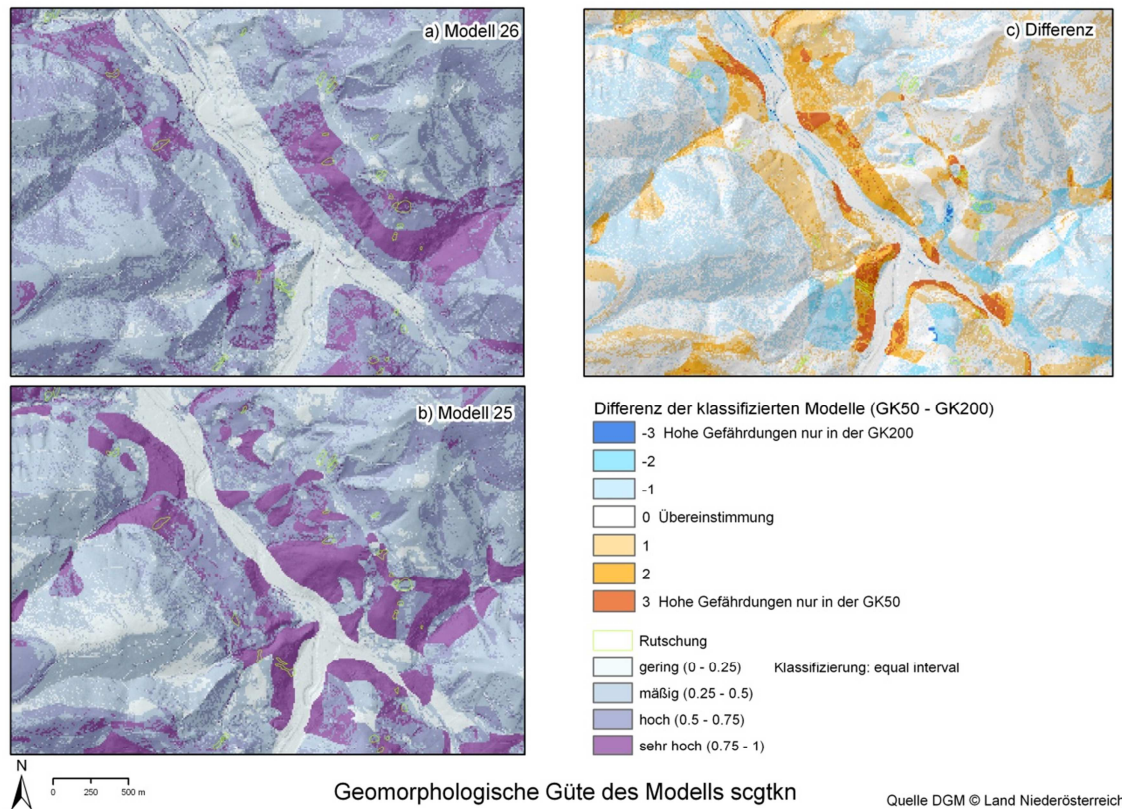


Abb. 22 Geomorphologische Güte des Modells scgtn klassifiziert nach Equal Interval. a) Gefährdungen der GK 200, b) Gefährdungen der GK 50 und c) die Differenz der beiden Modelle.

6.11.3. Diskussion zur Geomorphologischen Güte

Nach den bisherigen Arbeitsschritten ist dieses Vorgehen das einzige, welches nicht zu den quantitativen Methoden zählt. Viel mehr bietet dieser Evaluierungsschritt einen kritischen Blick auf die Ergebnisse und fordert die bestmögliche Darstellungsform zu finden. Die beste Art der Visualisierung hängt unter anderem auch vom Endnutzer ab. In der Literatur gibt es verschiedene Darstellungs- und Deklarierungsformen der Klassifizierung der jeweiligen Gefahrenhinweiskarten. VON RUETTE *et al.*, 2011 klassifiziert seine Ergebnisse nicht. DAI *et al.*, 2004 beispielsweise geben keinen Aufschluss über ihre Klassifizierung. Die Klassen werden dort nur qualitativ beschrieben. Die Geomorphologische Güte ist eine Methode, die den Dialog fördern kann und gibt auch Aufschluss darüber, wie robust die Ergebnisse sind. Je nach Verteilung der Werte scheinen Unterschiede in der unterschiedlichen Klassifizierung auf.

6.12. Modellierung mit Frequency Ratio Werten (gewichtete Lithologie und Landbedeckung)

Eine große Herausforderung stellt die Vielzahl an lithologischen Klassen dar. Die GK 200 umfasst 31 Klassen und bei der GK 50 sind es deren 85. Rechnet man diese auf 440 Rutschungen auf, so ist die statistische Aussagekraft innerhalb einzelner Klassen nicht sehr groß. Im Normalfall würden einige Klassen zu übergeordneten Einheiten zusammengefasst. Da jedoch das Namensgut der beiden Datensätze nicht übereinstimmt, konnte keine sinnvolle Zusammenlegung vorgenommen werden. Eine andere Lösungsvariante wurde mittels der Frequency Ratio ausprobiert. Dies bedeutet, dass jeder Klasse die Frequency Ratio zugewiesen und der Datensatz von einem kategorialen Niveau in ein metrisches umgewandelt wurde. Diese Gewichtung hatte den Sinn, den lithologischen Einheiten, die nicht oder nur unzureichend in die Stichprobe aufgenommen wurden, einen adäquaten Wert zuzuweisen. BAI *et al.*, 2010 hat diese Methode nach CARRARA, 1983 angewandt. Er begründete diese Vorgehensweise folgendermaßen: „Using landslide density to transform the nominal variables to numeric variables can avoid the creation of an excessively high number of dummy variables, and allow consideration of the so-called ‘previous knowledge’ of landslide susceptibility.“

Sämtliche nach dieser Variante berechneten Modelle hatten durchwegs einen um ca. 0.05 schlechteren AUROC Wert, als die faktoriell eingebundenen lithologischen Einheiten (Modelle 1-30). Auch die AIC Werte waren höher, als bei jenen Modellen, die durchwegs mit Dummy Variablen gerechnet wurden. Im Folgenden wird exemplarisch die Auswertung der Modelle 25 und 26 durch die Frequency Ratio vorgestellt. Ins Modell flossen Lithologie und Landbedeckung als metrische Werte, erzeugt durch die Frequency Ratio, mit ein.

Tabelle 13 fasst diese Statistik zusammen. Hohe Gefährdungen mit kartierten Rutschungen kommen auf rund 67% beziehungsweise auf 64%. Diese Werte liegen bis zu acht Prozentpunkte tiefer als bei den Modellen 25 und 26 (vergleiche Kapitel 6.10.2. und 6.10.3.). Betrachtet man andererseits die Werte mit den falsch eingeschätzten Gefährdungen, so fallen 2.47% als niedrig gefährdet eingestufte Rutschungen der GK 200 auf. Dies ist der niedrigste Wert überhaupt. Auch bei der GK 50 liegt dieser Wert tiefer als bei den entsprechenden Modellen 25 und 26. Bei den rutschungsfreien und gleichzeitig niedrig eingestuften Gefährdung liegen diese Werte in Tabelle 8 um bis maximal 15 Prozentpunkte tiefer. Ebenso werden Flächen ohne Hangrutschungen tiefer gefährdet eingeschätzt als ihr Pendant in den Modellen 25 und 26.

Tab. 13 Validierung der Gefahrenhinweiskarten der mit der Frequency Ratio erstellten Modelle 26a & 25a (sdplcgkeu100n) der GK 200 links und der GK 50 rechts.

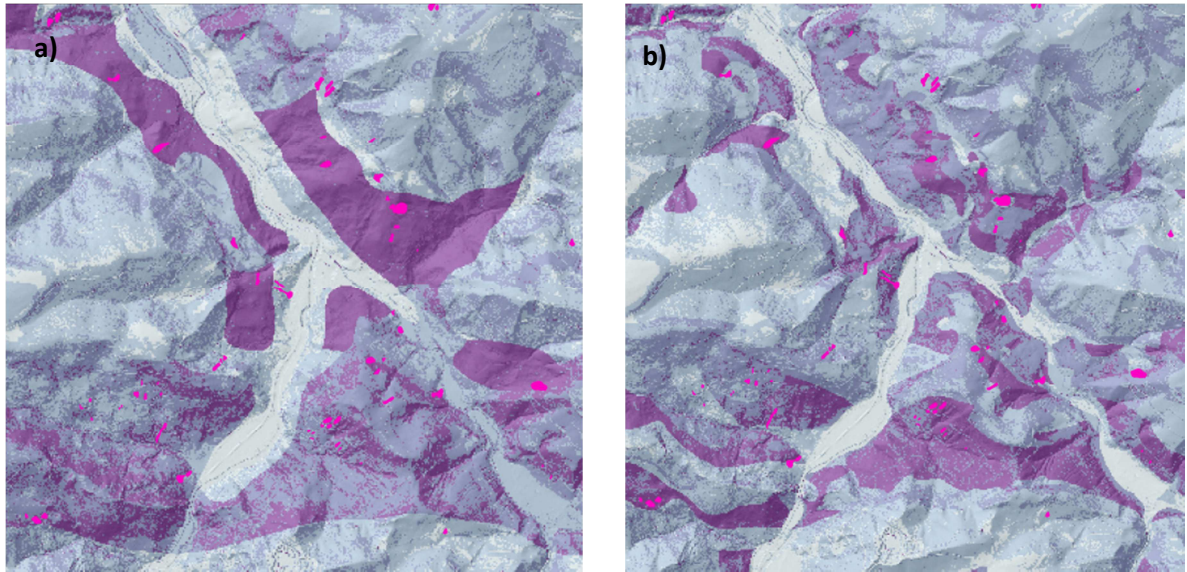
Modell** gewichtet	Modell 26a (GK 200)			Modell 25a (GK 50)		
Übereinstimmungsklasse	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB* =0 und Gefährdung = 4	224400	7.21		171593	5.51	
MB =0 und Gefährdung = 3	654221	21.01		514387	16.52	
MB =0 und Gefährdung = 2	1437292	46.15		1521537	48.86	
MB =0 und Gefährdung = 1	789637	25.35		898032	28.84	
Zwischensumme	3105550	99.72		3105550		
	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen	Anzahl Pixel	% Gesamtfläche	% Rutschungen
MB =1 und Gefährdung = 1	217	0.01	2.47	399	0.01	4.54
MB =1 und Gefährdung = 2	2673	0.09	30.42	2705	0.09	30.78
MB =1 und Gefährdung = 3	3714	0.12	42.26	2855	0.09	32.49
MB =1 und Gefährdung = 4	2184	0.07	24.85	2829	0.09	32.19
Zwischensumme	8788	0.28	100	8788	0.28	100
Gesamtsumme	3114338	100	100	3114338	100	100

*MB= Massenbewegungen, Gefährdung 1= 0-0.25, Gefährdung 2= >0.25-0.5, Gef. 3= >0.5-0.75 Gef. 4= >0.75-1

** Eingabeparameter: Hangneigung, Wölbung (horizontal), Lithologie (Frequency Ratio Werte) und Tektonik unklassifiziert, sowie die Landbedeckung (Frequency Ratio Werte).

Visuell sind besonders in der GK 200 deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Geologie hat durch die Frequency Ratio viel stärker an Gewicht zugelegt (Abb. 23 a) und c)). Bei der GK 50 ist dies nicht so deutlich zu sehen (Abb. 23 b) und d)). Dennoch scheinen sich die Unterschiede auf einzelne lithologische Einheiten zu beschränken. Im unteren Teil der beiden Ausschnitte sind die Ungleichheiten sowohl bei der GK 200, als auch bei der GK 50 geringer. Grundsätzlich sind alle gefährdeten Bereiche der Modelle 25 und 26 auch hier als gefährdet ausgewiesen. Es kommen noch die als hoch gefährdet ausgewiesene Gebiete hinzu.

Modell 26a und 25a gewichtete Werte nach der Frequency Ratio:



Modell 26 und 25 Ausschnitt aus Abb. 20:

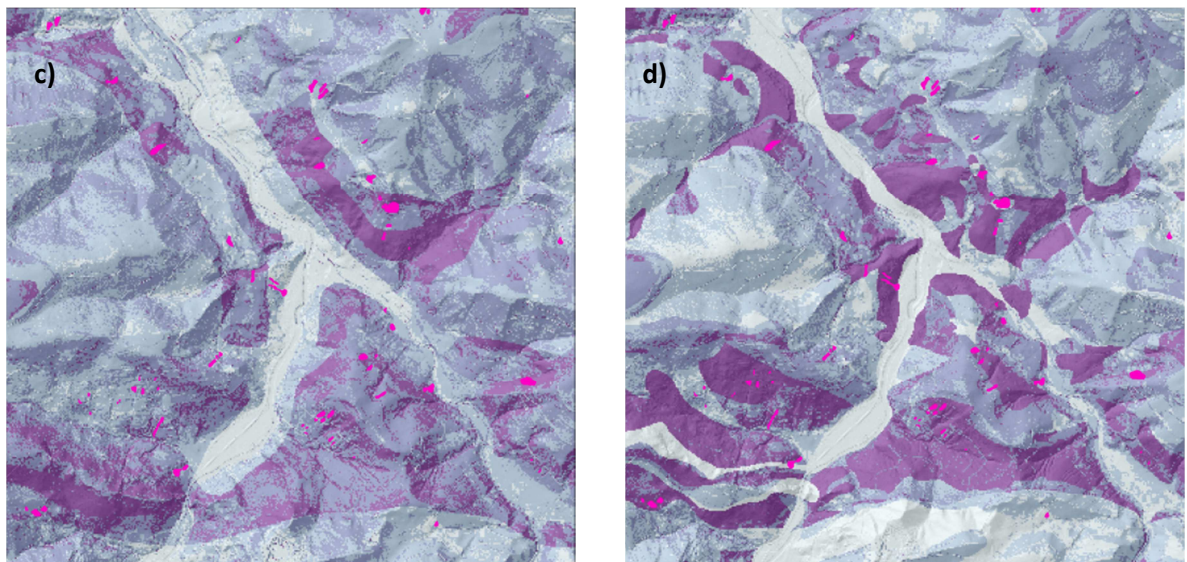


Abb. 23 Vergleich zwischen den gerechneten Modellen. a) Modell 26a GK 200 (gewichtete Werte). b) Modell 25a GK 50 (gewichtete Werte). c) Modell 26 GK 200 und d) Modell 25 GK 50.

In der Visualisierung schlugen sich die statistischen Verschlechterungen ebenfalls nieder. Besonders innerhalb der geologischen Einheiten wird in der Dummy Variante besser unterschieden. In den Darstellungen der GK 50 (Abb 23 b und d) sind die Täler allgemein besser abgegrenzt als jene der GK 200. Bei den Tälern sind auch die Unterschiede zwischen den beiden Modellierungsvarianten zu sehen. Besonders deutlich in Abbildung 23 b, sind Uferböschungen zum Teil auch durch vereinzelte Pixel als höher gefährdet eingestuft. Diese fallen bei der Modellierung mit Faktoren ganz weg (Abb. 23 d). Bei den GK 200'er Modellen fallen die Unterschiede bezüglich der Uferböschungen geringer aus.

Der Vergleich der beiden Modellierungsformen von kategorialen Daten zeigt, dass die logistische Modellierung als Methode sensibel auf Gewichtung reagiert. Daraus lässt sich schließen, dass auch die Qualität der Eingabeparameter eine wichtige Rolle spielt. In diesem Fall ist die Verwendung der Frequency Ratio wie BAI *et al.*, 2010 sie angewandt hat nicht die bessere Methode.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND PERSPEKTIVEN

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zusammengeführt und daraus die Schlussfolgerungen in Bezug auf die Hypothesen gezogen. In einem weiteren Schritt wird ein Ausblick auf mögliche aufbauende Forschungsfragen gegeben.

7.1. Hypothesen - Fazit

In den verschiedenen Arbeitsschritten wurde immer wieder auf die Unterschiede der beiden Datensätze hingewiesen. Im statistischen Teil weichen die Ergebnisse untereinander genauso stark ab, wie wenn man die lithologischen Daten mit der Frequency Ratio rechnet. Die Abweichungen sind konstant und nicht zufällig, aber insgesamt eher gering. Vom Standpunkt der Modellierung aus könnte man sagen, dass beide Datensätze zum Modellieren geeignet sind und beide auf die gleichen Tendenzen hinweisen. Beide Grundlagen sind hoch signifikant und liefern demnach einen großen Erklärungswert für das Modell. Ebenso reagiert die Methode auf andere Eingabeparameter, wie dies die Frequency Methode gezeigt hat.

H1: Die Geologie ist der maßgebende Faktor in der Gefährdungsmodellierung.

Die erste Hypothese wird demnach bestätigt, wobei die Geologie (Lithologie und die Tektonik) die Modellierungen nicht alleine prägten, sondern zusammen mit der Hangneigung den stärksten Einfluss auf die Modellierung hatten.

Die Abweichungen der beiden Lithologien scheinen dafür viel stärker in den Visualisierungen auf. Hierbei gilt es zwischen Generalisierungseffekten, die sich aus den Kartengrundlagen der Österreichischen Kartenwerke ergeben, und den tatsächlichen kartierten lithologischen Informationen zu unterscheiden. Für die Gefährdung von Massenbewegungen sind vor allem auch der Hangfuß und die Abgrenzung der Täler von Bedeutung. In diesen Fällen schneidet die GK 50 deutlich besser ab. Dennoch ist es fragwürdig, ob fein aufgelöste Gefährdungszonen nicht eine falsche Sicherheit suggerieren. Die großflächigeren als hoch gefährdet klassifizierten Gebiete der GK 200 oder die Gefahrenhinweiskarten aus den Modellen der Frequency Ratio weisen Gefährdungen großzügiger aus. In diesem Zusammenhang besteht weiterer Forschungsbedarf, wobei insbesondere der Hang als Ganzes kritisch zu betrachten ist. Hierzu muss auch erwähnt werden, dass die Karten nichts darüber aussagen, in wie fern Massenbewegungsereignisse vermeintlich stabile Gebiete im konkreten Falle destabilisieren.

H2: Die GK 50 liefert bessere Ergebnisse als die Daten der GK 200.

Diese Hypothese kann ebenfalls angenommen werden, wenn auch mit Vorbehalt. Die GK 200 eignet sich sehr wohl für eine statistische Auswertung und liefert ähnliche Ergebnisse wie die GK 50, für die Visualisierung ist die GK 50 jedoch vorzuziehen.

7.2. Perspektiven und Ausblick

Das Modellieren mittels logistischer Regression bietet eine Fülle an Möglichkeiten, welche in dieser Arbeit bei Weitem noch nicht ausgeschöpft sind. Interessant wären getrennte Modellierungen innerhalb unterschiedlicher geologischer Einheiten. Denn anhand des Hillshades sind die Unterschiede zwischen der Flyschzone, beziehungsweise der Molassezone und den Kalkalpen sehr deutlich zu sehen und erforderten bei der Kartierung einiges an Vorwissen. Ebenso könnte eine getrennte Modellierung der Landnutzungsklassen zum Beispiel mehr Einblick zum Einfluss des Waldes liefern, wie dies VON RUETTE *et al.*, 2011 untersucht wurde. Zu einer Verbesserung des Modells würde ebenfalls eine schrittweise Selektion von Variablen aus der Lithologie führen. Dies bedeutet, dass einzelne lithologische Einheiten ausgeklammert und nur die statistisch signifikanten weiterverarbeitet werden.

Die hier verwendeten Eingabeparameter zählen zu den statischen Variablen. Sie verändern sich mit Ausnahme der Landbedeckung kaum über weitreichende Zeiträume. In einem weiteren Schritt wären nun die variablen Faktoren wie der anthropologische Einfluss (zum Beispiel die Landnutzungsänderung) und das Klima in Form von Niederschlag zu untersuchen und in multitemporalen Ansätzen weiter zu erforschen. Denn wie schon in verschiedenen Studien (u.a. SCHWENK *et al.*, 1992) angesprochen wurde, gelten variable Faktoren wie Niederschlag als Auslöser oder der anthropogene Einfluss als Risikofaktor für Massenbewegungen.

Aus rechtlicher Sicht sind die geologischen Gefahren nicht so stark in gesetzlich festgelegten Rahmen eingebunden wie zum Beispiel Hochwasser, welches durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie zum Schutz vor Hochwasser in allen Gesetzesebenen verankert ist. Des Weiteren spricht ein Verfassungsgerichtsentscheid (VwGH 27.3.1995, 91/10/0090) dem Gefahrenzonenplan der WLV „flächenhafte Gutachten mit Prognosecharakter“ zu, aber entzieht ihm Rechtswirksamkeit. Erst durch die Implementierung desselben in die Flächenwidmungspläne erlangen Gefahrenzonen Rechtswirksamkeit. Zudem werden geogene Gefährdungen im Gefahrenzonenplan als braune Hinweisflächen geführt. Dies bedeutet zum einen keine parzellenscharfe Darstellungspflicht der Gefährdungen und zum anderen geben diese Flächen keine Informationen über die *Intensität* der Gefährdungen (SCHMID, 2011), was aber für die

Risikobewertung entscheidend ist. Um zukünftige Schäden durch Rutschungen möglichst auszuschließen beziehungsweise minimieren zu können, ist in Analogie zum Schutz vor Hochwasser eine einheitliche Regelung zum Verfassen von geologischen Gutachten zusammen mit den entsprechenden Gefahrenhinweiskarten in der Ausscheidung von Gefahrenzonen anzustreben.

Hierbei ist ausdrücklich zu erwähnen, dass Gefahrenhinweiskarten ein geologisches Gutachten nicht ersetzen, aber eine Grundlage dafür sein können, wann und wo eine Expertise einzuholen ist. Verbindet man nun das Wissen aus den Gefahrenhinweiskarten, verschneidet dieses mit der Intensität, so kann man Aussagen über das Risiko machen. In der Zusammenschau mit anderen Risikofaktoren wird deutlich, dass sich mehrere Gefährdungsarten überschneiden werden. Wo extreme Niederschläge für Hochwasser sorgen, können zum Beispiel je nach Gegebenheit auch Muren oder Rutschungen nicht ausgeschlossen werden. Der Multihazard-Ansatz (KAPPES *et al.* 2012) versucht dem Rechnung zu tragen. Gleichwohl basieren solche übergeordnete Ansätze auf dem Wissen auf Grundlagen, wie sie hier in dieser Arbeit vorgestellt wurden.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- AHNERT, F., 1996 *Einführung in die Geomorphologie*. UTB, Stuttgart.
- AMT DER NIEDERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG, 2010 *Statistisches Handbuch des Landes Niederösterreich*. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung.
- ARDIZZONE, F., M. CARDINALI, A. CARRARA, F. GUZZETTI und P. REICHENBACH, 2002 *Uncertainty and Errors in Landslide Mapping and Landslide Hazard Assessment*. Natural Hazard and Earth System Science **2**: 3-14.
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, 2002 Landslide Risk Management Concepts and Guidelines, S. 51-70 in *Australian Geomechanics*, edited by AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY SUB-COMMITTEE ON LANDSLIDE RISK MANAGEMENT.
- ATKINSON, P. M., und R. MASSARI, 1998 *Generalised Linear Modelling of Susceptibility to Landsliding in the Central Apennines, Italy*. Computers & Geosciences **24**: 373-385.
- BAFU, 2009 *Rutschungen - Ursachen*, Eidgenössisches Departement für Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Gefahrenprävention.
- BAI, S.-B., J. WANG, G.-N. LÜ, P.-G. ZHOU, S.-S. HOU und S.-N. XU, 2009 *Gis-Based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping of the Zhongxian 2 Segment in the Three Gorges Area, China*. Geomorphology **115**: 8.
- BÄK, R., H. RAETZO, K. MAYER, A. VON POSCHINGER und G. POSCH-TRÖTZMÜLLER, 2011 *Mapping of Geological Hazards: Methods, Standards and Procedures (State of Development) - Overview*, S. 30-52 In SKOLAUT C., *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs.
- BARTELME, N., 2005 *Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen*. Springer Verlag.
- BELL, R., 2007 *Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitative Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb*. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- BORRADAILE, G. J., 2003 *Statistics of Earth Science Data. Their Distribution in Time, Space and Orientation*. Springer, Heidelberg.
- BRENNING, A., 2005 *Spatial Prediction Models for Landslide Hazards: Review, Comparison and Evaluation*. Natural Hazards and Earth System Sciences **5**: 853-862.
- BREWER C. und M. HARROWER, 2002. <http://colorbrewer2.org/>, The Pennsylvania State University.
- CARRARA, A., 1983 *Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation*. Mathematical Geology **15**: 403-426.

- CARRARA, A., M. CARDINALI, R. DETTI, F. GUZZETTI, V. PASQUI und P. REICHENBACH, 1991 *Gis Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard*. Earth Surface Processes and Landforms **16**: 427-445.
- CARRARA, A., G. CROSTA und P. FRATTINI, 2008 *Comparing Models of Debris-Flow Susceptibility in the Alpine Environment*. Geomorphology **94**: 353-378.
- CHUNG, C.-J. F. und A. G. FABBRI, 2003 *Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping*. Natural Hazards **30**: 451-472.
- CHUNG, C.-J. F. und A. G. FABBRI, 2005 *Systematic Procedures of Landslide Hazard Mapping for Risk Assessment Using Spatial Prediction Models*, S. 139-174 In GLADE T., M. ANDERSON und M. J. CROZIER, *Landslide Hazard and Risk*, John Wiley und Sons Ltd., Chichester.
- CROZIER, M. J., 1986 *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. Croom Helm, London.
- CROZIER, M. J., 1989 *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. Routledge.
- CROZIER, M. J., und T. GLADE, 2005 *Landslide Hazard and Risk: Issues, Concepts, and Approach*, S. 1-38 In GLADE T., M. G. ANDERSON und M. J. CROZIER, *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester.
- CRUDEN, D. M., 1991 *A Simple Definition of a Landslide*. Bulletin International Association for Engineering Geology **43**: 27-29.
- CRUDEN, D. M. und D. J. VARNES, 1996 *Landslide Types and Processes*, S. 36-75 In TURNER A. K. und R. L. SCHUSTER, *Landslides: Investigation and Mitigation*, National Academy Press, Washington, D.C.
- DAI, F. C., C. F. LEE, J. LI und Z. W. XU, 2001 *Assessment of Landslide Susceptibility on the Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong*. Environmental Geology **40**: 381-391.
- DAI, F. C., C. F. LEE und Y. Y. NGAI, 2002 *Landslide Risk Assessment and Management: An Overview*. Engineering Geology **64**: 65-87.
- DAI, F. C., C. F. LEE, L. G. THAM, K. C. NG und W. L. SHUM, 2004 *Logistic Regression Modelling of Storm-Induced Shallow Landsliding in Time and Space on Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment **63**: 315-327.
- DIKAU, R., D. BRUNSDEN, L. SCHROTT und M. IBSEN (Eds.), 1996 *Landslide Recognition*. John Wiley und Sons Ltd, Chichester.
- DIKAU, R., und T. GLADE, 2002 *Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen*. Geographische Rundschau **54**: 38-45.
- FELL, R., J. COROMINAS, C. BONNARD, L. CASCINI, E. LEROI und W. Z. SAVAGE, 2008 *Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning*. Engineering Geology **102**: 85-98.
- FRATTINI, P., G. CROSTA und A. CARRARA, 2010 *Techniques for Evaluating the Performance of Landslide Susceptibility Models*. Engineering Geology **111**: 62-72.

- FREHNER, M., B. WASSER und R. SCHWITTER, 2005 *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle Im Schutzwald. Wegleitung Für Pflegemassnahmen in Wäldern Mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt*. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- FUCHS, W., 1980 *Das Werden der Landschaftsräume seit dem Oberpliozän*. In OBERHAUSER R., BAUER, F.K. *Der Geologische Aufbau Österreichs*, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GEMEINDE SIBRATSGFÄLL, Naturkatastrophe in Sibratsgfall, <http://www.sibra.at/index.php?page=380>, zuletzt aufgerufen am 12.12.2011.
- GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT, 2003, *Jahresbericht 2001*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GLADE, T., 2005 *Stand, Aufgaben Und Probleme Der Naturrisikoforschung Aus Physisch-Geographischer Sicht*, S. 79-90 In WARDENGA U. und D. MÜLLER-MAHN *Möglichkeiten und Grenzen integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie*,. Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig.
- GLADE, T., und M. J. CROZIER, 2005 *A Review of Scale Dependency in Landslide Hazard and Risk Analysis*, S. 75-138 In GLADE T., M. G. ANDERSON und M. J. CROZIER *Landslide Hazard and Risk*, Wiley, Chichester.
- GLADE, T., und R. DIKAU, 2001 *Gravitative Massenbewegungen - Vom Naturereignis Zur Naturkatastrophe*. Petermanns Geographische Mitteilungen **145**: 42-55.
- GLADE, T., und R. DIKAU, 2002 *Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen*. Geographische Rundschau **54**: 38-45.
- GODINA, R., und G. MÜLLER, 2009 *Das Hochwasser in Österreich Vom 22. Bis 30. Juni 2009 - Beschreibung der hydrologischen Situation* Abteilung VII/3 – Wasserhaushalt (HZB)
- GUNS, M., und V. VANACKER, 2012 *Logistic Regression Applied to Natural Hazards: Rare Event Logistic Regression with Replications*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **12**: 1937-1947.
- GUZZETTI, F., 2005 *Landslide Hazard and Risk Assessment*, Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- GUZZETTI, F., A. CARRARA, M. CARDINALI und P. REICHENBACH, 1999 *Landslide Hazard Evaluation: A Review of Current Techniques and Their Application in a Multi-Scale Study, Central Italy*. Geomorphology **31**: 181-216.
- GUZZETTI, F., C. P. STARK und P. SALVATI, 2005 *Evaluation of Flood and Landslide Risk to the Population of Italy*. Environmental Management **36**: 15-36.
- GUZZETTI, F., P. REICHENBACH, F. ARDIZZONE, M. CARDINALI und M. GALLI, 2006 *Estimating the Quality of Landslide Susceptibility Models*. Geomorphology **81**: 166-184.
- HAIDEN, T., 2009 Meteorologische Analyse Des Niederschlags Von 22.-25. Juni 2009, In *Bericht der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

- HEINTEL, M. H. und WEIXELBAUMER N., 1999 *Oberösterreichische Eisenwurzten - Eisenstraße: Zur Räumlichen Abgrenzung, Akzeptanz und regionalen Identität Der Region Eisenwurzten bzw. der Eisenstraßenidee* In *Aktuelle Beiträge Zur Geographie, Raumforschung und Raumordnung*. Universität Wien, Wien.
- HOFMANN, T., und H. P. SCHÖNLAUB, 2007 *Geo-Atlas Österreich. Die Vielfalt Des Geologischen Untergrundes*. Böhlau, Wien.
- HOSMER, D. W., und S. LEMESHOW, 2000 *Applied Logistic Regression*. Wiley, New York.
- HUTCHINSON, J., 1995 Keynote Paper: Landslide Hazard Assessment, In BELL. D. H., A.A. Balkema, *Proceedings of the sixth International Symposium, 10-14 February 1992, , Rotterdam, Christchurch, New Zealand*.
- HUTCHINSON, J. N., 1977 *General, Largely Morphological Classification of Mass Movements on Slopes - November 1977.*, Imperial College, London.
- HYDROGRAPHISCHER-DIENST, 2009 *Wasserstandsnachrichten*, Land Niederösterreich.
- JEMEC, M., und M. KOMAC, 2011 *An Overview of Approaches for Hazard Assessment of Slope Mass Movements*, S. 88-99 In SKOLAUT C., *Gefahrendarstellungen Für Massenbewegungen*, Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs.
- KAPPES, M. S., K. GRUBER, S. FRIGERIO, R. BELL, M. KEILER und T. GLADE, 2012 *The Multirisk Platform: The Technical Concept and Application of a Regional-Scale Multihazard Exposure Analysis Tool*. *Geomorphology* **151-152**: 139-155.
- KILIAN, W., MÜLLER, F., und F. STARLINGER, 1994 *Die Forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung Nach Waldökologischen Gesichtspunkten*. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum, Wien.
- KRENMAYR, H. G. und HOFMANN T., 2002 *Rocky Austria - Eine Bunte Erdgeschichte von Österreich*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- LEE, S., und N. DAN, 2005 *Probabilistic Landslide Susceptibility Mapping in the Lai Chau Province of Vietnam: Focus on the Relationship between Tectonic Fractures and Landslides*. *Environmental Geology* **48**: 778-787.
- LEGORRETA PAULIN, G., M. BURSIK, J. LUGO-HUBP und J. J. ZAMORANO OROZCO, 2010 *Effect of Pixel Size on Cartographic Representation of Shallow and Deep-Seated Landslide, and Its Collateral Effects on the Forecasting of Landslides by Sinmap and Multiple Logistic Regression Landslide Models*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **35**: 137-148.
- LIN, F.-J., 2008 *Solving Multicollinearity in the Process of Fitting Regression Model Using the Nested Estimate Procedure*. *Quality & Quantity* **42**: 417-426.
- MAC EACHREN, A., 2005 *How Maps Work - Representation, Visualization, and Design*. Guilford Press, New York.

- MACEachREN, A. M., G. CAI, R. SHARMA, I. RAUSCHERT, I. BREWER, L. BOLELLI, B. SHAPARENKO, S. FUHRMANN und H. WANG, 2005 *Enabling Collaborative Geoinformation Access and Decision-Making through a Natural, Multimodal Interface*. International Journal of Geographical Information Science **19**: 293 - 317.
- MÖLK, M., T. SAUSGRUBER, R. BÄK und A. KOCIU, 2011 *Standards and Methods of Hazard Assessment for Rapid Mass Movements (Rock Fall and Landslide) in Austria*, S. 88-99 In SKOLAUT C., *Gefahrendarstellungen für Massenbewegungen*. Verein der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs.
- MÜHLENDahl, K. E. v., 1998 Odds Ratio (or) Und Relatives Risiko (Rr). Umweltmedizin in Forschung und Praxis (Umweltmed Forsch Prax) **3**: 124.
- OH, H. J., S. LEE, W. CHOTIKASATHIEN, C. H. KIM und J. H. KWON, 2009 *Predictive Landslide Susceptibility Mapping Using Spatial Information in the Pechabun Area of Thailand*. Environmental Geology **57**: 641-651.
- ORF Bericht vom 21.5.2009, Sibratsgfall zehn Jahre nach der Katastrophe <http://vbgv1.orf.at/stories/363559>, zuletzt aufgerufen am 12.12.2011
- ÖROK, 2011, - Örok Atlas, Österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK), Wien.
- PARLOW, E., 1950 *Die Kalkalpen-Flyschgrenze Zwischen Hainfeld Und Gresten pp. in Erdwissenschaften*. Universität Wien, Wien.
- PETLEY D., 2011 The Landslide Blog <http://blogs.agu.org/landslideblog/category/earthquake-induced-landslide/>, zuletzt aufgerufen am 12.12.2011.
- RUDOLF-MIKLAU, F., 2011 *Principles of Hazard Assessment and Mapping*, pp. 20-29 In SKOLAUT C., *Zeitschrift Für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- Und Steinschlagschutz*, Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs.
- RUFF, M., 2005 *Gis-Gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich)*, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- SCHMID, F., 2011 *Gefahrenzonenpläne Für Steinschlag Und Rutschungen: Erfahrungen aus der Praxis*, S. 246-251 In SKOLAUT C., *Gefahrendarstellungen Für Massenbewegungen*. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs.
- SCHNABEL, W., 2002 *Geologische Karte Niederösterreichs 1:200.000 - Legende Und Kurze Erläuterung* Geologische Bundesanstalt.
- SCHWENK, H., R. SPENDLINGWIMMER und R. SALZER, 1992 *Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990.*, S. 597-660 In *Jahrbuch Der Geologischen Bundesanstalt* Geologische Bundesanstalt.
- STÖTTER, J., und A. ZISCHG, 2008 *Alpines Risikomanagement - Theoretische Ansätze, Erste Umsetzungen*, S. 297-310 In FELGENTREFF C. und T. GLADE, *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Springer-Verlag, Berlin.

- SÜDDEUTSCHE ZEITUNG Bericht vom 1.3.2011, 4000 Obdachlose nach Erdbeben,
<http://www.sueddeutsche.de/panorama/bolivien-obdachlose-nach-erdrutsch-1.1065675>,
zuletzt aufgerufen am 12.12.2011
- TOBLER, W. R., 1970 *A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region* Economic Geography **46**: 234-240.
- TRAUTH, F., 1948 *Geologie Des Kalkalpenbereiches der Zweiten Wiener Hochquellenleitung - Quellengebiete an und nächst der steirischen Salza und Leitungstrecke bis Scheibbs*. In *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt in Wien*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- VAN DEN EECKHAUT, M. V., A. MARRE und J. POESEN, 2010 *Comparison of Two Landslide Susceptibility Assessments in the Champagne-Ardenne Region (France)*. Geomorphology **115**: 141-155.
- VAN WESTEN, C. J., 1993 *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Geologic Hazard Mitigation*. ITC Journal **4**: 393-399.
- VAN WESTEN, C. J., 2007 *Mapping Landslides: Recent Developments in the Use of Digital Spatial Information*, pp. 221-238 In TURNER A. K. und R. L. SCHUSTER, *First North American Conference on Landslides*. The Association of Environmental und Engineering Geologists, Vail, Colorado, USA.
- VAN WESTEN, C. J., N. RENGERS, M. T. J. TERLIEN und R. SOETERS, 1997 *Prediction of the Occurrence of Slope Instability Phenomena through Gis-Based Hazard Zonation*. Geologische Rundschau **86**: 404-414.
- VARNES, D. J., 1984 *Landslides Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. UNESCO, Paris, France.
- VEIT, H., 2002 *Die Alpen - Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. UTB Verlag, Stuttgart.
- VON ELVERFELDT, K., T. GLADE und R. DIKAU, 2008 *Naturwissenschaftliche Gefahren- Und Risikoanalyse*, S. 31-46 In FELGENTREFF C. und T. GLADE, *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Springer-Verlag, Berlin.
- VON RUETTE, J., A. PAPRITZ, P. LEHMANN, C. RICKLI und D. OR, 2011 *Spatial Statistical Modeling of Shallow Landslides, Validating Predictions for Different Landslide Inventories and Rainfall Events*. Geomorphology **133**: 11-22.
- WEIDINGER, J. T., 2009 *Das Gschliefgraben-Rutschgebiet Am Traunsee-Ostufer (Gmunden/Oö)- Ein Jahrtausende altes Spannungsfeld Zwischen Mensch und Natur*. Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt **149**: S. 195-206.
- WESSELY, G., 2006 *Niederösterreich*. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- WP/WLI (INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES' UNESCO WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY), 1993 *Multilingual Landslide Glossary*. Bitech, Richmond, B.C.
- ZEPP, H., 2004 *Grundriß Allgemeine Geographie: Geomorphologie*. UTB, Paderborn.

Kartenmaterial:

Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000

Schnabel, Wolfgang (Koord.)

Bearbeitung: Fuchs, Gerhard et al.

2 Bl., Farbdruck, 2002.

Kurzerläuterungen von: Schnabel, Wolfgang (Red.) et al.;

47 S., ill., 2 Taf.,

ISBN 3-85316-017-4

Geologische Karte 1:50.000, Blatt 72 Mariazell

Bauer, Franz K.; Grösel, Klemens; Jarnik, Marion; Ruttner, Anton Wolfgang; Schnabel, Wolfgang;

Hofmann, Thomas

Mariazell 1:50.000 / bearb. v. F.K. Bauer und W. Schnabel

1 Bl., Farbdruck, 1997.

Karte in Abb. 6:

Austrian Map Fly 5.0, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen.

Internetquellen:

Cynthia Brewer, Colorbrewer, zuletzt aufgerufen am 12.12.2011

<http://colorbrewer2.org/>

ESRI ArcGIS Webhelp

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Aspect%20works>,

zuletzt aufgerufen am 12.12.2011

Anhang

Die Tabellen im Anhang sind alle auf der beigelegten CD zu finden.

ERKLÄRUNG

Ich versichere,

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2012

Christine Gassner

e - mail: christine.gassner@univie.ac.at
geboren 1980, Staatsbürgerschaft: Schweiz

Berufserfahrung

seit 10.2009	Freie Dienstnehmerin am Umweltbundesamt GmbH, 1090 Wien, Datamangement and Reporting, verschiedenste Arbeiten im GIS-Bereich
4.2011 / 4.2012	European Geoscience Union Wien, studentische Hilfskraft
8.2009 - 7.2010	Tutorin für Geomorphologie, Universität Wien
3.2008 - 3.2010	Tutorin für „Angewandte Geoinformation“, Universität Wien
2. 2006 - 7.2010	Freie Dienstnehmerin an verschiedenen Erwachsenenbildungsinstituten Lehrkraft für Deutsch als Fremdsprache, Berufsorientierung
7.2008 - 2.2009	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Wien (Projektbasis), in Zusammenarbeit mit dem Umweltbundesamt
8.2002 - 7.2005	Klassenvorstand auf Volksschulstufe, Wattwil, Schweiz

Praxisjahr/ Auslandsaufenthalte

2.2010	Mitorganisatorin für die Neuseeland – Exkursion der Universität Wien Institut für Geographie und Regionalforschung,
2000/2001	obligatorisches Praxisjahr
	2 Monate Wirtschaftspraktikum in einem Hotel im Wallis (Service)
	2 Monate Sprachaufenthalt in Cannes, Frankreich
	4 Monate Sozialpraktikum in einem Kinderheim in Taiwan
	3 Monate Sprachaufenthalt in Edinburgh, Schottland
	1 Monat Wirtschaftspraktikum bei Sigma Aldrich in Buchs Schweiz

Ausbildung/ Schulbildung

10.2008 -	Seit Oktober 2005 Geographiestudium (Geomorphologie Hauptfach, Kartographie und GIS Nebenfächer) an der Universität Wien
	1. Diplomzeugnis 28.9.2008
8.1996 – 7.2002	Lehrerseminar in Sargans, Schweiz
8.1992 – 7.1996	Sekundarschule in Grabs, Schweiz
4.1987 – 7.1992	Primarschule in Grabs, Schweiz

Weiterbildung

4.2011/4.2012	European Geoscience Union, internationaler Kongress in Wien
4.2009	Seminare zu Körpersprache, Rhetorik und Gesprächsführung
2.2009 – 6.2009	Nostrifizierung des Primarlehrerdiploms an der Pädagogischen Hochschule Wien
2.2007	Ausbildung zur Prüferin des Österreichischen Sprachdiploms ÖSD
3.2007	Seminar „Gender Mainstreaming“
3.2008 – 6.2008	Projektmanagement, Universität Wien
11.2005	Wirtschaftsführerschein EBCL

Sprachen und IT Kenntnisse

Französisch B2 (DELE)
Englisch C1 (Cambridge Certificate in Advanced English (CAE))
Spanisch A2 (Certificado Inicial de Español)
Microsoft Office (ECDL), ESRI ArcInfo
Datenbanken, R Statistik, SPSS, Adobe Photoshop und Illustrator