



DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Räumliche Analyse und Gefährdungsmodellierung von
Rutschungen in der rhenodanubischen Flyschzone (NÖ)“

Verfasser

Stefan Steger

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, September 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt: Theoretische und Angewandte Geographie

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

Erklärung

Hiermit versichere ich,

dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,

dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe

und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, 23.09.2012

Stefan Steger

Danksagung

Während meiner Diplomarbeitszeit haben mich sehr viele Menschen in verschiedenster Art und Weise unterstützt. An dieser Stelle gilt mein herzlichster Dank:

Herrn Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade, für die Möglichkeit meine Diplomarbeit in der Arbeitsgruppe zu erstellen, seine Begeisterung für die Wissenschaft und für die vielen Anregungen.

Dr. Rainer Bell und Mag. Helene Petschko für die fachliche Unterstützung, sowie für die wertvollen Ratschläge in den verschiedenen Phasen meiner Diplomarbeit. Danke für die Geduld, die Zeit und die zahlreichen Tipps.

Meinen Eltern für die finanzielle Unterstützung während meiner Studienzeit.

Meinen StudienkollegInnen für viel Spaß, Verständnis und kurze Weile während des Studiums.

Mein größter Dank aber gebührt dir Doris. Danke für so Vieles!

Inhalt

ABKÜRZUNGEN	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	5
ABSTRACT	6
1. EINLEITUNG	7
1.1 Ziel	8
1.2 Arbeitshypothesen	9
1.3 Aufbau der Arbeit	9
2. GRAVITATIVE MASSENBEWEGUNGEN	10
2.1 Klassifikation gravitativer Massenbewegungen	10
2.2 Grundlagen der Hanginstabilität	12
2.3 Gefährdungsabschätzung	18
2.3.1 Terminologie	18
2.3.2 Gefährdungsmodellierung	19
3. DATENGRUNDLAGE	23
3.1 Digitales Geländemodell	24
3.2 Inventare	24
3.2.1 ALS-Inventar	25
3.2.2 Baugrunderkennung (BGK)	26
3.3 Korrigierte Geologie	27
3.4 Hydrologie	28
3.5 Landbedeckung und Substratklassen	28
3.6 Andere Geobasisdaten	29
4. UNTERSUCHUNGSGEBIET	30
4.1 Allgemeines	30
4.2 Geologie	31
4.3 Geomorphologie	35
4.4 Klima	35
4.5 Landbedeckung	36
5. METHODE	38
5.1 Datenaufbereitung	39
5.2 Explorative Datenanalyse	43
5.2.1 Nachbarschaftsstatistiken - Dichtekarten	43
5.2.2 Zonale Statistiken – frequency ratio (FR)	44
5.2.3 Korrelationskoeffizienten nach Spearman	46

5.2.4 BGK-Genauigkeit und geomorphologische Güte der Inventare	47
5.3 Validierung	47
5.3.1 Quantitative Validierung	47
5.3.2 Qualitative Validierung	50
5.4 Gefährdungsmodellierung	50
5.4.1 Multivariate Modellierung – Logistische Regression	50
5.4.2 Bivariate Modellierung – Landslide Susceptibility Index (LSI)	53
6. ERGEBNISSE	54
6.1 Ergebnisse der explorativen Datenanalyse	54
6.1.1 Ergebnisse Nachbarschaftsstatistiken – Dichtekarten	54
6.1.2 Ergebnisse Zonale Statistiken - frequency ratio (FR)	58
6.1.3 Ergebnisse Korrelationskoeffizienten nach Spearman	63
6.1.4 Ergebnisse BGK-Genauigkeit und geomorphologische Güte der Inventare	64
6.1.5 Diskussion der explorativen Datenanalyse	65
6.2 Ergebnisse der Validierung	68
6.2.1 Ergebnisse quantitative Validierung	68
6.2.2 Ergebnisse qualitative Validierung	72
6.2.3 Diskussion der Validierung	73
6.3 Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung	74
6.3.1 Ergebnisse multivariate Modellierung - Logistische Regression	74
6.3.2 Ergebnisse bivariate Modellierung – Landslide Susceptibility Index (LSI)	79
6.3.3 Diskussion der Gefährdungsmodellierung	83
7. DISKUSSION	86
8. ZUSAMMENFASSUNG	90
9. PERSPEKTIVEN	92
10. LITERATURVERZEICHNIS	95
ANHANG	105
Anhang A - Ergebnisse explorative Datenanalyse	105
Anhang B - Ergebnisse Gefährdungsmodellierung	115
LEBENS LAUF	117

Abkürzungen

AIC = Akaike Informations Criterion

AIT = Austrian Institute of Technology

ALS = Airborne Laserscanning

AUROC = Fläche unter der ROC-Kurve (engl. Area Under the ROC)

BAW = Bundesanstalt für Wasserwirtschaft

BD3 = Abteilung für Hydrologie und Geoinformation, Land Niederösterreich

BFW = Bundesforschungszentrum für Wald

BGK = Baugrundkataster

DGM = Digitales Geländemodell

FR = frequency ratio

GBA = Geologische Bundesanstalt

GIS = Geoinformationssystem

GK200 = Geologische Karte im Maßstab 1:200.000

GLM = Generalisiertes lineares Modell

HYDBOD = digitale hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs

LSI = Landslide Susceptibility Index

MoNOE = Methodenentwicklung zur Modellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich

ÖK50 = Österreich Karte im Maßstab 1:50.000

ÖKLIM = digitaler Klimaatlas Österreichs

R = Open-Source Statistiksoftware

ROC = Receiver Operating Characteristic

SA = Spatial Analyst

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vektorenparallelogramm für Rutschungen auf ebenen Gleitflächen (nach Ahnert, 1996; PLANAT, 2012)	14
Abbildung 2: Stabilitätszustände eines Hanges mit Beispielen von vorbereitenden, auslösenden und bewegungskontrollierenden Faktoren (nach Crozier, 1989; Dikau und Glade, 2002)	16
Abbildung 3: Übersicht Methoden der Gefährdungsabschätzung von gravitativen Massenbewegungen (Van Westen <i>et al.</i> , 1997; Van Westen, 2000, 2009; Guzzetti, 2006)	19
Abbildung 4: Schummerungskarte und ALS-Rutschungsinventar, Niederösterreich	25
Abbildung 5: Rutschungsinventar Baugrunderkennung, Niederösterreich	27
Abbildung 6: Untersuchungsgebiet - Rhenodanubische Flyschzone	30
Abbildung 7: Für den Flysch typische Wechselfolge aus Sandstein und Mergeln (Rabenstein an der Pielach, NÖ)(Krenmayr <i>et al.</i> , 2002 S. 19)	32
Abbildung 8: Geologische Übersicht des Untersuchungsgebietes	33
Abbildung 9: Typenreihen der Kulturlandschaften (schwarze Umrandung: Untersuchungsgebiet) (nach Wrbka <i>et al.</i> , 2005)	37
Abbildung 10: Methodische Konzeption (die Nummerierung entspricht den Kapiteln)	38
Abbildung 11: Relative Hangposition (Topographic Position Index) in topographisch differenziertem (a) und flachen (b) Bereichen des Untersuchungsgebietes	40
Abbildung 12: Vorgehensweise der Aufteilung des Untersuchungsgebietes in 4 Zonen anhand multipler negativer Puffer (schwarze Linien)	41
Abbildung 13: Berechnung der Nachbarschaftsstatistiken (nach ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Focal Statistics works)	44
Abbildung 14: Berechnung der Zonalen Statistiken – Beispiel: Mittelwertberechnung nach Zonen (ZoneRas) für den Werteraster (ValRas) (ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Zonal Statistics works)	45
Abbildung 15: FR-Raster. Beispiel der relativen Gefährdung der Hangneigungsklassen des ALS-Rutschungsinventares (>1 überdurchschnittliche relative Gefährdung, <1 unterdurchschnittliche relative Gefährdung)	46
Abbildung 16: Dichtekarten ALS-Inventar	54
Abbildung 17: Dichtekarten BGK-Inventar	55
Abbildung 18: Durchschnittliche Hangneigungen im Untersuchungsgebiet	56
Abbildung 19: Walddichte (Anteil der Waldpixel) im Untersuchungsgebiet	57
Abbildung 20: Dichtekarten: mittlere Jahresniederschläge (1961-1990)	58
Abbildung 21: FR-Diagramm: geologische Formationen	59

Abbildung 22: FR-Diagramme: a) Hangneigung, b) Hangposition (TPI), c) Wölbung, d) Exposition	61
Abbildung 23: FR-Diagramme: a) Landbedeckung reklassifiziert, b) Distanz zu Straßen, c) Distanz zur Verbauung, d) mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990)	63
Abbildung 24: ROC-Kurven und AUROC des ALS-Modelles (a) und des BGK-Modelles (b), logistische Regression	69
Abbildung 25: Quantitative Validierung für den LSI-Klassifikationsgrenzwert 1; a) ALS-Inventar, b) BGK-Inventar	70
Abbildung 26: modifizierte ROC-Streudiagramme für die finalen vier Modelle	71
Abbildung 27: Flächenanteil der Gefährdungsklassen und Rutschungsdichte des Validierungsdatensatzes der vier Modelle; a) logistische Regression BGK-Inventar; b) logistische Regression ALS-Inventar, c) LSI BGK-Inventar, d) LSI-ALS-Inventar.....	72
Abbildung 28: Gefahrenhinweiskarte - logistische Regression, ALS.....	75
Abbildung 29: Gefahrenhinweiskarte - logistische Regression, BGK.....	78
Abbildung 30: Gefahrenhinweiskarte - Landslide Susceptibility Index, ALS.....	80
Abbildung 31: Gefahrenhinweiskarte - Landslide Susceptibility Index, BGK.....	82
Abbildung 32: Vergleich Schummerungskarte mit Standardbeleuchtung und aufbereitete HDR-Schummerungsdarstellung im Untersuchungsgebiet (Standardbeleuchtung: 315°; HDR aus vier Schummerungskarten mit den Beleuchtungsrichtungen 315°, 45°, 135°, 225°; Software Photomatix Pro Version 4.0.2)	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gravitative Massenbewegungen in Niederösterreich nach geologischen Zonen (~1953-1990) (nach Schwenk, 1992)	8
Tabelle 2: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach Prozess- und Materialtyp (nach Cruden und Varnes, 1996; Dikau <i>et al.</i> , 1996; Abbildungen nach Highland, 2004).....	11
Tabelle 3: Hangneigung und Rutschungen in Niederösterreich (Schwenk, 1992).....	16
Tabelle 4: Datenübersicht.....	23
Tabelle 5: Grenzwerte für die Bildung der modifizierten ROC-Kurven für beide Inventare.....	49
Tabelle 6: BGK -Genauigkeit im Untersuchungsgebiet (A = abgegriffen von Karte, E = eingemessen, K = keine Angabe, O = im Umkreis von, U = ungenaue Angabe).....	64
Tabelle 7: Geomorphologische Güte der finalen Gefährdungsmodelle.....	73
Tabelle 8: Standardisierte Beta-Koeffizienten der stetigen Variablen und Odds Ratio der signifikanten kategorialen Variablen für die finalen Gefährdungsmodelle der logistischen Regression.....	77

Abstract

The present diploma thesis provides a comprehensive spatial analysis of slope conditions which give rise to landsliding in the rhenodanubian Flyschzone of Lower Austria. Furthermore, statistical modeling was performed to reveal the most endangered areas by susceptibility maps.

Analyses were performed using two different landslide inventories. The ALS-Inventory was generated purposely for susceptibility modeling using a high resolution hillshade. The building ground register (BGK-inventory) represents the damaging events of landslides in Lower Austria. Exploratory data analysis identified relationships between the spatial occurrence of landslides and its preparatory factors for the respective inventory. Additionally, several limitations of input data were uncovered and subsequently considered in the statistical modeling.

For susceptibility modeling two statistical approaches, namely multivariate logistic regression analysis and a bivariate index-based approach (Landslide Susceptibility Index, LSI), have been applied on both inventories in separate calculations. Quantitative validation results revealed similar levels of statistical quality for all models. However, differing geomorphological “qualities” of obtained susceptibility maps indicated that a high statistical quality alone does not guarantee high qualitative modeling results. Furthermore it could be shown, that the modeling method used has a lower impact on the quality of the results than the landslide inventories used.

Best modeling results were obtained using the more accurate ALS-inventory and logistic regression. The resulting susceptibility map represents a high quality map which identifies the landslide prone areas and emphasizes the importance of input data quality. Furthermore, slope properties and geological preconditions were identified as the main influencing factors of modeling results.

Summarizing, the identified uncertainties associated with statistical susceptibility modeling indicate, that quantitative approaches should be combined with qualitative variable selection and appropriate qualitative validation of the modeling. In natural hazard analysis, especially in the prediction of future landslide prone areas and risks, a holistic and interdisciplinary collaboration of social, natural and engineering sciences should be aimed at (Felgentreff and Glade, 2007).

1. Einleitung

Die durch Naturkatastrophen hervorgerufenen finanziellen Schäden waren im Jahr 2011 mit 300 Milliarden Euro um über 60% höher als im bisherigen Rekordjahr 2005. Wie die UN-Sonderbeauftragte für Katastrophenvorsorge Margareta Wahlström mitteilte, leben zur Zeit über 50% aller Menschen unter dem Risiko von Naturgefahren (Frankfurter Rundschau, 2012; Sueddeutsche.de, 2012). Ereignisse wie die Erdbeben im Indischen Ozean im Jahr 2004, in Haiti im Januar 2010 und in Japan im März 2011 mit den damit verbundenen sekundären Folgen (z.B. Tsunamis Schäden) haben durch die intensive mediale Berichterstattung weltweite Aufmerksamkeit erlangt und der Menschheit vor Augen geführt, „*dass der Mensch den natürlichen Prozessen des Systems Erde schutzlos ausgeliefert zu sein scheint*“ (Dikau und Weichselgartner, 2005 S. 7).

Die Bedeutung von Naturgefahren scheint im Zusammenhang einer stetig zunehmenden Bevölkerungszahl und den damit verbundenen steigenden Raumansprüchen auch in Österreich zuzunehmen. Gravitative Massenbewegungen wie Rutschungen, Murgänge oder Steinschläge stellen hierbei eine bedeutende Naturgefahr dar (Schweigl und Hervás, 2009). In Niederösterreich gehören gravitative „*Massenbewegungen (...) neben Erdbeben, Hochwässern und Lawinen (...) zu den häufigsten Naturereignissen, die immer wieder Hab und Gut und in einzelnen Fällen sogar Gesundheit und Leben von Menschen bedrohen oder zerstören*“ (Schwenk, 1992 S. 598).

Wie diverse Publikationen belegen, stellen Rutschungen, welche den Forschungsgegenstand dieser Diplomarbeit bilden, die häufigste Schadensform der gravitativen Massenbewegungen in Niederösterreich dar. Besonders in den Katastrophenjahren 1965, 1966, 1975 und 2009 verursachten eine Vielzahl von Rutschungen Schäden und traten verstärkt in den Mittelpunkt der öffentlichen Wahrnehmung (Schwenk, 1992; Wessely *et al.*, 2006; Pomaroli *et al.*, 2011). Auch in der niederösterreichischen Raumordnung wird der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen seit jeher eine besondere Wichtigkeit beigemessen (Pomaroli *et al.*, 2011). Wie in Wessely *et al.* (2006) beschrieben, wurden in Niederösterreich bis zum Jahr 2006 über 1200 dieser schadenverursachenden Ereignisse gemeldet, wobei Rutschungen mit 1100 gemeldeten Fällen die häufigste Schadensform darstellen. Die hohe Rutschaktivität in Niederösterreich zwischen ~1953 und 1990 stellt Schwenk (1992) in tabellarischer Form dar, wobei die aufgetretenen Massenbewegungen nach Bewegungsformen und geologischen Zonen unterteilt wurden (Tab. 1).

Tabelle 1: Gravitative Massenbewegungen in Niederösterreich nach geologischen Zonen (~1953-1990) (nach Schwenk, 1992)

	Böhmische Masse	Molasse/ Inneralp. Tertiär	<u>Flysch</u>	Klippen	Kalkalpen	Grauwacken- zone	Zentral- zone	Quartär	Σ
Sturzprozesse	24	2	2	-	21	-	2	19	70
Felsgleitungen	2	-	4	2	11	-	3	-	22
<u>Rutschungen</u>	14	150	404	183	143	3	55	12	964
Kriech- und Fließprozesse	2	5	2	1	2	-	1	-	13
Murgänge	6	3	16	3	41	-	10	-	79
Σ	48	160	428	189	218	3	71	31	1148

Im entsprechenden Zeitraum konnten 1148 Massenbewegungen verzeichnet werden. Den Großteil bilden hierbei Rutschungen mit 964 Fällen, welche am häufigsten (404 Fälle) in der rhenodanubischen Flyschzone auftraten (Schwenk, 1992).

Um im Kontext des globalen Umweltwandels, welcher sowohl natürliche als auch anthropogene Veränderungen beinhaltet, auch in Zukunft auf derartige schadensbringenden Ereignisse vorbereitet zu sein, sind die Kenntnisse der funktionalen Zusammenhänge und rutschungsfördernden Momente, sowie eine flächenhafte Ausweisung der gefährdeten Bereiche essentiell und können wesentlich zur Vermeidung von Schäden beisteuern (Pomaroli *et al.*, 2011).

1.1 Ziel

Ziel dieser Diplomarbeit ist es einen umfassenden Überblick über die wichtigsten Zusammenhänge zwischen den Vorbedingungen bzw. vorbereitenden Faktoren von Rutschungen (vgl. Kapitel 2.2) und der Rutschungsaktivität der rhenodanubischen Flyschzone in Niederösterreich aufzuzeigen und die durch Rutschungsprozesse gefährdeten Bereiche flächenhaft darzustellen. Durch Verwendung von zwei Modellierungsansätzen und zwei unabhängig voneinander erstellten Rutschungsinventare kann sowohl der Einfluss der Methode als auch der Einfluss der zugrundeliegenden Inventare auf die Ergebnisse untersucht werden. Die Arbeit wird im Rahmen des Projektes „Methodenentwicklung zur Modellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich“ (MoNOE) durchgeführt, welches vom Land Niederösterreich finanziert wird.

1.2 Arbeitshypothesen

Im Folgenden werden die grundlegenden Arbeitshypothesen dieser Arbeit formuliert.

- I. Die explorative Datenanalyse kann grundlegende Zusammenhänge im Untersuchungsgebiet sichtbar machen, wodurch die anschließende Gefährdungsmodellierung optimiert wird.
- II. Die Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet kann nur durch eine kombinierte Betrachtung mehrerer Faktoren abgeschätzt werden.
- III. Die Ergebnisse sind von der jeweilig verwendeten Methode als auch vom jeweilig verwendeten Rutschungsinventar abhängig. Die daraus abgeleiteten Aussagen unterscheiden sich maßgeblich.
- IV. Die durch statistische Modellierung erstellte Gefahrenhinweiskarte kann die Rutschungsgefährdung im regionalen Maßstab ausreichend gut darstellen.

Ad: Als ausreichend gut wird die Darstellung der Rutschungsgefährdung erachtet, wenn die statistischen Validierungsmaße auf eine mindestens gute Trennung zwischen den gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen hinweisen und die geomorphologische Güte des Modelles ebenfalls als mindesten gut eingeschätzt wird.

1.3. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich grundsätzlich am internationalen wissenschaftlichen Standard, welcher im englischen Sprachraum mit dem Akronym IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion) bezeichnet wird (Day und Gastel, 2011). Nach der Einleitung (Kapitel 1), in welcher die Ziele, die Arbeitshypothesen und der Aufbau der Arbeit dargestellt werden, folgt ein für Diplomarbeiten übliches Theoriekapitel (Kapitel 2). Hierbei werden Begrifflichkeiten, Definitionen sowie das für das Thema grundlegende Fachwissen erläutert. Nach der Darstellung der für die Analysen angewandten Datengrundlagen (Kapitel 3) wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt (Kapitel 4). Das methodische Vorgehen dieser Diplomarbeit wird in Kapitel 5 erläutert, die Ergebnisse im darauffolgenden Kapitel 6. Im jeweiligen Unterkapitel werden die Ergebnisse interpretiert. Eine abschließende Diskussion aller Ergebnisse folgt in Kapitel 7. Nach der Zusammenfassung (Kapitel 8) werden die aus den Erkenntnissen dieser Arbeit abgeleiteten Perspektiven aufgezeigt (Kapitel 9). Dem Literaturverzeichnis (Kapitel 10) folgt der Anhang.

2. Gravitative Massenbewegungen

In diesem Kapitel werden grundlegende Definitionen, Klassifikationen und Fachkenntnisse zum Thema gravitative Massenbewegungen und deren Gefährdungsabschätzung aufgezeigt, wobei der Schwerpunkt auf Rutschungsprozesse (Prozesstyp „Gleiten“, vgl. Kapitel 2.1) gesetzt wird.

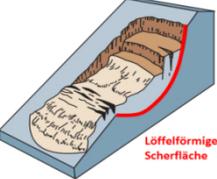
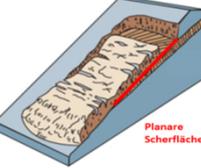
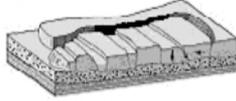
2.1 Klassifikation gravitativer Massenbewegungen

“One obstacle to a simple definition of „landslide“ is the erroneous assumption that a landslide is, simply, a slide of land. A similar linguistic analysis would suggest that a cowboy is a male calf.” (Cruden, 1991 S. 27).

Der Begriff gravitative Massenbewegungen bezieht sich auf alle geomorphologisch wirksamen Prozesse, welche eine hangabwärts gerichtete Bewegung von hangformendem Material unter dem Einfluss der Schwerkraft aufweisen (Dikau und Glade, 2002; Glade *et al.*, 2005). Die hierfür international verwendeten Begriffe „mass movements“, „landslides“ oder „slope failures“ beziehen sich daher nicht nur auf Hangrutschungen im eigentlichen Sinne, sondern umfassen jegliche Bewegung von Fels und/oder Lockergestein, welche der Gravitation hangabwärts folgt (Cruden, 1991; Ahnert, 1996). Diese teils sehr unterschiedlichen Prozesse finden sowohl an der Erdoberfläche, als auch in der oberflächennahen Lithosphäre statt (Dikau und Weichselgartner, 2005). Das breite Spektrum von gravitativen Massenbewegungen weist eine hohe Variabilität bezüglich der Bewegungsgeschwindigkeiten und Magnituden auf und lässt sich nach dem internationalen Standard „WP/WLI International Geotechnical Societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory 1993“ nach Prozess- und Materialtyp klassifizieren (Cruden und Varnes, 1996; Dikau und Glade, 2002).

Die verschiedenen Prozesstypen werden in Tabelle 2 getrennt nach den zwei übergeordneten Materialtypen Festgestein und Lockergestein dargestellt, wobei der Begriff Lockermaterial sowohl Erd-Boden- und Schuttmaterial beinhaltet. Als „Fallen“ werden hierbei jene gravitativen Massenbewegungen bezeichnet, bei welchen Fels- oder Lockermaterial frei fallend, springend oder rollend abstürzt. Bei der Ablösung des Materials findet nur eine geringe oder keine Scherbewegung statt (Dikau und Glade, 2002). In der deutschsprachigen Literatur wird bei fallenden Festgesteinen je nach bewegtem Volumen zwischen Steinschlag/Blocksturz (< 2m³), Felssturz (2m³-10.000m³) und Bergsturz (>10.000m³) unterschieden (Poisel, 1997). Fallendes Lockermaterial wird als Erd- bzw. Schuttsturz bezeichnet.

Tabelle 2: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach Prozess- und Materialtyp (nach Cruden und Varnes, 1996; Dikau *et al.*, 1996; Abbildungen nach Highland, 2004)

Prozesstyp		Material		
		Festgestein	Lockergestein	
Fallen (engl. fall)		Bergsturz Felssturz Blocksturz Steinschlag	Erdsturz Schuttsturz	
Kippen (engl. topple)		Felskipfung	Erdkipfung Schuttkipfung	
Gleiten (engl. slide)	rotationsförmig	Felsrutschung	Erd- Schuttrutschung	 Löffelförmige Scherfläche
	translational	Felsgleitung	Erdblockgleitung Schuttblockgleitung	 Planare Scherfläche
Fließen (engl. flow)		Sackung, Talzuschub	Murgang Erdfließen Schuttfließen	
Driften (engl. spread)		Felsdriften	Erddriften Schuttdriften	
Komplex (engl. complex)		z.B. Felslawine	z.B. Rotationsrutschung mit Erdfließen und Steinschlagschutt (vgl. Abb. rechts)	

Der Prozesstyp „Kippen“ ist durch eine hangauswärtige Rotation der bewegten Masse um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunktes charakterisiert (Dikau und Glade, 2002). Man unterscheidet je nach kippendem Material zwischen Fels- Erd- und Schuttkipfung. Obwohl im Alltagsgebrauch viele Massenbewegungen als Hangrutschungen bezeichnet werden, wird in der Fachterminologie eine Rutschung als das der Gravitation folgende „Gleiten“ von Material auf Gleitflächen oder Zonen intensiver Scherverformung bezeichnet (Dikau und Glade, 2002; Highland, 2004; Bell, 2007). Rutschungen mit löffelförmigen Gleit- bzw. Scherflächen werden als Rotationsrutschungen (engl. slumps) bezeichnet, während man bei Vorhandensein von hangparallelen,

planaren Gleit- bzw. Scherflächen von Translationsrutschungen spricht (Dikau *et al.*, 1996). Rutschungen des Festgesteins werden je nach Form der Gleitfläche in Felsrutschung (gekrümmte Gleitfläche) und Felsgleitung (planare Gleitfläche) unterteilt (Dikau *et al.*, 1996). Der Prozesstyp „Fließen“ ist hingegen durch eine kontinuierliche Bewegung charakterisiert, bei der gewöhnlich keine Scherflächen vorhanden sind (Canadian Geotechnical Societies, 1993). Das charakteristische Fließverhalten führt zu einer irreversiblen, kontinuierlichen Deformation der bewegten Massen, die Geschwindigkeitsverteilung kann dabei als viskos beschrieben werden (Canadian Geotechnical Societies, 1993; Dikau und Glade, 2002). Langsam fließendes Festgestein wird je nach Größe der Massenbewegung als Sackung bzw. Talzusub beschreiben, schnell fließende Lockergesteine werden als Murgang (Zweiphasenströmung aus Wasser und Feststoff) charakterisiert (Schwenk, 1992; Cruden und Varnes, 1996; Dikau *et al.*, 1996; Iverson, 1997). Der Begriff „Driften“ definiert eine Lateralbewegung von Locker- oder Festgesteinen mit einem Einsinken in darunterliegende weichere Substrate, wobei die Gleitflächen kaum Scherungen ausgesetzt sind (Dikau und Glade, 2002). Als „Komplex“ wird eine gravitative Massenbewegung dann bezeichnet, wenn die bereits genannten Prozesstypen in Kombination auftreten (Cruden und Varnes, 1996; Dikau und Glade, 2002).

Neben der Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach Prozesstyp und Material existieren weitere Klassifikationen nach relativer Konzentration von Wasser, Feinmaterial und grobkörnigem Sediment (Phillips und Davies, 1991) oder nach Geschwindigkeit und Aktivitätsgrad (Cruden und Varnes, 1996). In dieser Arbeit werden unter dem Begriff Rutschungen alle gleitenden gravitativen Massenbewegungen (rotationsförmig und translational) zusammengefasst.

2.2 Grundlagen der Hanginstabilität

Gravitative Massenbewegungen hatten schon immer signifikante Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, daher besitzt auch die Erforschung dieser Hangbewegungen eine lange Geschichte. Ein Hauptaugenmerk der Wissenschaft lag dabei auf der Erforschung von grundlegenden funktionalen Zusammenhängen (Glade *et al.*, 2001). Aus geotechnischer Sichtweise konzentriert man sich heute noch auf das Zusammenspiel zwischen diversen Kraftkomponenten (Orme, 2002). Da die Wirkung der Schwerkraft auf die Materialbewegung an Hängen eine Funktion der Hangneigung darstellt (Ahnert, 1996), wirken auf jede Masse am Hang Kräfte, welche das Abscheren der Massen begünstigen. Diese treibenden Kräfte werden als Scherspannung zusammengefasst (Glade *et al.*, 2005). Die ersten quantitativen Ansätze bedienten sich an diesem Verständnis und versuchten das Auftreten von Hangbewegungen empirisch mit der Hangneigung in Verbindung zu setzen (Orme, 2002). Gegen die treibenden Kräfte (Scherspannung) wirken die Scherwiderstände (auch Scherfestigkeit genannt). Diese Kräfte versuchen der hangabwärts gerichteten Scherspannung zu widerstehen (Glade *et al.*, 2005)(vgl. Abb. 1). Charles Augustin Coulomb erkannte, dass besonders den Scherwiderständen eine bedeutende

Rolle bei der Auslösung von gravitativen Massenbewegungen zukommen und konzentrierte sich daher auf bodenmechanische Eigenschaften. Mit seiner 1776 veröffentlichten Publikation „Coulomb’s Statics Memoir“ schaffte er die Grundlagen für moderne quantitative Ansätze und trug erheblich zum Prozessverständnis bei (Orme, 2002). Das darin formulierte Coulomb-Gesetz lautet:

$$S_k = (\sigma - u) \tan\Phi + c$$

wobei

S_k = Grenzscherspannung

Φ = innerer Reibungswinkel

σ = Normalspannung

u = Porenwasserdruck

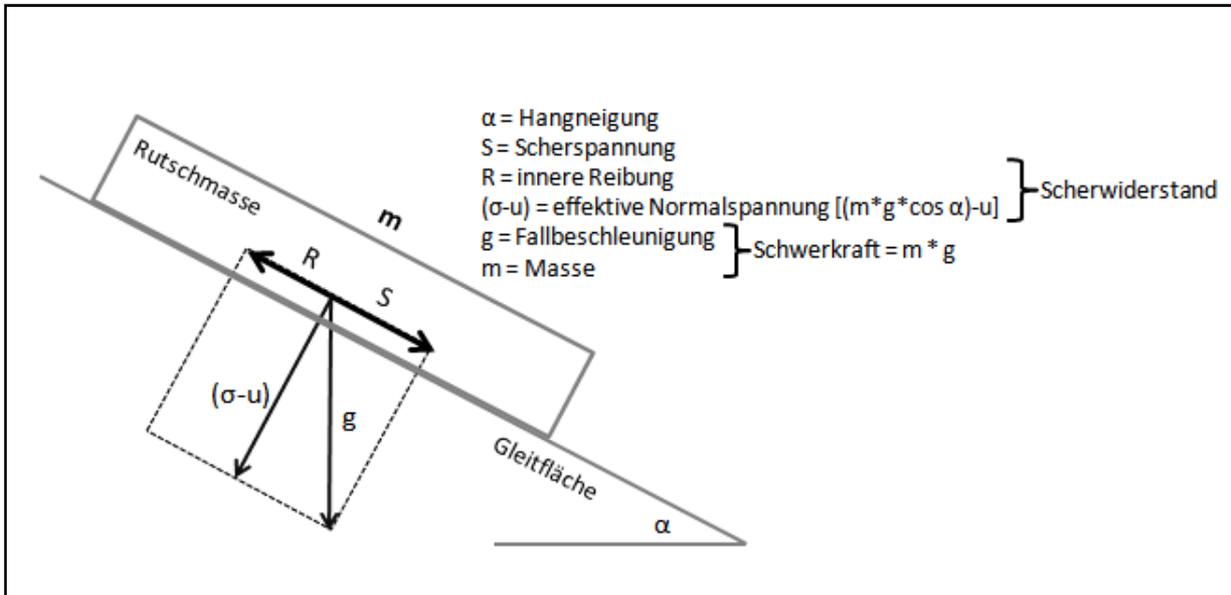
$(\sigma - u)$ = effektive Normalspannung

c = Kohäsion

Als Grenzscherspannung S_k kann jener Schwellenwert verstanden werden, bei dessen Überschreitung eine Massenbewegung ausgelöst wird. Dieser Grenzwert kann durch Reduktion der Scherwiderstände oder durch Erhöhung der Scherspannung überschritten werden (Glade *et al.*, 2005). Der innere Reibungswinkel Φ beschreibt eine Materialeigenschaft und gibt jenen Neigungswinkel an, bei dem eine kohäsionslose Lockermasse in Bewegung gerät. In der Regel wird der innere Reibungswinkel umso größer, je eckiger und dichter die Körner des Materials (Lagerungsdichte) gelagert sind (Summerfield, 1991; Ahnert, 1996). Ein erhöhter Zusammenhalt der Partikel führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Scherwiderstände. Diese als Kohäsion c bezeichnete Materialeigenschaft wird vor allem durch den Wassergehalt beeinflusst. Während des Bruchs werden kohäsive Verbindungen aufgelöst, sodass die Kohäsion ≈ 0 beträgt (Iverson, 1997). Wie die Abbildung 1 zeigt, ist die Normalspannung, die abhängig von der Masse m und dem Neigungswinkel ist, rechtwinklig zum Hang gerichtet (Summerfield, 1991). Diese auch als Haftung bezeichnete Kraft wird wiederum von hydrologischen Aspekten beeinflusst, wobei vor allem durch eine Erhöhung des Porenwasserdruckes und infolge von Auftrieb die haltenden Kräfte vermindert werden (Schwenk, 1992). Aus der Gleichung (Grenzscherspannung) ist abzuleiten, dass ein positiver Porenwasserdruck (bei völlig gefüllten Poren) die Normalspannung verringert, da der Scherwiderstand der häufig tonig-schluffigen Partikel durch „quellen“ herabgesetzt wird. Die tonig-schluffigen Lagen stellen daher eine Schwachstelle dar, welche in Verbindung mit Wasser als Scherfläche fungieren. Jegliche Wasserzufuhr, sei es durch Niederschläge, Schneeschmelze oder künstliche Bewässerung, kann daher den Stabilitätszustand eines Hanges verändern, wobei die Auflast des Wassers die Scherspannung zusätzlich vergrößert (Crozier, 1989; Schwenk, 1992; Glade *et al.*, 2005; Wessely *et al.*, 2006; Schweigl und Hervás, 2009). In den meisten Fällen sind hierbei Starkniederschläge und starke Tauperioden für die hohe Durchfeuchtung des Bodens verantwortlich und können als Auslöser von Rutschungen identifiziert werden. Ein negativer Porenwasserdruck hingegen erhöht den Scherwiderstand, da die nur teilweise befeuchteten Poren aufgrund einer erhöhten Oberflächenspannung die Partikel stärker binden. Folglich ergibt sich eine effektive Normalspannung,

welche den Effekt des Porenwasserdrucks berücksichtigt (Summerfield, 1991; Ahnert, 1996; Iverson, 1997; Busche, 2005). Bei bindigen Bodenarten bestimmt vor allem die Scherfestigkeit, bei nicht bindigen Bodenarten vor allem der Reibungswinkel die Rutschanfälligkeit des Hanges (Schwenk, 1992).

Abbildung 1: Vektorenparallelogramm für Rutschungen auf ebenen Gleitflächen (nach Ahnert, 1996; PLANAT, 2012)



Der Stabilitätszustand eines Hanges hängt somit aus geotechnischer Sicht sowohl von den Materialeigenschaften (Veränderungen durch Wasserzufuhr) als auch von den geometrischen Eigenschaften des Hanges ab. Hänge sind demnach umso anfälliger für gravitative Massenbewegungen, je steiler sie sind und je geringer die Kohäsion, die Lagerungsdichte sowie der innere Reibungswinkel ist, wobei in diesen Überlegungen auch hydrologische Aspekte (z.B. Porenwasserdruck) berücksichtigt wurden (Ahnert, 1996; Zepp, 2002).

Um den Grad der Stabilität eines Hanges abzuschätzen, können die treibenden Kräfte (Scherspannung) und haltenden Kräfte (Scherwiderstand) für eine bekannte oder angenommene planare oder rotationsförmige Scherfläche berechnet und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Der als Quotient zwischen Scherwiderstand und Scherspannung definierte Faktor wird als Sicherheitsfaktor (engl. factor of safety) bezeichnet und ist weit verbreitet.

$$\text{Sicherheitsfaktor} = \frac{\text{Scherwiderstand}}{\text{Scherspannung}}$$

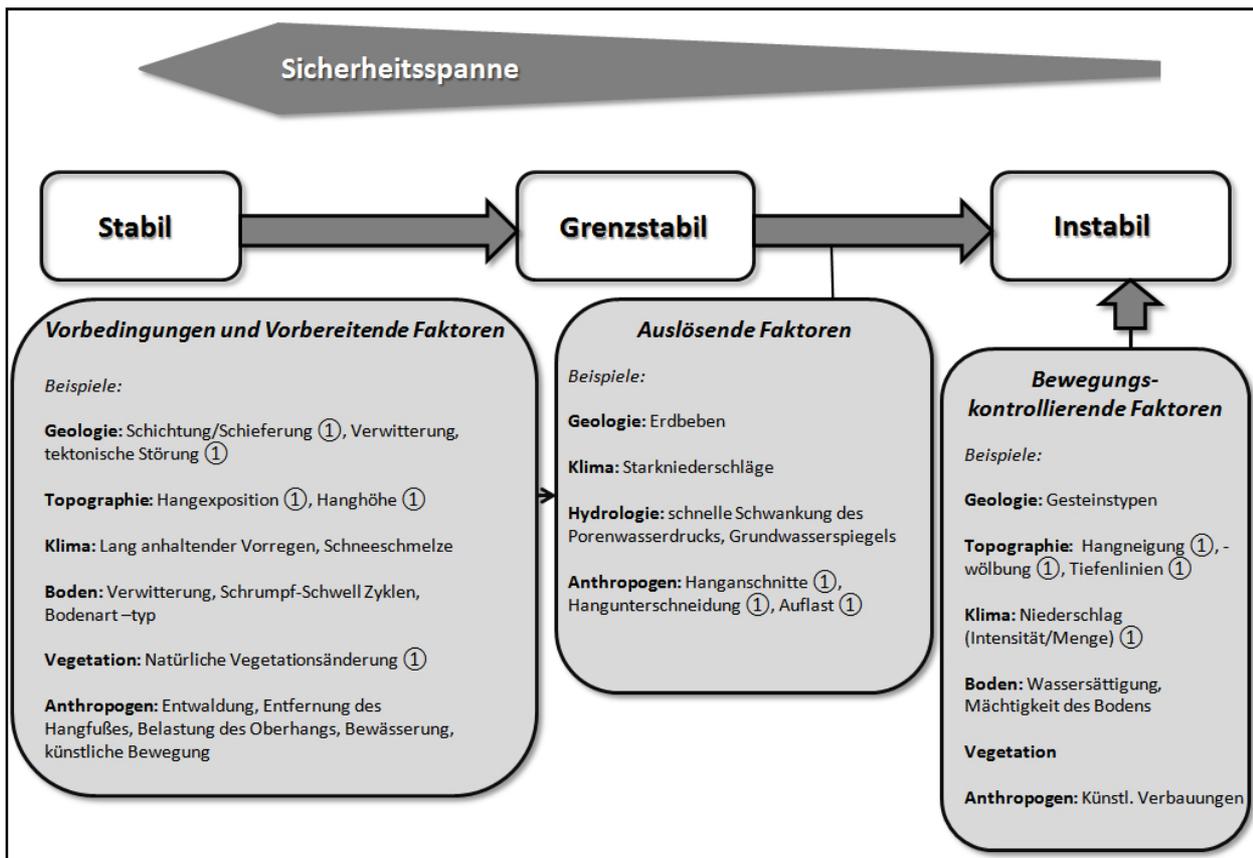
Beträgt dieser Faktor > 1 (bei Summerfield $> 1,3$) so kann der Hang als stabil bezeichnet werden, Werte < 1 identifizieren instabile Bedingungen am Hang. Als grenzstabil (engl. meta stable) kann ein Hang dann bezeichnet werden, wenn der Sicherheitsfaktor genau 1 (Summerfield 1-1,3) beträgt (Summerfield, 1991; Selby, 1993; Glade *et al.*, 2005; Guzzetti, 2006; Bell, 2007). Wie Glade und Crozier (2005) sowie

Summerfield (1991) ausführen, ist die Anwendung des Sicherheitsfaktors mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Summerfield merkt hierbei an, dass die Kohäsion sowie der Porenwasserdruck äußerst variable Eingangsparameter darstellen und somit die Anwendung des Sicherheitsfaktors in vielen Situationen eine beschränkte Verwendbarkeit aufweist (Summerfield, 1991). Glade und Crozier (2005) zeigen die Limitationen dieses Faktors auf, indem sie zwei Hänge mit unterschiedlichen Scherwiderständen und Scherspannungen vergleichen. Diese Hänge weisen einen identischen Sicherheitsfaktor, jedoch eine völlig unterschiedliche Sicherheitsspanne (engl. margin of stability) auf, welche wie folgt berechnet wird:

$$\text{Sicherheitsspanne} = \text{Scherwiderstand} - \text{Scherspannung}$$

Damit eine gravitative Massenbewegung auftritt, muss diese Sicherheitsspanne gänzlich überschritten werden, was durch eine Reduktion der Scherwiderstände oder durch eine Erhöhung der Scherspannungen erfolgen kann. Besitzen zwei Hänge denselben Sicherheitsfaktor jedoch unterschiedliche Sicherheitsspannen, so kann der Hang mit höherer Sicherheitsspanne den destabilisierenden Kräften in einem höheren Maß standhalten und somit als stabiler bezeichnet werden (Glade *et al.*, 2005). Crozier (1989) hat hierzu den theoretischen Rahmen entworfen, in welchem jeder Hang einen bestimmten Stabilitätszustand aufweist (Abb. 2). Er unterscheidet dabei stabile (engl. stable), grenzstabile (engl. marginally stable) und instabile (engl. actively unstable) Hänge. Ein stabiler Hang weist demnach eine hohe Sicherheitsspanne auf und kann daher nur durch gravierende Veränderungen in einen grenzstabilen und schließlich instabilen Zustand überführt werden. Ein grenzstabiler Hang hat noch keine Bewegung initiiert, reagiert jedoch höchst sensitiv auf jegliche Veränderung. Ein instabiler Hang besitzt eine Sicherheitsspanne von nahezu Null und weist ständige oder unterbrochene Bewegung auf. In welchem der drei Stabilitätszustände sich der Hang befindet, hängt von diversen Vorbedingungen sowie vorbereitenden, auslösenden und bewegungskontrollierenden Faktoren ab. Als Vorbedingungen und vorbereitende Faktoren werden jene Faktoren verstanden, welche die Sicherheitsspanne herabsetzen ohne eine Bewegung zu initiieren. Vorbedingungen werden als statische Faktoren definiert, die als Katalysatoren wirken und dadurch die destabilisierende Wirkung der dynamischen Faktoren effektiver machen. Die vorbereitenden Faktoren stellen dynamische Einflüsse dar, welche für die Überführung eines Hanges von einem stabilen in einen grenzstabilen Hang verantwortlich sind. Als auslösende Faktoren werden jene Faktoren bezeichnet, welche eine gravitative Massenbewegung initiieren (Crozier, 1989; Glade *et al.*, 2005). Die bewegungskontrollierenden Faktoren sind für das Bewegungsverhalten verantwortlich und kontrollieren sowohl Form, Rate und Dauer der Bewegung. In Abbildung 2 werden das Konzept von Crozier (1989) sowie eine Auswahl von statischen und dynamischen Faktoren dargestellt.

Abbildung 2: Stabilitätszustände eines Hanges mit Beispielen von vorbereitenden, auslösenden und bewegungskontrollierenden Faktoren (nach Crozier, 1989; Dikau und Glade, 2002)



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

Die Ursachen von gravitativen Massenbewegungen sind demnach vielfältig, wobei geologische, topographische, klimatische, anthropogene und hydrologische Faktoren sowie Eigenschaften des Bodens und der Vegetation besonders in ihrem Zusammenwirken den Stabilitätszustand von Hängen bestimmen.

Schwenk (1992) hat die durchschnittliche Hangneigung der Rutschhänge in Niederösterreich verglichen und nach geologischen Zonen gegliedert (Tab. 3.).

Tabelle 3: Hangneigung und Rutschungen in Niederösterreich (Schwenk, 1992)

Zone	Anzahl der Messungen	Durchschnittliche Neigung
Molasse und Inneralpines Tertiär	131	27°
Flysch- und Klippenzone	528	29°
Zentralzone	48	35°
Kalkalpen	165	37°

Die Rutschungshänge der Molasse, des Inneralpinen Tertiärs und der Flysch- und Klippenzone weisen dabei wesentlich geringere Hangneigungen als jene der Zentralzone und der Kalkalpen auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Lockerböden der Molasse, des Inneralpinen Tertiärs und der Flysch- und

Klippenzone deutlich rutschanfälliger sind (Schwenk, 1992), da die Grenzscherspannung bereits bei geringeren Hangneigungen überschritten wird. Neben der Hangneigung kommt der Lithologie, welche die Mächtigkeit und Eigenschaft der jeweiligen Verwitterungsdecke bestimmt, eine Schlüsselrolle bei der Ursachenerörterung von Hangbewegungen zu (Götzing, 1943; Schwenk, 1992; Wessely et al., 2006; Schweigl und Hervás, 2009).

Auch die längerfristigen klimatischen Gegebenheiten haben Einfluss auf chemische, physikalische und organische Verwitterungsprozesse und mitbestimmen somit den Aufbau, die Zusammensetzung und Mächtigkeit der Verwitterungsdecke (Schwenk, 1992; Wilhelmy und Bauer, 2002). Eine Vielzahl der genannten natürlichen Faktoren wird wiederum durch den menschlichen Eingriff in das geomorphologische System beeinflusst. Somit muss der anthropogene Faktor bei der Erörterung von derartigen Ursachen-Wirkungsbeziehungen stets berücksichtigt werden, da der Mensch einen großen Teil der Massenbewegungen vorbereitet, begünstigt, verursacht oder direkt auslöst (Crozier, 1989; Schwenk, 1992; Glade, 2003; Glade *et al.*, 2005; Kittel *et al.*, 2010). Dabei stellt die Landbedeckung, welche maßgeblich durch die menschliche Landnutzung beeinflusst wird (z.B. durch Entwaldung, Bewirtschaftung), einen wichtigen Einflussfaktor dar. Wie diverse Publikationen belegen, haben Veränderungen der Landnutzung, im Besonderen die Entwaldung von Hängen, unmittelbare Auswirkungen auf das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen (Montgomery *et al.*, 2000; Rickli *et al.*, 2002; Glade, 2003; Kittel *et al.*, 2010). Analysen von Götzing (1943) und Schwenk (1992) weisen darauf hin, dass Rutschungen häufiger in nicht bewaldeten Bereichen auftreten. Wie Rickli *et al.* (2002) zeigen, wird der Waldbedeckung im Allgemeinen eine positive Wirkung auf die Hangstabilität zugeschrieben, wobei das Gesamtvolumen von oberflächennahen und durch Starkniederschläge ausgelösten Rutschungen unter Waldbedeckung geringer ist. Das durchschnittliche Rutschungsvolumen (Magnitude) war unter Wald jedoch größer. Die Interpretation der Autoren kann anhand der Betrachtung der Sicherheitsspanne verdeutlicht werden. Unter Wald sind durch die intensive Durchwurzlung und die erhöhte Evapotranspiration die Erosionsprozesse im Allgemeinen geringer. Die Sicherheitsspanne ist aufgrund der höheren Scherwiderstände (mechanische Stärkung durch Wurzelsysteme und günstigere Hanghydrologie durch erhöhte Evapotranspiration) unter Wald größer, aufgrund der geringeren Erosionsraten wird zudem unter Wald mehr Material akkumuliert. Die erhöhte Sicherheitsspanne führt dazu, dass kleinere Niederschlagsereignisse unter Wald keine Rutschungen auslösen. Die Sicherheitsspanne beträgt somit nur bei extremen Niederschlagsereignisse ~ 0 , wodurch weniger, jedoch größere Rutschungen als im Freiland auftreten können (Rickli *et al.*, 2002). Über einen längeren Betrachtungszeitraum kann somit das durch oberflächennahe Rutschungen transportierte Materialvolumen unter Wald genauso groß bzw. größer sein als im Freiland (Crozier, 1989; Rickli *et al.*, 2002; Bell, 2007). Wie Schwenk (1992) und Wessely (2006) feststellen, sind in Niederösterreich Verbauungsmaßnahmen wie Hangfußanschnitte, Belastungen von Oberhängen oder Wasserzuführungen in vielen Fällen die Hauptursache für Rutschungsprozesse, wobei die mit den

Verbauungsmaßnahmen einhergehenden Veränderungen der Hangwasserverhältnisse viele Rutschungen vorbereiten und/oder verursachen (Schwenk, 1992; Wessely *et al.*, 2006). Bei der flächenhaften Abschätzung der Rutschungsgefährdung müssen daher eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigt werden, welche zur Erklärung des räumlichen Verteilungsmusters der Rutschungen beitragen.

2.3 Gefährdungsabschätzung

Um die Gefährdungen durch Massenbewegungen für ein bestimmtes Gebiet zu identifizieren, existieren eine Reihe von Methoden (Kapitel 2.3.2). Da in der Praxis diverse Fachtermini (z.B. Gefährdung, Gefahr und Risiko) synonym verwendet werden (Fell *et al.*, 2008), werden Abschnitt 2.3.1 die wichtigsten Begriffe erläutert.

2.3.1 Terminologie

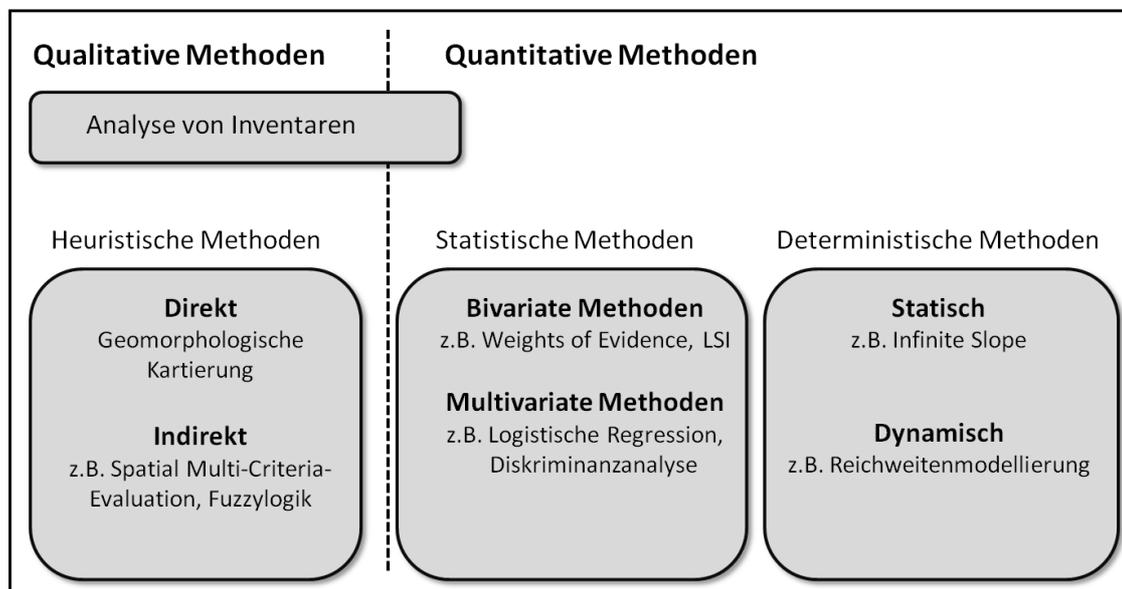
Unter einem Naturereignis (engl. natural event) wird das Auftreten natürlicher geomorphologischer Prozesse (z.B. Rutschungen) verstanden, welche vom Menschen nicht als potenzielle Bedrohung betrachtet werden. Ein Naturereignis wird erst dann zur Naturgefahr (engl. natural hazard), wenn diese natürlichen Prozesse das Leben und Eigentum von Menschen bedrohen (Dikau und Weichselgartner, 2005). Unter dem Begriff Gefährdung (engl. susceptibility) kann die räumliche Anfälligkeit oder Empfindlichkeit eines Gebietes gegenüber eines bestimmten geomorphologischen Prozesses verstanden werden (Schweigl und Hervás, 2009). Die Gefährdungsabschätzung (engl. susceptibility assessment), welche in dieser Arbeit durchgeführt wird, analysiert im Gegensatz zur Risikoanalyse die Rutschungsprozesse unabhängig von den potentiell gefährdeten Risikoelementen und beantwortet lediglich die Frage „*Wo kann was auftreten?*“ (Bell, 2007). Die dadurch erstellten Gefahrenhinweiskarten oder Gefährdungskarten (engl. susceptibility maps) stellen somit die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer bestimmten gravitativen Massenbewegung an einem gegebenen Ort dar (Schweigl und Hervás, 2009). Die Gefahrenanalyse (engl. hazard assessment) erweitert die Gefährdungsanalyse inhaltlich und versucht sowohl die Frequenz, als auch die Magnitude der analysierten Prozesse zu erörtern (Bell, 2007). Die resultierende Gefahrenkarte (engl. hazard map) dient somit zur Darstellung der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses einer gewissen Magnitude an einem bestimmten Ort, innerhalb eines definierten Zeitraumes. Unter dem Begriff Risiko (engl. risk) wird jene Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der nachteilige Einwirkungen für den Menschen, dessen Eigentum und die Umwelt entstehen können (Dikau und Glade, 2002). Somit setzt sich das quantitativ ausgedrückte Risiko aus der Verbindung von Naturgefahr und der Verwundbarkeit zusammen ($Risiko = Naturgefahr \times Verwundbarkeit$), wobei die Verwundbarkeit (engl. vulnerability) als die Verletzbarkeit von Risikoelementen (Personen, Gesellschaften, Infrastruktur, System) gegenüber einer spezifischen Naturgefahr mit einer bestimmten Ereignisstärke verstanden wird (Dikau und Weichselgartner, 2005).

Die Risikoanalyse (engl. risk analysis) beschäftigt sich somit mit der „Nutzung verfügbarer Informationen zur Abschätzung des durch die Gefahr hervorgerufenen Risikos für die Bevölkerung, das Individuum, das Eigentum, die Umwelt etc. [...]“ (Dikau und Glade, 2002 S. 41).

2.3.2 Gefährdungsmodellierung

Die Gefährdungsmodellierung von gravitativen Massenbewegungen versucht die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit dieser geomorphologischen Prozesse zu erörtern, wobei die zeitliche Auftretenswahrscheinlichkeiten sowie die Magnituden der erwarteten gravitativen Massenbewegungen ausdrücklich nicht in die Analysen einbezogen werden (Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy, 2004 in Guzzetti, 2005; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2006; Fell *et al.*, 2008). Die räumliche Anfälligkeit des jeweiligen Untersuchungsgebietes wird hierbei auf Basis von Geobasisdaten oder anhand von Expertenwissen abgeschätzt. Diese Datenbasis soll die Vorbedingungen und die vorbereitenden bzw. verursachenden Faktoren (vgl. Kapitel 2.2) für den zu modellierten Prozess besonders gut repräsentieren. Die Methoden der Gefährdungsmodellierungen können in qualitative und quantitative Ansätze gegliedert werden (Abb. 3).

Abbildung 3: Übersicht Methoden der Gefährdungsabschätzung von gravitativen Massenbewegungen (Van Westen *et al.*, 1997; Van Westen, 2000, 2009; Guzzetti, 2006)



Den wichtigsten Eingabeparameter für die Gefährdungsmodellierungen bilden die Inventare der jeweilig untersuchten Prozesse. Die Lagegenauigkeit der Inventare sowie die darin enthaltenen Informationen bestimmen maßgeblich die Qualität der daraus abgeleiteten Modellierungsergebnisse (Petschko *et al.*, 2011). Die räumliche Darstellung dieser aus digitalen Geländemodellen, Luftbildern oder historischen Analysen erhaltenen Inventare in Form von Dichtekarten (engl. „density maps“ bzw. „isopleth“) kann als

eine elementare Form der Gefährdungsdarstellung angesehen werden. Hierbei wird aus der räumlichen Verteilung der gravitativen Massenbewegungen die zukünftige räumliche Gefährdung direkt abgeleitet ohne jene Faktoren zu berücksichtigen, welche zu diesen Hanginstabilitäten geführt haben (Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2006; Van Westen, 2009). Die gravitativen Massenbewegungen können hierbei sehr detailliert als Flächen (somit wird auch die Magnitude erfasst) oder als Punkte verortet werden. Anhand entsprechender Informationen zu den Inventaren können daher Auslösefaktoren identifiziert und Frequenz-Magnitude-Beziehungen hergestellt werden. Gefährdete Flächen, welche noch nicht von gravitativen Massenbewegungen betroffen sind, können jedoch nicht ausgewiesen werden (Dai *et al.*, 2002).

Heuristischen Methoden der Gefährdungsmodellierung stellen einen Expertenansatz dar, in welchem das Wissen des jeweiligen Bearbeiters eine entscheidende Rolle einnimmt (Van Westen *et al.*, 1997). Die expertenbasierten Ansätze stellen daher subjektive Methoden dar, in welchen angenommen wird, dass die Beziehungen zwischen der Rutschungsgefährdung und den vorbereitenden Faktoren im Gebiet für den Bearbeiter *a priori* bekannt sind (Dai *et al.*, 2002; Guzzetti, 2006). Bei der geomorphologischen Kartierung bestimmt der Experte die Gefährdung direkt im Gelände oder durch die Interpretation von digitalen Geländemodellen, Satelliten- oder Luftbildern. Es werden durch Interpretation der Geländeformen, des Materials und der geomorphologischen Prozesse potentiell gefährdete Hänge direkt abgeleitet. Diese Vorgehensweise kann zu sehr verlässlichen Aussagen führen, hängt aber im wesentlichen von den Fähigkeiten und dem Wissen des Bearbeiters ab (Van Westen *et al.*, 1997; Guzzetti, 2006; Bui *et al.*, 2011). Bei den indirekten heuristischen Methoden werden auf Basis von Expertenwissen eine Reihe von Parametern nach deren Wichtigkeit gereiht, gewichtet und miteinander kombiniert, um Gefährdungswerte abzuleiten (Van Westen, 2009). Diese subjektive Gewichtung der rutschungsfördernden Faktoren sowie die schwierige Reproduzierbarkeit der Ergebnisse stellen Limitationen der heuristischen Methoden dar. Zudem benötigen heuristische Methoden detaillierte Langzeitinformationen über die gravitativen Massenbewegungen und deren verursachenden Faktoren (Guzzetti *et al.*, 1999; Dai *et al.*, 2002). Die Gefährdung wird bei den qualitativen Methoden deskriptiv bzw. qualitativ (z.B. gering, mittel, hoch) ausgedrückt (Guzzetti, 2006).

Quantitative Methoden stellen die Gefährdung in der Regel numerisch (z.B. räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit) dar, wobei zwischen statistischen und deterministischen Ansätzen unterschieden werden kann (Van Westen *et al.*, 1997; Aleotti und Chowdhury, 1999; Guzzetti, 2006). Dabei wird die Annahme getroffen, dass die gravitativen Massenbewegungen in Zukunft unter den gleichen geologischen, geomorphologischen, hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen auftreten, welche bereits vergangene Massenbewegungen ausgelöst haben. Es wird somit vorausgesetzt, dass die Faktoren, welche gravitative Massenbewegungen vorbereiten, auslösen und

kontrollieren (vgl. Kapitel 2.2) identifizierbar sind und dass dadurch auch der Grad der Gefährdung hinreichend gut bewertet werden kann (Varnes, 1984; Aleotti und Chowdhury, 1999; Guzzetti, 2006). Zudem wird davon ausgegangen, dass sich diese erklärenden Faktoren nicht gegenseitig beeinflussen, was zu einer Reihe von praktischen Problemen führt (vgl. Kapitel 7). Die statistischen Methoden analysieren die funktionalen Zusammenhänge zwischen den gravitativen Massenbewegungen und den rutschungsfördernden Faktoren und setzen die räumliche Verteilung von gravitativen Massenbewegungen mit einer Vielzahl von Umweltfaktoren statistisch in Beziehung (Guzzetti, 2006; Bui *et al.*, 2011). Die statistische Vorgehensweise beugt somit dem subjektiven Vorgehen der heuristischen Methoden in gewissem Maße vor (Aleotti und Chowdhury, 1999). Durch die Analyse von rutschungsfördernden Faktoren kann die Gefährdung auch für jene Bereiche ausgewiesen werden, welche (noch) keine Massenbewegungen aufweisen (Guzzetti, 2006; Van Westen, 2009). Bivariate statistische Methoden kombinieren die möglichen rutschungsfördernden Parameter (z.B. Geologie, Hangneigung) jeweils getrennt mit den Rutschungsinventaren (Beguería, 2006; Guzzetti, 2006; Bui *et al.*, 2011). Beispielsweise werden bei der Generierung des Hazard-Index nach Van Westen (Van Westen, 1997; Bui *et al.*, 2011) und des Landslide Susceptibility Index (LSI) (Lee, 2004; Lee und Dan, 2005; Akgun *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; Vijith und Madhu, 2007; Yalcin *et al.*, 2011) alle getrennt voneinander erstellten Gewichtungparameter addiert, wobei der Variablenauswahl eine Schlüsselrolle zukommt. Der Hauptkritikpunkt der bivariaten Methoden liegt nach Van Westen (1997) in der Annahme, dass die verschiedenen Eingangsparameter unabhängig voneinander sind (Van Westen, 1997; Van Westen *et al.*, 1997; Bui *et al.*, 2011). Durch eine gründliche vorbereitende Datenexploration kann dieses Problem jedoch minimiert werden, indem die als voneinander abhängig identifizierten Variablen (vor der Kombination aller Parameter) kombiniert werden und im Anschluss nur ein Parameter in die Analysen eingeht (Van Westen *et al.*, 1997). Multivariate statistische Methoden berücksichtigen die Tatsache, dass das Zusammenspiel von rutschungsfördernden Faktoren eine bedeutende Rolle spielt und analysieren daher kombinierte Beziehungen zwischen einer abhängigen Variable (Rutschung) und mehreren unabhängigen Variablen (z.B. Geologie, Hangneigung). Für jede Kombination der rutschungsfördernden Faktoren wird hierfür die An- bzw. Abwesenheit von Rutschungen bestimmt und eine Matrix generiert. Diese Matrix wird im Anschluss mithilfe der Diskriminanzanalyse, der logistische Regression oder anderen multivariaten statistischen Methoden analysiert (Van Westen *et al.*, 1997; Aleotti und Chowdhury, 1999; Guzzetti, 2006; Van Westen, 2009; Bui *et al.*, 2011). Statistische Methoden eignen sich besonders gut für kleinmaßstäbige Analysen der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen. In einem iterativen Prozess kann dabei eine schrittweise Optimierung der Modelle durchgeführt werden (Van Westen *et al.*, 1997).

Deterministische Methoden versuchen die Gefährdung anhand physikalischer Stabilitätsmodelle auszuweisen. Diese prozessbasierten Modelle analysieren das geomechanische Gleichgewicht zwischen Stabilität und Instabilität eines Hanges. Hierbei werden die in Abbildung 1 dargestellten Vektoren (z.B.

innerer Reibungswinkel, Normalkraft, Kohäsion, Porenwasserdruck) miteinander in Beziehung gesetzt, um somit einen Sicherheitsfaktor (vgl. Kapitel 2.2) ausweisen zu können (Guzzetti *et al.*, 1999). Statisch deterministische Ansätze analysieren die Gefährdung zeitunabhängig, während dynamisch deterministische Ansätze das Ergebnis eines Zeitabschnittes als Eingabe für die Berechnung des nächsten Zeitabschnittes verwenden und somit beispielsweise Reichweitenmodellierungen realisiert werden können. Die deterministischen Methoden sind jedoch nur sinnvoll anwendbar, wenn homogene geomorphologische und hydrogeologische Verhältnisse im untersuchten Gebiet vorhanden sind, was diese Methoden nur für große Maßstäbe anwendbar macht (Van Westen, 2009; Van Westen *et al.*, 1997).

Die für Gefährdungsmodellierungen unerlässliche Validierung der Ergebnisse überprüft die Güte der erstellten Modelle, wodurch diese in einem iterativen Prozess optimiert werden können. Das Ziel der Validierung ist daher aufzuzeigen, ob das Modell eine korrekte und ausreichend gute Unterscheidung zwischen Gebieten mit und ohne Massenbewegungen ausweisen kann (Chung und Fabbri, 2003). Um die Qualität eines Modelles abzuschätzen, können eine Vielzahl von Gütemaßen berechnet werden. Bei den in dieser Arbeit verwendeten statistischen Methoden, bieten die Berechnungen von Erfolgsraten (engl. success rate), Vorhersageraten (engl. prediction rate), Fehlerraten (engl. error rates) sowie die grafische Darstellung diverser Gütemaße in Diagramm- (z.B. ROC) oder Matrizenform (z.B. Confusion Matrix) Aufschluss über die Verwendbarkeit und Aussagekraft der generierten Modelle (Chung und Fabbri, 2003; Brenning, 2005; Beguería, 2006).

Die vielfältigen und unterschiedliche methodischen Herangehensweise zur Abschätzung von Gefährdungen durch gravitative Massenbewegungen zeigt, dass in der wissenschaftlichen Gemeinschaft bis heute noch keine Übereinstimmung darüber getroffen wurde, welche Methode sich für welchen Zweck am besten eignet (Bui *et al.*, 2011).

3. Datengrundlage

Die räumlichen Analysen dieser Arbeit basieren auf einer Vielzahl von Geobasisdaten und Daten zu gravitativen Massenbewegungen. In Tabelle 4 werden die Metadaten der verwendeten Datensätze dargestellt. Ein Teil der verwendeten Daten wurde im Rahmen des Projektes „MoNOE“ aus bereits vorhandenen Daten abgeleitet (vgl. Spalte Datengrundlage).

Tabelle 4: Datenübersicht

Daten	Maßstab/Auflösung	Quelle	Geometrie	Datengrundlage
ALS-Inventar (Airborne Laserscanning)	-	Universität Wien, AIT	Punkte	Kartiergrundlage: DGM 1mx1m
BGK-Inventar (Baugrunderkennung)	1:50.000	Land Niederösterreich, Geologischer Dienst Niederösterreich	Punkte	-
Digitales Geländemodell (DGM)	1mx1m	Land Niederösterreich, Abteilung Hydrologie und Geoinformation	Raster	ALS-Befliegungsdaten
Korrigierte GK200	1:200.000/10mx10m	GBA - 2009 - ZI.383-09, Korrektur AIT	Raster	GK200, DGM, Lockergesteinskarte
Landbedeckung	50mx50m	Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (BFW, BAW)	Raster	Digitale Katastralmappe Österreich, Österreichische Waldkarte, Invekos- Daten, Orthofotos
Orthofotos	25cmx25cm	Land Niederösterreich, Abteilung Hydrologie und Geoinformation	Raster	-
Straßennetz	1:50.000	Land Niederösterreich, Abteilung Hydrologie und Geoinformation	Vektor	ÖK50
Flussnetz	1:10.000	Land Niederösterreich, Abteilung Hydrologie und Geoinformation	Vektor	DLM (BEV)
Substratklassen	50mx50m	Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (BFW, BAW)	Vektor	GK200, Bodenzustandsinventur Österreich, Bodenprofile ebod
Mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990)	3 Bogenmin.x5 Bogenmin.	Hydrologischer Atlas Österreich 2007	Vektor	Modellrechnung mit unkorrigierten Daten (Skoda/Lorenz)
Konvektive Starkniederschläge	3 Bogenmin.x5 Bogenmin.	Hydrologischer Atlas Österreich 2007	Vektor	Modellrechnung
Bezirke, Gemeinden, Geonamen, OEK50-Situation	1:50.000	Land Niederösterreich, Abteilung Hydrologie und Geoinformation	Vektor/ Raster	-

3.1 Digitales Geländemodell

Ein digitales Geländemodell (DGM) stellt die Geländehöhen eines Gebietes dar, wobei diese Höhen aus einem flugzeuggetragenen Laserscan (engl. airborne laser scan, ALS) abgeleitet werden. Hierbei werden die einzelnen Geländeabschnitte streifenweise beflogen, wobei Laserpulse ausgesendet werden und durch Laufzeitberechnungen der Höhenwert für jeden Punkt ermittelt wird. Bei dem aus einer Punktwolke bestehenden digitalen Oberflächenmodell (DOM) wird somit die oberste Fläche aus der Vogelperspektive dargestellt. Das Oberflächenmodell enthält alle Höhen, welche von diversen Objekten reflektiert werden. Daher werden im offenen Gelände Geländehöhen, bei Häusern die Dachfläche und in Waldgebieten sowohl die Höhen der Baumkronen (first pulse) als auch Höhen der Geländeoberfläche (last pulse) angezeigt. Durch Anwendung ausgereifter Filteralgorithmen kann das einfache digitale Oberflächenmodell (DOM) in ein digitales Geländemodell (DGM) überführt werden, welches nur die Höhe der Geländeoberfläche (z.B. im Wald nur die Höhe des Waldbodens - last pulse) darstellt (Pfeifer, 2003).

Das in dieser Arbeit verwendete hochaufgelöste DGM wurde von der Abteilung Hydrologie und Geoinformation (BD3) vom Land Niederösterreich zur Verfügung gestellt und besitzt eine räumliche Auflösung von 1m×1m. Wie im Abfragetool (Suchthema: Flugdatum Laserscan, Info-Tool) des NÖ-Atlas (NÖ-Atlas 3.0, 2012) ersichtlich, wurde das gesamte DGM für das Bundesland Niederösterreich im Zeitraum zwischen 2006-2009 beflogen. Die Geländehöhen des Untersuchungsgebietes beziehen sich daher auf diesen Zeitraum. Beispielsweise wurde der Flugblock Neulengbach im Herbst 2006 beflogen, die Daten zum Flugblock Raming beziehen sich auf das Frühjahr 2009. Der Großteil der Daten des Untersuchungsgebietes stammt vom Frühjahr 2008, in welchem die Flugblöcke Waidhofen an der Ybbs, Scheibbs und Hainfeld beflogen wurden. Somit basieren auch die Analysen dieser Arbeit auf Daten, welche einen unterschiedlichen Bezugszeitraum aufweisen.

Neben einer Reihe von Derivaten (z.B. Hangneigung, Exposition, Wölbung) kann aus einem DGM eine hochauflösende Schummerungskarte (engl. hillshade) (vgl. Abb.4) abgeleitet werden, welche die Oberflächenformen visualisiert. Diese Schummerungskarte kann für Darstellungszwecke als auch für die geomorphologische Validierung der Modelle verwendet werden.

3.2 Inventare

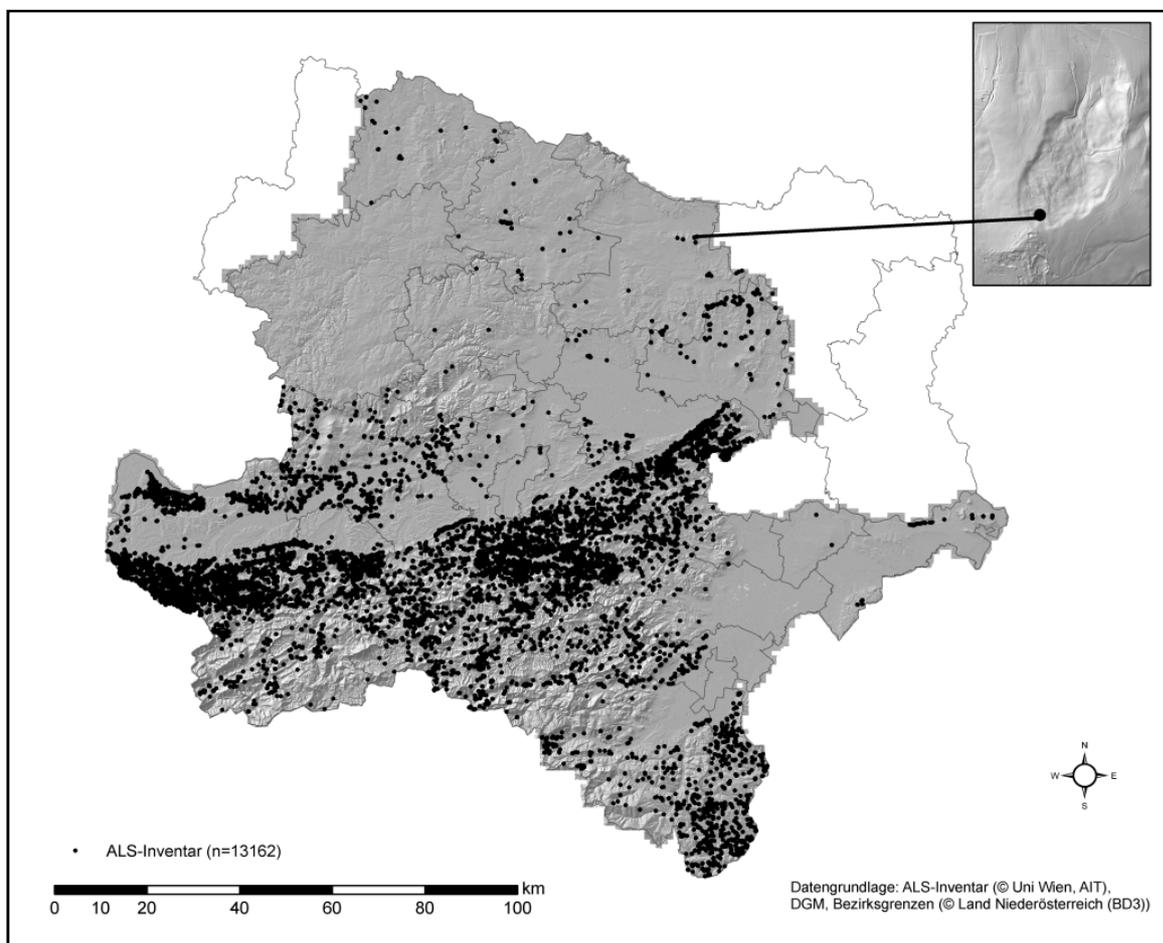
In dieser Arbeit wurden zwei unabhängig voneinander erstellte Rutschungsinventare für sämtliche Analysen verwendet, um den unterschiedlichen Einfluss auf die Ergebnisse und den daraus ableitbaren Aussagen zu untersuchen. Es handelt sich hierbei um Kartierungsergebnisse aus einer hochauflösenden Schummerungskarte (Abschnitt 3.2.1) und um die verorteten Punktdaten zu gravitativen Massenbewegungen aus dem Baugrunderkennungskataster (BGK) des Landes Niederösterreich (Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 ALS-Inventar

Das ALS-Rutschungsanrissinventar wurde im Laufe des Projektes „MoNOE“ erstellt und erfasst 2/3 der Gesamtfläche von Niederösterreich (ca. 10.300km²). Wie in Abbildung 4 ersichtlich, wurden die Rutschungsanrisse mithilfe einer hochaufgelösten Schummerungskarte kartiert und als Punkte erfasst. Das Ergebnis der Kartierung beinhaltet 13.162 Punktdaten in denen die Anrissbereiche von Rutschungen verortet wurden. Da die Datengrundlage (DGM) dieser Kartierung auf unterschiedliche Zeiträume basiert (vgl. Kapitel 3.1), beziehen sich auch die Kartierungsergebnisse auf unterschiedliche Zeiträume. Der Flugblock Raming beinhaltet daher alle sichtbaren Rutschungen bzw. Rutschungsanrisse, welche bis zum Frühjahr 2009 aufgetreten sind; im Flugblock Neulengbach, welcher im Herbst 2006 befliegen wurde, sind somit Rutschungen der Jahre 2007-2009 nicht kartiert.

Die Vorgehensweise der Kartierung wurde im nicht veröffentlichten, projektinternen Dokument „Protokoll zum Treffen zur Planung und Koordinierung der ALS-Kartierung (UniWien, AIT)“ festgehalten. Als Kartierungsgrundlage wurde von den Kartierern der Universität Wien sowie des AIT (Austrian Institute of Technology) eine Schummerungskarte mit unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen herangezogen.

Abbildung 4: Schummerungskarte und ALS-Rutschungsinventar, Niederösterreich

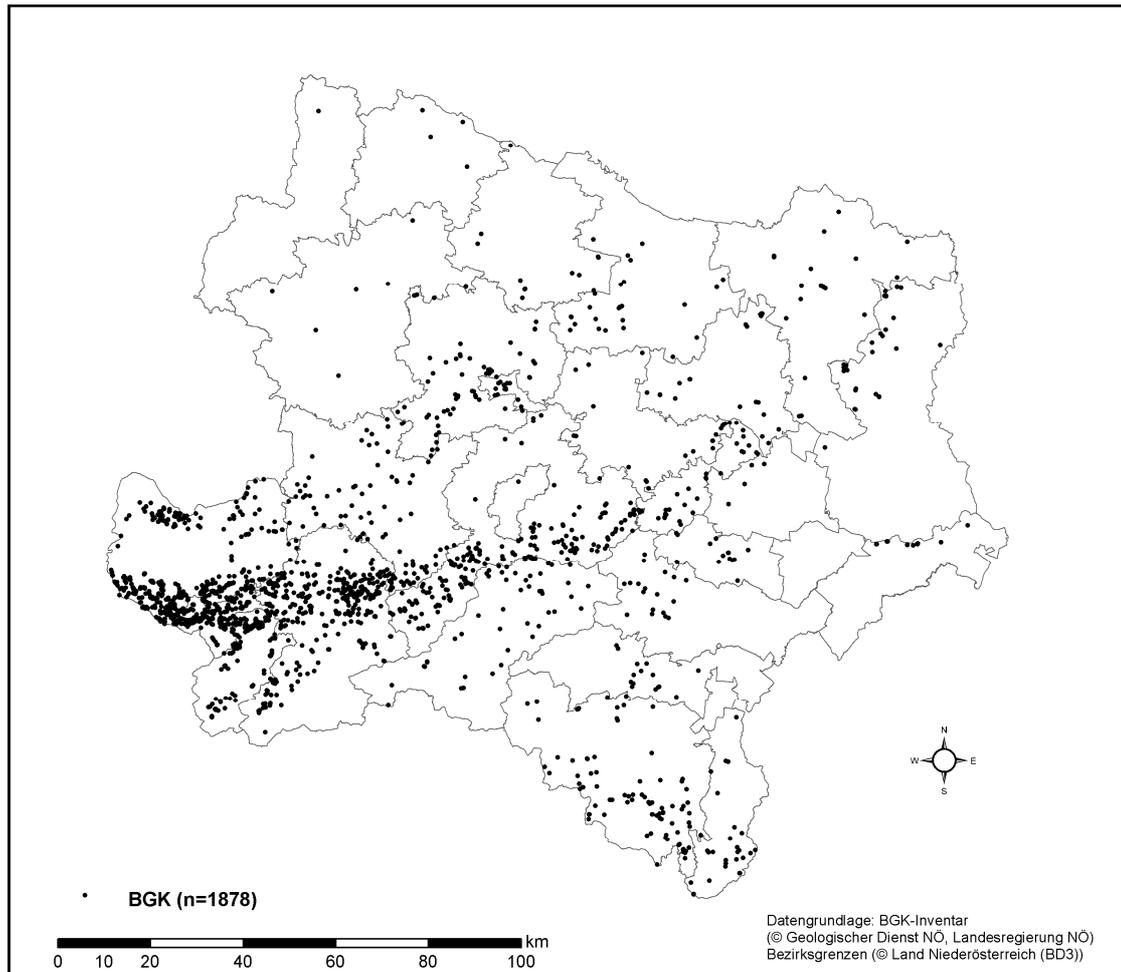


Zudem dienten Hangneigungskarten, Höhenschichtlinien (Äquidistanz 4m) und Orthofotos als zusätzliche Informationsquellen. Anhand dieser Grundlagen wurden die Rutschungsanrisse kartiert, wobei die Verortung der Anrisse im oberen konkav geformten Bereich der Rutschung erfolgte. Hierbei wurden die Rutschungsanrisse nur von jenen Rutschungen kartiert, dessen Fläche mehr als 100m² beträgt und eine klar erkennbare Morphologie aufweist. Die visuelle Interpretation der geomorphologischen Strukturen anhand der Schummerungskarte ermöglichte eine flächendeckende Verortung von sichtbaren Rutschungsanrissen auch in waldbedeckten Arealen. Der Fokus der Kartierung wurde hierbei auf eher jüngere Ereignisse gesetzt. Stichprobenartige Validierungen der Ergebnisse wurden anhand mehrerer Exkursionen durchgeführt (Projektinternes Protokoll zum Treffen zur Planung und Koordinierung der ALS-Kartierung (UniWien, AIT), 09.06.2011 (unveröffentlicht)).

3.2.2 Baugrundkataster (BGK)

Der Baugrundkataster des Landes Niederösterreich stellt eine Datensammlung von gravitativen Massenbewegungen dar, welche für Gefährdungsmodellierungen eingesetzt werden kann. Dieser vom geologischen Dienst des Landes Niederösterreich verwaltete Datensatz wurde, um den Ansprüchen einer Gefährdungsmodellierung zu entsprechen, im Laufe des Projektes „MoNOE“ umfangreich aufbereitet (vgl. Pomaroli *et al.*, 2011). Im Unterschied zum ALS-Inventar wurden im Baugrundkataster nicht die oberflächlich sichtbaren Rutschungsanrisse kartiert, sondern die gemeldeten Schadensereignisse durch Massenbewegungen in Punktform verortet. Eine erhöhte Meldedichte dieser schadensbringenden Ereignisse konnte seit dem Erlass des Katastrophenfondsgesetzes (Bundesgesetzblatt 207) im Jahr 1966, wodurch finanzielle Mittel für die Vorsorge, Abwendung und Folgenbeseitigung von Naturkatastrophen bereitgestellt werden, beobachtet werden. Durch diese systematische Erfassung von Schäden durch Naturgefahren können wertvolle Informationen zur zeitlichen und räumlichen Verteilung der diversen schadensbringenden Ereignisse analysiert werden (Schwenk, 1992; Wessely *et al.*, 2006; NOE.gv.at, 2012). Wie aus den Informationen in den geologischen Gutachten zu den einzelnen Punktdaten feststellbar ist, beziehen sich die Daten im Untersuchungsgebiet auf den Zeitraum zwischen ~1960 und 2009, hierbei hat das Jahr 1975 besonders viele Einträge zu verzeichnen. Bestätigt wird dies durch die Publikation von Schwenk (1992) in welcher über 200 Rutschungen in diesem Jahr gemeldet wurden. In Abbildung 5 sind die 1878 verorteten gravitativen Massenbewegungen des BGK dargestellt.

Abbildung 5: Rutschungsinventar Baugrunderkennung, Niederösterreich



3.3 Korrigierte Geologie

Die geologische Karte von Niederösterreich im Maßstab 1:200.000 (GK200) stellt die Datengrundlage für die im Rahmen des Projektes „MoNOE“ vom AIT korrigierte geologische Karte dar. Im unveröffentlichten zweiten Zwischenbericht des Projektes vom Februar 2011 wurde aufgezeigt, dass die Generalisierungen, der GK200 besonders im Bereich der Talalluvionen, den Ansprüchen einer statistischen Gefährdungsmodellierung nicht genügen. Im Vergleich zwischen der GK200 und dem DGM wurde ersichtlich, dass ein nicht durch flussgenetische Prozesse erklärlicher Teil der fluviatilen Sedimente auf den Hängen vorzufinden ist. Durch eine Kombination der Lockergesteinskarte mit dem DGM konnten die Bereiche der Talalluvionen den geomorphologischen Verhältnissen angepasst werden. Der dadurch generierte Raster enthält die Basisinformationen aus der GK200, die Täler entsprechen den genaueren Informationen der Lockergesteinskarten und des Geländemodelles. Die räumliche Auflösung dieses Rasters beträgt 10mx10m (MoNOE - Zweiter Zwischenbericht, 2011; unveröffentlicht).

3.4 Hydrologie

Die Daten zum Flussnetz im Untersuchungsgebiet wurden von der Abteilung Hydrologie und Geoinformation (BD3) des Landes Niederösterreichs von einem digitalen Landschaftmodell im Maßstab 1:10.000 abgeleitet und als Vektordaten zur Verfügung gestellt. Die Daten zu den Niederschlägen stammen aus dem digitalen hydrologischen Atlas Österreichs (ÖKLIM, 2007) (Auer *et al.*, 2007). Die mittleren Jahresniederschlagsdaten beziehen sich hierbei auf den Zeitraum 1961-1990 und wurden als Vektordaten in einer räumlichen Auflösung von 3 Bogenminuten x 5 Bogenminuten dargestellt. Somit beziehen sich diese Niederschlagsdaten auch auf die rutschungsreichen Jahre 1965, 1966 und 1975. Es handelt sich hierbei um eine Modellrechnung von Skoda und Lorenz, in welcher über 600 Messstellen unterhalb von 1500m Seehöhe Beachtung fanden. Aus den verfügbaren Tagessummen der Niederschläge wurde der mittlere Jahresniederschlag im Zeitraum 1961-1990 berechnet und die Daten mithilfe dreier Korrekturen in die Fläche übertragen. Somit wurde ein mesoskaliges orographisches Niederschlagsmodell generiert, dessen Niederschlagsdaten betreffend der regionalen Seehöhenabhängigkeit des Niederschlages und der lokalen Besonderheiten der den Messwert umgebenden Werte korrigiert wurden. Die Darstellung der Daten erfolgt in Form von Rasterzellen und die darin berechneten Flächenmittelwerte sollen eine Ablesung von Punktwerten vermeiden (Skoda und Lorenz, 2007). Die Daten zu den konvektiven Starkniederschlägen stammen ebenfalls aus dem digitalen hydrologischen Atlas Österreichs. Durch Modellrechnungen konnten Starkniederschläge für die Dauerstufen 15, 60 und 180 Minuten für die Jährlichkeiten von 2, 10, 50 und 100 Jahren räumlich dargestellt werden. Diese Daten beziehen sich ebenfalls auf den Zeitraum 1961-1990. Die vorliegende Modellierung berücksichtigt hierbei die wichtigsten physikalischen Wechselwirkungen, welche zwischen der Niederschlagsbildung und der Topographie bestehen. Hierbei wird mithilfe eines DGM's die flächenhafte Verteilung des orographisch- konvektiven Verstärkungsindex (OKV) berechnet, welcher bevorzugte Gewitterentstehungsgebiete darstellt. Die flächenhafte Darstellung der Ergebnisse erfolgt wiederum in Rastern der Größe 3Bogenminuten x 5Bogenminuten um hochfrequente Fluktuationen zu dämpfen (Skoda *et al.*, 2007).

3.5 Landbedeckung und Substratklassen

Die Landbedeckungsklassifikation sowie die Substratklassen des Untersuchungsgebietes wurden den digitalen hydrologischen Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (HYDBOD) entnommen. Diese in Rasterform dargestellten Daten der Bundesanstalt für Wasserwirtschaft (BAW) und des Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) liegen in einer Auflösung von 50mx50m vor. Die Basis für die Landbedeckungsklassifizierung bildet hierbei die digitale Katastralmappe, in welcher jeder Parzelle eine Nutzungsart zugewiesen wird. Mithilfe der österreichischen Waldkarte, welche auf LANDSAT-Aufnahmen, INVEKOS-Daten (INtegriertes VERwaltungs- und KOntrollSystem der EU) und Orthofotos

basiert, konnten die Wald- bzw. landwirtschaftlich genutzten Flächen räumlich weiter differenziert und eine Landbedeckungsklassifizierung für das gesamte Bundesland generiert werden (Eder *et al.*, 2011).

Das typische Bodenartenspektrum in Niederösterreich wird anhand der Substratklassen dargestellt. Hierbei konnten durch die Verknüpfung von Bodenprofilaten der digitalen Bodenkarte (eBod), der Bodenzustandsinventur (BZI) und der geologischen Karte (GK200) Korngrößeninformationen abgeleitet werden. Für die Ausweisung der typischen Korngrößen wurden aus den Bodenprofilen nur Informationen der untersten Horizonte herangezogen.

3.6 Andere Geobasisdaten

Die in diesem Abschnitt angeführten Daten liegen im Maßstab 1:50.000 vor und stammen vom Land Niederösterreich (Abteilung BD3). Die Orthofotos, welche zur Darstellung der Ergebnisse und zur visuellen Überprüfung herangezogen werden, liegen in einer Auflösung von 25cmx25cm vor. Das Befliegungsdatum der Orthofotos wurde dem digitalen NÖ-Atlas (NÖ-Atlas 3.0, 2012) entnommen, wobei im Untersuchungsgebiet ein Zeitraum von 2000 bis 2005 abgedeckt wird. Neben den zur kartographischen Darstellung verwendeten Bezirks- und Gemeindegrenzen, sowie der ÖK50-Situation, wird das vorliegende Straßennetz, welches nur die höherrangigen Straßen darstellt, auch in den statistischen Analysen berücksichtigt.

4. Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel wird das Untersuchungsgebiet dieser Diplomarbeit vorgestellt. Im Kapitel Allgemeines wird die Lage, die Größe und die allgemeine demographische Entwicklungen im Untersuchungsgebiet beschrieben. Die darauffolgenden Kapitel Geologie, Geomorphologie, Klima und Landbedeckung charakterisieren das Untersuchungsgebiet aus physiogeographischer Perspektive, wobei der Fokus auf diverse rutschungsfördernde Eigenschaften gelegt wird.

4.1 Allgemeines

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, die rhenodanubische Flyschzone von Niederösterreich, welche in der korrigierten GK200 (vgl. Kapitel 3.3) ausgewiesen wird, wird in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Untersuchungsgebiet - Rhenodanubische Flyschzone



Diese geologische Einheit erstreckt sich in West-Ost Richtung vom östlichen Ufer der Enns bei Steyr langgestreckt bis zu den Randzonen des Korneuburger Beckens im Norden von Wien. Der Begriff „rhenodanubisch“ verweist hierbei auf die ca. 500km lange am Alpennordrand verlaufende Ausdehnung dieser geologischen Einheit zwischen Rhein (lat. Rhenus) und Donau (lat. Danuvius)(Faupl, 1996). Das Untersuchungsgebiet stellt somit selbst eine geologische Großeinheit dar und wird im Osten durch die Bundeslandgrenze zu Oberösterreich und im Westen von den Grenzen des vorhandenen Geländemodelles (vgl. Abb.4) begrenzt. Die Gesamtfläche des 13 Bezirke (Amstetten, Baden, Korneuburg, Lilienfeld, Melk, Mistelbach, Mödling, Scheibbs, St.Pölten-Land, St. Pölten-Stadt, Tulln, Waidhofen an der Ybbs, Wien Umgebung) umfassenden Gebietes beträgt 1353,5 km².

Die Betrachtung der Bevölkerungsdichte im Untersuchungsgebiet zeigt, dass der größte Teil der Gemeinden nach der Typisierung der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) als ländlich geprägt bzw. ländlich bezeichnet werden kann. Hierbei ist eine höhere Bevölkerungsdichte im Osten des Untersuchungsgebietes erkennbar (Österreichisches Institut für Raumplanung, 2008). Die Orthofotos machen ersichtlich, dass besonders in den hügeligen Bereichen des Untersuchungsgebietes viele Weiler und Einzelhofsiedlungen vorhanden sind. Durch Betrachtung der Bevölkerungsentwicklung seit 1952 wird aufgezeigt, dass die Bevölkerungszahl im Bundesland Niederösterreich stetig zunimmt und infolge verstärkter Zuwanderung bis zum Jahre 2050 um prognostizierte 21% wächst. Die diversen kartographische Darstellungen der vergangenen und zukünftig prognostizierten Bevölkerungsveränderung zeigen, dass die Bevölkerungszahlen im Osten des Untersuchungsgebietes stärker zugenommen haben (und zunehmen werden) als im ländlicher geprägten Westen (ÖROK, 2010). Die mit diesen Entwicklungen einhergehenden zunehmenden Raumansprüche sind im Kontext einer umfassenden Naturgefahrenanalyse besonders bedeutend. Der ländliche Raum im Untersuchungsgebiet wird daher in Zukunft eine größere Bedeutung als Funktion des Siedlungsraumes erfahren, der Überschneidungsbereich zwischen Naturgefahr und Mensch wird größer (Österreichisches Institut für Raumplanung, 2008).

4.2 Geologie

Die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes dieser Arbeit erfolgt nach der korrigierten geologischen Karte im Maßstab 1:200.000 (vgl. Kapitel 3.3), welche unter der Bezeichnung T10-T14 die rhenodanubische Flyschzone im weitesten Sinne ausweist. Der Begriff „Flysch“ entstammt der alemannisch-schweizerischen Sprache und bezeichnet Gesteinsserien die zum Rutschen und Fließen neigen (Krenmayr *et al.*, 2002). Die Gesteinskomplexe des Flyschs sind in einem langgestreckten Tiefseetrog entstanden und werden durch Wechselfolgen von Schiefertönen bis Mergeln mit häufig kalkig, mergelig gebundenen Sandsteinbänken gekennzeichnet (Bauer, 1980; Murawski und Meyer, 1998; Schnabel, 2002).

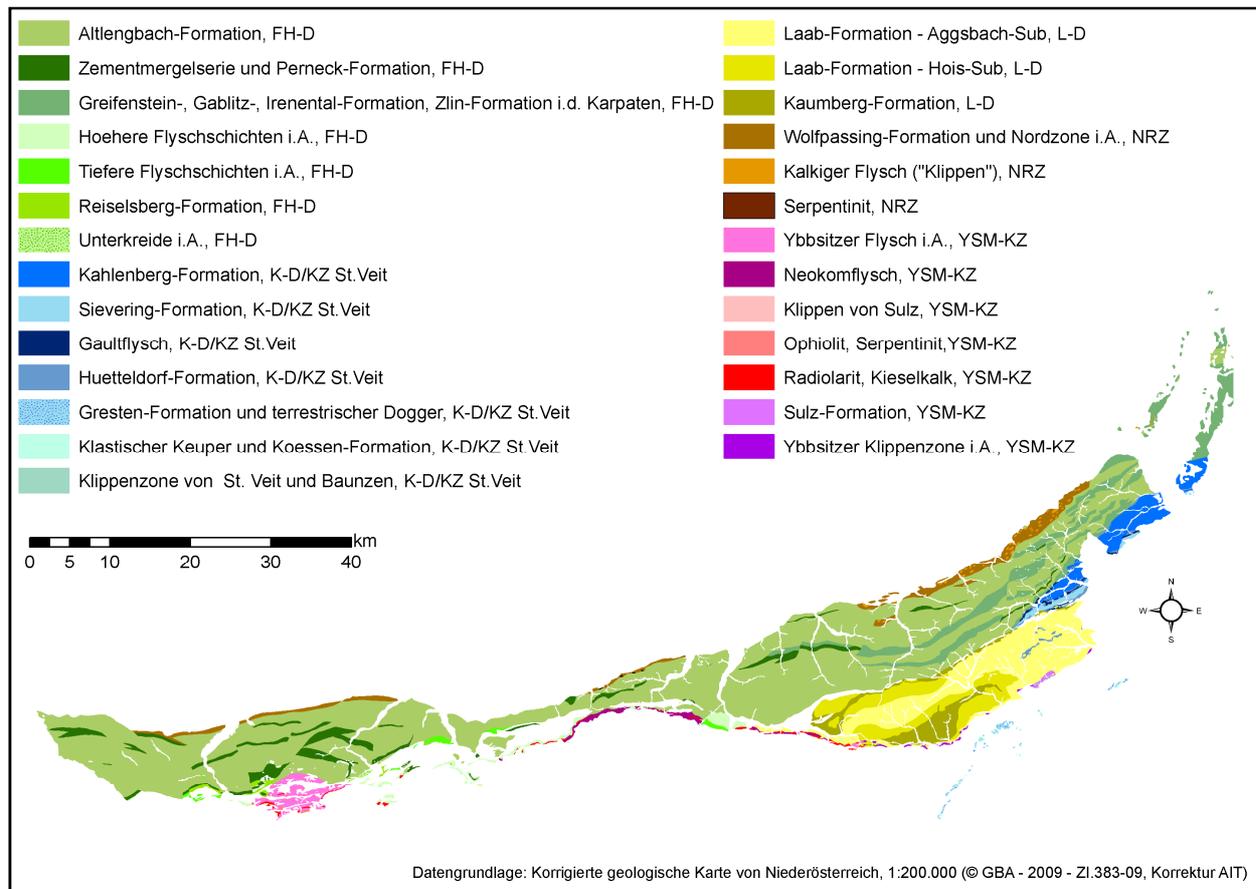


Abbildung 7: Für den Flysch typische Wechselfolge aus Sandstein und Mergeln (Rabenstein an der Pielach, NÖ)(Krenmayr *et al.*, 2002 S. 19)

Die marinen Sedimente wurden von der höheren Unterkreide bis ins unterste Ober-Eozän als Turbidite in den marinen Tiefseegräben fächerförmig abgelagert (Murawski und Meyer, 1998; Wessely *et al.*, 2006). Als Turbidite werden hierbei Trübestrome bezeichnet, welche infolge von Sturmereignissen, Erdbeben oder Meeresspiegelschwankungen mit hoher Geschwindigkeit vom Schelfrand entlang untermeerischer Hänge in die Tiefe verfrachtet wurden. Die am Schelfrand noch unverfestigten Sedimentablagerungen dehnten sich aufgrund ihres lawinenartigen Transportes in der Tiefsee fächerförmig aus wo sie sich schließlich beckenparallel einschwenkten (Murawski und Meyer, 1998; Schnabel, 2002; Wessely *et al.*, 2006). Da diese Vorgänge episodisch immer wieder kehrten, erfolgte die anschließende Sedimentation in zyklischen Abfolgen. Daraus resultieren die für Flyschgesteine typischen Sedimentstrukturen wie Korngrößenab- bzw. zunahmen innerhalb einer Sandsteinlage sowie laminierte Schichtungen. In den Zeiträumen zwischen den beschriebenen submarinen Sedimentlawinen lagerten sich hauptsächlich hemipelagische (Meeressedimente in einer Tiefe zwischen 200m - 4000m) Tone auf den Turbiditablagerungen ab (Wessely *et al.*, 2006). Die daraus resultierenden mächtigen Stapel aus Sandsteinen, Mergeln und Tonsteinen wiederholen sich im Flysch in charakteristischer Weise. Im Zuge der alpidischen Orogenese wurden diese Gesteinskomplexe nach Norden verfrachtet und über die Molasse bzw. Klippenzone überschoben und vom Süden von den Kalkalpen überfahren (Bauer, 1980; Krenmayr *et al.*, 2002). Der Deckenkomplex der rhenodanubischen Flyschzone liegt daher zusammen mit der Hauptklippenzone tektonisch über der nördlich befindlichen Klippenzone und der Molasse (Faupl, 1996).

Die in der GK200 ausgewiesenen 27 geologische Formationen im Untersuchungsgebiet werden in Abbildung 8 dargestellt, wobei diese 6 tektonischen Einheiten zugeordnet werden können. Die Flächenanteile der geologischen Formationen und tektonischen Einheiten werden anhand von Histogrammen im Anhang (A5/1-2) graphisch dargestellt.

Abbildung 8: Geologische Übersicht des Untersuchungsgebietes (FH-D= Flyschhauptdecke und Greifensteiner Decke, K-D/KZ St.Veit = Kahlenberger Decke und Klippenzone von St.Veit, L-D = Laaber Decke, NRZ = Nördliche Randzone, YSM-KZ = Ybbsitzer und Sulz/Mauer Klippenzone)



Betrachtet man die tektonische Gliederung des Untersuchungsgebietes, so bildet die Schichtfolge der Flyschhaupt- und Greifensteiner Decke (FH-D) mit einem Flächenanteil von 72% den größten Teil des Untersuchungsgebietes. Die Alltengbachformation stellt hierbei mit einem Flächenanteil von über 58% die größte geologische Formation im Untersuchungsgebiet dar. In dieser turbiditbetonten Folge aus grauen Sandsteinen, Kalksandsteinen, Mergeln und Tonschiefern überwiegen grobkörnige Sandsteine, welche häufig zu „Mürbsandsteinen“ verwittern (Wessely *et al.*, 2006). Die bis zu 1300m mächtigen Schichten stellen einen relativ siliziklastikareichen Flysch dar (Faupl, 1996). Neben der Alltengbachformation bilden die Greifensteinformation sowie die karbonatreiche Zementmergelserie und Perneckformation bedeutende Formationen der Flyschhauptdecke und Greifensteiner Decke (FH-D). Die Greifensteinformation dominiert besonders die flacheren Bereiche im Norden der Donau und besteht hauptsächlich aus einer Wechselfolge von mächtigen Sandsteinabschnitten und dazwischen eingelagerten grauen und bunten Tonschichten (Wessely *et al.*, 2006). Die karbonatreichen, dünn-schichtigen Bänke aus Schiefen der Zementmergelserie sind durch einen relativ hohen Anteil an hemipelagischen Intervallen (Tonen) charakterisiert (Faupl, 1996), was im Zusammenhang mit der Rutschaktivität in dieser Einheit von Bedeutung ist (vgl. Kapitel 2.2). Die Kahlenberg Formation bildet das größte Schichtglied (3% Flächenanteil) der Kahlenberger Decke und Klippenzone von St. Veit (K-D/KZ St.

Veit). Die karbonatreichen Turbiditabfolgen ähneln lithofaziell der Zementmergelerde und weisen daher ebenfalls geringmächtige Sandsteinbänke auf (Faupl, 1996; Wessely *et al.*, 2006). Die mächtige sandsteindominierte Hois-Subformation, die schiefer-tonreichen Aggsbachschichten sowie die Kaumberger Schichten aus dünnbankigen, karbonatreichen Folgen von Sandsteinen mit bunten Tonsteinen bis Tonmergeln gehören der zweitgrößten tektonischen Einheit im Untersuchungsgebiet, der Laaber Decke (L-D) (17 % Flächenanteil) an (Wessely *et al.*, 2006). Wie Götzinger bereits 1943 feststellte, sind die Schiefertone der Laaber Schichten sehr rutsch anfällig (Götzinger, 1943). Schnabel (2002) hingegen beschreibt die Lagerung der Laaber Formationen als auffallend ruhig und deren Hangneigungen als relativ gering, was wiederum die Rutschanfälligkeit herabsetzt (vgl. Kapitel 2.2). Die größte Formation der nördlichen Randzone (NRZ) (3,7% Flächenanteil) bildet die Wolfpassing Formation. Diese besteht hauptsächlich aus klippenähnlichen kalkhaltigen Körpern. Hierbei wechsellagern zumeist Feinbrekzien (seltener gröbere Brekzien) mit Tonmergelschiefern (Bauer, 1980; Schnabel, 2002). Als Klippenzone werden hierbei lithologische Gesteinskörper bezeichnet die ihre Umgebung klippenartig überragen (Krenmayr *et al.*, 2002). Im Südwesten des Untersuchungsgebietes befindet sich die Klippenzone von Ybbs und Sulz/Mauer, welche einen Flächenanteil von 2,7% aufweist und tektonisch betrachtet dem rhenodanubischen Hauptflyschkörper aufgelagert ist. Aufgrund der tiefmeerischen Fazies wird diese Klippenzone ebenfalls der rhenodanubischen Flyschzone zugerechnet (Schnabel, 2002). Durch die tektonische Lage der Klippenzone und der damit einhergehenden starken mechanischen Beanspruchung können die Verwitterungsprozesse das Material stark aufbereiten und deren Festigkeit verringern. In der Ybbsitzer Klippenzone sind die Bereiche mit hohem Buntmergelanteil (rote und grüne Tonmergel) besonders rutsch anfällig (Wessely *et al.*, 2006).

Wie diverse Publikationen (Götzinger, 1943; Schwenk, 1992; Wessely *et al.*, 2006; Damm und Terhorst, 2007, 2009, 2010; Schweigl und Hervás, 2009; Terhorst *et al.*, 2009) belegen, weist die rhenodanubische Flyschzone im Vergleich zu anderen geologischen Großeinheiten Niederösterreichs eine hohe Rutschanfälligkeit auf. Im Besonderen stellen jene schieferreichen Schichtfolgen, welche einen hohen Anteil an tonigen und schluffigen Mergeln besitzen sowie tiefgründig verwitterte Sandsteine aufweisen, die gefährdetsten Bereiche innerhalb der rhenodanubischen Flyschzone dar (Wessely *et al.*, 2006). Hierbei sind es vor allem die Verwitterungsprodukte und deren Eigenschaften, welche die Disposition gegenüber Rutschungen erhöhen. Die Böden im Flysch können als vorwiegend tonig-schluffig bezeichnet werden. Die bindigen bis leicht-bindigen Böden mit lehmigen bis feinsandigen Lagen reagieren hierbei besonders stark auf Durchfeuchtung (vgl. Kapitel 2.2) (Schwenk, 1992). In besonders tonreichen Gesteinen und Böden der rhenodanubischen Flyschzone können durch eine starke Durchfeuchtung auch an flacheren Hängen Rutschungen ausgelöst werden (Götzinger, 1943).

4.3 Geomorphologie

Das Untersuchungsgebiet kann aus geomorphologischer Perspektive als hügelige Mittelgebirgslandschaft bezeichnet werden, welche im Laufe der Geschichte durch glaziale bzw. periglaziale Prozesse geprägt wurde (Krenmayr *et al.*, 2002). Hierbei nimmt das bewaldete und landwirtschaftlich genutzte Hügelland besonders im Westen bzw. Süden des Untersuchungsgebietes einen Mittelgebirgscharakter an. Im flacheren Osten sind sanftere Formen mit flacheren Kuppen dominant (Bauer, 1980). Wie Damm und Terhorst (2009) zeigen, sind die Gesteinskomplexe der Altlenzbach- und Greifensteinformationen besonders im Osten des Untersuchungsgebietes von quartären periglazialen Sedimenten und Lössablagerungen bedeckt und hochgradig erodierbar (Damm und Terhorst, 2009). Die intensive Zerschneidung der leicht erodierbaren Böden des Flysches kann bei Betrachtung des dendritischen Flussnetzes nachvollzogen werden. Eine große Anzahl an Rinnen und Kerbtälern kann besonders im Osten des Untersuchungsgebietes beobachtet werden. Diese V-förmige Talform mit steilen häufig bewaldeten Seitenhängen ist charakteristisch für große Teile des Untersuchungsgebietes (Wrbka *et al.*, 2005), wobei die vielen kleineren Gerinne an der hohen Zerschneidung der Landschaft beteiligt sind (Damm und Terhorst, 2010). Nach Götzinger, welcher sich ebenfalls intensiv mit dem Flysch und dessen Formung im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes beschäftigte, sind im Flysch des Wienerwaldes zwei Abtragungsprozesse vorherrschend. In den flacheren Bereichen dominieren demnach Denudationsprozesse sowie Schuttkriechen, je steiler die Hänge werden, desto häufiger treten Rutschungen auf (Götzinger, 1943). Die für Rutschungen typische unruhige Oberflächenmorphologie kann anhand der hochauflösenden Schummerungskarte in großen Teilen des Untersuchungsgebietes erkannt werden (vgl. Abb.4). Neben den typischen konkav geformten Rutschungsanrissen kann hangabwärts ein zumeist konvex geformtes, im Falle einer Rotationsrutschung nach hinten verkipptes, kuppiges Hangrelief mit Stauchwülsten beobachtet werden (Busche, 2005). Die hohe Rutschungsanfälligkeit des Gebietes kann auch anhand von deformierten Wegen und Straßen und der häufig erkennbaren Schiefstellung der darauf befindlichen Bäume (Betrunkenener Wald, Säbelwuchs) erkannt werden. Neben den geomorphologisch auffälligen Rutschungserscheinungen und Kerbtälern sind unnatürlich wirkende ruhig geformte landwirtschaftlich genutzten Flächen auffallend. Die Bedeutung des Menschen als wichtiger direkter landschaftsformender Faktor wird somit auch im Untersuchungsgebiet augenscheinlich (Götzinger, 1943; Schwenk, 1992; vgl. Kapitel 4.5).

4.4 Klima

Die heterogenen klimatischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet können anhand der von Nagl entworfenen Klimaprovinzen Österreichs und der Klimatypen nach dem Entwurf von Hitz und Birsak nachvollzogen werden (Nagl, 1983; Hitz und Birsak, 2004). Sowohl die auf Daten der Projekte ÖKLIM und ALOCLIM (Austrian Longterm Climate 1767-2000) entworfenen Klimatypen, als auch die Klimaprovinzen

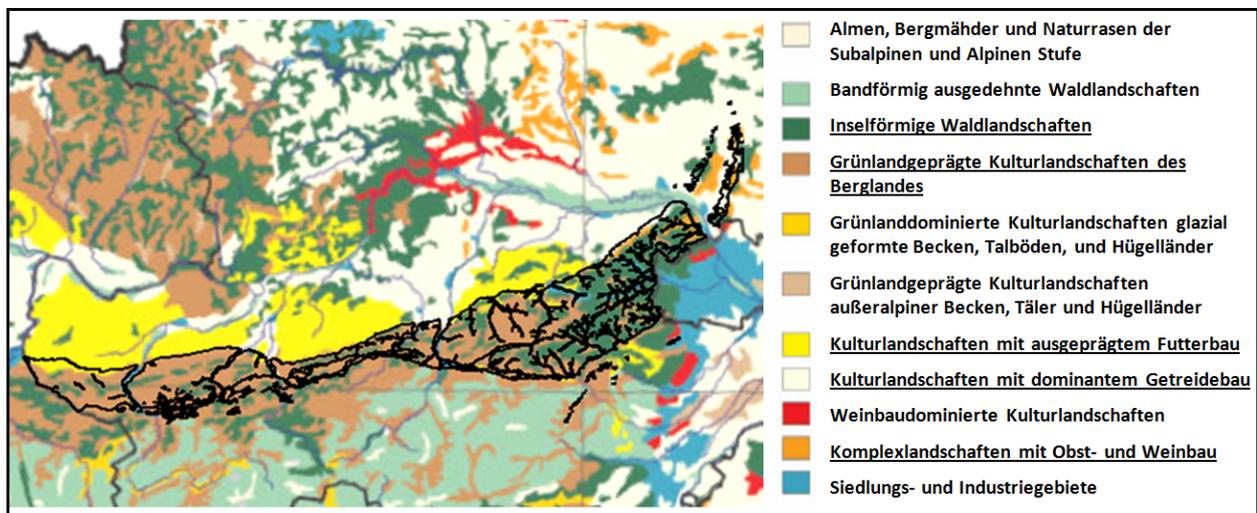
nach Nagl zeigen, dass der flachere kontinental geprägte Osten des Untersuchungsgebietes geringere Jahresniederschlagssummen aufweist als der höher gelegene Süden und Westen. Der äußerste Nordosten des Untersuchungsgebietes kann dem pannonisch kontinentalen Klimatyp zugeordnet werden, welcher eine hohe Jahresamplitude der Temperaturen und längere Trockenperioden bei insgesamt wenigen Niederschlagstagen aufweist (Nagl, 1983; Hitz und Birsak, 2004). Die mittlere Jahresniederschlagssumme beträgt hier stellenweise unter 600 mm/Jahr (Auer *et al.*, 2007). Dem Gebirgsrandklima können die tiefer gelegenen Bereiche westlich von Wien bis St. Pölten zugeordnet werden. Hierbei nehmen die Niederschlagstage als auch die Jahresniederschläge allmählich zu, der kontinentale Einfluss und somit die Jahresamplitude der Temperaturen wird geringer. Die höher gelegenen Bereiche im zentralen Süden als auch im Großteil des Westens werden dem Übergangsklima zugeordnet. Dieser Klimatyp befindet sich im Grenzbereich zu den alpinen Staurengengebieten der nördlichen Kalkalpen, welche vermehrte Steigungsregen und daraus resultierende hohe Gebietsniederschläge verzeichnen. In diesem Fall sind die klimatischen Verhältnisse besonders höhenabhängig, wobei die Tallagen eher kontinental, die Höhen eher ozeanisch geprägt sind. Dem subalpinen Klima werden die höchsten Bereiche im Süden und Südwesten des Untersuchungsgebietes zugeordnet (Nagl, 1983; Hitz und Birsak, 2004). Hohe mittlere Jahresniederschlagssummen (>1200mm), viele Niederschlagstage und kalte Wintertemperaturen charakterisieren diesen Klimatyp (Auer *et al.*, 2007).

4.5 Landbedeckung

Das Land Niederösterreich kann gemäß der Bevölkerungsdichte als ländlicher Raum bezeichnet werden (Österreichisches Institut für Raumplanung, 2008). Wie durch Betrachtung der Typenreihen der Kulturlandschaften (Abb. 9; Wrška *et al.*, 2005) und der Landbedeckungsklassifikation nach HYDBOD (Eder *et al.*, 2011, Anhang A 1) zu entnehmen, trifft dies vor allem auf das Untersuchungsgebiet zu. Der nordöstliche Teil des Untersuchungsgebietes kann dem Kulturtypus der dominanten Getreide-, Obst- und Weinbaugebiete zugeordnet werden. Hierbei befinden sich in den flachen, lößbedeckten Bereichen hauptsächlich Getreide und Ackerbaugebiete, in den Hangbereichen vorzugsweise Obst- und Weinbaukomplexe. Westlich daran anschließend befindet sich die Typenreihe der inselförmigen Waldlandschaften. Es handelt sich dabei um ursprünglich zusammenhängende Waldgebiete, welche im Zuge der Kulturlandschaftsentwicklung gerodet und somit in fragmentierte Waldinseln zerlegt wurden (Wrška *et al.*, 2005). Wie den Histogrammen zur Landschaftsbedeckung nach HYDBOD zu entnehmen (Anhang A5/12), sind über 52% der Fläche des Untersuchungsgebiet bewaldet. Der Hauptanteil (39% der Gesamtfläche) werden hierbei als Laubwald, die restlichen 12% als Nadelwald ausgewiesen (Eder *et al.*, 2011). Im Bezirk St. Pölten Land und westlich davon dominieren die grünlandgeprägten Kulturlandschaften des Berglandes, wobei auch hier immer wieder inselförmige Waldlandschaften vorzufinden sind. Bei diesem Kulturlandschaftstyp handelt es sich um Gebiete der montanen bis

subalpinen Höhenstufe, in denen landwirtschaftlich stark genutzte Weiden- und Wieseflächen dominieren (Wrbka *et al.*, 2005). Insgesamt konnten 33% der Gesamtfläche der Landbedeckungskategorie Wiese/Weide zugeordnet werden und nur 10% der Klasse Acker und Brachland (Eder *et al.*, 2011). Der Großteil dieser Zonen wurde erst gegen Ende des Hochmittelalters und später etabliert. Als prägnantes Erkennungsmerkmal können die verstreuten Einzelhöfe, welche innerhalb von Blockparzellen aus Weiden und Wiesen lokalisiert sind, genannt werden. Innerhalb der Typenreihe „grünlandgeprägte Kulturlandschaften des Berglandes“ befindet sich die „randalpinen Rodunginseln“. Diese vor allem in der Flyschzone vorzufindenden Flächen sind aufgrund des Gebirgsverlaufes vor allem als Rodungsbänder am Nord- und Ostsaum der Alpen vorzufinden (Wrbka *et al.*, 2005). Die nördlich des Untersuchungsgebietes wesentlich flacheren Bereiche der Molassezone werden als Kulturlandschaften mit ausgeprägtem Futterbau (Wrbka *et al.*, 2005) bzw. als Ackerflächen (Eder *et al.*, 2011) ausgewiesen. Wie die Studie von Wrbka *et al.* zeigt, ist die Landbedeckung im gesamten Untersuchungsgebiet, besonders aber die nichtbewaldeten Bereiche, durch intensive menschliche Nutzungen beeinflusst und können daher als euhemerob bezeichnet werden (Wrbka *et al.*, 2005), wobei nur 4% der Gesamtfläche als verbaut ausgewiesen wird (Eder *et al.*, 2011).

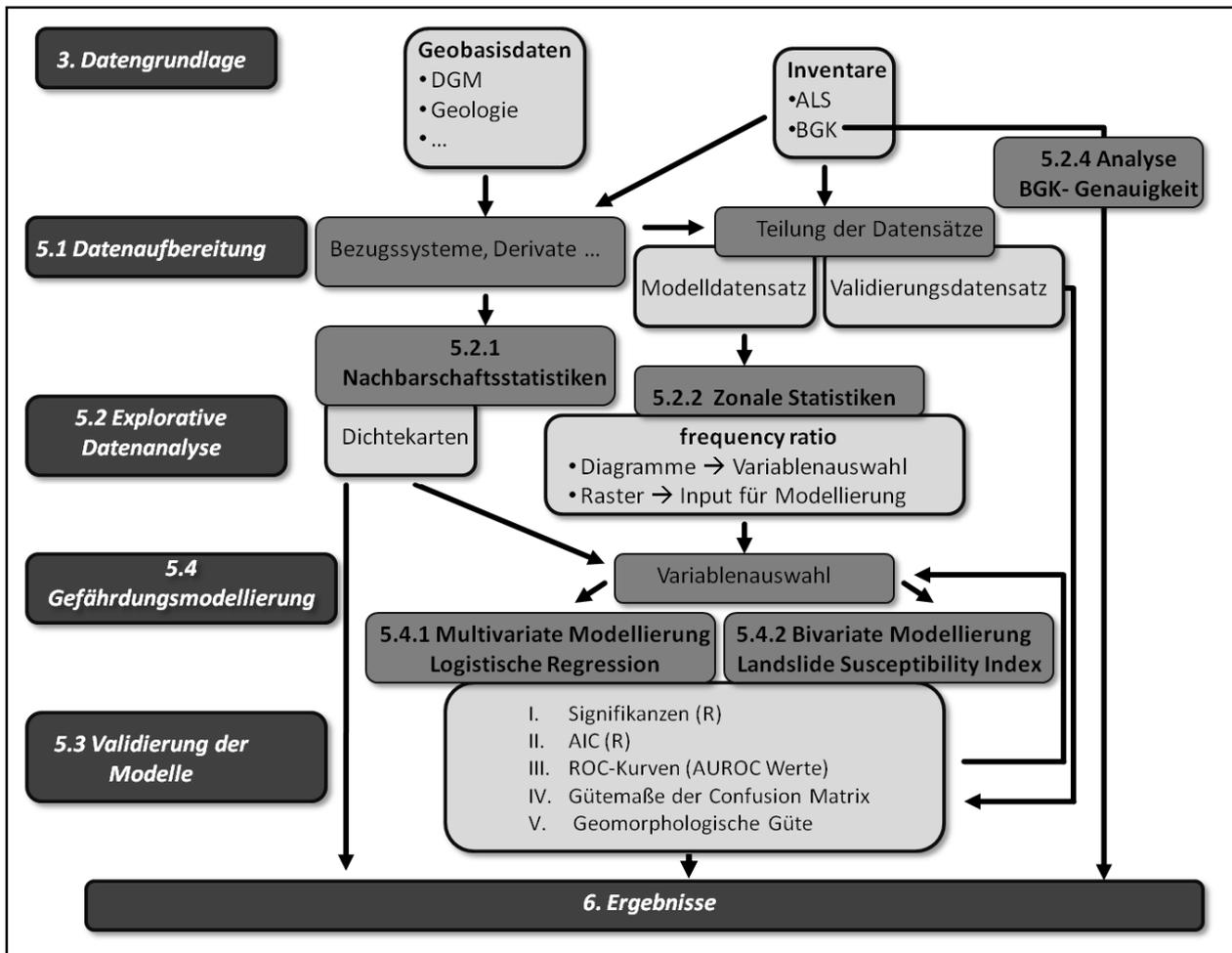
Abbildung 9: Typenreihen der Kulturlandschaften (schwarze Umrandung: Untersuchungsgebiet) (nach Wrbka *et al.*, 2005)



5. Methode

Das methodische Vorgehen dieser Diplomarbeit wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Abbildung 10: Methodische Konzeption (die Nummerierung entspricht den Kapiteln)



Wie die Abbildung der methodischen Konzeption (Abb. 10) zeigt, wurde in dieser Arbeit nach erfolgter Datenaufbereitung das gesamte Untersuchungsgebiet im Sinne einer explorativen Datenanalyse untersucht, wobei sowohl natürliche Faktoren (z.B. Hangneigungen, Exposition, absolute Höhe, Niederschlagsverteilung) als auch der menschliche Eingriff ins System (Landnutzungen, Wegenetze, Siedlungen) in die Analysen einbezogen wurden. Die Erkenntnisse der explorativen Datenanalyse flossen in die anschließenden statistischen Gefährdungsmodellierungen ein (z.B. Variablenauswahl). Sämtliche Modellierungen wurden hierbei anhand der Modelldatensätze, die Validierungen anhand der Validierungsdatensätze des jeweiligen Rutschungsinventares durchgeführt. Die Gefährdungsmodellierungen erfolgten anhand von zwei unterschiedlichen methodischen Ansätzen. Dies sind die multivariate logistische Regression (Bsp. Van Westen, 1993, 2000; Jäger und Wiecezorek, 1994;

Guzzetti *et al.*, 1999; Brenning, 2005; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2006; Bui *et al.*, 2011), sowie die bivariate LSI-Methode (Landslide Susceptibility Index) (Bsp. Lee, 2004; Lee und Dan, 2005; Akgun *et al.*, 2007; Vijith und Madhu, 2007; Bui *et al.*, 2011; Yalcin *et al.*, 2011). Die Eingangsparameter der Modellierungen wurden durch diverse Validierungsmethoden in einem iterativen Prozess ständig angepasst, wobei jene Einflussgrößen identifiziert werden konnten, welche das Untersuchungsgebiet am besten charakterisieren. Sämtliche statistische Analysen erfolgten anhand der Software ArcGIS 9.3 sowie der OpenSource Statistik Software „R“. Ein Teil der sich in ArcGIS 9.3 wiederholenden Arbeitsschritte wurde anhand von generierten Modellen im „ModelBuilder“ automatisiert (ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of ModelBuilder).

5.1 Datenaufbereitung

Die in diesem Kapitel beschriebene Datenaufbereitung wurde gänzlich in ArcGIS 9.3 durchgeführt. Damit ein einheitlicher räumlicher Bezug für alle Daten vorliegt, wurden sämtliche Daten in das Gauß-Krüger Koordinatensystem (Bundesmeldenetz M34) überführt, welches auf einer transversalen Zylinderprojektion beruht und den Bessel-Ellipsoiden als geodätisches Datum aufweist (ArcGIS Desktop Help 9.3 - Gauss-Kruger):

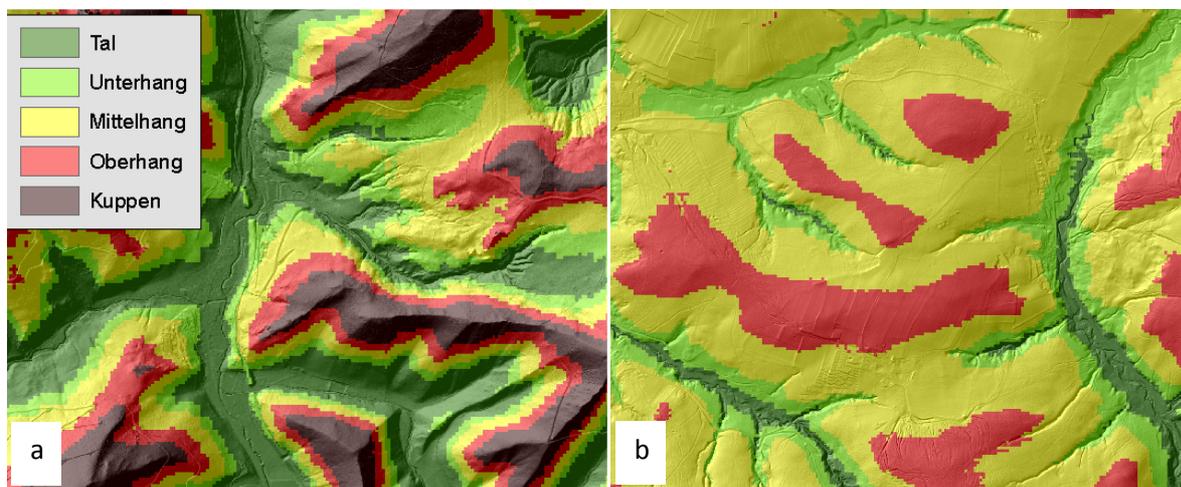
Map Projection Name: Transverse Mercator
Scale Factor at Central Meridian: 1
Longitude of Central Meridian: 16.3333
Latitude of Projection Origin: 0
False Easting: 0
False Northing: -5000000
Datum: D_Bessel_1841

Die Datenintegration wurde durch die ArcGIS 9.3 Werkzeuge „project“ (Überführung in eine andere Projektion) und „transform“ (Überführung in ein anderes geodätisches Datum) realisiert (vgl. ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of the Projections and Transformations toolset). Um für alle Daten flächenhafte Informationen zu erhalten und das Untersuchungsgebiet abzugrenzen, wurde der vorhandene korrigierte Geologieraster mit dem DGM verschnitten. Die dadurch erhaltene Fläche bildet die Grenze des Untersuchungsgebietes, welche im Osten durch die für Niederösterreich nicht flächenmäßig vorliegenden DGM-Daten begrenzt wird (vgl. Abb. 4) und im Norden, Süden und Westen durch die Grenzen der rhenodanubischen Flyschzone. Die vorliegenden Rasterdaten wurden im Anschluss in eine räumliche Auflösung von 10mx10m überführt und auf die Untersuchungsgebietsgrenzen zugeschnitten.

Das DGM wurde im Anschluss anhand der bilinearen Interpolationsoption geglättet, um die durch die Überführung in eine andere Auflösung entstehenden Artefakte zu minimieren (vgl. ArcGIS Desktop Help 9.3 – Resample). Anhand der Spatial Analyst Werkzeuge „slope“, „aspect“, „curvature“ und „hillshade“ konnten die DGM-Derivate Hangneigung, Exposition, Wölbung und die Schummerungsdarstellung berechnet werden (vgl. ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of the Spatial Analyst toolbox). Die relative Hangposition wurde anhand der frei erhältlichen Topographic Toolbox

(<http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15996>) aus dem DGM berechnet. Wie in Jenness (2006) beschrieben, wird der hierfür berechnete Topographic Position Index (TPI) aus der Differenz des Höhenwertes eines Pixels im DGM zum mittleren Höhenwertes der Nachbarschaft berechnet (Jenness, 2006). Der für die Ausweisung der relativen Hangposition verwendete Suchradius von 300m und die anschließende Klassifizierung wurde durch wiederholtes visuelles Abgleichen der Ergebnisse mit der hochauflösenden Schummerungskarte ermittelt. Die dadurch ausgewiesenen fünf Hangpositionsklassen werden in Abbildung 11 dargestellt und zeigen, dass in topographisch differenziertem Gelände (a) alle Klassen abgebildet werden und in flachen Bereichen (b) die als Kuppen und Täler klassifizierten Flächen zurücktreten.

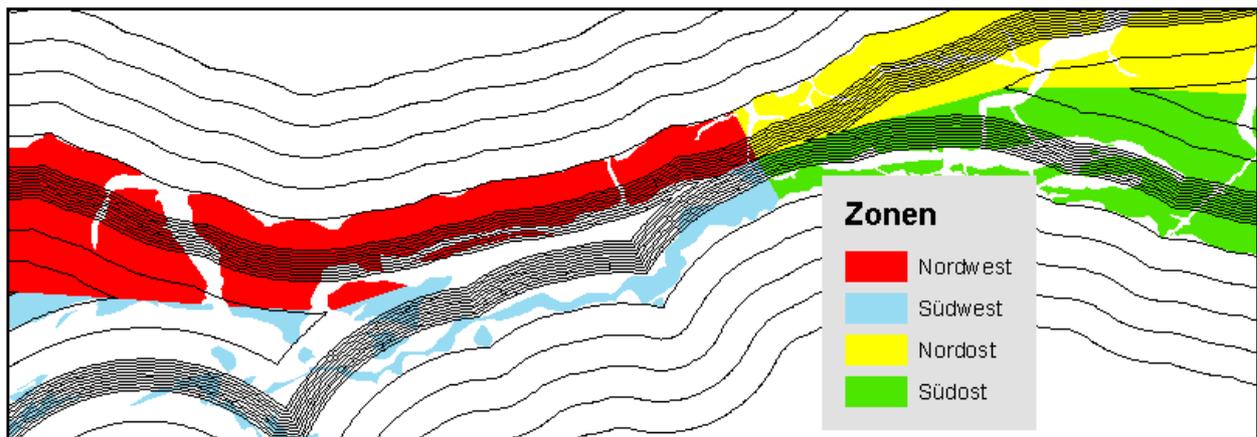
Abbildung 11: Relative Hangposition (Topographic Position Index) in topographisch differenziertem (a) und flachen (b) Bereichen des Untersuchungsgebietes



#Um die Entfernungen jeder Rasterzelle zu den Straßen, Verbauungen, Flüssen, tektonischen Störungen und geologischen Übergängen (Grenzen der geologischen Formationen) zu erhalten, wurden sämtliche Daten in einen Raster (Werkzeug: „feature to raster“) umgewandelt und reklassifiziert (1=Wert vorhanden, Rest=NoData). Mithilfe des Werkzeuges „euclidean distance“ konnte somit der euklidische Abstand für jede Rasterzelle zum nächsten Wertepixel (Wert=1) berechnet werden (ArcGIS Desktop Help 9.3 - Euclidean Distance).

Die Aufteilung des Untersuchungsgebietes in die vier Zonen Südwest, Nordwest, Nordost und Südost konnte anhand multipler Pufferungen (Werkzeug: „multiple buffer“) realisiert werden. Der hierfür erzeugte 5000m-Puffer wurde zunächst um die Untersuchungsgebietsgrenzen gelegt und im Anschluss durch negative Pufferwerte schrittweise „zusammengezogen“ bis sich der Puffer in zwei Teile aufgliederte (West-Ost Aufteilung). Die Grenze zwischen Nord und Süd wurde entlang der Eckpunkte des Puffers gezogen (vgl. Abb.12).

Abbildung 12: Vorgehensweise der Aufteilung des Untersuchungsgebietes in 4 Zonen anhand multipler negativer Puffer (schwarze Linien)



Das BGK-Inventar von Niederösterreich ($n=1878$), welches im 5000m-Puffer um die Untersuchungsgebietsgrenze aus 1195 Punkten besteht, wurde anhand der Informationen der zugehörigen Attributtabelle bereinigt. Aus dem Datensatz wurden zunächst jene gravitativen Massenbewegungen entfernt, welche keine Rutschungen darstellen (z.B. Steinschlag). Mit dem Werkzeug „point distance“ konnten im Anschluss jene Punkte identifiziert werden, welche eine identische Lage aufweisen (point distance = ~ 0) und somit auf zumeist reaktivierte Rutschungen hinweisen. Diese Punkte wurden ebenfalls aus dem Datensatz gelöscht, da sämtliche rasterbasierte Analysen nur einen Wert pro Pixel verarbeiten können. Von den ursprünglich 719 BGK-Punkten im Untersuchungsgebiet konnten somit 38 Punkte aus dem Datensatz entfernt werden, wobei 20 Punkte aufgrund der identischen Lage gelöscht wurden. Somit beinhaltet der für die Analysen verwendete BGK-Datensatz im 5000m-Puffer 1082 Punkte, im Untersuchungsgebiet 681 Punkte. Der ALS-Datensatz, welcher aus 13.162 verorteten Rutschungsanrissen besteht, wurde ebenfalls auf den 5000m-Puffer zugeschnitten und im Anschluss bereinigt. Hierbei wurden jene Rutschungsanrisse aus dem Datensatz entfernt, welche eine so geringe Distanz zueinander aufweisen, dass bei der Überführung in Rasterdaten nur noch ein Punkt erhalten bliebe. Nach mehreren Versuchen stellte sich eine „point distance“ von $>2\text{m}$ im Untersuchungsgebiet als ausreichend heraus, um alle Punktdaten verlustfrei in ein Raster umwandeln zu können. Von den ursprünglich 8.862 Punkten im Pufferbereich konnten somit 44 Rutschungsanrisse aus dem Datensatz entfernt werden. Somit liegen im finalen ALS-Datensatz im 5000m-Puffer noch 8.818, im Untersuchungsgebiet 6.187 Rutschungsanrisse vor.

Um die Qualität der Gefährdungsmodellierungen quantitativ beurteilen zu können, wurden die Rutschungsinventare in einen für die Modellentwicklung verwendeten Modelldatensatz und einen davon unabhängigen Validierungsdatsatz aufgeteilt. Um die unabhängige Validierungsdaten zu generieren, werden von Remondo *et al.* (2003) und Chung und Fabbri (2003) drei Optionen empfohlen:

- I. Das vorhandene Rutschungsinventar wird nach dem Zufallsprinzip aufgeteilt (zufällige Kreuzvalidierung)
- II. Das Untersuchungsgebiet wird in zwei räumlich unterschiedliche Areale aufgeteilt, wobei ein Bereich für die Modellentwicklung und der andere Teil zum Validieren des Modelles verwendet wird (räumliche Kreuzvalidierung)
- III. Die beste Möglichkeit, die Vorhersagegüte eines Modelles zu testen, besteht nach Remondo *et al.* (2003) in der Aufteilung des Inventares nach Zeitabschnitten, wobei für einen Zeitperiode das Modell entwickelt wird und das Modell anhand der gravitativen Massenbewegungen einer anderen Zeitperiode validiert werden (zeitliche Kreuzvalidierung) (Chung und Fabbri, 2003; Remondo *et al.*, 2003).

Die Aufteilung der Rutschungsinventare für die in dieser Arbeit durchgeführte Gefährdungsmodellierung erfolgte anhand der zufälligen Kreuzvalidierung (Option I.). Aufgrund der hohen topographischen und geologischen Diversität im Untersuchungsgebiet wurde die räumliche Partitionierung der Inventare als nicht sinnvoll erachtet. Aufgrund der fehlenden Zeitinformationen zu den einzelnen Rutschungen wurde die zeitliche Kreuzvalidierung ausgeschlossen. Der Modelldatensatz, welcher aus 80% aller Rutschungen des jeweiligen Inventares besteht, wurde dazu verwendet, das Gefährdungsmodell zu berechnen und iterativ an die Daten anzupassen. Die Fähigkeit des Modelles sich an die Eingangsdaten anzupassen kann somit im Anschluss quantitativ beurteilt werden (Chung und Fabbri, 2003; Beguería, 2006; Guzzetti *et al.*, 2006; Fell *et al.*, 2008). Da die Lage der zukünftig auftretenden gravitativen Massenbewegungen unbekannt ist und somit eine direkte Beurteilung der Vorhersagefähigkeit des Modelles nicht möglich ist, imitiert der von dem Modelldatensatz unabhängige Validierungsdatensatz, welcher aus 20% der Rutschungen des jeweiligen Inventares besteht, die zukünftigen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet (vgl. Chung und Fabbri, 2003). Somit können auch Aussagen über die „Vorhersagefähigkeit“ der Modelle gegeben werden, indem aufgezeigt wird wie gut das Gefährdungsmodell die Validierungs-rutschungen vorhersagen konnte (Chung und Fabbri, 2003; Guzzetti, 2006). Praktisch realisiert wurde die Datenpartition anhand des Werkzeuges „random points“, welches eine vom Benutzer definierte Anzahl von zufällig verteilten Punkten innerhalb eines definierten Raumausschnittes generiert (vgl. ArcGIS Desktop Help 9.3 - create random points). Hierfür wurden aus allen Rutschungen zunächst Rasterdaten generiert (1= Rutschung, Rest= NoData), welche als Maske im Spatial Analyst eingesetzt werden konnten. Über die Anzahl der Punkte und deren minimalen Abstand zueinander kann somit gewährleistet werden, dass 80% (ALS: 4974, BGK: 545) aller Rutschungen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt werden. Damit die nicht von Rutschungen betroffenen Bereiche im gleichen Maße wie die Rutschungsbereiche in die Modellierung eingehen, wurden im Anschluss den nicht-Rutschungsbereichen gleich viele Punkte (Werkzeug: „random points“, Maske: Untersuchungsgebiet ohne Rutschungen) wie den Rutschungsbereichen zugewiesen. Durch das

Zusammenfügen (Werkzeug: „merge“) der dadurch generierten Punktdaten konnte der Modelldatensatz generiert werden, welcher 80% der Rutschungen und eine gleich hohe Anzahl an nicht-Rutschungspunkten, welche ebenfalls zufällig verteilt sind, enthält. Mithilfe des Werkzeuges „erase“ wurden die vorher generierten 80% der Rutschungen vom gesamten Rutschungsinventar abgezogen. Somit konnte ein Datensatz erstellt werden, welcher die restlichen 20% (ALS: 1244, BGK: 136) der Rutschungen enthält und die Basis für die Bildung des Validierungsdatensatzes darstellt.

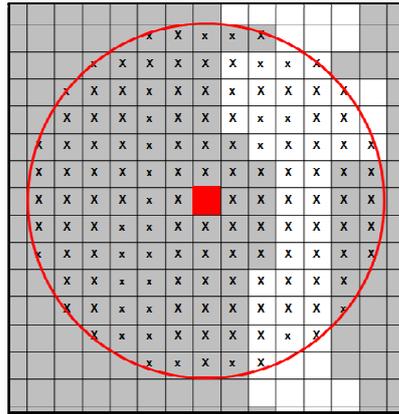
Die Modellierungs- und Validierungsdatensätze wurden mithilfe des „Intersect to point“- Werkzeuges der frei erhältlichen Hawth's Analysis Tools komplettiert (Beyer, 2004). Dadurch konnte für jeden Modellierungs- und Validierungsdatensatz (ALS und BGK) eine Tabelle generiert werden, welche zu jedem Punkt die Attribute sämtlicher Variablen (z.B. Hangneigung, geologische Formation) enthält. Um die Analysen in der freien Statistiksoftware R durchführen zu können, wurden diese Punkt-Shapefiles ins Datenformat ASCII (Werkzeug: „raster to ascii“) überführt.

5.2 Explorative Datenanalyse

Die explorative Datenanalyse soll die wichtigsten prädisponierenden Faktoren für die Rutschungen bzw. Rutschungsanrisse im Untersuchungsgebiet sichtbar machen und die geeignetsten Variablen für die Gefährdungsmodellierung identifizieren.

5.2.1 Nachbarschaftsstatistiken - Dichtekarten

Die räumliche Darstellung der Rutschungsinventare anhand von Dichtekarten stellt die einfachste Form der Gefährdungsdarstellung dar (Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005; Van Westen, 2009). Die Dichtekarten dieser Arbeit sollen sowohl räumliche Schwerpunkte in der Rutschungsaktivität als auch Auffälligkeiten der predisponierenden Faktoren im Untersuchungsgebiet visualisieren. Aufgrund der zeitintensiven Berechnungsmethode werden sämtliche Dichteberechnungen in einer räumlichen Auflösung von 40mx40m durchgeführt. Mithilfe des Werkzeuges „focal statistics“ kann für jeden Rasterwert eine Statistik innerhalb einer definierten Nachbarschaft berechnet werden. Hierbei werden sämtliche Berechnungen anhand eines 5000m-Puffers, welcher um das Untersuchungsgebiet gelegt wurde, durchgeführt. Somit kann gewährleistet werden, dass auch jene Rasterwerte in die Berechnungen mit einbezogen werden, welche sich in den Talalluvionen bzw. knapp außerhalb der Untersuchungsgebietsgrenzen befinden. Folglich können auch die Dichtewerte in den Grenzbereichen des Untersuchungsgebietes korrekt interpretiert werden. Die im Pufferbereich berechneten Dichtekarten wurden im Anschluss auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten. Die Abbildung 13 zeigt, dass für die Berechnung der Nachbarschaftsstatistiken eines Pixelswertes (rot) alle Werte innerhalb eines definierten Suchradiuses (Kreis) sowohl im Untersuchungsgebiet (grau) als auch außerhalb des Untersuchungsgebietes (weiß) herangezogen werden.

Abbildung 13: Berechnung der Nachbarschaftsstatistiken (nach ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Focal Statistics works)

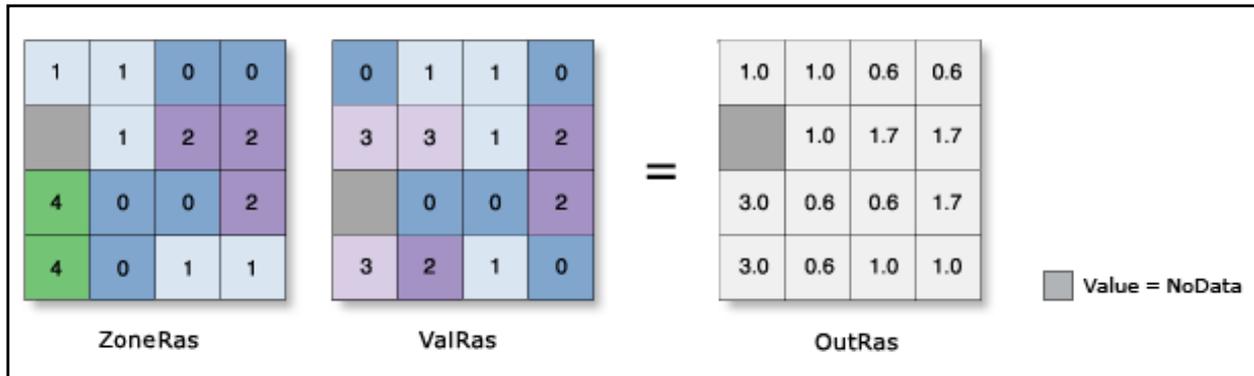
Durch die Verwendung verschiedener Suchradien (5000m, 3000m und 1000m) sollen sowohl kleinräumigere (Suchradius 1000m) als auch großflächige Tendenzen (Suchradius 5000m) sichtbar gemacht werden. Die Dichtekarten der DGM-Derivate (Ausnahme: relatives Relief), der Verbauung, der Waldbedeckung, der Niederschläge, der Straßen und der Flüsse zeigen die Mittelwerte in den jeweiligen Suchradien. Um das relative Relief im Untersuchungsgebiet zu visualisieren, wurde die Spannweite der Höhenwerte des DGM's für den jeweiligen Suchradius berechnet. Aufgrund der im Vergleich zu den Gesamtpixelanzahl geringen Anzahl an Rutschungspunkten, wurde für die Berechnung der Inventardichten das ArcGIS-Werkzeug „point density“ verwendet, welches die Rutschungsdichte pro Quadratkilometer im definierten Suchradius errechnet (vgl. ArcGIS Desktop Help 9.3 – How Point Density works)

5.2.2 Zonale Statistiken – frequency ratio (FR)

Die Anwendung von zonalen Statistiken ermöglichen das Berechnen von Rasterwerte eines Datensatzes innerhalb einer definierten Zone eines anderen Datensatzes. Die Zonen stellen hierbei Flächen dar, welche identische Pixelwerte aufweisen (ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Zonal Statistics works). Da die Ergebnisse der zonalen Statistiken direkt als Eingangsvariablen für die LSI-Gefährdungsmodellierungen verwendet werden (vgl. Kapitel 5.4.2), wurden diese gänzlich anhand des Modellierungsdatensatzes berechnet. Die Bildung der Zonen stellte die Basis für die Berechnung der FR-Werte dar. Hierfür müssen alle stetigen Variablen (z.B. Hangneigung) in Klassen unterteilt werden, wobei es keine allgemein akzeptierte Vorgehensweise zur Bildung der Klassengrenzen oder Klassenanzahl gibt und daher diese Unterteilung einer gewissen Subjektivität unterliegt (Bui *et al.*, 2011). Die Zonen der kategorialen Variablen (z.B. Landbedeckung, Geologie, Hangposition) wurden durch die vorgegebene Klasseneinteilung, jene der stetigen Variablen durch die Klassifizierung (Werkzeug: „reclassify“) der Rasterwerte definiert. Durch Übertragung der Pixelanzahlen jeder Zone können die Histogramme (vgl. Anhang A5) der unabhängigen Variablen in Microsoft Excel erstellt werden. Die Zusammenhänge

zwischen dem räumlichen Rutschungsaufreten und den rutschungsfördernden Faktoren wurden im Anschluss für beide Rutschungsinventare anhand des Werkzeuges „zonal statistic“ ermittelt (Abb.14).

Abbildung 14: Berechnung der Zonalen Statistiken – Beispiel: Mittelwertberechnung nach Zonen (ZoneRas) für den Werteraster (ValRas) (ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Zonal Statistics works)



Die Rutschungen der Modelldatensätze stellen den Werteraster (ValRas) dar (1=Rutschung, 0=keine Rutschung). Für jede Zone (z.B. Hangneigungsklasse) wurden zunächst die Rutschungen aufsummiert, um daraus die Rutschungsanteile ermitteln zu können.

Neben den Rutschungsanteilen wurde für jede unabhängige Variable die frequency ratio (FR) pro Zone (Lee und Dan, 2005; Vijith und Madhu, 2007; Yalcin *et al.*, 2011) berechnet und dargestellt. Die FR-Modelle basieren auf dem Konzept der favourability function nach Chung und Fabbri (1999), wobei in dieser Arbeit eine statistische Beziehung zwischen den Rutschungen der Inventare und den einzelnen rutschungsfördernden Faktoren hergestellt wurde (Chung und Fabbri, 1999; Vijith und Madhu, 2007). Die FR-Werte wurden aus dem Verhältnis des Rutschungsanteiles der Zone zum Flächenanteil der Zone (vgl. Anhang A5) berechnet. Somit konnte die relative Gefährdung jeder Zone bzw. Klasse, wie bei dem von Van Westen (1997) und Bui *et al.* (2011) verwendeten Hazard-Index sowie der Likelihood ratio (Lee, 2004; Akgun *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007), ausgewiesen werden. Die Berechnung der FR erfolgte nach dem Übertragen der Rutschungen pro Klasse und der Anzahl der Pixel pro Klasse in Microsoft Excel für jede Zone bzw. Klasse wie folgt:

$$FR = ((\sum rk / \sum ru) \times 100) / ((\sum pk / \sum pu) \times 100), \text{ wobei}$$

rk = Rutschungen pro Klasse

ru = Rutschungen im Untersuchungsgebiet

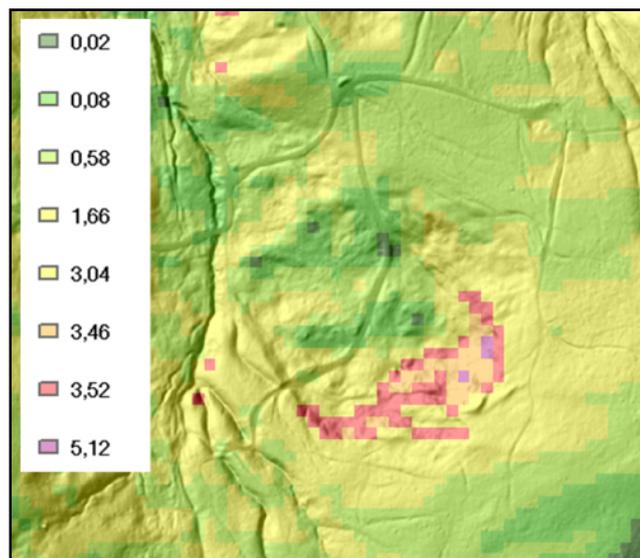
pk = Pixel pro Klasse

pu = Pixel im Untersuchungsgebiet

Beträgt der FR-Wert 1, so ist das Verhältnis zwischen dem Rutschungsanteil und dem Flächenanteil der jeweiligen Zone ausgeglichen, die relative Rutschungsgefährdung kann somit als durchschnittlich

bezeichnet werden. Eine überdurchschnittliche relative Gefährdung der jeweiligen Zone wird durch eine hohe Korrelation von >1 , eine unterdurchschnittliche relative Gefährdung durch eine geringe Korrelation <1 ausgewiesen (Lee und Dan, 2005). Die dargestellten FR-Diagramme zeigen sowohl die Rutschungsanteile als auch die FR-Werte für jede Zone getrennt nach den Inventaren. Die für die Modelldatensätze ermittelten FR-Werte wurden im Anschluss den nach Zonen klassifizierten Rastern zugewiesen und somit in die Fläche übertragen. Die dadurch generierten FR-Raster bilden die Basis für die LSI-Gefährdungsmodellierung (Abb.15).

Abbildung 15: FR-Raster. Beispiel der relativen Gefährdung der Hangneigungsklassen des ALS-Rutschungsinventares (>1 überdurchschnittliche relative Gefährdung, <1 unterdurchschnittliche relative Gefährdung)



5.2.3 Korrelationskoeffizienten nach Spearman

Um Hinweise auf mögliche korrelative Zusammenhänge zwischen den in den Modellierungen verwendeten (angenommenen unabhängigen) Variablen ausfindig zu machen, wurde für die Modelldatensätze der beiden Inventare der nichtparametrische Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman berechnet. Neben den stetigen Variablen wurden die korrelativen Zusammenhänge auch für die kategorialen Variablen (in Form der FR-Werte) ermittelt. Als Korrelationsmaß wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman verwendet, welcher ein rangbasiertes Zusammenhangsmaß darstellt. Dieser Korrelationskoeffizient eignet sich besonders Zusammenhänge aufzudecken, bei denen die Verteilung der einzelnen Variablen nicht bekannt ist (bzw. keine Normalverteilung vorhanden ist) und ein hohes Datenrauschen vorliegt. Eine weitere Stärke dieses Korrelationskoeffizienten liegt in seiner Insensitivität gegenüber Ausreißern. Ein Wert von $|1|$ weist auf eine perfekte Korrelation, Werte von 0 auf eine perfekte nicht vorhandene Korrelation hin (Spearman, 1904; Borradaile, 2003; Fahrmeir *et al.*, 2009). Dieser Korrelationskoeffizient wurde in der Statistiksoftware „R“ mit dem Befehl „cor(x, method=spearman)“ berechnet, wobei x den Datensatz (vgl. Modelldatensatz Kapitel 5.1) darstellte (Quick R: Correlations). Aufgrund der großen Anzahl der möglichen Variablenkombinationen werden im

Anhang A7 nur jene korrelativen Zusammenhänge dargestellt, welche einen Korrelationskoeffizienten $>|0,3|$ aufweisen.

5.2.4 BGK-Genauigkeit und geomorphologische Güte der Inventare

Die Lagegenauigkeit des BGK-Inventares wurde anhand der vom geologischen Dienst zur Verfügung gestellten Informationen ausgewertet. Hierbei handelt es sich um einen Datensatz, welcher dem Großteil der gravitativen Massenbewegungen eine Angabe zur Verlässlichkeit der Verortung der einzelnen Rutschungen zuweist. Neben der Ausweisung der BGK-Anteile in den verschiedenen Verlässlichkeitsklassen wurden die mit O (= im Umkreis von) gekennzeichneten quantitativen Aussagen zur Lagegenauigkeit gesondert analysiert. Sämtliche Analysen wurden sowohl innerhalb des Untersuchungsgebietes als auch in einem 1000m-Pufferbereich um die Untersuchungsgebietsgrenzen durchgeführt. Der Pufferbereich wurde analysiert um auch jene Rutschungen zu identifizieren, welche außerhalb/innerhalb der Untersuchungsgebietsgrenzen liegen, jedoch aufgrund der Lageungenauigkeit möglicherweise auch innerhalb/außerhalb des Untersuchungsgebiets verortet wurden. Neben der quantitativen Analyse des BGK-Inventares wurden beide Rutschungsinventare anhand der hochaufgelösten Schummerungskarte aus geomorphologischer Perspektive beurteilt.

5.3 Validierung

Dieses Kapitel erläutert die Vorgehensweise zur Erörterung der quantitativen sowie qualitativen Validierungsergebnisse, welche in einem iterativen Prozess in die jeweilige Modellentwicklung einfließen sowie die Auswahl der jeweils „besten“ Gefährdungsmodelles begründen. Die Erkenntnisse der quantitativen Validierung (Kapitel 5.3.1) soll Aussagen darüber bieten, wie gut sich das Modell an die Daten angepasst hat. Die Vorhersagefähigkeit der Modelle wurde anhand des unabhängigen Validierungsdatensatzes (vgl. Kapitel 5.1) ermittelt und kann im engeren Wortsinn als die eigentliche Validierung bezeichnet werden. Bell (2007) zeigt in seinen Studien auf, dass die Interpretation von quantitativen Gütemaßen durch eine Beurteilung der qualitativen geomorphologischen Güte (Kapitel 5.3.2) ergänzt werden soll (Bell, 2007).

5.3.1 Quantitative Validierung

Die quantitativen Validierungen der logistischen Regressionsmodelle wurde in der Statistiksoftware „R“ anhand der importierten ASCII-Datensätze (vgl. Kapitel 5.1) durchgeführt.

Die passende Anzahl der vorselektierten Variablen für die logistischen Regressionsmodelle wurde anhand des Akaiken Informations Criteria (AIC) für beide Modelldatensätze (ALS und BGK) überprüft. Dieses häufig verwendete Selektionskriterium reagiert auf eine zu hohe Anzahl der unabhängigen Variablen im Modell mit einer Erhöhung des Wertes (Sakamoto *et al.*, 1986; Brenning, 2005; Konishi und

Kitagawa, 2008). Hierbei wird eine schrittweise vor- und rückwärtsgerichtete Variablenauswahl durchgeführt, welche den AIC-Wert als Selektionskriterium heranzieht (vgl. ETHa). Bei der automatisierten vorwärtsgerichteten Variablenselektion werden bis zum Erreichen des bestmöglichen AIC-Wertes Variablen hinzugefügt, bei der automatisierten rückwärtsgerichteten Variablenselektion wird bis zum Erreichen des statistischen Optimums die Variablenanzahl stetig reduziert (Harrell, 2001). Neben den AIC-Werten wurden die in R ebenfalls automatisch ausgewiesenen Signifikanzwerte der einzelnen Variablen, welche auf den Überschreitungswahrscheinlichkeiten (P-Werte) basieren, überprüft (Everitt und Hothorn, 2012). Die Anpassungsfähigkeit der logistischen Regressionsmodelle an die Daten wurde anhand der Modelldatensätze, die „Vorhersagegüte“ anhand der Validierungsdatsätze überprüft. Mithilfe des RSAGA-Packages (Brenning, 2007) können somit ROC-Kurven und AUROC-Werte für die logistischen Regressionsmodelle beider Inventare berechnet werden. Die ROC-Kurven geben Aufschluss über die Güte der Trennung zwischen den korrekt klassifizierten von Rutschungen betroffenen Flächen (Sensitivität) und den korrekt klassifizierten nicht von Rutschungen betroffenen Flächen (Spezifität). Daher kann aufgezeigt werden, wie gut das Modell die gefährdeten Bereiche von den nicht gefährdeten Bereichen unterscheiden kann. Das erstellte Streudiagramm, welches der Sensitivität die Spezifität für alle möglichen Kombinationen gegenüberstellt, ist von den Klassifikationsgrenzen der Gefährdungswerte unabhängig und deshalb besonders geeignet um die Güte von Gefährdungsmodellen zu ermitteln. Die Ergebnisse des ROC-Streudiagrammes werden durch den AUROC-Wert (engl. area under the curve) zusammengefasst, welcher bei einem Wert von 0,5 auf ein Zufallsmodell, bei einem Wert von 1 auf eine perfekte Trennung zwischen den gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen hinweist (Hosmer und Lemeshow, 2000; Brenning, 2005, 2008; Beguería, 2006; Bell, 2007). Wie Guzzetti (2006) anführt, stellt die damit ausgewiesene „Vorhersagefähigkeit“ der Modelle für die Endnutzer (z.B. Raumplanung, Politik etc.) die wichtigste Aussage zur Modellgüte dar und soll Bestandteil einer jeden Gefährdungsmodellierung sein (Guzzetti, 2006).

Da die Generierung des ROC-Streudiagrammes in „R“ Gefährdungswerte zwischen 0 und 1 voraussetzt, können die LSI-Modelle nicht in dieser Form validiert werden. Daher wurden für die Validierungsdatsätze der LSI-Modelle die von einer Klassifikationsgrenze abhängigen Gütemaße der Confusion Matrix nach Beguería berechnet (Beguería, 2006). Die Berechnung dieser Gütemaße wurde auch für die logistischen Regressionsmodelle durchgeführt, um quantitative Vergleiche zwischen den angewandten Modellierungsansätzen zu ermöglichen. Die praktische Umsetzung in ArcGIS 9.3 erfolgte anhand von Verschneidungen der Validierungsdatsätze mit den vorher klassifizierten (4 Klassen) Gefährdungsmodellen.

Beispiel der Validierung des ALS-Validierungsdatensatzes für die Klassifikation Quantile:

als_valid01 = Validierungsdatensatz-ALS (1=Rutschung, 0=keine Rutschung)

m1_als4 = Klassifizierung 1 (Quantile), ALS-Inventar, 4 Gefährdungsklassen (1=gering, 2=mittel, 3=hoch, 4 sehr hoch)

Validierungsraster = con([als_valid01] == 1 & [m1_als4] == 1, 1, con([als_valid01] == 1 & [m1_als4] == 2, 2, con([als_valid01] == 1 & [m1_als4] == 3, 3, con([als_valid01] == 1 & [m1_als4] == 4, 4, con([als_valid01] == 0 & [m1_als4] == 1, -1, con([als_valid01] == 0 & [m1_als4] == 2, -2, con([als_valid01] == 0 & [m1_als4] == 3, -3, con([als_valid01] == 0 & [m1_als4] == 4, -4, 0)))))))))

Die Sensitivität wurde aus der Anzahl der Rutschungen (als_valid01=1), welche in den Gefährdungsbereichen hoch bzw. sehr hoch (m1_als=3 bzw. 4) liegen, errechnet. Die Spezifität kann aus der Anzahl der nicht von Rutschungen betroffenen Pixel (als_valid01 = 0) in den Gefährdungsklassen gering bzw. mittel (m1_als=1 bzw. 2) abgeleitet werden. Der Anteil der fehlerhaft klassifizierten Validierungspixel kann anhand des Fehlertyps 1 (hohe und sehr hohe Gefährdung, keine Rutschungspixel; engl. false positive rate) und des Fehlertyps 2 (geringe und mittlere Gefährdung, vorhandene Rutschungspixel; engl. false negative rate) nachvollzogen werden. Der Anteil aller korrekt klassifizierten Beobachtungen (Sensitivität+Spezifität/2) wird als Modelleffizienz bezeichnet, die Fehlklassifikationsrate beschreibt den Anteil der nicht korrekt klassifizierten Beobachtungen (Fehlertyp1+Fehlertyp2/2) (Beguería, 2006). Da sämtliche Gütemaße der Confusion-Matrix von den Klassifikationsgrenzwerten abhängen, wurden diese für beide Inventare für vier Klassifikationsgrenzwerte berechnet, wobei der fett gedruckte Wert den Grenzwert zwischen gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen bildet (Tab.5).

Tabelle 5: Grenzwerte für die Bildung der modifizierten ROC-Kurven für beide Inventare

	Logistische Regression	Landslide Susceptibility Index
Klassifikationsgrenzwerte	Quartile	Quartile
	0,1; 0,3 ; 0,6; 1	0,5; 1 ; 1,5; >1,5
	0,3; 0,8 ; 0,9; 1	0,7; 1,2 ; 1,8; >1,8
	0,05; 0,1 ; 0,4; 1	0,7; 1,5 ; 2,25; >2,25

Somit konnten 16 Sensitivitäts-/Spezifitäts-Paare (4 für jedes Modell) berechnet werden, welche in Microsoft Excel in einem ROC-Streudiagramm aufgetragen und mithilfe eines logarithmischen Trends als Kurven dargestellt werden. Der Trapezoid-AUROC wurde mithilfe von Trapezen, welche unterhalb der Punkte aufgespannt werden, ebenfalls in Microsoft Excel berechnet.

Als abschließende Validierung wurden die Histogramme der verwendeten Klassifikationen sowie die Rutschungsdichten der Validierungsdatensätze für die ausgewählten besten Modelle jeder Modellierungsmethode (ALS und BGK) dargestellt. Eine hohe quantitative Modellgüte wurde im Untersuchungsgebiet dann angenommen, wenn der Flächenanteil in den niedrigen Gefährdungsklassen überwiegt und somit nur ein geringer Flächenanteil als höchst gefährdet ausgewiesen wurde. Bei gleichzeitiger hoher Rutschungsdichte in den höchsten Gefährdungsklassen wird somit eine ausreichende Differenzierung zwischen den gefährdeten und weniger gefährdeten Bereiche bei

entsprechender Klassifikation gewährleistet. Eine gute Trennung dieser Bereiche wird durch einen linkssteilen Verlauf der Flächenanteile und eine rechtssteile Verteilung der Rutschungsdichten bei aufsteigenden Gefährdungswerten visualisiert.

5.3.2 Qualitative Validierung

Neben der quantitativen Validierung wurde jedes Modell nach dem von Bell (2007) eingeführten qualitativen geomorphologischen Gütekriterium beurteilt, da die alleinige Beurteilung von quantitativen Gütemaßen keine Garantie für eine geomorphologisch gute Gefährdungsmodellierung darstellt. Die Ermittlung der quantitativen Güte der Modelle wurde daher durch die Beurteilung der qualitativen geomorphologischen Güte ergänzt. Dieses subjektiv abgeschätzte Gütemaß zeigt, wie gut die jeweilige Gefahrenhinweiskarte die tatsächliche Rutschungsgefährdung wiedergeben kann (Bell, 2007). Die geomorphologische Güte der Gefahrenhinweiskarten wurde mithilfe der hochaufgelösten Schummerungsdarstellung beurteilt. Eine hohe geomorphologische Güte wird dann angenommen, wenn Flächen in denen Rutschungen kartiert wurden bzw. die für Rutschungen typische Oberflächenmorphologie (vgl. Kapitel 4.3) erkennbar ist, auch tatsächlich eine höhere Gefährdung aufweisen. Relativ flache Gebiete wie beispielsweise die sanften Kuppenbereiche und Flussauen mit ruhiger Oberflächenmorphologie sollen hierbei eine geringe Rutschungsgefährdung aufweisen.

5.4 Gefährdungsmodellierung

Die Gefährdungsmodellierungen wurden anhand der vorher ausgewählten unabhängigen Variablen für beide Rutschungsinventare (Modelldatensatz, vgl. Kap. 5.1) in einer räumlichen Auflösung von 10mx10m durchgeführt. Die multivariate Gefährdungsmodellierung anhand der logistischen Regression wird in Kapitel 5.4.1, die bivariate Modellierung anhand des Landslide Susceptibility Index in Kapitel 5.4.2 beschrieben.

Beide in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsmethoden basieren auf der Annahme, dass die Vergangenheit der Schlüssel zur Zukunft ist und daher bestimmte Hangdispositionen (z.B. Hangneigungen, Geologie), welche in der Vergangenheit zu Rutschungen geführt haben, auch in Zukunft zu Rutschungen führen werden (Fell *et al.*, 2008).

5.4.1 Multivariate Modellierung – Logistische Regression

Die logistische Regression wurde erstmals von Atkinson *et al.* (1998) sowie Atkinson und Massari (1998) für die Analyse von geomorphologischen Fragestellungen bzw. von Gefährdungsmodellierungen angewandt (Atkinson und Massari, 1998; Atkinson *et al.*, 1998). Wie zahlreiche Beispiele zeigen, hat sich die logistische Regression für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten von gravitativen Massenbewegungen bewährt (Dai und Lee, 2002; Lee, 2004; Brenning, 2005, 2008; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2006, 2010; Duman *et al.*, 2006; Bender *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; Falaschi *et al.*, 2009; Das *et al.*,

2010; Atkinson und Massari, 2011; Yalcin *et al.*, 2011; Bui *et al.*, 2011; Guns und Vanacker, 2012). Bei der logistischen Regressionsanalyse wird eine statistische Beziehung zwischen einer abhängigen Variable (verortete Rutschungen) und mehreren unabhängigen Variablen (z.B. Hangneigung, Geologie, Niederschlag etc.) hergestellt (Dai und Lee, 2002; Van Den Eckhaut *et al.*, 2006). In dieser Arbeit wurde ein generalisiertes lineares Modell (GLM) einem einfachen linearen Regressionsmodell vorgezogen, da die abhängige Variable binär vorliegt (1= Rutschung vorhanden, 2= keine Rutschung) und mithilfe der Link-Funktion sowohl stetige als auch kategoriale unabhängige Variablen zur Erklärung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Rutschungen beitragen können (Atkinson und Massari, 1998; Hosmer und Lemeshow, 2000).

Mathematisch kann die Beziehung zwischen dem Auftreten von Rutschungen und den unabhängigen Variablen wie folgt ausgedrückt werden (Dai und Lee, 2002):

$$P_e = 1 / (1 + e^{-Z}) \text{ mit} \\ Z = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

wobei P_e die Wahrscheinlichkeit (P) des Eintretens eines Events (e = Rutschung vorhanden) und β_i ($i= 0,1, \dots, n$) die Beta-Regressionskoeffizienten darstellen, welche anhand des Modelldatensatzes (vgl. Kapitel 5.1) abgeschätzt wurden. Da der Wert Z zwischen $-\infty$ und $+\infty$ variiert, liegt die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Events zwischen 0 und 1. α bezeichnet hierbei die Konstante (Interzept) und n die Anzahl der in der Modellierung verwendeten erklärenden Variablen. Die für die spätere flächenhafte Übertragung benötigten Regressionskoeffizienten werden hierbei anhand des Maximum-Likelihood-Verfahrens ermittelt (Hosmer und Lemeshow, 2000; Dai und Lee, 2002). Sämtliche Berechnungen erfolgten in „R“ anhand des RSAGA-Packages (Brenning, 2007), wobei die Modelldatensätze als ASCII-Daten (vgl. Kapitel 5.1) eingelesen werden mussten. In den Modellierungen wurden hierbei nur jene erklärenden Variablen berücksichtigt, welche aufgrund der explorativen Datenanalyse selektiert wurden. Aus den Klassen der kategorialen Variablen Geologie, Exposition und Hangposition wurden zunächst anhand der Funktion „`as.factor()`“ einzelne Faktoren generiert. Beispielsweise besteht die kategoriale Variable Exposition aus den Faktoren Nord, Ost, Süd und West. Die als Faktoren ausgewiesenen kategorialen Variablen konnten somit in den anschließenden Modellen als binäre Dummy-Variablen (Ausprägung vorhanden / Ausprägung nicht vorhanden) behandelt werden. Im Anschluss an das Faktorisieren dieser Variablen, wurde das Bezugslevel der jeweiligen kategorialen Variable angegeben, wobei jene Klasse ausgewählt wurde, welche den größten Flächenanteil aufweist (vgl. Wood, 2006).

Mithilfe des R-Befehls „`glm`“ wurden die generalisierten linearen Modelle für beide Rutschungsinventare berechnet, wobei die schrittweise Variablenauswahl anhand des AIC-Wertes und die Signifikanzen der einzelnen Variablen die Modellentwicklung unterstützen (vgl. ETHa; Kapitel 5.3.2).

Das folgende Beispiel zeigt für das logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares die Befehlseingabe in „R“, wobei durch Rückgriff auf die Variablen mittlerer Jahresniederschlag (mjns), Hangneigung (slope), Exposition (asprec), Hangposition (topogra), Geologie, (geol_fl) sowie Wölbung (curv) die binomiale Zielvariable (slide) anhand des ALS-Modelldatensatzes (m_als) erklärt wird:

```
ALSfit = glm(slide ~ mjns + slope + asprec_ + topogra + geol_fl + curv, family = binomial, data = m_als)
```

In „R“ wurden für jede der stetigen Variablen die nicht-standardisierten Regressionskoeffizienten ausgegeben. Da die Rasterwerte der unabhängigen Variablen in ArcGIS 9.3 ebenfalls nicht-standardisiert vorliegen, wurden die nicht-standardisierten Regressionskoeffizienten für die Erstellung der Gefährdungsmodelle verwendet und wie folgt in die Fläche übertragen (Interzept = -4,84):

```
M_ALS = exp (-4.84 + 0.2091 * [slope] + 0.001535 * [mjns] - 0.2586 * [curv] + 0.5153 * [aspect2] + 0.4811 * [aspect3] + 0.234 * [aspect4] - 1.656 * [topo5] - 0.7668 * [topo4] - 1.6 + [topo1] - 0.244 * [topo2] - 11.6 * [geo410] + 1.424 * [geo417] + 0.1473 * [geo404] - 2.198 * [geo420] - 1.385 * [geo405] - 0.1617 * [geo416] - 0.7691 * [geo415] + 2.463 * [geo401] - 0.2430 * [geo413] - 1.446 * [geo421] - 13.38 * [geo419] - 0.5425 * [geo411] - 0.9299 * [geo412] - 1.24 * [geo424] - 0.2134 * [geo426] - 0.1595 * [geo425] + 0.009738 * [geo409] + 11.82 * [geo402] - 0.1577 * [geo414] - 11.98 * [geo427] + 0.03721 * [geo408] + 1.182 * [geo400] - 0.2784 * [geo423] - 0.4533 * [geo422] + 0.1968 * [geo407])
```

Die dadurch erhaltene Gefahrenhinweiskarte wurde durch Transformation ($M_ALS / (1 + M_ALS)$) in Wahrscheinlichkeiten zwischen 0 und 1 überführt und anhand von 14 Gefährdungsklassen visualisiert. Für jene geologischen Formationen in denen kein Modellierungspunkt vorhanden ist, sind die Aussagen über die Gefährdungen nicht gültig. Deshalb wurden diese Flächen (ALS: 0,04km²; BKG: 9,5km²) in schwarz dargestellt.

Der Einfluss der einzelnen unabhängigen Variablen auf die Zielvariable wurde anhand der standardisierten Regressionskoeffizienten sowie der Odds Ratio-Werte interpretiert. Die Stärke des Einflusses der einzelnen stetigen erklärenden Variablen auf die binäre Zielvariable (Rutschung ja/nein) kann anhand der Regressionskoeffizienten nachvollzogen werden. Da diese Regressionskoeffizienten auf ungleichem Maßstab gemessen werden (z.B. Niederschlag 1300mm, Hangneigung 30°), können diese nicht ohne Weiteres verglichen werden. Daher wurden die stetigen Daten mithilfe der R-Funktion scale() auf eine vergleichbare Messdimension gebracht, indem eine Mittelwertzentrierung durchgeführt (Mittelwert = 0) und die Standardabweichung jeder stetigen Variable auf 1 gesetzt wurde (Falk et al., 2002; Kohn, 2004, ETHb). Für die kategorialen Variablen wurde für jeden Faktor, mit Ausnahme des Bezugslevels, ein eigener Regressionskoeffizient ausgegeben, welcher den Einfluss jedes Faktors auf die Zielvariable zeigt. Die Regressionskoeffizienten der einzelnen Faktoren wurden somit in Relation zum jeweiligen Bezugslevel berechnet. Die Odds Ratio (= $\exp(\beta)$), welche für die logistische Regression als Effektschätzer bezeichnet werden kann (Bender *et al.*, 2007), erhält daher für das Bezugslevel den Wert

1. Alle anderen Faktoren dieser kategorialen Variable beziehen sich auf diesen Bezugslevel und erhöhen die Gefährdung (Odds Ratio >1) oder setzen diese herab (Odds Ratio <1) (Brenning A., mündliche Mitteilung).

5.4.2 Bivariate Modellierung – Landslide Susceptibility Index (LSI)

Die Vergleichbarkeit zwischen den Modellierungsansätzen konnte durch eine identische Auswahl der erklärenden Variablen für das jeweilige Rutschungsinventar gewährleistet werden. Bei der Modellierung anhand des LSI handelt es sich um eine bivariate Gefährdungsmodellierung, welche auf den Konzepten der „frequency ratio“ basiert (vgl. Kapitel 5.2.2). Die Gefährdungsmodellierungen von gravitativen Massenbewegungen anhand des LSI stellt eine bivariate statistische Beziehung zwischen dem Rutschungsaufreten und mehreren erklärenden Variablen anhand der FR-Raster her (Bsp. Lee, 2004; Lee und Dan, 2005; Akgun *et al.*, 2007; Vijith und Madhu, 2007; Bui *et al.*, 2011; Yalcin *et al.*, 2011):

$$\text{LSI} = \sum \text{FR-Raster}$$

Die FR-Raster, welche klassifiziert vorliegen (z.B. Acht Hangneigungsklassen), liegen in einer räumlichen Auflösung von 10mx10m vor. Da die FR-Raster eine überdurchschnittliche relative Gefährdung durch Werte >1 und eine unterdurchschnittliche relative Gefährdung durch Werte <1 ausweisen (vgl. Abb.15), wurde der LSI durch die Anzahl der FR-Raster dividiert, um wiederum einen Grenzwert von 1 zu erhalten, welcher eine überdurchschnittliche Gefährdung von einer unterdurchschnittlichen Gefährdung trennt:

$$\text{LSI} = \sum \text{FR-Raster} / \text{Anzahl der FR-Raster}$$

Die auch bei bivariaten Gefährdungsmodellierungen geforderte Unabhängigkeit der erklärenden Variablen konnte anhand der explorativen Datenanalyse und der darauf basierenden Variablenselektion berücksichtigt werden. Da im Falle der FR-Werte des BGK-Inventares eine hohe Korrelation (0,57) zwischen der Geologie (FRbgk_geol) und den mittleren Jahresniederschlägen (FRbgk_mjns) erkannt wurde, wurden diese beiden Parameter miteinander kombiniert (vgl. VanWesten *et al.* 1997). Die Gesamtgefährdung wurde im in ArcGIS 9.3 (RasterCalculator) wie folgt berechnet:

$$\text{LSI_ALS} = (\text{FRals_slope} + \text{FRals_geol} + \text{FRals_mjns} + \text{FRals_aspect} + \text{FRals_tpi} + \text{FRals_curv}) / 6$$

$$\text{LSI_BGK} = (\text{FRbgk_slope} + \text{FRbgk_aspect} + \text{FRbgk_tpi} + ((\text{FRbgk_geol} + \text{FRbgk_mjns})/2)) / 4$$

Um eine visuelle Vergleichbarkeit zwischen den Modellierungsmethoden zu erleichtern, wurden die Grenzen der Gefährdungsklassen optisch an die Gefährdungsklassen der logistischen Regressionsmodelle desselben Inventares angeglichen. Eine optische Vergleichbarkeit der beiden Inventare für dieselbe Modellierungsmethode wird durch Berechnung von Differenzen der Gefährdungswerte ermöglicht.

6. Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse dieser Arbeit beschrieben. Eine Interpretation der wichtigsten Erkenntnisse erfolgt im Anschluss an das jeweilige Unterkapitel. Eine zusammenfassende Betrachtung und Diskussion aller Ergebnisse folgt in Kapitel 7.

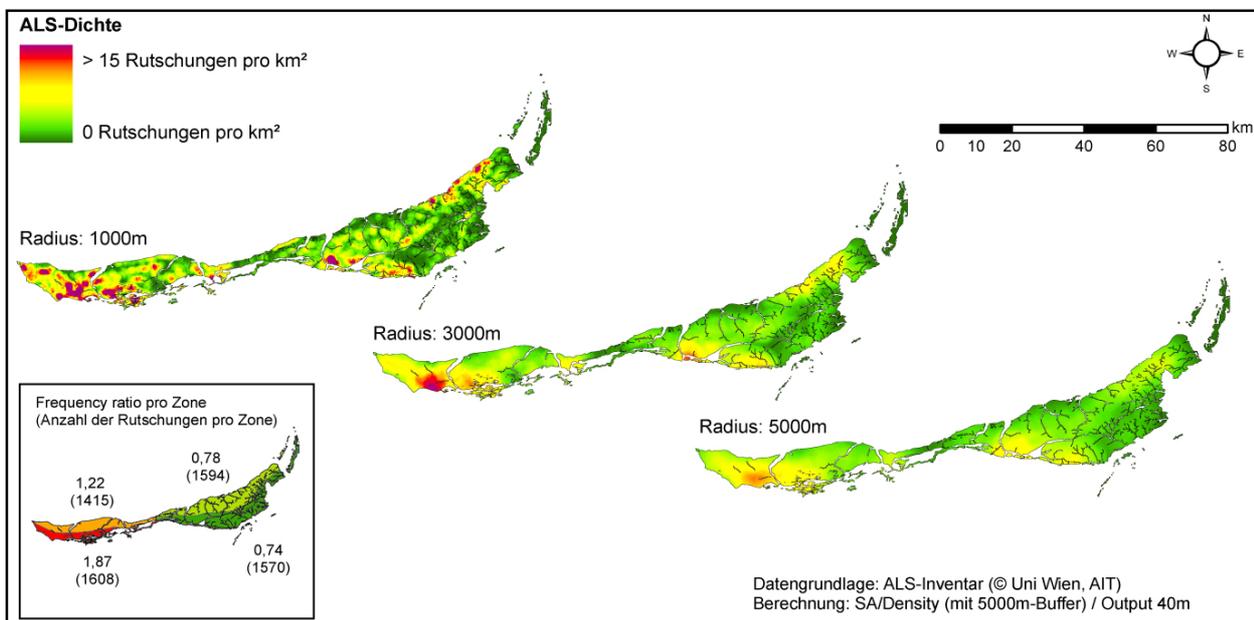
6.1 Ergebnisse der explorativen Datenanalyse

Die Ergebnisse der explorativen Datenanalyse bieten eine räumliche Übersicht über das Untersuchungsgebiet und zeigen grundlegende Zusammenhänge zwischen dem räumlichen Rutschungsausbreiten und den rutschungsfördernden Faktoren.

6.1.1 Ergebnisse Nachbarschaftsstatistiken – Dichtekarten

Von insgesamt 13.162 kartierten Rutschungsanrissen des ALS-Inventares befinden sich 6.218 im Untersuchungsgebiet. Die Rutschungsdichte für das gesamte Untersuchungsgebiet beträgt 4,6/km². Wie die Dichtekarten des ALS-Inventares (Abb.16) zeigen, kann die räumliche Verteilung der Rutschungen im Untersuchungsgebiet als heterogen beschrieben werden.

Abbildung 16: Dichtekarten ALS-Inventar

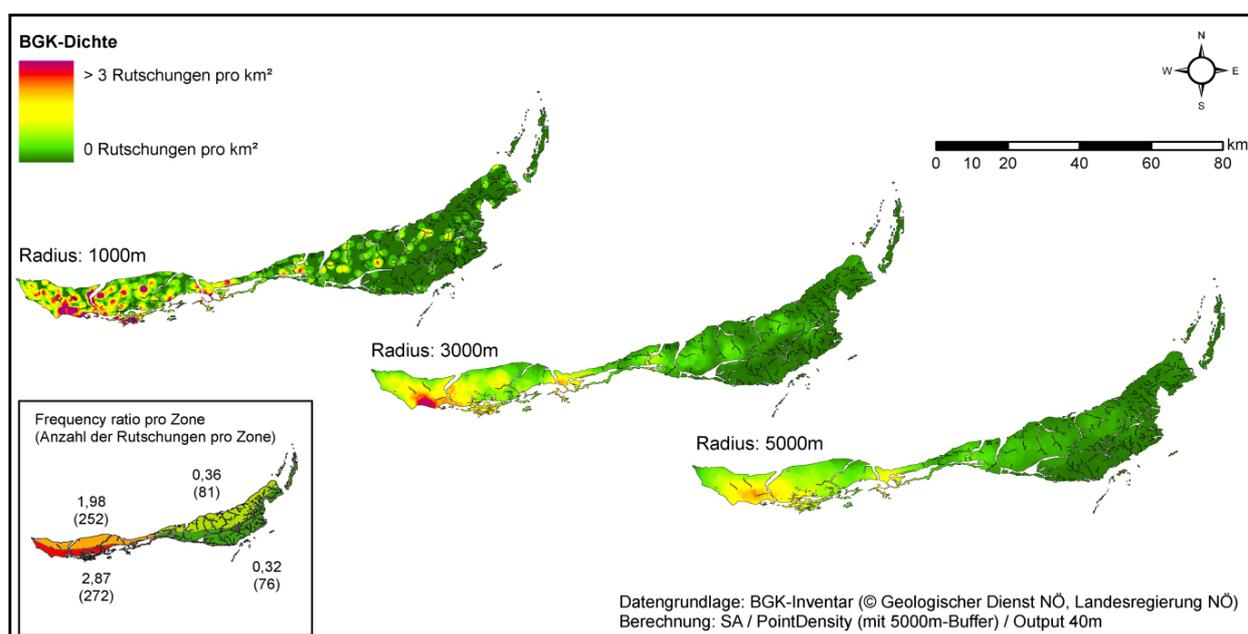


Im Suchradius von 5000m wird ersichtlich, dass in den südwestlich gelegenen Bezirken Waidhofen an der Ybbs, Amstetten und Scheibbs besonders viele Rutschungsanrisse kartiert wurden. Auch die südlichen Bereiche im Bezirk Lilienfeld weisen eine erhöhte Rutschungsdichte auf. Wie die Darstellung der ALS-Rutschungsdichte im Suchradius von 3000m und 1000m zeigt, weist auch der nördlich bis

nordöstliche Teil im Bezirk Tulln eine erhöhte Rutschaktivität auf. Alle Abbildungen zeigen eine geringere Rutschungsdichte im Südosten (Baden, Mödling) und im äußersten Nordosten (Korneuburg). Im Suchradius von 1000m werden auch kleinere räumlich begrenzte Schwerpunkte in der Rutschaktivität erkennbar. Die FR-Werte des ALS-Inventares sind in der Zone Südwest am höchsten (FR: 1,87) und weisen auf eine überdurchschnittliche relative Gefährdung (Grenzwert = 1) hin. Hierbei befinden sich 26% der Rutschungen (1608 Rutschungsanrisse) auf 188,4km² (13,9% Flächenanteil). Eine erhöhte relative Gefährdung weist auch der Nordwesten (FR: 1,22) auf. Als unterdurchschnittlich gefährdet werden die Zonen Südost (FR: 0,74) und Nordost (FR: 0,78) ausgewiesen. In der Zone Südost konnten auf einer Fläche von 466km² (Flächenanteil 34,4%) nur 1570 Rutschungsanrisse (25,4%) verortet werden.

Von den 1878 gemeldeten Schadensmeldungen des BGK-Rutschungsinventares in Niederösterreich befinden sich 681 Rutschungen im Untersuchungsgebiet. Die Rutschungsdichte beträgt 0,5/km² und ist im Vergleich mit dem ALS-Inventar um den Faktor 10 geringer. Im visuellen Vergleich der Dichtekarten zwischen ALS- und BGK-Inventar sind deshalb die unterschiedlichen Skalenwerte zu beachten (Abb.16 und Abb.17).

Abbildung 17: Dichtekarten BGK-Inventar

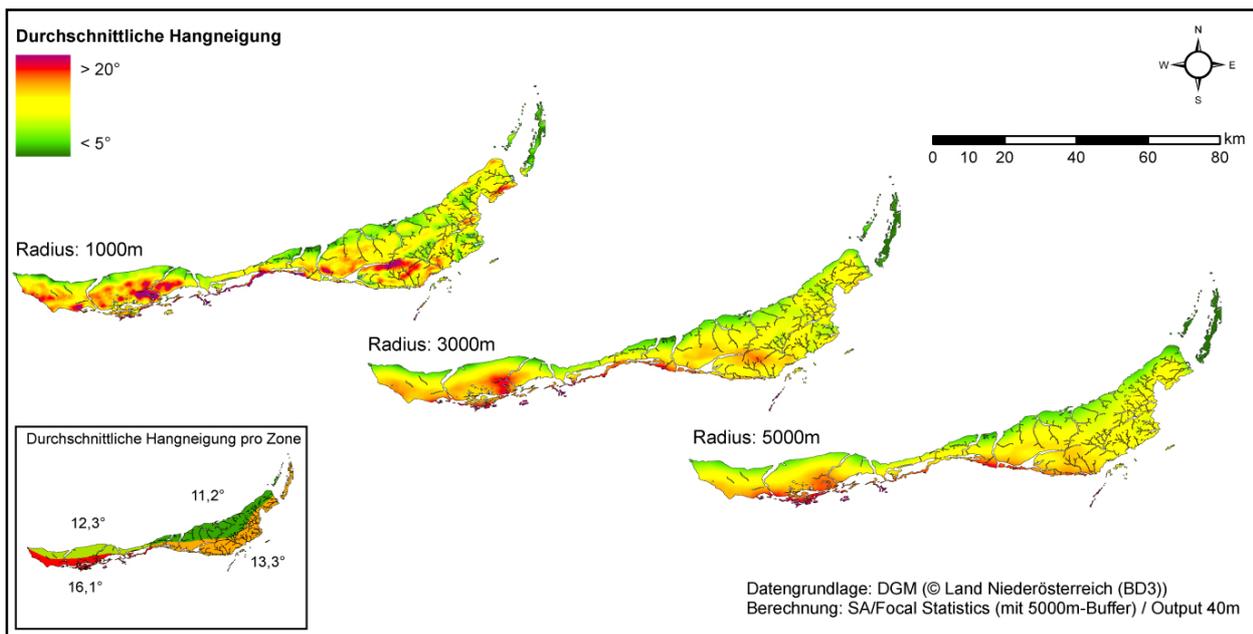


Die kartographische Darstellung der Rutschungsdichte des BGK-Inventares zeigt eine unterschiedliche Anzahl von Schadensmeldungen zwischen dem Westen und Osten. Im Suchradius 5000m und 3000m ist dieser Trend besonders auffallend. Die südöstlich befindlichen Bezirke Waidhofen an der Ybbs, Amstetten, Scheibbs und teilweise auch Melk weisen hohe Rutschungsdichten auf, während der gesamte Bereich östlich davon geringe Rutschungsdichten aufzeigt. Das BGK-Inventar zeigt in der Zone Südwest die höchsten FR-Werte, die Zone Südost hingegen besitzt die geringsten FR-Werte und somit

auch die niedrigste relative Rutschungsfährdungen. Hierbei steht ein sehr hoher FR-Wert von 2,87 in der Zone Südwest einem sehr niedrigen FR-Wert von 0,32 im Südost gegenüber. In der mit 466 km² größten Zone (Südost) sind demnach am wenigsten (76) Schadenmeldungen verortet.

In Abbildung 18 werden die mittleren Hangneigungen im Untersuchungsgebiet dargestellt, wobei ersichtlich wird, dass der Südwesten in allen Suchradien die höchsten Hangneigungen und der Nordosten des Untersuchungsgebietes (Bezirk Korneuburg) die geringsten Hangneigungen aufweist.

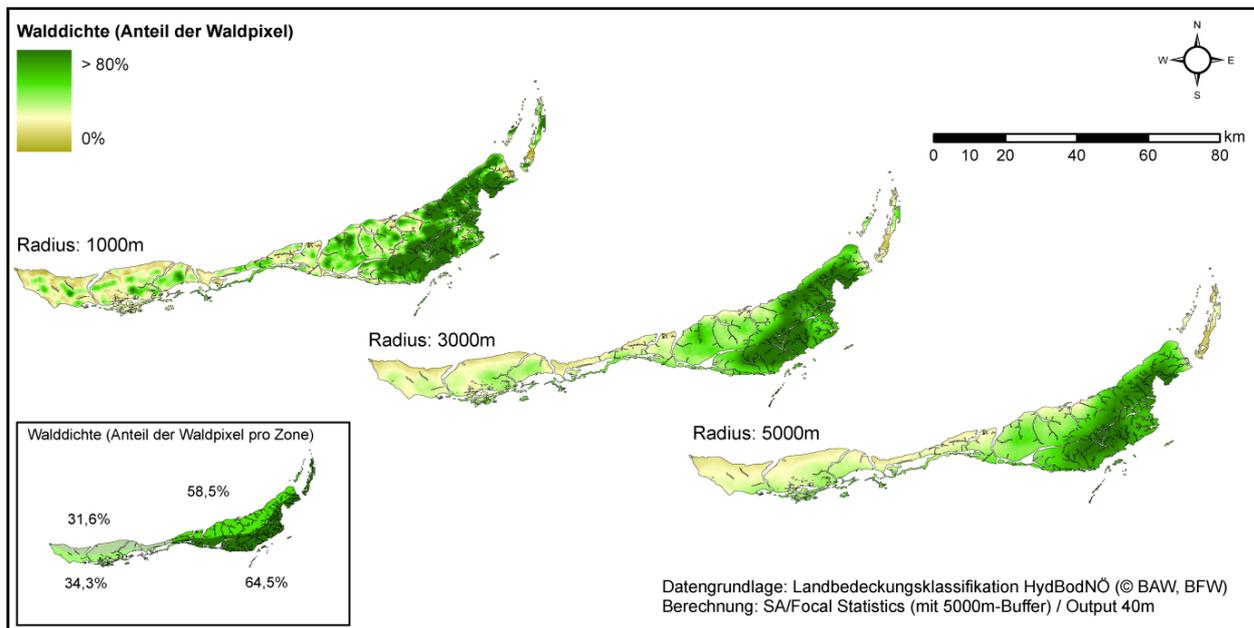
Abbildung 18: Durchschnittliche Hangneigungen im Untersuchungsgebiet



Durch die detailliertere Darstellung im Suchradius 1000m können die Bereiche südlich der Gemeinde Randegg im Bezirk Scheibbs als auch südlich der Gemeinde Brand-Laben im Bezirkes St. Pölten Land als besonders steil erkannt werden. Zudem werden in diesem Suchradius auch die Richtung Donauterrassen steiler abfallenden Bereiche im nördlich liegenden Bezirk Tulln erkennbar. Die Dichtekarten der absoluten Höhen (Anhang A2a) und des mittleren relativen Reliefs (Anhang A2b) zeigen, dass der steilere Süden auch größere absolute Höhen sowie ein größeres relatives Relief aufweist. Der höchste Punkt des Untersuchungsgebietes, der Schöpl mit einer Höhe von 893m, liegt in der Zone Südost an der Bezirksgrenze zwischen Baden und St. Pölten Land. Die Zone Südwest weist im Vergleich zu den anderen Zonen die höchsten gemittelte Höhen(553m), die höchste durchschnittliche Hangneigung (16,1°) und das größte mittlere relative Relief (295m) auf. Die geringsten mittlere absoluten Höhen (392m), die geringsten durchschnittlichen Hangneigungen (11,2°) und das geringste relative Relief (185m) kann in der Zone Nordost beobachtet werden. Mit Ausnahme des Bezirkes Tulln kann somit der steilere und höher liegende Süden bzw. Südwesten vom flacheren niedrigeren Norden bzw. Nordosten unterschieden werden.

Die in vielen Fällen für die Hangstabilität förderliche Waldbedeckung (vgl. Kapitel 2.2; Götzing, 1943; Schwenk, 1992; Rickli *et al.*, 2002; Kittel *et al.*, 2010), wird anhand der Dichtekarten in Abb. 19 visualisiert.

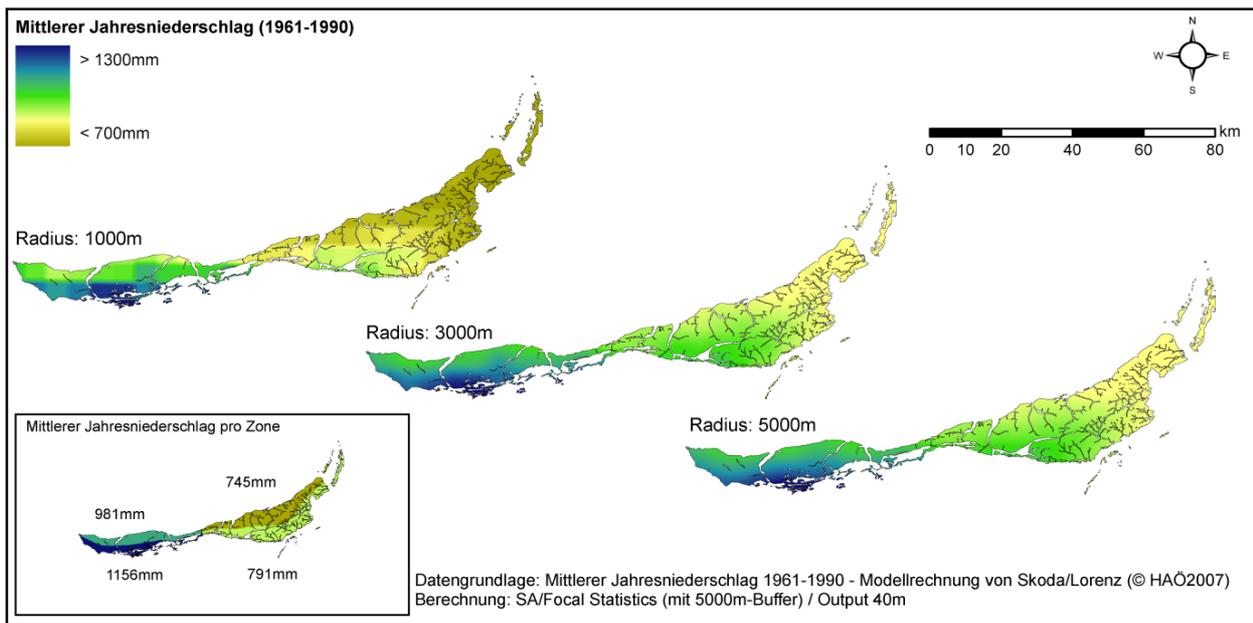
Abbildung 19: Walddichte (Anteil der Waldpixel) im Untersuchungsgebiet



Die Unterschiede zwischen dem walddichten Osten und dem geringer bewaldeten Westen können anhand der Dichtekarten im Suchradius 5000m und 3000m nachvollzogen werden. Die südöstlich befindlichen Gebiete in den Bezirken Mödling, Baden und Wien Umgebung weisen hierbei eine hohe Walddichte auf. Der Anteil der Waldpixel ist in den östlich liegenden Zonen mit über 58% sehr hoch, in den westlichen Zonen fällt dieser Anteil mit knapp über 30% wesentlich geringer aus. Eine differenziertere Darstellung stellt die Walddichte im Suchradius 1000m dar. Hierbei können auch einzelne dichte Waldgebiete im Westen des Untersuchungsgebietes ausgemacht werden.

Die tendenziell höhere fluviatile Zerschneidung im Osten des Untersuchungsgebietes (Wrbka *et al.*, 2005; Damm und Terhorst, 2010) kann anhand der Flussdichtekarten (Anhang A3b) nachvollzogen werden, wobei im Suchradius von 1000m auch in Teilen des Westens eine erhöhte Flussdichte ersichtlich wird. Die Analyse der Verbauungsdichte zeigt (Anhang A3a), dass die Bereiche mit der höchsten Bevölkerungsdichte im Osten des Untersuchungsgebietes (vgl. Kap.4.1) wie erwartet auch die höchste Verbauungsdichte aufweisen. Hierbei werden auch die dichter besiedelten Talbereiche durch erhöhte Verbauungsdichten sichtbar.

Die Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet wird sowohl anhand von Dichtekarten der mittleren Jahresniederschläge von 1961-1990 (Abb.20) als auch anhand von Dichtekarten der konvektiven Starkniederschläge (Anhang A4) dargestellt.

Abbildung 20: Dichtekarten: mittlere Jahresniederschläge (1961-1990)

Generell kann eine Abnahme der mittleren Jahresniederschläge vom höher gelegenen Südwesten zum niedriger gelegenen pannonisch geprägten Nordosten beobachtet werden (Abb. 20). Die in Kapitel 4.4 beschriebene Stauzone mit hohen Jahresniederschlagssummen am Nordrand der Kalkalpen (Nagl, 1983; Hitz und Birsak, 2004) wird im Südwesten des Untersuchungsgebiets durch hohe Niederschlagswerte gut ersichtlich. In den südlichsten Lagen des Untersuchungsgebietes können mittlere Jahresniederschläge von über 1300mm, im Nordosten lediglich Werte unter 700mm verzeichnet werden. Die Darstellung im Suchradius von 1000m macht die geringe räumliche Auflösung der flächenhaften Daten von 3Bogenminuten x 5Bogenminuten sichtbar. Die Daten zu den konvektiven Starkniederschlägen für die Dauerstufen 15, 60 und 180 Minuten für Jährlichkeiten von 2, 10, 50 und 100 Jahren basieren auf dem orographisch konvektiven Verstärkungsindex (OKV) (vgl. Kapitel 3.4). Daher ist das grundsätzliche räumliche Muster der verschiedenen Wiederkehrintervallen und Dauerstufen sehr ähnlich, die Niederschlagshöhen unterscheiden sich jedoch beträchtlich. Wie die dargestellte Dichtekarte der mittleren Starkniederschläge in Anhang A4 zeigt, besteht eine hohe räumliche Ähnlichkeit des Verteilungsmusters mit dem räumlichen Verteilungsmuster der mittleren Jahresniederschläge. Da die räumliche Verteilung der Gewitterhäufigkeit in komplexer Weise mit den topographischen Gegebenheiten zusammenhängt, sind die Starkniederschlagswerte in den topographisch höher gelegenen Bereichen des Westens und Südens höher als im flacheren Osten bzw. Nordosten (Skoda *et al.*, 2007).

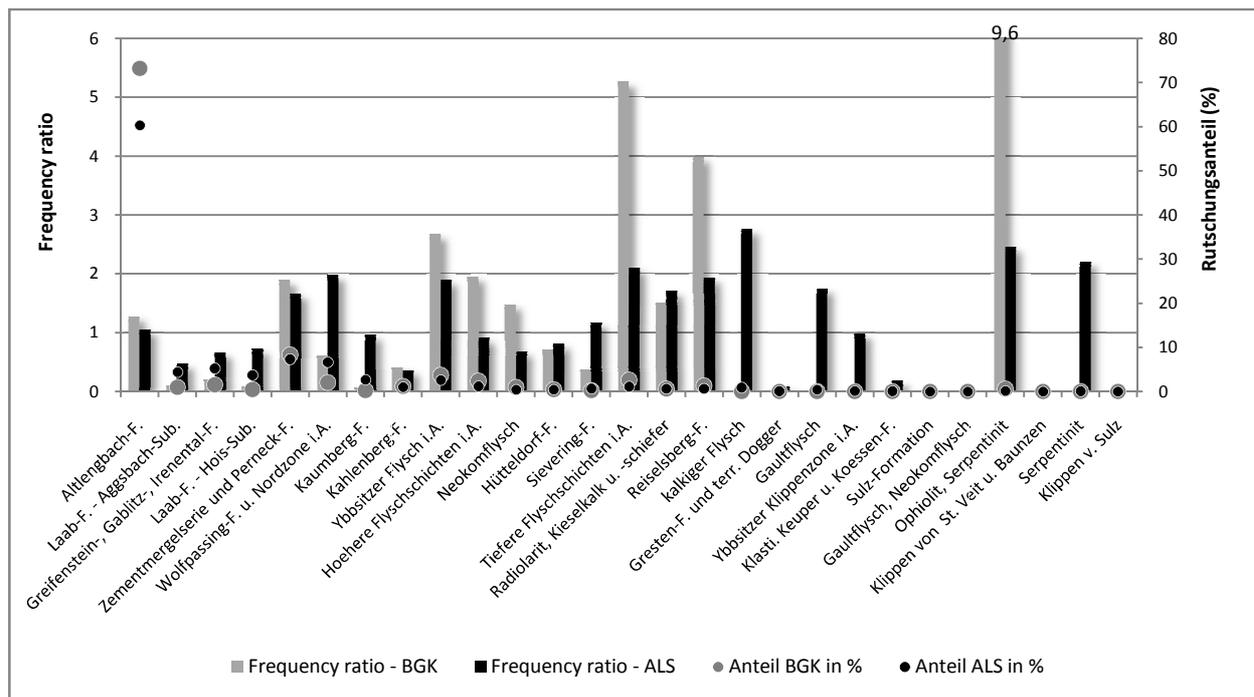
6.1.2 Ergebnisse Zonale Statistiken - frequency ratio (FR)

Anhand der Zonalen Statistiken kann die relative Rutschungsgefährdung einer Klasse (z.B. Hangneigungsklasse, Landbedeckungsklasse) aufgezeigt werden. Die nachfolgenden Diagramme stellen

die FR-Werte und die Rutschungsanteile ausgewählter Variablen getrennt für die beiden Inventare dar. Die Flächenanteile der einzelnen Klassen können anhand der Histogramme in Anhang A5 nachvollzogen werden.

Die Abbildung 21 stellt die relativen Gefährdungswerte (FR) der einzelnen geologischen Formationen im Untersuchungsgebiet dar, deren Lage in Abbildung 8 nachvollzogen werden kann. Die Anordnung der Formationen im Diagramm erfolgt von links nach rechts abnehmend nach deren Flächenanteil.

Abbildung 21: FR-Diagramm: geologische Formationen



Die Altenbachformation stellt mit einem Flächenanteil von 57,7% die größte Formation im Untersuchungsgebiet dar. In dieser Formation befinden sich 60,3% der ALS-Rutschungsrisse und 73,2% der BGK-Rutschungen, der FR-Wert liegt beim ALS-Inventar bei 1,05, beim BGK-Inventar bei 1,27. Die relative Gefährdung in dieser Formation kann somit als durchschnittlich bzw. leicht überdurchschnittlich (Grenzwert = 1) beschrieben werden. Die Aggsbach- (Flächenanteil 9,4%) und Hoisformationen (Flächenanteil 5,1%) bilden die Subformationen der Laabformation. Zusammen mit der Kaumbergformation (Flächenanteil 2,8%) bilden sie die südöstlich des Untersuchungsgebietes gelegene Laaber Decke. Wie man aus den FR-Werten ableiten kann, weisen diese Formationen für beide Inventare unterdurchschnittliche relative Gefährdungen auf. Der FR-Wert der Kaumbergformation des ALS-Inventares beträgt demnach 0,95, jener des BGK Inventars sehr geringe 0,07. Insgesamt befinden sich in der Laaber-Decke 10,7% aller ALS-Rutschungsrisse und nur 3% der BGK-Rutschungen. Die östlich gelegene Greifenstein- Gablitz- Irenentalformationen (Flächenanteil 7,8%) sowie die nördlich von Wien liegende Kahlenbergformation (Flächenanteil 2,8%) weisen für beide Inventare ebenfalls unterdurchschnittliche relative Gefährdungen auf. Als eindeutig überdurchschnittlich gefährdet konnten

für beide Inventaren die Bereiche der Zementmergelerde und Perneckformation (Flächenanteil 4,4%) sowie der Ybbsitzer Flysch im Allgemeinen (Flächenanteil 1,4%) identifiziert werden. Die im Westen der Flyschhauptdecke befindliche Zementmergelerde und Perneckformation weist FR-Werte von 1,66 für das ALS-Inventar und 1,89 für das BGK-Inventar auf. Der zur Ybbsitzer und Sulz/Mauer Klippenzone gehörende und südlich liegende Ybbsitzer Flysch ist ebenfalls durch hohe FR-Werte für das ALS-Inventar (1,89), als auch für das BGK-Inventar (2,67) gekennzeichnet. Die größten Unterschiede in der relativen Gefährdung zwischen den Inventaren kann in der tektonischen Einheit der nördlichen Randzone beobachtet werden. Die größte Formation dieser tektonischen Einheit stellt im Untersuchungsgebiet die Wolfpassing Formation sowie die Nordzone im Allgemeinen (Flächenanteil 3,4%) dar. Einer hohen relativen Gefährdung (1,97) beim ALS-Inventar steht hierbei eine geringe relative Gefährdung (0,6) beim BGK-Inventar gegenüber. 6,6% aller ALS-Rutschungsanrisse und 2% aller BGK-Rutschungen befinden sich in dieser Formation. Die zur Flyschhauptdecke gehörige Formation der höheren Flyschschichten (Flächenanteil 1,2%) zeigt im Falle des ALS-Inventares eine knapp unterdurchschnittliche Gefährdung (FR: 0,9) und im Falle des BGK-Inventares eine hohe relative Gefährdung (FR: 1,95). Alle weiteren Formationen besitzen einen Flächenanteil von unter 0,7% und sind daher nur beschränkt interpretierbar. Als Beispiel sei hier die im Falle des BGK mit einer sehr hohen relativen Gefährdung (FR: 9,6) gekennzeichnete Formation „Ophiolit, Serpentin“ erwähnt, welche jedoch nur drei BGK-Rutschungen aufweist.

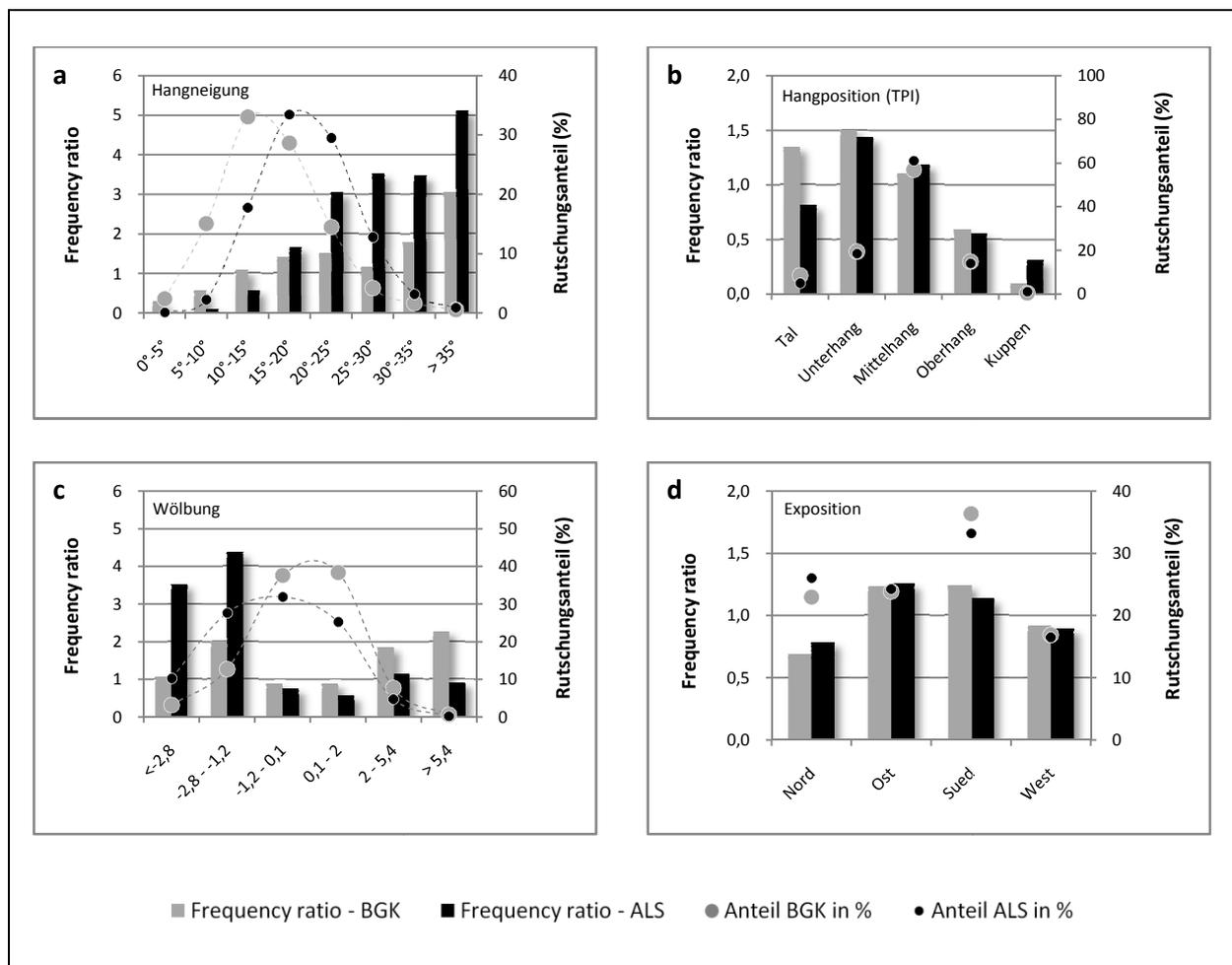
Die FR-Werte der tektonischen Einheiten, werden in Anhang A6/1 dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die Flysch Hauptdecke und Greifensteiner Decke als durchschnittlich bzw. leicht überdurchschnittlich gefährdet charakterisiert werden können. Die südöstlich liegende Laaber Decke, sowie die östlich gelegene Kahlenberger Decke und Klippenzone von St. Veit weisen für beide Inventare unterdurchschnittliche Gefährdungen auf. Als eindeutig überdurchschnittlich gefährdet kann die südlich gelegene Klippenzone von Ybbs, Sulz und Mauer ausgewiesen werden. Die nördliche Randzone zeigt beim ALS-Inventares eine hohe (FR: 2,03), im Falle des BGK-Inventares eine niedrige (FR: 0,55) relative Gefährdung.

Die Darstellung der relativen Gefährdung in Abhängigkeit zur Entfernung von tektonischen Störungen als auch von geologischen Übergängen konnte keinen eindeutigen Trend sichtbar machen (Anhang A6/2-3). Große Unterschiede in der relativen Gefährdung konnten zwischen den einzelnen Substratklassen beobachtet werden (Anhang A6/4). Der visuelle Vergleich der Variable „Substratklassen“ mit der Variable „geologischen Formationen“ ergab eine hohe räumliche Übereinstimmung. Die flächenmäßig größte Substratklasse 1 (Flächenanteil 64,5%), stimmt etwa räumlich größtenteils mit der Altlenzbachformation überein und weist somit wie diese durchschnittliche bzw. leicht überdurchschnittliche relative Gefährdungen auf. Die Substratklasse 5 (Flächenanteil 16,8%), welche räumlich Teile der Laaber-Decke sowie der nördlichen Randzone beinhaltet, weist im Falle des ALS-

Inventares eine durchschnittliche, im Falle des BGK-Inventares eine unterdurchschnittliche Gefährdung auf.

Die Abbildung 22 stellt die relative Gefährdung der aus dem hochauflösenden DGM abgeleiteten Derivate dar. Hierbei kann erkannt werden, dass ein starker Zusammenhang zwischen der Hangneigung und den verorteten Rutschungen besteht, wobei die relative Gefährdung mit zunehmender Hangneigung bei beiden Inventaren ansteigt (Abb.22a). Die FR-Werte des ALS-Inventares zeigen bis zur Hangneigungsklasse 10°-15° eine unterdurchschnittliche relative Gefährdung. Ab der Hangneigungsklasse 20°-25° treten hohe relative Gefährdungen (FR > 3) auf, welche bis zur höchsten Hangneigungsklasse stetig zunehmen. Die FR-Werte des BGK-Inventares zeigen überdurchschnittliche relative Gefährdungen bereits ab einer Hangneigung von 10°-15° an, wobei die stetige Zunahme der FR-Werte in den hohen Hangneigungsklassen geringer ausfällt als beim ALS Inventar. Die Darstellung der FR-Werte der Hangposition (TPI) zeigt eine unterdurchschnittliche relative Gefährdung in Kuppen- und Oberhangbereichen, während eine überdurchschnittliche Gefährdung bei Unterhängen festgestellt werden kann.

Abbildung 22: FR-Diagramme: a) Hangneigung, b) Hangposition (TPI), c) Wölbung, d) Exposition



In den Talbereichen weisen die FR-Werte des BGK-Inventares auf eine überdurchschnittliche Gefährdung (FR: 1,4), die FR-Werte des ALS-Inventares hingegen auf eine unterdurchschnittliche Gefährdung (FR: 0,8) hin (Abb.22b). Die FR-Werte der Wölbung weisen im Falle des BGK-Inventares keinen klaren Zusammenhang zwischen dem räumlichen Rutschungsaufreten und den Wölbungsparametern auf, während die konkaven Wölbungen beim ALS-Inventar (negative Werte der Wölbung) auf hohen relative Gefährdungen ($FR > 3$) hinweisen (Abb.22c). Schließlich zeigt die Auswertung der FR-Werte zur Exposition, dass die tendenziell höher gefährdeten Ost- und Südhänge, den niedriger gefährdeten Nord- und Westhängen gegenüberstehen (Abb.22d).

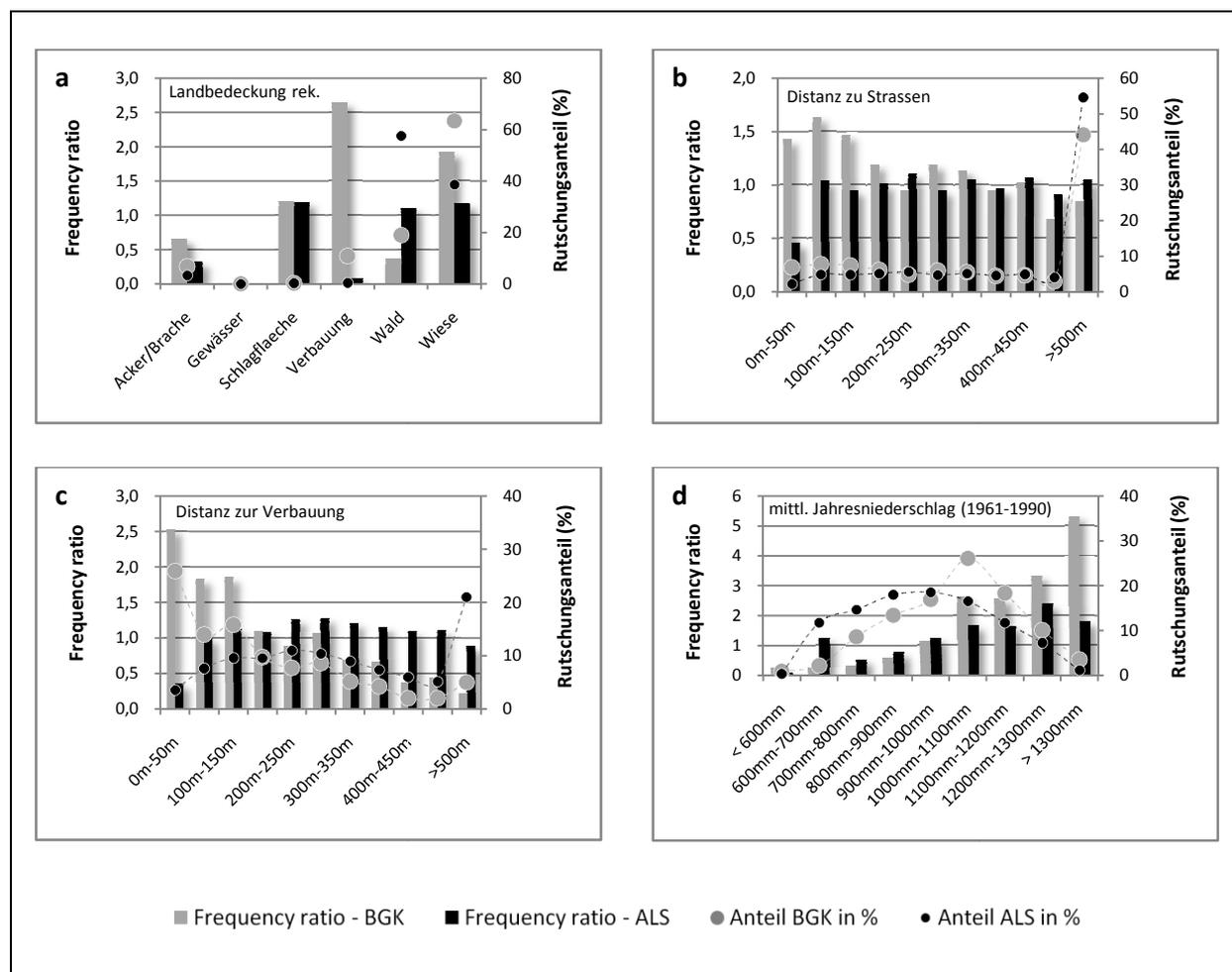
Der Vergleich der relativen Gefährdungswerte der reklassifizierten Landbedeckungseinheiten weist auf erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Rutschungsinventaren hin (Abb. 23a). Im Allgemeinen zeigen die FR-Werte bei vorhandener Waldbedeckung eine leicht überdurchschnittliche Gefährdung im ALS-Inventar (FR: 1,1) und eine unterdurchschnittliche relative Gefährdung im BGK-Inventar (FR: 0,4). Hierbei befinden sich 57,6% der ALS-Rutschungen bzw. nur 18,9% der BGK-Rutschungen in bewaldeten Bereichen. Als unterdurchschnittlich gefährdet werden bei beiden Inventaren die Acker- und Brachflächen ausgewiesen. Die FR-Werte der Wiesen- und Weideflächen zeigen beim BGK-Inventar eine hohe relative Gefährdung (FR: 1,92), beim ALS-Inventar eine leicht überdurchschnittliche relative Gefährdung (FR: 1,17). Die größten Unterschiede zwischen den Inventaren können bei Betrachtung der Klasse Verbauung verzeichnet werden. Einer sehr hohen relativen Gefährdung von 2,64 (BGK-Inventar), steht eine sehr niedrige relative Gefährdung von 0,07 (ALS-Inventar) gegenüber. Die FR-Werte der (nicht reklassifizierten) Landbedeckungseinheiten werden im Anhang A6/5 dargestellt.

Die Analyse der FR-Werte der Variablen „Distanz zu Straßen“ (Abb. 23b) und „Distanz zu Verbauung“ (Abb. 23c) zeigen ebenfalls gegensätzliche Beziehungen zwischen den beiden Inventaren. Das BGK-Inventar weist hierbei auf eine erhöhte Gefährdung in der Nähe von Verbauungen und Straßen hin. Je weiter man sich von Verbauungen entfernt, desto geringer wird die relative Rutschungsgefährdung. Ab einer Distanz von 300m können eindeutig unterdurchschnittliche relative Gefährdungen erkannt werden. Das ALS-Inventar weist in der Nähe von Verbauungen und Straßen eine gegensätzliche Tendenz auf, sodass in der Entfernungsklasse 0-50m für beide Variablen niedrige FR-Werte ($< 0,5$) ausgewiesen werden.

Die FR-Werte zu den mittleren Jahresniederschlägen (1961-1990) zeigen für beide Inventare eine tendenziell höhere Gefährdung bei steigenden mittleren Jahresniederschlagswerten. Ab einer mittleren Jahresniederschlagshöhe von 900mm kann eine überdurchschnittliche relative Gefährdung beobachtet werden. Dieser Trend wird besonders bei Betrachtung des BGK-Inventares ersichtlich. In den Bereichen mit mittleren Jahresniederschlägen über 1200mm werden hierbei FR-Werte von über 3 erreicht. In den Bereichen unter 900mm Jahresniederschlag werden im Falle des BGK-Inventares durchwegs

unterdurchschnittliche Gefährdungen errechnet, im Falle des ALS-Inventares wird die Niederschlagsklasse 600mm-700mm als leicht überdurchschnittlich gefährdet ausgewiesen (Abb. 23d). Wie die FR-Diagramme zu den konvektiven Starkniederschlägen zeigen (Beispiel in Anhang A6/8), kann auch ein tendenzieller Anstieg der relativen Rutschungsgefährdung mit steigenden Starkniederschlagswerten verzeichnet werden.

Abbildung 23: FR-Diagramme: a) Landbedeckung reklassifiziert, b) Distanz zu Straßen, c) Distanz zur Verbauung, d) mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990)



6.1.3 Ergebnisse Korrelationskoeffizienten nach Spearman

Die erhöhten Abhängigkeiten ($>|0,3|$) zwischen den erklärenden Variablen (vgl. Anhang A5) wurden mithilfe des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman errechnet und werden in Anhang A7 dargestellt. Grundsätzlich scheinen erhöhte Korrelationen zwischen jenen Variablen auf, welche sich auf ähnliche Themengebiete (z.B. DGM-Derivate oder Landbedeckungsvariablen) beziehen. So korrelieren die FR-Werte der geologischen Formationen mit den FR-Werten der tektonischen Einheiten bzw. das relative Relief mit der Hangneigung. Für beide Inventare konnten zudem hohe Abhängigkeiten zwischen dem mittleren Jahresniederschlag, dem relativen Relief und der absoluten Höhe erkannt werden. Die

FR-Werte zur Hangposition (TPI), welche auch die Talbereiche ausweisen, korrelieren mit der Variable „Distanz zu Flüssen“. Die Variablen Wölbung und Exposition sind jene Variablen, welche mit keiner anderen Variable stärker korrelieren.

6.1.4 Ergebnisse BGK-Genauigkeit und geomorphologische Güte der Inventare

Die visuelle Überprüfung der BGK-Rutschungen anhand hochauflösender Orthophotos zeigt, dass ein beträchtlicher Teil der Massenbewegungen direkt auf Straßen und Gebäuden verortet wurde. Eine quantitative Auswertung des Attributes „Verlässlichkeit“, welches jeder BGK-Rutschung eine Angabe zur Lagegenauigkeit zuweist, wird in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: BGK -Genauigkeit im Untersuchungsgebiet (A = abgegriffen von Karte, E = eingemessen, K = keine Angabe, O = im Umkreis von, U = ungenaue Angabe)

Verlässlichkeit	Im Umkreis von/ Maßstab	Anzahl der Punkte	%
A	1:50000	604	88,7%
A	1:10000	2	0,3%
A	„100“ ?	1	0,1%
E (4), K	0m	5	0,7%
O	(Mittelwert 119,9m)	65	9,5%
U	500m	4	0,6%
	Summe	681	100%

Wie die Analyse zeigt, wurden 88,7% aller BGK-Rutschungen im Untersuchungsgebiet von einer kartographischen Darstellung im Maßstab 1:50.000 abgegriffen. 9,5% aller Rutschungen („O“) weisen eine quantitative Angabe zur Lageungenauigkeit in Metern auf. Der Lagefehler liegt bei 63% dieser Rutschungen zwischen 0m-100m, bei 25% zwischen 100m-200m und bei 12% zwischen 200m und 400m. Im Mittel beträgt der Lagefehler der mit „O“ gekennzeichneten Rutschungen bei 119,9m. Bei vier Rutschungen („U“) wurde eine Ungenauigkeit von 500m ermittelt.

Durch Betrachtung der Lagefehler im Pufferbereich von 1000m zur Untersuchungsgebietsgrenze konnten 83 BGK-Rutschungen identifiziert werden, welche eine Angabe zum Lagefehler („O“) beinhalten. Der mittlere Lagefehler („O“) dieser Rutschungen liegt in dieser Pufferzone bei 158m. Hierbei konnten maximale Lagefehler von 700m-800m bzw. 1500m erkannt werden. Insgesamt wurden 268 BGK-Rutschungen identifiziert, welche sich im Abstand von 0m-100m zur Untersuchungsgebietsgrenze befinden. 382 BGK-Rutschungen liegen im Abstand von 0m-200m.

Die geomorphologische Güte des BGK-Inventares wurde anhand der Orthofotos und der hochaufgelösten Schummerungskarte beurteilt und als gering beurteilt. Die geomorphologische Güte des ALS-Inventares kann nach visueller Überprüfung das räumliche Rutschungsauftreten im

Untersuchungsgebiet sehr gut wiedergeben. Da es sich hierbei um ein subjektiv abgeschätztes Gütemaß handelt, werden diese Ergebnisse in der folgenden Diskussion erläutert.

6.1.5 Diskussion der explorativen Datenanalyse

Im vorliegenden Kapitel werden die Erkenntnisse der explorativen Datenanalyse in ihren Zusammenhängen diskutiert. Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse einerseits die hohe Heterogenität des Untersuchungsgebietes auf, andererseits werden die räumlichen Zusammenhänge zwischen den Rutschungsschwerpunkten und den vorbereitenden Faktoren demonstriert. Zudem können Limitationen der zur Verfügung stehenden Daten aufgedeckt und beurteilt werden. Auf Basis dieser Informationen wird in diesem Kapitel eine Vorselektion der erklärenden Variablen durchgeführt. Für die anschließende Gefährdungsmodellierung werden hierbei nur jene Variablen selektiert, welche in der vorliegenden räumlichen Auflösung auch einen Erklärungsbeitrag zur Ausweisung der Rutschungsgefährdung liefern. Werden außerdem hohe Abhängigkeiten zwischen den (angenommenen unabhängigen) erklärenden Variablen erkannt, so wird jeweils nur eine dieser Variablen für die Modellierung verwendet. Zur besseren Übersicht zeigt die Tabelle in Anhang A8 eine Zusammenfassung der selektierten bzw. ausgeschlossenen erklärenden Variablen.

Die geomorphologische Güte der Rutschungsinventare zeigt, dass das aus einer hochaufgelösten Schummerungskarte generierte ALS-Inventar eine wesentlich höhere Lagegenauigkeit und geomorphologische Güte als das BGK-Rutschungsinventar aufweist. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass die Kartiererergebnisse des ALS-Inventares wesentlich vom jeweiligen Bearbeiter abhängig sind und daher die Qualität zwischen den Bezirken unterschiedlich ist. Im Falle des BGK-Inventares, welches die Schadensmeldungen verortet, konnten hohe und sehr unterschiedliche Lageungenauigkeiten beobachtet werden, was auf einen heterogenen Erhebungsstandard dieses Inventares hinweist. Die im Vergleich zum ALS-Inventar wesentlich geringere Rutschungsdichte des BGK-Rutschungsinventars zeigt, dass die Zahl der tatsächlichen Rutschungen nicht durch die Anzahl der Schadensmeldungen des BGK's ableitet werden kann (vgl. Petschko et al., 2011). Neben den Unterschieden in der Lagegenauigkeit unterscheiden sich die Rutschungsinventare auch bezüglich ihres räumlichen Verteilungsmusters, was anhand der Dichtekarten der Inventare nachvollzogen werden kann (Abb. 16; Abb.17).

Die FR-Gefährdungswerte der geologischen Formationen sowie die Dichtekarten beider Inventare zeigen, dass die einzelnen geologischen Einheiten der rhenodanubischen Flyschzone unterschiedliche relative Rutschungsgefährdungen aufweisen. Die möglichen Aussagen zur Rutschungsanfälligkeit der einzelnen geologischen Formationen unterscheiden sich dabei je nach Rutschungsinventar deutlich. Hierbei ist die Aussagekraft der Ergebnisse in den flächenmäßig kleinsten Formationen aufgrund der geringen Anzahl der dort verorteten Rutschungen eingeschränkt. Da die geologischen Vorbedingungen die Hanginstabilität im Untersuchungsgebiet wesentlich beeinflussen (vgl. Kapitel 2.2 und Kapitel 4.2),

wird die Variable „geologische Formationen“ als Inputparameter für die anschließende Gefährdungsmodellierung selektiert. Der Vergleich der Dichtekarten der mittleren Hangneigungen mit den Dichtekarten der beiden Rutschungsinventare zeigt, dass Bereiche mit hohen Hangneigungen besonders beim ALS-Inventar auch eine hohe Rutschungsdichte aufweisen. Aufgrund der geringen Flächenanteile in den hohen Hangneigungsklassen ist der Rutschungsanteil beider Inventare in den mittleren Hangneigungsklassen am größten. Die Analyse der FR-Gefährdungswerte zeigt, dass die höchste relative Gefährdung in den höchsten Hangneigungsbereichen ausgewiesen wird. Der Zusammenhang zwischen der Hangneigung und den BGK-Rutschungen erreicht jedoch nicht die Stärke des ALS-Inventars, was auf die hohen Lageungenauigkeiten des BGK-Inventares zurückgeführt werden kann. Beispielsweise können in den steilen und rutschungsreichen Bereichen des Ostens (Bezirk Tulln) sehr geringe BGK-Rutschungsdichten und daher niedrige relative Gefährdungswerte beobachtet werden. Die für beide Rutschungsinventare leicht erhöhten relativen Gefährdungen in den südlichen und östlichen Expositionen, sowie die geringen Gefährdungswerte in den Nordexpositionen, lassen differenzierte klimatische Einwirkungen vermuten. Hierbei könnte neben einer höheren Sonneneinstrahlung auch eine unterschiedliche Niederschlagsverteilung eine erhöhte Verwitterungstätigkeit an den Süd- und Ostexpositionen hervorrufen und damit die Gefährdungswerte erklären (vgl. Wilhelmy und Bauer, 2002). Die FR-Gefährdungswerte zur Hangposition zeigen, dass die Mittel- und Unterhänge für beide Inventare besonders rutschgefährdet, die flachen Kuppenbereiche hingegen erwartungsgemäß gering gefährdet sind. Die im Falle des BGK-Inventares ausgewiesene höhere Gefährdung in den Talbereichen lässt sich aus dem Verwendungszweck dieses Inventares (Verortung von Schadensmeldungen) sowie der höheren Verbauungsdichte (vgl. Anhang A3a) in diesen Bereichen ableiten. Sämtliche bis hier angeführten erklärenden Variablen zeigen nachvollziehbare Zusammenhänge zur räumlichen Rutschungsverteilung und werden daher in den Gefährdungsmodellierungen berücksichtigt.

Die Betrachtung der Ergebnisse der Variable „Wölbung“ zeigt, dass die konkav geformten Hangbereiche nur im Falle des ALS-Inventares eine erhöhte relative Gefährdung (vgl. Kartiervorgabe: im konkaven Anrissbereich, Kapitel 3.2.1) aufweisen. Im Falle des BGK-Inventares liefern die Wölbungsparameter aufgrund der hohen Lageungenauigkeiten keinen Erklärungsbeitrag und werden deshalb nicht für die Modellierungen dieses Inventares verwendet.

Aus dem Verständnis des Verwendungszweckes der beiden Inventare (vgl. Kapitel 3.2, ALS: Gefährdungsmodellierung, BGK: Schadensmeldungen) lassen sich die Ergebnisse der Landbedeckung interpretieren. Wie die von Schwenk (1992) durchgeführten Untersuchungen in Niederösterreich zeigen, ereignete sich der Großteil der Rutschungen im Betrachtungszeitraum auf Wiesen und Weideland und nur ein geringer Anteil in bewaldeten Bereichen (Schwenk, 1992). Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen diese Tendenz nur bedingt und zeigen auf, dass die möglichen Aussagen zur relativen

Gefährdung der jeweiligen Landbedeckungseinheit wesentlich vom analysierten Rutschungsinventar abhängen. Eine alleinige Betrachtung der quantitativen Ergebnisse des ALS-Inventares führt zur Widerlegung der Aussagen von Schwenk (1992) und zeigt überdurchschnittliche Rutschungsdichten und FR-Gefährdungswerte in den Waldbereichen. Bell *et al.* (2012) zeigen die enormen Einflüsse des menschlichen Eingriffes auf die geomorphologischen Strukturen von Rutschungen u.a. in Niederösterreich auf. Die Erkennbarkeit bzw. die Persistenzzeiten der geomorphologischen Strukturen von Rutschungen sind demnach von der Größe der Rutschung als auch von der Landnutzung abhängig. Besonders in Nicht-Waldgebieten (z.B. Wiesen/Weiden) wird ein Großteil der Rutschungen durch menschliche Eingriffe (z.B. Planierung) überprägt und ist daher im ALS nicht erkennbar (Bell *et al.*, 2012). Dies wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt, da die geringsten ALS-Gefährdungen auf den verbauten Flächen bzw. in geringen Distanzen (0m-50m) zu Verbauungen und Straßen beobachtet wurden. Da die Kartierung des ALS-Inventares anhand einer hochaufgelösten Schummerungsdarstellung erfolgte (vgl. Kapitel 3.2.1), kann vermutet werden, dass durch den hohen menschliche Eingriff im Untersuchungsgebiet (vgl. Kapitel 3.5) die geomorphologischen Strukturen besonders in den nicht-Waldbereichen überprägt wurden und dies die Kartierung stark beeinflusste. Die Rutschungsanteile sowie die FR-Gefährdungswerte des BGK-Inventares zeigen in Bezug auf die Landbedeckung hingegen eine gegenteilige Tendenz und bestätigen damit die Aussagen von Schwenk (1992). Rutschungen, welche keine wirtschaftlichen Schäden verursachen, werden im BGK-Inventar in der Regel nicht aufgenommen. Daraus erklärt sich das Auftreten der höchsten Rutschungsgefährdungen in der Nähe von Verbauungen und Straßen und bestätigt, dass dieses Inventar die tatsächliche Rutschungsaktivität nicht korrekt wiedergeben kann. In größerer Distanz zu diesen Vermögenswerten werden hingegen die geringsten relativen BGK-Rutschungsgefährdungen ausgewiesen. Somit unterliegen beide Rutschungsinventare bezüglich der Variablen zur Landbedeckung und dem Straßennetz systematischen Fehlern. Sämtliche Landbedeckungsvariablen (Landbedeckung, Waldbedeckung, Distanz zur Verbauung, Distanz zu Straßen) wurden daher aus den Gefährdungsmodellierungen ausgeschlossen. Hierbei wird jedoch ausdrücklich betont, dass sowohl die Landbedeckung als auch Veränderungen der Landnutzung einen entscheidenden Einfluss auf die Rutschungsaktivität im Untersuchungsgebiet haben (vgl. Kapitel 2.2; Göttinger, 1943; Schwenk, 1992; Wessely *et al.*, 2006), jedoch beide Inventare diesen Einfluss nicht korrekt widerspiegeln können.

Die räumliche Verteilung der mittleren Jahresniederschläge und der konvektiven Starkniederschläge zeigen im Untersuchungsgebiet ein ähnliches Verteilungsmuster, wobei der niederschlagsreiche Südwesten vom niederschlagsarmen Nordosten unterschieden werden kann. Die geringe räumliche Auflösung der Niederschlagsdaten beschränkt jedoch deren Anwendbarkeit und Aussagekraft (vgl. Skoda *et al.*, 2007). Die Variable „mittlere Jahresniederschläge“ spiegelt dennoch die grundsätzliche längerfristige Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet wieder, welche durch die damit in

Verbindung stehenden Verwitterungsprozesse einen wesentlichen Einfluss auf die Verwitterungsdecke hat (vgl. Kapitel 2.2; Schwenk, 1992; Wilhelmy und Bauer, 2002). Bereiche mit höheren mittleren Jahresniederschlagssummen weisen tendenziell für beide Inventare auch höhere Rutschungsdichten und relative Gefährdungswerte auf, wobei das BGK-Inventar auf einen wesentlich stärkeren Zusammenhang hinweist. Somit wird wie in Bui *et al.* (2011) die Variable „mittlere Jahresniederschläge“ aufgrund des Einflusses auf die Verwitterungsdecke für die Gefährdungsmodellierungen selektiert (Bui *et al.*, 2011).

Die Ergebnisse der explorativen Datenanalyse zeigen, dass sich die ableitbaren Aussagen zur Rutschungsgefährdung je nach zugrunde liegendem Rutschungsinventar beträchtlich unterscheiden. Wie in Petschko *et al.* (2011) beschrieben, ist die Anwendbarkeit des jeweiligen Inventares für eine Gefährdungsmodellierung von dessen Lagegenauigkeit und der Repräsentativität des zu modellierenden Prozesses abhängig. Die Interpretation der Ergebnisse setzt daher neben dem grundlegenden geomorphologischen Verständnis der Prozesse im Untersuchungsgebiet eine intensive Auseinandersetzung mit den zugrundeliegenden Daten (z.B. Verwendungszweck, räumliche Auflösung, zeitliche Auflösung) voraus. Eine vorbereitende manuelle Datenanalyse kann somit als eine ernstzunehmende Alternative zur rein automatisierten Variablenauswahl für statistische Gefährdungsmodellierungen angesehen werden (Brenning, 2005; Atkinson und Massari, 2011).

6.2 Ergebnisse der Validierung

Die Validierungsergebnisse werden vor dem Kapitel Gefährdungsmodellierung erläutert, da diese die Auswahl der in Kapitel 6.3 dargestellten „besten“ Gefährdungsmodelle begründen. Durch die Verwendung von zwei Modellierungsmethoden für beide Rutschungsinventare wurden vier Gefährdungsmodelle berechnet, welche im folgenden Kapitel validiert werden.

6.2.1 Ergebnisse quantitative Validierung

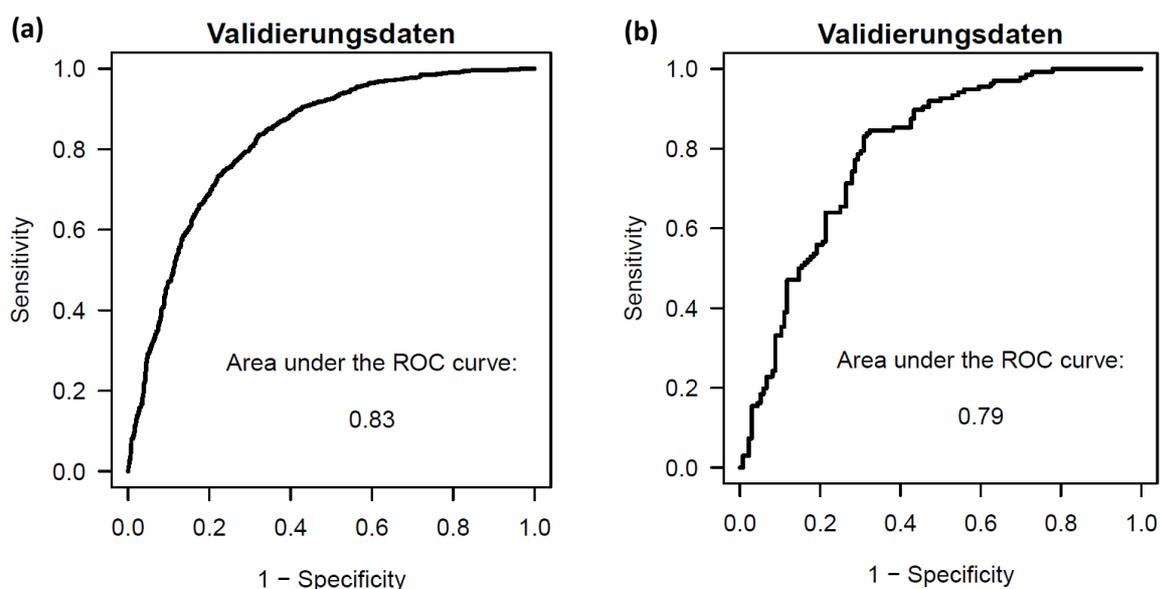
Die quantitativen Validierungsergebnisse werden in diesem Abschnitt für beide Inventare dargestellt. Zudem beinhaltet dieses Kapitel die Ergebnisse der automatisierten Variablenselektion sowie die Signifikanzwerte der einzelnen erklärenden Variablen, welche anhand der Modelldatensätze (vgl. Kapitel 5.1) berechnet wurden. Die im Anschluss dargestellten Gütemaße der Gefährdungsmodelle wurden mithilfe des unabhängigen Validierungsdatensatzes berechnet.

Die Ergebnisse der automatisierten Variablenselektion, welche den AIC-Wert als Selektionskriterium heranzieht, zeigen, dass keine der durch die explorative Datenanalyse vorselektierten stetigen Variablen aus den logistischen Regressionsmodellen ausgeschlossen wurden. Manche der flächenmäßig kleineren Kategorien der vorher faktorierten kategorialen Variablen (geologische Formationen, Hangposition, Exposition) wurden aufgrund einer Erhöhung des AIC-Wertes bei der automatisierten Variablenselektion

vorerst ausgeschlossen. Um die benötigten flächendeckenden Informationen für die kategorialen Variablen zu gewährleisten, wurden jedoch alle Klassen dieser Variablen in die Modellierungen integriert. Die Signifikanzwerte der verwendeten Variablen werden in Anhang B 1 dargestellt, wobei für die definierten Bezugsvariablen der faktorierten kategorialen Variablen (vgl. Tabelle 9) keine Signifikanzen ausgegeben werden, da diese im Interzept beinhaltet sind (Brenning A., mündliche Mitteilung). Alle verwendeten stetigen Variablen weisen hohe Signifikanzen ($< 0,001$) auf. Die Signifikanzwerte der kategorialen Variablen zeigen, dass die einzelnen Kategorien der Variable Exposition und Hangposition beim ALS-Inventar hoch signifikant ($\leq 0,001$), im Falle des BGK-Inventares tendenziell geringer signifikant sind. Die Kategorien der geologischen Formationen weisen für beide Inventare sehr unterschiedliche Signifikanzwerte auf, wobei jene Formationen, welche die meisten Rutschungen des jeweiligen Modelldatensatzes beinhalten, auch höhere Signifikanzwerte zeigen.

In Abbildung 24 werden die von der jeweiligen Klassifizierung der Gefährdungswerte unabhängigen ROC-Kurven für die logistischen Regressionsmodelle dargestellt, wobei die höhere Anzahl der Validierungspunkte beim ALS-Rutschungsinventar durch einen glatteren Kurvenverlauf erkennbar ist (Abb.24a). Der Kurvenverlauf sowie die Fläche unter der ROC-Kurve (AUROC) zeigen, dass die ALS-Modellierung mit einem AUROC-Wert von 0,83 (Modelldatensatz: 0,85) auf eine exzellente Trennung zwischen den gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen nach Hosmer und Lemeshow (2000) hinweist. Der AUROC von 0,79 (Modelldatensatz: 0,81) des BGK-Modelles zeigt, dass dessen „Vorhersagegüte“ als akzeptabel eingestuft werden kann (Hosmer und Lemeshow, 2000).

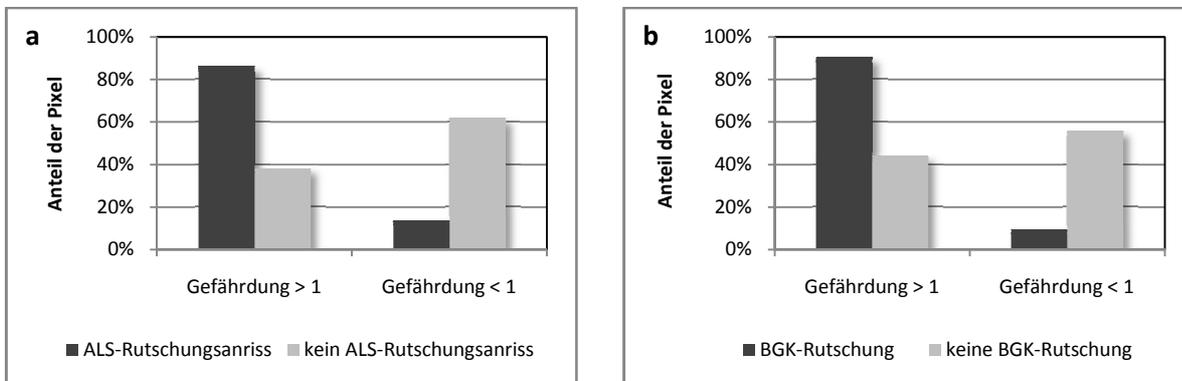
Abbildung 24: ROC-Kurven und AUROC des ALS-Modelles (a) und des BGK-Modelles (b), logistische Regression



Die Güte der bivariaten Gefährdungsmodelle, welche anhand des LSI erstellt wurden, werden anhand der Gütemaße der Confusion Matrix beurteilt (Beguería, 2006). Diese von den jeweiligen Klassengrenzen abhängigen Gütemaße werden in Abbildung 25 für den Grenzwert 1 dargestellt. Dieser

Klassifikationsgrenzwert trennt die überdurchschnittlich gefährdeten Bereiche (>1) von den unterdurchschnittlich gefährdeten Bereichen (<1). Abbildung 25a zeigt hierbei die Validierung des bivariaten ALS-Modelles, Abbildung 25b jene des bivariaten BGK-Modelles dar.

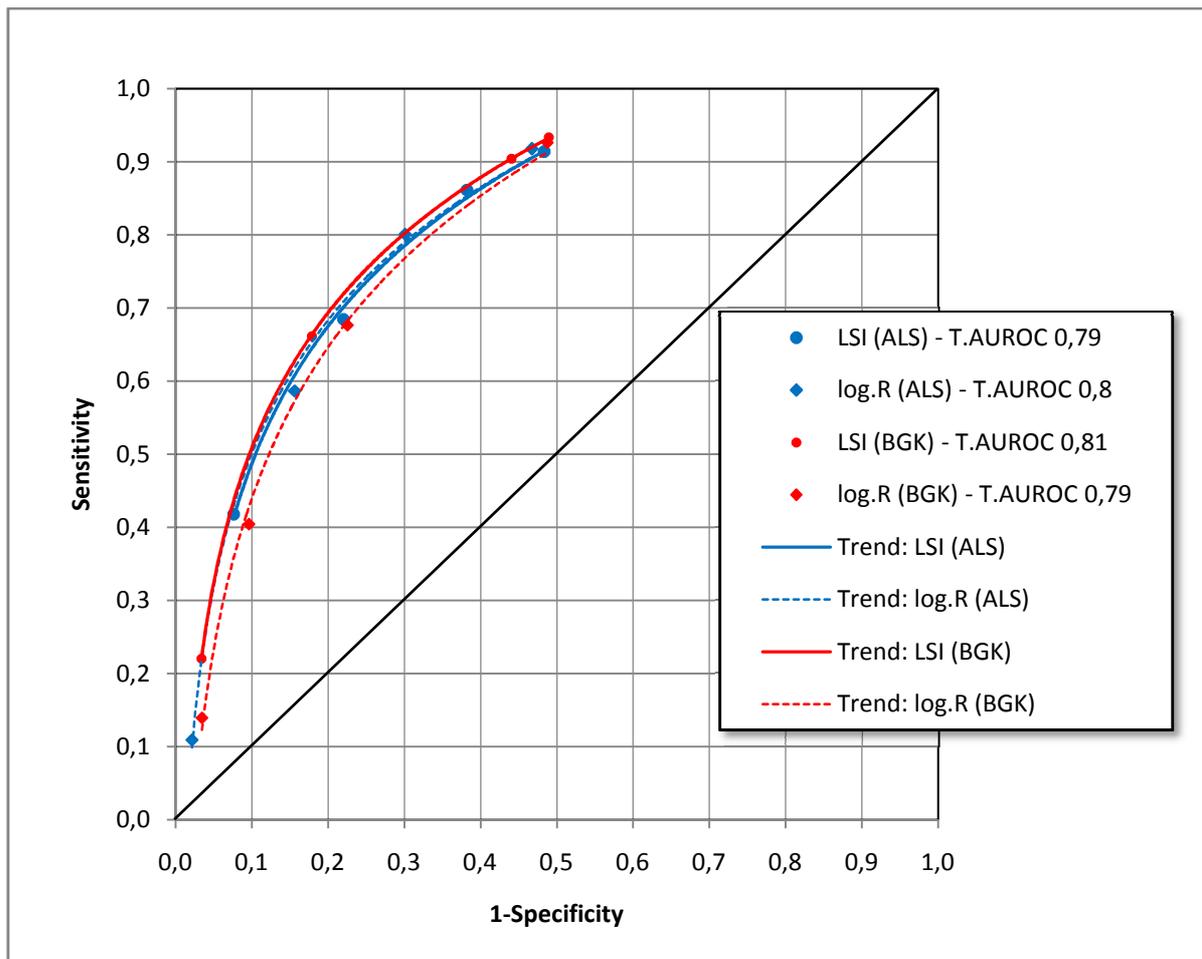
Abbildung 25: Quantitative Validierung für den LSI-Klassifikationsgrenzwert 1; a) ALS-Inventar, b) BGK-Inventar



Die Sensitivität (schwarze Balken, >1) zeigt den Anteil der korrekt klassifizierten von Rutschungen betroffenen Validierungspixel und beträgt für die ALS-Modellierung 86%, sowie 90% für die BGK-Modellierung. Die Spezifität kennzeichnet den Anteil der korrekt klassifizierten nicht von Rutschungen betroffenen Validierungspixel und wird durch die grauen Balken in den unterdurchschnittlich gefährdeten Bereichen (<1) dargestellt. Das ALS-Modell weist eine Spezifität von 62%, das BGK-Modell eine Spezifität von 56% auf. Der Anteil der fehlerhaft klassifizierten Validierungspixel kann anhand des Fehlertyps 1 und Fehlertyps 2 nachvollzogen werden. Der Anteil der Validierungspixel ohne Rutschungen, welche jedoch als überdurchschnittlich gefährdet ausgewiesen werden (Fehlertyp 1), wird durch die die grauen Balken der Gefährdungsklasse > 1 dargestellt. Der Fehlertyp 1 beträgt beim ALS-Modell 38%, beim BGK-Modell 44%. Der Anteil der Rutschungen, welche in den unterdurchschnittlich gefährdeten Bereichen (<1) liegen und somit den Fehlertyp 2 repräsentieren, beträgt für das ALS-Modell 14%, für das BGK-Modell 10%. Der Anteil aller korrekt klassifizierten Beobachtungen ($\text{Sensitivität} + \text{Spezifität} / 2$) wird als Modelleffizienz bezeichnet und beträgt für die ALS-Modellierung 74%, für die BGK-Modellierung 73%. Die Fehlklassifikationsrate beschreibt den Anteil der nicht korrekt klassifizierten Beobachtungen ($\text{Fehlertyp1} + \text{Fehlertyp2} / 2$) und beträgt für den ALS-Inventar 26%, für den BGK-Inventar 27%.

Eine quantitative Vergleichbarkeit aller vier Gefährdungsmodelle wurde durch das Berechnen der Spezifität und Sensitivität für jeweils vier Klassifikationsgrenzwerte pro Modell realisiert (vgl. Kapitel 5.3.1), wodurch ein modifiziertes ROC-Streudiagramm für die Validierungsdatensätze mit 16 Sensitivitäts-/Spezifitätsparen (4 für jedes Modell) erstellt wurde (Abb. 26).

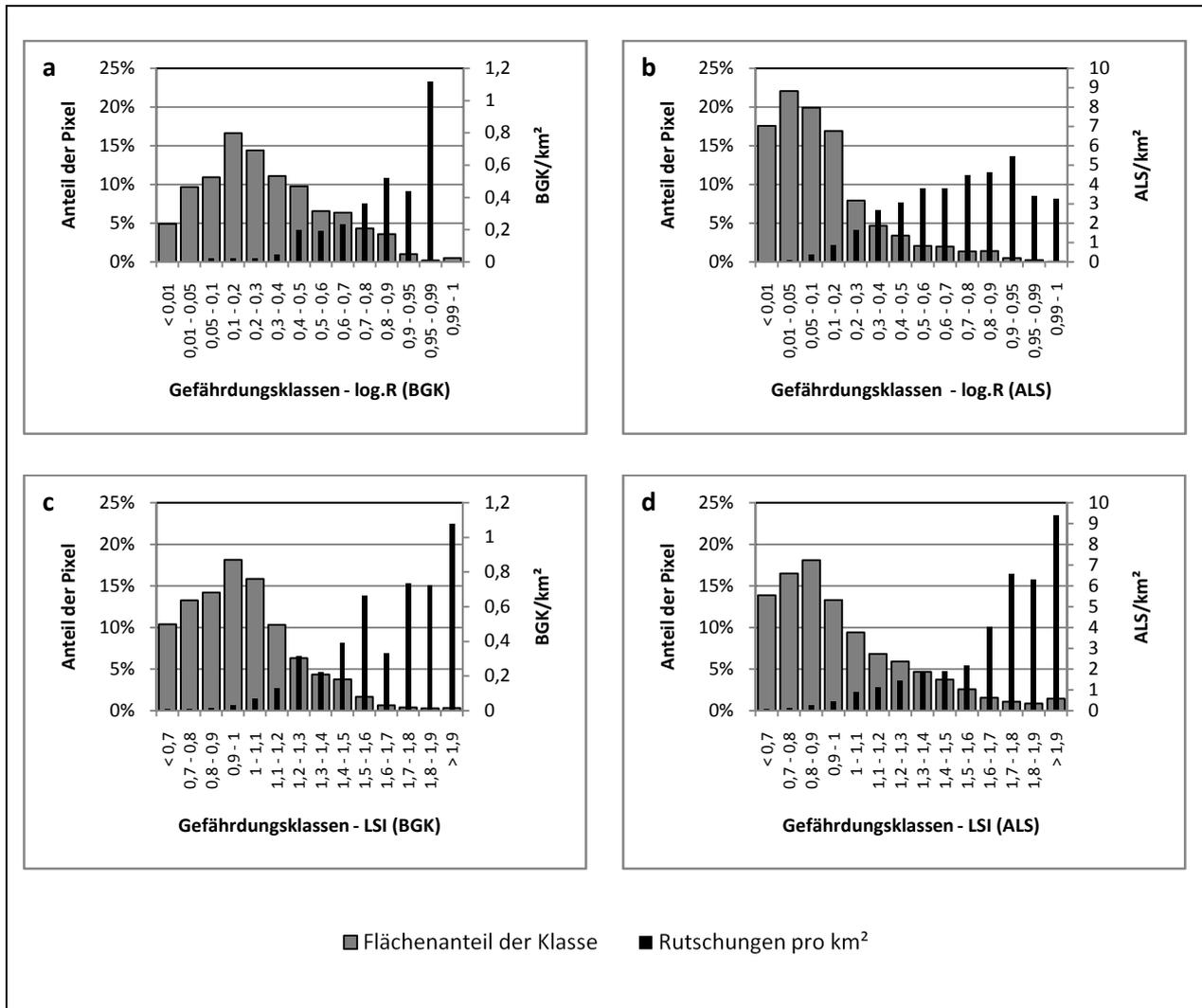
Abbildung 26: modifizierte ROC-Streudiagramme für die finalen vier Modelle



Die durch den logarithmischen Trend abgebildeten ROC-Kurven zeigen für jedes Modell eine deutliche Abweichung von der Diagonale, welche ein Zufallsmodell darstellt. Der ROC-Kurvenverlauf aller vier Modelle unterscheidet sich nur geringfügig und weist daher auf eine gute „Vorhersagefähigkeit“ aller Modelle hin. Die geringste Modellgüte zeigt hierbei das logistische Regressionsmodell des BGK-Inventares, die höchste Modellgüte weist das LSI-Modell des BGK-Inventares auf. Aufgrund der geringen Anzahl von Sensitivitäts-/Spezifitätsparen, dient der Trapezoid-AUROC lediglich als zusätzliche Orientierungshilfe. Dieser liegt bei allen Modellen zwischen 0,79 und 0,81 und bestätigt somit die geringen Unterschiede in der quantitativen Güte der Modelle.

Die Abbildung 27 stellt die in den finalen Gefahrenhinweiskarten verwendeten Klassifikationen, sowie die Flächenanteile und Rutschungsdichten des Validierungsdatensatzes in diesen Klassen dar. Eine hohe quantitative Modellgüte wird im Untersuchungsgebiet dann angenommen, wenn der Flächenanteil in den niedrigen Gefährdungsklassen bei gleichzeitiger hoher Rutschungsdichte in den höchsten Gefährdungsklassen überwiegt. Visualisiert wird dies durch einen linkssteilen Verlauf der Flächenanteile und einer rechtssteilen Verteilung der Rutschungsdichten bei aufsteigenden Gefährdungswerten der x-Achse.

Abbildung 27: Flächenanteil der Gefährdungsklassen und Rutschungsdichte des Validierungsdatensatzes der vier Modelle; a) logistische Regression BGK-Inventar; b) logistische Regression ALS-Inventar, c) LSI BGK-Inventar, d) LSI-ALS-Inventar



6.2.2 Ergebnisse qualitative Validierung

Die qualitative Güte der Gefährdungsmodelle wurde nach geomorphologischen Aspekten beurteilt (vgl. Kapitel 5.3.2). Die Ergebnisse der dadurch abgeschätzten geomorphologischen Güte werden in Tabelle 7 dargestellt und können beispielhaft an den Detailausschnitten der finalen Gefahrenhinweiskarten nachvollzogen werden (Abb. 28 bis Abb.31; Anlage). Wie diese Abschätzung zeigt, ist die geomorphologische Güte der ALS-Modelle höher als jene der BGK-Modelle. Die höchste geomorphologische Güte weist hierbei das logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares auf, welches grundsätzlich die steilsten Bereiche als höchst gefährdet und die flachsten Kuppen- und Talbereiche als gering gefährdet ausweist. Der visuelle Vergleich zwischen den ALS-Modellen zeigt, dass das LSI-Modell eine leicht geringere Differenzierung der Gefährdungswerte zwischen den steilsten und flachsten Hangbereichen ermöglicht. Das LSI-Modell des BGK-Inventares zeigt eine geringe geomorphologische Güte, wobei der gesamte Westen tendenziell zu hoch, der gesamte Osten tendenziell zu gering gefährdet ausgewiesen wurde. Diese Tendenz wird im Falle des logistischen

Regressionsmodelles des BGK-Inventares weiter verstärkt, wobei besonders in den Bezirken Baden und Mödling auch die steilsten Hangbereiche sehr niedrige Gefährdungswerte zeigen und die rutschungsreichen Bereiche des Bezirkes Tulln als ebenfalls gering gefährdet ausgewiesen werden.

Tabelle 7: Geomorphologische Güte der finalen Gefährdungsmodelle

Methode – Inventar	Geomorphologische Güte
Logistische Regression - ALS	hoch
Logistische Regression - BGK	sehr gering
Landslide Susceptibility Index - ALS	mittel
Landslide Suceptibility Index - BGK	gering

6.2.3 Diskussion der Validierung

Die Validierung der Modellierungsergebnisse stellt einen essentiellen Teil der Gefährdungsmodellierungen dar, da dadurch die Endnutzer der Gefahrenhinweiskarten Aufschluss über die Verwendbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse erhalten (Chung und Fabbri, 2003; Brenning, 2005; Beguería, 2006). Wie die quantitativen Validierungsergebnisse dieser Arbeit zeigen, weisen alle generierten Modelle sowohl eine vergleichbare sowie gute Anpassungsfähigkeit an die Daten als auch eine ähnliche jedoch leicht geringere „Vorhersagefähigkeit“ auf. Auf Basis von unabhängigen Validierungsdatensätzen konnten modifizierte ROC-Kurven generiert werden, welche einen Vergleich aller Modelle ermöglichen. Wie die Ergebnisse zeigen, unterscheiden sich die vier Modelle bezüglich der „Vorhersage“ der Validierungs-rutschungen nur geringfügig, wobei das BGK-Modell, welches mithilfe des LSI erstellt wurde, die beste Trennung zwischen den korrekt klassifizierten von Rutschungen betroffenen Flächen und den korrekt klassifizierten nicht von Rutschungen betroffenen Flächen aufweist. Die Validierung der finalen Gefährdungsklassen zeigt, dass bei allen Modellen der Flächenanteil in den geringen Gefährdungsklassen überwiegt und nur ein geringer Flächenanteil als höchst gefährdet ausgewiesen wird. Die gleichzeitig hohe Rutschungsdichte in den höchsten Gefährdungsklassen bei allen Modellen weist somit auf eine gute Differenzierung zwischen den gefährdeten und weniger gefährdeten Bereichen hin.

Wie die Beurteilung der subjektiv abgeschätzten geomorphologischen Güte zeigt, weisen die statistisch ähnlichen Modelle eine stark unterschiedliche qualitative Modellgüte auf. Das in Bezug auf eine Gefährdungsmodellierung qualitativ höherwertige ALS-Inventar, führt hierbei zu räumlich wesentlich selektiveren Modellen. Aus geomorphologischer Perspektive wird die Rutschungsgefährdung anhand der BGK-Modelle nicht angemessen ausgewiesen. Wie diese Ergebnisse zudem zeigen, sind die Unterschiede zwischen den Modellierungsmethoden geringer als zwischen den verwendeten Rutschungsinventaren. Das logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares (Karte in der Anlage) wird

aufgrund der guten quantitativen Validierungsergebnisse und der höchsten geomorphologische Güte als das beste Gefährdungsmodell bestimmt.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass ein qualitativ hochwertiger und lagegenauer Rutschungsinventar die Basis für eine hochwertige Gefährdungsmodellierung darstellt (Petschko *et al.*, 2011). Eine hohe statistische Güte führt jedoch nicht zwangsläufig zu qualitativ hochwertigen Gefährdungsmodellen. Daher sollte die von Bell (2007) geforderte Beurteilung der geomorphologischen Güte von Gefahrenhinweiskarten Bestandteil einer jeden Validierung sein.

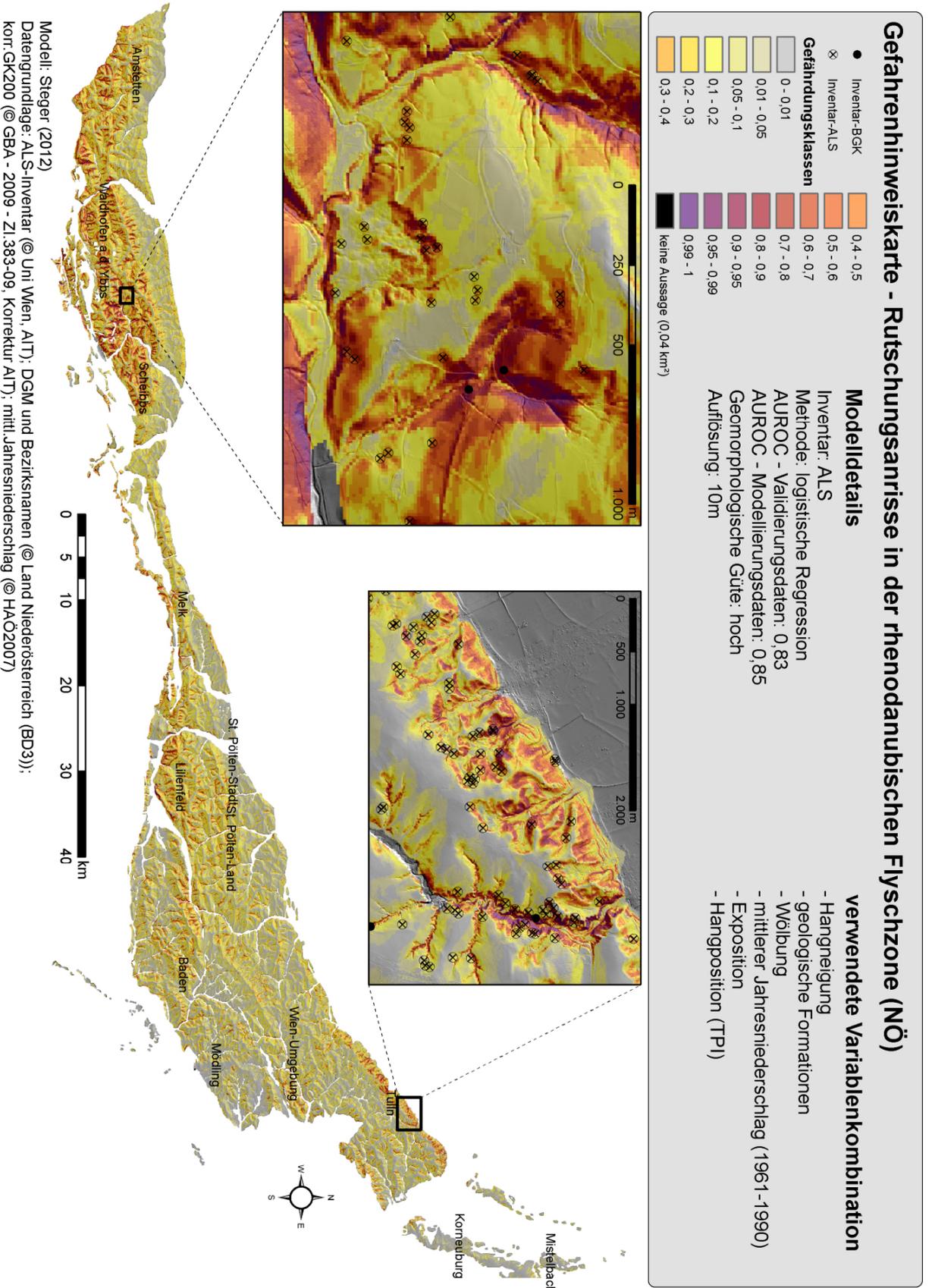
6.3 Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung

Die durch Informationen der explorativen Datenanalysen optimierten Gefährdungsmodelle, deren Güte in Kapitel 6.2 dargestellt wird, werden in diesem Abschnitt beschrieben. Zur Modellierung der Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet wurden für die ALS-Modelle die Parameterkombination Hangneigung, geologische Formationen, Wölbung, Exposition, Hangposition (TPI) sowie der mittlere Jahresniederschlag (1961-1990) verwendet. Die Modelle des BGK-Inventares verwenden mit Ausnahme der Wölbung die identische Kombination von erklärenden Variablen.

6.3.1 Ergebnisse multivariate Modellierung - Logistische Regression

Die Gefährdungsmodelle der logistischen Regression werden anhand von 14 Gefährdungsklassen dargestellt. Die durch die Validierungsergebnisse identifizierte „beste“ Gefahrenhinweiskarte, die logistische Regression des ALS-Inventares, wird in Abbildung 28 und in beiliegender Karte (Anlage) abgebildet.

Abbildung 28: Gefahrenhinweiskarte - logistische Regression, ALS



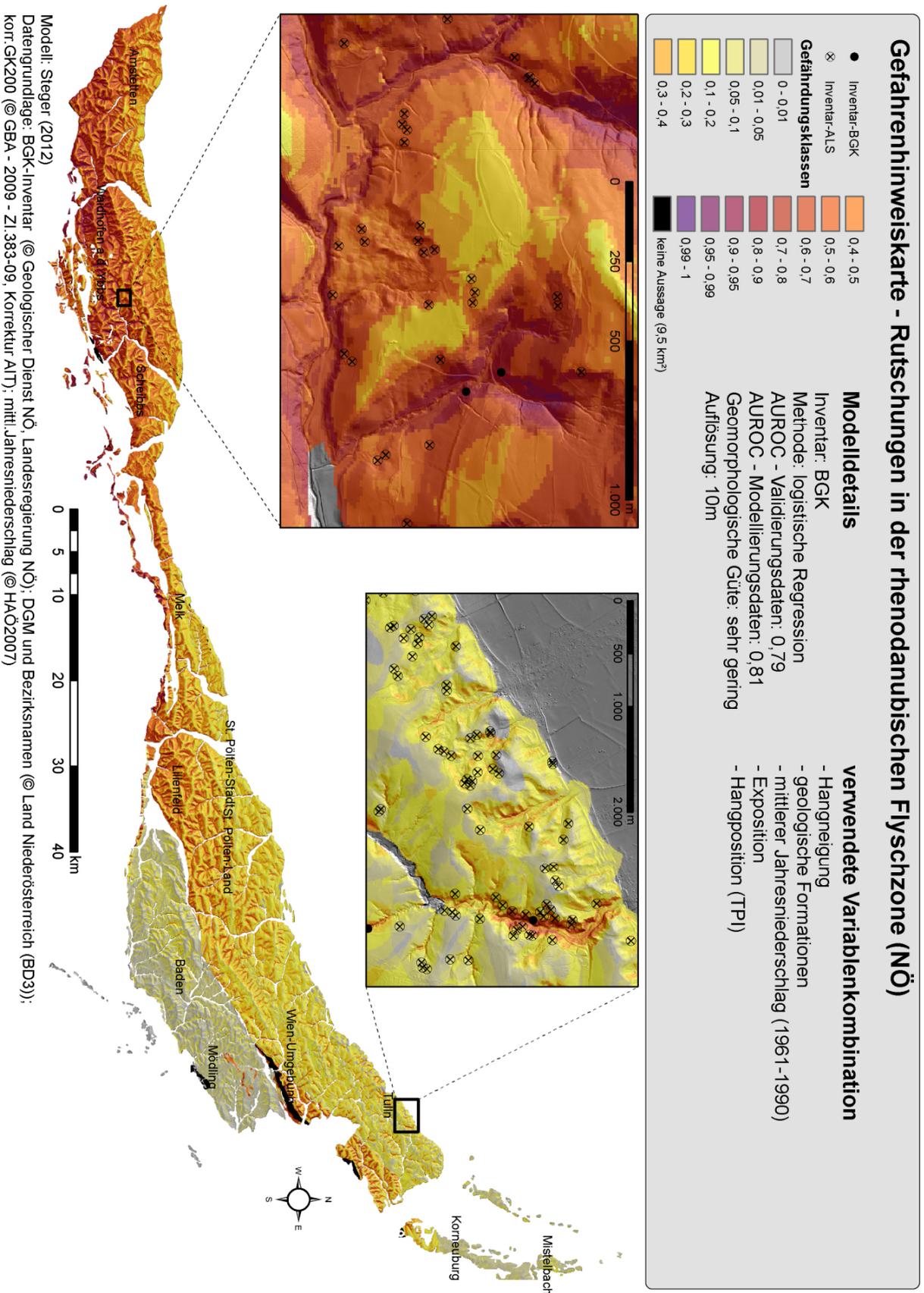
Wie das ALS-Modell zeigt, werden sowohl in den westlich liegenden Bezirken (Amstetten, Waidhofen an der Ybbs, Scheibbs), als auch in den zentral und östlich liegenden Bezirken Lilienfeld und Tulln hoch gefährdete Bereiche ausgewiesen. Die hohe räumliche Differenzierung und die damit einhergehende Abhängigkeit des Modelles von der Hangneigung kann sowohl visuell (Detailausschnitte Abb.28; Anlage) als auch anhand der berechneten standardisierten Beta-Koeffizienten nachvollzogen werden. Die Tabelle 8 zeigt die standardisierten Beta-Koeffizienten, welche neben der Richtung auch die Stärke des Einflusses aller verwendeten stetigen Variablen auf die Ausweisung der Gefährdungswerte angeben (vgl. King, 2012). Von den stetigen Variablen besitzt hierbei die Hangneigung (1,4) den stärksten Einfluss auf die Ausweisung der Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet. Die konkave Wölbung, welche durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet ist, hat für dieses Modell einen stärkeren Einfluss (-0,5) auf die Gefährdungswerte als die Variable mittlerer Jahresniederschlag (0,27). Die Odds Ratio-Werte wurden für die hoch signifikanten kategorialen Variablen berechnet und zeigen, welche Variablenkategorie im Vergleich zur vorher bestimmten Bezugskategorie (Odds Ratio=1) der jeweiligen Variable die Gefährdung erhöht (Werte >1) bzw. herabsetzt (Werte <1). Die Odds Ratio-Werte der geologischen Formationen, für welche als Bezugskategorie die flächenmäßig größte geologische Formation (Altlangbach) definiert wurde, belegen, dass die geologischen Formation kalkiger Flysch (11,7), Gaultflysch (4,2) sowie die Wolfpassingformation (3,3) die gefährdetsten geologischen Formationen dieses Modelles darstellen. Im Vergleich zur Altlangbachformation können alle anderen signifikanten geologischen Formationen als relativ gering rutschungsgefährdet (Werte <1) bezeichnet werden, wobei die niedrigen Odds Ratio-Werte und somit auch die geringe Gefährdung in der Laaber Decke (Mödling und Korneuburg) auf die in Schnabel (2002) beschriebene ruhige Lagerung dieser Formationen zurückgeführt werden kann. Die durch die Odds Ratio-Werte identifizierte leicht erhöhte Gefährdung der Süd- und Osthänge (>1,6) bzw. die geringere Gefährdung der Nordhänge (1) kann visuell kaum nachvollzogen werden. Bezüglich der Variable Hangposition, sind die geringen Gefährdungen der flachen Kuppen- und Talbereiche (0,2) in den Gefahrenhinweiskarten gut erkennbar.

Tabelle 8: Standardisierte Beta-Koeffizienten der stetigen Variablen und Odds Ratio der hochsignifikanten kategorialen Variablen für die finalen Gefährdungsmodelle der logistischen Regression

<u>logistische Regression – ALS</u>		<u>logistische Regression - BGK</u>	
stetige Variable	stand. Beta	stetige Variable	stand. Beta
Hangneigung	1,4	Hangneigung	0,3
m. Jahresniederschlag	0,3	m. Jahresniederschlag	0,9
Wölbung	-0,5	Wölbung nicht modelliert	
kateg. Variable - Geologie	Odds Ratio	kateg. Variable - Geologie	Odds Ratio
Bezugsvariable - Altflengbach (406)	1	Bezugsvariable - Altflengbach (406)	1
Wolfpassing F. (400)	3,3	Greifenstein (404)	0,5
Höhere Flyschschichten (405)	0,3	Zementmergelserie (407)	0,5
Laab Aggsbach (411)	0,6	Laab Aggsbach (411)	0,1
Laab Hois (412)	0,4	Laab Hois (412)	0,1
Kahlenberg (415)	0,5	Kaumberg (413)	0,1
kalkiger Flysch (401)	11,7	Ybbsitzer Flysch (423)	0,2
Neokomflysch (424)	0,3	Radiolarit (425)	0,2
Gaultflysch (417)	4,2		
kateg. Variable - Exposition	Odds Ratio	kateg. Variable - Exposition	Odds Ratio
Bezugsvariable - Nord	1	Bezugsvariable - Nord	1
Ost	1,7	Ost	3,1
Süd	1,6	Süd	2
West	1,3	West	1,7
kateg. Variable - Hangposition	Odds Ratio	kateg. Variable - Hangposition	Odds Ratio
Bezugsvariable - Mittelhang	1	Bezugsvariable - Mittelhang	1
Kuppen	0,2	Kuppen	0,2
Oberhang	0,5	Oberhang	0,4
Tal	0,2	Tal	0,6
Unterhang	0,8		

Die Gefahrenhinweiskarte des BGK-Inventares, welche anhand der logistischen Regression erstellt wurde und die geringste geomorphologische Güte aller Modelle aufweist, wird in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29: Gefahrenhinweiskarte - logistische Regression, BGK



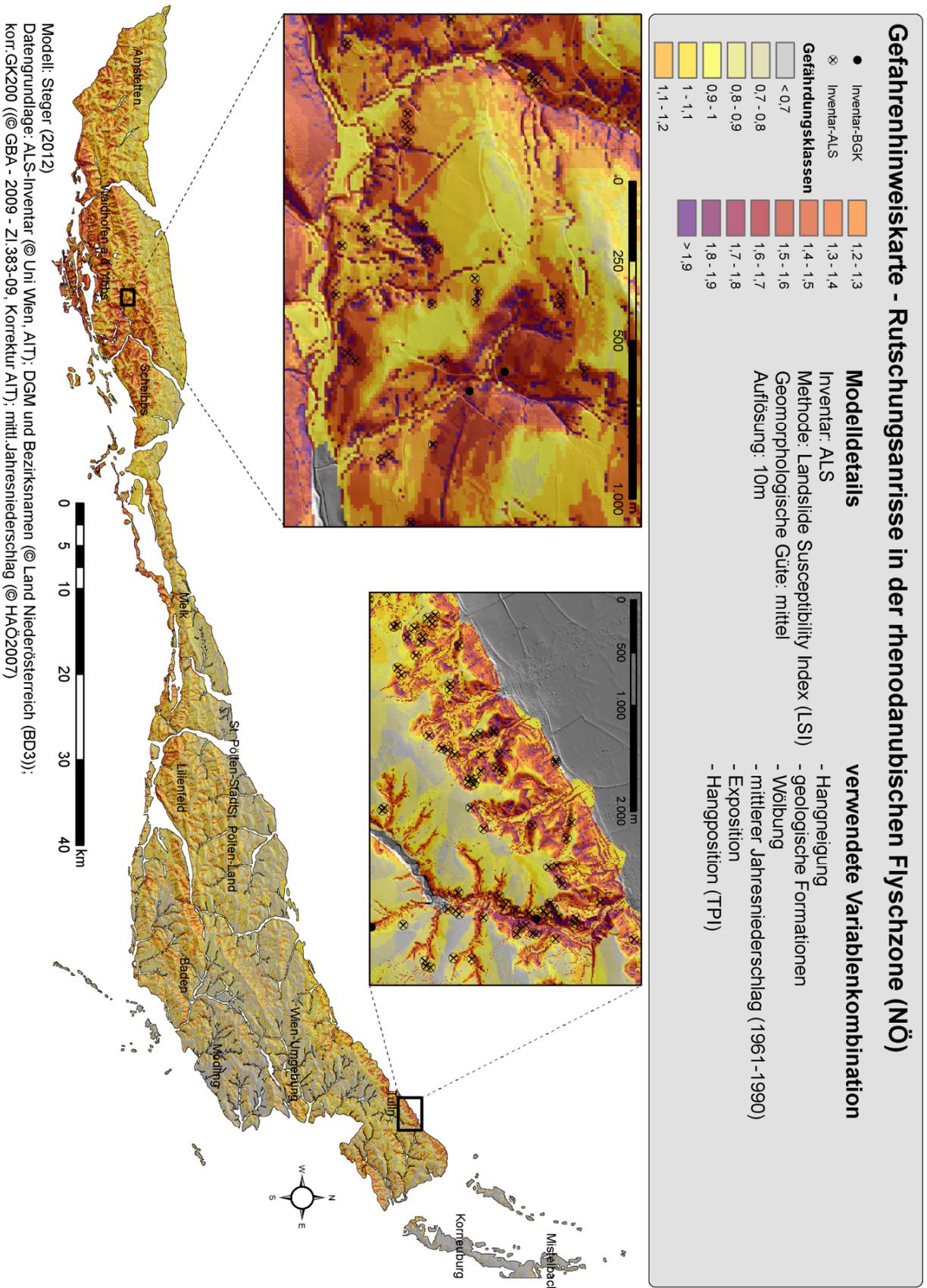
Die Gefahrenhinweiskarte des BGK-Inventares zeigt im Gegensatz zur ALS-Modellierung eine geringe räumliche Differenzierung zwischen flachen und steilen Hangbereichen. Große Bereiche in den westlichen Bezirken Amstetten, Waidhofen an der Ybbs und Scheibbs sowie in Teilen von Lilienfeld werden als hoch gefährdet ausgewiesen. Auffallend hierbei sind die geringen Gefährdungswerte in den Bezirken Baden und Mödling sowie die geringe Reaktion der Modelle auf die Variable Hangneigung, wodurch auch sehr flache Tal- und Kuppenbereiche des Westens als hochgefährdet ausgewiesen werden. Die standardisierten Beta-Koeffizienten der BGK-Modellierung (Tab. 8) belegen, dass die Ausweisung der Gefährdung im Untersuchungsgebiet für die stetigen Variablen am stärksten von den mittleren Jahresniederschlagswerten (0,9) und weniger stark von den Hangneigungswerten (0,3) bestimmt wird. Die Odds Ratio-Werte der geologischen Formationen zeigen, dass die flächenmäßig großen Laab-Formationen (0,1) sowie die Kaumbergformation (0,1) die Gefährdungswerte an diesen Lokalitäten besonders stark herabsetzen. Wie auch beim ALS-Modell weisen die Ost- und Südhänge erhöhte Odds Ratio-Werte (>2) auf. Die Tal- und Kuppenbereiche ($<0,6$) setzen die Gefährdung im Vergleich zu den anderen Hangpositionen herab. Die kleinräumige Differenzierung der Gefährdungswerte erreicht nicht die Qualität der ALS-Modellierung.

Die Differenzkarte im Anhang B2 visualisiert die Unterschiede zwischen den Gefährdungswerten der logistischen Regressionsmodelle. Hierbei können die beschriebenen unterschiedlich starken Einflüsse der einzelnen erklärenden Variablen visuell nachvollzogen werden. Die sehr hohen Gefährdungswerte im Westen sowie die geringe räumliche Differenzierung im Falle des BGK-Modelles ist im Detailausschnitt ersichtlich. Die höheren ALS-Gefährdungen in den steilsten, konkaven Bereichen visualisieren die höhere Sensitivität des ALS-Modelles gegenüber Änderungen in der Hangneigung.

6.3.2 Ergebnisse bivariate Modellierung – Landslide Susceptibility Index (LSI)

Die Gefahrenhinweiskarten, welche anhand des bivariaten LSI erstellt wurden, werden in diesem Abschnitt dargestellt und beschrieben. Die Rutschungsgefährdung wird ebenfalls durch 14 Klassen dargestellt, wobei Werte < 1 auf eine unterdurchschnittliche relative Rutschungsgefährdung, Werte > 1 auf eine überdurchschnittliche relative Rutschungsgefährdung im Gebiet hinweisen (vgl. Kapitel 5.4.2).

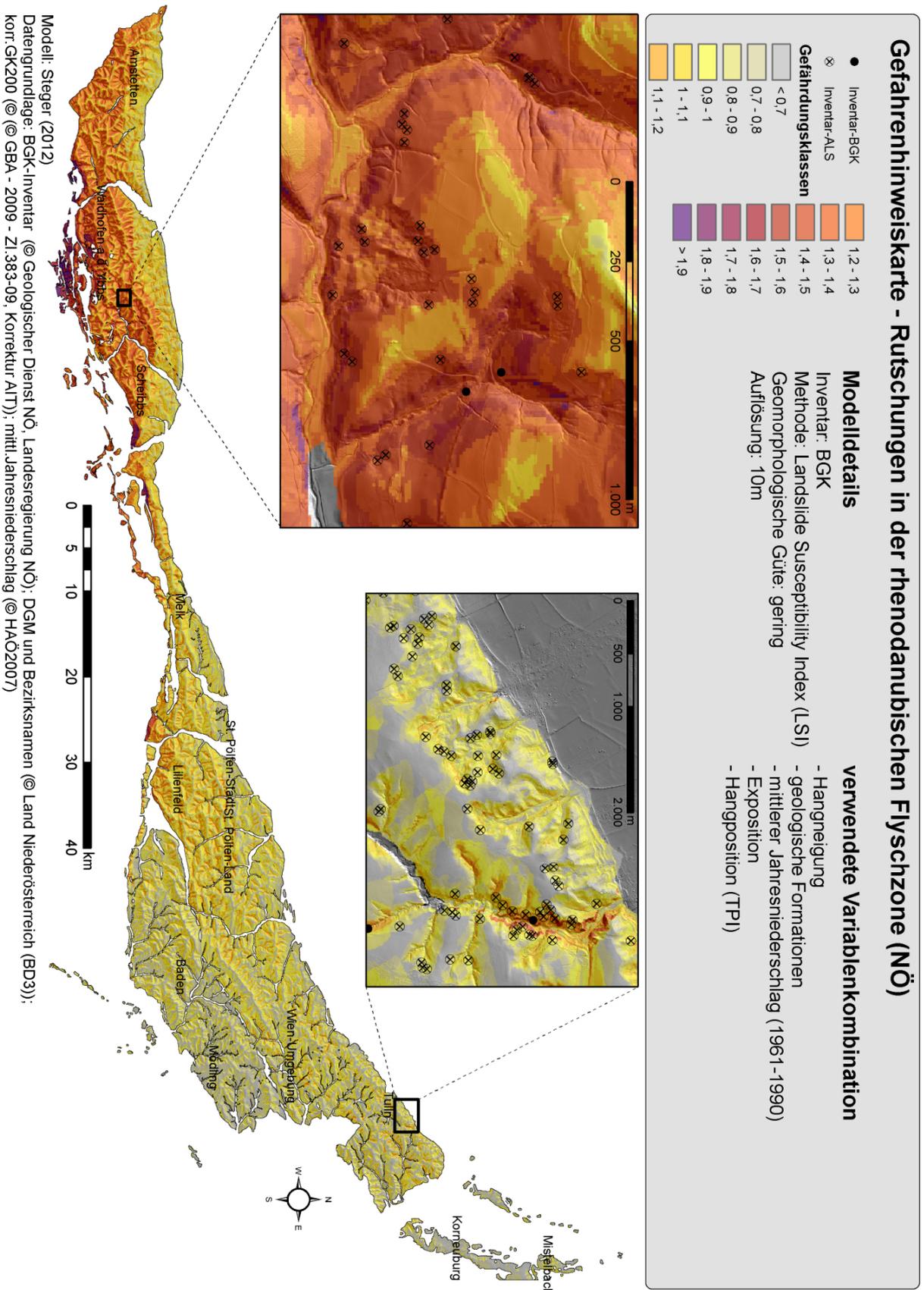
Abbildung 30: Gefahrenhinweiskarte - Landslide Susceptibility Index, ALS



Die mit einer mittleren geomorphologischen Güte gekennzeichnete Gefahrenhinweiskarte des ALS-Inventares (Abb. 30) weist im optischen Vergleich mit den Dichtekarten dieses Inventares (vgl. Abb. 16) ein ähnliches Erscheinungsbild auf. Bereiche mit hohen Rutschungsdichten werden als hoch gefährdet, Bereiche mit geringen Rutschungsdichten als gering gefährdet ausgewiesen. Überdurchschnittliche Gefährdungen (>1) werden vor allem in den südwestlichen bzw. südlichen Bezirken Amstetten, Waidhofen an der Ybbs, Scheibbs, Lilienfeld und im nordöstlichen Bezirk Tulln ausgewiesen. Die geringsten Gefährdungen können in Teilen der östlichen Bezirke Baden, Mödling und Korneuburg beobachtet werden. Bei großmaßstäbiger Betrachtung wird der Zusammenhang zwischen den Gefährdungswerten und den FR-Werte der erklärenden Variablen (vgl. Kap. 6.1.2) ersichtlich. Die höchsten Gefährdungen im Untersuchungsgebiet können daher in den steilen, konkav geformten Hangbereichen der gefährdetsten geologischen Formationen beobachtet werden. Bezüglich der Hangposition werden die Mittel- bis Unterhänge als gefährdeter ausgewiesen, wobei auch hohe mittlere Jahresniederschläge die relativen Gefährdungswerte erhöhen. Der Detailausschnitt im Westen des Bezirkes Scheibbs zeigt diese Tendenzen besonders gut. Die in diesem Ausschnitt überdurchschnittlich hohen FR-Werte der geologischen Formationen (Zementmergelerde und Perneckformation, FR: 1,66) sowie des mittleren Jahresniederschlags (1000mm-1100mm; FR: 1,66) heben die Gefährdungswerte zusätzlich an, wodurch auch die flacheren Tal- und Kuppenlagen nicht in der niedrigen Gefährdungsklasse ($<0,7$) vorzufinden sind. Wie der Detailausschnitt im Bezirk Tulln, in welchem zahlreiche ALS-Rutschungen kartiert wurden, zeigt, wird trotz der geringen mittleren Jahresniederschläge (600mm-700mm) eine hohe Gefährdung in den steilsten Bereichen ausgewiesen. Dieser Detailausschnitt stellt die in Richtung der Donau abfallenden Bereiche der Wolfpassing-Formation (FR: 1,97) dar, welche durch eine unruhige Oberflächenmorphologie gekennzeichneten sind. Die flachen sanft geformten Hangkuppen dieses Ausschnittes werden jedoch als gering gefährdet ausgewiesen und demonstrieren die hohe Selektivität dieses Modelles. Auch in diesem Modell werden die mit geringeren Hangneigungen gekennzeichneten Bereiche der Laaber-Decke sowie die sehr flachen Bereiche im Bezirk Korneuburg als gering gefährdet ausgewiesen.

Die Abbildung 31 zeigt die LSI-Gefahrenhinweiskarte des BGK-Inventares, welche durch eine geringe geomorphologische Güte gekennzeichnet ist. In dieser Gefahrenhinweiskarte steht einer hohen Gefährdung im Südwesten des Untersuchungsgebietes eine geringe Gefährdung im Osten gegenüber, wobei der niederschlagsreiche Süden des Bezirkes Waidhofen an der Ybbs die höchsten Gefährdungswerte aufweist.

Abbildung 31: Gefahrenhinweiskarte - Landslide Susceptibility Index, BGK



Modell: Steger (2012)
 Datengrundlage: BGK-Inventar (© Geologischer Dienst NÖ, Landesregierung NÖ); DGM und Bezirksnamen (© Land Niederösterreich (BD3));
 kor: GK200 (© GBA - 2009 - ZI.383-09, Korrektur ALT); mittl. Jahresniederschlag (© HAÖ2007)

Wie der Detailausschnitt im Westen des Untersuchungsgebietes belegt, zeigt dieses Modell eine geringe räumliche Differenzierung der Gefährdungswerte zwischen den flachen und steileren Hangbereichen. Hierbei werden auch flache Tal- und Kuppenbereiche des Südwesten als überdurchschnittlich gefährdet (>1) ausgewiesen. Die ca. 3km nördlich dieses Detailausschnittes ersichtliche linienhafte abrupte Veränderungen der Gefährdungswerte (West-Ost Erstreckung) kann durch Betrachtung des FR-Rasters der mittleren Jahresniederschläge erklärt werden und visualisiert die hohe Abhängigkeit dieses Modelles von dieser Variable. Den südlich liegenden Bereichen mit hohen FR-Werten von 2,61 (Klasse: 1000mm-1100mm) stehen hierbei die nördlich liegenden Flächen mit geringen FR-Werten von 1,13 (Klasse: 900mm-1000mm) gegenüber. Der Detailausschnitt des Bezirkes Tulln zeigt die grundsätzlich geringen Gefährdungswerte des niederschlagsärmeren Ostens, wobei auch die dort vorkommenden, durch unruhige Morphologie gekennzeichneten, steileren Hangbereiche als unterdurchschnittlich gefährdet ausgewiesen werden. Wie bei den logistischen Regressionsmodellen kann der Einfluss der Variable Exposition, welche relativ geringe FR-Abweichungen vom Grenzwert 1 aufweist, visuell nicht nachvollzogen werden.

Die Unterschiede der Gefährdungswerte zwischen den beiden LSI-Modellen können anhand der Differenzkarte im Anhang B3 nachvollzogen werden, wobei der im Falle des BGK-Inventares wesentlich höher gefährdete Westen hervortritt. Im Detailausschnitt wird ersichtlich, dass besonders die steilsten, konkaven Hangbereiche im Falle des ALS-Inventares als höher gefährdet ausgewiesen werden. Der unterschiedlich starke Einfluss der erklärenden Variablen geologische Formationen sowie mittlerer Jahresniederschlag kann ebenfalls anhand des Detailausschnittes nachvollzogen werden. Die Wolfpassing-Formation tritt hierbei als roter Streifen (höhere Gefährdung bei ALS-Inventar) hervor, welcher sich bis in den Osten durchzieht, und visualisiert die höhere relative Gefährdung des ALS-Inventares für diese geologische Kategorie. Der südlich liegende blaue Streifen (höherer Gefährdung bei BGK-Inventar) zeigt die Auswirkung des beschriebenen abrupten Überganges der klassifizierten mittleren Jahresniederschläge.

6.3.3 Diskussion der Gefährdungsmodellierung

In diesem Kapitel werden die vier finalen Gefahrenhinweiskarten diskutiert, sowie die Vor- und Nachteile bei der praktischen Anwendung der jeweiligen Modellierungsansätze angeführt. Die in Verbindung mit den statistischen Gefährdungsmodellierungen einhergehenden Unsicherheiten sowie weitere inhaltliche Limitationen werden im darauffolgenden Kapitel 7 in ihrem Zusammenhang diskutiert.

Die in Götzing (1943), Schwenk (1992) und Wessely *et al.* (2006) beschriebene hohe Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet konnte anhand der Gefahrenhinweiskarten räumlich differenziert für die niederösterreichische rhenodanubische Flyschzone dargestellt werden. Bei allen

generierten Modellen wird ersichtlich, dass die westlich liegenden Bereiche der Bezirke Amstetten, Waidhofen an der Ybbs und Scheibbs eine generell höhere Rutschungsgefährdung aufweisen, als die östlichen Bezirke Baden, Mödling und Korneuburg. Eine detaillierte Betrachtung der vier Modelle zeigt jedoch erhebliche Unterschiede.

Die mit dem hohen menschlichen Eingriff in Verbindung stehende Landbedeckung beeinflusst die Rutschungsaktivität des Untersuchungsgebietes erheblich, wurde jedoch aufgrund der bereits diskutierten systematischen Fehlern in den Inventaren nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.1.5). Eine Gefährdungsmodellierung mithilfe der Variablen der Landbedeckung und des Straßennetzes hat bestätigt, dass deren Verwendung zu unrealistischen Gefährdungswerten führt. Hierbei wurden im Falle des ALS-Inventares in der Nähe von Verbauungen und Straßen zu geringe Gefährdungen, in Waldgebieten hingegen erhöhte Gefährdungen ausgewiesen. Der gegenteilige Effekt konnte im Falle des BGK-Inventares beobachtet werden, wobei unrealistisch hohen Gefährdungswerten für verbaute Flächen und in der Nähe von Straßen und Siedlungen erhalten wurden. Der Vergleich der Modellierungen macht ersichtlich, dass beide ALS-Modelle eine höhere Qualität als die BGK-Modelle aufweisen und somit als wesentlich selektiver bezeichnet werden können. Das ALS-Regressionsmodell (Karte Anlage) repräsentiert die Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet am „besten“ und zeigt, dass diese durch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren im Untersuchungsgebiet beeinflusst wird, wobei der Hangneigung sowie der geologischen Disposition eine Schlüsselrolle zukommt. Die BGK-Modelle zeigen eine geringe bis sehr geringe geomorphologische Güte und weisen auf eine hohe Abhängigkeit der Ergebnisse von der Variable „mittlerer Jahresniederschlag“ hin. Der erörterte relativ geringe Einfluss der Variable Hangneigung auf diese Modellierungsergebnisse belegt wiederum die in Bezug zur Gefährdungsmodellierung erkannten Limitationen dieses Inventares (Lageungenauigkeiten) und erklärt die geringere Verwendbarkeit der dadurch generierten Gefahrenhinweiskarten (vgl. Kapitel 6.2.2).

Der Vergleich der Modellierungsmethoden zeigt, dass die LSI-Modelle aufgrund der Klassenbildung der Eingangsdaten (vgl. Kapitel 6.1.2) die funktionalen Zusammenhänge zwischen rutschungsfördernden Faktoren und dem Auftreten von Massenbewegungen in höherem Maße generalisieren als die logistischen Regressionsmodelle (Van Westen *et al.*, 2003; Van Westen, 2009). Die für die LSI-Modelle benötigte Klassifikation sämtlicher Eingangsdaten ist zudem durch ein „verpixeltes“ Erscheinungsbild der Gefährdungsbereiche erkennbar. Die Ergebnisse lassen zudem vermuten, dass die LSI-Methode aufgrund der hohen Generalisierung und der einfachen methodischen Herangehensweise (vgl. Kapitel 5.4.2) einen geringeren Anspruch an die Qualität der verwendeten Inventare hat. Das LSI-Modell des BGK-Inventares weist demnach auch eine höhere geomorphologische Güte als das logistische Regressionsmodell desselben Inventares auf. Die Betrachtung der logistischen Regressionsmodelle weist darauf hin, dass diese Methode in einem höheren Maße von der Qualität der Inventare abhängig ist. Das

qualitativ hochwertige ALS-Modell steht hierbei dem BGK-Modell, welches die geringste geomorphologische Güte aller Modelle aufweist, gegenüber.

In der praktischen Anwendung benötigen die logistischen Regressionsmodelle eine umfangreichere Datenaufbereitung als die LSI-Modelle. Praktische Vorteile der logistischen Regression liegen in der einfachen Berechenbarkeit von Signifikanzwerten, Beta-Koeffizienten sowie Odds Ratio-Werten der einzelnen erklärenden Variablen. Für die Generierung der logistischen Regressionsmodelle sind die Berechnung von Korrelationswerten zwischen den erklärenden Variablen (vgl. Kapitel 6.1.3) sowie die automatisierte Variablenauswahl anhand des AIC-Wertes hilfreich. Mithilfe entsprechender Tools können quantitative Validierungen der Ergebnisse durchgeführt werden. Die Anwendung der bivariaten LSI-Methode sowie die Bildung der hierfür notwendigen klassifizierten Inputfaktoren (FR-Raster) ist im Vergleich zur logistischen Regression relativ einfach und kann gänzlich in ArcGIS 9.3 durchgeführt werden. Die Ergebnisse können durch die Vorgehensweise intuitiv nachvollzogen werden. Die quantitative Validierung der Ergebnisse kann bei der LSI-Methode nur für vorher festgesetzte Klassifikationsgrenzen durchgeführt werden. Die generierten modifizierte ROC-Kurve und Trapezoid AUROC-Werte beruhen daher ebenfalls auf (mehreren) Klassengrenzen der Gefährdungsmodelle. Um die passenden Variablenkombinationen zu identifizieren hat sich die explorative Datenanalyse für beide Modellierungsansätze als sehr hilfreich erwiesen.

7. Diskussion

Die Identifikation von rutschungsfördernden Faktoren sowie die Ausweisung von gefährdeten Bereichen anhand von Gefahrenhinweiskarten kann in vielen Gebieten, wie auch in der untersuchten rhenodanubischen Flyschzone, als Basis für nachhaltige raumplanerische Maßnahmen dienen. Die nachfolgende Diskussion erörtert die in den einzelnen Ergebnisdiskussionen nicht angesprochenen Aspekte der durchgeführten Analysen, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf die damit verbundenen Unsicherheiten und den daraus resultierenden Limitationen der Aussagekraft sämtlicher Ergebnisse gelegt wird. Im Anschluss werden die dieser Arbeit zugrundeliegenden Arbeitshypothesen verifiziert bzw. falsifiziert.

Räumliche Analysen können als eine statistische Erforschung von Phänomenen definiert werden, welche sich im Raum manifestieren und daher versuchen, geographische Fragestellungen mithilfe statistischer Methoden zu lösen (Anselin, 1993). Die Ergebnisse zeigen, dass sämtliche in dieser Arbeit verwendeten indirekten statistischen Methoden hohe Ansprüche an die Datenqualität stellen. Die explorative Datenanalyse ermöglicht hierbei neben der Identifikation der wichtigsten rutschungsfördernden Faktoren, auch die Limitationen der verwendeten Datensätze aufzuzeigen und die Gefährdungsmodellierungen an diese Informationen anzupassen. Der Mehrwert der explorativen Datenanalyse liegt daher in der Erörterung der Eignung der Datensätze für die anschließenden Analysen. Hierbei müssen sowohl die räumliche und zeitliche Auflösung der Datenbasis, räumliche Abhängigkeiten zwischen den Variablen als auch mögliche systematische Fehler in den Inventaren in die Überlegungen einbezogen werden.

Die zwischen den Landbedeckungsklassen erkannte heterogene Qualität und Vollständigkeit beider Rutschungsinventare steht beim ALS-Inventar mit der anthropogenen Überprägung geomorphologischer Strukturen (Persistenzzeiten) in Zusammenhang, beim BGK-Inventar hingegen mit dessen Verwendungszweck (Schadenmeldungen). Das daraus resultierende Fehlen von Rutschungen in den entsprechenden Landnutzungseinheiten konnte durch den Ausschluss sämtlicher Landbedeckungsvariablen nicht vollständig ausgeglichen werden. Die dadurch generierten Gefährdungsmodelle weisen jedoch eine höhere Qualität (geomorphologische Güte) auf (vgl. Kapitel 6.3.3). Die auf den Rutschungsinventaren basierenden Gefährdungsmodelle werden durch diesen Sachverhalt beeinflusst, wodurch die Wichtigkeit einer vollständigen und qualitativ hochwertigen Datenbasis unterstrichen wird.

Die räumlichen Abhängigkeiten der erklärenden Variablen wurden durch Berechnung von Korrelationskoeffizienten erörtert, da beide in dieser Arbeit verwendeten Modellierungsansätze auf der

Annahme beruhen, dass die Eingangsparameter unabhängig voneinander sind (Van Westen, 1997; Van Westen *et al.*, 1997; Bui *et al.*, 2011). Hierbei konnte jedoch erkannt werden, dass durch diesen quantitativen Ansatz nicht alle räumlichen Abhängigkeiten zwischen den Variablen aufgedeckt und in den Gefährdungsmodellierungen berücksichtigt werden konnten. Beispielsweise wurde der Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Landbedeckung bzw. Lithologie quantitativ nicht erfasst. Eine visuelle Betrachtung der Daten hat jedoch gezeigt, dass bestimmte Landnutzungen (z.B. Acker) bevorzugt in flacheren Bereichen vorzufinden sind bzw. bestimmte Lithologien die Hangneigungswerte stark beeinflussen. Die Erkennbarkeit der räumlichen Zusammenhänge ist daher auch im Untersuchungsgebiet nicht nur von den Merkmalsausprägungen der Variablen selbst, sondern auch von der Erhebungseinheit und dessen Eigenschaften (z.B. Auflösung der Daten) abhängig (Atkinson und Massari, 2011).

Da den Analysen dieser Arbeit Daten unterschiedlicher räumlicher Auflösungen zugrundeliegen (vgl. Kapitel 3), muss bei der Interpretation der Ergebnisse unterschieden werden, ob die erklärenden Variablen aufgrund der funktionalen Zusammenhänge oder aufgrund der verwendeten räumlichen Auflösung der Daten einen bzw. keinen Erklärungsbeitrag zur Ausweisung der Gefährdungsbereiche leisten können. Wie Atkinson und Massari (1998) zeigen, kann bei entsprechender Interpretation der Ergebnisse aus pragmatischen Gründen die Verwendung von Daten unterschiedlicher räumlicher Auflösungen sinnvoll sein.

Die räumliche Autokorrelation zeigt die Stärke mit dem Dinge aufgrund ihrer Lage miteinander korreliert sind und kann als die Korrelation einer Variable mit sich selbst bezeichnet werden. Viele geostatistische Analysen, wie auch die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierungen werden durch autokorrelative Zusammenhänge beeinflusst (Gatrell und Laboratory, 1987; Anselin und Getis, 1992; Anselin, 1993). Durch Betrachtung sämtlicher in dieser Arbeit verwendeten räumlichen Daten konnte festgestellt werden, dass sowohl die Rutschungsinventare selbst als auch die Werteausprägungen der erklärenden Variablen eine räumliche Autokorrelation in unterschiedlichem Maßstabsbereich aufweisen. So tendiert ein Rasterwert nahe eines Rasterwertes mit hoher Hangneigung dazu, selbst eine hohe Hangneigung aufzuweisen bzw. zeigt die Rutschungsverteilung im Untersuchungsgebiet starke autokorrelative Zusammenhänge. Die Berücksichtigung von derartigen Autokorrelationen ist auch für Gefährdungsmodellierungen theoretisch möglich. Dadurch werden jedoch größtenteils die kartierten Rutschungen selbst nachgebildet und Bereiche, welche (noch) keine Rutschungen aufweisen tendenziell vernachlässigt (vgl. Atkinson und Massari, 2011). Da die Gefahrenhinweiskarten dieser Arbeit auch zukünftige noch nicht von Rutschungen betroffene Gefährdungsbereiche ausweisen sollten, wurden autokorrelative Zusammenhänge nicht berücksichtigt.

Neben den genannten räumlichen Unsicherheiten muss bei Gefährdungsmodellierungen auch die zeitliche Auflösung der Eingangsdaten berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 3 angeführt, spiegeln sämtliche Eingangsdaten entweder einen Ist-Zustand (z.B. DGM-Befliegungsdatum) oder einen

Zeitabschnitt in der Vergangenheit (z.B. ALS-Inventar – Rutschungen mehrerer hundert Jahre) wieder. Bei der Datenauswahl wurde daher darauf geachtet, dass der jeweilige Datensatz auch in seiner zeitlichen Auflösung für die Gefährdungsmodellierung relevante Informationen enthält. Beispielsweise beziehen sich die verwendeten Niederschlagsdaten auf den Zeitraum 1961-1990 und bieten korrekterweise keinen Erklärungsbeitrag für Rutschungen vor bzw. nach dieser Zeitspanne. Unter der Annahme, dass das grundlegende räumliche Muster der Niederschläge und somit der Einfluss auf die Verwitterungsdecke über den besagten Zeitraum hinaus konstant war, wird auch die Anwendung dieses Datensatzes als sinnvoll erachtet. Die für beide Regressionsmodelle errechneten niedrigeren AIC-Werte bei Einbeziehung der Variable „mittlerer Jahresniederschlag“ sowie die Signifikanzen bestätigen die sinnvolle Verwendbarkeit dieser Variable.

Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten kann nachvollzogen werden, dass mit jeder zusätzlichen Eingangsvariable auch eine mögliche neue Fehlerquelle in die Gefährdungsmodellierung aufgenommen wird. Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte wurden von den 19 erklärenden Variablen sechs Variablen für die ALS-Modellierungen und fünf Variablen für die BGK-Modellierungen ausgewählt. Die Gefährdungsmodellierungen dieser Arbeit können jedoch auch nach intensiver Datenanalyse und sorgfältiger Variablenauswahl den Ansprüchen einer statistisch vollkommen korrekten Analyse nicht gerecht werden. Wie Van Westen *et al.* (2003) beschreiben, werden in der täglichen Praxis häufig nur jene rutschungsfördernden Faktoren in den Analysen berücksichtigt, welche auch relativ einfach bzw. kostengünstig verfügbar sind, wodurch statistisch korrekte Modelle nicht realisiert werden können.

Wie in Brenning (2005) dargestellt, kann ein statistisch nicht vollkommen korrektes Modell gute Vorhersageeigenschaften aufweisen und von hohem praktischen Nutzen für diverse Entscheidungsträger sein. Die quantitativen Validierungsergebnisse dieser Arbeit bestätigen dies und zeigen, dass alle generierten Modelle eine ähnliche und gute Unterscheidung zwischen Gebieten mit und ohne Massenbewegungen für das jeweilige Inventar aufweisen. Die qualitative Validierung der Gefährdungsmodelle belegt, dass die Qualität der Ergebnisse in hohem Maße von der Qualität der Eingangsdaten (besonders Inventare) bestimmt wird und weniger von den hierbei verwendeten Modellierungsmethoden. Die unterschiedliche geomorphologische Güte der Modelle bei ähnlichen quantitativen Gütemaßen demonstriert hierbei die Limitationen einer rein quantitativen Validierung. Hierbei zeigen beide ALS-Modelle eine höhere geomorphologische Güte, als die BGK-Modelle. Da für das ALS-Inventar die logistische Regression und für das BGK-Inventar die LSI-Methode die besten Ergebnisse liefern, wird die Wichtigkeit einer passenden Methodenauswahl für die jeweilige Datenbasis hervorgehoben. Wie die Validierungsergebnisse zeigen, wird das generierte logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares (Karte in Anlage) als das „beste“ Modell identifiziert und kann trotz der damit verbundenen Unsicherheiten die Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet ausreichend gut visualisieren.

Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten der Modelle kommt der Kommunikation der Ergebnisse und deren Limitationen eine entscheidende Rolle zu. Dem Endbenutzer sollte stets bewusst sein, dass ein Modell eine Abstraktion der Realität darstellt und die Ergebnisse daher nicht direkt in die Wirklichkeit projiziert werden dürfen (=ontologischer Fehlschluss) (vgl. von Elverfeldt, 2010). In der Realität weist jede einzelne gravitative Massenbewegung ihre eigene Dynamik auf, ein Modell kann demnach nur korrekt verifiziert werden, indem gewartet wird, ob das Event nun eintritt oder nicht (Van Westen *et al.*, 2003; Van Westen, 2009).

Abschließend werden die Arbeitshypothesen dieser Arbeit verifiziert:

- I. Die explorative Datenanalyse kann grundlegende Zusammenhänge im Untersuchungsgebiet sichtbar machen, wodurch die anschließende Gefährdungsmodellierung optimiert wird.
Diese Arbeitshypothese kann als wahr angenommen werden.

- II. Die Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet kann nur durch eine kombinierte Betrachtung mehrerer Faktoren abgeschätzt werden.
Diese Arbeitshypothese kann als wahr angenommen werden. Hierbei stellt sich besonders die Kombination von Hangneigung und geologischen Formationen als wichtig heraus.

- III. Die Ergebnisse sind von der jeweilig verwendeten Methode als auch vom jeweilig verwendeten Rutschungsinventar abhängig. Die daraus abgeleiteten Aussagen unterscheiden sich maßgeblich.
Die Arbeitshypothese kann als wahr angenommen werden. Hierbei konnte erkannt werden, dass das jeweilig verwendete Rutschungsinventar einen höheren Einfluss auf die Qualität der Modellierungsergebnisse hat, als die jeweils verwendete Modellierungsmethode.

- IV. Die durch statistische Modellierung erstellte Gefahrenhinweiskarte kann die Rutschungsgefährdung ausreichend gut darstellen.
Die Arbeitshypothese kann nur teilweise als wahr angenommen werden, da von den vier finalen Gefährdungsmodellen nur das logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares eine gute Trennung zwischen den gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen bei gleichzeitig hoher geomorphologischer Güte aufweist.

8. Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Rahmen des Projektes „Methodenentwicklung zur Modellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich (MoNOE)“ durchgeführt und stellt eine umfassende räumliche Analyse der rutschungsfördernden Faktoren in der niederösterreichischen rhenodanubischen Flyschzone dar. Die durch statistische Modellierungen ausgewiesenen gefährdeten Bereiche konnten hierbei anhand von Gefahrenhinweiskarten räumlich differenziert ausgewiesen werden. Sämtliche Analysen wurden getrennt nach zwei Rutschungsinventaren durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen eigens für Gefährdungsmodellierungen generierten Rutschungsinventar, in welchem aus einer hochaufgelösten Schummerungskarte die Rutschungsanrisse kartiert wurden (ALS-Inventar), sowie um den Baugrunderkater des Landes Niederösterreich (BGK-Inventar), welcher die Schadensmeldungen von gravitativen Massenbewegungen verortet.

Die durchgeführte explorative Datenanalyse ermöglicht es, wichtige Zusammenhänge zwischen dem räumlichen Rutschungsauftreten und dessen vorbereitenden Faktoren für den jeweiligen Rutschungsinventar zu identifizieren, sowie Unterschiede zwischen den Inventaren aufzuzeigen. Die Ergebnisse weisen zudem auf die Limitationen der verwendeten Datensätze hin, wodurch die anschließenden Gefährdungsmodellierungen optimiert werden können. Systematische Fehler der Eingangsdaten konnten somit ebenso wie die Abhängigkeiten zwischen den erklärenden Variablen berücksichtigt werden.

Für die Gefährdungsmodellierungen wurden zwei statistische Modellierungsansätze angewandt. Es handelt sich hierbei um die multivariate logistische Regression und um einen bivariaten Indexbasierten Ansatz (Landslide Susceptibility Index, LSI). Die quantitativen Validierungsergebnisse zeigen für alle vier Modelle eine ähnlich hohe statistische Güte. Die Unterschiede in der qualitativ beurteilten geomorphologischen Güte der Modelle zeigt jedoch, dass gute statistische Gütemaße kein Garant für hochwertige Modellierungsergebnisse sind. Die qualitativen Validierungsergebnisse weisen darauf hin, dass die verwendete Modellierungsmethode einen geringeren Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat als das jeweils verwendete Rutschungsinventar.

Da für beide Inventare unterschiedliche Modellierungsansätze die besten Ergebnisse lieferten, sollte dennoch auf eine geeignete Methodenauswahl beachtet werden. Die besten Ergebnisse für den lagegenauen ALS-Inventar wurde mit der logistischen Regression erreicht, während für den aus geomorphologischer Perspektive minderwertigen BGK-Inventar der einfach anzuwendende LSI die besseren Ergebnisse lieferte. Es kann somit angenommen werden, dass die Modellierungsmethode nach der Qualität der Eingangsdaten auszuwählen ist.

Die ALS-Modelle weisen eine wesentlich höhere qualitative Güte als die BGK-Modelle auf, wodurch verdeutlicht wird, dass der Qualität der Eingangsdaten (besonders der Rutschungsinventare) eine höhere Beachtung geschenkt werden sollte als den in den wissenschaftlichen Publikationen häufiger diskutierten Auswahl der geeigneten Modellierungsmethoden. Das logistische Regressionsmodell des ALS-Inventares (Karte im Anhang) ist hierbei jenes Modell, welches sowohl eine gute quantitative Trennung zwischen gefährdeten und nicht gefährdeten Bereichen als auch eine hohe geomorphologische Güte aufweist. Wie die standardisierten Regressionskoeffizienten sowie die Odds Ratio Werte dieses Modelles zeigen, kann die Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet nur durch eine kombinierte Betrachtung mehrerer Faktoren abgeschätzt werden, wobei der Hangneigung und der Geologie eine Schlüsselrolle zukommt. Die dadurch erstellte qualitativ hochwertige Gefahrenhinweiskarte weist die gefährdeten Bereiche differenziert aus.

Aufgrund der mit statistischen Gefährdungsmodellierungen einhergehenden Unsicherheiten scheint eine methodisch rein quantitative Herangehensweise keine optimalen Ergebnisse zu liefern. Die Modellentwicklung sollte daher durch eine qualitative Variablenselektion und eine qualitative Validierung ergänzt werden, wobei eine korrekten Kommunikation der Unsicherheiten in den Ergebnissen berücksichtigt werden sollte. Bei Naturgefahrenanalysen, allem voran bei Voraussagen von zukünftigen Gefährdungsbereichen und Risiken, erscheint eine holistische interdisziplinäre Zusammenarbeit von Sozial-, Natur- und Ingenieurwissenschaftlichen dringend notwendig (Felgentreff und Glade, 2007).

9. Perspektiven

In diesem Kapitel werden im Zuge dieser Arbeit entstandene Ideen sowie mögliche zukünftige Forschungsfelder diskutiert.

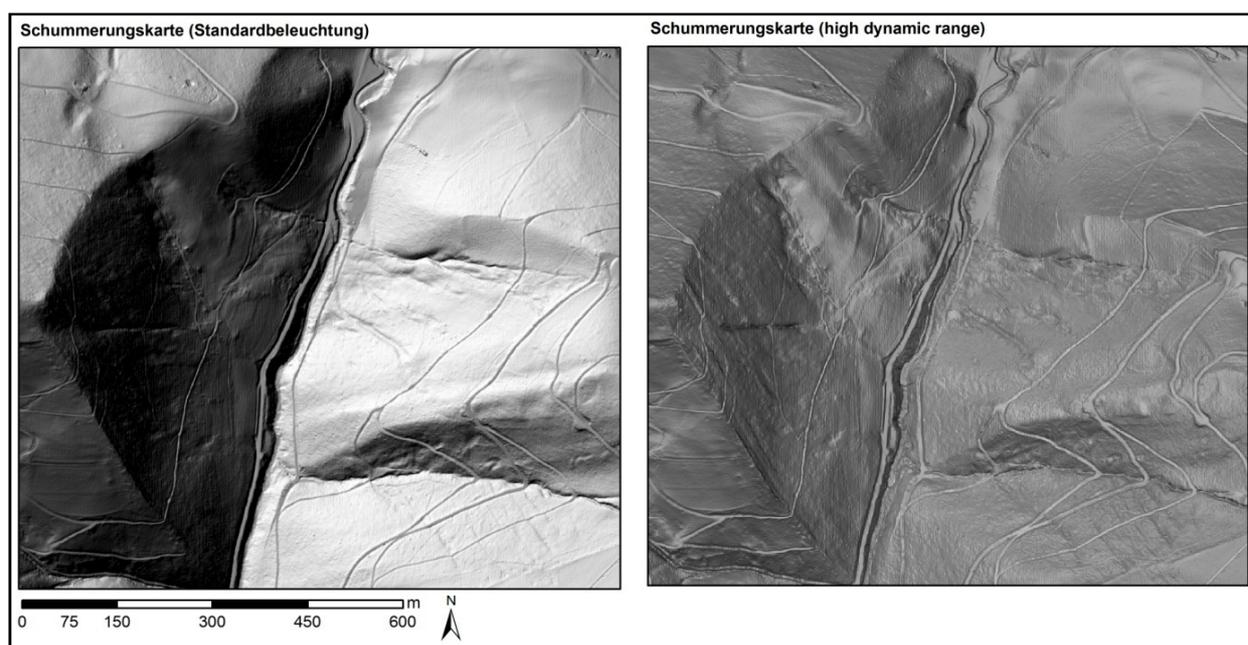
Zahlreiche Publikationen bezüglich des Themas Gefährdungsabschätzung von gravitativen Massenbewegungen belegen, dass der Fokus der wissenschaftlichen Gemeinschaft auf der Anwendung und Entwicklung diverser Methoden liegt. Hierbei herrscht weder bezüglich der geeignetsten Modellierungsmethoden noch über eine optimale methodische Herangehensweise zur Auswahl der Modelldatensätze bzw. Validierungsdatsätze Einigkeit (vgl. Bui et al., 2011).

Aufgrund der erkannten nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den Rutschungen und den erklärenden Variablen, könnten die bereits guten Modellierungsergebnisse dieser Arbeit durch Anwendung von generalisierten additiven Modellen (GAM) verbessert werden. Diese Modelle stellen eine Erweiterung des verwendeten generalisierten linearen Modelles (GLM) dar, wobei durch die Verwendung von Glättungsfunktionen auch Nichtlinearitäten berücksichtigt werden können (Wood, 2006). Da die LSI-Methode auf den FR-Werten der erklärenden Variablen beruht, werden bei dieser Methode in gewisser Weise auch Nichtlinearitäten berücksichtigt. Weiterführende Untersuchungen bezüglich der Bildung der hierfür notwendigen Klassenanzahl und Klassengrenzen, sowie deren Auswirkungen auf die Ergebnisse, wären für die Anwendung derartiger Methoden hilfreich. Die Validierungsergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass sich die Auswahl der geeigneten Modellierungsmethode an der zur Verfügung stehenden Datenbasis orientieren sollte. Die Annahme, dass für qualitativ minderwertige Datengrundlagen (z.B. BGK-Inventar) „einfachere“ Modellierungsmethoden (z.B. LSI) bessere Ergebnisse liefern, wäre durch weitere Analysen zu untersuchen.

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit hervorheben, sollte der Auswahl, der Aufbereitung und Generierung der zugrundeliegenden Datenbasis vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Ergebnisse der objektiven statistischen Modellierungsmethoden werden durch die subjektive Auswahl und Aufbereitung der Eingangsdaten wesentlich bestimmt, wodurch den Fachkenntnissen des Bearbeiters eine besondere Bedeutung zukommt. Die Notwendigkeit einer vorbereitenden Datenanalyse scheint in diesem Zusammenhang von hoher Wichtigkeit. Den wichtigsten Datensatz jeder Gefährdungsmodellierung stellt das zugrundeliegende Inventar dar (Petschko *et al.*, 2011). Dem mit den Persistenzzeiten der ALS-Kartierung (vgl. Bell *et al.*, 2012) in Verbindung stehenden Fehlen von Rutschungen, besonders in menschlich stark überprägten Landbedeckungseinheiten, könnte mit einer Korrektur des Inventares anhand von historische Analysen entgegengewirkt werden. In der praktischen

Umsetzung ist dies aufgrund von fehlenden Informationen jedoch nur bedingt durchführbar. Bei entsprechenden Kenntnissen über die Dynamiken im Untersuchungsgebiet wäre eine heuristische Korrektur der Gefährdungswerte in den betroffenen Landbedeckungseinheiten möglich. Die damit in den Modellierungsergebnissen eingehende Subjektivität ist nach Van Westen (1997) als nicht grundsätzlich negativ zu bezeichnen, sollte jedoch auf den Erfahrungen eines Experten beruhen. Eine Abschätzung von Persistenzzeiten sowie deren Ausweisung in den Gefahrenhinweiskarten würde die Interpretation der Ergebnisse in anthropogen beeinflussten Untersuchungsgebieten zusätzlich erleichtern. Die Kommunikation derartiger Aussagen wie auch der Unsicherheiten sollte jedoch an das Fachwissen der jeweiligen Zielgruppe angepasst werden. Die Qualität der Kartierung von Rutschungsinventare aus hochaufgelösten Schummerungskarten könnte durch eine Bearbeitung dieser Karten mittels HDR-Technik (high dynamic range) erfolgen. Diese aus der digitalen Bildbearbeitung bekannte Methode minimiert Abschattungsgebiete sowie überbelichtete Flächen, wodurch die Erkennbarkeit von geomorphologischen Strukturen verbessert wird (Abb.32).

Abbildung 32: Vergleich Schummerungskarte mit Standardbeleuchtung und aufbereitete HDR- Schummerungsdarstellung im Untersuchungsgebiet (Standardbeleuchtung: 315°; HDR aus vier Schummerungskarten mit den Beleuchtungsrichtungen 315°, 45°, 135°, 225°; Software Photomatix Pro Version 4.0.2)



Der Verwendungszweck des BGK-Inventares könnte bei entsprechend genauer Verortung (evtl. Mobile-GPS) sowie einer standardisierten Prozessbeschreibung (z.B. Ereignisdatum, Ereignisgröße) wesentlich erweitert werden und so auch für wissenschaftliche Zwecke, wie beispielsweise Gefährdungs-, Gefahren- oder Risikoanalysen nutzbar gemacht werden.

Den in der Praxis aus den hochaufgelösten DGM's ableitbaren detaillierten Aussagen zu den geomorphologischen Eigenschaften stehen häufig Datensätze zur Verwitterungsdecke, Landbedeckung, hydrogeologische Faktoren sowie Starkniederschlägen gegenüber, welche nicht in der benötigten

Qualität verfügbar sind. Untersuchungen bezüglich der Eignung von Jahresniederschlagsdaten für Naturgefahrenanalysen wären ebenfalls interessant. Um die Wirkung der Jahresniederschläge auf Rutschungen zu erörtern, könnte ähnlich wie bei den Untersuchungen von Rickli (2002) vorgegangen werden. Rickli (2002) hat die Wirkung der Waldbedeckung auf Rutschungen untersucht und dabei festgestellt, dass unter Wald eine geringere Rutschungsfrequenz vorzufinden ist. Im Vergleich zu unbewaldeten Flächen war das Gesamtvolumen der bewegten Massen über einen längeren Zeitraum betrachtet jedoch gleich groß (oder größer) (vgl. Kapitel 2.2). Analog hierzu könnten geologisch ähnliche Gebiete mit hohen Jahresniederschlagssummen und selteneren Starkniederschlägen mit Gebieten mit geringeren Jahresniederschlagssummen und häufigeren Starkniederschlagsereignissen verglichen werden. Mit diesem Vergleich könnte aufgedeckt werden, ob in Gebieten mit häufigen Starkniederschlägen auch häufiger Rutschungen auftreten, welche aufgrund der Frequenz der Ereignisse und der damit verbundenen Materialverfügbarkeit jedoch eine geringe Magnitude aufweisen. Gleichzeitig könnten die Ergebnisse jedoch auch darauf hinweisen, dass im Gebiet mit hohen Jahresniederschlagssummen aufgrund der geringeren Rutschungsfrequenz das für Rutschungen verfügbare Gesamtvolumen größer ist. Bei den wenigen Starkniederschlagsereignissen würden somit größere Rutschungen ausgelöst, wodurch das Gesamtvolumen über einen längeren Zeitraum betrachtet zwischen beiden Gebieten ähnlich sein könnte. Die Anwendbarkeit von Jahresniederschlagsdaten für Gefährdungsmodellierungen (welche keinen Zeitbezug aufweisen) könnte somit zusätzlich überprüft werden.

Die Berücksichtigung von autokorrelativen Zusammenhängen für Gefährdungsmodellierungen oder die Entwicklung neuer Algorithmen stellen eine wissenschaftlich anspruchsvolle Herausforderung dar. In der täglichen Praxis sollte der Fokus jedoch vermehrt auf die Eignung und Qualität der zugrundeliegenden Datenbasis (besonders Inventare) und auf eine korrekte Kommunikation der Limitationen der Ergebnisse an die Entscheidungsträger gelegt werden.

Bezüglich sämtlicher mit Naturgefahren in Verbindung stehenden Forschungsfelder stellen rein quantitative Ansätze nur Annäherungen an die Realität dar. Da für den Endnutzer die Ergebnisse jedoch häufig die Realität darstellen, kommt der Kommunikation der damit verbundenen Unsicherheiten eine entscheidende Rolle zu. Die Ausweisung der gefährdeten Bereiche und Risiken kann hierbei lediglich dazu beitragen, die Prozesse zu verstehen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten um Schäden zu begrenzen. Besonders bei der Vorhersage von Naturgefahren und Risiken sollten auch Veränderungen in den sozialen Systemen, welche sich beispielsweise in der Landnutzung widerspiegeln, vermehrt Beachtung finden. Ziel sollte hierbei eine interdisziplinäre Zusammenarbeit sein, um eine optimale Anpassung an diese nicht zu verhindernden geomorphologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet zu gewährleisten (vgl. Felgentreff und Glade, 2007).

10. Literaturverzeichnis

- Ahnert, F., 1996. Einführung in die Geomorphologie. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Akgun, A., Dag, S., Bulut, F., 2007. Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology* 54, 1127–1143.
- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 21–44.
- Anselin, L., 1993. Exploratory Spatial Data Analysis and Geographic Information Systems. Research Paper 9329, DOSES/EUROSTAT Workshop on New Tools for Spatial Analysis, ISEGI.
- Anselin, L., Getis, A., 1992. Spatial statistical analysis and geographic information systems. *The Annals of Regional Science* 26, 19–33.
- Atkinson, P., Jiskoot, H., Massari, R., Murray, T., 1998. Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 1185–1195.
- Atkinson, P.M., Massari, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences* 24, 373–385.
- Atkinson, P.M., Massari, R., 2011. Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Geomorphology*.
- Auer, I., Böhm, R., Mohnl, H., Potzmann, R., Schöner, W., Skomorowski, P., 2007. ÖKLIM-Digitaler Klimaatlas Österreichs, CD-ROM. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Bauer, F.K., 1980. Der Geologische Aufbau Österreichs. Hrsg. von d. Geologischen Bundesanstalt. Springer, Wien, New York.
- Beguéría, S., 2006. Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management. *Natural Hazards* 37, 315–329.
- Bell, R., 2007. Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb (Dissertation).
- Bell, R., Petschko, H., Röhrs, M., Dix, A., 2012. Assessment of landslide age, landslide persistence and human impact using airborne laser scanning digital terrain models. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94, 135–156.

- Bender, R., Ziegler, A., Lange, S., 2007. Logistische Regression. Artikel Nr. 14 der Statistik-Serie in der DMW. Dtsch Med Wochenschr 132, e33–e35.
- Borradaile, G.J., 2003. Statistics of Earth Science Data: Their Distribution in Time, Space, and Orientation. Springer.
- Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. Natural Hazards and Earth System Science.
- Brenning, A., 2007. RSAGA: SAGA geoprocessing and terrain analysis in R.
- Brenning, A., 2008. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. In: J. Böhner, T. Blaschke und L. Motanarella (eds.), SAGA -Seonds Out. Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie 19, 23–32.
- Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O., 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. Natural Hazards 59, 1413–1444.
- Busche, D., 2005. Landschaftsformen der Erde: Bildatlas der Geomorphologie. Wiss. Buchges., Darmstadt.
- Canadian Geotechnical Societies, 1993. Multilingual landslide glossary, UNESCO. Working Party for World Landslide Inventory. BiTech Publ., Richmond B.C.
- Chung, C.J., Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65, 1389–1399.
- Chung, C.J., Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards 30, 451–472.
- Crozier, M.J., 1989. Landslides: Causes, Consequences and Environment. Routledge.
- Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43, 27–29.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide Types and Processes, TRB Special Report. National Academy Press, Washington.
- Dai, F., Lee, C., Ngai, Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. Engineering Geology 64, 65–87.

-
- Dai, F.C., Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42, 213–228.
- Damm, B., Terhorst, B., 2007. Quaternary slope formation and landslide susceptibility in the Flysch Zone of the Vienna Forest (Austria). *Geomorphology for the Future* 89–96.
- Damm, B., Terhorst, B., 2009. Slope Stability and Slope Formation in the Flysch Zone of the Vienna Forest (Austria). *Journal of Geological Research* 2009, 1–10.
- Damm, B., Terhorst, B., 2010. A model of slope formation related to landslide activity in the Eastern Prealps, Austria. *Geomorphology* 122, 338–350.
- Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A., Hack, R., 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology* 114, 627–637.
- Day, R.A., Gastel, B., 2011. *How to Write and Publish a Scientific Paper*. ABC-CLIO.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L., 1996. *Landslide Recognition: Identification, movement and causes*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
- Dikau, R., Glade, T., 2002. Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau* 54, 38–45.
- Dikau, R., Weichselgartner, J., 2005. *Der unruhige Planet: der Mensch und die Naturgewalten*. Primus Verlag, Darmstadt.
- Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Sonmez, H., 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology* 51, 241–256.
- Eder, A., Sotier, B., Klebinder, K., Sturmlechner, R., Dorner, J., Markart, G., Schmid, G., Strauss, P., 2011. *Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs - Endbericht*. HydroBodNÖ. BAW, BFW.
- Everitt, S.B., Hothorn, T., 2012. *A Handbook of Statistical Analyses Using R*. Chapter 6: Logistic Regression and Generalised Linear Models: Blood Screening, Women's Role in Society and Colonic Polyps.
- Fahrmeir, L., Pigeot, I., Künstler, R., Tutz, G., 2009. *Statistik: Der Weg Zur Datenanalyse*. Springer DE.

- Falaschi, F., Giacomelli, F., Federici, P.R., Puccinelli, A., D'Amato Avanzi, G., Pochini, A., Ribolini, A., 2009. Logistic regression versus artificial neural networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy. *Natural Hazards* 50, 551–569.
- Falk, M., Marohn, F., Tewes, B., 2002. *Foundations of Statistical Analyses and Applications With Sas*. Birkhäuser.
- Faupl, P., 1996. *Tiefwassersedimente und tektonischer Bau der Flyschzone des Wienerwaldes*.
- Felgentreff, C., Glade, T., 2007. *Naturreisiken und Sozialkatastrophen*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102, 85–98.
- Gatrell, A.C., Laboratory, N.R.R., 1987. *On Putting Some Statistical Analysis Into Geographical Information Systems: With Special Reference to Problems of Map Comparison and Map Overlay*. Northern Regional Research Laboratory.
- Glade, T., 2003. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena* 51, 297–314.
- Glade, T., Albini, P., Francés, F., 2001. *The use of historical data in natural hazard assessments*. Springer.
- Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J., 2005. *Landslide hazard and risk: Issues, Concepts and Approach*. John Wiley, Chichester.
- Götzing, G., 1943. *Neue Beobachtungen über Bodenbewegungen in der Flyschzone. Zur Bodenkultur-Geographie des Wienerwaldes*. Geographische Gesellschaft Wien, Wien.
- Guns, M., Vanacker, V., 2012. Logistic regression applied to natural hazards: rare event logistic regression with replications. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 1937–1947.
- Guzzetti, F., 2006. *Landslide Hazard and Risk Assessment (Dissertation)*.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181–216.
- Harrell, F.E., 2001. *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis*. Springer.
- Highland, L., 2004. *Landslides Types and Processes, Fact Sheet 2004-3072*. U.S. Geological Survey.

- Hitz, H., Birsak, L., 2004. Klimatypen Österreichs (1961-1990). Hölzel Universalatlas zu Geographie und Geschichte.
- Hosmer, D.W., Lemeshow, S., 2000. Applied Logistic Regression. John Wiley & Sons.
- Iverson, R.M., 1997. The Physics of Debris Flows. *Reviews of Geophysics* 35, 245–296.
- Jäger, S., Wieczorek, G.F., 1994. Landslide susceptibility in the Tully Valley Area, Finger Lakes Region. U.S. Geological Survey 94–615.
- Jenness, J., 2006. Topographic Position Index. (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises.
- Kittel, R., Ottner, F., Damm, B., Terhorst, B., 2010. A man-induced landslide in Lower Austria: natural conditions versus man-made causes. EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria, p. 7045 12, 7045.
- Kohn, W., 2004. Statistik: Datenanalyse Und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Springer DE.
- Konishi, S., Kitagawa, G., 2008. Information Criteria and Statistical Modeling. Springer.
- Krenmayr, H.G., Hofmann, T., Mandl, G.W., Peresson, H., Pestal, G., Pistotnik, J., Reitner, J., Scharbert, S., Schnabel, W., Schönlaub, H.P., 2002. Rocky Austria: eine bunte Erdgeschichte von Österreich. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Lee, S., 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management* 34, 223–232.
- Lee, S., Dan, N.T., 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.
- Lee, S., Ryu, J.-H., Kim, I.-S., 2007. Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides* 4, 327–338.
- Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M., Dietrich, W.E., 2000. Forest clearing and regional landsliding. *Geology* 28, 311–314.
- Murawski, H., Meyer, W., 1998. Geologisches Wörterbuch, 10. Auflage. ed. Enke, Stuttgart.

Nagl, H., 1983. Klima- und Wasserbilanztypen Österreichs. Versuch einer regionalen Gliederung mit besonderer Berücksichtigung des außeralpinen Raumes, Geographischer Jahresbericht aus Österreich, XL.Band (1981). Institut für Geographie und Regionalforschung, Wien.

Orme, A.R., 2002. Shifting paradigms in geomorphology: the fate of research ideas in an educational context. *Geomorphology* 47, 325–342.

ÖROK, 2010. Kleinräumige Bevölkerungsprognose für Österreich 2010-2030 mit Ausblick bis 2050 („ÖROK-Prognosen“), Teil 1: Endbericht zur Bevölkerungsprognose. Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien.

Österreichisches Institut für Raumplanung, 2008. Der ländliche Raum in Niederösterreich. ÖIR-Informationendienste GmbH, Arbeiterkammer Niederösterreich, Wien.

Petschko, H., Bell, R., Leopold, P., Heiss, G., Glade, T., 2011. Landslide inventories for reliable susceptibility maps in Lower Austria., in: *Proceedings of the 2nd World Landslide Forum*, 2-7 October, Rom. Presented at the *Proceedings of the 2nd World Landslide Forum*, 2-7 October, Rom.

Pfeifer, N., 2003. Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Delft University of Technology, Niederlande.

Phillips, C.J., Davies, T.R.H., 1991. Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology* 4, 101–110.

Poisel, R., 1997. Geologische-geomechanische Grundlagen der Auslösemechanismen von Steinschlag. Tagungsband Steinschlag als Naturgefahr und Prozess, Institut für Wildbach- und Lawinenschutz. Universität für Bodenkultur. Wien.

Pomaroli, G., Bell, R., Glade, T., Heiss, G., Leopold, P., Petschko, H., Proske, H., Schweigl, J., 2011. Darstellung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen im Bundesland Niederösterreich als Grundlage der Raumplanung. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, Skolaut, C. (Hrsg.), (2011): *Gefahrendarstellungen für Massenbewegungen* 198–212.

Remondo, J., González, A., De Terán, J.R., Cendrero, A., Fabbri, A., Chung, C.J., 2003. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards* 30, 437–449.

Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W., Lüscher, P., 2002. Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 153(11), 437–445.

- Sakamoto, Y., Ishiguro, M., Kitagawa, G., 1986. Akaike information criterion statistics. KTK Scientific Publishers.
- Schnabel, W. (Redaktion), 2002. Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000.
- Schweigl, J., Hervás, J., 2009. Landslide mapping in Austria, JRC Scientific and Technical Reports. European Commission Joint Research. Centre Institute for Environment and Sustainability., Luxemburg.
- Schwenk, H., 1992. Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990, Jahrbuch Geologische Bundesanstalt. Jahrbuch Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Selby, M., 1993. Hillslope materials and processes. Oxford University Press, Oxford.
- Skoda, G., Lorenz, P., 2007. Mittlere Jahresniederschlagshöhe - Modellrechnung mit unkorrigierten Daten. Hydrologischer Atlas Österreich 2007 Erläuterungsblatt 2.2.
- Skoda, G., Weilguni, V., Haiden, T., 2007. Konvektive Starkniederschläge - Niederschlag in 15, 60 und 180 Minuten. Hydrologischer Atlas Österreich 2007 Erläuterungsblatt 2.5.
- Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. The American journal of psychology 15, 72–101.
- Summerfield, M.A., 1991. Global geomorphology: an introduction to the study of landforms. Pearson/Prentice Hall, Harlow.
- Terhorst, B., Damm, B., Peticzka, R., Kötttritsch, E., 2009. Reconstruction of Quaternary landscape formation as a tool to understand present geomorphological processes in the eastern Prealps (Austria). Quaternary International 209, 66–78.
- Van Den Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., Malet, J.P., Picarelli, L., 2010. Calibration of logistic regression coefficients from limited landslide inventory data for European-wide landslide susceptibility modelling, in: Proc. Int. Conference Mountain Risks: Bringing Science to Society, Florence, Italy. pp. 24–26.
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). Geomorphology 76, 392–410.
- Van Westen, C., 1997. Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2, 73–84.
- Van Westen, C., Rengers, N., Soeters, R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Natural Hazards 30, 399–419.

- Van Westen, C.J., 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. International Institute for Aerospace Study and Earth Sciences, Enschede.
- Van Westen, C.J., 2000. The modelling of landslide hazards using GIS. Surveys in geophysics. International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences (ITC), Enschede, The Netherlands. 21, 241–255.
- Van Westen, C.J. (editor), 2009. Multi - hazard risk assessment: RiskCity, Distance education. itc, Enschede.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M., Soeters, R., 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86, 404–414.
- Varnes, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, International Association of Engineering Geology. Unesco, Paris.
- Vijith, H., Madhu, G., 2007. Estimating potential landslide sites of an upland sub-watershed in Western Ghat's of Kerala (India) through frequency ratio and GIS. *Environmental Geology* 55, 1397–1405.
- von Elverfeldt, K., 2010. Systemtheorie in der Geomorphologie. Problemfelder, erkenntnistheoretische Konsequenzen und praktische Implikationen (Dissertation).
- Wessely, G., Draxler, I., Gangl, G., Gottschling, P., Heinrich, M., Hofmann, T., Lenhardt, W., Matura, A., Pavuza, R., Peresson, H., Sauer, R., 2006. Geologie von Niederösterreich, Geologie der österreichischen Bundesländer. Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Wilhelmy, H., Bauer, B., 2002. Exogene Morphodynamik Abtragung, Verwitterung, Tal- und Flächenbildung.
- Wood, S.N., 2006. Generalized additive models: an introduction with R. Chapman and Hall / CRC, Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA.
- Wrbka, T., Reiter, K., Paar, M., Szerencsits, E., Stocker-Kiss, A., Fussenegger, K., 2005. Die Landschaften Österreichs und ihre Bedeutung für die biologische Vielfalt. Umweltbundesamt.
- Yalcin, A., Reis, S., Cagdasoglu, A., Yomralioglu, T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*.
- Zepp, H., 2002. Geomorphologie: Grundriß Allgemeine Geographie, 3. Aufl. ed. UTB, Stuttgart.

Tutorials / Tools zu ArcGIS und R:

ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of ModelBuilder

http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_overview_of_ModelBuilder

Zugriff: 21.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of the Projections and Transformations toolset

http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_overview_of_the_Projections_and_Transformations_toolset

Zugriff: 11.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - An overview of the Spatial Analyst toolbox

http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=An_overview_of_the_Spatial_Analyst_toolbox

Zugriff: 11.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - create random points (data management)

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=create_random_points_\(data_management\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=create_random_points_(data_management))

Zugriff: 15.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - Euclidean Distance

http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Euclidean_Distance

Zugriff: 12.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - Gauss-Kruger

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=Gauss-Kruger>

Zugriff: 03.07.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Focal Statistics works

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/body.cfm?topicname=how%20focal%20statistics%20works&tocVisible=0>

Zugriff: 02.02.2012

ArcGIS Desktop Helb 9.3 – How Point Density works

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

Zugriff: 21.01.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - How Zonal Statistics works

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

Zugriff: 03.02.2012

ArcGIS Desktop Help 9.3 - Resample

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Resample>

Zugriff: 11.07.2012

Beyer, H.L., 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS.

<http://www.spatial ecology.com/htools>

Zugriff: 20.03.2012

ETHa. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Seminar for Statistics

R: Choose a model by AIC in a Stepwise Algorithm

<http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/MASS/html/stepAIC.html>

Zugriff: 13.04.2012

ETHb. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Seminar for Statistics

R: Scaling and Centering of Matrix-like Objects

<http://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/base/html/scale.html>

Zugriff: 25.07.2012

King, W.B., 2012. R-Tutorials: Multiple Regression. Coastal Carolina University

<http://ww2.coastal.edu/kingw/statistics/R-tutorials/multreg.html>

Zugriff: 10.07.2012

Quick R: Correlations

<http://www.statmethods.net/stats/correlations.html>

Zugriff: 04.04.2012

Internetquellen:

Frankfurter Rundschau, 2012. 2011 war Rekordjahr bei Naturkatastrophen

<http://www.fr-online.de/politik/2011-war-rekordjahr-beinaturkatastrophen,1472596,11772336,view,asTicker.html>

Zugriff: 06.03.2012

NOE.gv.at, 2012. Das Land Niederösterreich/Gemeindeservice/Katastrophenfonds

<http://www.noel.gv.at/Gemeindeservice/Gemeindeservice/Katastrophenschutz-und-hilfe-Feuerwehrwesen/katfonds.wai.html>

Zugriff: 05.03.2012

NÖ-Atlas 3.0, 2012.

<http://www.intermap1.noel.gv.at/>

Zugriff: 28.02.2012

PLANAT, 2012. Plattform für Naturgefahren

<http://www.planat.ch/de/wissen/rutschung-und-felssturz/erdrutsch/scherfestigkeit/>

Zugriff: 28.01.2012

Sueddeutsche.de, 2012. Negativ-Rekord 2011 - Schäden durch Naturkatastrophen so hoch wie nie.

<http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/negativ-rekord-schaeden-durch-naturkatastrophen-so-hoch-wie-nie-1.1301062>

Zugriff: 06.03.2012

Andere Quellen:

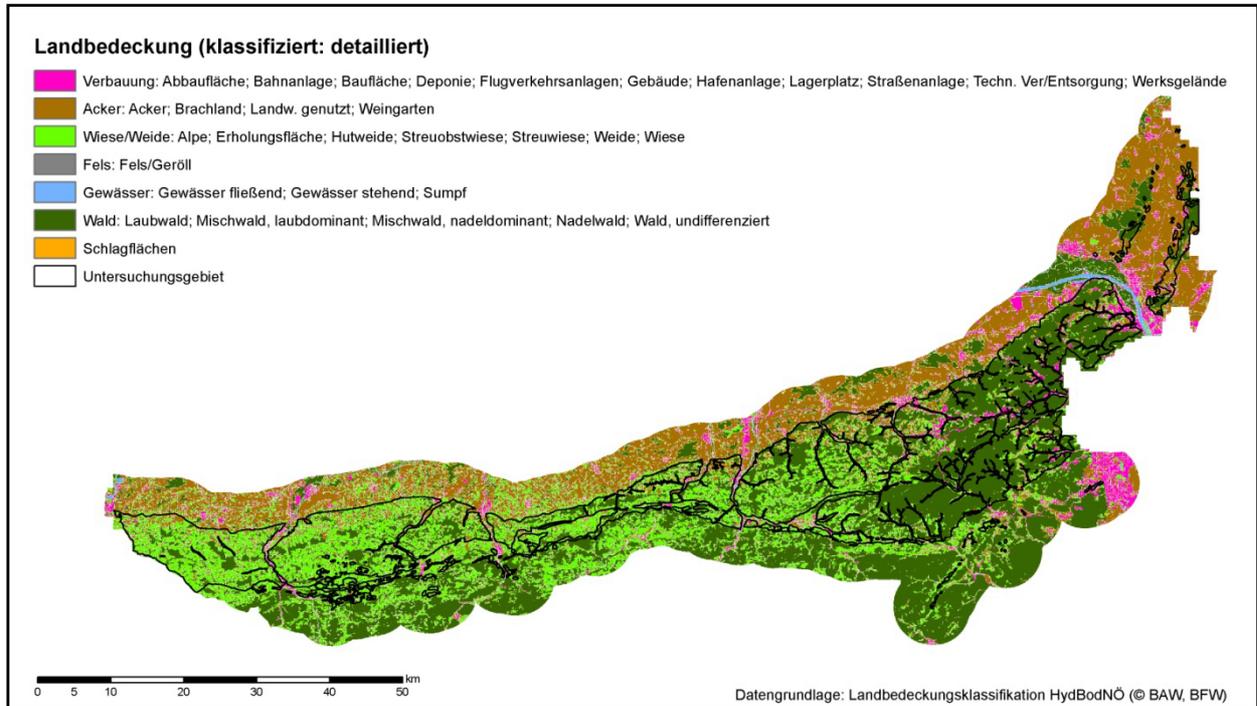
Projektinternes Protokoll zum Treffen zur Planung und Koordinierung der ALS-Kartierung (UniWien, AIT), 09.06.2011 (unveröffentlicht)

MoNOE - Zweiter Zwischenbericht, 2011 (unveröffentlicht)

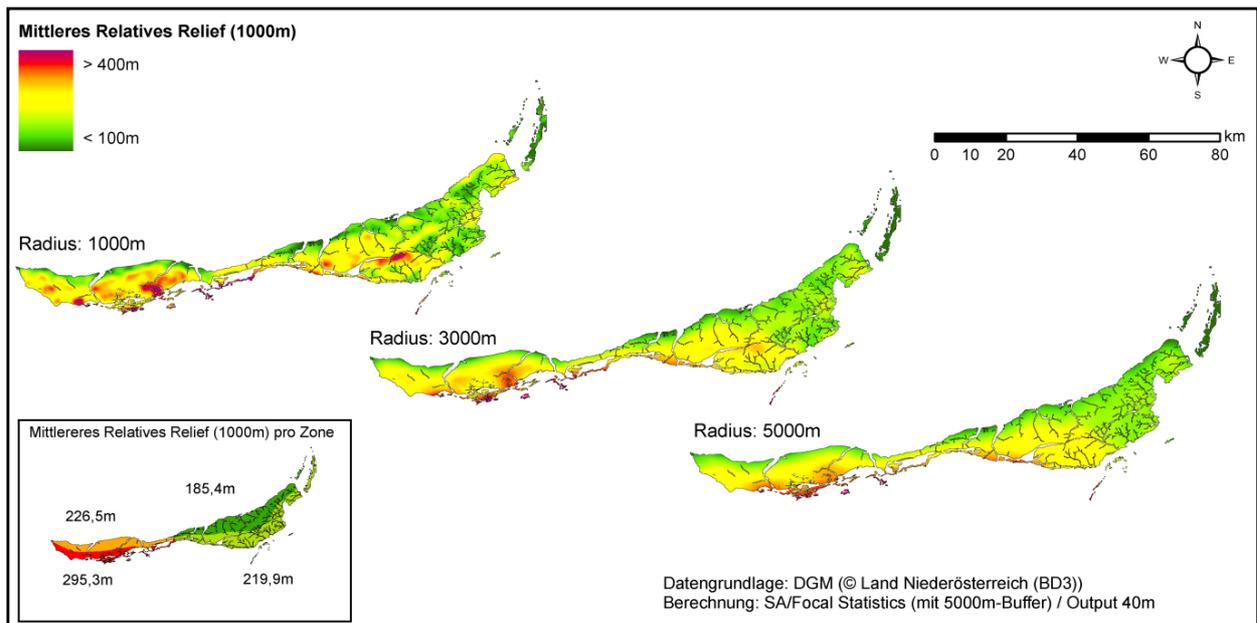
Anhang

Anhang A - Ergebnisse explorative Datenanalyse

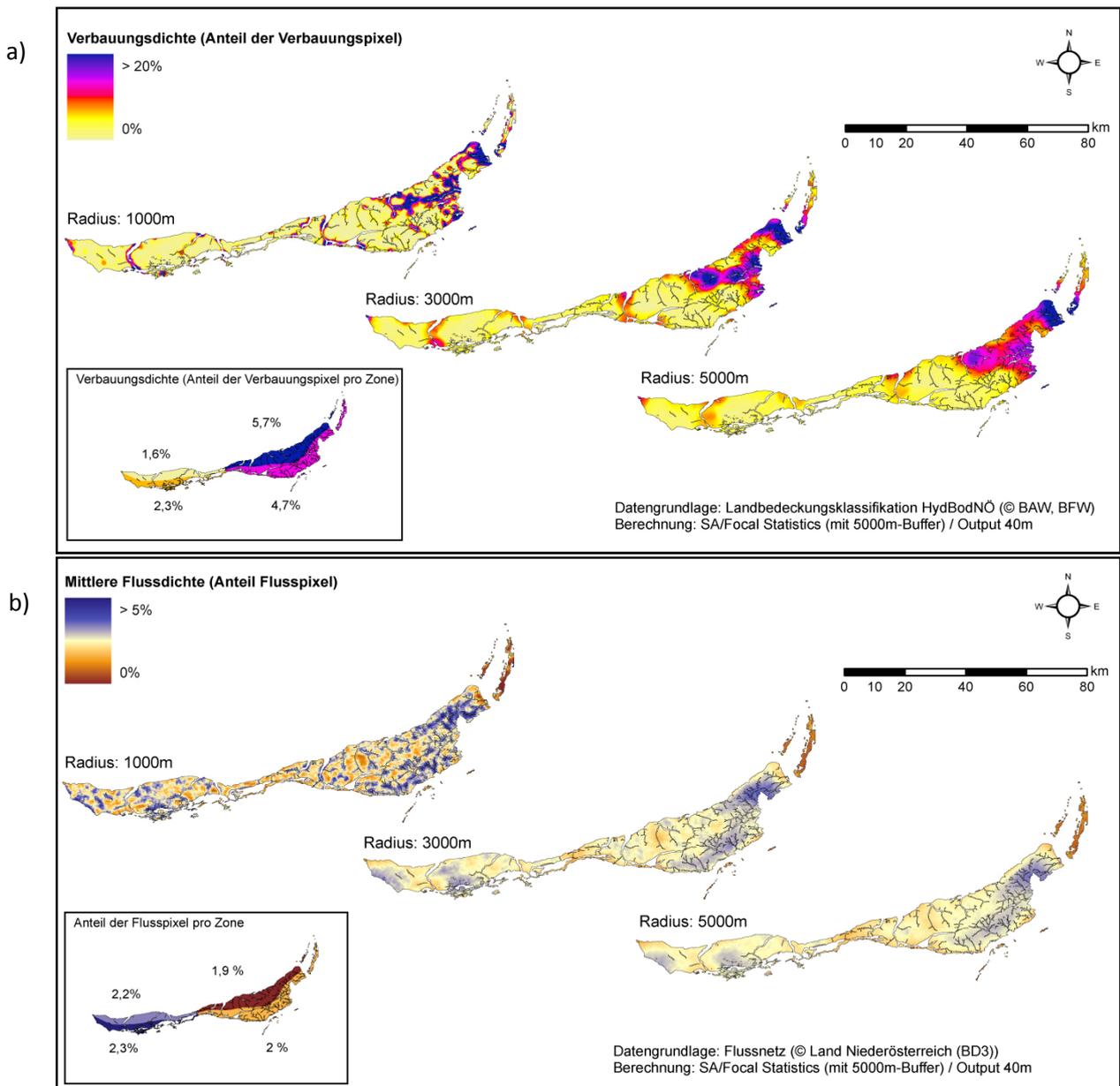
A 1: Landbedeckung im Untersuchungsgebiet (nach Eder *et al.*, 2011)



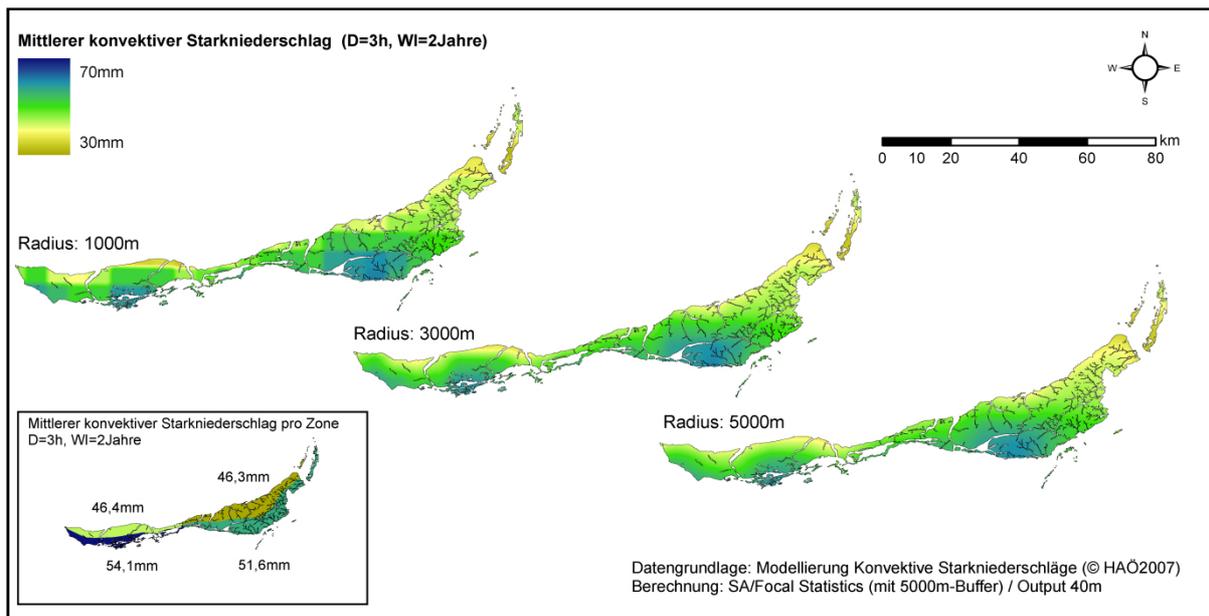
A 2: Dichtekarten a) durchschnittliche absolute Höhe, b) mittleres relatives Relief



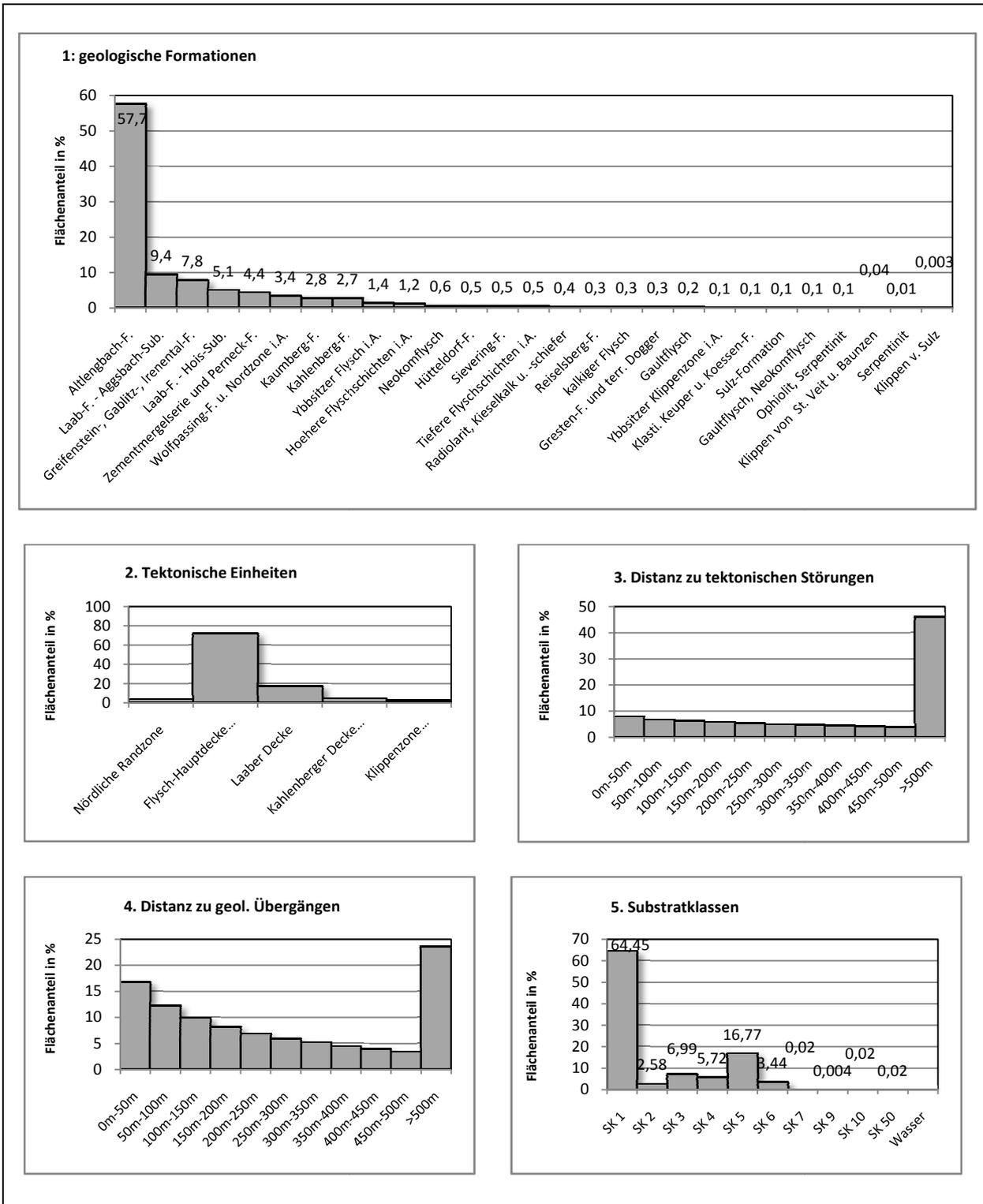
A 3: Dichtekarten a) Verbauungsdichte b) Flussdichte

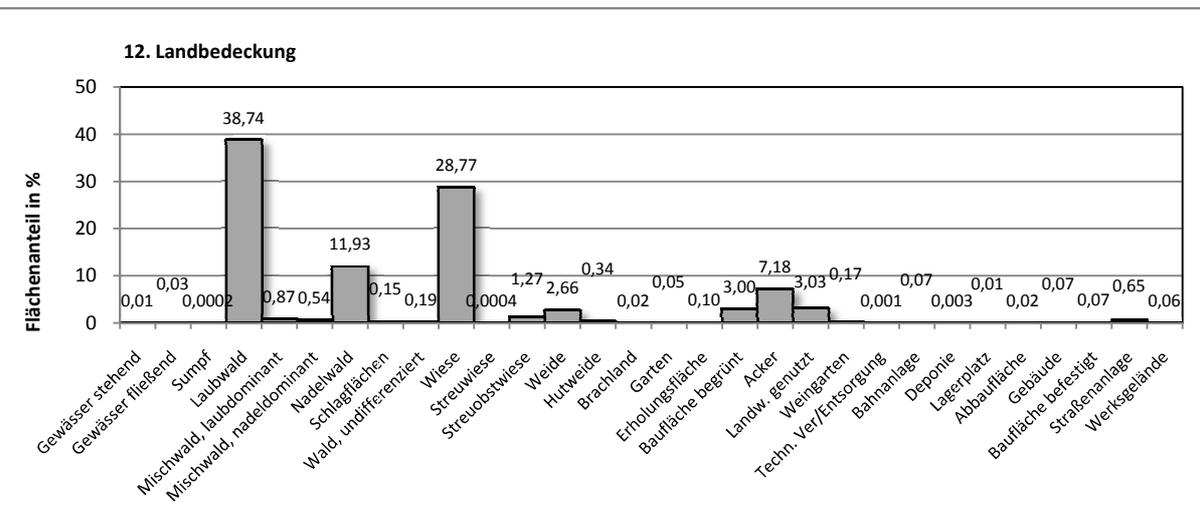
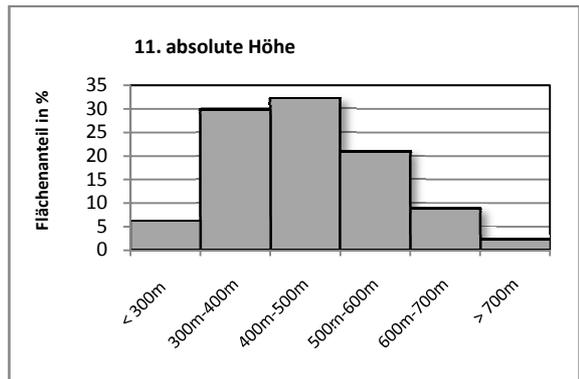
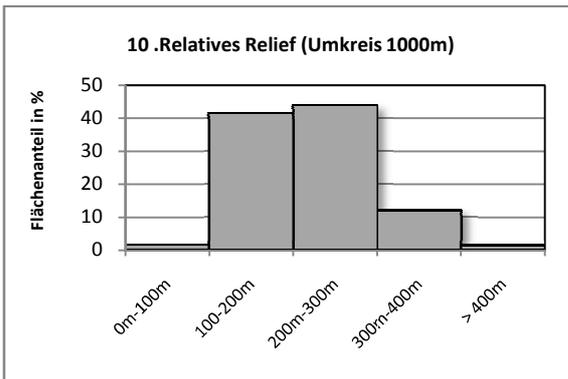
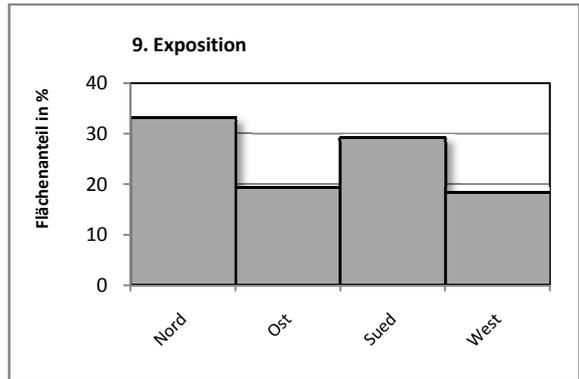
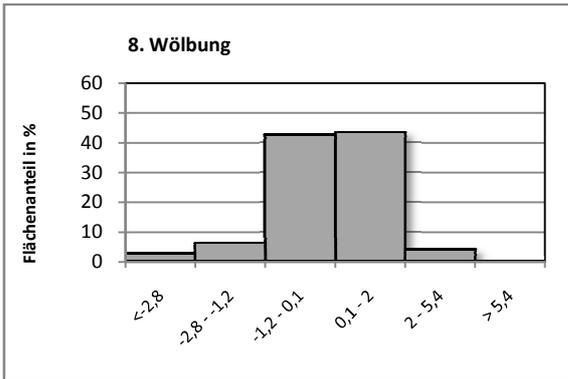
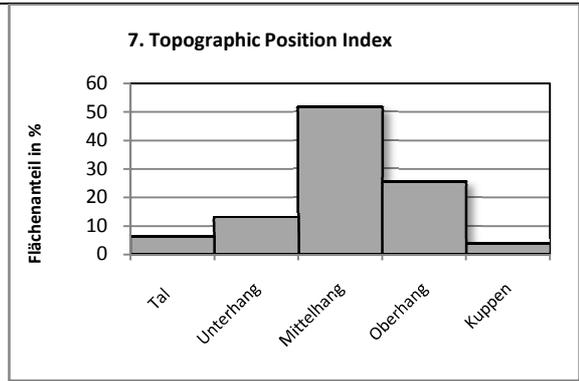
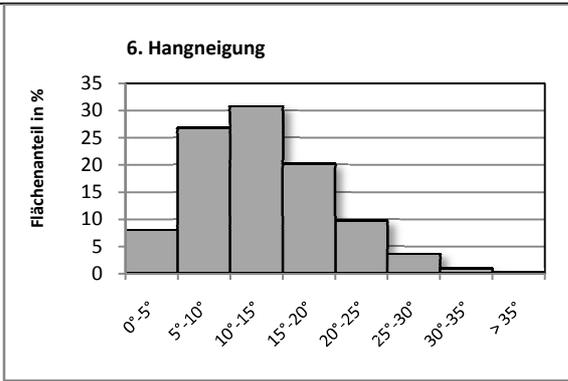


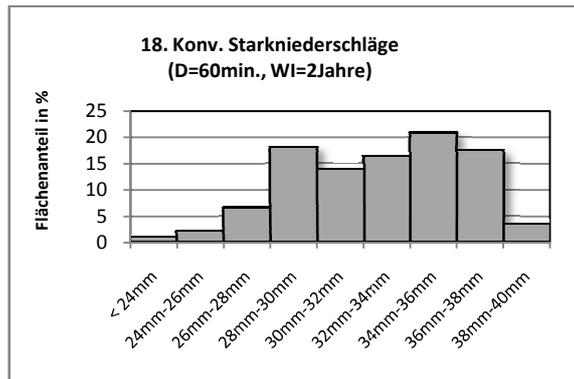
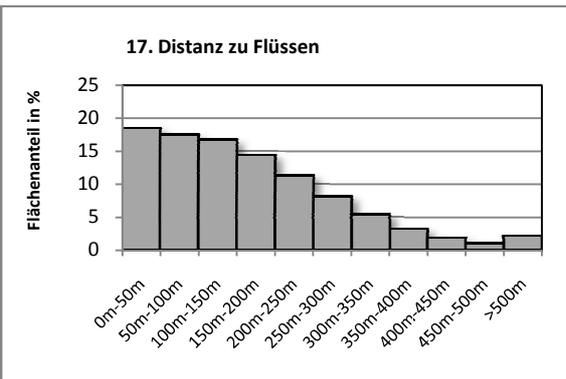
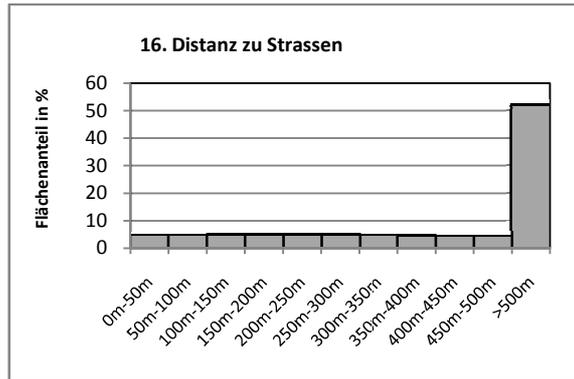
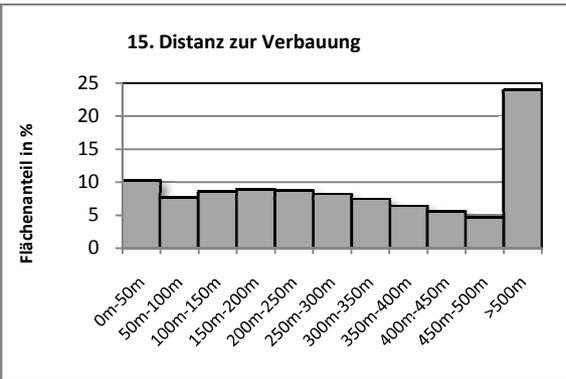
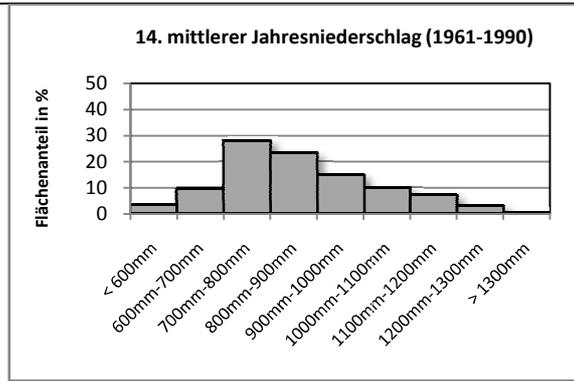
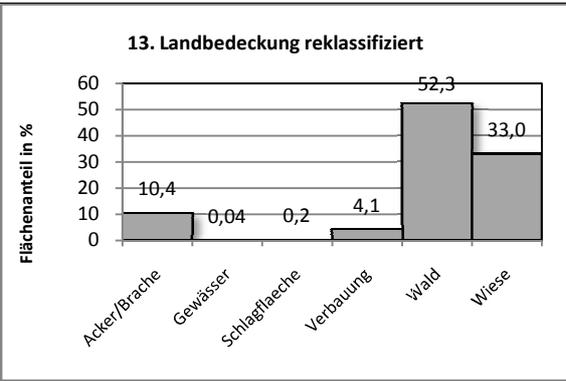
A 4: Dichtekarten: mittlere konvektive Starkniederschläge (Dauerstufe 3h, Wiederkehrintervall 2 Jahre)



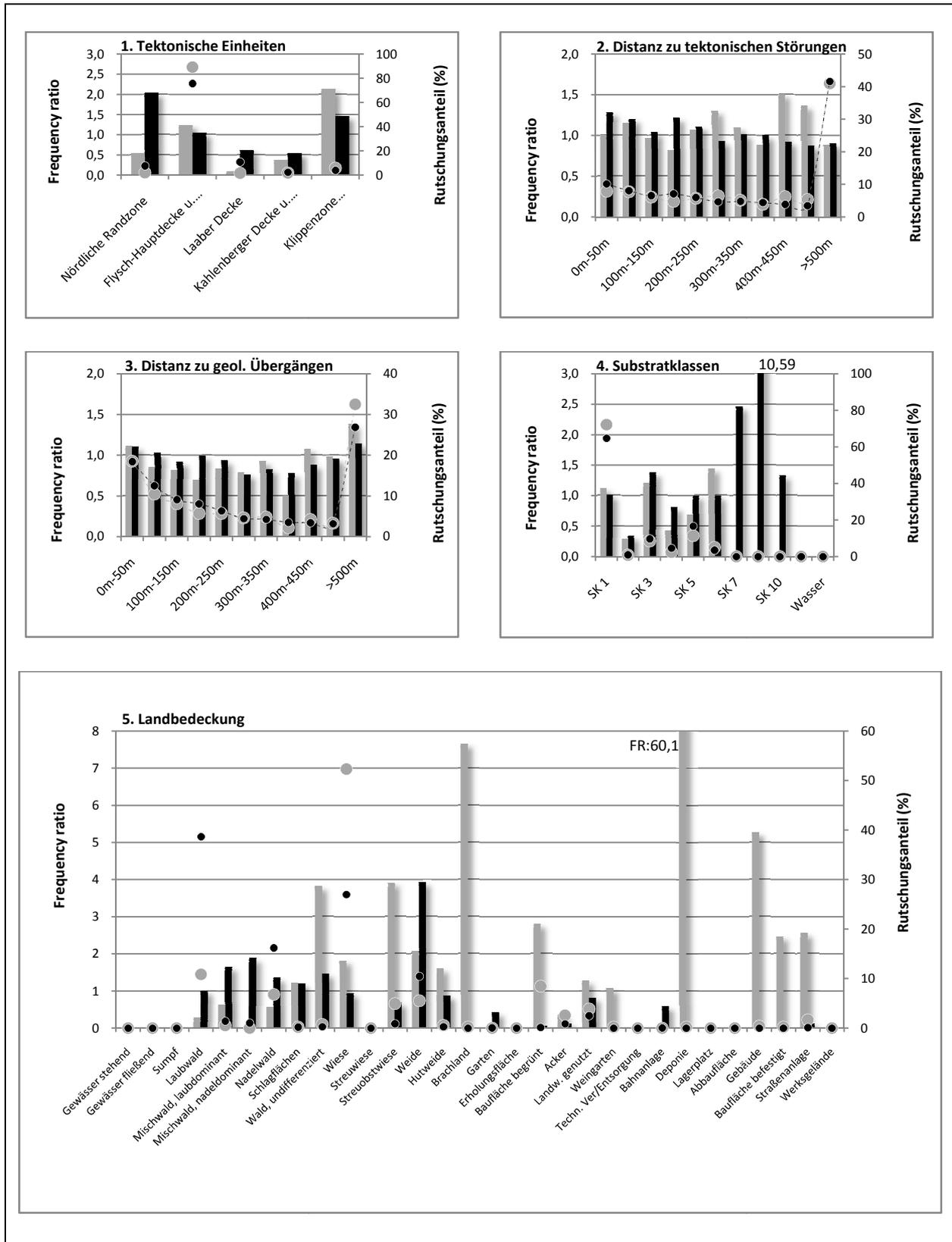
A 5: Histogramme

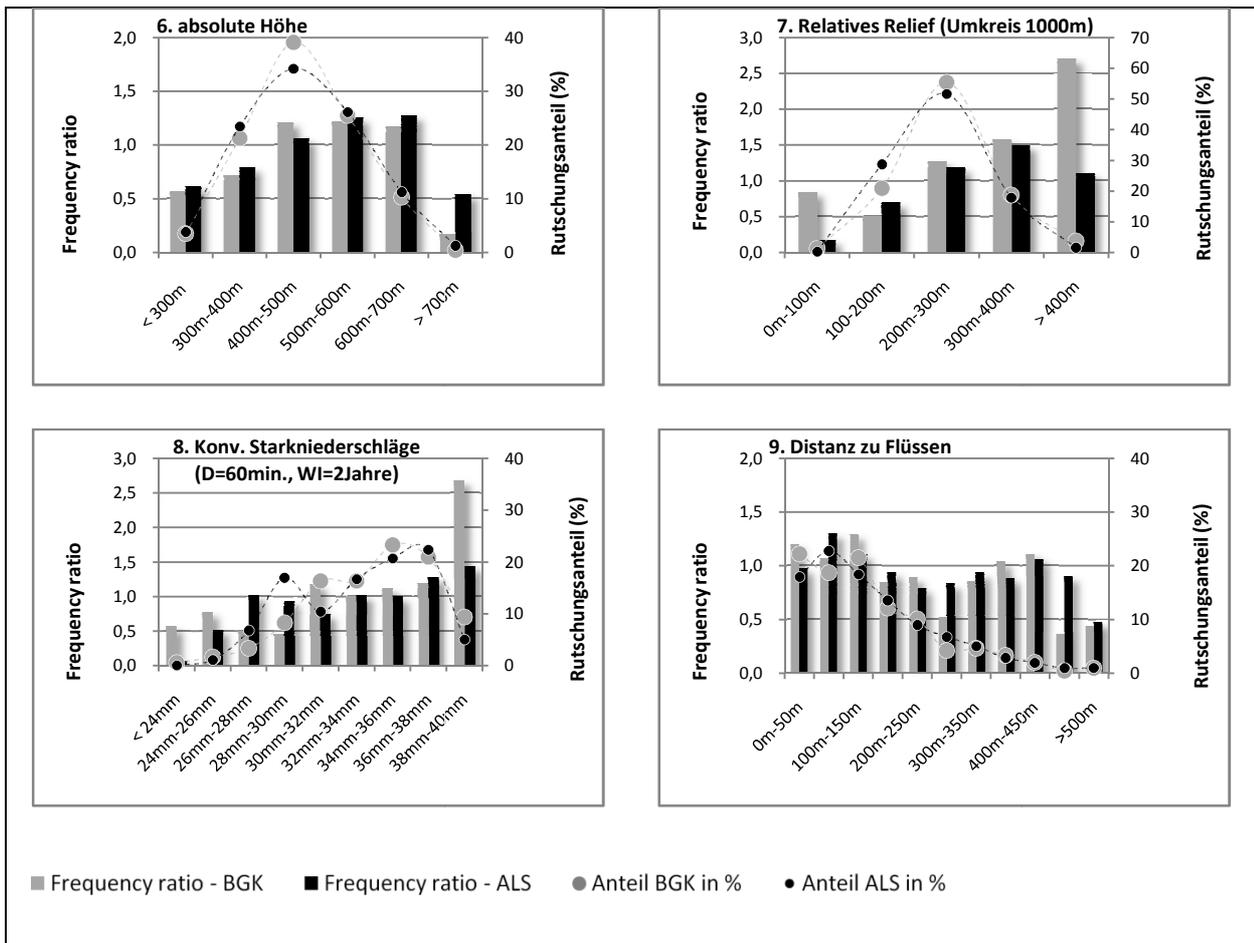






A 6: FR-Diagramme





A 7: Korrelationskoeffizienten >|0,3| nach Spearman

Variable	Korrelation (>0,3) - ALS	Korrelation (>0,3) - BGK
Hangneigung	Relatives Relief (0,4), Landbedeckung (0,36)	Relatives Relief (0,39)
Absolute Höhe	Distanz zu geologischen Übergängen (0,31), Distanz zu Strassen (0,34), Mittlerer Jahresniederschlag (0,62), Relatives Relief (0,61)	Distanz zu geologischen Übergängen (0,32), Distanz zu Strassen (0,4), Mittlerer Jahresniederschlag (0,53), Relatives Relief (0,59)
Relatives Relief	Absolute Höhe (0,61), Mittlerer Jahresniederschlag (0,57), Hangneigung (0,4)	Geologische Formationen (0,34), Absolute Höhe (0,58), Mittlerer Jahresniederschlag (0,59), Hangneigung (0,39)
FR: Topographic Position Index	Distanz zu Flüssen (0,38)	Distanz zu Flüssen (0,54)
FR: Geologie	Substratklassen (0,33), Tektonische Einheiten (0,72), Mittlerer Jahresniederschlag (0,31)	Landbedeckung (0,35), Substratklassen (0,3), Tektonische Einheiten (0,77), Mittlerer Jahresniederschlag (0,57), Relatives Relief (0,34)
FR: Tektonische Einheiten	FR: Geologische Formationen (0,72)	Geologische Formationen (0,77), Landbedeckung (0,32), Substratklassen (0,33)
Distanz zu tektonischen Störungen	Distanz zu geologischen Übergängen (0,47)	Distanz zu geologischen Übergängen (0,5)
Distanz zu geol. Übergängen	Absolute Höhe (0,31), Distanz zu tektonischen Störungen (0,47)	Absolute Höhe (0,32), Distanz zu Flüssen (0,32), Distanz zu tektonischen Störungen (0,5)
FR: Landbedeckung	Hangneigung (0,36)	Geologische Formationen (0,35), Landnutzung reklassifiziert (0,89), Tektonische Einheiten (0,32), Distanz zur Verbauung (0,4), Mittlerer Jahresniederschlag (0,41)
Distanz zu Verbauung	Distanz zu Straßen (0,47)	Landbedeckung (0,4), Landbedeckung reklassifiziert (0,43), Distanz zu Straßen (0,43)
Distanz zu Strassen	Absolute Höhe (0,34), Distanz zur Verbauung (0,47)	Absolute Höhe (0,4), Distanz zur Verbauung (0,43)
Distanz zu Flüssen	Topographic Position Index (0,38)	Topographic Position Index (0,54)
Mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990)	Geologische Formationen (0,31), Landbedeckung reklassifiziert (0,4), absolute Höhe (0,62), relatives Relief (0,57)	Geologische Formationen (0,57), Landbedeckung (0,4), Landbedeckung reklassifiziert (0,3), Tektonische Einheiten (0,42), absolute Höhe (0,53), relatives Relief (0,59)
FR: Substratklassen	Geologische Formationen (0,33)	Geologische Formationen (0,3), tektonische Einheiten (0,33)

A 8: Vorselektion der Variablen aufgrund der explorativen Datenanalyse

Variable	Input für Modellierung?		Entscheidungsgrundlage
	ALS	BGK	
Hangneigung	Ja	Ja	Frequency ratio, Dichtekarte
Absolute Höhe	Nein	Nein	kein klarer Zusammenhang (vgl. Frequency ratio)
Exposition	Ja	Ja	Frequency ratio
Relatives Relief	Nein	Nein	Korrelation mit Hangneigung, Dichtekarte (wird durch Hangneigung repräsentiert)
Wölbung	Ja	Nein	Ja: Frequency ratio Nein: Frequency ratio, BGK-Lageungenauigkeit
Topographic Position INDEX	Ja	Ja	Frequency ratio
Geologische Formationen	Ja	Ja	Frequency ratio, Vergleich Inventar-Dichtekarten mit geologischen Übersicht;
Tektonische Einheiten	Nein	Nein	Korrelation mit Geologie
Distanz zu tektonischen Störungen	Nein	Nein	Frequency ratio
Distanz zu geol. Übergängen	Nein	Nein	Frequency ratio
Landbedeckung	Nein	Nein	Erklärbarer systematischer Fehler bei beiden Inventaren, vgl. Diskussion 6.1.5, Modellierungsversuche zeigen unrealistische Ergebnisse;
Landbedeckung reklassifiziert	Nein	Nein	„siehe Landbedeckung“
Waldbedeckung	Nein	Nein	„siehe Landbedeckung“
Distanz zu Verbauung	Nein	Nein	„siehe Landbedeckung“
Distanz zu Strassen	Nein	Nein	„siehe Landbedeckung“
Distanz zu Flüssen	Nein	Nein	Korrelation mit Topographic Position INDEX (Tal)
Mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990)	Ja	Ja	Frequency ratio, Dichtekarten, AIC, Signifikanz
Konvektive Starkniederschläge	Nein	Nein	Auflösung der Daten, Dichtekarten, hohe visuelle Ähnlichkeit mit mittleren Jahresniederschlag
Substratklassen	Nein	Nein	Hohe visuelle Ähnlichkeit mit geologischen Formationen, Daten nur bis 1 Meter Tiefe gültig, Frequency ratio

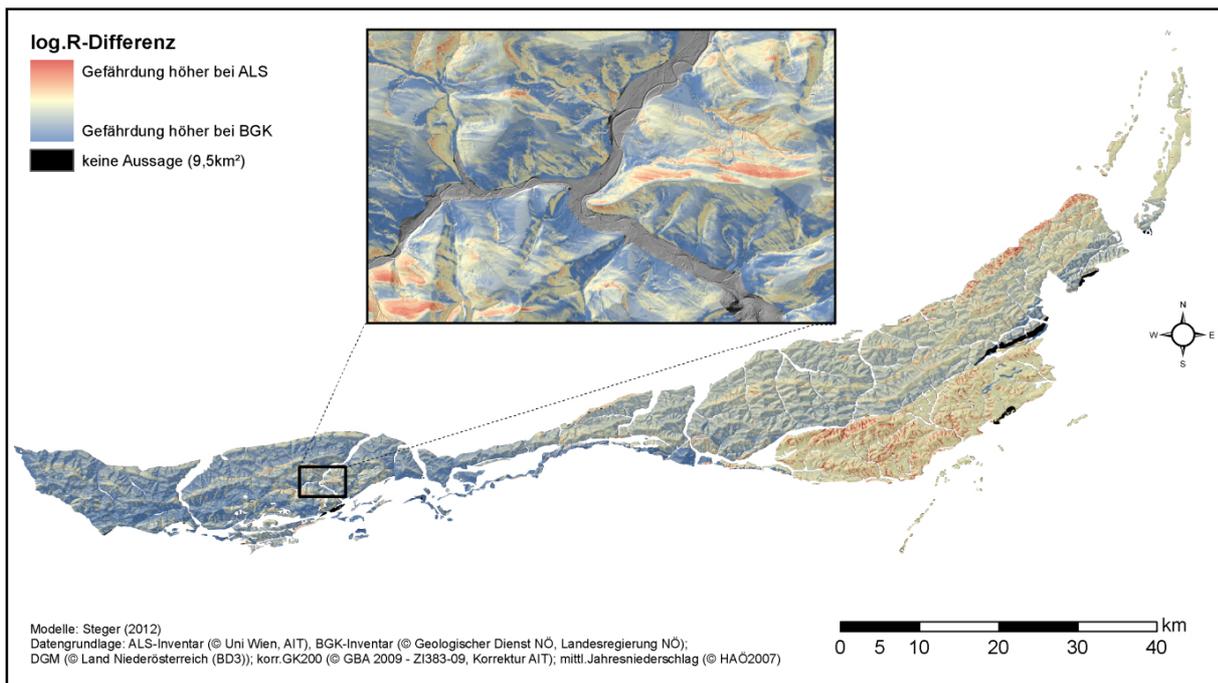
Anhang B - Ergebnisse Gefährdungsmodellierung

B 1: Nicht standardisierte Beta Koeffizienten, Signifikanzen und AIC der erklärenden Variablen der finalen logistischen Regressionsmodelle

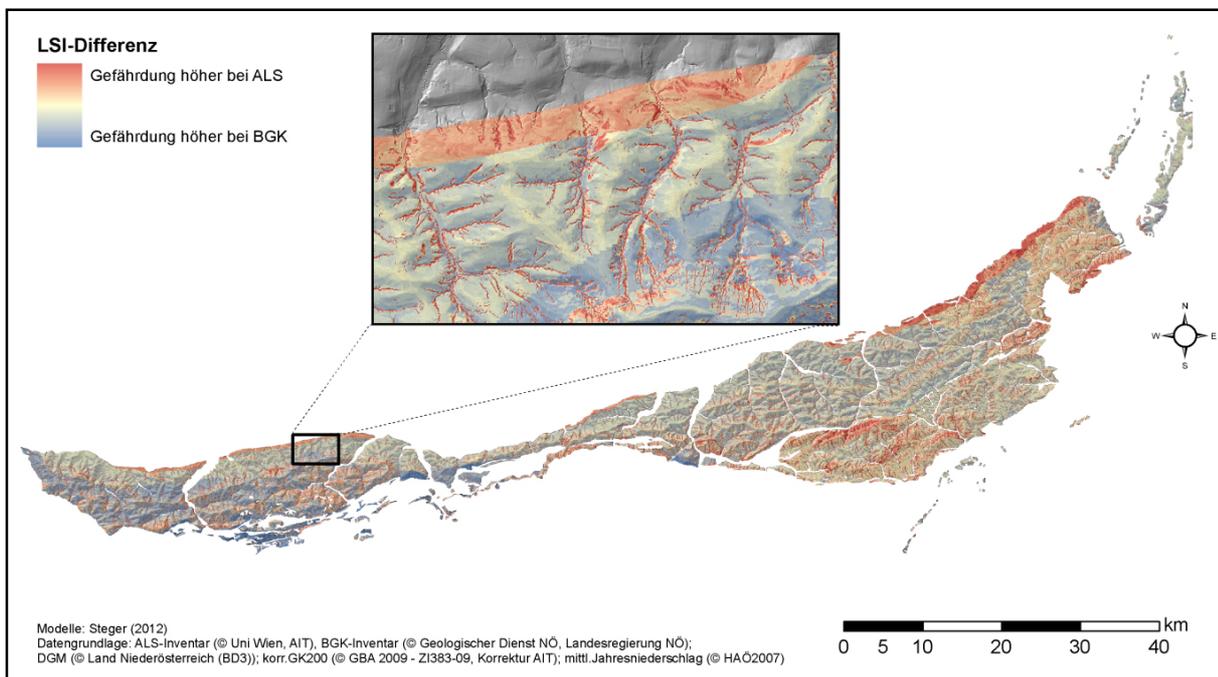
	ALS		BGK	
	Beta	Stand. Beta	Beta	Stand. Beta
(Intercept)	-4.840 ***	0.062817	-5.326 ***	-0.01532
Mittlerer Jahresniederschlag	0.001535 ***	0.269123 ***	0.004817 ***	0.88835 ***
Hangneigung	0.2091 ***	1.441335 ***	0.05440 ***	0.34196 ***
Osten	0.515269 ***		1.12819 ***	
Süden	0.481098 ***		0.65841 ***	
Westen	0.233953 **		0.51576 *	
TPI: Kuppen	-1.655632 ***		-1.80669 *	
TPI: Oberhang	-0.766816 ***		-0.85999 ***	
TPI: Tal	-1.600307 ***		-0.48959 .	
TPI: Unterhang	-0.244027 ***		0.05086	
Geologie_Gaultflysch410	-11.597287		Keine Aussage	
Geologie_Gaultflysch417	1.424287 ***		Keine Aussage	
Geologie_Greifenstein404	0.147309		-0.79976 .	
Geologie_Grestenformation42	-2.197687 .		-15.10090	
Geologie_Hoehere Flysch405	-1.384818 ***		0.70645	
Geologie_Huetteldorf416	-0.161693		1.57176	
Geologie_Kahlenberg415	-0.769077 ***		0.79382	
Geologie_kalkiger Flysch401	2.463253 ***		-14.43048	
Geologie_Kaumberg413	-0.243012		-2.85188 **	
Geologie_Kl Keuper421	-1.445696		-14.19523	
Geologie_KlippenSt Veit419	-13.381496		-15.45125	
Geologie_Laab Aggsbach411	-0.542525 ***		-2.06481 ***	
Geologie_Laab Hois412	-0.929914 ***		-2.69236 ***	
Geologie_Neokomflysch424	-1.239621 **		1.48544	
Geologie_Ophiolit426	-0.213416		-1.10224	
Geologie_Radiolarit425	-0.159472		-1.63747 .	
Geologie_Reiselberg409	0.009738		-1.06355	
Geologie_Serpentinit402	11.823067		Keine Aussage	
Geologie_Sievering414	-0.157657		17.37214	
Geologie_Sulz427	-11.978118		Keine Aussage	
Geologie_Tiefere Flysch408	0.037208		0.56536	
Geologie_Wolfpassing400	1.182263 ***		-0.17302	
Geologie_Ybbsitzer Flysch423	-0.278374		-1.43689 **	
Geologie_Ybbsitzer Klippen422	-0.453270		-15.56868	
Geologie_Zementmergelserie4	0.196781 .		-0.64241 *	
Wölbung	-0.2586 ***	-0.449488 ***	nicht modelliert	nicht modelliert
AIC	9782.9		1213.9	

Signifikanz: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '' 1

B 2: Differenz zwischen den Gefährdungswerten der logistischen Regressionsmodelle



B 3: Differenz zwischen den Gefährdungswerten der LSI-Modelle



Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Stefan Steger

Geburtstag: 24.07.1983

Geburtsort: Bruneck

Staatsbürgerschaft: Italien

E-Mail: stefansteger@hotmail.com

Bildungsgang

2005 - 2012 Diplomstudium Geographie \ Theoretische und angewandte Geographie

Schwerpunktfach: Angewandte Geomorphologie

Wahlfach 1: Geoinformation und Visualisierung

Wahlfach 2: Alpine Naturgefahren (Universität für Bodenkultur, Wien)

2000 - 2005 Handelsoberschule, Bruneck (Südtirol)

1997 - 2000 Lehre: Lebensmittelfachverkäufer

1994 – 1997 Mittelschule, Bruneck (Südtirol)

1989 – 1994 Volksschule, Pfalzen

Praktikum

Umweltbundesamt GmbH, Wien

Sprachen

Deutsch (Muttersprache)

Italienisch und Englisch (Wort und Schrift)

EDV-Kenntnisse

Microsoft Office

ArcGIS

SPSS

R