universität wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Physikalisch basierte Gefährdungsmodellierung flachgründiger Translationsrutschungen in einem geologisch heterogenen Gebiet mittels SINMAP – dargestellt am Bezirk Waidhofen/Ybbs (Niederösterreich)“

Verfasser

Ekrem Canli BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:	A 066 855
Studienrichtung lt. Studienblatt:	Masterstudium Geographie
Betreuerin / Betreuer:	Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe, dass ich dieses Masterarbeitsthema 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, 26. April 2013 Ekrem Canli

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meinem Masterarbeitsbetreuer Prof. Dr. Thomas Glade bedanken, der mir mit seiner fachlichen Kompetenz immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Darüber hinaus hat er im Wesentlichen dazu beigetragen, dass ich während meiner Studienzeit stets großen Spaß daran hatte, mich mit der eigentlich so ernsten Thematik der Naturgefahren zu beschäftigen. Ohne einzelne Namen nennen zu wollen, möchte ich mich auch geschlossen bei der Arbeitsgruppe *ENGAGE Geomorphologische Systeme und Risikoforschung* am Institut für Geographie und Regionalforschung an der Universität Wien bedanken.

Benni Thiebes danke ich sehr herzlich für zahlreiche sehr zweckdienliche Hinweise bezüglich des angewendeten Modells. Mein Dank gebührt auch den Entwicklern von SINMAP, Robert Pack und David Tarboton, die mir mit der Beantwortung einiger Fragen sehr zum Verständnis des Modells beigetragen haben. Dem Land Niederösterreich danke ich für die gute Kooperation mit unserer Arbeitsgruppe – ohne die von ihnen zur Verfügung gestellten Daten wäre diese Arbeit in der Form nicht durchführbar gewesen.

Mein spezieller Dank gilt meinen Eltern. Trotz meiner alles andere als berühmten Schullaufbahn, haben sie mir dennoch alles offen gelassen und mich während meiner Studienzeit unterstützt, wo sie nur konnten. Ohne ihre Hilfe wäre meine Studienzeit nicht annähernd so schön gewesen, wie sie letztendlich war.

Danke!

Wien, 26. April 2013 Ekrem Canli

Zusammenfassung

Trotz erheblicher Fortschritte in der Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen innerhalb des letzten Jahrzehnts, stellen u.a. Rutschungen weltweit nach wie vor eine große Gefahr dar, die Infrastruktur und Menschenleben gleichermaßen bedrohen. Aus diesem Grund ist es im Rahmen des Risikomanagements essentiell, zunächst die Rutschungsgefährdung für ein spezifisches Gebiet zu bestimmen. Einen Beitrag dazu liefert die hier vorliegende Arbeit. Auf Basis eines physikalisch basierten, deterministischen Ansatzes, wird die Hangstabilität für den gesamten Bezirk Waidhofen/Ybbs mit dem Modell SINMAP (Pack et al., 1998) berechnet. SINMAP basiert auf den theoretischen Grundlagen des *infinite slope stability models* in Kombination mit einem hydrologischen Modell, welches Parameter aus einem hoch aufgelösten Digitalen Geländemodell (DGM) ableitet. Die Berechnung des Stabilitätsindex erfolgt durch die Parametrisierung von bodenphysikalischen Parametern, die für unterschiedliche Kalibrationsgebiete erhoben wurden. Das Untersuchungsgebiet weist eine sehr heterogene Geologie auf, wobei speziell der nördliche Teil mit über 800 Rutschungen eine extrem hohe Rutschungsdichte aufweist. Die unterschiedliche Lithologie hat es erfordert, das Untersuchungsgebiet in einen nördlichen (überwiegend Flysch und Klippenzone) und südlichen (Kalk und Dolomit) Teil zu trennen. Die Modellierung hat ergeben, dass stets mind. 77% der kartierten Rutschungen in den drei geringsten Stabilitätsklassen liegen. Die Modellierung wurde jeweils in verschiedenen räumlichen Auflösungen durchgeführt, um Differenzen, die sich aus der Datengrundlage ergeben, zu ermitteln. Jedoch hat der Vergleich mit einer für das Untersuchungsgebiet bereits durchgeführten statistischen Modellierung gezeigt, dass bei Klassifikation gleicher Gefährdungsklassen für das nördliche Untersuchungsgebiet zwar eine gute Übereinstimmung vorliegt (über 70% der Pixel mit der selben Gefährdungsklasse klassifiziert), im südlichen jedoch eine sehr große Diskrepanz vorherrscht (nur 29% der Pixel mit der selben Gefährdungsklasse). Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass bei einer Änderung der Eingangsparameter der Reibungswinkel die größten Auswirkungen auf das Modell hat. Nur geringe Änderungen würden sich hingegen durch eine Veränderung des hydrologischen Parameters ergeben. Trotz des positiv bewerteten Modelloutputs für das nördliche Untersuchungsgebiet bleiben dennoch viele Fragen offen, speziell, da die Unterschiede zwischen deterministischer und statistischer Modellierung im südlichen Untersuchungsgebiet so groß ausfallen. Eine Kombination aus beiden Modellierungsansätzen ist für zukünftige Arbeiten erstrebenswert, da durch die Implementierung deterministischer Ansätze die physikalische Interpretation erhöht werden kann.

Abstract

Although there have been major advances in the analysis of landslide hazard within the last decade, landslides still pose a substantial threat to infrastructure and lives on a global scale. Within the field of risk management it is crucial to obtain information on landslide susceptibility for a specific area beforehand. This thesis contributes to that related topic. Based on a deterministic approach, the slope stability for the whole district of Waidhofen/Ybbs is being calculated with the SINMAP model (Pack et al., 1998). SINMAP has its theoretical roots in the *infinite slope stability model* combined with a hydrological model that obtains wetness from a high resolution Digital Terrain Model (DTM). The stability index is calculated for different calibration areas by the parametrization of different geotechnical parameters. The study area consists of very heterogeneous geological conditions in which particularly the northern part exhibits more than 800 landslides resulting in a very high landslide density. Due to these different lithologies it was necessary to split the study area into a northern part (consisting mainly of Flysch and Klippen zone) and a southern part (Limestone and Dolomite). Modeling results revealed that at least 77% of the mapped landslides are within the three lowest stability classes. The modeling was carried out in different spatial resolutions to estimate the difference caused by a changing data basis. A comparison with a previously realized statistical modeling for the same study area revealed substantial differences. The unified susceptibility classes displayed a good match for the northern part where more than 70% of the pixels were classified with the same susceptibility class. Whereas the southern part revealed a high mismatch, as only 29% of the pixels are within the same susceptibility class. Results of the sensitivity analysis proved that changing values of the friction angle bear the greatest impact on the model. Only slight changes to the model outcome occur when changes in the hydrological parameter take place. Although the results of the northern part are considered to be adequate, there are still a lot of questions to be answered. This is due to the comparison with the statistical model, as differences, particularly in the southern part, are enormous. A combination of both modeling approaches, statistical and deterministic, is advised since this adds a better physical interpretation to empirical models.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **7**
- 1.1 Zielsetzung . . . 8
- 1.2 Arbeitshypothese . . . 9

2 Theorie **11**
- 2.1 Gravitative Massenbewegungen . . . 11
- 2.2 Aspekte der Hangstabilität . . . 13
- 2.3 Physikalische Grundlagen . . . 15
  - 2.3.1 Reibung, Kohäsion und Scherspannung . . . 15
  - 2.3.2 Factor of Safety . . . 17
- 2.4 Naturgefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen . . . 18
  - 2.4.1 Risiko: Begriffe und Definitionen . . . 19
  - 2.4.2 Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen . . . 21

3 Methoden **25**
- 3.1 Stability Index Mapping (SINMAP) . . . 26
  - 3.1.1 Das *Infinite Slope Stability Model* . . . 26
  - 3.1.2 Topographischer Feuchteindex . . . 29
  - 3.1.3 Definition des Stabilitätsindex . . . 31
- 3.2 Aufbereitung der Eingangsdaten . . . 33
  - 3.2.1 Erstellung der Kalibrationsgebiete . . . 33
    - 3.2.1.1 Ableitung von Bodensubstratklassen . . . 33
    - 3.2.1.2 Ermittlung bodenphysikalischer Parameter . 34
    - 3.2.1.3 Kombination unterschiedlicher Kartengrundlagen . . . 37
  - 3.2.2 Digitales Geländemodell (DGM) . . . 38
  - 3.2.3 Inventar gravitativer Massenbewegungen . . . 38
  - 3.2.4 Aufteilung des Untersuchungsgebietes . . . 39
- 3.3 DGM Rasteranalyse . . . 40
- 3.4 Stabilitätsanalyse . . . 40
- 3.5 Sensitivitätsanalyse . . . 41
- 3.6 Vergleich mit statistischer Modellierung . . . 43
- 3.7 Daten . . . 45

4 Untersuchungsgebiet **47**
4.1 Geologie Niederösterreichs 47
4.2 Rutschungen in Niederösterreich 47
4.3 Untersuchungsgebiet Waidhofen an der Ybbs 49
4.3.1 Klima 49
4.3.2 Geologie 52
4.3.3 Hydrologie 55
4.3.4 Landnutzung 55
4.3.5 Böden 56
4.3.6 Geomorphologie 57
4.3.7 Gravitative Massenbewegungen in Waidhofen/Ybbs . 59

5 Ergebnisse **60**
5.1 Erstellung von Eingangsdaten 60
5.1.1 Ermittlung von Bodengruppen 60
5.1.2 Festlegung der Kalibrationsgebiete 62
5.1.3 Parametrisierung 64
5.1.4 Digitales Geländemodell (DGM) 67
5.2 Rasteranalyse 67
5.3 Stabilitätsanalyse 75
5.4 Gefährdungsmodellierung mit SINMAP mit verschiedenen Eingangsdaten 75
5.4.1 Einfluss der räumlichen Auflösung 77
5.4.2 Einfluss verschiedener Kalibrationsgebiete 78
5.5 Sensitivitätsanalyse 81
5.5.1 Gemeinsame Veränderung des Minimum- *und* Maximumwertes 86
5.5.2 Veränderung des Minimum- *oder* Maximumwertes . . 87
5.6 Vergleich mit statistischer Modellierung 88

6 Diskussion und Perspektiven **95**
6.1 Diskussion und Unsicherheiten 95
6.2 Perspektiven 104

Abbildungsverzeichnis **107**

Tabellenverzeichnis **111**

Literaturverzeichnis **113**

Appendices **121**

Anhang A **122**
A.1 Formationen im Bezirk Waidhofen/Ybbs 123

Anhang B **124**
B.1 Rutschungen in Niederösterreich 125

Anhang C **126**
C.1 Zuordnung von Formationen zu Substratklassen 127
C.2 Geologische Substratklassen 131

Anhang D **135**
D.1 Gefahrenhinweiskarten für Waidhofen/Ybbs Nord 136
D.2 Gefahrenhinweiskarten für Waidhofen/Ybbs Süd 139

Anhang E **142**
E.1 Sensitivitätsanalyse Eingangsdaten – WY Nord 143
E.2 Sensitivitätsanalyse Eingangsdaten – WY Süd 146

Kapitel 1

Einleitung

Trotz erheblicher Fortschritte in den letzten Jahren auf dem Gebiet der Gefahrenanalyse und dem Risikomanagement, stellen gravitative Massenbewegungen weltweit nach wie vor eine große Gefahr für Infrastruktur und Leben dar. Schwerwiegende Rutschungsereignisse der letzten Jahre, wie z.B. jene die durch schwere Niederschläge ausgelöst wurden in Messina (Italien, Oktober 2009), Bududa (Uganda, März 2010) und Rio de Janeiro (Brasilien, Jänner 2011) oder jene die durch Erdbeben verursacht wurden in Haiti (Jänner 2010) und Wenchuan (China 2008), aber auch Rutschungen in Österreich wie jene in Feldbach 2009, Gasen/Haslau 2005 und wiederholt in den Bezirken Waidhofen/Ybbs und Scheibbs verdeutlichen die Wichtigkeit von Gefährdungsanalysen zur Identifikation der am stärksten betroffenen Gebiete. Häufig stehen jedoch daraus entwickelte Karten nicht zur Verfügung, da sie zeitaufwändig sind, ausreichende finanzielle Mittel erforderlich sind, erfahrene Experten auf dem Gebiet erfordern und vor allem genaue Datengrundlagen benötigt werden, um die kontrollierenden und auslösenden Faktoren für Rutschungen identifizieren zu können (Eeckhaut et al. 2012).

Tatsächliche Opferzahlen aufgrund von gravitativen Massenbewegungen sind schwierig zu quantifizieren. Petley (2012) nennt dafür zwei Gründe. Einerseits mangelt es an einer systematischen Datenerfassung, wie es von anderen Gefahrentypen her bekannt ist. Dies liegt womöglich daran, dass Massenbewegungen sehr weit verbreitet sind und häufig in abgelegenen Gebieten auftreten. Andererseits liegt dies in der Natur von Gefahrendatenbanken, die Todesfälle als Folge des auslösenden Ereignisses angeben, und nicht aufgrund der tatsächlichen Ursachen. Demzufolge werden Todesfälle in Folge von Massenbewegungen i.d.R. dem verursachenden Erdbeben oder tropischen Zyklon zugerechnet. Daraus folgt, dass „previous estimates of human losses associated with landslides unterestimate the magnitude of their impact“ (Petley 2012: S. 927). Untersuchungen von Petley (2012) zufolge er-

eigneten sich zwischen 2004 und 2010 ca. 2620 Massenbewegungen mit etwa 32.300 Todesopfern.

Verursacht durch den Klimawandel, Landnutzungsänderungen und Bevölkerungsdruck ist bereits eine weltweite Zunahme der Rutschungsgefährdung und des -risikos festzustellen. Aus diesen Gründen ist eine kontinuierliche Verbesserung der Modelle und Karten hinsichtlich der Rutschungsgefährdung erforderlich, um die Auswirkungen auf Infrastruktur und Mensch so weit als möglich zu reduzieren (Goetz et al. 2011). Es liegt bereits ein breites Methodenspektrum vor, um die Gefährdung aufgrund von gravitativen Massenbewegungen zu ermitteln. Die hier vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse der Rutschungsgefährdung des Bezirks Waidhofen/Ybbs im südwestlichen Niederösterreich auf Basis eines physikalisch basierten, deterministischen Modells. Das Untersuchungsgebiet ist vor allem durch die sehr heterogene Geologie gekennzeichnet, wobei vor allem der nördliche Teil mit ca. 800 Rutschungen eine extrem hohe Rutschungsdichte aufweist. Ein Großteil der hier verwendeten Daten wurde vom Land Niederösterreich zur Verfügung gestellt.

1.1 Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für den gesamten Bezirk Waidhofen/Ybbs. Die Methodik basiert auf einem physikalisch basierten, deterministischen Ansatz und wurde in dieser Form im vorliegenden Untersuchungsgebiet bis dato noch nicht durchgeführt. Das verwendete Modell SINMAP (Pack et al. 1998) wurde in zahlreichen Untersuchungen weltweit erfolgreich angewendet und ermöglicht aufgrund der Parametrisierung einiger bodenphysikalischer Parameter die Berechnung eines Stabilitätsindex, der für jedes Pixel einzeln ermittelt wird. Die Gefahrenhinweiskarten basieren auf unterschiedlichen Kalibrationsgebieten und Auflösungen.

Zusätzlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss einzelner Parameter auf das Modell zu quantifizieren und deren jeweilige Bedeutung für das Untersuchungsgebiet aufzuzeigen. Der letzte Schritt umfasst einen Vergleich des Modelloutputs aus der deterministischen Modellierung mit dem Output einer bereits durchgeführten statistischen Modellierung für dasselbe Untersuchungsgebiet. Dies soll die Stärken und Schwächen der jeweiligen Modelle aufzeigen und die Differenzen in der räumlichen Gefährdung evaluieren.

1.2 Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese dieser Arbeit lautet:

„Physikalisch basierte, deterministische Stabilitätsmodelle (z.B. SINMAP Stability INdex MAPping) ermöglichen eine plausible Darstellung der räumlichen Gefährdung flachgründiger Translationsrutschungen. Eine anschließende Sensitivitätsanalyse liefert Aussagen darüber, wie sehr Änderungen bei den Eingangsbedingungen ein Ergebnis beeinflussen. Der abschließende Vergleich mit einer multivariaten Analyse im selben Untersuchungsgebiet zeigt die Unterschiede zu der deterministischen Analyse auf.“

Diese übergeordnete Arbeitshypothese wird anhand von drei thematisch getrennten Frageblöcken bearbeitet:

1. Welche Parameter erfordert das verwendete Modell und wie wirkt sich die Qualität dieser Daten auf die Modellgüte aus?

   (a) Durch das Fehlen von eigenständig *in situ* erhobenen geotechnischen Parametern werden Werte aus der Literatur herangezogen. Wie gut eignen sich solche Daten für die Gefährdungsmodellierung von Rutschungen auf der regionalen Ebene?

   (b) Lassen sich aus dem Digitalen Geländemodell über mathematische Funktionen für das angewendete Modell realistische Derivate für den Hangabfluss und die Bodenwassersättigung erstellen?

   (c) Ermöglichen parameterarme, gekoppelte hydrologische Stabilitätsmodelle eine plausible Darstellung rezenter Rutschungstätigkeit?

2. Wie wirkt sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse eine Abänderung der Eingangsparameter auf das Modell aus?

   Die Sensitivitätsanalyse liefert allgemein Aussagen darüber, wie sehr Änderungen bei den Eingangsbedingungen ein Ergebnis beeinflussen, also wie sensitiv ein System reagiert. Hierzu soll geklärt werden, wie sich die Resultate der Gefährdungsmodellierung ändern, wenn:

   (a) die Werte der geotechnischen Parameter innerhalb eines festgelegten Wertebereichs modifiziert werden.

   (b) die räumliche Auflösung des zugrunde liegenden Digitalen Geländemodells modifiziert wird.

   (c) Annahmen über zukünftige Veränderungen der variablen Disposition (z.B. klimatische Änderungen) getroffen werden.

3. Wie wirkt sich der zugrunde liegende Modellierungsansatz (deterministische vs. statistische Modellierung) auf die räumliche Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet aus?

   Hierzu soll geklärt werden:

   (a) inwiefern sich im Bezirk Waidhofen/Ybbs die Ergebnisse der deterministischen Gefährdungsmodellierung verglichen mit jener der statistischen unterscheiden.

   (b) welche die Vor- und Nachteile der jeweiligen Modellierungsmethoden für das Untersuchungsgebiet sind.

Kapitel 2

Theorie

Einleitend werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit behandelt. Dabei werden die gängigen Definitionen für Begriffe aus dem Umfeld der Risikoforschung erläutert sowie eine Klassifikation unterschiedlicher Typen gravitativer Massenbewegungen vorgestellt. Aspekte der Hangstabilität werden aus physikalischer Sichtweise erläutert. Anschließend werden Ansätze der räumlichen Naturgefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen sowie das dafür vorgesehene Methodenspektrum vorgestellt.

2.1 Gravitative Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen werden von Glade und Dikau (2001: S. 42) definiert als „hangabwärts gerichtete Bewegungen von Fels- und/oder Lockergestein unter der Wirkung von Schwerkraft“. Dabei werden mit dem Begriff der gravitativen Massenbewegungen verschiedene Prozessarten unterschieden: Fallen, Kippen, Driften, Fließen, Rutschen/Gleiten sowie komplexe Bewegungen. In der Realität ist es jedoch schwierig, ein Ereignis einer bestimmten Klasse zuzuordnen, da häufig eine Bewegungsform in eine andere übergeht (Glade und Crozier 2005a). So können z.B. Rutschungen bei zunehmendem Wassergehalt in Muren übergehen.

Um in der Forschung und Praxis eine möglichst große Vergleichbarkeit von Untersuchungen zum Thema gravitativer Massenbewegungen zu erzielen, ist eine einheitlich verwendete Klassifikation notwendig. In der geomorphologischen Forschung etablierte Klassifikationen von Cruden und Varnes (1996), Hutchinson (1988), Dikau et al. (1996) und Hungr et al. (2001) nehmen eine Unterscheidung nach beteiligten Prozess- und Materialtypen vor (Abb. 2.1). In der englischsprachigen Naturgefahrenforschung werden für gravitative Massenbewegungen häufig die synonym verwendeten Begriffe *mass wasting*, *mass movements* oder *landslides* verwendet.

Process	Material		
	Rock	Debris	Earth
Fall	Rockfall	Debris fall	Earthfall
Topple	Rock topple	Debris topple	Earth topple
Rotational slide	Single (slump)	Single	Single
	Multiple	Multiple	Multiple
	Successive	Successive	Successive
Translational slide	Block slide	Block slide	Slab slide
Planar	Rockslide	Debris slide	Mudslide
Lateral spreading	Rock spreading	Debris spread	Earth spreading
Flow	Rockflow (Sackung)	Debris flow	Earthflow
Complex	e.g. Rock avalanche, Bergsturz	e.g. flow slide	e.g. slump – earthflow

Abbildung 2.1: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Dikau et al. (1996). Quelle: Glade und Crozier (2005a)

Aus modellbedingten, methodischen Gründen und der Auswahl des bearbeiteten Untersuchungsgebietes erfolgt im Zuge dieser Arbeit eine ausschließliche Behandlung flachgründiger Translationsrutschungen. Dikau et al. (1996) beschreiben diesen Prozess als translationsförmige Bewegung von Boden oder Lockermaterial entlang einer planaren Scherfläche. Entlang dieser Scherflächen erfolgt die Scherbewegung häufig an a) Schwächezonen, die sich im Untergrundmaterial ausbilden (Schichtung, Schieferung) oder b) Kontaktzonen zwischen permeablen oder impermeablen Bodenschichten bzw. –horizonten (Abb. 2.2).

Das *United States Geological Survey* (USGS) definiert Translationsrutschungen folgendermaßen: „The mass in a translational landslide moves out, or down and outward, along a relatively planar surface with little rotational movement or backward tilting. This type of slide may progress over considerable distances if the surface of rupture is sufficiently inclined, in contrast to rotational slides, which tend to restore the slide equilibrium. [...] Translational slides commonly fail along geologic discontinuities such as faults, joints, bedding surfaces, or the contact between rock and soil“ (Highland und Bobrowsky 2008: S. 10). Translationsrutschungen gehören zu den häufigsten Rutschungstypen weltweit, so auch in Niederösterreich. Sie sind i.d.R. flachgründiger als Rotationsrutschungen und können von sehr kleinen Rutschungen (Größe eines Einfamilienhauses) bis zu mehreren Kilometer langen Rutschungen reichen. Die Prozessgeschwindigkeit schwankt stark, so können sie Bewegungsraten von 1,5 Meter im Monat bis 1,5 Meter pro Tag und noch schneller erreichen. Mit zunehmender Geschwindigkeit kann die Rutschmasse zerfallen und in Fließprozesse (z.B. Mure) übergehen (Highland und Bobrowsky 2008).

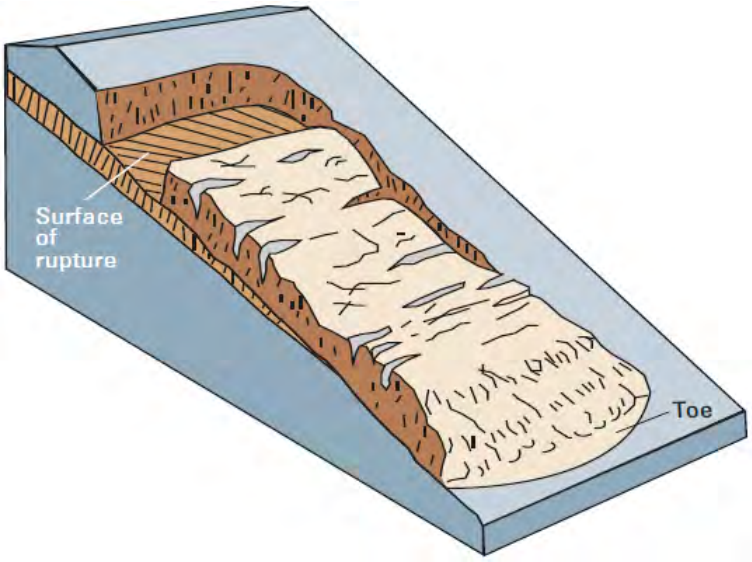


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer Translationsrutschung. Quelle: Highland und Bobrowsky (2008)

2.2 Aspekte der Hangstabilität

Entstehung, Auslösung sowie Ablauf von Hangprozessen sind Teil eines komplexen Systems. Der Zustand eines solchen Systems ist nicht konstant, vielmehr ändert er sich im Laufe der Zeit als dynamisches System. Glade und Crozier (2005a: S. 43) definieren die Hangstabilität als „the propensity for a slope to undergo morphologically and structurally disruptive landslide processes“. Die Veränderlichkeit dieses komplexen Systems, und damit einhergehend jene der Hangstabilität, wird mit dem Begriff der Disposition beschrieben. Die Disposition erfasst den der zeitlichen Variation unterworfenen Systemzustand. Sie „bezeichnet die Anfälligkeit oder Anlage eines Gebietes für die Entstehung und Auslösung von Prozessen“ (Bollinger et al. 2000: S. 18).

Unterschiedliche Faktoren spielen für die Disposition von Hangprozessen eine unterschiedlich große Rolle. Zu diesen Faktoren gehören geologische, hydrogeologische, hydrologische Merkmale ebenso wie Reliefeigenschaften (Hangneigung, Exposition, Kurvatur, etc.). Dabei werden Grunddisposition und variable Disposition unterschieden (Bollinger et al. 2000, Glade und Crozier 2005a):

→ Grunddisposition (*pre-disposing factors*): Diese ist über längere Zeiträume (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) mehr oder weniger unverändert. Sie stellt die von geologischen und hydrogeologischen Grundgegeben-

heiten (z.B. Schuttproduktion, Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Lithologie) sowie Reliefeigenschaften abhängige Anfälligkeiten eines Gebietes für die Entstehung gewisser Prozesse dar. Sie kann in diesem Kontext zusätzlich als Katalysator wirken, in dem z.B. die geologische Schichtung einer Gesteinsformation begünstigend für Hangprozesse wirkt.

→ Variable Disposition (*preparatory factors*): Diese veränderlichen Faktoren führen dazu, die Hangstabilität im zeitlichen Verlauf zu reduzieren ohne jedoch Massenbewegungen selbst auszulösen. Manche dieser Faktoren wirken über lange geomorphologische Zeiträume (unterschiedliche Verwitterung, Klimawandel, tektonische Hebung etc.) wohingegen Hangversteilungen (natürlich durch Erosion oder anthropogen bedingt) oder Abholzung dynamische Faktoren sind, die in einer kleineren zeitlichen Skala wirksam werden.

Die variable Disposition ist auch im Zuge des Klimawandels von großem Interesse, da eine erhöhte Niederschlagsmenge die Disposition dahingehend verändern könnte, dass bei der Annahme, ein positiver Porenwasserdruck sei Hauptauslöser für gravitative Massenbewegungen, dies zu einer höheren Prozessaktivität führen kann (siehe auch Kapitel 2.3.2). Ebenso ist die Vegetation zu der variablen Disposition zu zählen. Fungiert ein Wald unter Umständen als Schutz vor Steinschlag, ist dieser bei Rodung nicht mehr gegeben, womit die Disposition eine gänzlich andere ist. Jedoch kann umgekehrt eine Aufforstung negative Auswirkungen auf den Untergrund ausüben, wenn durch die erhöhte Auflast (*slope loading*) die maximale Scherspannung überschritten wird (Swanston 1974). Andererseits kann ein Waldbestand, je nach Bestandsart, -dichte und -alter, die Hangstabilität auch erhöhen, da durch das Wurzelsystem die Bodenkohäsion erhöht wird. In jedem Fall ist deshalb eine individuelle Herangehensweise bei der Stabilitätsanalyse von Hängen und Wänden erforderlich.

Die Disposition alleine löst jedoch keine gravitativen Massenbewegungen aus; dafür sind zusätzlich auslösende Faktoren (*triggering factors*) notwendig. Ein Hangprozess wird dann ausgelöst, wenn „das System bei gegebener Disposition dermaßen belastet wird, dass der Schwellenwert der einen oder anderen Zustandsgrösse überschritten wird. Bei natürlichen auslösenden Faktoren handelt es sich meist um eine kurzfristige Belastung (z.B. Gewitter, Starkregen, Erdbeben), durch welche ein Prozess ausgelöst wird“ (Bollinger et al. 2000: S. 18). Die Überschreitung eines gewissen Schwellenwertes (*threshold*), die in der Vergangenheit gravitative Massenbewegungen in einem Gebiet ausgelöst hat, muss bei erneuter Überschreitung jedoch nicht notwendigerweise erneut zu Hanginstabilitäten führen. Dadurch, dass bei der vorherigen Überschreitung dieses (z.B. Niederschlags)Schwellenwertes

Hangmaterial in Form von gravitativen Massenbewegungen abgeführt wurde, erhöht sich damit auch der Schwellenwert der notwendig ist, um erneut Massenbewegungen auszulösen. Crozier und Preston (1999) bezeichnen dieses Phänomen als *event resistance*.

2.3 Physikalische Grundlagen

Gravitative Massenbewegungen sind dynamische Phänomene einer komplexen Umwelt. Um diese Komplexität quantitativ erfassen zu können, sind vereinfachende physikalische Annahmen zu treffen. Trotz ihrer Komplexität erfordert das grundsätzliche Verständnis gravitativer Massenbewegungen jedoch nur einiger Gesetze der Mechanik. Die größten Unsicherheiten in der Analyse der Hangstabilität resultieren „more to lack of knowledge on the pysical conditions and materials characteristics, rather than to a lack of knowledge for the basic laws. The motion of landslides can consequently be described in terms of well-known laws of friction, cohesion, and gravity“ (De Blasio 2011: S. 9). In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Auseinandersetzung mit diesen mechanischen Aspekten der Hangstabilität. Nachdem diese Arbeit einen physikalisch basierten Ansatz – jenen des *limiting-equilibriums* – verfolgt, wird zuletzt auf einen häufig in der deterministischen Naturgefahrenanalyse berechneten Sicherheitsfaktor (*factor of safety*) eingegangen.

2.3.1 Reibung, Kohäsion und Scherspannung

Auf einer mit dem Winkel α geneigten Hangfläche liegt ein statisches Objekt auf. Die Gravitationskraft M_g kann dabei in zwei Komponenten aufgeteilt werden: die normal zur Fläche gerichtete Kraft F_n und die hangparallele Kraft F_p, wobei $F_n = Mg\cos\beta$ und $F_p = Mg\sin\beta$ (Abb. 2.3). Daraus lassen sich Normalspannung σ und Scherspannung τ ermitteln, indem der Quotient aus der jeweils einwirkenden Kraft und der Fläche S gebildet wird. Wird die Gewichtskraft ausgedrückt als $\rho g D' S$, so ergibt sich

$$\sigma = \frac{F_n}{S} = \frac{\rho g D' \cos\beta}{S} = \rho g D' \cos\beta = \rho g D \cos^2\beta \tag{2.1}$$

$$\tau = \frac{F_p}{S} = \frac{\rho g D' \sin\beta}{S} = \rho g D' \sin\beta = \rho g D \sin\beta\cos\beta \tag{2.2}$$

wobei $D' = D\cos\beta$ die Mächtigkeit des Objekts ist und D die vertikale Projektion der Mächtigkeit (De Blasio 2011). Die Spannung wird gemessen in Pascal (Pa).

Dabei noch nicht berücksichtigt ist die Reibung. Die Reibungskraft wirkt zwischen zwei Oberflächen fester Körper. Dabei ist die Reibungskraft F_A proportional zum Gewicht des Objekts $P = Mg$, wobei M die Objektmasse ist. Das Verhältnis $\mu = {}^{F_A}/_{P}$ zwischen den beiden Kräften ist demnach

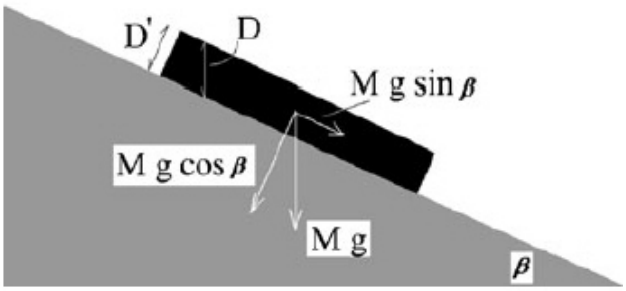


Abbildung 2.3: Elementare geometrische Elemente zur Identifikation von Normalkraft und Scherspannung. Quelle: De Blasio (2011)

unabhängig von der Masse und der Schwerkraft und wird als Reibungskoeffizient bezeichnet, der als

$$F_A = \mu P \tag{2.3}$$

formuliert werden kann.

Neben der Normalkraft $Mg\cos\beta$ und der hangparallelen Kraft $Mg\sin\beta$ ist unter der Bedingung, dass Reibungskräfte einwirken, die Kraft $Mg\mu\cos\beta$ erforderlich, um ein Objekt in Bewegung zu versetzen. Die Bedingung, die zu Instabilität führt, wird bei $Mg\sin\beta > Mg\mu\cos\beta$ erfüllt, woraus folgt, dass $\tan\beta > \mu$. Folglich wird das Objekt in Bewegung versetzt, sobald ein kritischer Winkel ϕ erreicht ist. Dieser Winkel wird als Reibungswinkel bezeichnet. Wird der Reibungskoeffizient mit dem Verhältnis aus Reibungs- und Normalkraft gleichgestellt, wird dies zu

$$\mu = \frac{Mg\sin\phi}{Mg\cos\phi} = \tan\phi \tag{2.4}$$

und zeigt damit, dass der Reibungskoeffizient der Tangens des Reibungswinkels ist (De Blasio 2011).

Neben den auf einem Hang wirksamen Kräfte, ist zusätzlich die Kohäsion zu berücksichtigen. Sie ist eine messbare Widerstandsgröße, die in Pascal (Pa) gemessen wird. In natürlichen Böden resultiert die Kohäsion aus elektrostatischen Bindungen zwischen den Ton- und Schluffpartikeln. Demzufolge sind Böden ohne Ton- und Schlufffraktion kohäsionslos, abgesehen von kapillaren Kräften, die wirksam werden, wenn kleinere Mengen Wasser Brücken zwischen den Sandkörnern ausbilden. Dies führt zu einem negativen Porenwasserdruck. Die Kohäsion von Böden liegt in einer Größenordnung von einigen kPa, wohingegen Festgesteine normalerweise zigtausendfach höhere Kohäsionswerte aufweisen als Böden. Böden und Fels weisen in der Regel beide Kohäsions- und Reibungskräfte auf. Die Scherkraft eines Bodens

entspricht damit der Summe aller Einflüsse von Kohäsion und Reibung. Bei Annahme eines Bodenabschnitts unter Einfluss von Kohäsion und Reibung bei konstanter Mächtigkeit auf einem Hang mit dem Neigungswinkel β, sind die Widerstandskräfte durch das Zusammenspiel von Kohäsion und Reibung gegeben. Dies äußert sich in

$$F_{res} = Mg\cos\beta\tan\phi + CwL \tag{2.5}$$

wobei w die Breite des Bodenabschnitts ist und L die Länge. Ist diese zusammengesetzte Kraft geringer als die Gravitationskomponente entlang des Hangs, gerät der Bodenabschnitt nicht in Bewegung. Weil die Masse

$$M = \rho DwL\cos\beta \tag{2.6}$$

ist, stellt sich heraus, dass $F_{res} = \rho gDwL\cos^2\beta\tan\phi + CwL$, oder auch

$$F_{res} = \sigma wL\tan\phi + CwL \tag{2.7}$$

ist, wobei $\sigma = \rho gD\cos^2\beta$ die Normalkraft ist (De Blasio 2011).

Dies entspricht damit dem bereits im Jahr 1776 formulierten *Coulombschen Gesetz*. Dabei wird die Grenzscherspannung (τ_f) definiert als Produkt aus Normalkraft (σ) und Reibungswinkel ($\tan\phi$) plus der Kohäsion (C), oder auch

$$\tau_f = C + \sigma\tan\phi \tag{2.8}$$

wobei in kohäsionslosen Böden die Coulombsche Gleichung zu

$$\tau_f = \sigma\tan\phi \tag{2.9}$$

wird (Selby 1993).

2.3.2 Factor of Safety

Die Hangstabilität wird normalerweise mit einem Sicherheitsfaktor, oder *Factor of Safety* (FoS), ausgedrückt. Dieser wird als das Verhältnis zwischen Widerstandskräften (*resisting forces*) und antreibenden Kräften (*driving forces*) angegeben. Dieses Verhältnis äußert sich bei gleichen Widerstands- und auslösenden Kräften in einem FoS Wert von 1. Je höher dieser Wert, desto höher wird die Stabilität eines Hangs eingeschätzt. Diese Methode der Hangstabilitätsanalyse wird als *limiting equilibrium analysis* bezeichnet (Crozier 1986). Zu beachten gilt es, dass es keine absolute Stabilität gibt, „only an increasing probability of stability as the value of F [Anm.: FoS] becomes larger. Most natural hillslopes upon which landsliding can occur have F values between about 1 and 1.3, but such estimates depend upon an

accurate knowledge of all the forces involved and for practical purposes design engineers always adopt very conservative estimates of stability“ (Selby 1993: S. 268).

In ihren Grundzügen kann die Coulombsche Gleichung (Formel 2.8) als Widerstandskraft (*shear strenght*) herangezogen werden. Als antreibende Kraft (*shear stress*) wird das Produkt aus Gewicht des Materials (W) pro Flächeneinheit (A) und dem Winkel der Scherfläche ($\sin\beta$) herangezogen. Bei zusätzlicher Berücksichtigung des Porenwasserdrucks (u) wird daraus

$$FoS = \frac{\text{shear strenght}}{\text{shear stress}} = \frac{C + (\sigma - u)\tan\phi}{\frac{W}{A}\sin\beta}. \tag{2.10}$$

Der hier berücksichtigte Porenwasserdruck kann sowohl positiv als auch negativ sein. Positiver Porenwasserdruck ist dann erreicht, wenn der Grundwasserspiegel über die Scherfläche ansteigt und damit bei Bodensättigung die Normalspannung reduziert. Der positive Porenwasserdruck „exerts an upthrust which, by reducing normal stress, detracts from the resistance within the slope“ Crozier (1986: S. 42). Unter ungesättigten Bedingungen kann der Porenwasserdruck negativ sein. Das so vorhandene Bodenwasser kann in Form von Kapillarwasser mitunter zu einer Zunahme der Bodenstabilität beitragen. Allgemein gilt zu beachten, dass die Genauigkeit und Eignung der *limiting equilibrium analysis* für einen ganzen Hang stark von der Homogenität der lokalen Bedingungen abhängt. Natürliche Hänge weisen jedoch eine hohe Variabilität in den bodenphysikalischen Eigenschaften auf, weshalb diese Methode stets mit Ungenauigkeiten behaftet ist. Hawley (1981), zitiert nach Crozier (1986: S. 43), sieht folgende Probleme der *limiting equilibrium analysis*: „...for most natural slopes even the best sampling and testing operation would lead to a scatter of values of c [Anm.: Kohäsion] und ϕ [Anm.: Reibungswinkel] which would be more than sufficient to span the range between 'should have failed' and 'stable'. The more thorough the investigation, the greater is the range likely to be...it is not generally practicable to assign meaningful values of c and ϕ to slopes in natural ground.“

2.4 Naturgefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Auseinandersetzung mit den gängigsten Begriffen im Kontext der Risikoanalyse, in den die hier vorliegende Arbeit eingebettet ist. Dies ist notwendig, da zahlreiche Begriffe im alltäglichen Sprachgebrauch einen anderen Wortsinn aufweisen, als dies im wissenschaftlichen Umfeld der Fall ist. Zuletzt erfolgt eine Auseinandersetzung mit den gängigen Methoden und Ansätzen der Naturgefahrenanalyse.

2.4.1 Risiko: Begriffe und Definitionen

Begriffe wie Gefahr und Risiko sind im alltäglichen Sprachgebrauch fest etabliert. Eine genaue Definition beider Begriffe dürfte den meisten Menschen schwer fallen. In der Risikoforschung, sowohl von natur- als auch von sozialwissenschaftlicher Seite, wurden zahlreiche Versuche unternommen, diese Begriffe in einen einheitlichen Kontext zu bringen, um die Kommunikation im Bereich des Risikomanagements zu vereinheitlichen und zu vereinfachen. Die Schlüsselbegriffe, die es zu definieren gilt, sind:

→ Gefahr (*hazard*): Eine Gefahr bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes schadensbringendes Ereignis in einem bestimmten Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt auftritt. Diese Definition wird sowohl in den Natur- als auch in den Sozialwissenschaften verwendet. Jedoch ist die Gefahrenanalyse eher eine Domäne der Naturwissenschaften (Clague und Roberts 2012).

→ Risiko (*risk*): Das Themengebiet 'Risiko' hingegen ist eher in den Sozialwissenschaften verankert, da es nicht nur die Gefahren, sondern auch die Vulnerabilität und Bewältigungsfähigkeit (*coping capacity*) miteinbezieht (Clague und Roberts 2012). Es gibt zahlreiche Definitionen zum Risikobegriff, eine gebräuchliche jedoch ist

$$Risiko = f(\text{Gefahr, Exponiertheit, Vulnerabilität, Bewältigungsfähigkeit}).$$

Obwohl der Risikobegriff als Funktion dieser vier Bestandteile definiert werden kann, können ihre Interdependenzen weder mathematisch beschrieben noch vollkommen verstanden werden. Die Vulnerabilität und Bewältigungsfähigkeit sind latente Zustände eines Risikoelements (*elements at risk*) und kommen nur bei Auftreten eines Gefahrenereignisses zum Tragen. Risikoelemente bezeichnen dabei physische oder soziale Gebilde, die durch ihre Exponiertheit von einem Ereignis betroffen sein können.

→ Vulnerabilität (*vulnerability*): Die Vulnerabilität kennzeichnet die Anfälligkeit eines Elements gegenüber eines Gefahrenereignisses. Diese lässt sich in einer physischen und sozialen Vulnerabilität ausdrücken. Die physische (oder technologische) Komponente berücksichtigt dabei den Schaden an der physischen Struktur von Infrastruktur oder den Verlust von Menschenleben und wird überwiegend von Geowissenschaftlern behandelt. Die soziale Komponente berücksichtigt eine große Spannweite an Auswirkungen auf den Menschen infolge eines Schadensereignisses. Diese reichen vom Verlust der Existenzgrundlage bis hin zu psychologischen Auswirkungen (Clague und Roberts 2012).

→ Bewältigungsfähigkeit (*coping capacity*): Diese beschreibt die Fähigkeit eines Elements auf ein Gefahrenereignis zu reagieren und die negati-

ven Eigenschaften, die daraus resultieren, zu vermindern (Clague und Roberts 2012)

→ Exponiertheit (*exposure*): Diese bezeichnet die Überschneidung in-Raum und Zeit von Gefahrenprozessen mit Infrastruktur und Bevölkerung (Clague und Roberts 2012).

Die Natur- und Sozialwissenschaften haben jeweils ihre Stärken in der Konzeptionalisierung und Evaluierung bestimmter Elemente von Risiko. Einzeln jedoch übervereinfachen sie die jeweils anderen Komponenten. Der Fokus der naturwissenschaftlich ausgerichteten Forschungszweige liegt auf der Behandlung von Gefahr und Exponiertheit. Dabei wird die Komponente Mensch typischerweise als statisches oder passives Gebilde betrachtet. Im Gegensatz dazu liegt der Fokus der sozialwissenschaftlich ausgerichteten Risikoanalyse auf der Vulnerabilität und der Bewältigungsfähigkeit. Hierbei wird die Gefahr als statisches Element angesehen, das die Vulnerabilität und Bewältigungsfähigkeit aufdeckt. In der Realität sind jedoch alle vier Risikokomponenten dynamische Elemente mit einer großen räumlichen und zeitlichen Variabilität (Clague und Roberts 2012).

Der erste Schritt bei der Bestimmung des Rutschungsrisikos ist die Quantifizierung der Gefahr. Zunächst wird versucht, ein tieferes Verständnis für die potentiell auslösenden Faktoren zu erlangen. Diese erste Gefährdungsanalyse (*susceptibility analysis*) gibt Auskünfte über die „[...] probability of spatial occurrence of slope failures, given a set of geo-environmental conditions“ (Guzzetti 2005: S. 113, zitiert nach Bell 2007). Das Resultat aus der Gefährdungsanalyse ist eine Gefährdungs- oder Gefahrenhinweiskarte. Im Kontext der Risikoanalyse ist somit die hier vorliegende Arbeit in diesem frühen Arbeitsschritt eingeordnet, in dem versucht wird, die Rutschungsgefährdung (*landslide susceptibility*) für ein spezifisches Untersuchungsgebiet zu bestimmen, ohne noch die zeitliche Komponente zu berücksichtigen. Werden zusätzlich Frequenz und Magnitude von Massenbewegungen miteinbezogen, ist dies der Schritt in Richtung Gefahrenanalyse und den daraus resultierenden Gefahrenkarten.

Jedoch ist es in weiterer Folge für die Risikoanalyse nicht ausreichend, die ohnehin sehr schwierig zu erhebenden Komponenten Frequenz und Magnitude zu bestimmen. Die Gefahr ist nämlich stets prozessabhängig zu betrachten, da unterschiedliche Typen von Massenbewegungen unterschiedliche Gefahrenausprägungen annehmen. Erst dann kann der nächste Schritt in der Risikoanalyse, die Exponiertheit, erarbeitet werden. Die Exponiertheit ist bezogen auf das Auftreten von Risikoelementen, demzufolge kann für jedes spezifische Risikoelement die Vulnerabilität und Bewältigungsfähigkeit ermittelt werden. Die Vulnerabilität ist ein äußert schwierig zu ermitteln-

der Faktor. Konzeptuelle Modelle vereinfachen die Auswahl geeigneter Indikatoren für die Vulnerabilitätsanalyse, dennoch stellt sich stets die Frage nach der Quantifizierbarkeit sozialer Merkmale. Klar ist, dass Individuen und Gesellschaften mit geringen Möglichkeiten, die Auswirkungen von externen Einflüssen abzuschwächen, vulnerabler sind und ein geringeres Maß an Bewältigungsfähigkeit aufweisen. Soziale erhebbare Indikatoren wie Lebensqualität, pro Kopf Einkommen oder Zugang zu medizinischen Einrichtungen sind nur sehr grobe Indikatoren, die tatsächliche Vulnerabilität und Bewältigungsfähigkeit auszudrücken. Diese Problematik ist eng verbunden mit dem Konzept des akzeptierbaren Risikos oder der Risikotoleranz. In entwickelten Staaten der Erde (v.a. Japan, Neu Seeland, Australien sowie jene Europas und Nordamerikas) ist die soziale Tolerierbarkeit gegenüber Naturgefahren weit geringer als in Staaten mit geringem Lebensstandard. Als Konsequenz daraus investieren entwickelte Staaten Unsummen in die Schadensminderung (*mitigation*) von Naturgefahren (z.B. Hangstabilisierungen) und zur Reduktion von Vulnerabilität (z.B. durch aufklärende Tätigkeit) (Clague und Roberts 2012).

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist es zu erwarten, dass aufgrund einer massiven Zunahme der Weltbevölkerung, der Zunahme der Bevölkerung in rutschungsgefährdeten Regionen und aufgrund von klimatischen Faktoren es zu einer Zunahme des Rutschungsrisikos kommt (Clague und Roberts 2012).

2.4.2 Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen

Für die Analyse von Naturgefahren, hier im konkreten von gravitativen Massenbewegungen, gibt es unterschiedliche Methoden und Ansätze. Eine besonders wichte Rolle spielt in der modernen Naturgefahrenanalyse die Modellierung. Modelle werden angewendet, um den gegenwärtigen Stabilitätszustand zu ermitteln und das Hangverhalten unter veränderten Umweltbedingungen (z.B. Niederschlagsereignisse oder Landnutzungsänderungen) abzubilden. Auch dienen sie dazu, rückwirkende Analysen (*back-analyses*) von bereits von Rutschungen betroffenen Hängen durchzuführen oder um die Effektivität von Verbauungsmaßnahmen zu evaluieren. Jedoch gilt es beim Einsatz von Modellen stets zu berücksichtigen, dass sie immer nur Generalisierungen und Annäherungen an tatsächlich ablaufende Prozesse in der Natur sein können. Bei der Modellierung von gravitativen Massenbewegungen kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen der Fokussierung auf einzelne Rutschungen (lokale Modelle) und der Behandlung größerer Gebiete (regionale Modelle). Lokale Ansätze haben eine lange Tradition im geotechnischen Ingenieurwesen, während regionale Modelle speziell mit dem Aufkommen von leistungsstarker Computer Hardware in Kombination mit geographischen Informationssystemen (GIS) massiv an Bedeutung gewon-

nen haben (Thiebes 2012). Aufgrund der Relevanz für die hier vorliegende Arbeit werden im Folgenden ausschließlich regionale Ansätze erläutert.

Soeters und Van Westen (1996) unterscheiden vier verschiedene Ansätze in der Analyse gravitativer Massenbewegungen auf der regionalen Ebene: inventarbasierte, heuristische, statistische und deterministische. Inventare ermöglichen eine detaillierte Analyse der Verteilung von Massenbewegungen. Liegt ein multi-temporales Inventar vor, sind damit Aktivitätsmuster ablesbar und sie dienen somit als wichtige Grundlage für die regionale Modellierung von Rutschungsgefährdung, Rutschungsgefahr und dem Rutschungsrisiko. Heuristische Methoden integrieren das Wissen und die Erfahrung von Experten auf dem Gebiet der Geomorphologie oder der Geotechnik um regionale Gefahren- und Gefahrenhinweiskarten zu erstellen (Thiebes 2012). Soeters und Van Westen (1996) unterscheiden dabei zwischen einer geomorphologischen Analyse und einer gewichteten Kombination verschiedener thematischer Karten. Als Nachteil dieser Methode muss die Subjektivität genannt werden, die beim heuristischen Ansatz zum Tragen kommt. Mitunter wird dadurch die Nachvollziehbarkeit erschwert. Jedoch ermöglicht dieser Ansatz, aufgrund der Expertise von facheinschlägigen Experten, so gut wie kein anderer die Abbildung komplexer Zusammenhänge in einem spezifischen Untersuchungsgebiet. Solche Interaktionen in einem komplexen Umweltsystem werden i.d.R. von keinem anderen Ansatz in diesem Ausmaß berücksichtigt (Bell 2007).

Statistische (oder probabilistische) Methoden sind die am häufigsten angewendeten für die Modellierung der regionalen Rutschungsgefährdung und -gefahr. Statistische Methoden stellen einen Zusammenhang her zwischen möglichen auslösenden Faktoren und den Rutschungsstandorten. Unter der Annahme, dass „in Zukunft die gravitativen Massenbewegungen unter ähnlichen Faktorenkonstellationen auftreten, werden die statistischen Beziehungen anschließend in den Raum extrapoliert, um entsprechend gefährdete Bereiche auszuweisen“ (Bell 2007: S. 49). Dieser quantitative Ansatz wird mit einer Vielzahl statistischer Verfahren angewendet. Bell (2007) gibt eine detaillierte Literaturübersicht über durchgeführte Arbeiten und nennt unter den angewendeten Verfahren folgende:

1. Bivariate Analyse
2. Multiple Regressionsanalyse
3. Diskriminanzanalyse
4. Logistische Regression
5. Neuronale Netzwerke

6. Support Vector Machines
7. Bayes'sche Statistik
8. Fuzzy Logic
9. Likelihood Ratio

Das Spektrum der anwendbaren Verfahren ist sehr groß, jedoch gibt es fundamentale Kritikpunkte in der Anwendung statistischer Modellierungsansätze, die von Guzzetti (2005: S. 127), zitiert nach Bell (2007), folgendermaßen zusammengefasst werden: „...many investigators are interested chiefly in applying different statistical methods, and much less concerned in: (i) collecting detailed, high quality information related to slope failures, (ii) identifying new environmental parameters useful to the assessment of landslide susceptibility, (iii) validating quantitatively the model results, (iv) explaining the geomorphological aspects of terrain zoning for landslide susceptibility models. This is rather unfortunate because it leads investigators to focus on the tool (a classification technique) rather than on the target (an optimal landslide susceptibility assessment). Also disappointing is the fact that [...] very few attempts to quantitatively compare susceptibility models prepared by different methods, critically evaluating their advantages and limitations, are available".

Den vierten und letzten hier vorgestellten Ansatz macht jener der physikalisch basierten (deterministischen) Modellierung aus. In dieser Modellierungsmethode wird üblicherweise der Stabilitätszustand eines Hanges mit einem Sicherheitsfaktor (Factor of Safety, siehe Kapitel 2.3.2) angegeben. Die zugrunde liegenden bodenphysikalischen Parameter liefern wichtige Aussagen über die möglichen auslösenden Faktoren für gravitative Massenbewegungen. Die am häufigsten zum Einsatz kommende Methode für die regionale deterministische Modellierung basiert auf einer hydrologischen Modellierung in Kombination mit einem vereinfachten Ansatz zur Stabilitätsberechnung, z.B. dem *infinite-slope model*. Die hydrologische Modellierung basiert normalerweise auf der Ermittlung der topographischen Fließrichtung und der simulierten Entwicklung der Bodenfeuchtigkeit über einer wasserundurchlässigen Schicht. Gruber und Peckham (2009) geben einen ausführlichen Überblick über hydrologische Fließalgorithmen. Bei der Berechnung der Hangstabilität fließen Werte aus bodenphysikalischen Paramtern ein, z.B. der Kohäsion oder des Reibungswinkels. Das *infinite-slope model* ermittelt einen Stabilitätswert für jedes Pixel eines Digitalen Geländemodells (DGM) und vernachlässigt den Einfluss benachbarter Pixel. Deterministische Modelle sind nur dort anwendbar, wo die geomorphologischen und geologischen Bedingungen überwiegend homogen sind und im gesamten Untersuchungsgebiet simple Rutschungstypen vorliegen, z.B. flachgründige

Translationsrutschungen (Thiebes 2012). Die am häufigsten angewendeten Modelle für die deterministische Modellierung auf regionaler Ebene sind TOPMODEL (Montgomery und Dietrich 1994), SHALSTAB (Dietrich et al. 2001) und SINMAP (Pack et al. 1998), wobei auch zahlreiche andere Modellierungen durchgeführt wurden, die auf dem *infinite-slope model* beruhen (Thiebes 2012).

Kapitel 3

Methoden

In diesem Kapitel werden all jene Methoden beschrieben, die dazu geführt haben, zur endgültigen Gefahrenhinweiskarte (*susceptibility map*) für flachgründige Translationsrutschungen im Bezirk Waidhofen an der Ybbs zu gelangen. In einem ersten Schritt wurde eine Auswahl darüber getroffen, welche Geodaten als Basis für die Modellierung fungieren sollen. Ein in diesem Kontext häufig gebräuchlicher Ansatz ist die Verwendung von lithologischen Karten, wobei die einzelnen lithologischen Einheiten zur Unterscheidung verschiedener geotechnischer Wertebereiche herangezogen werden. In dieser Arbeit wurden jedoch aus den lithologischen Einheiten abgeleitete Bodensubstratgruppen verwendet, da die Größe und vor allem die geologische Heterogenität des Untersuchungsgebietes die Parametrisierung des Modells wesentlich erschwert hätten. Sämtliche Basiskarten für die Modellierung wurden in unterschiedlichen Auflösungen generiert, um Unterschiede in der Modellierung mit veränderter räumlicher Auflösung aufzuzeigen. Ein sehr detailiertes Inventar gravitativer Massenbewegungen für das gesamte Bundesland Niederösterreich liegt seit kurzem vor und wurde in dieser Arbeit zur statistischen Auswertung verwendet.

Die Modellierung selbst fand mit dem Stabilitätsmodell SINMAP statt, wobei im Anschluss an die Modellierung eine Sensitivitätsanalyse erfolgt ist, um den Einfluss einzelner bodenphysikalischer Bodenparameter auf das Modell zu ermitteln. In einem letzten Schritt erfolgt ein einfacher Vergleich zwischen der hier erstellten Gefahrenhinweiskarte basierend auf einer deterministischen Modellierung und einer Gefahrenhinweiskarte basierend auf statistischen Methoden. Abbildung 3.1 fasst die durchgeführten Arbeitsschritte in dieser Arbeit grafisch zusammen. Eine Auflistung der verwendeten Daten findet sich in Kapitel 3.7.

3.1 Stability Index Mapping (SINMAP)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das physikalisch basierte, deterministische Stabilitätsmodell SINMAP (*Stability Index Mapping*) von Pack et al. (1998) verwendet. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung von ESRI ArcView, die als Open Source Datei frei im Internet verfügbar ist. Ziel von SINMAP ist die Berechnung eines Stabilitätsindex, der für jeden einzelnen Pixel separat ermittelt wird. Diese numerischen Werte werden anschließend zu sechs Stabilitätsklassen klassifiziert. Das Modell erfordert lediglich den Input von drei Parametern und ist als relativ parameterarmes Modell damit geeignet größere Gebiete zu modellieren. Als Eingangsdaten erforderlich sind ein Digitales Geländemodell (DGM) in möglichst hoher räumlicher Auflösung, ein Rutschungsinventar (Punktshapefile) und ein Kalibrationsgebiet aus einem oder mehreren Regionen, denen die bodenphysikalischen Parameter C (Kohäsion), Φ (interner Reibungswinkel) und T/R (als zusammengesetzter hydrologischer Wert, bestehend aus Transmissivität und Niederschlag) zugewiesen werden. SINMAP erlaubt zudem, die bodenphysikalischen Parameter nicht als einzelnen Wert in die Modellierung einfließen zu lassen, sondern einen Schwankungsbereich oder Ungenauigkeitsbereich zwischen Minimum- und Maximumwert zu definieren. Damit werden Schwankungsbereiche, die in natürlichen Systemen vorkommen, berücksichtigt. Für die endgültige Kalibration des Gebietes ist zudem ein möglichst vollständiges Rutschungsinventar notwendig. Eine Validierung des Modells im Sinne einer statistischen Gefährdungsmodellierung, wo das Rutschungsinventar als abhängige Variable in die Modellierung selbst miteingeht, ist bei einer deterministischen Modellierung nicht möglich, da die Stabilitätsklassen rein auf physikalischen Gegebenheiten beruhen.

SINMAP beruht als kombiniertes hydrologisches Stabilitätsmodell auf dem *infinite-slope stability model* und ist daher modellbedingt ausschließlich dafür geeignet, flachgründige Translationsrutschungen zu modellieren. Durch immer leistungsfähigere Hardware und der Verfügbarkeit immer höher aufgelöster Digitaler Geländemodelle, ist in den letzten Jahren eine Zunahme auch regionaler Gefährdungsmodellierungen größerer Gebiete erfolgt (Thiebes 2012). In den folgenden Kapiteln werden die Spezifika von SINMAP näher ausgeführt.

3.1.1 Das *Infinite Slope Stability Model*

Der Factor of Safety (FoS) (als Verhältnis zwischen stabilisierenden und destabilisierenden Faktoren) wird im *infinite slope stability model* (in der vereinfachten Form bei gleicher Feucht- und Trockendichte nach Hammond et al. (1992)) als

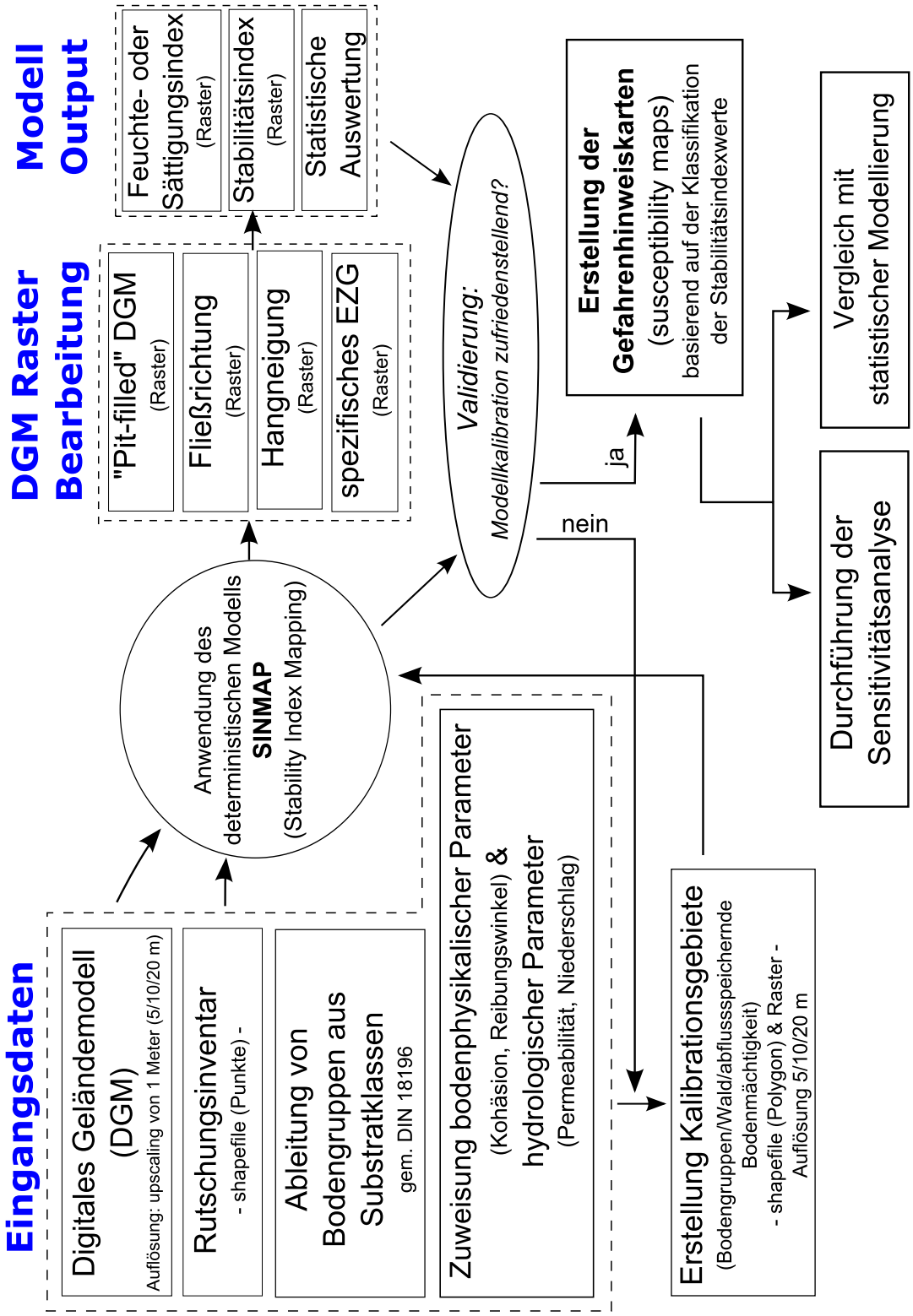


Abbildung 3.1: Übersicht der in dieser Arbeit durchgeführten Arbeitsschritte

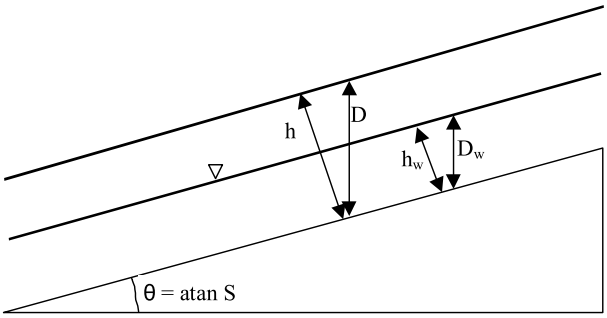


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Hanggeometrie im *infinite slope stability model*. Quelle: Pack et al. (1998)

$$FoS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w]\tan\phi}{D\rho_s g \sin\theta\cos\theta} \tag{3.1}$$

berechnet, wobei C_r die Wurzelkohäsion (*root cohesion*) $[N/m^2]$, C_s die Bodenkohäsion $[N/m^2]$, θ der Hangneigungswinkel, ρ_s die feuchte Bodendichte $[kg/m^3]$, ρ_w die Wasserdichte $[kg/m^3]$, g die Gravitationskonstante $[9,81 m/s^2]$, D die vertikale Bodentiefe $[m]$ und ϕ der interne Reibungswinkel des Bodens ist. Abbildung 3.2 veranschaulicht die Hanggeometrie aus Formel 3.1.

Speziell am zugrunde liegenden *infinite slope stability model* in SINMAP ist die Bestimmung der Bodenmächtigkeit normal zur Hangoberfläche anstatt der gemessenen vertikalen Bodenmächtigkeit. Die Bodenmächtigkeit h $[m]$ ist mit der Tiefe D $[m]$ über die Hangneigung θ folgendermaßen verbunden:

$$h = D\cos\theta \tag{3.2}$$

Damit ändert sich der FoS zu

$$FoS = \frac{C + \cos\theta[1 - wr]\tan\phi}{\sin\theta} \tag{3.3}$$

wobei

$$w = \frac{D_w}{D} = \frac{h_w}{h} \tag{3.4}$$

die relative Bodenwassersättigung als Verhältnis zwischen wassergesättigtem Bereich innerhalb des Bodens zur gesamten Bodenmächtigkeit ist,

$$C = \frac{C_r + C_s}{h\rho_s g} \tag{3.5}$$

als fortan dimensionslose Kohäsion relativ zur normalen Bodenmächtigkeit, und

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_s} \tag{3.6}$$

als Dichteverhältnis zwischen Wasser und Boden.

Damit ist Formel 3.3 die dimensionslose Form des *infinite slope stability models*, der SINMAP zugrunde liegt. Die Kohäsion ist dabei kombiniert mit der Bodendichte und der Bodenmächtigkeit zu einem dimensionslosen Kohäsionsfaktor C zusammengefasst (Gleichung 3.5). Dabei kann dieser Faktor als Verhältnis zwischen kohäsiven Kräften zum Gewicht des Bodens verstanden werden. Abbildung 3.3 verdeutlicht dieses Konzept. Die Variable Φ in Formel 3.3 repräsentiert den zur Stabilität beitragenden Anteil des internen Reibungswinkels (bzw. als $\tan\Phi$ den Reibungskoeffizienten). Dieser nimmt mit steigendem Feuchtegehalt ab, bedingt durch eine Zunahme des Porenwasserdrucks und damit einher gehender Reduktion der Normalkraft, die durch die Bodenmatrix getragen wird. Die Sensitivität dieses Effektes wird durch das Dichteverhältnis r (Formel 3.6) bestimmt.

3.1.2 Topographischer Feuchteindex

Für die deterministische Modellierung gravitativer Massenbewegungen ist es unerlässlich, Bodenfeuchtewerte zu berücksichtigen. Dies ist durch die große räumliche Variabilität allerdings ein schwieriges Unterfangen. Es gibt daher Modelle, die morphometrisch Feuchteindizes aus Digitalen Geländemodellen ableiten. Da Bodenfeuchtewerte in SINMAP kein direkter Eingabeparameter sind, werden diese Werte aus einem solchen Modell ermittelt. SINMAP greift dabei auf das hydrologische Modell *TOMODEL* zurück (Beven und Kirkby 1979).

Da die Bodenfeuchte ein schwierig zu ermittelnder Faktor ist, sind einige Annahmen diesbezüglich zu treffen. Für SINMAP gelten:

1. Flachgründiger, hangparalleler Hangabfluss erfolgt an topographischen Falllinien. Damit ist es möglich, aus den topographischen Gegebenheiten das spezifische Einzugsgebiet zu ermitteln (Abb. 3.4).

2. Der hangparallele Abfluss ist an jedem Punkt im Gleichgewicht mit der konstanten Neubildungsrate (*steady state recharge*) R $[^m/_{hr}]$.

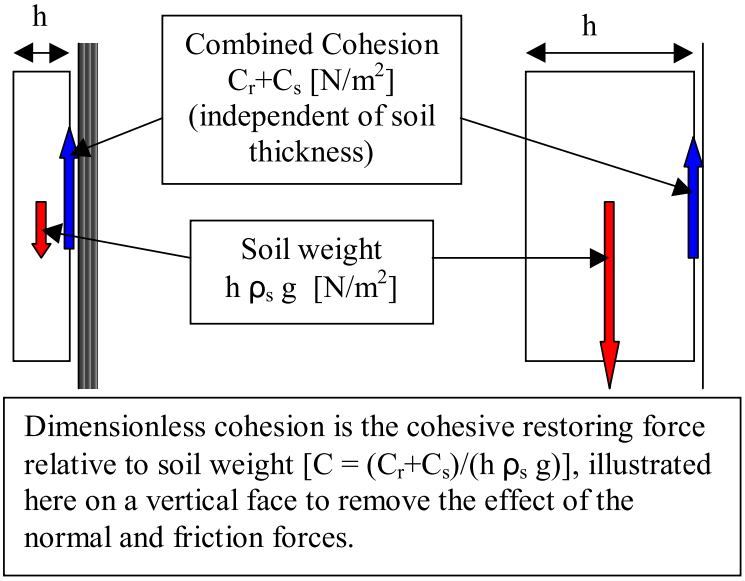


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Konzeptes des dimensionslosen Kohäsionsfaktors. Quelle: Pack et al. (1998)

3. Der hangparallele Abfluss an jedem Punkt ist $T \sin\theta$, wobei T die Transmissivität des Bodens $[m^2/hr]$ ist. Sie ist das Produkt aus dem hydraulischen Durchlässigkeitskoeffizient k_f $[m/hr]$ und der Bodenmächtigkeit h $[m]$.

Die ersten beiden Annahmen implizieren an jedem Punkt eine Abflussmenge, die direkt proportional zur Größe ihres spezifischen Einzugsgebietes ist ($Q = Ra$). Die dritte Annahme unterscheidet sich vom ursprünglichen *TOPMODEL* Ansatz von Beven und Kirkby (1979) insofern, als dass der hydraulische Durchlässigkeitskoeffizient k_f mit zunehmender Tiefe nicht abnimmt. Der Wert bleibt über die gesamte Tiefe des gleichmäßig durchlässigen Bodens konstant, bis eine relativ impermeable Bodenschicht erreicht wird. Zudem wird statt $\sin\theta$ im ursprünglichen *TOPMODEL* Ansatz $\tan\theta$ verwendet, da durch den Sinus größere Hangneigungen als eher rutschungsanfällig berücksichtigt werden, während der Unterschied bei geringeren Hangneigungen insignifikant ausfällt. Mit diesen getroffenen Annahmen lässt sich die relative Bodenfeuchte als

$$w = \frac{R}{T}\frac{a}{\sin\theta} \tag{3.7}$$

ausdrücken.

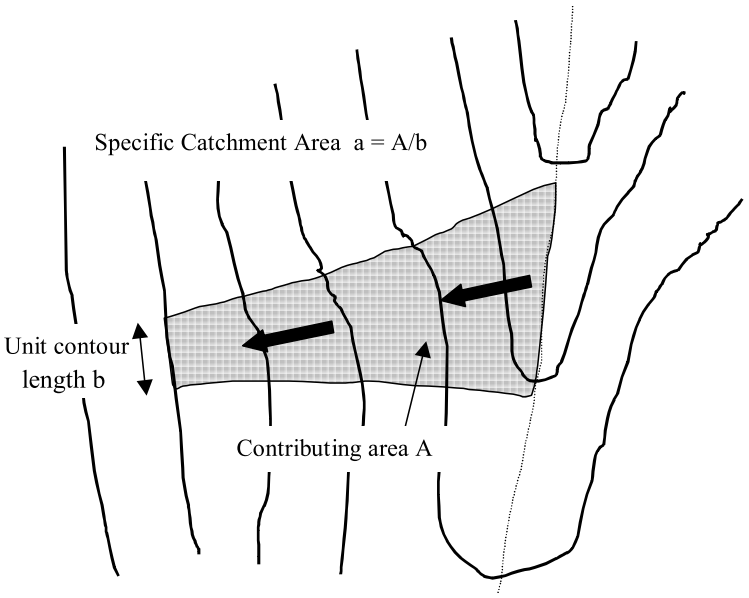


Abbildung 3.4: Schematische Abbildung eines spezifischen Einzugsgebietes. Quelle: Pack et al. (1998)

Wie in Abb. 3.2 dargestellt, repräsentiert die relative Bodenfeuchte im Modell die relative Tiefe des (schwebenden) Grundwasserspiegels (*perched water table*) innerhalb des Bodens. Das Verhältnis $^{R}/_{T}$ $[m^{-1}]$ (Formel 3.7) drückt die relative Bodenfeuchte als konstante Neubildungsrate R relativ zur Kapazität des Bodens T Wasser abzuführen aus. Der Ausdruck *konstante Neubildungsrate* ist in dem Sinne nicht ganz richtig, als dass damit kein längerfristiger (z.B. jährlicher) Durchschnitt der Neubildungsrate zu verstehen ist, sondern eher die effektive Neubildungsrate in Perioden extremer Niederschläge die Massenbewegungen auslösen können. Das Verhältnis R/T, das als einzelner Parameter in die Modellierung eingeht, kombiniert damit hydrogeologische und klimatische Faktoren. Das Resultat aus $^{R}/_{T} \sin\theta$ $[m]$ kann daher als Länge des (ebenen) Hanges interpretiert werden, die notwendig ist, Bodensättigung nach einem extremen Niederschlagsereignis auszulösen.

3.1.3 Definition des Stabilitätsindex

Der Stabilitätsindex (SI) wird bezeichnet als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Standort stabil ist, unter der Annahme einer gleichmäßigen Parameterverteilung innerhalb der Unsicherheitsspannweite (Maximum-/Minimumwert). Der Wert von SI reicht dabei von 0 (*most unstable*) bis 1 (*least unstable*). Wird bei der destabilisierendsten (*most conservative*) Parameterkonstellation im Modell ein Standort nach wie vor als stabil ausgewiesen, wird der

Stabilitätsindex als Factor of Safety (FoS) bezeichnet (als Verhältnis zwischen stabilisierenden und destabilisierenden Faktoren). Dies resultiert in einem Wert > 1.

Um den Stabilitätsindex zu definieren, wird die relative Bodenfeuchte aus Formel 3.7 in den dimensionslosen Factor of Safety (FoS) in Gleichung 3.3 eingesetzt, um

$$FoS = \frac{C + \cos\theta[1 - min\left(\frac{R}{T}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right) r] \tan\phi}{\sin\theta} \tag{3.8}$$

zu erhalten.

Die Variablen a (spez. EZG) und θ werden aus der Topographie ermittelt. C, $\tan\phi$, r und R/T sind Eingabeparameter. Das Dichteverhältnis r wird dabei mit einem konstanten Wert $0,5$ angenommen, die anderen drei Parameter fließen mit ihrer Unsicherheitsspannweite (Minimum-/Maximumwert) in die Modellierung ein. Die Werte innerhalb dieser Unsicherheitsspanne variieren als normalverteilte Wahrscheinlichkeitsfunktion. Wird R/T als x und $\tan\phi$ als t bezeichnet, so können die Minimum- und Maximumwerte der Normalverteilung als

$$C \sim U(C_1, C_2)$$
$$x \sim U(x_1, x_2)$$
$$t \sim U(t_1, t_2)$$

angeschrieben werden. Dabei bezeichnen die Minimumwerte von C und t (das sind C_1 und t_1) zusammen mit dem Maximumwert von x (das ist x_2) das worst case Szenario (*most conservative*). Wo diese worst case Parameterkonstellation in FoS Werten > 1 resultiert, wird

$$SI = FoS_{min} = \frac{C_1 + \cos\theta[1 - min\left(x_2\frac{a}{\sin\theta}, 1\right) r]t_1}{\sin\theta}. \tag{3.9}$$

Demnach gilt, dass bei einem $FoS_{min} > 1$ der $SI = FoS$. An Standorten, an denen der minimale Factor of Safety (FoS) < 1 ist, besteht die Wahrscheinlichkeit einer Rutschung. Das best case Szenario wird durch die Werte $C = C_2$, $x = x_1$ und $t = t_2$ ausgedrückt. Sollte in diesem Fall der $FoS_{max} < 1$ sein, ist $SI = 0$. Eine ausführliche mathematische Herleitung befindet sich im Anhang des SINMAP User's Manual (Pack et al. 2005).

3.2 Aufbereitung der Eingangsdaten

Wie aus dem Ablaufdiagramm (Abb. 3.1) ersichtlich, war der erste Schritt die Generierung der Eingangsdaten für die Gefährdungsmodellierung in SINMAP. Dazu notwendig sind ein das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckendes Digitales Geländemodell (DGM) in möglichst hoher Auflösung, ein möglichst vollständiges Inventar flachgründiger Translationsrutschungen sowie Kartengrundlagen, aus denen bodenphysikalische Parameter abgeleitet werden können. Eigene Erhebungen *in situ* wurden nicht durchgeführt. Eine genaue Auflistung der Eingangsdaten mit weiteren Informationen diesbezüglich befindet sich in Kapitel 3.7.

3.2.1 Erstellung der Kalibrationsgebiete

Die bodenphysikalischen Parameter, die nicht direkt aus der Rasteranalyse in SINMAP abgeleitet und unmittelbar in das Modell übernommen werden, sondern durch Eingabe in das Modell zu integrieren sind, werden aus unterschiedlichen Datengrundlagen ermittelt. Vorangegangene Arbeiten, die SINMAP für eine Gefährdungsmodellierung verwendet haben, haben die notwendigen Parameter (C, ϕ und T/R) entweder aus Böden (Zizioli et al. 2013, Deb und El-Kadi 2009) oder der Lithologie (Terhorst und Kreja 2009) abgeleitet. In dieser Arbeit wurden zu diesem Zweck Substratklassen als Unterscheidungskriterium gewählt, die aus der Lithologie abgeleitete Bodenarten ausweisen.

3.2.1.1 Ableitung von Bodensubstratklassen

Für das Bundesland Niederösterreich liegt eine geologische Karte im Maßstab 1:200.000 vor. Diese beinhaltet 329 Formationen (lithologische Einheiten, die nach sedimentologischen, petrologischen, mineralogischen, morphologischen u.a. Charakteristika gegliedert sind). Das Untersuchungsgebiet alleine weist 30 unterschiedliche Formationen auf. Da einerseits für die ortsspezifischen Formationen (u.a. *Altlengbach-Formation, Waidhofen-Formation, Kössen-Formation* etc.) keine geotechnischen Parameter vorhanden sind und andererseits für so ein großes Untersuchungsgebiet eine Parametrisierung für so viele Formationen relativ kompliziert und ungenau wäre, musste ein Weg gefunden werden, eine Komplexitätsreduzierung durchzuführen. Im Zuge des HYDROBOD-NÖ Projektes (*HYDROlogische BODenkenndaten Niederösterreich*) wurde eine solche erzielt, indem Bodensubstratklassen aus der geologischen Karte von Niederösterreich abgeleitet wurden. Dabei werden durch die Verknüpfung von Bodenprofildaten mit der geologischen Karte bevorzugte Verwitterungsprodukte der verschiedenen Gesteinsarten abgeleitet. Resultat daraus sind typische Bodenartenspektren. Durch die große geologische Heterogenität in Niederösterreich wurden die über 300 verschiedenen

lithologischen Einheiten durch eine Clusteranalyse in eine geringe Anzahl von Bodensubstratklassen aggregiert (Sotier et al. 2011).

Die Bodenprofildaten für die Verknüpfung mit der geologischen Karte stützen sich auf die digitale Bodenkarte Österreichs (eBOD, Schneider et al. 2001) und Daten aus der Österreichischen Bodenzustandsinventur (BZI, Blum et al. 1996). Dabei wurden 3.500 Profildaten der eBOD hinsichtlich ihrer Bodenart ausgewertet, wobei darauf geachtet wurde, nur die untersten Horizonte zu verwenden um eine größtmögliche Nähe zum Ausgangsgestein zu erzielen und andere Nutzungseinflüsse zu vermeiden. Die eBOD deckt die landwirtschaftliche Nutzfläche Niederösterreichs ab. Für die BZI lagen Korngrößeninformationen lediglich für den obersten Bodenhorizont vor, weshalb diese Daten nur dann verwendet wurden, wenn Formationen nicht oder durch weniger als 5 Profilpunkte repräsentiert wurden. Für die Datenaufbereitung wurden die Flächeninformationen der geologischen Karte auf die Profilpunkte übertragen und für jede Formation die am häufigsten/zweithäufigsten vorkommende Bodenart bestimmt. Die Bodenarten wurden nach ihrer potentiellen Durchlässigkeit bewertet, die mit steigendem Tongehalt abnimmt. Die anschließende Clusteranalyse erbrachte eine Trennung in 10 Cluster (+ Löss als eigenständige, bodenartlich homogene Einheit), in denen sämtliche Formationen in Niederösterreich untergebracht sind und mit denen lithologisch verwandte Einheiten am besten wiedergegeben werden. Diese Cluster entsprechen damit den Substratklassen. Zur Veranschaulichung wurden für die Bodensubstratklassen Bodenartendiagramme basierend auf dem Texturdreieck der deutschen Bodenkundlichen Kartieranleitung *KA5* erstellt (Sotier et al. 2011).

3.2.1.2 Ermittlung bodenphysikalischer Parameter

SINMAP als kombiniertes hydrologisches Stabilitätsmodell bezieht Werte für die Gefährdungsmodellierung einerseits automatisch aus der integrierten Rasteranalyse bzw. dem hydrologischen Modell. Dabei handelt es sich u.a. um die Parameter Hangneigung (θ) oder relative Feuchte (w). Andererseits erfordert SINMAP die direkte Eingabe einiger bodenphysikalischer Parameter, die aus den zugrunde liegenden Substratkarten ermittelt werden müssen. Dabei handelt es sich um die Parameter Kohäsion (C), interner Reibungswinkel (ϕ) und einen kombinierten Parameter aus Transmissivität und Niederschlag (T/R).

Als Basis für die Ermittlung der erforderlichen bodenphysikalischen Parameter dient die Karte der Bodensubstratgruppen. Diese entstammt dem HYDROBOD-NÖ Projekt, welches zusätzlich im Endbericht Körnungsdreiecke und Diagramme über den relativen Anteil der Korngrößenfraktion für jede Substratgruppe enthält (Eder et al. 2011). Diese relativen Anteile wur-

den jedoch lediglich als Säulendiagramm dargestellt, ohne die tatsächlichen Werte zusätzlich in separater Form zu enthalten. So mussten aus sämtlichen Diagrammen manuell die einzelnen Korngrößenfraktionen ermittelt werden. Anschließend wurden für die so bestimmten Werte die zugehörigen Bodenarten nach der deutschen Bodenkundlichen Kartieranleitung *KA5* (basierend auf der *DIN 4220:1998-07*[1]) festgestellt. In einem nächsten Schritt musste eine Methode gefunden werden, aus diesen Bodenarten die erforderlichen bodenphysikalischen Parameter abzuleiten. Zu diesem Zweck gibt es in den ingenieurtechnischen Fachrichtungen (Grundbau, Bodenmechanik, Statik etc.) charakteristische Bodenkennwerte bzw. Erfahrungswerte, die auf einer Vielzahl von vorangegangenen Laboranalysen beruhen. Diese Bodenkennwerte werden daher in der Regel immer in einem Schwankungsbereich angegeben, um die Unsicherheiten mit zu berücksichtigen. Für das bearbeitete Untersuchungsgebiet gibt es nur sehr vereinzelt tatsächlich durchgeführte bodenphysikalische Laboranalysen (Schweigl 2012, pers. Komm.). Da diese jedoch nur einzelne Standorte umfassen und daher mögliche lokale Einflüsse aufweisen, die nicht repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet sind, wurde von einer Berücksichtigung tatsächlich vorhandener Standortgutachten Abstand genommen. Zudem weichen diese Werte womöglich verstärkt von den charakteristischen Bodenkennwerten aus der Literatur ab, die jedoch aus einer Vielzahl von ortsunabhängigen Analysen ermittelt wurden.

Die nach *DIN 4220* ermittelten Bodenarten finden vor allem Anwendung in bodenkundlichen oder agrarökologischen Fragestellungen. Die in den Ingenieurwissenschaften ausgewiesenen charakteristischen Bodenkennwerte beziehen sich jedoch nicht auf die *DIN 4220*, sondern verwenden zur Klassifizierung von Böden eigene Normen, die für ingenieurtechnische Fragestellungen optimiert sind. In der facheinschlägigen Literatur wird dabei auf die *DIN 18196:2011-05*[2] verwiesen. Hierbei wird im Unterschied zur *DIN 4220* nicht ausschließlich nach der Korngrößenverteilung zwischen verschiedenen Bodenarten unterschieden. Zusätzlich hinzu kommt die Unterscheidung nach Plastizität und Lagerungszustand. Die Körnung trifft dabei für die Einteilung in Bodengruppen Aussagen über die Struktur (grobkörnig, feinkörnig, etc.). Somit musste eine Möglichkeit gefunden werden, die Bodenarten im bodenkundlichen Verständnis - wie sie für die Substratklassen vorliegen - in die ingenieurtechnischen Bodenklassen überzuführen. Smoltczyk (2001) schlägt als einziger Autor in der verwendeten Literatur eine zusätzliche Abgrenzung nach der Korngrößenverteilung vor. So entspricht bei ihm z.B. die Bodenart *sandiger Schluff* der Bodengruppe *Schluff, leicht plastisch* [*UL*] (*nach DIN 18196*), wobei diese Bodengruppe einen Anteil von $> 50\%$ an

[1] DIN 4220:1998-07: Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten

[2] DIN 18196:2011-05: Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

der Korngrößenfraktion $< 0,06\ mm$ und einen Anteil von gesamt $> 80\%$ an der Fraktion $< 2,0\ mm$ aufweist. So wurde für jede Bodenart die Bodengruppe bestimmt, welcher anschließend charakteristische Bodenkennwerte aus der Literatur zugewiesen wurden.

Für die bodenphysikalischen Parameter C (Kohäsion) und ϕ (Reibungswinkel) wurde jeweils die gesamte Bandbreite des Lagerungszustandes bindiger Böden aus sämtlichen herangezogenen Quellen berücksichtigt. Diese gehen als Minimum- und Maximumwert für den jeweiligen Parameter in die Modellierung ein. Zum Beispiel definiert Smoltczyk (2001) für die Bodengruppe UL einen Wertebereich für den internen Reibungswinkel von 28° bis 35°, Richwien und Lesny (2004) von $27,5°$ bis $32,5°$ und Türke (1999) von $27,5°$ bis 30°. Der kleinste Minimum- und größte Maximumwert davon wurde der jeweiligen Bodengruppe zugewiesen. Die Kohäsion geht in SINMAP als dimensionsloser Parameter als Kombination von Wurzelkohäsion (*root cohesion*) und Bodenkohäsion ein (z.B. entspräche die tatsächliche Kohäsion von 5 $^{kN}/_{m^2}$ einer Eingabe in SINMAP von 0.05). Um vegetationsbedingte Unterschiede in der Kohäsion im Untersuchungsgebiet zu berücksichtigen, wurde an Standorten, an denen eine Waldbedeckung vorlag, sowohl die minimale als auch maximale Kohäsion jeweils um einen konstanten Wert erhöht. Schwarz et al. (2012) haben eine Einflussnahme von durchschnittlich 10 $^{kN}/_{m^2}$ durch die verstärkende Wirkung von Wurzeln ermittelt. Dieser Wert wurde daher bewaldeten Flächen zur Basiskohäsion addiert.

Der aus Transmissivität und Niederschlag zusammengesetzte Parameter T/R ist selbst zu berechnen. Dieser Parameter wird in Meter angegeben und „may be thought of as the length of hillslope (planar, not convergent) required to develop saturation in the critical wet period being considered“ (Pack et al. 2005: S. 9). Die Transmissivität T $[^{m^2}/_d]$ ist das Produkt aus Durchlässigkeitskoeffizient k_f und der Mächtigkeit des Aquifers; hier wird vereinfacht die Mächtigkeit des Bodens h angenommen. Der Parameter R $[^m/_d]$ wird als *steady state recharge* bezeichnet, wird aber vereinfacht als Niederschlagsmenge pro Tag dargestellt. Diese vereinfachte Annahme wird von Pack et al. (2005: S. 2) damit begründet, dass „the complexity and additional computational burden of analyzing sequences of weather data is unwarranted“. Damit ist R der einzige stark variable Parameter in SINMAP. Als Minimumwert wurde dabei die größte Niederschlagssumme innerhalb von 24 Stunden für den Monat mit dem geringsten Wert angenommen. Der Niederschlagswert für das Minimum bezieht sich dabei auf die Normalperiode 1971-2000 für die ZAMG-Station (*Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik*) in Waidhofen/Ybbs (Seehöhe: 421 Meter; geogr. Länge: $14°45'$, geogr. Breite: $47°57'$). Der Maximumwert entspricht hier einer Abschätzung des maximalen Niederschlags innerhalb von 24 Stunden in den niederschlagsreichsten Monaten. Dazu dienen berechnete Werte aus Klimaszenarien (Has-

linger et al. 2013) und sind hier als voraussichtlich maximal zu erwartender Tagesniederschlag zu verstehen.

3.2.1.3 Kombination unterschiedlicher Kartengrundlagen

Für die Erstellung der Kalibrationsgebiete, die die unterschiedlichen bodenphysikalischen Parameter repräsentieren, gingen - wie bereits erwähnt - die aus den Bodensubstratgruppen abgeleiteten Bodengruppen in die Modellierung ein. Diese Karte resultiert aus der zugrunde liegenden Geologischen Karte mit der Auflösung 1:200.000. Sämtliche verwendete Kartenwerke liegen bereits in digitaler Form vor, sodass keinerlei nachträgliche Digitalisierung erforderlich war. Da SINMAP einen einzigen kombinierten Kohäsionswert als Eingabeparameter aufweist, wird um eine bessere Differenzierung zwischen vegetationslosen Flächen und Flächen mit Vegetation zu erzielen, die Karte der Bodengruppen über die *union* Funktion in ArcGIS mit jener der niederösterreichischen Waldkarte 1:50.000 kombiniert. Die Modellierung erfolgte jeweils mit der kombinierten Bodengruppen+Wald-Karte als auch rein mit der Karte der Bodengruppen.

Aus dem bereits erwähnten HYDROBOD-NÖ Projekt ging zudem eine niederösterreichweite Karte über die Bodenmächtigkeit hervor. Konkret wird die Bodenmächtigkeit als *abflussspeichernde Bodenmächtigkeit (asBM)* definiert. Damit wird lt. Klebinder et al. (2012) die Mächtigkeit des Solums definiert bis

1. zum Ausgangsgestein, wobei der Cv-Horizont noch zum Solum hinzugerechnet wird
2. zu einem gering durchlässigen Horizont/Stauer, oder
3. zum Grundwasserspiegel.

Die abflussspeichernde Bodenmächtigkeit umfasst dabei eine maximale Tiefe von 100 *cm*. In kartierten Bereichen wurde die Bodenmächtigkeit aus der Horizontansprache abgeleitet. In nicht kartierten Bereichen wurde sie über eine Regressionsfunktion berechnet. Die Tiefenwerte liegen jedoch nicht als kontinuierliche Datenreihe, sondern als kategorische Daten vor. Die 16 Tiefenstufen wurden hier mittels *natural breaks*-Methode zu vier Tiefenstufen klassifiziert. Da die Definition für die abflussspeichernde Bodenmächtigkeit (in weiterer Folge nur noch als Tiefe bezeichnet) für die Analyse flachgründiger Translationsrutschungen als geeignet erachtet wurde, wurde die Karte über die klassifizierten Tiefenstufen als zusätzliches Kalibrierungsgebiet für die Modellierung berücksichtigt. Damit liegen für die Modellierung in SINMAP letztendlich 4 Kalibrationsgebiete vor: Bodengruppen, Bodengruppen+Wald, Tiefe, Tiefe+Wald. Diese als *polygon shapefiles* vorliegenden Karten wurden in verschiedenen Auflösungen gerastert:

5, 10 und 20 Meter. Die Tiefenkarte lag ausschließlich als Raster mit einer Auflösung von 20 Meter vor, weshalb sie auch nur mit dieser Auflösung in die Modellierung einging.

3.2.2 Digitales Geländemodell (DGM)

Eine zentrale Rolle für die Gefährdungsmodellierung mit SINMAP spielt das zugrunde liegende Digitale Geländemodell (DGM). Dabei wird die Geländeoberfläche mit einem flugzeuggestützten Laserscanner (*airborne laserscanning*) abgetastet und später zu einem Raster verarbeitet. Die Vegetation wird im Unterschied zum Digitalen Höhenmodell (DHM) hier nicht berücksichtigt, weshalb rein die Geländeoberfläche abgebildet ist. Informationen zur Technik bzw. zum Befliegungszeitpunkt des vorliegenden DGM befinden sich in Kapitel 3.7. Aus dem DGM werden in SINMAP sowohl sämtliche topographische als auch hydrologische Parameter abgeleitet. Aus diesem Grund ist ein möglichst hoch aufgelöstes Geländemodell erstrebenswert. Um die Auswirkungen verschiedener räumlicher Auflösungen auf das Resultat der Gefährdungsmodellierung zu ermitteln, wurden sämtliche Modelldurchläufe in unterschiedlichen Rastergrößen durchgeführt. Dabei wurde das in 1 Meter Auflösung vorliegende DGM mit Hilfe der *Resample* Funktion in ArcGIS auf die jeweils selbe Auflösung der entsprechenden Kalibrationsgebiete auf Pixelgrößen von 5, 10 und 20 Meter modifiziert (*upscaling*).

3.2.3 Inventar gravitativer Massenbewegungen

Möglichst vollständige Inventare gravitativer Massenbewegungen gehören zu den wichtigsten Grundvoraussetzungen für die Gefährdungsmodellierung von Rutschungen und schließlich für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Es gibt zwar in Europa in zahlreichen Staaten nationale Inventare, diese sind jedoch bei weitem nicht vollständig. Ein Vergleich zwischen Staaten ist schwierig, da es keine einheitlichen Richtlinien für die Kartierung von gravitativen Massenbewegungen gibt (Eeckhaut et al. 2012). Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Rutschungsinventar wurde im Rahmen des Projektes MoNoe (*Methodenentwicklung für die Gefährdungsmodellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich*) erstellt (Petschko et al. 2012a, Bell et al. in Press). Dabei handelt es sich um ein homogenisiertes Inventar mit Punktinformationen, da Petschko et al. (in Press) zeigen konnten, dass in den Anrissbereichen gesetzte Punkte einen fast gleichwertigen Informationsgehalt liefern wie die Kartierung von Polygonen.

Die Rutschungen wurden überwiegend digital aufgenommen. Dazu standen zahlreiche digitale Geodaten zur Verfügung, wobei das wichtigste das hochaufgelöste Digitale Geländemodell (in der Auflösung von 1x1 Meter) ist. Daraus abgeleitete Derivate, die zur Kartierung beitrugen, waren Schum-

merungskarten (*hillshades*) mit unterschiedlichen Azimutwinkeln (315°, 45°, 135°), um unterschiedliche Beleuchtungseffekte zu erzielen, Konturlinien im Abstand von 4 Metern sowie Hangneigungskarten. Damit - und mit Unterstützung von Orthofotos aus den Jahren 2002 und 2007 - wurde visuell die durch Rutschungen veränderte Geländemorphologie erfasst. Kriterien dafür waren u.a. eine konkave Hauptanrisskante, konvexe Akkumulationsbereiche, signifikante Änderungen in der Hangneigung und sichtbare Risse und Spalten. Pro Rutschung wurde dabei je ein Punkt in den Anrissbereich gesetzt, da dort „landslide boundaries are easy to detect what results in high relative accuracy in the location of the points“ (Petschko et al. 2012b: S. 771). Die Kartierungen wurden im Zuge von Geländebegehungen an ausgewählten und charakteristischen Standorten überprüft. Das Inventar unterscheidet nicht zwischen unterschiedlichen Rutschungstypen; kartiert worden sind allgemein gravitative Massenbewegungen des Typs *Rutschen*, die eine Mindestgröße von 100 m^2 umfassen (Petschko 2013, pers. Komm.).

3.2.4 Aufteilung des Untersuchungsgebietes

Resultate aus Modellierungsdurchläufen für das gesamte Untersuchungsgebiet zusammen haben ergeben, dass die Stabilitätswerte im Norden aufgrund der geringeren Hangneigung, bedingt durch eine gänzlich andere Lithologie als im Süden, viel zu hoch ausgefallen sind. Deterministische Modelle sind jedoch überwiegend nur dann anwendbar, wenn die geomorphologischen und geologischen Bedingungen weitgehend homogen sind und im gesamten Untersuchungsgebiet überwiegend simple Rutschungstypen vorkommen, z.B. flachgründige Translationsrutschungen (Thiebes 2012). Aus diesem Grund wurde auch im Rahmen dieser Arbeit eine solche Trennung vorgenommen. Petschko et al. (2012b) haben in ihrer Arbeit aufgrund der sehr heterogenen lithologischen Bedingungen eine Trennung des Untersuchungsgebietes vorgenommen. Die Differenz zwischen den verschiedenen Einheiten wurde durch unterschiedliche Ansätze ermittelt. Diese umfassten u.a. die visuelle Interpretation der Schummerungskarte mit überlagerter lithologischer Karte, dem explorativen Vergleich der durchschnittlichen Hangneigung je lithologischer Einheit oder der Verteilung der Rutschungen in Abhängigkeit der Hangneigung. Für die hier vorliegende Arbeit hat sich damit eine klare Trennung in ein nördliches und südliches Gebiet ergeben, die sich jeweils durch Lithologie, Hangneigung und Rutschungsdichte deutlich unterscheiden. Die Charakterisierung des Untersuchungsgebietes erfolgt in Kapitel 4. Abbildung 5.3 visualisiert die Trennung in einer Karte, während für sämtliche Modellierungsdurchläufe beide Teilgebiete stets getrennt betrachtet wurden.

3.3 DGM Rasteranalyse

Das Digitale Geländemodell (DGM) spielt eine zentrale Rolle für die Gefährdungsmodellierung in SINMAP. Das DGM ist in einer Matrixdatenstruktur abgespeichert und beinhaltet für jedes Pixel in dieser Matrix die dazugehörigen Höheninformationen. Daraus lassen sich speziell in einem GIS zahlreiche topographische Analysen durchführen. SINMAP führt zu diesem Zweck vier solcher Analysen durch. Die erste ist eine *Pit filling correction*. Pits werden definiert als Grid-Elemente, die durch höheres Gelände umgeben sind und keinen Abfluss aufweisen. Die Auffüllung dieser abflusslosen Senken erfolgt durch Angleichung an benachbarte Rasterpixel. Der Angleich erfolgt dabei mit dem am tiefst gelegenen Nachbarpixel. Solche *pits* sind i.d.R. Artefakte des DGMs und in der Natur nicht vorzufinden Pack et al. (2005). Die nächsten Schritte umfassen die Bestimmung der Hangneigung und der Fließrichtung. SINMAP verwendet dazu den D∞ Ansatz von Tarboton (1997). Dieser Ansatz ermöglicht eine Abflussweitergabe an einen oder auch an mehrere Pixel. Darauf folgt die Bestimmung des spezifischen Einzugsgebietes. Dieses stellt - basierend auf der Fließrichtung - die Größe des Gebietes, aus dem Abfluss in jedes einzelne Pixel erfolgt, dar.

3.4 Stabilitätsanalyse

Die Stabilitätsanalyse als letzter Schritt in SINMAP beinhaltet schlussendlich die Ergebnisse der DGM Rasteranalyse (Pit filling correction, Hangneigung, Fließrichtung) und die parametrisierten Kalibrationsgebiete. Als Resultat werden die Bodenwassersättigung und die modellierte Stabilität für jeden einzelnen Pixel im Untersuchungsgebiet berechnet und in Form einer Rasterkarte ausgegeben. Anhand des Inventars gravitativer Massenbewegungen erfolgt eine statistische Auswertung über die räumliche Verteilung der Rutschungen in den modellierten Stabilitätsklassen.

Die Ermittlung des Stabilitätsindex (SI) wurde bereits in Kapitel 3.1.3 erläutert. Die berechneten Werte für den Stabilitätsindex werden in SINMAP klassifiziert und als Rasterkarte mit 6 Stabilitätsklassen ausgegeben. Eine eigene Klassifikation mit anderen Klassengrenzen ist in einem GIS zwar möglich, allerdings wurde im Rahmen dieser Arbeit die vorgegebene Klassifikation von Pack et al. (2005) verwendet. Sie verwenden dazu die Begriffe *stable*, *moderately stable* und *quasi-stable*, um Gebiete mit einem $SI > 1.0$ zu klassifizieren, die „according to the model should not fail with the most conservative parameters in the parameter ranges specified“ (S. 4). Die Begriffe *lower threshold* und *upper threshold* charakterisieren Gebiete ($1.0 > SI > 0.0$), die „according to the parameter uncertainty ranges quantified by the model, the probability of instability is less than or greater than

Tabelle 3.1: Definition der in SINMAP verwendeten Stabilitätsklassen nach Pack et al. (2005)

Bedingung	Klasse	Stabilitäts-klasse	Parameterbereich	möglicher Einfluss nicht model-lierter Faktoren
SI > 1,5	1	Stable slope zone	Parameterbereich kann keine Instabilität model-lieren	signifikant destabilisierende Fakto-ren notwendig für Instabilität
1,5 > SI > 1,25	2	Moderately stable slope zone	Parameterbereich kann keine Instabilität model-lieren	moderat destabilisierende Fakto-ren notwendig für Instabilität
1,25 > SI > 1,0	3	Quasi-stable slope zone	Parameterbereich kann keine Instabilität model-lieren	geringe destabilisierende Faktoren können zu Instabilität führen
1,0 > SI > 0,5	4	Lower threshold slope zone	pessimistischer halber Parameterbereich not-wendig für Instabilität	destabilisierende Faktoren sind nicht notwendig für Instabilität
0,5 > SI > 0,0	5	Upper threshold slope zone	optimistischer halber Parameterbereich not-wendig für Stabilität	stabilisierende Faktoren könnten für Stabilität verantwortlich sein
0,0 > SI	6	Defended slope zone	Parameterbereich kann keine Stabilität modellie-ren	stabilisierende Faktoren notwen-dig für Stabilität

50% respectively“ (S. 4). Die letzte Klasse wird als *defended* bezeichnet, wobei diese „according to the model, the slope should be unstable for any parameters within the parameter ranges specified“ (S. 5). Diese letzte Klasse $(0,0 > SI)$ bezeichnet dabei Gebiete, die scheinbar von Faktoren beeinflusst werden, die durch das Modell nicht abgedeckt werden bzw. Gebiete mit besonderen natürlichen Gegebenheiten (z.B. exponiertes, anstehendes Gestein), die vom Modell nicht verarbeitet werden. Tabelle 3.1 zeigt die für die Stabilitätsanalyse verwendeten Stabilitätsklassen inkl. deren Klassenwerte und dem möglichen Einfluss nicht modellierter Faktoren. Die eigene Farbgebung der Stabilitätsklassen in der Tabelle entspricht auch jener in den Gefahrenhinweiskarten.

3.5 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse liefert allgemein Aussagen darüber, wie sehr Änderungen bei den Eingangsbedingungen ein Ergebnis beeinflussen, also wie sensitiv ein System reagiert. Hierzu soll geklärt werden, wie sich die Resultate der Gefährdungsmodellierung ändern, wenn die Werte der geotechnischen Parameter innerhalb eines festgelegten Wertebereichs modifiziert werden. Damit können Aussagen darüber getroffen werden, wie stark ein bestimmter Parameter, der in die Modellierung einfließt, das Ergebnis beeinflusst. Im Rahmen einer deterministischen Modellierung ist es deshalb auch möglich, vereinfachte Zukunftsszenarien zu erstellen. Sofern eine Zunahme der Niederschlagsintensität zu verstärkter Rutschungsaktiviät führt, erlaubt ein deterministisches Modell bei Veränderung hydrologischer Parameter Aussagen

über zukünftige Veränderungen. Die hier durchgeführte Sensitivitätsanalyse erlaubt durch die Veränderung des T/R Wertes einen ersten groben Ausblick bezüglich eventuell auftretender zukünftiger Veränderungen. Hammond et al. (1992) erwähnen zudem, dass die Sensitivitätsanalyse dazu genutzt werden kann, die wichtigsten Inputparameter bestimmen zu können, um den Fokus der Primärdatenerhebung auf bestimmte Parameter zu lenken, die sich besonders stark in der Modellierung auswirken würden.

Eine Möglichkeit, die Sensitivitätsanalyse durchzuführen, ist die direkte Ableitung der Veränderung aus dem Factor of Safety (FoS) (Simons et al. 1978). Hierbei würde in der Formel zur Berechnung des FoS der jeweilige Parameter geändert werden, dessen Sensitivität es zu ermitteln gilt. Dabei würde der jeweilige Parameter in einem Wertebereich von Minus bis Plus 100% berechnet und grafisch in einem Diagramm dargestellt, wobei die Achsen die Veränderung des Parameters in Prozent sowie die Veränderung des FoS wiedergeben.

Da im Rahmen dieser Arbeit modellbedingt jedoch einige Werte direkt aus der Rasteranalyse (Hangneigung, Feuchteverhältnisse etc.) in die Berechnung des FoS einfließen, die nicht direkt ablesbar sind bzw. ohnehin zusammengesetzte Parameter sind (T/R-Wert als Kombination aus Transmissivität und Niederschlag), wurde ein anderer Ansatz gewählt. Hier wird nicht der theoretische FoS für einen einzelnen Pixel und dessen Änderung bei Modifikation einzelner zugrunde liegender Parameter berechnet, sondern die Veränderung der jeweiligen Fläche der einzelnen Gefährdungsklassen über das gesamte Untersuchungsgebiet. Es wird somit der FoS für jeden einzelnen Pixel berechnet. Da SINMAP für jeden Parameter einen Schwankungsbereich zulässt, erfolgt die Sensitivitätsanalyse sowohl für die gleichsame Veränderung des Maximum- und Minimumwertes eines Parameters (wobei die anderen Parameter ihren Basiswert beibehalten), als auch die Veränderung nur eines der Werte, also Veränderung des Maximumwertes bei gleichzeitig gleichbleibendem Minimumwert und umgekehrt. Wurde außerdem durch die Absenkung bzw. Erhöhung eines Parameters bei gleichbleibendem Maximum- oder Minimumwert dieser über- bzw. unterschritten, so wurde der betroffene Wert gleichsam mit dem errechneten modifizierten Wert gleichgesetzt.

Die Parameter T/R und Φ wurden jeweils in 10% Schritten im Wertebereich zwischen 50% und 150% ihres Basiswertes (=100%) modifiziert, während alle anderen Parameter ihren Basiswert beibehielten. Da die minimale Kohäsion Null beträgt, wurde bei diesem Parameter etwas anders vorgegangen. C_{min} wurde auf 100% mit C_{max} gleichgesetzt und jeweils um 10% des C_{max}-Wertes verringert.

3.6 Vergleich mit statistischer Modellierung

Im Zuge dieser Arbeit erfolgt eine Gefährdungsmodellierung flachgründiger Translationsrutschungen auf physikalischer Basis. Für das Untersuchungsgebiet erfolgte jedoch auch schon eine Modellierung mit einem statistischen Ansatz (Petschko et al. 2012b). Dies wurde als Anlass genommen, einen Vergleich beider Modellierungsergebnisse anzustellen. Die statistische Modellierung erfolgte mittels eines *generalized additive models* (GAM). Dieses kombiniert die häufig in der statistischen Gefährdungsmodellierung angewandten *generalized linear models* (GLM), wozu u.a. die lineare Regression zählt, mit einem additiven Modell. Dabei wird anstatt eines einzelnen Koeffizienten für jede Variable eine nicht spezifizierte bzw. nichtparametrisierte Funktion geschätzt. Damit soll eine bestmögliche Vorhersage für die abhängigen Variablen erzielt werden. Dies wurde für jede lithologische Einheit separat durchgeführt, einerseits um den unterschiedlichen geotechnischen Parametern in den verschiedenen Einheiten gerecht zu werden, andererseits um die spezifischen Hangneigungen zu berücksichtigen. Das GAM wurde über eine schrittweise Variablenauswahl basierend auf dem *Akaike's Information Criterion* (AIC) durchgeführt. Eine statistische Validierung erfolgte über einen Testdatensatz mit der Berechnung der Fläche unterhalb der *receiver operating curve* (ROC). Dabei wird der Prozentsatz der korrekt klassifizierten Rutschungspunkte gegen den Prozentsatz der falsch klassifizierten Nicht-Rutschungspunkte aufgetragen.

Ziel dieser statistischen Modellierung waren Gefahrenhinweiskarten für die Verwendung in der Raumplanung, weshalb sie spezielle Ansprüche an die Benutzerfreundlichkeit stellte. Neben der Farbgebung war die Auswahl der verwendeten Gefährdungsklassen von entscheidender Bedeutung. Für die Endnutzung wurden schlussendlich drei Klassen festgelegt: *Gefährdung nicht zu erwarten*, *Gefährdung nicht auszuschließen* und *Gefährdung zu erwarten*. Die von Petschko et al. (2012b) erstellte Gefahrenhinweiskarte basierend auf statistischer Modellierung ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

Aus zeitlichen Gründen kann der Vergleich des hier durchgeführten physikalisch basierten Ansatzes mit den Ergebnissen des statistischen Ansatzes nur in sehr kleinem Umfang erfolgen. Der erhaltene Rastergrid der statistischen Modellierung weist eine Auflösung von 10 Meter auf. Aus diesem Grund wurde als Vergleichsergebnis aus der physikalisch basierten Modellierung das Resultat aus dem Kalibrationsgebiet *Bodengruppen ohne Wald* mit einer Auflösung von 10 Meter gewählt. Das Hauptproblem dabei besteht darin, Klassengrenzen festzulegen, die zwar gänzlich anders ermittelt werden, aber dennnoch für etwaige Endnutzer dieselbe Aussagekraft aufweisen. Um die Vergleichbarkeit zu erhöhen, wurden die sechs in SINMAP verwendeten Stabilitätsklassen (Tabelle 3.1) auf ebenfalls drei Klassen reduziert. Deb

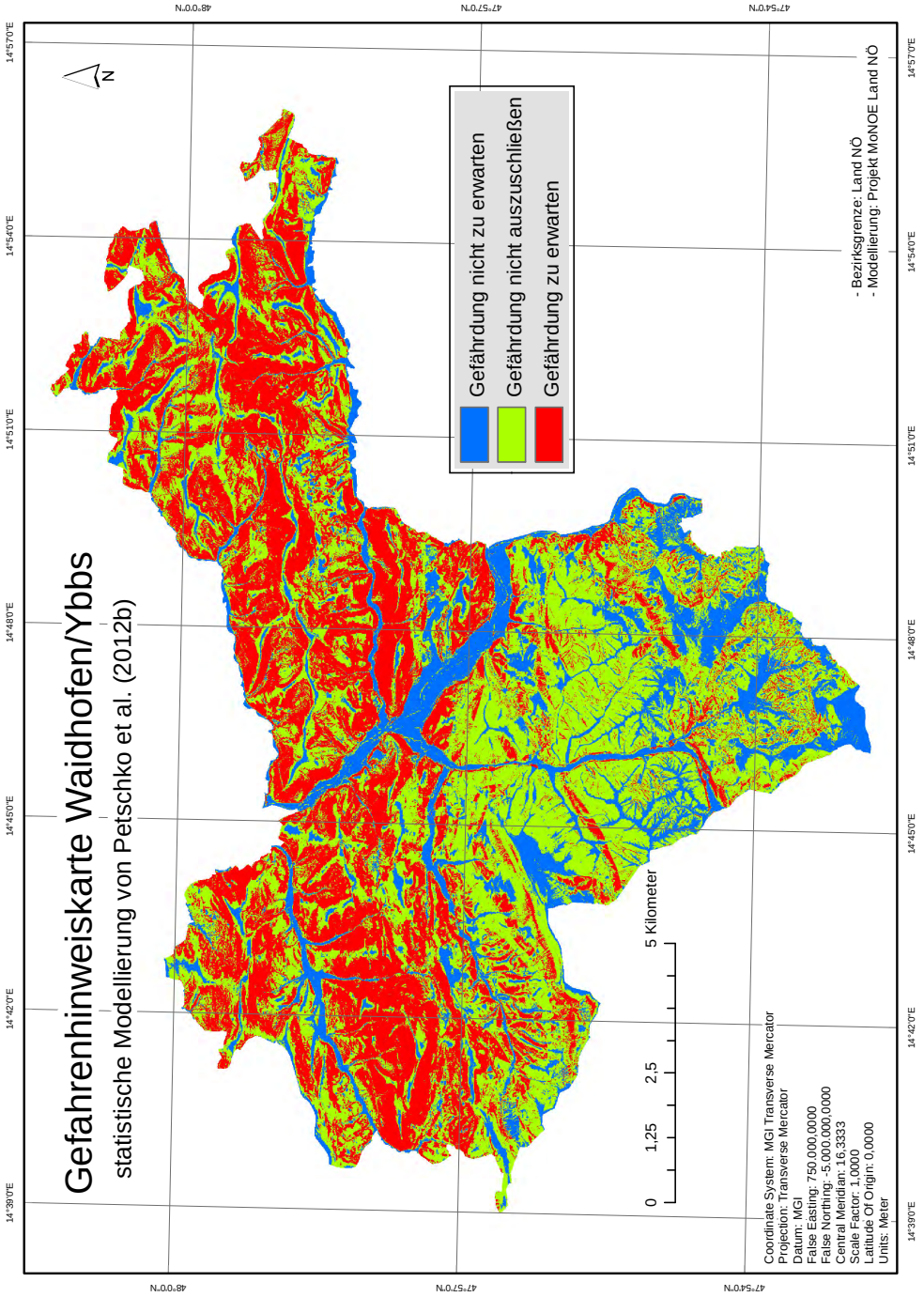


Abbildung 3.5: Gefahrenhinweiskarte von Petschko et al. (2012b) basierend auf einem statistischen Ansatz durchgeführt mit einem *generalized additive model* (GAM)

und El-Kadi (2009) stellen einen ähnlichen Vergleich auf, in dem sie die Modellierung aus SINMAP einer Gefahrenkarte für Muren gegenüberstellen. Dabei klassifizieren sie einen $SI > 1.5$ als *Safe area*, $1.5 > SI > 1.0$ als *Low-to-medium susceptibility* und darunter als *High* ($1.0 > SI > 0.5$) bzw. *Very high susceptibility* ($0.5 > SI > 0.0$). Dieser Klassifikation folgt die hier vorliegende Arbeit, jedoch werden die letzten drei Stabilitätsklassen direkt zu einer zusammengefasst ($1,0 > SI > 0$), um schließlich zu drei Gefährdungsklassen zu gelangen.

Verglichen werden die beiden Gefahrenhinweiskarten aus den verschiedenen Modellierungsansätzen schließlich auf zwei Arten: a) Vergleich der absoluten Fläche der jeweiligen Gefährdungsklasse im Untersuchungsgebiet bzw. deren relativen Anteil und b) ein pixelgenaues Differenzmodell, wobei die Abweichung der Gefährdungsklasse ausgehend von der statistischen Modellierung zwischen -2 und $+2$ bestimmt wird, um räumliche Muster aufzudecken, in denen sich die beiden Modellierungsansätze deutlicher unterscheiden.

3.7 Daten

Eine zusammenfassende Auflistung der in dieser Arbeit verwendeten Daten ist Tabelle 3.2 zu entnehmen. Sämtliche Daten sind als digitale Datensätze verfügbar, weshalb keine selbstständige Kartierung oder Digitalisierung erfolgen musste.

Das Digitale Geländemodell (DGM) ist der wichtigste Datensatz dieser Arbeit, da die GIS gestützte Gefährdungsmodellierung mit SINMAP zu einem großen Teil topographische Parameter (u.a. Feuchte und Hangneigung) aus dem DGM ableitet. Das DGM für das gesamte Bundesland wurde vom Land Niederösterreich zur Verfügung gestellt. Die räumliche Auflösung beträgt 1x1 Meter. Die *resample* Funktion wurde dazu verwendet, die Auflösung des DGM auf 5, 10 und 20 Meter zu ändern. Die Aufnahme erfolgte mittels flugzeuggestützter Laserscannbefliegung (ALS - *Airborne Laserscan*) im Auftrag der Niederösterreichischen Landesregierung. Die Aufnahmen für das Untersuchungsgebiet erfolgten in zwei Befliegungen: der Flugblock Waidhofen an der Ybbs wurde im Frühjahr 2008 (KW15/08-KW25/08) abgedeckt; der Befliegungszeitraum für den Flugblock Raming war im Frühjahr 2009 (KW16/09). Die Aufnahmen erfolgten jeweils mit dem Laserscanner des Typs *Riegl LMS-Q560* (NÖAtlas 2013). Bei der ALS Technik wird die Geländeoberfläche mit einer punktweisen Entfernungsmessung abgetastet. Damit wird einerseits die Geländehöhe, andererseits werden Objekte darauf erfasst. Durch unterschiedliche Rückstrahlwerte und dem Einsatz einer *full waveform* Technik können nachträglich Objekte auf der

Tabelle 3.2: In dieser Arbeit verwendete Datensätze

Datensatz	Format	Auflösung/Maßstab	Datenquelle
Digitales Geländemodell (DGM)	Raster	1 m	Land Niederösterreich
Geologische Karte	Polygon shapefile	1:200.000	Land Niederösterreich
Substratklassen	Polygon shapefile	1:200.000	Projekt HydroBod Land Niederösterreich
abflussspeichernde Bodenmächtigkeit (asBM)	Raster	20 m	Projekt HydroBod Land Niederösterreich
Wald	Polygon shapefile	1:50.000	Land Niederösterreich
Bezirksgrenzen	Polygon shapefile	1:200.000	Land Niederösterreich
Orthofoto	Raster	12,5 cm	Land Niederösterreich
Rutschungen	Punkt shapefile	-	Projekt MoNOE Land Niederösterreich
Substratdaten	Literatur	-	Türke 1999 Smoltczyk 2001 Richwien & Lesny 2004

Geländeoberfläche subtrahiert werden, um die reine Topographie zu erhalten. Werden die Objekte auf der Geländeoberfläche belassen, wird von einem Digitalen Höhenmodell (DHM) gesprochen (El-Sheimy et al. 2005).

Kapitel 4

Untersuchungsgebiet

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem bearbeiteten Untersuchungsgebiet dieser Arbeit. Das Untersuchungsgebiet umfasst den gesamten Bezirk Waidhofen an der Ybbs im Südwesten des Bundeslandes Niederösterreich (Mostviertel). Das Kapitel gliedert sich in eine allgemeine Beschreibung der Geologie und der Verteilung gravitativer Massenbewegungen in Niederösterreich, sowie anschließend einer Charakterisierung des Bezirks Waidhofen/Ybbs hinsichtlich Geologie, Klima, Hydrologie, Böden, Landnutzung und Geomorphologie. Abbildung 4.1 zeigt die Lage des Untersuchungsgebietes in Niederösterreich.

4.1 Geologie Niederösterreichs

Die Geologie Niederösterreichs weist zahlreiche tektonische Großeinheiten auf, die auf der Übersichtskarte in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Die Böhmische Masse im Nordwesten Niederösterreichs bildet dabei den kristallinen Sockel, der im Waldviertel, im Dunkelsteinerwald und im Amstettener Bergland zutage tritt. Quartäre Deckschichten als rezente Ablagerungsprodukte der Erosion machen die geologisch jüngste Einheit aus. Daraus empor ragen östlich und südlich der Böhmischen Masse die Molassezone als Vortiefe der Alpen. Südlich daran anschließend folgt der Alpengürtel, bestehend aus Flyschzone mit den Klippenzonen, den Nördlichen Kalkalpen mit der im Süden anschließenden Grauwackenzone an der Basis und der Zentralalpenzone im Südosten des Landes (Wessely 2006).

4.2 Rutschungen in Niederösterreich

Rutschungen in Österreich mit Sach- und Personenschaden (z.B. Feldbach, Juni 2009 oder Gasen/Haslau, August 2005) verursachen große ökonomische Schäden. Auch Niederösterreich ist jährlich von zahlreichen gravitativen

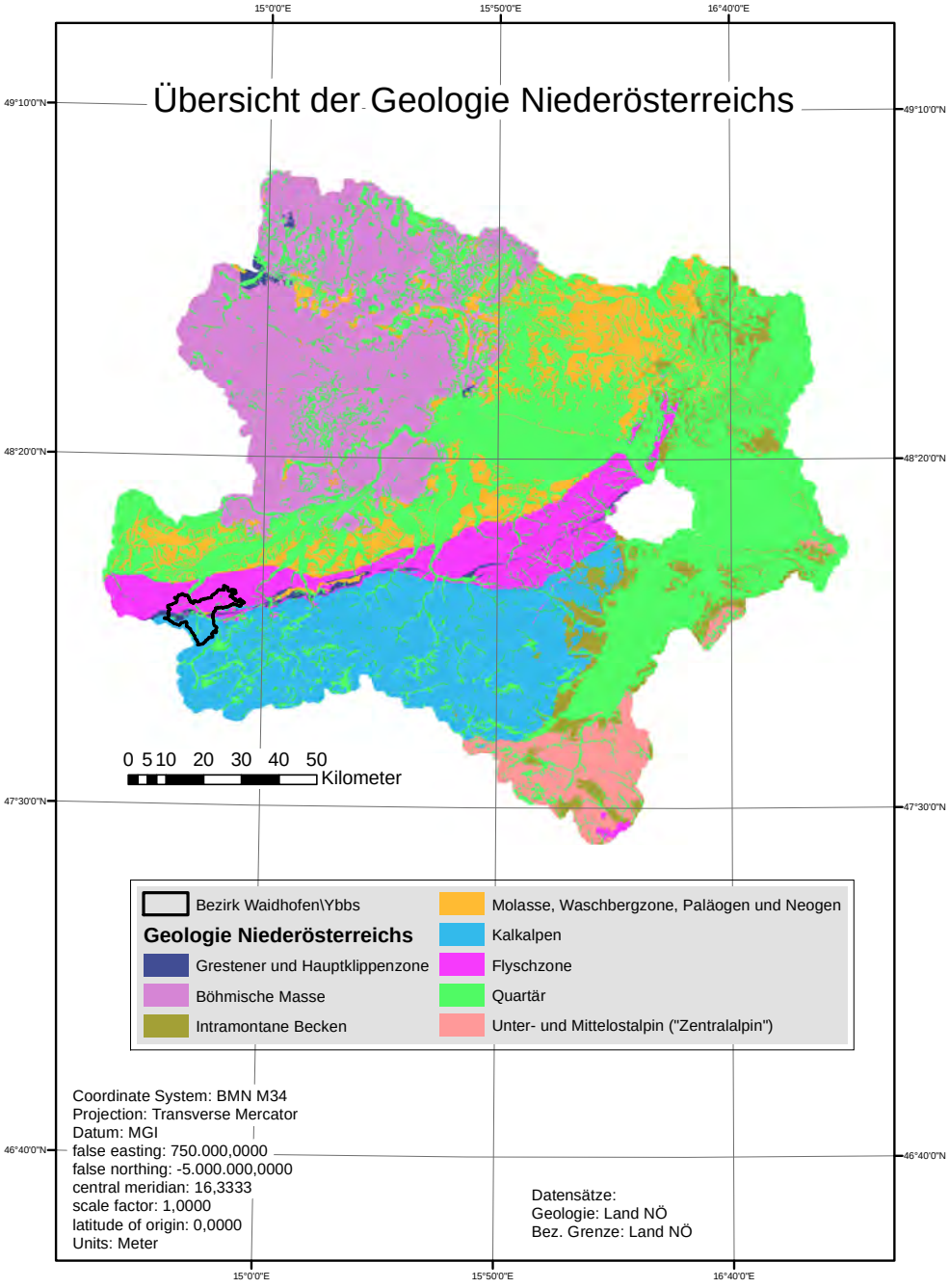


Abbildung 4.1: Übersicht der Geologie Niederösterreichs

Massenbewegungen betroffen (Schwenk 1992). Die Geologische Bundesanstalt weist dazu in ihrem Baugrundkataster (BGK) ca. 1.800 Einträge zu gravitativen Massenbewegungen für Niederösterreich aus. Der Typus reicht dabei von Felsstürzen über flachgründige Translationsrutschungen bis hin zu tiefgründigen Rotationsrutschungen. In Niederösterreich sind ca. 50% der Gemeinden von gravitativen Massenbewegungen betroffen (Petschko et al. 2012a). Für Niederösterreich, mit 15.850 km^2 das flächengrößte Bundesland Österreichs, gibt es zahlreiche Rutschungsinventare, die sich hinsichtlich Vollständigkeit, Genauigkeit und Aktualität stark unterscheiden. Eine Übersicht der verschiedenen Inventare und der Verortung ihrer Einträge zeigt Abbildung 4.2. Für weiterführende Analysen und der Herstellung von Gefahrenhinweiskarten auf regionaler Ebene sind die Informationen aus den verschiedenen Inventaren jedoch nur mäßig geeignet. Sie decken nur gewisse Teile des Bundeslandes ab, umfassen nur tatsächliche Schadensfälle oder sind räumlich nur unzureichend verortet. Aus diesem Grund entstand für die Erstellung einer niederösterreichweiten Gefahrenhinweiskarte ein neues, homogenisiertes Inventar (Petschko et al. 2012a). Die Methodik der Aufnahme wird in Kapitel 3.2.3 erläutert, da dieses Inventar in der hier vorliegenden Arbeit verwendet wurde. Es umfasst 13.162 Rutschungen, wobei keine weitere Differenzierung nach Typ vorgenommen wurde (Abb. 4.3). Die dazugehörige Datentabelle befindet sich in Anhang B.

Quantitative Untersuchungen zur Rutschungsgefährdung in Niederösterreich, die nicht bloß einzelne Rutschungen betreffen, stammen u.a. von Petschko et al. (2012b) (gesamt Niederösterreich), Gassner et al. (2013) (Bezirk Waidhofen an der Ybbs), Neuhäuser et al. (2012) (Wienerwald), Damm und Terhorst (2010) (Wienerwald) und Terhorst und Damm (2009) (Wienerwald).

4.3 Untersuchungsgebiet Waidhofen an der Ybbs

Waidhofen an der Ybbs ist eine Statutarstadt und dadurch gleichzeitig ein eigener Bezirk im Südwesten Niederösterreichs. Der Bezirk hat eine Fläche von 131,52 km^2 und weist eine Einwohnerzahl von ca. 11.500 auf. Die Bevölkerungsdichte beträgt 87 Einwohner pro km^2.

4.3.1 Klima

Das Klima in Waidhofen kann als humid bis kontinental charakterisiert werden (Lemenkova et al. 2012). Die Sommertemperaturen (bezogen auf die Normalperiode 1971-2000) sind gemäßigt mit Tagesmittelwerten von ca. +17°C. Die feuchtesten Monate sind im Sommer mit einer mittleren Monatssumme des Niederschlags von bis zu 144 *mm* (Juli). Die größte Niederschlagssumme innerhalb eines Tages überstieg 80 *mm*. Frühlings- und

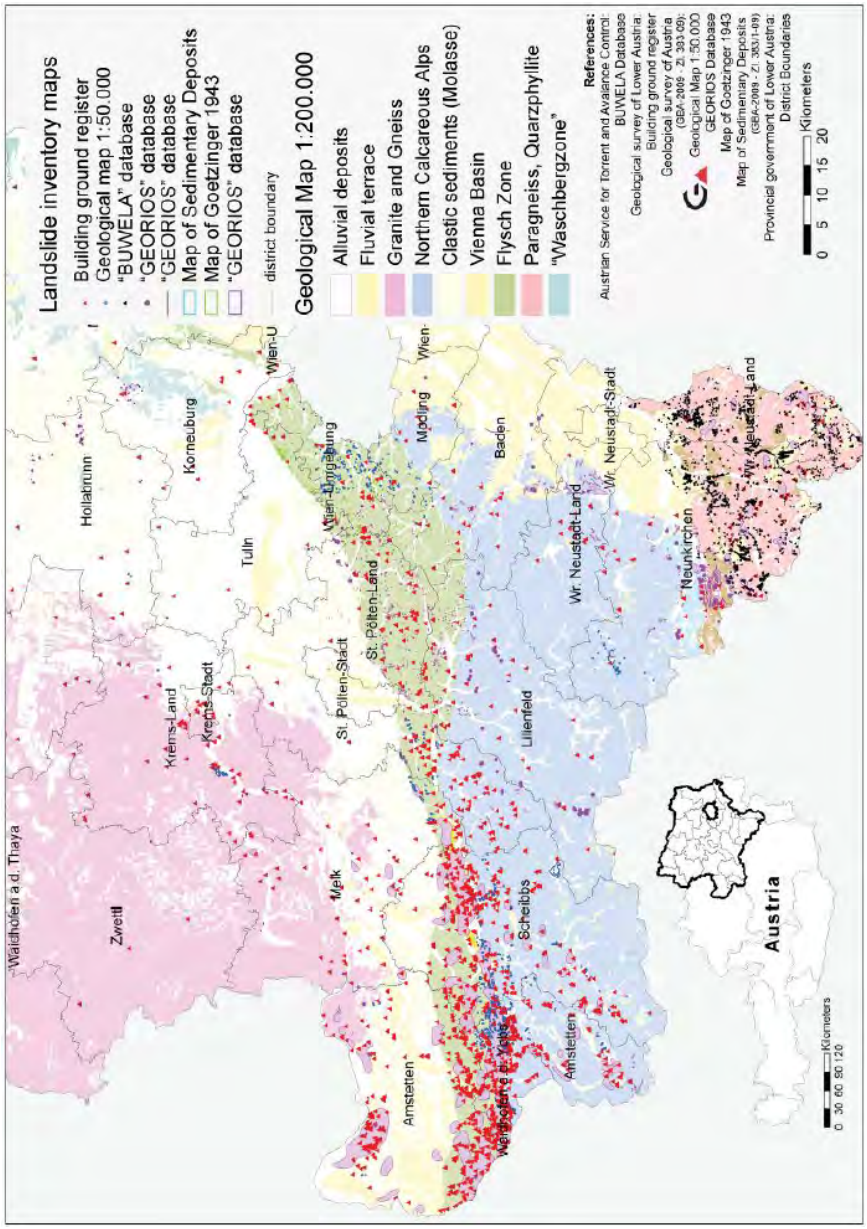


Abbildung 4.2: Inventare gravitativer Massenbewegungen in Niederösterreich. Quelle: Bell et al. (in Press)

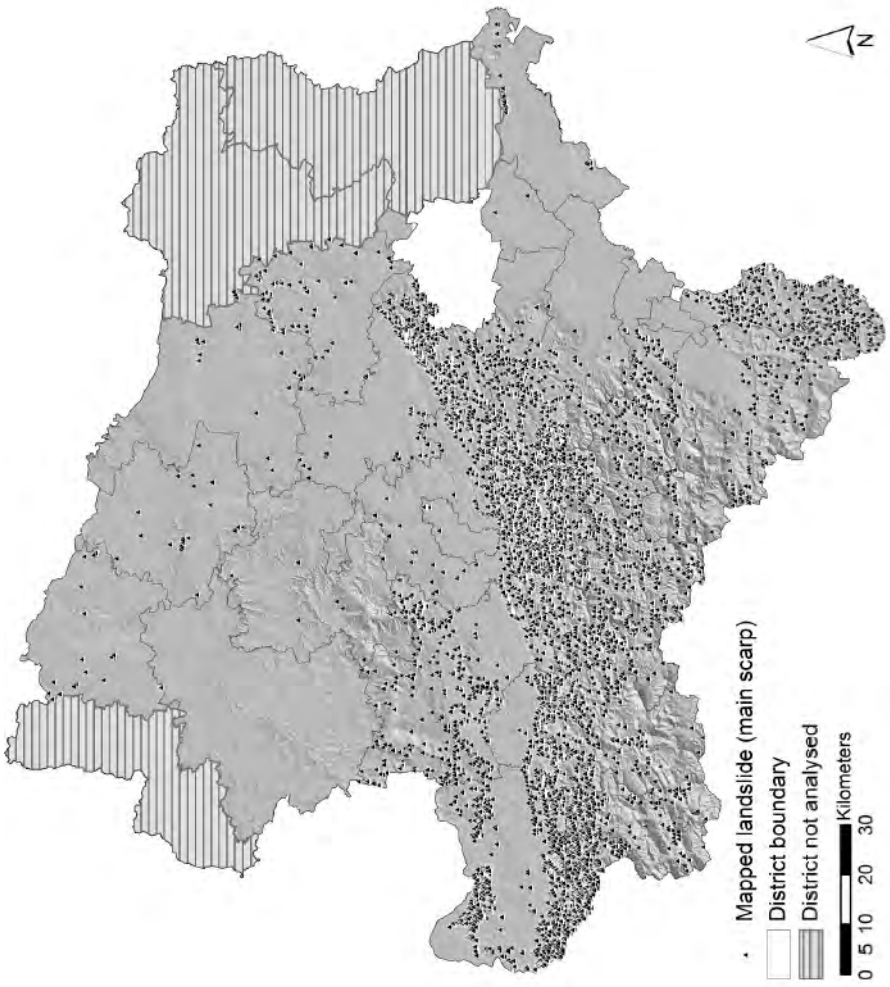


Abbildung 4.3: Räumliche Verteilung der kartierten Rutschungen in Niederösterreich. Quelle: Petschko et al. (2012a)

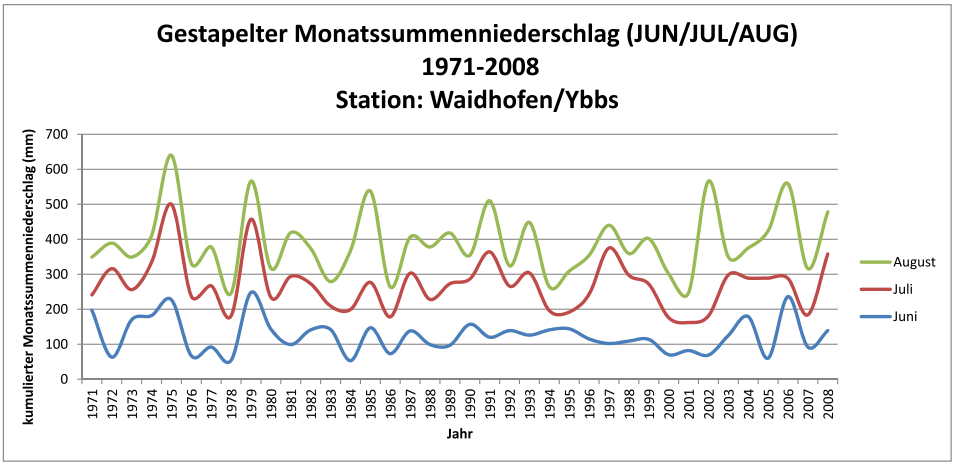


Abbildung 4.4: Gestapelter Monatssummenniederschlag in Waidhofen für die Monate Juni/Juli/August im Zeitraum 1971-2008 (Linien geglättet). Quelle: HISTALP Datensatz der ZAMG (Auer et al. 2007)

Herbstniederschläge reichen ebenfalls beinahe an die 100 *mm* Niederschlag Monatssumme heran. Die Summe der Neuschneemengen im Winter (Dez/-Jan/Feb) wird mit ca. 30 *cm* angegeben. Die maximale Schneedecke beträgt im Dezember bis zu 84 *cm*. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 1133,6 *mm* (Vergleich Station *Wien-Innere Stadt*: 547,9 *mm*) (ZAMG 2013). Die Messstation für den Standort Waidhofen liegt auf 421 Meter Höhe (14° 45' O, 47° 57' N). Orographisch bedingte Änderungen im vertikalen Niederschlagsgradienten für höher gelegene Standorte sind zu erwarten. Abbildung 4.4 zeigt den gestapelten Monatssummenniederschlag in Waidhofen für die niederschlagsreichsten Monate Juni, Juli und August für die Periode 1971-2008. Die Daten basieren auf dem HISTALP (*Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region*) Datensatz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (Auer et al. 2007).

4.3.2 Geologie

Der Bezirk Waidhofen/Ybbs liegt in einem komplexen geologischen Interaktionsraum. So befinden sich auf der Geologischen Karte 1:200.000 (GK200) 30 verschiedene Formationen, die sich durch unterschiedliche Lithologien unterscheiden (durch morphologische, petrologische, mineralogische, paläontologische u.a. Merkmale). Abbildung 4.5 zeigt alle in Waidhofen vorkommenden Formationen gemäß der GK200. Die Legende dazu befindet sich aufgrund deren Länge in Anhang A. An der tektonischen Großgliederung hat Waidhofen Anteil an vier Großeinheiten. Die nördliche Hälfte des Bezirkes

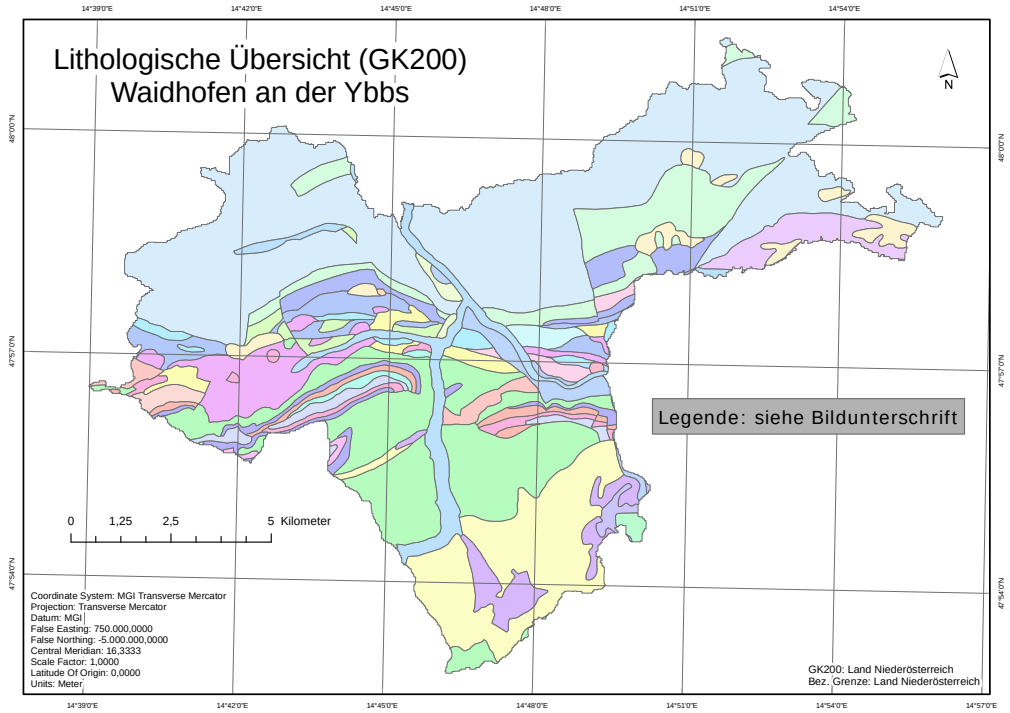


Abbildung 4.5: Formationen (lithostratigrafische Gesteinseinheiten) im Bezirk Waidhofen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Formationen befindet sich die vollständige Legende in Anhang A. Quelle: Land Niederösterreich

wird durch das Penninikum (das ist im Wesentlichen die Rhenodanubische Flyschzone) abgedeckt. Darin enthalten sind kleine Flächenanteile der Molasse. Südlich an das Penninikum anschließend folgt der komplexe Bereich des Helvetikums, das in Waidhofen durch die Grestener Klippenzone repräsentiert wird. Die südliche Hälfte des Bezirks besteht aus Gesteinen des (Ober)Ostalpins, das durch die Nördlichen Kalkalpen vertreten ist.

Flyschzone

Das Penninikum wird im Bezirk Waidhofen durch die Rhenodanubische Flyschzone vertreten. Die Gesteine der Flyschzone sind in einem langgestreckten Tiefseetrog entstanden. Zu Beginn der Unter-Kreide bis in das mittlere Eozän wurden mit Trübeströmen (*turbidity currents*) große Mengen an Lockermaterial periodisch vom Beckenrand in den Trog verfrachtet. Dort bildeten sie eine Wechsellagerung aus Sand-, Ton- und Mergelsteinen großer Mächtigkeit aus („Turbidite“). Die Flyschzone kann als waldreiche Mittelgebirgslandschaft charakterisiert werden, die meist tiefe Verwitterungsböden

aufweist. Die Gesteinsfolgen sind weitgehend impermeabel und mergelreiche Partien rutschanfällig (Schnabel 2002).

Grestener Klippenzone

Das Helvetikum wird im Bezirk Waidhofen durch die Grestener Klippenzone vertreten. Die Gesteine stammen vom Schelfbereich und oberen Kontinentalrand des Südrandes der Europäischen Plattform des Jura bis zum mittleren Eozän. Sie ist vollständig von der Hauptdecke der Rhenodanubischen Flyschzone überschoben und befindet sich an deren Südrand in einer komplexen Schuppenzone („Klippenzone"). Die „Klippen" werden dabei als eine Sammelbezeichnung verschiedener Formationen verwendet, bestehend aus Kalkstein und Mergelstein unterschiedlicher Ausbildung (z.T. dünn- bis mittelbankig, hell, grau und bunt). Umgeben sind die Klippen von einer Klippenhülle: der Buntmergelserie. Das sind überwiegend rote und grüne Tonmergel, in den jüngsten Gesteinen auch Sandstein und Brekzien. Charakterisiert werden kann die Klippenzone durch instabile, zum Rutschen neigende, flache Wiesen und Waldhänge (oberste Unter-Kreide bis mittleres Eozän) (Schnabel 2002).

Molasse

Das Vorkommen der Molasse im Bezirk Waidhofen wird als „Inneralpine Molasse" bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine Schichtfolge umgeben von der Grestener Klippenzone, die sich durch ihr junges Alter deutlich von den umgebenden Gesteinsserien unterscheidet (Eozän bis Oligozän). Sie ist meist von Gesteinen der Buntmergelserie umgeben, mit der sie in komplexer Weise verschuppt ist. Es handelt sich dabei um die ältesten Gesteine des Molassetroges. Morphologisch fallen sie durch flache Geländeformen zwischen der Flyschzone im Norden und der Klippenzone und den Nördlichen Kalkalpen im Süden auf (Schnabel 2002).

Nördliche Kalkalpen

Das Oberostalpin als letzter und zugleich oberster Teil des Ostalpinen Deckensystems in Waidhofen wird hier durch die Nördlichen Kalkalpen vertreten. Die Gesteine der Nördlichen Kalkalpen sind überwiegend ehemalige biogene Meeresablagerungen. In Waidhofen sind sie überwiegend obertriassischen Ursprungs. Der größte Teil dieses kalkalpinen Ablagerungsraumes dieser Zeit bestand aus ausgedehnten, seichtmarinen Lagunen. In Waidhofen sind vor allem der Hauptdolomit und die Opponitz-Formation vertreten. Der Hauptdolomit entstand in landnahen, gezeitenbeeinflussten Wattbereichen und prägt heute das Landschaftsbild der Kalkvoralpen. Dolomitgesteine haben meist eine geringmächtige Bodendecke und bilden für die Vegetation

eher trockene Standorte aus. Die Opponitz-Formation als Abfolge von Kalkstein, Mergelstein, Rauhwacke und Gips, entstand in ausgedehnten seichten Lagunen mit hypersalinem bis evaporitischem Milieu (Schnabel 2002).

Quartär

Das Quartär stellt keine eigene tektonische Großeinheit dar, wird in der GK200 jedoch separat ausgewiesen. Es ist die jüngste und kürzeste Periode der Erdgeschichte und überwiegend durch die Eiszeiten geprägt. Quartäre Ablagerungen sind das Produkt rezenter Verwitterung und Erosion. Quartäre Sedimente sind in Waidhofen u.a. in Form von Talfüllungen, Hangschutt und Terrassen vorzufinden und liegen unkonsolidiert den darunter liegenden Einheiten auf.

4.3.3 Hydrologie

Der Bezirk Waidhofen weist keine nennenswerten Stehgewässer auf. Neben zahlreichen Bächen (u.a. Waidhofenbach, Schwarzbach) ist das größte Fließgewässer die Ybbs. Sie hat eine Gesamtlänge von 138 km und ein Einzugsgebiet von ca. 1.300 km^2. Sie mündet bei Ybbs an der Donau in die Donau. Die Ybbs fließt im südlichen Waidhofen in einem breiten, von Grünlandwirtschaft geprägten Tal. Schluchtstrecken sind meist sehr kurz. Bei Waidhofen (Stadt) geht die Ybbs in das Alpenvorland über. Die Umgebung des Flusses ist durch dichte Besiedlung und intensive landwirtschaftliche Nutzung gekennzeichnet. Intensive wasserwirtschaftliche Nutzung (Querbauwerke, Ausleitungen, Staustrecken) prägen die Ybbs zwischen Waidhofen und Amstetten (Hettrich et al. 2011). Die vom hydrographischen Dienst Niederösterreich betriebene Abflussmessstation für die Ybbs liegt etwas südlich des Bezirks Waidhofen bei Opponitz (Pegelhöhe: 391 Meter). Sie wurde im Jahr 1922 errichtet. Das orographische Einzugsgebiet bis zum Pegel beträgt ca. 507 km^2. Der mittlere Abfluss (MQ) der Ybbs beträgt hier 19,7 $^{m^3}/_s$ (eHYD 2013). Die Jährlichkeitsstatistik gibt als HQ1 einen Abfluss von 210 $^{m^3}/_s$ aus, für HQ100 einen Abfluss von 630 $^{m^3}/_s$ (noel.gv.at 2013). Historische Hochwässer der Ybbs gemessen am Pegel Opponitz sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

4.3.4 Landnutzung

Das vom Land Niederösterreich bereitgestellte shapefile für die Bewaldung im Bezirk Waidhofen/Ybbs weist eine bewaldete Fläche von 71,8 km^2 aus, die unbewaldete Fläche beträgt 59,6 km^2. Speziell der südliche Teil des Bezirks im Bereich der Nördlichen Kalkalpen (die eine Fläche von 43,4 km^2 ausmachen) ist überwiegend bewaldet (32,5 km^2 bewaldet bzw. 10,9 km^2 unbewaldet). Die Veränderung der Landnutzung in einem repräsentativen

Tabelle 4.1: Historische Hochwässer der Ybbs gemessen am Pegel Opponitz (Mirenau). Quelle: noel.gv.at (2013)

Datum	Q [m^3s^{-1}]	Wasserstand [cm]	Jährlichkeit
07.08.2006	637	653	110
07.09.2007	629	645	100
02.08.1991	554	618	36
24.06.2009	550	596	35
08.07.1997	473	563	13
13.08.2002	472	559	13
16.08.1949	470	550	13
01.07.1975	460	546	11
01.08.1977	453	545	10

Tabelle 4.2: Relative Flächenanteile (in %) der jeweiligen Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche eines Ausschnitts im Norden von Waidhofen/Ybbs. Quelle: Promper und Glade (2012)

Landnutzung	1962	1979	1988	2005
Grasland	59,29	54,69	54,43	59,46
Ackerfläche	1,61	4,25	2,74	1,67
bebaute Fläche	3,93	4,08	4,98	4,80
Wald	34,83	36,63	37,51	33,67
Wasser	0,35	0,35	0,35	0,39
Alluvium	0,01	0,00	0,00	0,00

Gebiet im nördlichen Teil des Bezirks Waidhofen/Ybbs wurde von Promper und Glade (2012) erhoben. Dabei wurde mittels Luftbildern und Orthofotos anhand von vier Zeitscheiben die Landnutzungsänderung zwischen 1962 und 2005 erfasst. Fast 90% der Landnutzung machen Grasland und Wald aus. Der Trend innerhalb dieser 43 Jahre zeigt, dass es (bezogen auf das Jahr 1962) zu einer Zunahme der bebauten Fläche und des Graslandes auf Kosten der Wald- und Ackerflächen kam. Tabelle 4.2 weist den relativen Flächenanteil der jeweiligen Landnutzungsklasse an der Gesamtfläche aus.

4.3.5 Böden

Die Digitale Bodenkarte für Österreich (eBOD 2013) weist für den nördlichen Bereich des Bezirkes überwiegend Braunerden (Lockersediment-Braunerde, Felsbraunerde) sowie Gleye (Hanggleye) und Pseudogleye auf. Da Bodentypen unter Waldgebieten nicht ausgewiesen werden, sind Informationen

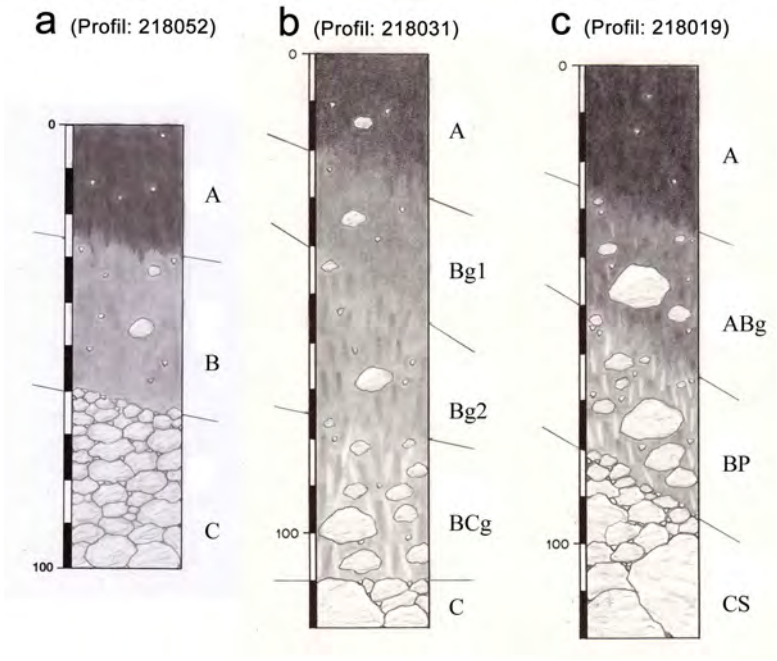


Abbildung 4.6: Bodenprofile zu Standorten in Waidhofen/Ybbs. Siehe dazu Tabelle 4.3. Quelle: eBOD (2013)

aus der eBOD für den südlichen Bereich spärlich, jedoch kommen dort überwiegend Braunerden und Rendzinen vor. Die Bodenarten variieren räumlich stark. Abbildung 4.6 stellt drei der eBOD entnommenen Profilzeichnungen aus dem Bezirk Waidhofeh/Ybbs dar, wobei Profil A silikatisches Flyschmaterial (vorwiegend aufgemürbten Sandstein) als Ausgangsmaterial aufweist, Profil B feines und grobes silikatisches Schwemmmaterial und Profil C Opponitzer Kalk. Die dazu gehörigen Profilinformationen sind Tabelle 4.3 zu entnehmen.

4.3.6 Geomorphologie

Der Bezirk Waidhofen/Ybbs liegt im Alpenvorland und geht im Süden direkt in die Nördlichen Kalkalpen über. Der niedrigste Punkt liegt auf 324 Meter a.s.l., der höchste ist mit 1.115 Meter der Gipfel des Wetterkogel. Die Hausberge der Stadt Waidhofen sind der Schnabelberg (958 Meter) und der Buchenberg (790 Meter, zugleich Naturpark). Die tektonischen Großeinheiten im Bezirk streichen WSW-ONO und weisen unterschiedliche Hangneigungswinkel auf. Die Molasse hat in den Bezirken Waidhofen/Ybbs, Amstetten und Baden eine durchschnittliche Hangneigung von 7°, die Flysch- und Klippenzone 14° bzw. 16° und die Nördlichen Kalkalpen 20° (Kalk) bzw. 25° (Dolomit) (Petschko et al. 2012b).

Tabelle 4.3: Bodenprofilinformationen zu Standorten in Waidhofen/Ybbs. Siehe dazu Abb. 4.6. Quelle: eBOD (2013)

Profilstelle	**Kulturart**	**Seehöhe**	**Reliefart**	**Neigung**	**Ausrichtung**	**Bodentyp**
218052 (westl. von Konradsheim)	Grünland	815 m	Mittelhang	15°	S	kalkfreie Lockersediment-Braunerde

Horizont	von [cm]	bis [cm]	Bodenart	Grobanteil
A	0	25	lehmiger Sand	geringer Grobanteil (viel Grus, wenig Kies, 1-2 cm)
B	25	60	sandiger Lehm	mäßiger Grobanteil (viel Grus, wenig Kies, wenige Steine, 1-4 cm)
C	60	100	-	vorherrschender Grobanteil (viele Steine, wenig Grus)

Profilstelle	**Kulturart**	**Seehöhe**	**Reliefart**	**Neigung**	**Ausrichtung**	**Bodentyp**
218031 (nördl. von Unterraben)	Grünland	540 m	Hangmulde	15°	WNW	vergleyte kalkfreie Felsbraunerde

Horizont	von [cm]	bis [cm]	Bodenart	Grobanteil
A	0	20	lehmiger Sand	geringer Grobanteil (Grus, 1 cm)
AB	20	45	lehmiger Sand/sandiger Lehm)	geringer Grobanteil (Grus, 1-2 cm)
Bg	45	85	sandiger Lehm	mäßiger Grobanteil (viel Grus, wenig Steine, 1-4 cm)
C	85	100	-	vorherrschender Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine)

Profilstelle	**Kulturart**	**Seehöhe**	**Reliefart**	**Neigung**	**Ausrichtung**	**Bodentyp**
218019 (westl. von Unterglatzberg)	Grünland	545 m	Mittelhang	16°	NNW	pseudovergleyte kalkhaltige Felsbraunerde

Horizont	von [cm]	bis [cm]	Bodenart	Grobanteil
A	0	20	lehmiger Schluff	geringer Grobanteil (Grus, 1 cm)
ABg	25	50	Lehm	mäßiger Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine, 1-14 cm)
BP	50	80	Lehm	hoher Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine, 1-16 cm)
C	80	100	-	vorherrschender Grobanteil (Grus, Steine, Grobsteine)

4.3.7 Gravitative Massenbewegungen in Waidhofen/Ybbs

Die Verteilung gravitativer Massenbewegungen im Bezirk Waidhofen/Ybbs wird zu einem großen Teil durch die Lithologie bestimmt. Unter den vorhandenen lithologischen Einheiten weist die Flyschzone mit einer Rutschungsdichte von 61,8 Rutschungen pro km^2 den mit Abstand höchsten Wert niederösterreichweit auf. Die Klippen- und Molassezone, die innerhalb der Bezirksgrenze ebenfalls auftreten, haben eine Rutschungsdichte von 6,4 bzw. 3,4 Rutschungen pro km^2. Im Bereich der Nördlichen Kalkalpen beträgt die Dichte 2,9 (Dolomit) bzw. 1,8 (Kalk) Rutschungen pro km^2 (Petschko et al. 2012b). Petschko et al. (2012a) weisen für Waidhofen/Ybbs 1.063 Rutschungen auf, die nicht nach Rutschungstyp unterschieden wurden. Zum Vergleich weist der Baugrundkataster (BGK) für Waidhofen lediglich 151 Rutschungen aus, die zudem nur unzureichend verortet sind. Auswertungen des BGK ergaben für die Bezirke Waidhofen/Ybbs und Amstetten, dass der Hauptauslöser von Rutschungen auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen ist (76%), gefolgt durch die Schneeschmelze (12%). Sie traten überwiegend auf Grasland auf (43%). Die durchschnittliche Tiefe der Rutschungen wird mit 1,9 Meter angegeben (Petschko et al. in Press).

Kapitel 5

Ergebnisse

Folgendes Kapitel stellt die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Gefährdungsmodellierung dar. Anfangs werden die ermittelten und berechneten Eingangsdaten beschrieben, anschließend werden ausschnittsweise Resultate aus der Raster- und Stabilitätsanalyse der Modellierung mit SINMAP vorgestellt. Danach erfolgt die Auswertung aller vorausgegangenen Schritte inkl. einer Sensitivitätsanalyse. Der letzte Punkt umfasst die Resultate aus dem Vergleich einer Gafahrenhinweiskarte aus der physikalisch basierten Modellierung mit einer für das Untersuchungsgebiet erstellen Gefahrenhinweiskarte aus einer statistischen Modellierung.

5.1 Erstellung von Eingangsdaten

Die Methodik zur Erstellung der Eingangsdaten wird in Kapitel 3.2 beschrieben. Die Ergebnisse zeigen die Schritte bis zur Generierung der Kalibrationsgebiete, deren Parametrisierung und der Kombination verschiedener Kartengrundlagen.

5.1.1 Ermittlung von Bodengruppen

Die bodenphysikalischen/geotechnischen Parameter für die Parametrisierung des Modells wurden aus den Substratklassen abgeleitet, die wiederum aufgrund ähnlicher Bodenarten aus verschiedenen Formationen aggregiert sind. Innerhalb des hier bearbeiteten Untersuchungsgebietes liegen 9 von 11 ermittelten Substratklassen, womit eine deutliche Reduktion der 30 verschiedenen Formationen im Bezirk Waidhofen/Ybbs vorliegt. Für das Untersuchungsgebiet befinden sich die Bodenartendiagramme sowie die Auflistung der Substratklassen und der darin enthaltenen lithologischen Einheiten in Anhang C. Abbildung 5.1 stellt die räumliche Verteilung der Substratklassen in Waidhofen dar.

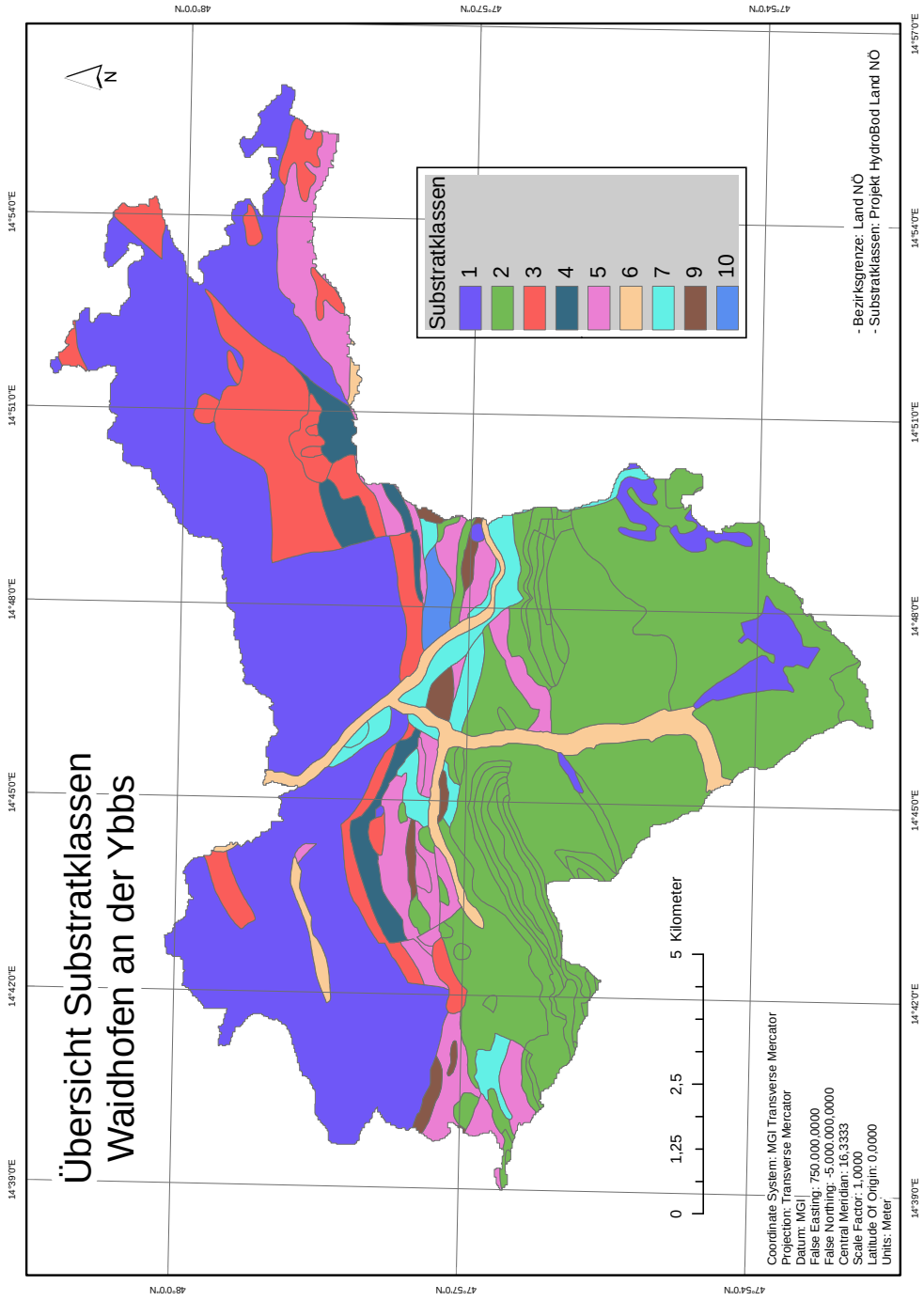


Abbildung 5.1: Übersicht der 9 im Bezirk Waidhofen/Ybbs vorkommenden Substratklassen. Die einzelnen Substratklassen haben keine gesondert ausgewiesenen Bezeichnungen; eine Auflistung der in den Substratgruppen vereinten Formationen ist Anhang C zu entnehmen.

Anhand der Körnungsdreiecke und den dazugehörigen Diagrammen über den relativen Anteil der Korngrößenfraktion in einer Substratklasse, mussten wegen fehlender Wertetabellen selbst die entsprechende Bodenart ermittelt werden. Bis auf die Substratklasse S3 (mittel schluffiger Sand) weisen sämtliche Bodenarten einen überwiegenden Schluffanteil auf. Die Sandfraktion hat dabei eine Spannweite von 1% (S5) bis 35% (S9), sowie einen Tonanteil zwischen 2% und 35%. Die Bodenarten reichen dabei von mittel schluffigem Ton über stark tonigen Schluff bis hin zu sandigem Schluff. Die Substratklasse S3 weist als einzige einen überwiegenden Sandgehalt auf (69%). Die beiden Substratklassen S1 und S2 machen mit einer Fläche von 94 km^2 fast 72% der Fläche Waidhofens aus, wobei Substratklasse S1 den größten Flächenanteil im Norden des Bezirks einnimmt, Substratklasse S2 nimmt fast den gesamten südlichen Teil ein. Um den Bodenarten entsprechende bodenphysikalische Parameter zuzuweisen, mussten sie zuvor in genormte Bodengruppen zusammengefasst werden, zu denen es in der Literatur typische Parameterbereiche gibt. Dies ergab für den Bezirk Waidhofen/Ybbs drei Bodengruppen: *UM* (Schluff, mittel und ausgeprägt plastisch), *UL* (Schluff, leicht plastisch) sowie *SW* (Sand schluffig, sehr weitgestuft). Dabei macht die Bodengruppe UM mit 117,4 km^2 ca. 89% der Gesamtfläche aus, ca. 8% entfallen auf die Bodengruppe UL, der Rest von ca. 3% auf die Bodengruppe SW. Tabelle 5.1 zeigt die zu den Substratgruppen gehörigen Bodenarten und -gruppen. Die räumliche Verteilung der Bodengruppen im Bezirk Waidhofen/Ybbs wird in Abbildung 5.2 dargestellt.

5.1.2 Festlegung der Kalibrationsgebiete

Die Kalibrationsgebiete weisen für die Zuweisung bodenphysikalischer Parameter möglichst homogene Teilräume des Untersuchungsgebietes aus. Hier wurden drei verschiedene Datengrundlagen verwendet, die entweder separat, oder in Kombination in Kalibrationsgebiete übergingen. Zum einen diente die Karte mit den Bodengruppen, die aus der Karte der Substratklassen mit dem Maßstab 1:200.000 abgeleitet wurde, als Kalibrationsgebiet. Diese enthält drei distinkte Teilräume, die jeweils den bodenphysikalischen Parametern entsprechend parametrisiert werden können. Zudem erfolgte mittels der *union*-Funktion in ArcGIS eine Kombination der Bodengruppenkarte mit der Bewaldung (Waldkarte 1:50.000). Dabei konnte ausschließlich zwischen *Wald ja* und *Wald nein* unterschieden werden. Dies führte dazu, dass die drei Teilräume des Kalibrationsgebietes mit den Bodengruppen um drei weitere ergänzt wurden: Bodengruppe UM mit/ohne Wald (56,1 bzw. 61,3 km^2), Bodengruppe UL mit/ohne Wald (2,8 bzw. 8,0 km^2), Bodengruppe SW mit/ohne Wald (0,7 bzw. 2,5 km^2). Diese beiden Kalibrationsgebiete wurden jeweils in den Auflösungen 5, 10 und 20 Meter für die Weiterbearbeitung in SINMAP gerastert (über die Funktion *Polygon to Raster*). Als weiteres Kalibrationsgebiet wurde die räumliche Verbreitungskarte der Bo-

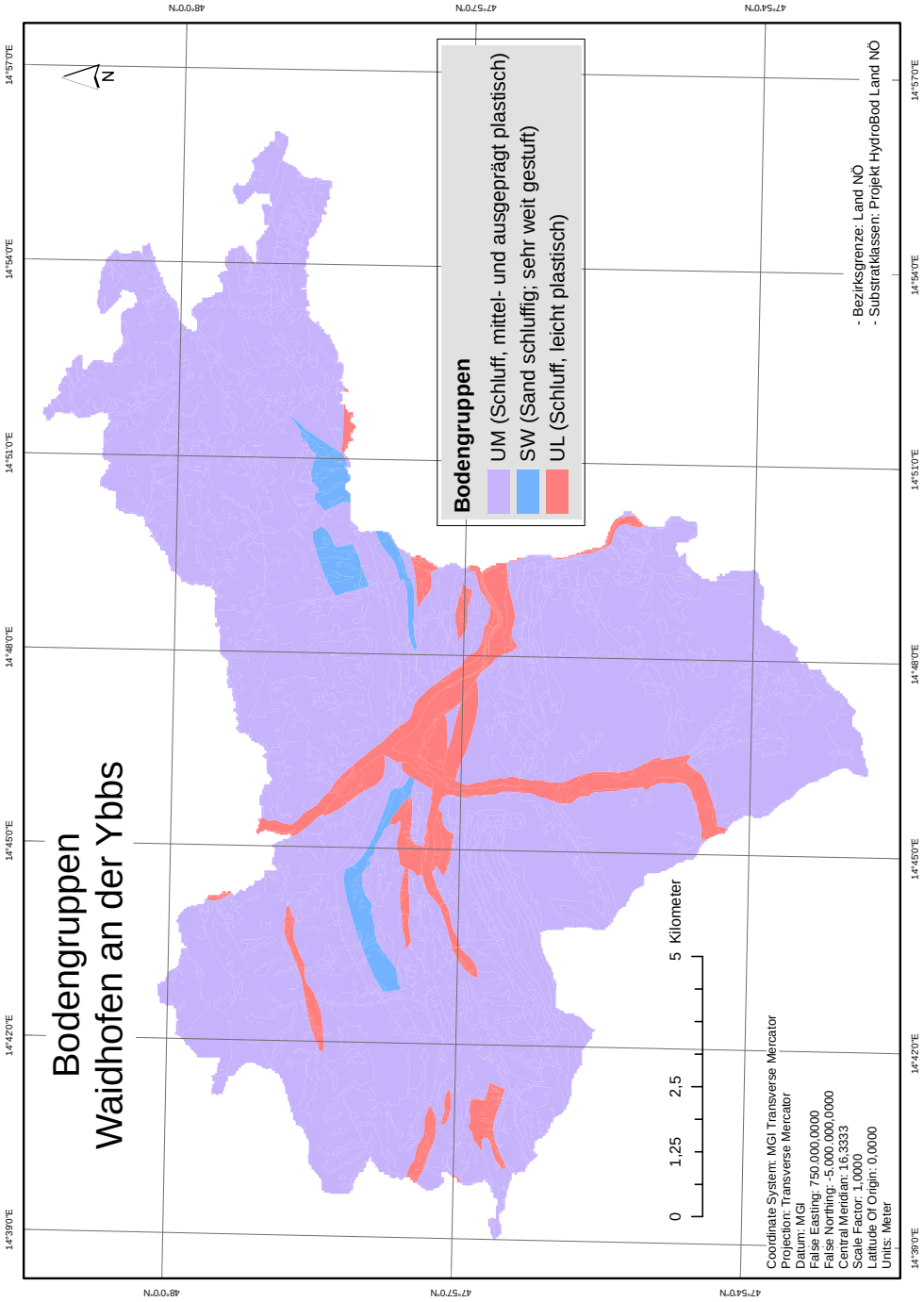


Abbildung 5.2: Karte über die räumliche Verbreitung der Bodengruppen im Bezirk Waidhofen/Ybbs

Tabelle 5.1: Aus Substratgruppen bestimmte Bodenarten und daraus ermittelte Bodengruppen für die Zuweisung bodenphysikalischer Parameter für das Untersuchungsgebiet Waidhofen/Ybbs.

Substrat-klasse	Fläche (km²)	Bodenart (gem. DIN 4220)	Sand	Schluff	Ton	Bodengruppe (gem. DIN 18196)
S1	50	mittel toniger Schluff	17,5%	76%	12,5%	UM (Schluff, mittel- und ausgeprägt plastisch)
S2	44	stark toniger Schluff	3,5%	75%	23%	UM
S3	12,2	mittel toniger Schluff	19,5%	69,5%	13%	UM
S4	3,3	mittel schluffiger Sand	69%	29,5%	1%	SW (Sand schluffig), sehr weitgestuft
S5	10,4	mittel schluffiger Ton	1%	65%	35%	UM
S6	5,1	sandiger Schluff	21%	72%	7,5%	UL (Schluff, leicht plastisch)
S7	4,2	sandiger Schluff	28%	66%	8%	UL
S9	1,4	sandiger Schluff	35%	62%	2%	UL
S10	0,8	schwach toniger Schluff	17%	72,5%	11,5%	UM
	131,4					

dentiefe (ausgewiesen als *abflussspeichernde Bodenmächtigkeit*) herangezogen, die jedoch nicht als shapefile, sondern als Raster mit einer Auflösung von 20 Meter vorlag. Diese als kategorische Tiefendaten vorliegende Datengrundlage wurde mittels *natural breaks*-Methode, jeweils getrennt für nördliches und südliches Untersuchungsgebiet, zu vier Tiefenstufen klassifiziert (Abb. 5.3 oben). Diese umfassen für den Norden 0-10 cm, >10-35 cm, >35-65 cm und >65-100 cm (Tab. 5.6). Für den Süden sind die vier Tiefenstufen 0-10 cm, >10-25 cm, >25-50 cm und >50-100 cm (Tab. 5.7). Das Raster der Tiefenstufen wurde für den nördlichen Teil ebenfalls mit der Bewaldung kombiniert (Abb. 5.3 unten), im südlichen wurde auf eine Kombination mit dem Wald verzichtet. Lediglich dort, wo die Tiefenstufe am geringsten ist, wurde die Kohäsion an eine Bewaldung angepasst, da vor allem in dieser Tiefenstufe der Wald dominiert. Mit diesen unterschiedlichen Kombinationen und Auflösungen ergaben sich schließlich 15 verschiedene Modellierungsdurchläufe (Tab. 5.2).

5.1.3 Parametrisierung

Nach Festlegung der Kalibrationsgebiete erfolgte mit der Zuweisung bodenphysikalischer Parameter zu den einzelnen Teilregionen die Parametrisierung. Die ausführliche Methodik dazu wird in Kapitel 3.2.1.2 erläutert. Die Standardwerte in SINMAP für die Gravitationskonstante (9,81 m/s^2), die

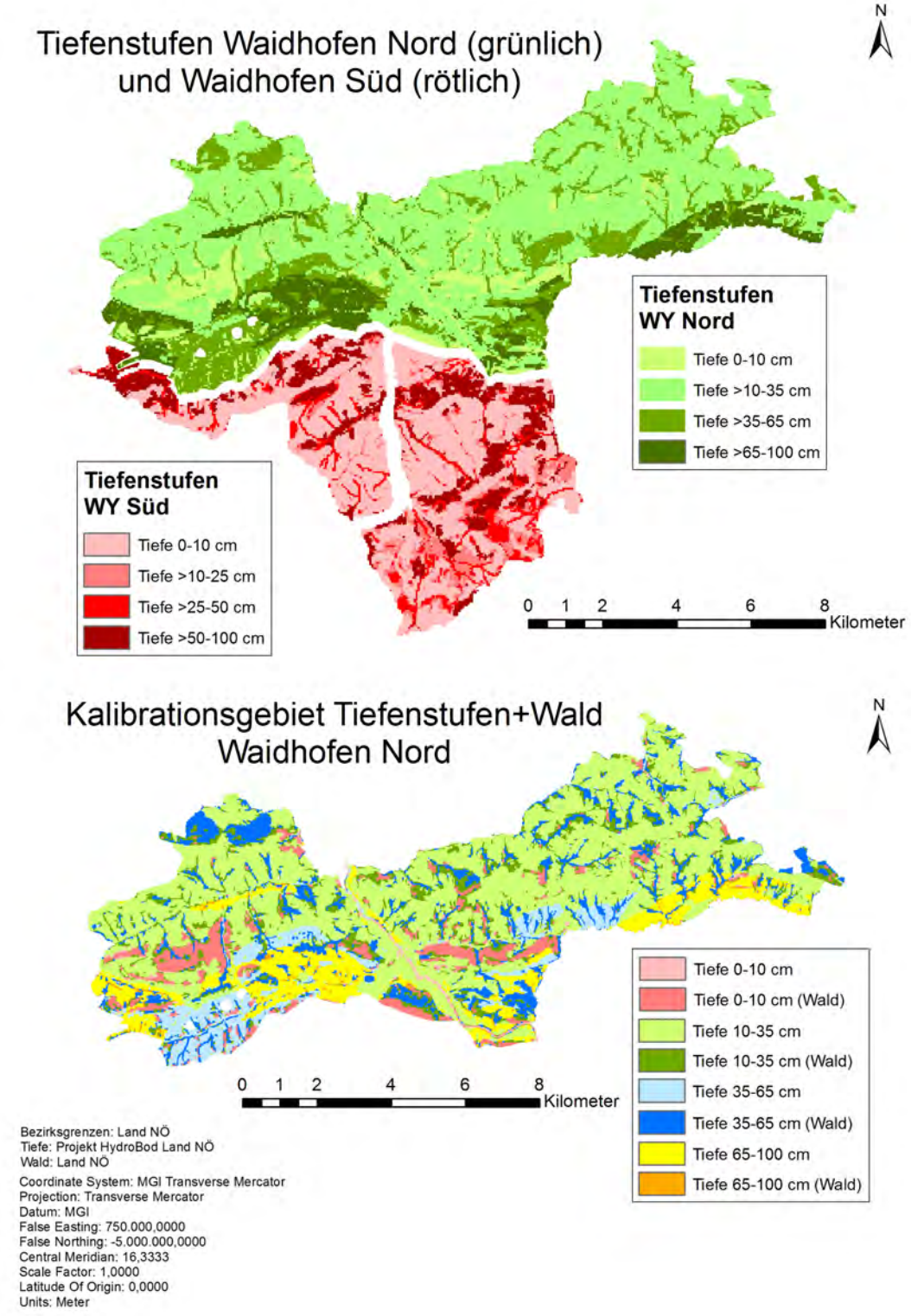


Abbildung 5.3: Oben: Klassifizierte Tiefenstufen getrennt nach nördlichem und südlichem Untersuchungsgebiet. Unten: Kalibrationsgebiet bestehend aus Tiefenstufen und Bewaldung.

Tabelle 5.2: Auflistung der Modellierungsdurchläufe in SINMAP basierend auf unterschiedlichen Auflösungen verschiedener Kalibrationsgebiete.

Kalibrationsgebiet	Waidhofen/Ybbs NORD [Auflösung in m]			Waidhofen/Ybbs SÜD [Auflösung in m]		
Bodengruppen	5	10	20	5	10	20
Bodengruppen + Wald	5	10	20	5	10	20
Tiefe	20			20		
Tiefe + Wald	20					

Wasser- (1.000 $^{kg}/_{m^3}$) und Bodendichte (2.000 $^{kg}/_{m^3}$) wurden unverändert übernommen. Die Zuweisung der Werte für die Parameter C (Kohäsion), Φ (interner Reibungswinkel) und T/R erfolgte aufgund von Angaben aus der Literatur bzw. für den T/R-Wert aus Berechnungen. Die berechneten T/R-Werte für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* sind Tabelle 5.3 zu entnehmen, die der *Tiefe Nord* Tabelle 5.4 (oben) und jene der *Tiefe Süd* Tabelle 5.4 (unten). Die berechneten T/R-Werte sind sehr viel geringer als die Standardvorgaben von SINMAP, die 2.000 Meter (min) bzw. 3.000 Meter (max) betragen. Die geringen Durchlässigkeitskoeffizienten (ks) führen in der Bodengruppe UM (Schluff, mittel und ausgeprägt plastisch) zu T/R-Werten von 0,002 Meter (min) bis 1,152 Meter (max). Den höchsten T/R-Wert weist durch die höhere Durchlässigkeit die Bodengruppe SW (Sand schluffig, sehr weit gestuft) aus; dort erreicht der Wert 288 Meter (max). Diese geringen Werte führten jedoch zu sehr unplausiblen Modellierungsresultaten, weshalb die T/R-Werte iterativ so angepasst wurden, dass die Modellierungsresultate ein zufriedenstellendes Ergebnis brachten. Dazu sei auf die Diskussion in Kapitel 6.1 verwiesen. Die T/R-Werte wurden so für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* einheitlich mit 300 Meter (min) bzw. 600 (max) festgelegt. Tabelle 5.5 weist sämtliche Parameter aus, die in die Modellierung mit SINMAP eingehen, wobei die Spalte T/R jeweils den errechneten Wert ausweist, sowie in rot und kursiv den iterativ ermittelten Wert, der schlussendlich in die Modellierung tatsächlich einfloss. Die Werte für die Kohäsion (C) in der Bodengruppe *UM* betragen zwischen 0 und 15 $^{kN}/_{m^2}$, der interne Reibungswinkel (ϕ) zwischen 15° und 22,5°. Die Kohäsion ist in bewaldeten Gebieten jeweils um 10 $^{kN}/_{m^2}$ erhöht. Die Bodengruppe *SW* (Sand schluffig, sehr weitgestuft) wird als kohäsionslos angegeben und hat mit einer Fläche von ca. 3 km^2 den geringsten Flächenanteil. Der Reibungswinkel ist hier mit Werten zwischen 30° und 41° höher. Die Bodengruppe *UL* weist Kohäsionswerte zwischen 0 und 10 $^{kN}/_{m^2}$ auf, der Reibungswinkel liegt zwischen 27,5° und 35°. Für das Kalibrationsgebiet Tiefe sind die iterativ ermittelten Werte für den T/R-Wert ebenfalls separat ausgewiesen (Tabelle 5.6 [Norden] und 5.7 [Süden]). Die Scherparameter C und ϕ entsprechen dabei jeweils den Wer-

Tabelle 5.3: Berechnung des T/R-Wertes für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe*.

Bodengruppe	Tiefe	ks			T	R		T/R
	m	m/sec	m/min	m/d	m²/d	mm/d	m/d	-
UM min	1	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	8,64E-05	35	0,035	0,002
UM max	1	2,E-06	1,E-04	0,17	1,73E-01	150	0,15	1,152
SW min	1	2,E-05	1,E-03	1,73	1,73E+00	35	0,035	49,371
SW max	1	5,E-04	3,E-02	43,20	4,32E+01	150	0,15	288,000
UL min	1	1,E-07	6,E-06	8,64E-03	8,64E-03	35	0,035	0,247
UL max	1	1,E-05	6,E-04	0,86	8,64E-01	150	0,15	5,760

ten der flächengrößten Bodengruppe (UM), lediglich bei den T/R-Werten gibt es durch die unterschiedlichen Tiefenstufen, die diesen Wert rechnerisch beeinflussen, Differenzen.

5.1.4 Digitales Geländemodell (DGM)

Das DGM dient in der Modellierung mit SINMAP dazu, topographische Informationen daraus zu erhalten. Dazu wurden den Modellierungsdurchläufen entsprechend in unterschiedlichen Auflösungen gerasterte Digitale Geländemodelle verwendet. Die Auflösungen betrugen 5, 10 und 20 Meter. Da das DGM original in einer Auflösung von 1 Meter erstellt wurde, sollte auch diese Auflösung in die Modellierung einfließen. Jedoch stieß diese Auflösung bei der Größe des Untersuchungsgebietes an die Leistungsgrenze des Rechners, weshalb diese Auflösung nicht in die Modellierung eingehen konnte. Abbildung 5.4 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Auflösungen in einer Schummerungskarte (*hillshade*) und einer Hangneigungskarte (*slope*). Schmale Konturen (z.B. Straßenverläufe) sind darin bis zu einer Auflösung von 5 Meter noch deutlich zu unterscheiden, auf einer Rastergröße von 10 Meter sind nur noch flächenhafte Objekte mit einer bestimmten Mindestgröße identifizierbar, ab 20 Meter sind nur noch sehr große topographische Strukturen zumindest wahrnehmbar. Abb. 5.5 zeigt in einem Diagramm ein Hangprofil im südlichen Untersuchungsgebiet aus einem DGM in 1 und 20 Meter Auflösung. Die vier Straßenzüge aus dem Profil (eingezeichnet in Abb. 5.4) sind mit 1 Meter Auflösung noch deutlich als Geländeknick zu identifizieren, während sie bei einer Auflösung von 20 Metern nicht mehr wahrnehmbar sind.

5.2 Rasteranalyse

Die Durchführung der Rasteranalyse in SINMAP stellt einen wichtigen Zwischenschritt in der Gefährdungsmodellierung dar. Die Rasteranalyse dient

Tabelle 5.4: Berechnung des T/R-Wertes für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Nord* (oben) und *Tiefe Süd* (unten).

Tiefenstufen Nord	**ks**			**T**	**R**		**T/R**
m	m/sec	m/min	m/d	m²/d	mm/d	m/d	-
0,1 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	8,64E-06	35	0,035	0,0002
0,1 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	1,73E-02	150	0,15	0,1152
0,35 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	3,02E-05	35	0,035	0,0009
0,35 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	6,05E-02	150	0,15	0,4032
0,65 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	5,62E-05	35	0,035	0,0016
0,65 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	1,12E-01	150	0,15	0,7488
1 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	8,64E-05	35	0,035	0,0025
1 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	1,73E-01	150	0,15	1,1520

Tiefenstufen Süd	**ks**			**T**	**R**		**T/R**
m	m/sec	m/min	m/d	m²/d	mm/d	m/d	-
0,1 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	8,64E-06	35	0,035	0,0002
0,1 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	1,73E-02	150	0,15	0,1152
0,25 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	2,16E-05	35	0,035	0,0006
0,25 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	4,32E-02	150	0,15	0,2880
0,5 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	4,32E-05	35	0,035	0,0012
0,5 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	8,64E-02	150	0,15	0,5760
1 (min)	1,E-09	6,E-08	8,64E-05	8,64E-05	35	0,035	0,0025
1 (max)	2,E-06	1,E-04	1,73E-01	1,73E-01	150	0,15	1,1520

Tabelle 5.5: Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist.

Region	Name	Bewaldung	T/R_{min}	TR_{max}	C_{min} (kN/m²)	C_{max} (kN/m²)	ϕ_{min} (Grad)	ϕ_{max} (Grad)	Fläche (km²)
1 (UM)	Substratklasse 1	-	0,002 *300*	1,152 *600*	0	15	22,5	33	
1	Substratklasse 2	-	0,002 *300*	1,152 *600*	0	15	22,5	33	
1	Substratklasse 3	-	0,002 *300*	1,152 *600*	0	15	22,5	33	61,3
1	Substratklasse 5	-	0,002 *300*	1,152 *600*	0	15	22,5	33	
1	Substratklasse 10	-	0,002 *300*	1,152 *600*	0	15	22,5	33	
2 (UM)	Substratklasse 1	Wald	0,002 *300*	1,152 *600*	10	25	22,5	33	
2	Substratklasse 2	Wald	0,002 *300*	1,152 *600*	10	25	22,5	33	
2	Substratklasse 3	Wald	0,002 *300*	1,152 *600*	10	25	22,5	33	56,1
2	Substratklasse 5	Wald	0,002 *300*	1,152 *600*	10	25	22,5	33	
2	Substratklasse 10	Wald	0,002 *300*	1,152 *600*	10	25	22,5	33	
3 (SW)	Substratklasse 4	-	49 *300*	288 *600*	0	0	30	41	2,5
4 (SW)	Substratklasse 4	Wald	49 *300*	288 *600*	10	10	30	41	0,7
5 (UL)	Substratklasse 6	-	0,247 *300*	5,760 *600*	0	10	27,5	35	
5	Substratklasse 7	-	0,247 *300*	5,760 *600*	0	10	27,5	35	8
5	Substratklasse 9	-	0,247 *300*	5,760 *600*	0	10	27,5	35	
6 (UL)	Substratklasse 6	Wald	0,247 *300*	5,760 *600*	10	20	27,5	35	
6	Substratklasse 7	Wald	0,247 *300*	5,760 *600*	10	20	27,5	35	2,8
6	Substratklasse 9	Wald	0,247 *300*	5,760 *600*	10	20	27,5	35	

Tabelle 5.6: Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Nord*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist.

Region	Name	Vegetation	T/R_{min}	TR_{max}	C_{min} (kN/m²)	C_{max} (kN/m²)	ϕ_{min} (Grad)	ϕ_{max} (Grad)	Fläche (km²)
1	Tiefe 0-10 cm	-	0,0002 *200*	0,1152 *500*	0	15	22,5	33	1,32
2	Tiefe 0-10 cm	Wald	0,0002 *200*	0,1152 *500*	10	25	22,5	33	5,98
3	Tiefe >10-35 cm	-	0,0009 *300*	0,4032 *600*	0	15	22,5	33	41,61
4	Tiefe >10-35 cm	Wald	0,0009 *300*	0,4032 *600*	10	25	22,5	33	9,16
5	Tiefe >35-65 cm	-	0,0016 *400*	0,7488 *700*	0	15	22,5	33	7,43
6	Tiefe >35-65 cm	Wald	0,0016 *400*	0,7488 *700*	10	25	22,5	33	10,13
7	Tiefe >65-100 cm	-	0,025 *500*	1,1520 *800*	0	15	22,5	33	8,39
8	Tiefe >65-100 cm	Wald	0,025 *500*	1,1520 *800*	10	25	22,5	33	1,05

Tabelle 5.7: Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Süd*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist.

Region	Name	T/R_{min}	TR_{max}	C_{min} (kN/m²)	C_{max} (kN/m²)	ϕ_{min} (Grad)	ϕ_{max} (Grad)	Fläche (km²)
1	Tiefe 0-10 cm	0,0002 *1000*	0,1152 *1200*	10	25	22,5	33	23,5
2	Tiefe >10-25 cm	0,0006 *1200*	0,2880 *1400*	0	15	22,5	33	5,8
3	Tiefe >25-50 cm	0,0012 *1400*	0,5760 *1600*	0	15	22,5	33	4,9
4	Tiefe >50-100 cm	0,0025 *1600*	1,1520 *2000*	0	15	22,5	33	9,0

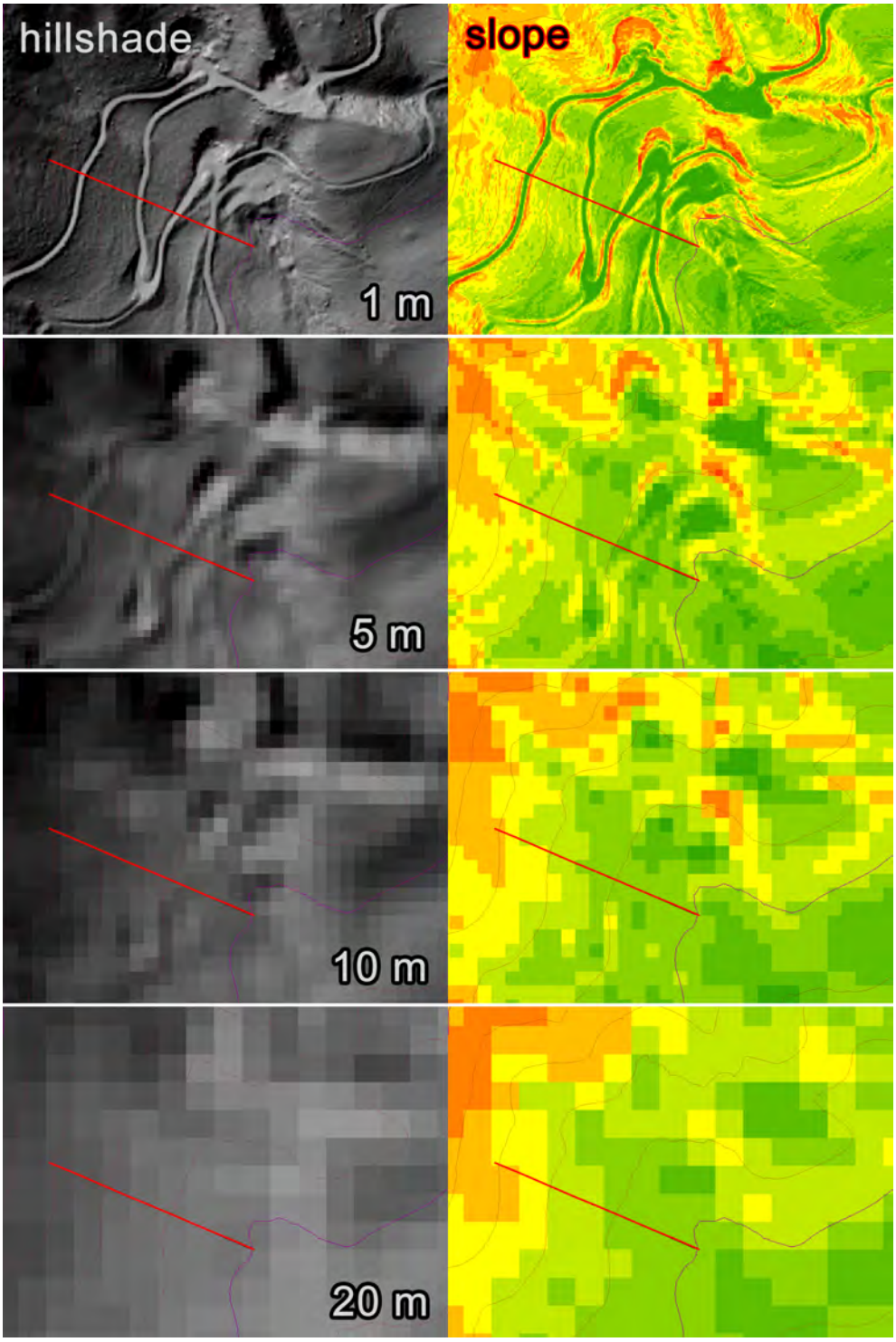


Abbildung 5.4: Schummerungs- (*hillshade*) und Hangneigungskarte (*slope*) in vier unterschiedlichen Auflösungen. Die Profillinie (rot) verläuft über vier Straßen. Datenquelle: Land Niederösterreich.

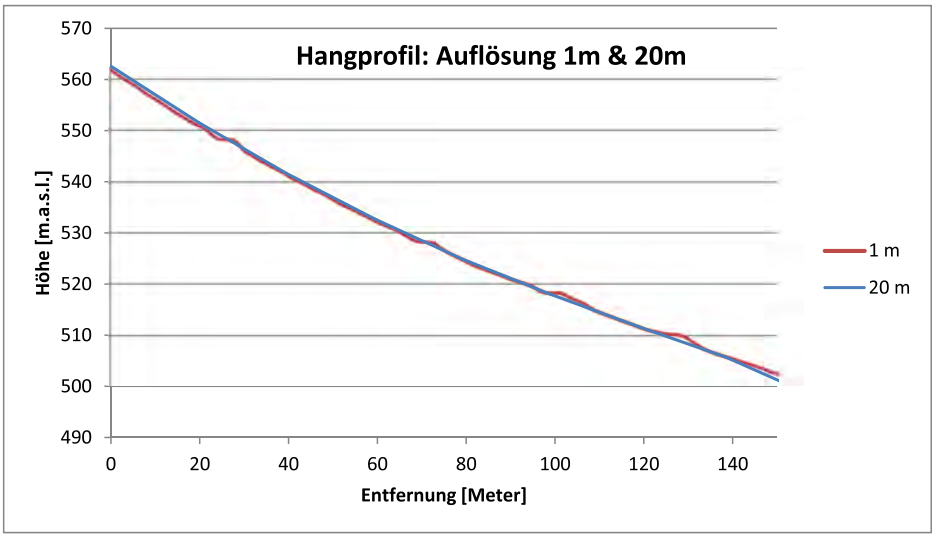


Abbildung 5.5: Hangprofil im südlichen Untersuchungsgebiet aus DGM mit 1 und 20 Meter Auflösung. Profillinie (eingetragen in Abb. 5.4) verläuft über vier Straßen.

dazu, topographische Informationen aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) abzuleiten, die schließlich in die Berechnung des Stabilitätsindex eingehen. Resultate der Rasteranalyse werden hier beispielhaft an einem Ausschnitt um das Stadtgebiet von Waidhofen/Ybbs gezeigt. Grundlage hierfür ist das DGM mit einer Rasterweite von 10 Meter. Den ersten Schritt in der Rasteranalyse macht die Auffüllung von Senken (*pit-filling*) aus. Dabei sind vor allem Bach- und Flussläufe von dieser Korrektur betroffen (Abb. 5.6). Ebenfalls von dieser Korrektur betroffen sind bebaute Flächen im dicht verbauten Stadtgebiet von Waidhofen. Der daran anschließende Bearbeitungsschritt weist die Hangneigung (*slope*) und Fließrichtung (*flow direction*) aus. Die Karte der Hangneigung (Abb. 5.7) weist die steilsten Abschnitte in Bachtälern auf. Die steilen Bereiche entlang des Ybbs Flusses im Stadtgebiet von Waidhofen sind auf die hohen Ufermauern zurückzuführen. Die flachsten Bereiche umfassen die Talfüllungen sowie das verbaute Stadtgebiet von Waidhofen. Die Fließrichtung wird in SINMAP mit der D∞ Methode von Tarboton (1997) durchgeführt. Dabei repräsentiert der Winkel der Fließrichtung von Osten aus gegen den Uhrzeigersinn einen Wert zwischen 0 und 2π (siehe dazu auch Kapitel 3.3). Markante Änderungen in der Karte (Abb. 5.8) erfolgen vor allem entlang von Rücken. Den letzten Schritt der Rasteranalyse in SINMAP macht die Berechnung des spezifischen Einzugsgebietes aus (Abb. 5.9). Dabei weisen vor allem Tiefenlinien die höchsten Werte aus, während sie auf Rücken am geringsten sind. Das spezifische Einzugsgebiet wird dabei pixelweise berechnet.

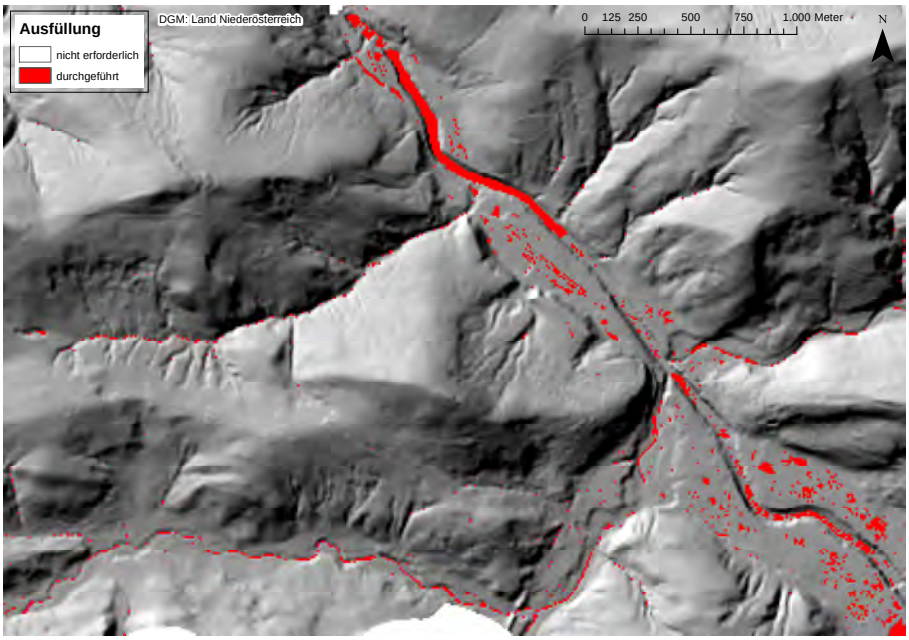


Abbildung 5.6: *Pit-filling* Korrektur in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

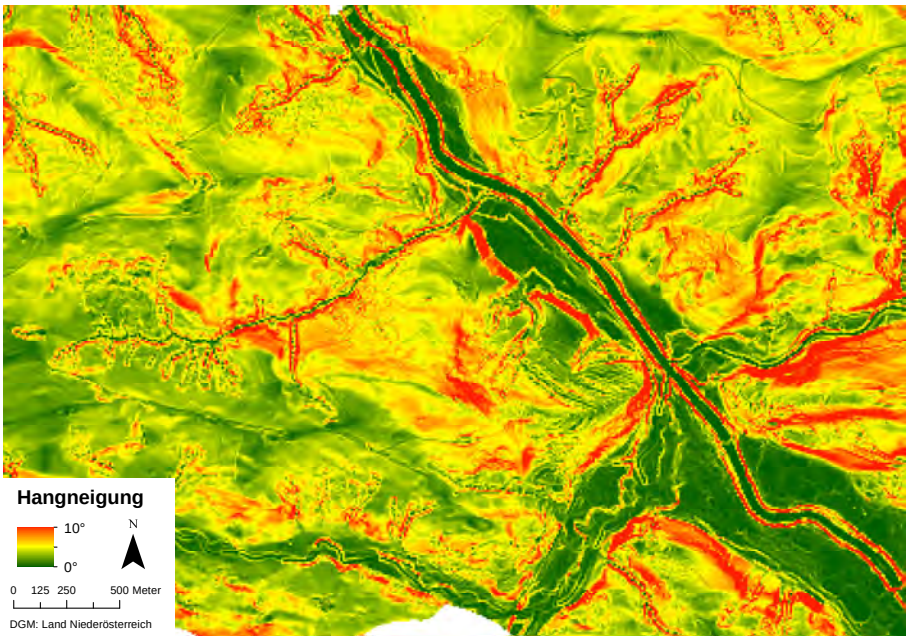


Abbildung 5.7: Hangneigungskarte in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

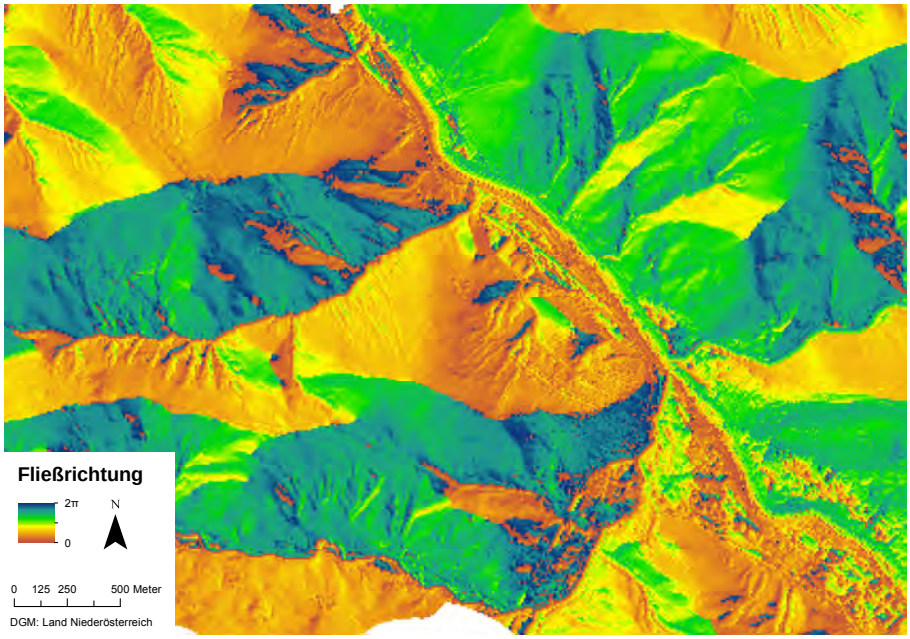


Abbildung 5.8: Karte der Fließrichtung in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

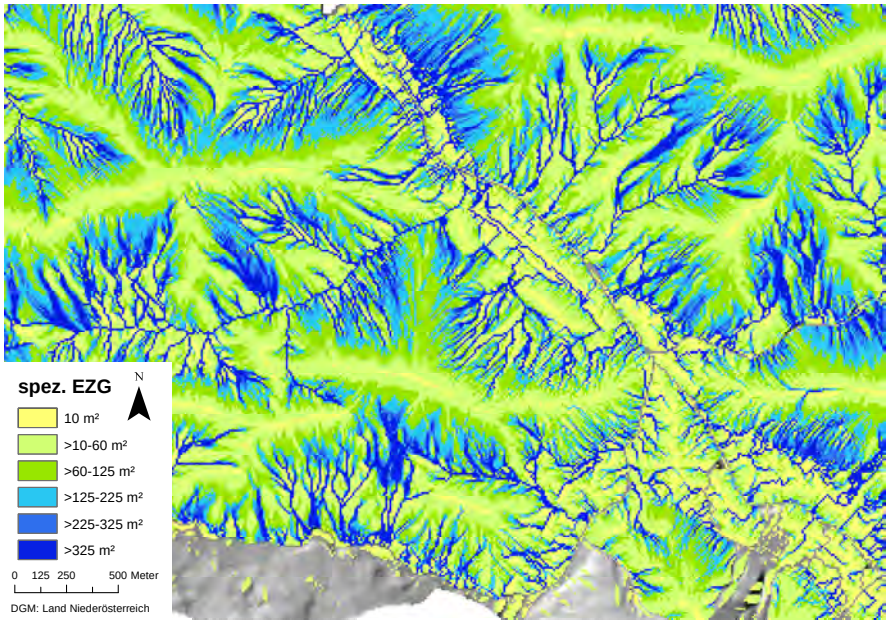


Abbildung 5.9: Karte des spezifischen Einzugsgebietes in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

5.3 Stabilitätsanalyse

An die Rasteranalyse anschließend erfolgt die Stabilitätsanalyse, in der die Ergebnisse aus der Rasteranalyse einfließen. Die Stabilitätsanalyse umfasst dabei zwei Arbeitsschritte: die Berechnung der Bodenwassersättigung und schließlich die Stabiliätsberechnung. Resultate der Rasteranalyse werden hier beispielhaft am selben Ausschnitt der Rasteranalyse gezeigt (Ausschnitt um das Stadtgebiet von Waidhofen/Ybbs). Grundlage hierfür ist das DGM mit einer Rasterweite von 10 Meter auf Basis des Kalibrationsgebietes *Bodengruppen*. Die berechnete Bodensättigung spiegelt dabei die Bodenfeuchteverhältnisse in Folge eines starken Niederschlagsereignisses. Im Ausschnitt in Abb. 5.10 entfallen auf den *low moisture* Bereich (nicht wassergesättigt) nur sehr kleine Flächen. Diese betreffen vor allem Rücken und die Ufer/Hänge einiger Tiefenlinien. Den überwiegenden Anteil der Fläche macht der Bereich *partially wet* (nicht vollständig gesättigt) aus. Den Bereich der *saturation zone* (gesättigten Zone) machen vor allem Tiefenlinien und versiegelte Gebiete aus. Der Bereich der *threshold saturation* im Übergang zur Bodensättigung umfasst dabei überwiegend Bereiche im Einzugsgebiet von Fließgewässern. Das letzte erzeugte Raster ist schließlich die Karte des Stabilitätsindex (Abb. 5.11). Die Karte, die zur besseren plastischen Darstellung mit dem DGM unterlagert wurde, weist die geringste Gefährdung (*stable*) vor allem in ebenen Gebieten und Rücken aus. Die Klassen *quasi-stable* und *moderately stable* folgen in den Randbereichen der als am stabilsten ausgewiesenen Klasse. Die als gefährdet ausgewiesenen Klassen (*lower* und *upper threshold*) entfallen überwiegend auf die Hangbereiche; die Klasse *defended* kommt nur sehr selten vor (z.T. wird die steile Böschungsmauer der Ybbs damit klassifiziert). Zusätzlich zur Karte mit dem Stabilitätsindex sind die Standorte der kartierten Rutschungen vermerkt. Eine quantitative Auswertung, welchen Gefährdungsstufen die kartierten Rutschungen angehören, erfolgt im nächsten Arbeitsschritt.

5.4 Gefährdungsmodellierung mit SINMAP mit verschiedenen Eingangsdaten

Im folgenden Kapitel werden sämtliche Resultate der unterschiedlichen Modellierungsdurchläufe präsentiert. Dabei wird unterschieden zwischen verschiedenen Auflösungen und verschiedenen Kalibrationsgebieten. Die quantitative Auswertung erfolgt je nach Stabilitätsklasse hinsichtlich deren eingenommener Fläche (absolut und relativ), der Anzahl der Rutschungen und dem prozentuellen Anteil der Rutschungen in einer bestimmten Stabilitätsklasse. Im folgenden Kapitel erfolgt nur eine Auswahl an Karten der Gefährdungsmodellierung; alle Modellierungsresultate sind jedoch in Anhang D enthalten.

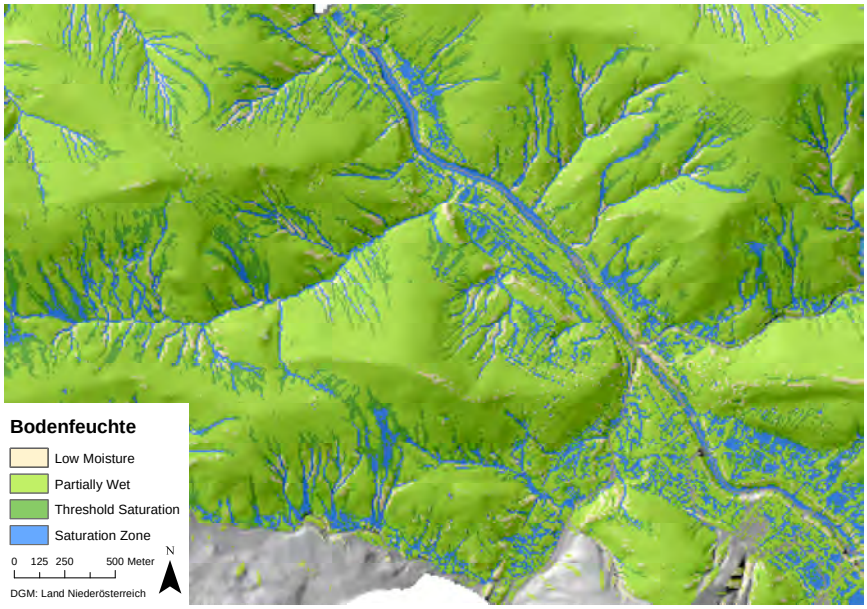


Abbildung 5.10: Karte des Bodensättigung nach einem starken Niederschlagsereignis in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

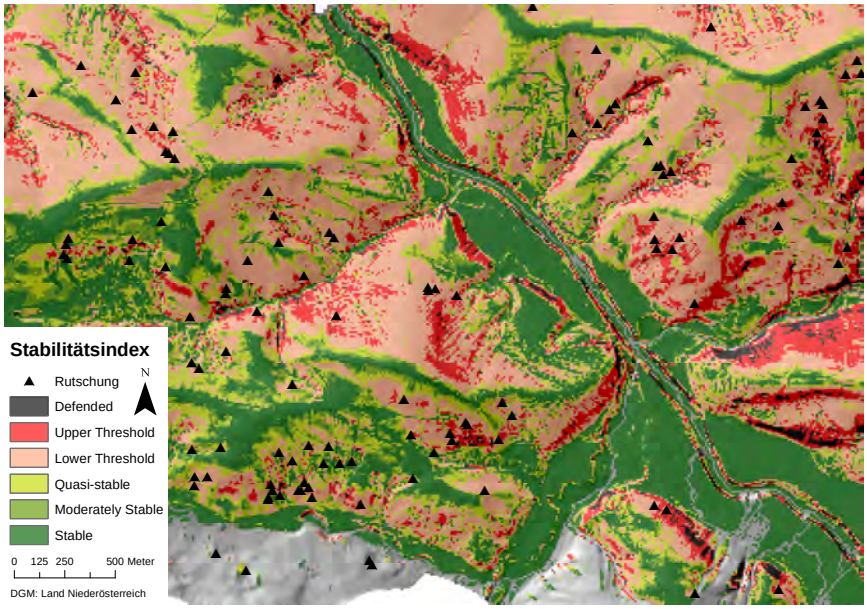


Abbildung 5.11: Karte des Stabilitätsindex in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter.

5.4.1 Einfluss der räumlichen Auflösung

Sämtliche Modellierungsschritte wurden in den Auflösungen 5, 10 und 20 Meter durchgeführt. Eine Modellierung in 1 Meter Auflösung war aufgrund eingeschränkter Rechnerkapazitäten nicht möglich. Die Rasteranalyse in SINMAP greift ausschließlich auf das vorhandene Digitale Geländemodell (DGM) zurück. Von der räumliche Auflösung des DGMs hängen somit sämtliche weitere Arbeitsschritte ab. Damit bewirken unterschiedliche räumliche Auflösungen des DGMs auch unterschiedliche Resultate in der Stabilitätsanalyse.

Abbildung 5.12 zeigt eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Auflösungen aus dem selben Gebiet. In der Auflösung 5 Meter ist eine weit stärkere Differenzierung der Stabilitätsklassen feststellbar. Je geringer die Auflösung wird, desto größer zeigen sich eher homogene Flächen, die eine bestimmte Stabilitätsklasse repräsentieren. Auflösungsbedingt ist die Ufermauer im nördlichen Fließgewässer in der 5 Meter Auflösung noch deutlich sichtbar und stark differenziert. Hingegen ist sie im Ausschnitt mit 20 Meter Auflösung nicht mehr erkennbar und mit umliegenden Pixeln generalisiert. Eine quantitative Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher räumlicher Auflösungen erfolgte für alle Kalibrationsgebiete jeweils hinsichtlich Fläche pro Stabilitätsklasse, Anzahl der Rutschungen pro Stabilitätsklasse und deren relativen Anteil daran. Die Ergebnisse dieser Analyse sind Tabelle 5.13 (Norden) und Tabelle 5.14 (Süden) zu entnehmen. Im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* im nördlichen Untersuchungsgebiet beträgt die Fläche der Stabilitätsklasse *defended* in der Modellierung mit 5 Meter 1,8 km^2 (das sind 2,4% der Gesamtfläche), während sie mit kleiner werdender Auflösung kontinuierlich sinkt. So beträgt die Fläche in der 10 Meter Modellierung 1,4 km^2 (1,8%) bzw. in der 20 Meter Modellierung 0,9 km^2 (1,2%). Jedoch zieht sich dieser Trend nicht durch alle Stabilitätsklassen durch. In der Klasse *upper threshold* steigt der Flächenanteil mit geringer werdender Auflösung. Beträgt hier die Fläche in der 5 Meter Modellierung 9,8 km^2 (12,9%), so steigt sie in der 20 Meter Modellierung bis auf 10,8 km^2 (14,8%). Jedoch steigt damit nicht automatisch auch die Zahl der Rutschungen in einer Stabilitätsklasse. Während in der Klasse *upper threshold* die Fläche mit geringerer Auflösung zunimmt, nimmt jedoch die Anzahl der Rutschungen ab. Sind in der 5 Meter Modellierung 275 Rutschungen in dieser Stabilitätsklasse enthalten, sind es in der 20 Meter Modellierung nur 226. Den flächengrößten Anteil macht für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* die Stabilitätsklasse *lower threshold* aus. In der 5 Meter Modellierung wird diese Klasse mit 31,2 km^2 (41% der Fläche) ausgewiesen, in der 10 Meter Modellierung mit 33 km^2 (43,9%) sowie mit 34,2 km^2 (46,9%) in der 20 Meter Modellierung. Die am stabilsten ausgewiesene Stabilitätsklasse *stable* weist zwischen der 5 und 20 Meter Modellierung eine Flächendifferenz von über 4 km^2 aus. Während in der 5 Meter Modellierung 20,6% der Gesamtfläche auf diese Klasse entfallen, sind es in der 20 Meter

Modellierung 15,2%. Speziell die Anzahl der Rutschungen in dieser als am stabilsten ausgewiesenen Klasse ist von besonderer Bedeutung. Während es in der 10 und 20 Meter Modellierung 17 bzw. 16 sind, verdoppelt sich die Anzahl der Rutschungen in der 5 Meter Modellierung auf 32 (3,9% aller Rutschungen). Die Gesamtfläche in den unterschiedlichen Auflösungen ist bedingt durch eine unterschiedliche Pixelanzahl nicht ident, sondern weicht geringfügig ab. Die relativen Werte beziehen sich jedoch stets auf die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes mit der dazugehörigen Auflösung. Ebenso verhält es sich mit den Rutschungen, die mit sinkender Auflösung in den Randbereichen wegfallen. Das südliche Untersuchungsgebiet ist vor allem dudurch gekennzeichnet, dass dort deutlich weniger Rutschungen auftreten als im nördlichen Teil. Die Änderungen zwischen den unterschiedlichen Auflösungen (z.B. erneut am Beispiel des Kalibrationsgebietes *Bodengruppe*) liegen ungefähr in der selben Größenordnung, jedoch im südlichen Teil mit einem höheren Flächenanteil der gefährdeteren Stabilitätsklassen. Die Stabilitätsklasse *defended* weist in der 5 Meter Auflösung einen Flächenanteil von 7,5% auf sowie einen Anteil von 22,5% aller Rutschungen. Bei geringer werdender Auflösung reduziert sich dieser Wert deutlich; so beträgt in der 20 Meter Auflösung der Flächenanteil der Stabilitätsklasse *defended* 4,9% und der prozentuelle Anteil der Rutschungen in dieser Klasse reduziert sich hier auf 6,1%. Den höchsten Flächenanteil aller Stabilitätsklassen macht auch im Süden die Stabilitätsklasse *lower threshold* aus. In der 5 Meter Modellierung beträgt der Flächenanteil dieser Klasse 32,6% mit 44,9% aller Rutschungen, in der 10 Meter Modellierung 34,2% der Fläche und 62,5% aller Rutschungen sowie 36,2% der Fläche und 58,5% der Rutschungen in der Modellierung mit 20 Meter.

5.4.2 Einfluss verschiedener Kalibrationsgebiete

Hier werden die Resultate der Gefährdungsmodellierung mit unterschiedlichen Kalibrationsgebieten vorgestellt. Zu den Kalibrationsgebieten, die jeweils möglichst homogene Teilräume im Untersuchungsgebiet für eine einheitliche Zuweisung bodenphysikalischer Parameter ausweisen, gehört jenes der Bodengruppen, der Bodengruppen inkl. Wald, der Bodentiefe, der Bodentiefe inkl. Wald. Dabei wurde jeweils zwischen nördlichem und südlichem Untersuchungsgebiet unterschieden. Abb. 5.15 zeigt beispielhaft die Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* und *Bodengruppe+Wald* in der Auflösung 20 Meter sowie Abb. 5.16 das selbe, jedoch für das südliche Untersuchungsgebiet. Sämtliche Modellierungsresultate in allen Auflösungen sind in Anhang D enthalten.

Das nördliche Untersuchungsgebiet weist für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* in der Auflösung 20 Meter einen überwiegend als *Lower threshold* klassifizierten Stabilitätsbereich aus (46,9% des Gebietes). Klassen mit

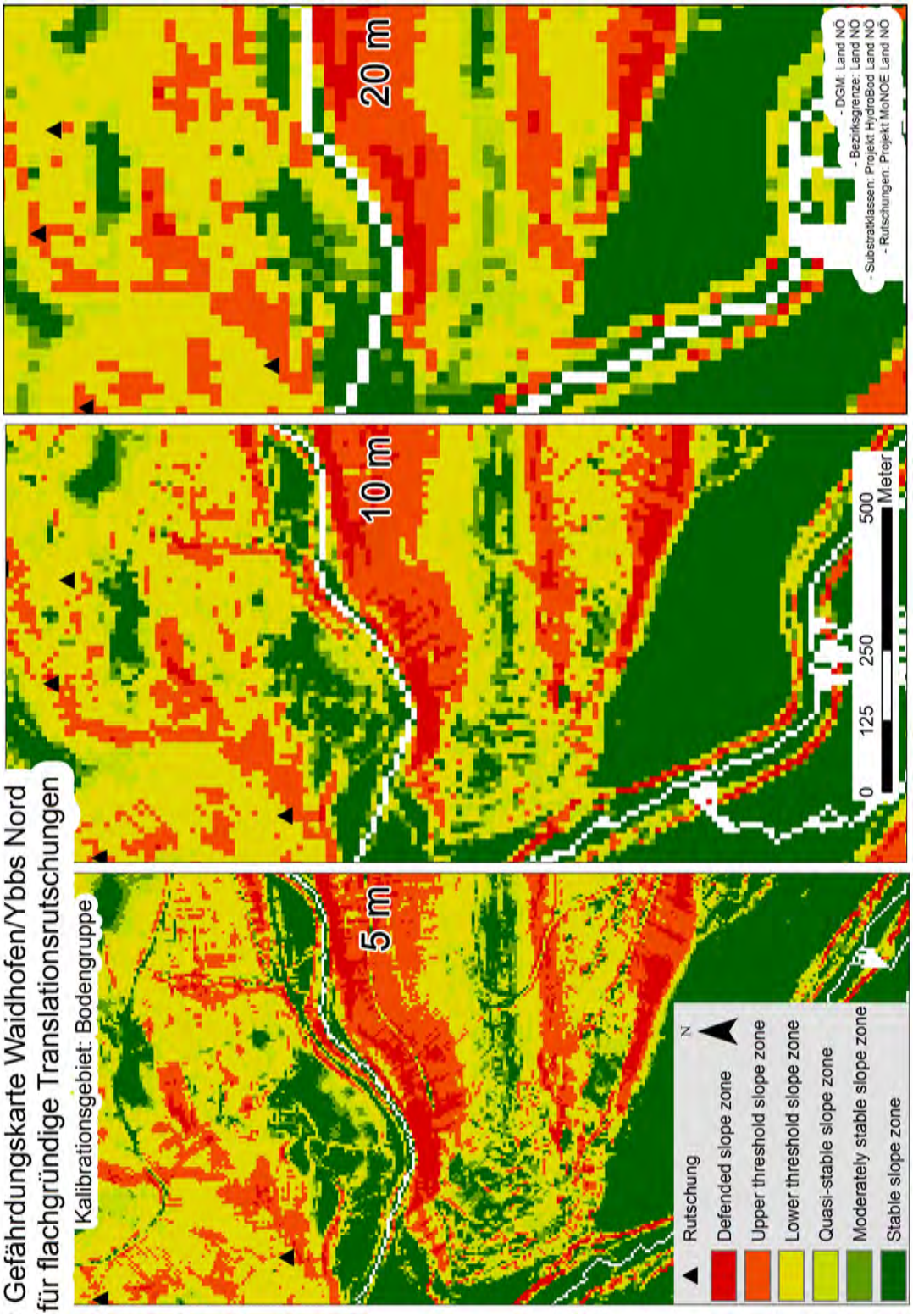


Abbildung 5.12: Gefahrenhinweiskarte aus der SINMAP Stabilitätsindexberechnung für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* im nördlichen Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind drei idente Ausschnitte, jedoch mit unterschiedlichen Auflösungen: 5, 10 und 20 Meter.

höherer Stabilität (*Stable*, *Moderately stable* und *Quasi-stable*) treten vorwiegend in den Tallagen auf. Größere Bereiche mit hoher Stabilität treten vor allem entlang der Ybbs und westlich davon auf. Die mit der geringsten Stabilität ausgewiesenen Klasse *Defended* kommt sehr selten vor (1,2% der Fläche), größere Flächenanteile gibt es in der Klasse *Upper threshold* (14,8% der Fläche). Sie kommt im gesamten Untersuchungsgebiet vor, jedoch sind größere Gebiete räumlich im Westen des Untersuchungsgebietes konzentriert, sowie in einem östlich von Waidhofen Stadt verlaufenden Band. Insgesamt liegen in diesem Kalibrationsgebiet in der 20 Meter Auflösung 85,5% aller Rutschungen in den drei als am wenigsten stabil ausgewiesenen Klassen. Die Miteinbeziehung der Waldflächen in die Stabilitätsanalyse bewirkt eine Reduktion der Flächenanteile der drei instabilsten Klassen zu gunsten der stabileren Klassen. Auf den Gefahrenhinweiskarten ist es vor allem die Klasse *Upper threshold* die eine sichtliche Reduktion ihres Flächenanteils erfährt. Im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe+Wald* beträgt der relative Anteil der Klasse *Upper threshold* 8,8% verglichen mit 14,8% im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe*. Die Berücksichtigung des Waldes bewirkt unter den gegebenen Parameterkonstellationen jedoch durchwegs einen Rückgang des Anteils der Rutschungen in den drei als am wenigsten stabil ausgewiesenen Klassen. Während das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* in der Auflösung 10 Meter 90,6% der Rutschungen in den drei instabilsten Klassen aufweist, sind es im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe+Wald* in der selben Auflösung nur 77,3%. Im südlichen Untersuchungsgebiet ist die überwiegende Stabilitätsklasse ebenfalls jene des *Lower thresholds*. Im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* ist der Flächenanteil der Klasse Upper threshold jedoch fast ident. In der 5 Meter Auflösung beträgt der relative Flächenanteil der Klasse Lower threshold 32,6%, jener der Klasse Upper threshold 31,7%. Die geringsten Stabilitätswerte werden im südlichen Untersuchungsgebiet in einem dicken Band im Zentrum erzielt, während größere Gebiete mit hohen Stabilitätswerten im Südosten vorzufinden sind (Abb. 5.16). Die markantesten Unterschiede zum nördlichen Untersuchungsgebiet im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* bestehen darin, dass die Flächenanteile der drei stabilsten Klassen weit geringer sind und der Flächenanteil der instabilsten Klasse (*Defended*) um einiges höher. Im Kalibrationsgebiet Bodengruppe beträgt der Anteil der Rutschungen in den drei instabilsten Klassen durchwegs über 92%. Wird der Wald miteinbezogen, führt dies im südlichen Untersuchungsgebiet zu einer erheblichen Reduktion der Stabilitätsklasse *Upper threshold*. Beträgt der Flächenanteil dieser Klasse im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* 33,9%, sind es im Kalibrationsgebiet *Bodengruppe+Wald* nur noch 13,5%. Ebenso führt der Wald in der Modellierung zu einer extremen Verringerung der instabilsten Klasse sowie zu einer Zunahme der Flächenanteile der drei stabilsten Klassen. Wie auch im nördlichen Untersuchungsgebiet führt die Berücksichtigung des Waldes zu einer Verringerung des Anteils der Rutschungen in den drei instabilsten Klassen (in der Auflösung 20 Meter ein

Tabelle 5.8: Auflistung der veränderten bodenphysikalischen Parameter für die Sensitivitätsanalyse und deren modifizierte Wertebereiche

Parameter	Wertebereich
T/R (Maximum und Minimumwert zusammen verändert)	50% bis 150% des Basiswertes (=100%)
$\mathbf{T/R_{min}}$ und $\mathbf{T/R_{max}}$ – Änderung jeweils getrennt	50% bis 150% des Basiswertes (=100%)
Reibungswinkel $\boldsymbol{\Phi}$ (Maximum und Minimumwert zusammen verändert)	50% bis 150% des Basiswertes (=100%)
$\boldsymbol{\Phi_{min}}$ und $\boldsymbol{\Phi_{max}}$ – Änderung jeweils getrennt	50% bis 150% des Basiswertes (=100%)
Kohäsion $\mathbf{C_{max}}$	50% bis 150% des Basiswertes (=100%)
Kohäsion $\mathbf{C_{min}}$	0% bis 100% des Wertes von C_{max} (C_{min} 100% ≙ C_{max})

Rückgang von 92,6% auf 82,8%). Das Kalibrationsgebiet *Tiefe* (sowohl für nördliches als auch südliches Untersuchungsgebiet jeweils ausschließlich in 20 Meter Auflösung verfügbar) ist gemessen an den Flächenanteilen der einzelnen Stabilitätsklassen beinahe ident zu jenem des Kalibrationsgebietes *Bodengruppe*. Selbiges gilt für das Kalibrationsgebiet *Tiefe+Wald* verglichen mit dem Kalibrationsgebiet *Bodengruppe+Wald* (siehe Tabelle 5.13 und 5.14).

5.5 Sensitivitätsanalyse

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den Resultaten der durchgeführen Sensitivitätsanalyse. Die Sensitivitätsanalyse ermöglicht, Aussagen darüber zu treffen, wie sehr Änderungen bei den Eingangsbedingungen ein Ergebnis beeinflussen. Wie in Kapitel 3.5 auf Seite 41 bereits beschrieben, wurden zu diesem Zweck die bodenphysikalischen Parameter T/R (als zusammengesetzter Wert aus Transmissivität und Niederschlag), Φ (interner Reibungswinkel) und C (Kohäsion) modifiziert. Die veränderten Eingangsbedingungen befinden sich vollständig in Anhang E.

Als Basis für die Sensitivitätsanalyse wurde für den Norden das Kalibrationsgebiet „*Bodengruppe (ohne Wald)*“ ausgewählt mit einer Auflösung von 10 Metern, für den Süden das Kalibrationsgebiet „*Bodengruppe (ohne Wald)*“ mit einer Auflösung von 5 Metern. Diese Gebiete haben das jeweils beste Modellierungsergebnis geliefert (im Sinne von höchster Prozentsatz der Rutschungen in den drei höchsten Gefährdungsklassen). Insgesamt wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse 160 Modelldurchläufe berechnet. In Tabelle 5.8 werden die Wertebereiche der jeweiligen Parameter zusammengefasst.

Gefährdungsmodellierung Waidhofen/Ybbs – *NORD*

Kalibrationsgebiet: **Bodengruppe** WY Nord	5 m				10 m				20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	15,7	20,6	32	3,9	13,4	17,8	17	2,1	11,1	15,2	16	2,0
moderately stable	6,5	8,5	28	3,4	6,1	8,1	19	2,3	5,5	7,5	20	2,6
quasi stable	11,1	14,6	69	8,4	10,9	14,5	81	10,0	10,3	14,1	78	10,0
lower threshold	31,2	41,0	362	43,9	33	43,9	410	55,6	34,2	46,9	418	53,4
upper threshold	9,8	12,9	275	33,4	10,4	13,8	251	30,9	10,8	14,8	226	28,9
defended	1,8	2,4	58	7,0	1,4	1,8	33	4,1	0,9	1,2	25	3,2
Summe der drei instabilen Klassen				**84,3**				**90,6**				**85,5**

Kalibrationsgebiet: **Bodengruppe + Wald** WY Nord	5 m				10 m				20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	18,4	24,1	54	6,6	15,7	21,0	38	4,7	13,3	18,3	32	4,1
moderately stable	7,8	10,2	43	5,2	7,5	10,0	41	5,1	6,8	9,3	43	5,5
quasi stable	13,1	17,2	88	10,7	13,1	17,5	105	12,9	13	17,9	98	12,5
lower threshold	29,7	38,9	384	46,6	31,5	42,0	415	51,1	33,1	45,5	436	55,7
upper threshold	6,6	8,7	220	26,7	6,7	8,9	197	24,3	6,4	8,8	167	21,3
defended	0,7	0,9	35	4,2	0,5	0,7	15	1,9	0,2	0,3	7	0,9
Summe der drei instabilen Klassen				**77,5**				**77,3**				**77,9**

Kalibrationsgebiet: **Tiefe** WY Nord	20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	10,4	14,3	12	1,5
moderately stable	5,3	7,3	16	2,0
quasi stable	10,6	14,5	58	7,4
lower threshold	34,7	47,6	452	57,5
upper threshold	10,9	15,0	224	28,5
defended	1,0	1,4	24	3,1
Summe der drei instabilen Klassen				**89,1**

Kalibrationsgebiet: **Tiefe + Wald** WY Nord	20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	12,7	17,3	24	3,1
moderately stable	7	9,6	32	4,1
quasi stable	12,9	17,6	97	12,3
lower threshold	33,6	45,9	455	57,9
upper threshold	6,7	9,2	172	21,9
defended	0,3	0,4	6	0,8
Summe der drei instabilen Klassen				**80,6**

Abbildung 5.13: Statistische Auswertung aller Kalibrationsgebiete für alle Auflösungen im nördlichen Untersuchungsgebiet.

Gefährdungsmodellierung Waidhofen/Ybbs – *SÜD*

Kalibrationsgebiet: **Bodengruppe** WY Süd	5 m				10 m				20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	4,5	12	1	1,1	3,9	10,6	0	0	3,3	9,3	0	0
moderately stable	2,2	5,8	0	0	2,1	5,6	1	1,1	1,9	5,3	1	1,2
quasi stable	3,9	10,5	5	5,6	3,8	10,4	6	6,8	3,6	10,3	5	6,1
lower threshold	12,2	32,6	40	44,9	12,6	34,2	55	62,5	12,8	36,2	48	58,5
upper threshold	11,9	31,7	23	25,8	12,1	33,0	15	17	12	33,9	23	28
defended	2,8	7,5	20	22,5	2,3	6,2	11	12,5	1,8	4,9	5	6,1
Summe der drei instabilen Klassen				**93,2**				**92**				**92,6**

Kalibrationsgebiet: **Bodengruppe + Wald** WY Süd	5 m				10 m				20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	6,1	16,2	1	1,1	5,4	14,6	0	0	4,7	13,2	2	2,4
moderately stable	3,0	8,0	3	3,4	2,9	7,8	5	5,7	2,8	7,9	4	4,9
quasi stable	5,8	15,4	10	11,2	6	16,1	13	14,8	5,9	16,6	8	9,6
lower threshold	15,8	42,0	46	51,7	16,5	44,5	51	60,0	17,0	47,8	57	69,5
upper threshold	6	16,0	20	22,5	5,6	15,1	15	17,1	4,8	13,5	8	9,6
defended	0,9	2,4	9	10,1	0,7	1,9	4	4,5	0,4	1,1	3	3,7
Summe der drei instabilen Klassen				**84,3**				**81,6**				**82,8**

Kalibrationsgebiet: **Tiefe** WY Süd	20 m			
	Fläche km²	% des Gebietes	Anzahl der Rutschungen	% der Rutschungen
stable	3,6	10,0	2	2,4
moderately stable	2,3	6,4	1	1,2
quasi stable	5,2	14,5	8	9,8
lower threshold	17,2	47,9	55	67,0
upper threshold	6,8	18,9	12	14,6
defended	0,8	2,2	4	4,9
Summe der drei instabilen Klassen				**86,5**

Abbildung 5.14: Statistische Auswertung aller Kalibrationsgebiete für alle Auflösungen im südlichen Untersuchungsgebiet.

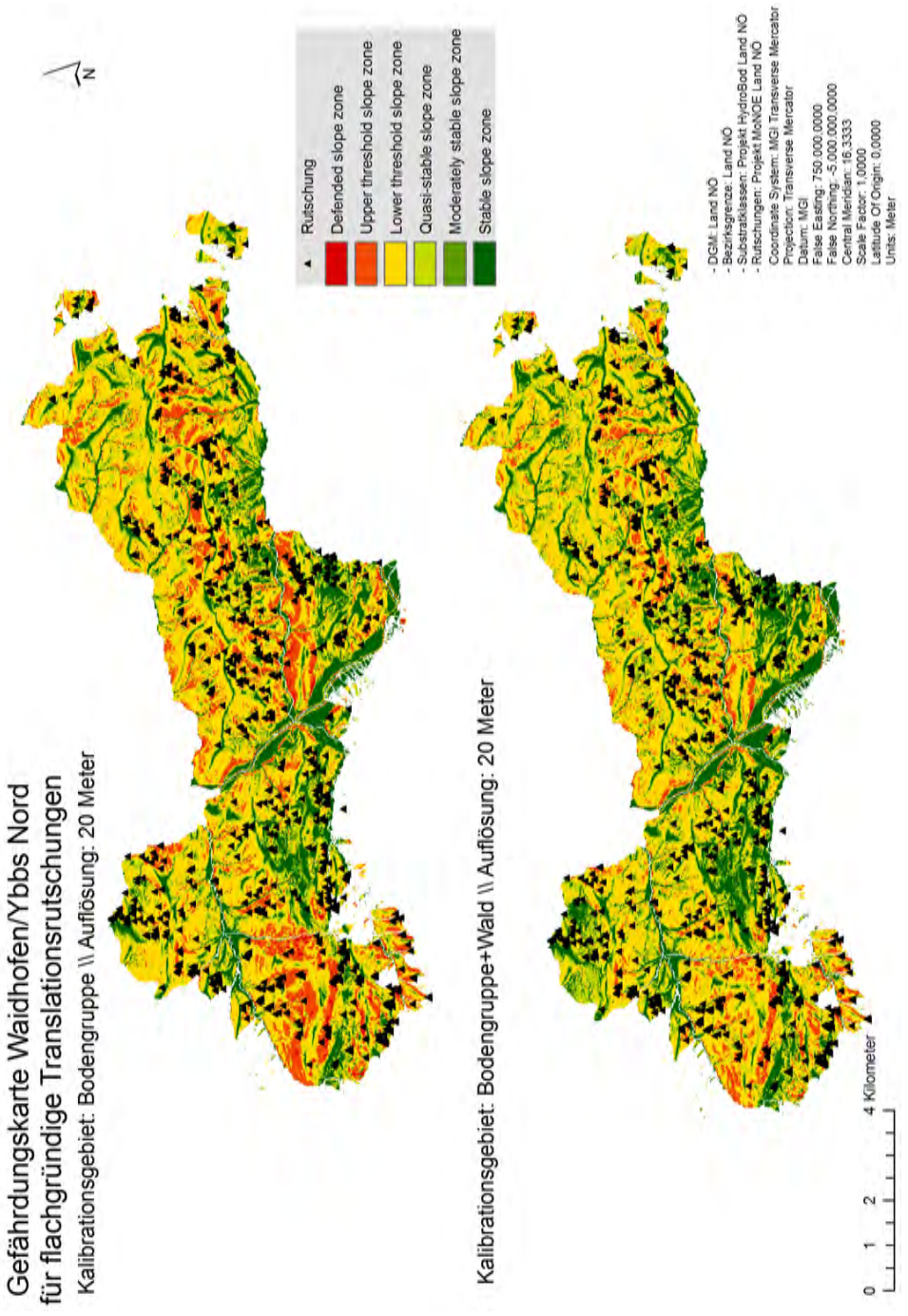


Abbildung 5.15: Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter.

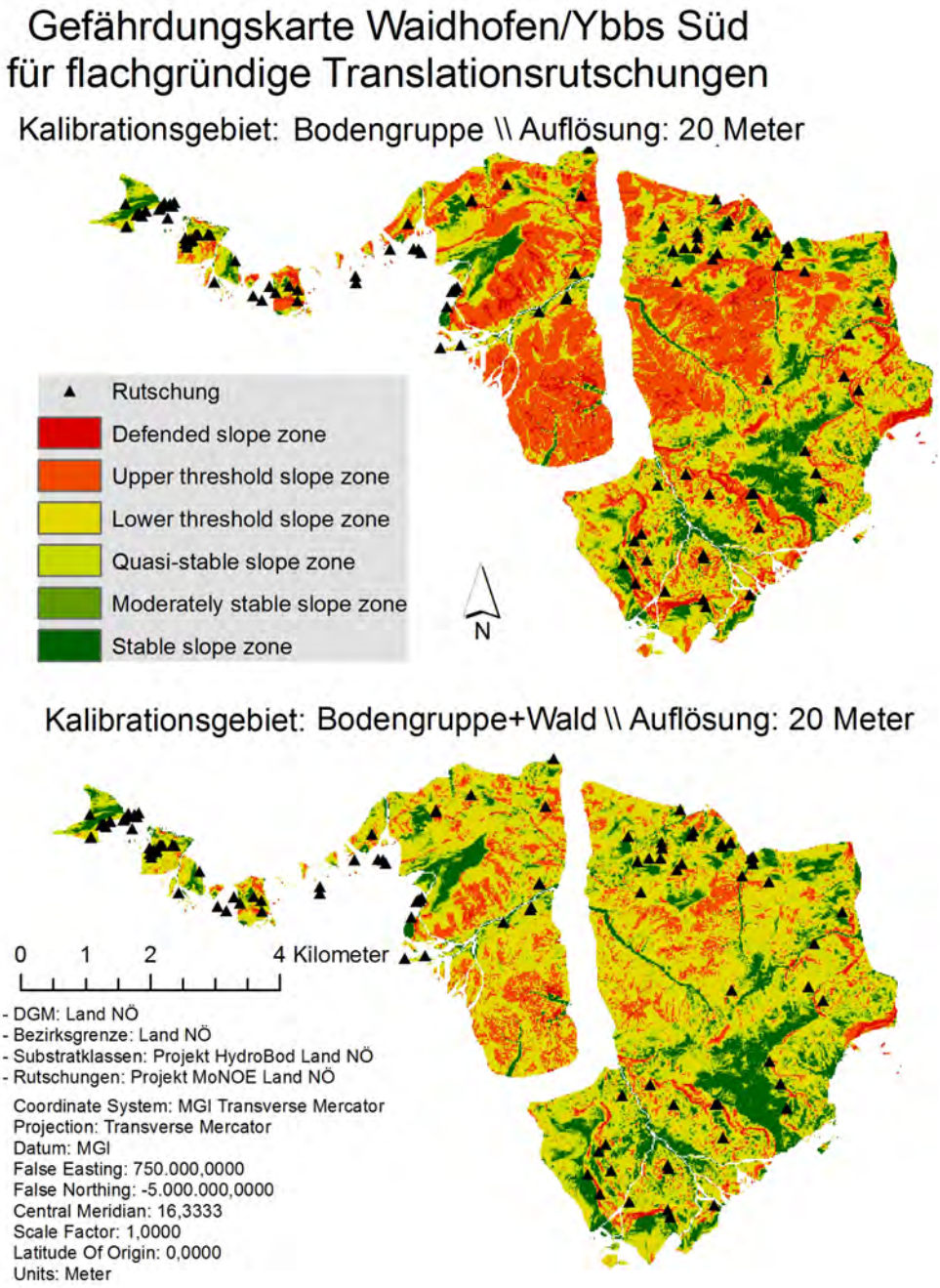


Abbildung 5.16: Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter.

5.5.1 Gemeinsame Veränderung des Minimum- *und* Maximumwertes

In einem ersten Schritt wurden die jeweils zu verändernden bodenphysikalischen Parameter mit ihren Maximum- und Minimumwerten gemeinsam verändert. Dazu wurden Maximum- und Minumumwert jeweils um 10% erhöht bzw. verringert um den Wertebereich zwischen 50% und 150% des Basiswertes (=100%) abzudecken. Die daraus resultierenden Diagramme spiegeln die Veränderung jedes einzelnen Pixels hinsichtlich ihres errechneten *Factor of Safety* (FoS) Wertes über die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes wieder.

Der die bodenhydrologischen Eigenschaften repräsentierende, zusammengesetzte Parameter T/R ändert bei gleichzeitiger Modifikation sowohl des Maximumwertes als auch des Minimumwertes innerhalb des Wertebereiches zwischen 50% und 150% des Basiswertes sowohl im nördlichen als auch südlichen Untersuchungsgebiet die jeweiligen Flächenanteile der sechs Stabilitätsklassen nur geringfügig. Bei Zunahme des T/R-Wertes erfolgt durchwegs durch alle Stabilitätsklassen eine Zunahme hin zu größeren Flächenanteilen der als eher stabil eingestuften Flächen. Beträgt in der ursprünglichen Modellierung der Flächenanteil der drei als am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen im nördlichen Untersuchungsgebiet $40,4\%$ der Fläche, sind es in der Modellierung mit 150% von T/R $46,1\%$ der Fläche, also eine Zunahme von etwa $14,1\%$ (Abb. 5.17(a)). Im südlichen Untersuchungsgebiet erhöht sich der Flächenanteil der drei als am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen um ca. $8,5\%$ (Abb. 5.17(b)). Die größten prozentuellen Flächenzugewinne zwischen der 50% und 150% Modellierung werden im nördlichen Untersuchungsgebiet in der Stabilitätsklasse *stable* erzielt. Dort beträgt der Flächenzugewinn ca. 38%. Die größten Flächenverluste zwischen der 50% und 150% Modellierung erfolgen in der kleinsten Stabilitätsklasse *defended*, wo die Fläche von $3,7\%$ auf $1,2\%$ sinkt. Ein ähnliches Bild zeigt das südliche Untersuchungsgebiet bei Modifikation des Parameters T/R. Die Stabilitätsklasse *stable* hat die größten prozentuellen Flächenzugewinne zwischen der 50% und 150% Modellierung (ca. $37,4\%$), die Stabilitätsklasse *defended* die größten Flächenverluste (von $10,2\%$ auf $6,7\%$). Größere Sprünge kommen sowohl zwischen den einzelnen prozentuellen Veränderungsschritten, als auch innerhalb der einzelnen Stabilitätsklassen nicht zum Vorschein.

Einen weitaus größeren Einfluss auf die Modellierung, verglichen mit der Änderung des T/R-Wertes, weist die Modifikation des internen Reibungswinkels Φ auf (Abb. 5.18). Generell kann diesem Parameter attestiert werden, dass er bei Zunahme eine eher stabilisierende Wirkung ausübt. In Zahlen ausgedrückt nimmt der prozentuelle Flächenanteil der drei als am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen im Vergleich zur ursprünglichen

Modellierung (=100%) für das nördliche Untersuchungsgebiet in der Modellierung mit 150% um genau 50% zu (von 40, 4% der Fläche auf 80, 8%). Im südlichen Untersuchungsgebiet sind es ca. 133, 6% (von 28, 3% der Fläche auf 66, 1%). Betrachtet man die Änderungen zwischen der Modellierung mit 50% und 150% des Basiswertes, so erfolgt im nördlichen Untersuchungsgebiet in der Stabilitätsklasse *moderately stable* die prozentuell größte Zunahme (von 1, 5% der Fläche auf 15, 8%). Die Stabilitätsklasse *defended* weist im südlichen Untersuchungsgebiet in der ursprünglichen Modellierung einen Flächenanteil von 1, 9% auf, bei Modifizierung des Parameters in der 50% Modellierung beträgt der Flächenanteil in der als am instabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklasse fast 1/3 der Gesamtfläche, während sie bei der 150% Modellierung gar nicht mehr vorhanden ist.

5.5.2 Veränderung des Minimum- *oder* Maximumwertes

Eine Vorgehensweise wie bei der jeweiligen gemeinsamen Erhöhung des Maximum- und Minimumwertes der Parameter T/R und Φ war bei der Kohäsion C nicht möglich, da das Minimum der Kohäsion Null ist. Hier wurde so vorgegangen, dass C_{min} auf 100% mit C_{max} gleichgesetzt wurde und sich der Wert jeweils um 10% des C_{max}-Wertes verringert hat.

Die Erhöhung des C_{max}-Wertes führt im nördlichen Untersuchungsgebiet dazu, dass mit zunehmender Kohäsion die Stabilitätsklassen *upper threshold* und *defended* in den *lower threshold* Bereich übergehen. Beträgt der Flächenanteil der Stabilitätsklasse *lower threshold* in der 50% Modellierung 36, 4%, sind es in der 150% Modellierung 49, 5%. Die Flächenanteile der beiden als am wenigsten stabil ausgewiesenen Stabilitätsklassen haben sich hingegen von zusammen 22, 9% auf 10, 2% reduziert. Eine Veränderung der drei am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen war nicht feststellbar. Ein ähnliches Bild ergibt sich dabei für das südliche Untersuchungsgebiet (Abb. 5.19(a)). Hier bleibt die Stabilitätsklasse *upper threshold* jedoch relativ konstant, wo hingegen der Flächenanteil der Klasse *lower threshold* zwischen der 50% und der 150% Modellierung um ca. 64, 7% zunimmt und der Flächenanteil der Klasse *defended* von 18, 5% auf 2, 9% zurückgeht. Auch hier ist eine Veränderung der drei am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen nicht feststellbar.

Die Veränderung des C_{min}-Wertes, in diesem Fall die Anhebung der Kohäsion von Null bis zu C_{max}, bringt vor allem große Zugewinne in den stabileren Klassen (Abb. 5.19(b)). So steigt im nördlichen Untersuchungsgebiet bei einer Erhöhung der Minimalen Kohäsion (Null) auf den Wert C_{max} der Flächenanteil der drei am stabilsten ausgewiesenen Stabilitätsklassen von 40, 4% der Gesamtfläche auf 81, 8% an. Eine Erhöhung der minimalen Kohäsion führt unter gegebenen Modellparametern somit zu einer Erhöhung

der Stabilität im Untersuchungsgebiet.

Minimum- und Maximumwert für die Parameter T/R und Φ wurden ebenfalls jeweils getrennt voneinander in die Modellierung eingespeist, jedoch decken sich die Aussagen mit jenen der gemeinsamen Erhöhung der Parameter.

5.6 Vergleich mit statistischer Modellierung

Die Methodik der statistischen Modellierung und des hier angestellten Vergleichs wird in Kapitel 3.6 dargestellt. Der erste Schritt umfasste die Reduktion der sechs Stabilitätsklassen in der physikalisch basierten Modellierung auf drei, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zu erzielen. Der Flächenvergleich der jeweils drei Gefährdungsklassen ist Tabelle 5.9 zu entnehmen. Der physikalisch basierte Ansatz mit SINMAP weist dabei höhere Flächenanteile der geringsten (17,7% der Fläche im Gegensatz zur statistischen Modellierung mit 12,9%) und höchsten (59,8% bzw. 54,5%) Gefährdungsklasse aus. Die größte Differenz weist die mittlere Gefährdungsklasse aus, die im statistischen Ansatz mit 32,6% der Fläche einen ca. 10% höheren Flächenanteil aufweist als im physikalisch basierten Ansatz (22,5%).

Ein qualitativer Vergleich offenbart für das nördliche Untersuchungsgebiet eine gute räumliche Übereinstimmung der jeweiligen Gefährdungsklassen. Abbildung 5.20 weist beide Gefahrenhinweiskarten für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes aus. Um dies in Zahlen auszudrücken und um räumliche Unterschiede auszumachen, wurde ein pixelgenaues Differenzmodell erstellt. Die Abweichungen um zwei Gefährdungsklassen (z.B. von *geringste* zu *höchste*) sind (jeweils ausgehend von der statistischen Modellierung) sehr gering. So beträgt der Anteil der Fläche der um -2 abweichenden Gefährdungsklasse 1,5%, jener mit $+2$ noch geringere 1,0%. Der Vergleich offenbart, dass 70,7% der Fläche mit der selben Gefährdungsklasse klassifiziert worden sind. Eine um $+1$ erhöhte Gefährdungsklasse manifestiert sich auf 12,7% der Fläche, eine um -1 reduzierte auf 14,1% der Fläche (Tabelle 5.10). Speziell im südlichen Teil des nördlichen Untersuchungsgebietes gibt es größere Cluster, die (ausgehend von der statistischen Modellierung) die Gefährdung überschätzen (-1), während Flächen mit Unterschätzungen ($+1$) räumlich verteilter sind, jedoch gibt es im Südwesten ebenfalls ein größeres Gebiet mit einer Unterschätzung der Gefährdung (Abb. 5.21).

Für den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes weichen die Gefährdungsklassen zwischen statistischer und physikalisch basierter Modellierung erheblich ab. So wurde 28,8% der Fläche mit der gleichen Gefährdungsstufe klassifiziert, wohingegen bei 59,3% (ausgehend von der statistischen Model-

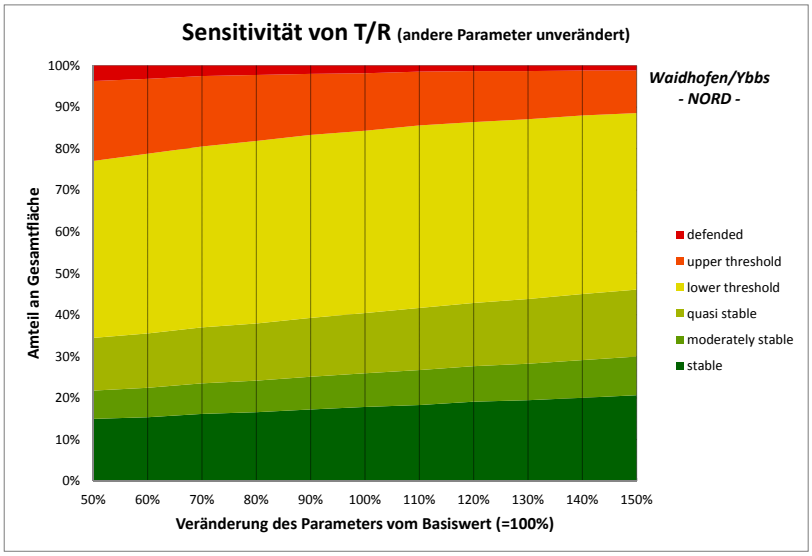
Tabelle 5.9: Vergleich der absoluten und relativen Flächenanteile der drei Gefährdungsklassen im statistischen Modell (GAM) und dem physikalisch basierten Modell (SINMAP) für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes

Gefährdungs-klasse	modellierte Fläche [km²] mit statistischem Ansatz	Fläche in %	modellierte Fläche [km²] mit physikalisch basiertem Ansatz	Fläche in %
geringste	9,7	12,9	13,3	17,7
mittlere	24,5	32,6	17,0	22,5
höchste	41,1	54,5	45,0	59,8

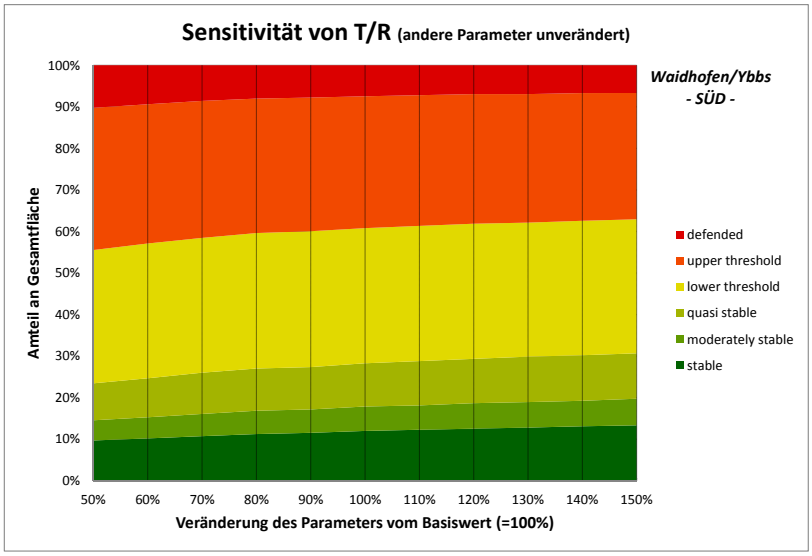
Tabelle 5.10: Abweichung der Gefährdungsklasse für jedes Pixel ausgehend von der statistischen Modellierung für das nördliche und südliche Untersuchungsgebiet

Untersuchungsgebiet Nord		
Differenz der Gefährdungsklasse	Fläche [km²]	Fläche in %
-2	1,1	1,5
-1	9,6	12,7
0	53,3	70,7
1	10,6	14,1
2	0,8	1,0
Untersuchungsgebiet Süd		
Differenz der Gefährdungsklasse	Fläche [km²]	Fläche in %
-2	3,6	9,8
-1	22,0	59,3
0	10,7	28,8
1	0,7	2,0
2	0,0	0,1

lierung) eine Unterschätzung um -1, bei fast 10% sogar um -2 modelliert wurde. Eine Überschätzung der Gefährdung in der statistischen Modellierung verglichen mit der physikalisch basierten erfolgte nur auf ca. 2% der Fläche (Tabelle 5.10).

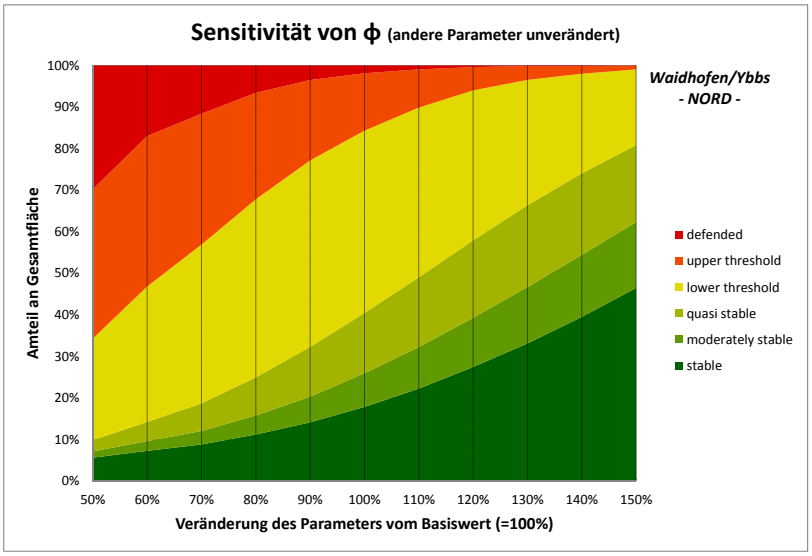


(a)

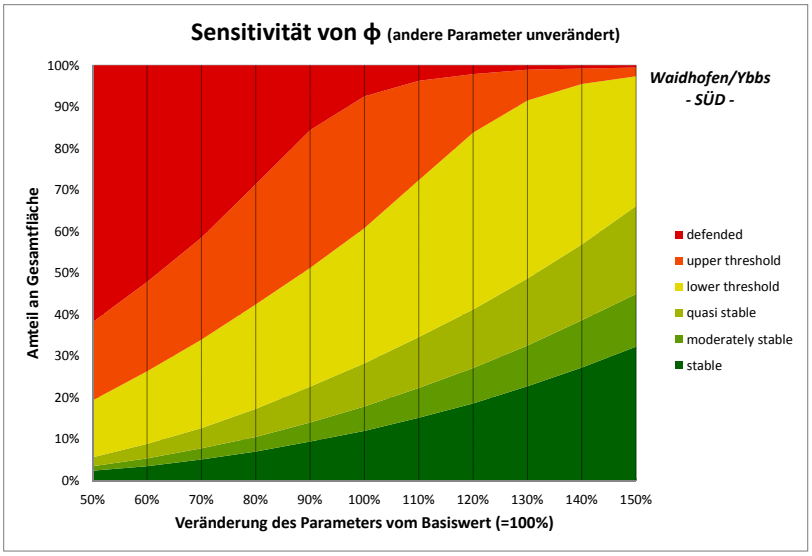


(b)

Abbildung 5.17: Sensitivität des Parameters T/R im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation des Maximum- und Minimumwertes. a) nördliches Untersuchungsgebiet. b) südliches Untersuchungsgebiet.

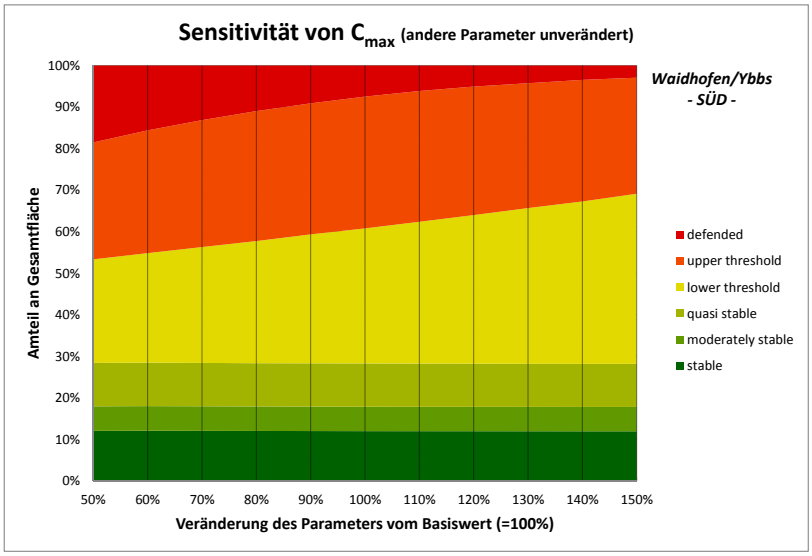


(a)

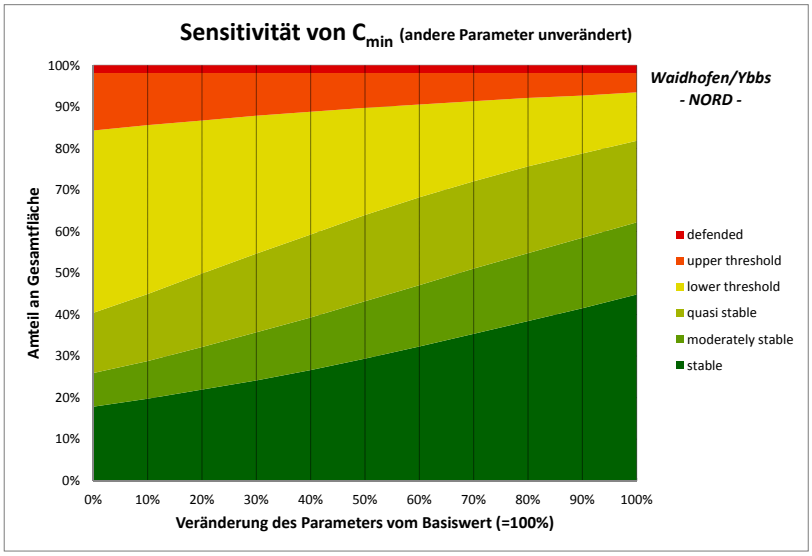


(b)

Abbildung 5.18: Sensitivität des Parameters Φ im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation des Maximum- und Minimumwertes. a) nördliches Untersuchungsgebiet. b) südliches Untersuchungsgebiet.



(a)



(b)

Abbildung 5.19: Sensitivität des Parameters C im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation entweder des Maximum- oder des Minimumwertes. a) C_{max} im südlichen Untersuchungsgebiet. b) C_{min} im nördlichen Untersuchungsgebiet.

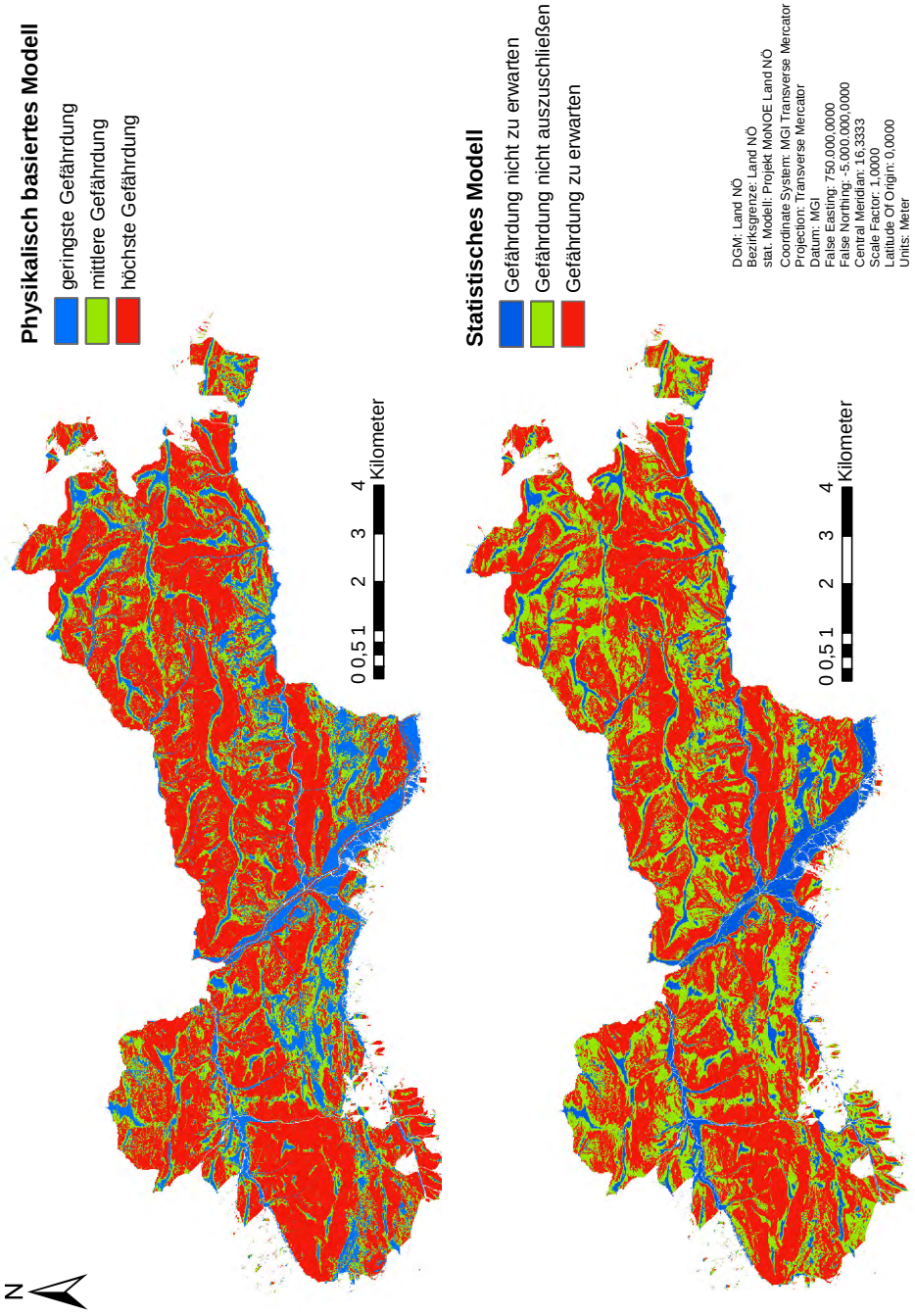


Abbildung 5.20: Gegenüberstellung der Gefahrenhinweiskarten resultierend aus der physikalisch basierten Modellierung mit SINMAP (oben) und der statistischen Modellierung mittels *generalized additive model* (unten)

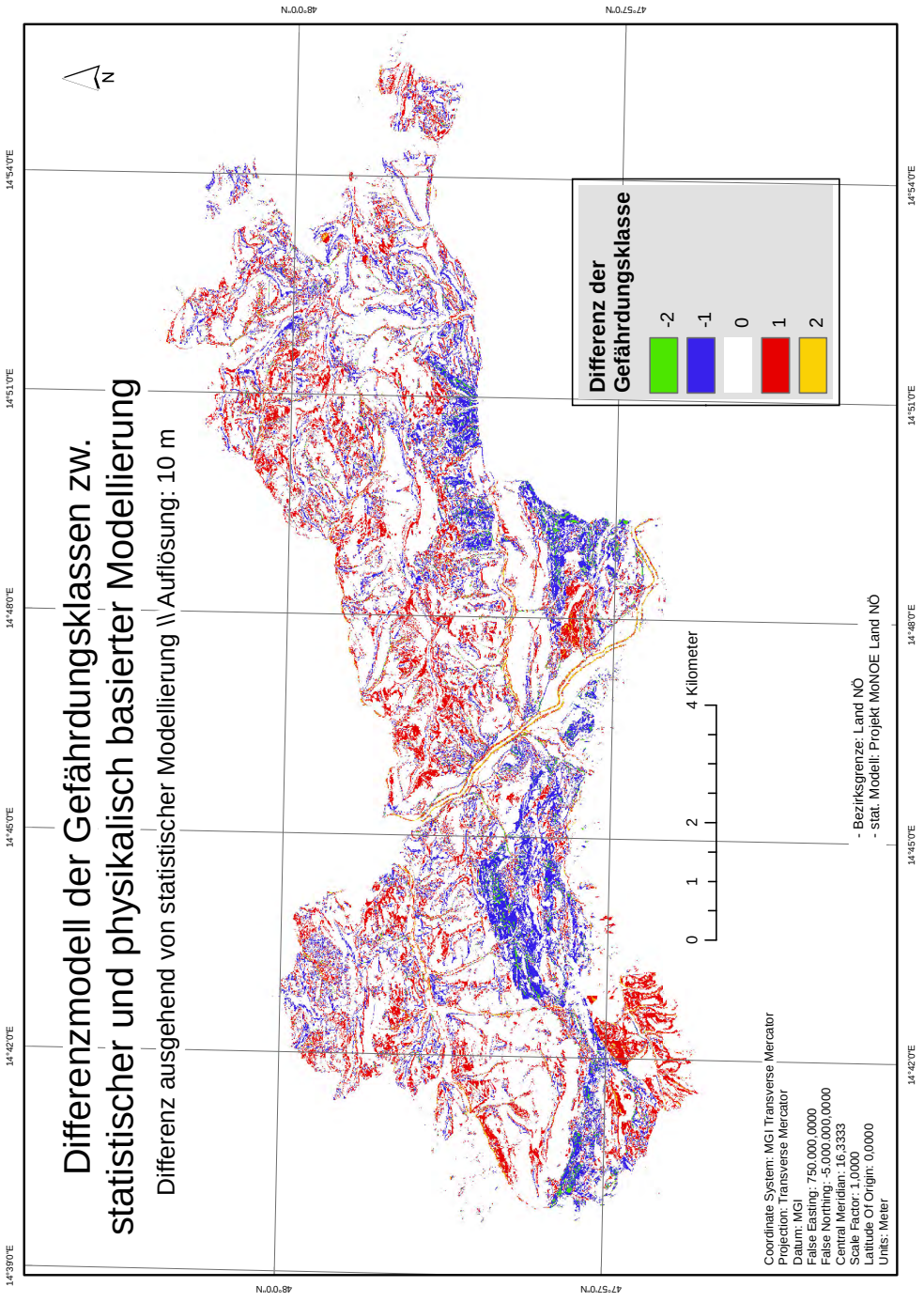


Abbildung 5.21: Differenzmodell zwischen statistischer Modellierung und physikalisch basierter Modellierung für das nördliche Untersuchungsgebiet. Abweichung der Gefährdungsklasse basierend auf statistischer Modellierung.

Kapitel 6

Diskussion und Perspektiven

Das letzte Kapitel umfasst eine kritische Betrachtung der im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse und möglicher Unsicherheiten bzw. Fehlereinflüsse. Dies geschieht in Anlehnung an die einzelnen Teilaspekte der Arbeitshypothese, dargestellt in Kapitel 1.2. Anschließend daran erfolgt ein Ausblick auf weitere mögliche Arbeitsschritte im Kontext dieser Arbeit.

6.1 Diskussion und Unsicherheiten

1.) Welche Parameter erfordert das verwendete Modell und wie wirkt sich die Qualität dieser Daten auf die Modellgüte aus?

Das im Zuge dieser Arbeit zum Einsatz gekommene gekoppelte hydrologische Stabilitätsmodell SINMAP (*Stability Index Mapping*) erfordert für die Parametrisierung der Kalibrationsgebiete nur wenige bodenphysikalische Parameter: die Kohäsion C, den internen Reibungswinkel ϕ sowie einen zusammengesetzen hydrologischen Wert T/R bestehend aus Transmissivität und (vereinfacht) der Niederschlagsmenge pro Tag. Nach vollzogener Trennung des Untersuchungsgebietes in zwei geologisch möglichst homogene Teilräume und der Ermittlung der Bodengruppen aus den zugrunde liegenden Substratklassen, erfolgte eine direkte Zuweisung der Kohäsion und des internen Reibungswinkels aus Literaturwerten. Extrem problembehaftet ist jedoch der kombinierte hydrologische Wert für T/R. Die Standardwerte in SINMAP für diesen Parameter betragen 2.000 (min) bzw. 3.000 (max) Meter. Jedoch erfolgt in der Modelldokumentation keine mathematische Herleitung dieser ausgewiesenen Werte. Auf direkte Nachfrage bei den Entwicklern von SINMAP wurde erklärt, dass die Standardwerte auf Böden mit Permeabilitätswerten zwischen 200 und 300 Meter pro Tag beruhen (Pack 2013, pers. Komm.). Diese Werte werden jedoch für Böden im Untersuchungsgebiet bei weitem nicht erzielt (siehe Tabelle 5.3). Meisina und Scarabelli (2007), Zizioli et al. (2013) oder Deb und El-Kadi (2009) haben ebenso sehr geringe

T/R-Werte, während Terhorst und Kreja (2009) den T/R-Wert durch bodenmechanische Gutachten erhoben haben, die weit höhere Werte (ähnlich den SINMAP Standardvorgaben) aufweisen. Eine genaue Vorgehensweise ist in Terhorst und Kreja (2009) jedoch nicht enthalten. Ebenfalls blieb eine persönliche Anfrage leider unbeantwortet. Ähnlich hohe Werte für die Parametrisierung in SINMAP weisen Lan et al. (2004) aus, ohne auf die Berechnung der Werte einzugehen. Ein sehr geringer T/R-Wert in dieser Arbeit führte in ersten Modellierungsversuchen jedoch zu extrem trockenen Standorten. Dabei definiert der Wert R keine langzeitlichen (z.B. jährlichen) Feuchteverhältnisse, „Instead it represents the effective recharge for a critical period or event of wet weather that is likely to trigger landslides“ (Deb und El-Kadi 2009: S. 226). Dies entsprach jedoch qualitativ betrachtet keineswegs den modellierten Feuchteverhältnissen, da die sehr geringen Transmissivitätswerte zu sehr trockenen Standorten führten. Aus diesem Grund musste die völlige Objektivität des deterministischen Modells zugunsten eines eher heuristischen Ansatzes aufgegeben werden. Dazu wurden iterativ T/R-Werte bestimmt, die die Feuchteverhältnisse im Untersuchungsgebiet nach einem Starkregenereignis adäquat repräsentieren und gleichzeitig einen möglichst hohen Anteil an Rutschungen in den geringsten Stabilitätsklassen aufweisen. Eine ähnliche Vorgehensweise für deterministische Modelle wählten auch Harp et al. (2008: S. 72): „In addition, some iterative adjustments were made in cohesion and friction-angle values to reflect the spatial density of failure locations from the date set and thereby improve the fit of the model“ Für konkret den T/R-Wert betreffend, wählten Deb und El-Kadi (2009: S. 227) ein ähnliches Vorgehen: „SINMAP is calibrated by comparing simulation results against inventoried landslide initiation points. The values of T/R parameters, which are difficult to measure, were adjusted to improve model prediction.“ Die veränderten und tatsächlich in die Modellierung eingeflossenen T/R-Werte wurden den berechneten Werten für alle Kalibrationsgebiete stets gegenübergestellt (Tabellen 5.5, 5.6 und 5.7). Diese Vorgehensweise hat somit zwei Nachteile: diese subjektive Anpassung entspricht dem Expertenwissen des Bearbeiters und die Modellierung ist rein gebietsspezifisch und damit nicht auf andere Regionen mit identen bodenphysikalischen Parametern übertragbar (Glade und Crozier 2005b).

Weitere Unsicherheitsfaktoren betreffen die Qualität der Eingangsdaten. Zwar liegt für das gesamte Untersuchungsgebiet Waidhofen/Ybbs ein Digitales Geländemodell (DGM) in der Auflösung 1 Meter vor, jedoch wurden sämtliche anderen Basisdaten in weit geringeren Auflösungen/Maßstäben aufgenommen (Tabelle 3.2). Richtig wäre eine Vorgehensweise, die sämtliche Daten an die Auflösung des Datensatzes mit der geringsten Auflösung anpasst. Jedoch werden in der wissenschaftlichen Praxis durchwegs Datensätze geringer Auflösung an jene der höchsten Auflösung angepasst. So wurde im Rahmen dieser Arbeit zum Beispiel das Wald shapefile mit dem Maß-

stab 1:50.000 in unterschiedlichen Rasterweiten an das DGM angepasst. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass dabei eine Genauigkeit vorgetäuscht wird, die nicht der Realität entspricht. So ist es zwar begrüßenswert, ein möglichst hoch aufgelöstes DGM vorzufinden um daraus bestmöglich topographische Parameter abzuleiten (z.B. durch resampling des 1 Meter DGMs auf 5 Meter), allerdings entspricht die Rasterung des Waldlayers auf 5 Meter tatsächlich nicht dieser Auflösung, da die Waldgrenzen ursprünglich nicht in dieser Auflösung digitalisiert wurden. Dieser Kompromiss ermöglicht dafür einen hohen Informationsgehalt topographischer Parameter und nimmt dafür Lageungenauigkeiten der Waldgrenzen in Kauf. Der Informationsgehalt von Geodaten entspricht trotz Änderung der Auflösung damit maximal jener der Aufnahmeauflösung. Garbrecht und Martz (1996: S. 1461) merken dazu an „Since the topographic information content of the 2- and 4-m DEMs is essentially the same as that of the 10-m DEM, landscape parameters derived from these DEMs are expected to be quite similar. [...] Relatively larger differences in parameter values are found between the 10-, 30-, and 90-, DEMs which reflect a true loss of landscape information due to decreasing resolution.“ Das bedeutet, dass eine möglichst hohe künstlich geschaffene Auflösung nicht erstrebenswert ist, sollten nicht alle involvierten Daten dieser Qualität entsprechen. Dies äußert sich im Rahmen dieser Arbeit so, dass die Unterschiede hinsichtlich Flächenanteil der Stabilitätsklassen und der Anzahl der Rutschungen darin, zwischen den verschiedenen räumlichen Auflösungen des selben Kalibrationsgebietes nur sehr gering ausfallen.

Ebenso mit Unsicherheiten behaftet ist das zum Einsatz gekommene Rutschungsinventar. Bei dem Rutschungsinventar für die Modellierung handelt es sind um eine Momentaufnahme von Rutschungen aus einem hoch aufgelösten DGM und Orthofoto, die mit bloßem Auge und unter Zuhilfenahme unterschiedlicher DGM Derivate und Beleuchtungsrichtungen der Schummerungskarte erkennbar sind. Ältere Rutschungen sind dabei aufgrund von Erosion und menschlichen Einflüssen (Planierung, Drainagierung, Abgrabungen etc.) nicht mehr erkennbar bzw. jüngere Rutschungen sind aufgrund des Alters des DGM oder Orthofotos noch gar nicht im Rutschungsinventar enthalten. Bell et al. (2012) beschäftigen sich mit dieser Problematik. Hinzu kommt die Subjektivität der Kartierung von Rutschungen, die je nach Bearbeiter unterschiedlich ist, da bei der Kartierung oftmals Interpretationsspielraum besteht und daher wesentlich vom Fachwissen und vor allem der Erfahrung des Bearbeiters abhängt (Bell et al. 2010). Im vorliegenden Rutschungsinventar wurde außerdem versucht, Informationen zu Rutschungen aus Gefahrenzonenplänen oder dem Baugrundkataster mittels des DGM zu rekonstruieren, was jedoch aufgrund der ungenauen Verortung bzw. erfolgten Sanierungsmaßnahmen oftmals nicht möglich war. Zudem fehlen jegliche Informationen bezüglich des Alters bzw. des Aktivitätszustands der Rutschungen, womit ein enormer Informationsgewinn erzielt werden könnte. All

diese Punkte, das Rutschungsinventar betreffend, gilt es, bei der Interpretation der statistischen Auswertung der Modellresultate (Tabelle 5.13 und 5.14) zu berücksichtigen. Speziell Rutschungen in der als am stabilsten ausgewiesenen Klasse sollte gesondert Beachtung geschenkt werden. So treten je nach Kalibrationsgebiet und Auflösung zum Teil über 5% der Rutschungen in Gebieten auf, die als *stable* klassifiziert wurden. Neben den Unsicherheiten von Seiten des Rutschungsinventars, die diesen Wert negativ beeinflussen, gibt es zudem methodische Unsicherheiten von Seiten des zugrunde liegenden Modellierungsansatzes, das auf dem *infinite slope stability concept* beruht; so auch SINMAP. Das bedeutet, dass SINMAP lediglich im Stande ist, Translationsrutschungen zu berücksichtigen. Petschko et al. (2010) haben jedoch gezeigt, dass im Bezirk Waidhofen/Ybbs neben gravitativen Massenbewegungen des Typs Rutschen auch fließende und komplexe Bewegungstypen auftreten, wenn auch in einem viel geringeren Umfang. Zudem wurde bei den Rutschungen nicht zwischen Rotations- und Translationsrutschungen unterschieden, die jedoch beide im Untersuchungsgebiet auftreten. Das zweidimensionale *infinite slope stability concept*, auf dem SINMAP beruht, berücksichtigt zudem nicht die Auswirkungen benachbarter Pixel. Der Stabilitätsindex wird pixelweise berechnet. Das bedeutet, dass jedes Pixel ein potentieller Initiierungspunkt für Rutschungen darstellt, ohne die Auswirkungen auf benachbarte Pixel durch die Propagierung der Rutschmasse zu berücksichtigen. Solch dynamische run-out Szenarien sind mit SINMAP nicht berechenbar; hierfür sind anderwertige Modellierungsansätze erforderlich. Neben modellspezifischen und inventarbasierten Unsicherheiten, die womöglich Rutschungen in stabil klassifizierten Gebieten ausweisen, können auch anthropogene Eingriffe dafür verantwortlich sein, die nicht in der Modellierung berücksichtigt werden können. Möller et al. (2001) und Deb und El-Kadi (2009) sehen vor allem Hangunterschneidungen für den Bau von Infrastruktur oder Siedlungserweiterungen als mögliche Faktoren.

Für ein Untersuchungsgebiet in der Größe Waidhofens ist es erforderlich, eine gewisse Komplexitätsreduktion hinsichtlich der Daten zu erzielen. Je größer das Untersuchungsgebiet, umso größer sollte der Generalisierungsgrad sein, da Profildaten oft nur sehr kleinräumig verfügbar sind und eine Regionalisierung auf größere Flächen sehr fehlerbehaftet ist. Hinsichtlich der Auswahl der Kalibrationsgebiete im Rahmen dieser Arbeit (Bodengruppen abgeleitet aus Substratklassen und der Bodentiefe; jeweils in Kombination mit und ohne Waldflächen) war dies ebenfalls erforderlich. Besagte Datengrundlagen stammen aus dem Projekt *HydroBod Niederösterreich* das zum Ziel hatte, bodenhydrologische Kennwerte flächendeckend für gesamt Niederösterreich zu modellieren. Aufgrund der Datenlage ist es erforderlich, zwischen bewaldeten und landwirtschaftlich genutzen Flächen zu unterscheiden. In landwirtschaftlich genutzten Flächen beträgt der durchschnittliche relative Fehler der Regionalisierung der Daten bis zu 20% und entspricht damit

dem üblichen Rahmen von Regionalisierungsversuchen dieses Maßstabsbereichs (Eder et al. 2011). Die Fehler in Waldbereichen sind teilweise sehr hoch als Resultat der geringen Dichte regionalisierbarer Profildaten bzw. fehlender flächiger Bodenkartierungen. Für den Bezirk Waidhofen kommt hinzu, dass dort keine Bodenkartierung erfolgte. Jedoch wurden im Rahmen des HydroBod NÖ Projektes Standortproben aus dem Bezirk genommen. Jedoch zeigten sich im Endeffekt sehr große Abweichungen von den tatsächlich gemessenen zu den regionalisierten Werten. Eder et al. (2011) begründen dies mit dem Betrachtungsmaßstab. Die kleinräumigen Variationen der Bodenparameter können über die Regionalisierung aus Punktdaten mit einem mittleren Punktabstand von ca. einem Kilometer nicht wiedergegeben werden. So decken die gemessenen Profile einen Wertebereich der Tonfraktion von 3 bis 24% ab, während die Tonminerale der Regionalisierung mit Werten zwischen 27 bis 28% eine weit geringere Variabilität aufweisen. Trotz aller Unsicherheiten stellt diese erstmals durchgeführte flächendeckende Erhebung von Bodendaten eine erhebliche Verbesserung der bisherigen Datenbasis dar und ist somit durchwegs zu begrüßen, wenn auch explizit die Fehlerbereiche adressiert werden müssen.

Speziell bei der Bodentiefe (eigentlich: abflussspeichernde Bodenmächtigkeit), die als Kalibrationsgebiet herangezogen wird, gilt es speziell einen Punkt zu berücksichtigen, der mit massiven Ungenauigkeiten behaftet ist. die Tiefenwerte beziehen sich keineswegs auf einen kontinuierliche Wertebereich, sondern liegen als kategorische Daten in Form von Gründigkeitsklassen vor. Diese sind aus einer Regressionsanalyse abgeleitete Werte und damit als theoretischer Wert zu verstehen. Die Tiefe wird mit einem Meter beschränkt, mit der Begründung, dass in größeren Tiefen schnelle Abflussprozesse nicht mehr relevant sind. Der Stauhorizont wird dabei definiert als ein gemittelter Grenzwert der regionalisierten vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit. Für die Modellierung der Stabilitätsindex wurde die Tiefe ebenfalls auf einen Meter beschränkt, da in diesem Maßstab keine weiteren flächenhaften Daten vorlagen. Analysen des Baugrundkatasters (BGK) ergaben jedoch, dass die durchschnittliche Mächtigkeit von Rutschungen im Untersuchungsgebiet ca. 1,9 Meter beträgt (Petschko et al. in Press). Jedoch ist selbst dieser Wert äußerst ungenau, bezieht sich diese Information schließlich auf Schätzungen aus Einträgen des BGKs, wobei Schätzungen über die Tiefe selbst nur bei gut einem Viertel der Einträge möglich waren und die Spannweite von wenigen Zentimetern bis zu 20 Meter reicht (Bell 2013, pers. Komm.). Aus Gründen der Einfachkeit und Umsetzbarkeit wurde die Tiefe demnach im Rahmen dieser Arbeit mit einem Meter festgelegt, zumal ähnliche Werte für flachgründige Rutschungen auch in der Literatur enthalten sind; so geben Zizioli et al. (2013: S. 564) an, dass „most of the landslides were shallow (thicknesses were generally between 0.5 and 2 m), with the failure surface located along the border between the colluvial cover and the weathered be-

drock and, in some cases, involving portions of the bedrock".

Die Kalibrationsgebiete Bodengruppe und Tiefe wurden jeweils sowohl mit, als auch ohne Bewaldung für die Stabilitätsberechnung herangezogen. In der Literatur wird häufig angemerkt (z.B. Sidle 1992), dass sich eine Bewaldung durch die stabilisierende Wirkung der Wurzeln sowie den Auswirkungen auf die Hanghydrologie positiv hinsichtlich der Rutschungsaktivität auswirkt. Demzufolge wurde auch gezeigt, dass Landnutzungsänderungen zu vermehrtem Auftreten von Rutschungen führen können (Glade 2003). Im Rahmen dieser Arbeit hat sich jedoch gezeigt, dass eine Berücksichtigung von Bewaldung (in Form von höherer Bodenkohäsion) stets dazu geführt hat, dass zwar die Flächen mit geringer Stabilität zu gunsten höherer Stabilität zurückgehen, jedoch der relative Anteil der Rutschungen in den drei instabilsten Klassen zunimmt. Zunächst sei erwähnt, dass die vorhandene Information über die Bewaldung lediglich zwischen *Wald ja* und *Wald nein* unterscheidet. Eine Differenzierung hinsichtlich Baumart, Bestandsalter und -dichte, die durchaus zusätzliche Interpretations- und Unterscheidungsmöglichkeiten geboten hätte, existiert nicht. Zudem ist die vorhandene Information über die Bewaldung eine gegenwärtige Momentaufnahme. Rutschungen sind womöglich in früherer Zeit dort aufgetreten, wo einst kein Wald vorzufinden war, zum Zeitpunkt der Kartierung der Waldflächen hingegen schon. Dies würde auch dem Trend entsprechen, dass in Zentraleuropa eine Zunahme der Waldfläche zu beobachten ist (Solberg et al. 2009). Liegen Rutschungen länger zurück, ist eine Erhebung der Landnutzungsgeschichte nicht unerheblich, da die Modellierung nur die Waldflächen zum Zeitpunkt der Aufnahme berücksichtigt. Eventuell wären zu diesem Zweck Besitzansprüche der Waldflächen in Waidhofen zu prüfen, ob es sich dabei eher um Privatbesitz handelt, und damit voraussichtlich eher um Monokulturen, oder ob es sich um Waldflächen der Bundesforste bzw. um Schutzwälder handelt, die eine größere Diversität aufweisen und sich damit eher positiv auf die Bodenstabilität auswirken. Deb und El-Kadi (2009) geben zudem an, dass Beobachtungen gezeigt haben, dass die Wurzeln nicht tief genug reichten und somit über dem Gleithorizont lagen. Dies wäre ein möglicher Erklärungsansatz, weshalb in der Modellierung trotz erhöhter Kohäsionswerte zwar die Flächenanteile der Stabilitätsklassen zugunsten der stabilen Bereiche anwuchsen, jedoch die Rutschungen größtenteils in den selben Stabilitätsklassen wie in der Modellierung ohne Wald verblieben. Inwiefern ein unterschiedlicher Bodenchemismus im südlichen Untersuchungsgebiet, welches durch Kalk und Dolomit unterlagert ist, Auswirkungen auf die Rutschungsgefährdung hat, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht feststellbar

Häufig gilt es auch zu beachten, dass Klassengrenzen subjektiv gezogen werden. Der *Factor of Safety* (FoS), der den Stabilitätszustand pro Pixel ausgibt, ist solch ein subjektiver Wertebereich. Pack et al. (1998) geben

für SINMAP 6 Wertebereiche an, wobei ein $FoS < 1$ Instabilität indiziert, ein $FoS > 1$ hingegen Stabilität (*quasi stable slope zone*). Pixel mit einem $FoS > 1,5$ werden als stabil (*stable slope zone*) ausgewiesen. In der Literatur finden sich häufig jedoch andere Klassengrenzen. Hier gilt es anzumerken, dass es keine absolute Stabilität gibt, sondern nur die Wahrscheinlichkeit der Stabilität mit steigendem FoS zunimmt. Die Klassengrenzen hängen davon ab, wie konservativ die Berechnung des Stabilitätsindex erfolgt. Vor allem in den Ingenieurwissenschaften werden eher höhere FoS Werte herangezogen. Während SINMAP standardmäßig ab einem $FoS > 1,5$ Pixel als stabil ausweist, liegt dieser FoS Klassenwert in Crozier (1986) und Selby (1993) bei $> 1,8$. Konkret auswirken würde sich diese Verschiebung des FoS Wertes nach oben darin, dass die Flächenanteile der als stabil klassifizierten Pixel sinken würden, was eine nicht unwesentliche Änderung der Gefahrenhinweiskarte bewirken würde. Hingegen als äußerst positiv in diesem Kontext zu bewerten ist die Tatsache, dass SINMAP nicht fixe Werte für die bodenphysikalischen Parameter erfordert, sondern die Stabilitätsberechnung mit einem selbst festlegbaren Wertebereich durchführt. Dies ist insofern wichtig, als dass selbst auf lokaler Ebene Wertebereiche bodenphysikalischer Parameter erheblichen Schwankungen unterliegen. Übertragen auf eine regionale Modellierung würde der Fehlerbereich durch einen fixen Wert pro Bodenparameter pro Region in einem Kalibrationsgebiet vermutlich sehr groß werden, ohne jetzt die Differenzen im Rahmen dieser Arbeit aus zeitlichen Gründen quantifizieren zu können.

2.) Wie wirkt sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse eine Abänderung der Eingangsparameter auf das Modell aus?

Wie eingangs in der Diskussion festgehalten wurde, ist die hydrologische Komponente im Rahmen der SINMAP Modellierung in Form des T/R-Wertes jener, der mit den größten Unsicherheiten behaftet ist. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die Werte für die Hydrologie iterativ ermittelt wurden und so eher von einem heuristischen denn einem deterministischen Anatz her resultieren. Ob die Feuchtebedingungen im Untersuchungsgebiet somit die Realität adäquat repräsentieren, konnte nicht im Rahmen dieser Arbeit quantifiziert werden. Eine qualitative Kontrolle erbrachte plausible Feuchtebedingungen, da besonders feuchte Hangbereiche an konvergenten Hangbereichen und Tiefenlinien auftraten und besonders trockene Standorte an Rücken und Kuppen vorzufinden sind. Die Sensitivitätsanalyse jedoch hat gezeigt, dass für die Modellierung in SINMAP und dem zugrunde liegenden *infinite slope stability concept* der hydrologische Parameter T/R keine großen Auswirkungen auf das Modelresultat aufweist, wenn der Wert in einem Wertebereich zwischen 50% und 150% der Standardwerte verändert wird. Im nördlichen Untersuchungsgebiet würde sowohl eine Zu- als auch eine Abnahme des T/R-Wertes um 50% die Flächenanteile der jeweiligen

Stabilitätsklassen nur im einstelligen Prozentbereich verändern. Viel gravierender sind die Auswirkungen bei Veränderung des Kohäsionswertes und des internen Reibungswinkels. Jedoch sei hier angemerkt, dass die Bodenkohäsion und der interne Reibungswinkel sehr persistente Parameter sind, die sich nur über sehr lange Zeiträume verändern und selbst dann in einem kleineren Wertebereich als in jenem der Sensitivitätsanalyse. Nicht so der T/R-Wert, der theoretisch direkt mit den Niederschlagsverhältnissen zusammenhängt und damit der variabelste der zu parametrisierenden Werte ist. Praktisch entspricht der in die Modellierung eingegangene Wert jedoch aufgrund bereits erwähnter methodischer Probleme einem an die kartierte Rutschungsverteilung angepassten Wert. Somit ist es extrem schwierig, die tatsächliche Qualität der Modellierung zu beurteilen, vor allem in Hinsicht auf zukünftige Entwicklungen, die durch die Anwendung physikalisch basierter deterministischer Ansätze näherungsweise dargestellt werden können.

3.) Wie wirkt sich der zugrunde liegende Modellierungsansatz (deterministische vs. statistische Modellierung) auf die räumliche Rutschungsgefährdung im Untersuchungsgebiet aus?

In sämtlichen Modellierungsdurchläufen, basierend auf verschiedenen Kalibrationsgebieten und unterschiedlichen Auflösungen, beträgt der Anteil der Rutschungen in den drei instabilsten Klassen stets mindestens 77%, häufig sogar über 90%. Würde rein das Resultat der physikalisch basierten, determinisitschen Modellierung herangezogen werden, so würden die Ergebnisse auf den ersten Blick als durchwegs sehr gut erscheinen. Der Vergleich mit der bereits vorliegenden statistischen Modellierung, die von Petschko et al. (2012a) durchgeführt wurde, offenbart jedoch markante Mängel des physikalisch basierten Ansatzes. Während im nördlichen Untersuchungsgebiet der Vergleich der beiden Modellierungsresultate durchwegs große Übereinstimmung brachte, sind die Resultate im südlichen Untersuchungsgebiet stark abweichend voneinander. Im nördlichen Untersuchungsgebiet wurden über 70% der Pixel mit der identen Gefährdungsklasse ausgewiesen, während es im südlichen Untersuchungsgebiet nur knapp 29% sind. Auf fast 60% der Fläche der physikalisch basierten Modellierung erfolgte eine Überschätzung der Gefährdung um eine Gefährdungsstufe. Die Gründe hierfür sind schwierig zu eruieren, da die Resultate im nördlichen Untersuchungsgebiet durchwegs eine große Übereinstimmung zeigen. Zumindest zwei Gründe werden als hierfür mitverantwortlich betrachtet. Primär weist die Lithologie einen großen Stellenwert in der räumlichen Verteilung von gravitativen Massenbewegungen auf. Jedoch geht die Lithologie nur indirekt in die Modellierung ein. Als primäres Unterscheidungskriterium dienten nämlich die aus den Substratklassen abgeleiteten Bodengruppen. Diese sind in weiten Teilen des nördlichen und südlichen Untersuchungsgebietes ident. Lediglich durch die Veränderung des hydrologischen Parameters T/R erfolgte eine Differenzierung. Im südlichen

Untersuchungsgebiet wurde der T/R-Wert dahin gehend verändert, dass die Klüftigkeit des anstehenden Kalk- und Dolomitgesteins, die eine größere Wasserdurchlässigkeit begünstigt, berücksichtigt wird. Es ist schwierig sich darauf festzulegen, ob nun die Lithologie oder doch der Boden als Hauptunterscheidungskriterium für die physikalische Modellierung herangezogen werden soll, da Rutschungen sowohl in Böden, in Festgestein aber auch in der Interaktionszone der Verwitterung zwischen Boden und anstehendem Gestein auftreten können. Tonreiche Böden neigen außerdem dazu, mehrere impermeable Horizonte auszubilden, die jeweils einzeln für sich als Gleithorizont fungieren können. Selbst wenn ein Großteil der flachgründigen Rutschungen in Böden auftritt, so muss dennoch die Lithologie eine entscheidende Rolle spielen, da die Rutschungsdichte im nördlichen Untersuchungsgebiet (v.a. Flysch und Klippenzone) weit höher ist als im südlichen Untersuchungsgebiet (Kalk und Dolomit), auch wenn die aus ingenieurgeologischer Sichtweise ermittelten Bodengruppen ident sind. Die Resultate des Vergleichs legen daher nahe, dass im nördlichen Untersuchungsgebiet der Boden als Unterscheidungskriterium durchaus geeignet ist, im südlichen jedoch nicht. Lan et al. (2004: S. 121) merken an, dass „most models are valuable for certain applications and certain regions“. Daher besteht die Möglichkeit, dass SINMAP speziell für die Anwendung in British Columbia kalibriert ist, und die Übertragbarkeit auf andere Gebiete fallweise zu überprüfen ist. Speziell die sehr geringen Permeabilitätswerte in British Columbia, die zu sehr hohen T/R-Werten als Standardwerte in SINMAP geführt haben, sind ein mögliches Indiz hierfür. Auf Nachfrage bei den Entwicklern von SINMAP wurde zudem erwähnt, dass „the use of SINMAP in cohesive soils with low K [Anm.: Permeabilität] may not be appropriate if the dominant mode of failure is not shallow translational“ (Pack 2013, pers. Komm.).

Als zweiter Grund für diese Diskrepanz zwischen statistischer und physikalisch basierter Modellierung im südlichen Untersuchungsgebiet muss der Parameter der Hangneigung erwähnt werden. Petschko et al. (2013) haben für eine niederösterreichweite statistische Rutschungsmodellierung eruiert, dass die Hangneigung die wichtigste unabhängige Variable ist. Dies war auch der Hauptgrund, weshalb im Rahmen dieser Arbeit eine Trennung in nördliches und südliches Untersuchungsgebiet erfolgt ist, da die durchschnittliche Hangneigung im südlichen Untersuchungsgebiet weit höher ist als im nördlichen und so die Modellierung eine zu geringe Gefährdung für den Norden ausgewiesen hat. Dadurch, dass durch die fast identen Bodengruppen im nördlichen und südlichen Untersuchungsgebiet die Parameter für Kohäsion und Reibungswinkel gleich sind, ist somit das Hauptunterscheidungskriterium die Hangneigung, die aus dem DGM berechnet wird. Dies äußert sich im südlichen Untersuchungsgebiet darin, dass die steilsten Hangbereiche, unter den gegebenen bodenphysikalischen Parametern, die geringste Stabilität ausweisen. Dies steht jedoch in absolut keiner Relation

zu den Resultaten aus der statistischen Modellierung. Besonders gestärkt wird diese Vermutung dadurch, dass sich die Resultate der Kalibrationsgebiete Bodengruppe und Tiefe (20 Meter Auflösung), Bodengruppe+Wald und Tiefe+Wald (20 Meter) hinsichtlich Fläche und Anteil der Rutschungen pro Stabilitätsklasse nur sehr wenig unterscheiden. Harp et al. (2008: S. 76) machten eine ähnliche Beobachtung: „The model using slope as the only variable is almost as effective as that using different shear strenghts when considering only the statistics themselves".

Ob die Arbeitshypothese aus der Einleitung verworfen oder angenommen werden kann, ist aufgrund der Erkenntnisse aus dem Vergleich mit der statistischen Modellierung nicht so ohne weiteres zu beantworten. Möller et al. (2001: S. 149) erwähnen als Vorteil ihres physikalisch basierten Ansatzes, dass „in areas without any evidence of recent landsliding processes, which prohibits statistical back analysis of critical conditions responsible for failures, this approach is suitable for susceptibility assessment and prediction of future landslide activities under changing environmental conditions". Die Modellierung in SINMAP hat jedoch gezeigt, dass dies nur dort zutrifft, wo eine hohe Rutschungsgefährdung aufgrund einer dafür anfälligen Lithologie besteht. Für das südliche Untersuchungsgebiet zeigt die physikalisch basierte Modellierung in SINMAP im Vergleich zur statistischen jedoch ein gänzlich anderes Bild. Andererseits ist SINMAP durch die geringe Anzahl an erforderlichen Inputparametern und der Möglichkeit der Eingabe von Wertebereichen anstatt eines fixen Wertes für bodenphysikalische Parameter gut dazu geeignet, sich relativ schnell einen Überblick über die Stabilitätsverhältnisse zu verschaffen. Somit können Gebiete geringer Stabilität ausgewiesen werden, in denen Detailuntersuchungen initiiert werden können.

6.2 Perspektiven

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Arbeitsschritte lassen noch viel Spielraum für weitere Untersuchungen. Speziell der Vergleich mit der statistischen Gefährdungsmodellierung hat besonders für das südliche Untersuchungsgebiet erhebliche Diskrepanzen zum physikalisch basierten Ansatz von SINMAP hervorgebracht. Zu diesem Zweck wäre ein Vergleich verschiedener physikalisch basierter Ansätze, die auf dem *infinite slope stability concept* beruhen, erstrebenswert. Primär, um den problembehafteten hydrologischen Parameter T/R in SINMAP zu umgehen, aber auch, um die allgemeine Performance von SINMAP im zufriedenstellenden nördlichen Untersuchungsgebiet (hinsichtlich Modelloutput im Vergleich zur statistischen Modellierung) evaluieren zu können. Einen solchen Vergleich stellten u.a. Zizioli et al. (2013) an, wobei der Output verschiedener physikalisch basierter Modelle (SINMAP, SHALSTAB, TRIGRS, SLIP) aus dem selben Untersu-

chungsgebiet gegenübergestellt wurde.

Wie in der Diskussion dargestellt, hat der Parameter Hangneigung einen sehr gewichtigen Faktor in der räumlichen Gefährdungsanalyse flachgründiger Rutschungen. Dies führt ohne Berücksichtigung der Rutschungen als eigenständige Variable (wie dies bei statistischen Ansätzen der Fall ist) dazu, dass die Hangneigung die Gefährdung überrepräsentiert. Eine mögliche Herangehensweise hierfür ist die Kombination aus statistischen und physikalisch basierten Modellen. Während statistische Ansätze Rutschungsstandorte als abhängige Variable integrieren, wird damit die Gefährdung steiler, aber kaum von Rutschungen betroffener Bereiche abgemindert. Einen solchen Ansatz verfolgten bereits Goetz et al. (2011), die eine Kombination aus statistischer und physikalisch basierter Modellierung durchführten. Variablen, die dabei aus physikalisch basierten Modellen bezogen wurden, haben zwar nicht zu einer Verbesserung der statistischen Modelle geführt, jedoch führte die Integration zu einer verbesserten physikalischen Interpretation des empirischen Modells. Einen interessanten Ansatz wählten auch Möller et al. (2001), die aus einer Kombination von lithologischen und pedologischen Substratparametern *soil mechanical response units* (SMRU) gebildet haben und ein einfaches physikalisch basiertes Modell mit heuristischen Ansätzen kombiniert haben.

Zusätzlich würde eine Erweiterung bzw. Verbesserung des Datenmaterials von sehr großem Nutzen sein, auch wenn diese Tätigkeit mit einem sehr großen Arbeitsaufwand verbunden ist. Zunächst sei das Rutschungsinventar erwähnt, dessen Erweiterung erheblich zu einer Verbesserung der Modellinterpretation führen würde. Im vorhandenen Rutschungsinventar wird keine Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Bewegungstypen vorgenommen. Für physikalisch basierte Modelle, die auf dem *infinite slope stability concept* beruhen, müssten strenggenommen sämtliche Formen gravitativer Massenbewegungen ausgenommen werden, die nicht auf einer planaren Fläche beruhen. Dies ist jedoch rein aus Daten der Fernerkundung äußerst schwierig zu erheben und würde langwierige Feldarbeit erforderlich machen. Zusätzlich zum Bewegungstyp wären als Zusatzinformationen vor allem das Alter der Rutschung und die Tiefe der Scherfläche von großem Nutzen. Damit würde der Weg in Richtung Gefahrenkarten geebnet werden. Jedoch nicht nur das Rutschungsinventar, auch sämtliche anderen räumlichen Eingangsdaten würden durch eine Verbesserung der räumlichen Auflösung erheblich zur Verbesserung des Modells beitragen. Im Idealfall liegen sämtliche Eingangsparameter in der selben räumlichen Auflösung vor. Hinsichtlich der Informationen bezüglich der Bewaldung wäre eine Differenzierung zwischen Bestandsalter, -dichte und -art ein Mehrgewinn, da sich dadurch einerseits andere Kohäsionswerte ergeben würden, die in die Modellierung einfließen, andererseits die inhaltliche Interpretation des Modelloutputs erhöhen würde.

Dies ist mit Methoden der Fernerkundung mit relativ geringem Aufwand auch über größere Gebiete zu bewerkstelligen.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Klassifikation gravitativer Massenbewegungen nach Dikau et al. (1996). Quelle: Glade und Crozier (2005a) 12
2.2 Schematische Darstellung einer Translationsrutschung. Quelle: Highland und Bobrowsky (2008) 13
2.3 Elementare geometrische Elemente zur Identifikation von Normalkraft und Scherspannung. Quelle: De Blasio (2011) 16

3.1 Übersicht der in dieser Arbeit durchgeführten Arbeitsschritte 27
3.2 Schematische Darstellung der Hanggeometrie im *infinite slope stability model*. Quelle: Pack et al. (1998) 28
3.3 Schematische Darstellung des Konzeptes des dimensionslosen Kohäsionsfaktors. Quelle: Pack et al. (1998) 30
3.4 Schematische Abbildung eines spezifischen Einzugsgebietes. Quelle: Pack et al. (1998) 31
3.5 Gefahrenhinweiskarte von Petschko et al. (2012b) basierend auf einem statistischen Ansatz durchgeführt mit einem *generalized additive model* (GAM) 44

4.1 Übersicht der Geologie Niederösterreichs 48
4.2 Inventare gravitativer Massenbewegungen in Niederösterreich. Quelle: Bell et al. (in Press) 50
4.3 Räumliche Verteilung der kartierten Rutschungen in Niederösterreich. Quelle: Petschko et al. (2012a) 51
4.4 Gestapelter Monatssummenniederschlag in Waidhofen für die Monate Juni/Juli/August im Zeitraum 1971-2008 (Linien geglättet). Quelle: HISTALP Datensatz der ZAMG (Auer et al. 2007) . 52
4.5 Formationen (lithostratigrafische Gesteinseinheiten) im Bezirk Waidhofen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Formationen befindet sich die vollständige Legende in Anhang A. Quelle: Land Niederösterreich 53
4.6 Bodenprofile zu Standorten in Waidhofen/Ybbs. Siehe dazu Tabelle 4.3. Quelle: eBOD (2013) 57

5.1 Übersicht der 9 im Bezirk Waidhofen/Ybbs vorkommenden Substratklassen. Die einzelnen Substratklassen haben keine gesondert ausgewiesenen Bezeichnungen; eine Auflistung der in den Substratgruppen vereinten Formationen ist Anhang C zu entnehmen. 61
5.2 Karte über die räumliche Verbreitung der Bodengruppen im Bezirk Waidhofen/Ybbs 63
5.3 Oben: Klassifizierte Tiefenstufen getrennt nach nördlichem und südlichem Untersuchungsgebiet. Unten: Kalibrationsgebiet bestehend aus Tiefenstufen und Bewaldung. 65
5.4 Schummerungs- (*hillshade*) und Hangneigungskarte (*slope*) in vier unterschiedlichen Auflösungen. Die Profillinie (rot) verläuft über vier Straßen. Datenquelle: Land Niederösterreich. 71
5.5 Hangprofil im südlichen Untersuchungsgebiet aus DGM mit 1 und 20 Meter Auflösung. Profillinie (eingetragen in Abb. 5.4) verläuft über vier Straßen. 72
5.6 *Pit-filling* Korrektur in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 73
5.7 Hangneigungskarte in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 73
5.8 Karte der Fließrichtung in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 74
5.9 Karte des spezifischen Einzugsgebietes in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 74
5.10 Karte des Bodensättigung nach einem starken Niederschlagsereignis in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 76
5.11 Karte des Stabilitätsindex in einem Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet (Stadtgebiet von Waidhofen) in der Auflösung 10 Meter. 76
5.12 Gefahrenhinweiskarte aus der SINMAP Stabilitätsindexberechnung für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe* im nördlichen Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind drei idente Ausschnitte, jedoch mit unterschiedlichen Auflösungen: 5, 10 und 20 Meter. 79
5.13 Statistische Auswertung aller Kalibrationsgebiete für alle Auflösungen im nördlichen Untersuchungsgebiet. 82
5.14 Statistische Auswertung aller Kalibrationsgebiete für alle Auflösungen im südlichen Untersuchungsgebiet. 83

5.15 Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter. 84
5.16 Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter. 85
5.17 Sensitivität des Parameters T/R im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation des Maximum- und Minimumwertes. a) nördliches Untersuchungsgebiet. b) südliches Untersuchungsgebiet. 90
5.18 Sensitivität des Parameters Φ im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation des Maximum- und Minimumwertes. a) nördliches Untersuchungsgebiet. b) südliches Untersuchungsgebiet. 91
5.19 Sensitivität des Parameters C im Hinblick auf die Veränderung des Flächenanteils der Stabilitätsklassen bei Modifikation entweder des Maximum- oder des Minimumwertes. a) C_{max} im südlichen Untersuchungsgebiet. b) C_{min} im nördlichen Untersuchungsgebiet. 92
5.20 Gegenüberstellung der Gefahrenhinweiskarten resultierend aus der physikalisch basierten Modellierung mit SINMAP (oben) und der statistischen Modellierung mittels *generalized additive model* (unten) 93
5.21 Differenzmodell zwischen statistischer Modellierung und physikalisch basierter Modellierung für das nördliche Untersuchungsgebiet. Abweichung der Gefährdungsklasse basierend auf statistischer Modellierung. 94

A.1 Signaturen der Formationen im Bezirk Waidhofen/Ybbs. Die dazugehörige Karte ist Abb. 4.5 auf Seite 53. 123

B.1 Vergleich der kartierten Rutschungen von Laserscan-Daten mit verfügbaren Daten aus dem Baugrundkataster (BGK, engl. BGR). Die Unterscheidung erfolgt bezirksweise. Quelle: Petschko et al. (2012a) 125

C.1 Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen I. Quelle: Eder et al. (2011) 127
C.2 Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen II. Quelle: Eder et al. (2011) 128
C.3 Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen III. Quelle: Eder et al. (2011) 129
C.4 Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen IV. Quelle: Eder et al. (2011) 130

C.5 Bodenartenverteilung der Substratklassen I. Quelle: Eder et al. (2011) . . . 131
C.6 Bodenartenverteilung der Substratklassen II. Quelle: Eder et al. (2011) . . . 132
C.7 Bodenartenverteilung der Substratklassen III. Quelle: Eder et al. (2011) . . . 133
C.8 Bodenartenverteilung der Substratklassen IV. Quelle: Eder et al. (2011) . . . 134

D.1 Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 5 Meter. . . . 136
D.2 Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 10 Meter. . . . 137
D.3 Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Tiefe (oben) und Tiefe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter. . . . 138
D.4 Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 5 Meter. . . . 139
D.5 Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 10 Meter. . . . 140
D.6 Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Tiefe (oben) in der Auflösung 20 Meter. . . . 141

E.1 Eingabewerte für den Parameter T/R für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord) . . . 143
E.2 Eingabewerte für den Parameter C für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord) . . . 144
E.3 Eingabewerte für den Parameter ϕ für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord) . . . 145
E.4 Eingabewerte für den Parameter T/R für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd) . . . 146
E.5 Eingabewerte für den Parameter C für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd) . . . 147
E.6 Eingabewerte für den Parameter ϕ für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd) . . . 148

Tabellenverzeichnis

3.1 Definition der in SINMAP verwendeten Stabilitätsklassen nach Pack et al. (2005) 41
3.2 In dieser Arbeit verwendete Datensätze 46

4.1 Historische Hochwässer der Ybbs gemessen am Pegel Opponitz (Mirenau). Quelle: noel.gv.at (2013) 56
4.2 Relative Flächenanteile (in %) der jeweiligen Landnutzungsklassen an der Gesamtfläche eines Ausschnitts im Norden von Waidhofen/Ybbs. Quelle: Promper und Glade (2012) 56
4.3 Bodenprofilinformationen zu Standorten in Waidhofen/Ybbs. Siehe dazu Abb. 4.6. Quelle: eBOD (2013) 58

5.1 Aus Substratgruppen bestimmte Bodenarten und daraus ermittelte Bodengruppen für die Zuweisung bodenphysikalischer Parameter für das Untersuchungsgebiet Waidhofen/Ybbs. . . 64
5.2 Auflistung der Modellierungsdurchläufe in SINMAP basierend auf unterschiedlichen Auflösungen verschiedener Kalibrationsgebiete. 66
5.3 Berechnung des T/R-Wertes für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe*. 67
5.4 Berechnung des T/R-Wertes für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Nord* (oben) und *Tiefe Süd* (unten). 68
5.5 Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Bodengruppe*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist. 69
5.6 Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Nord*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist. 70

5.7 Sämtliche in die Modellierung mit SINMAP eingegangene Parameter für das Kalibrationsgebiet *Tiefe Süd*. Der rote, kursive Wert in den T/R-Spalten entspricht dem iterativ ermittelten Wert, der tatsächlich in die Modellierung eingeflossen ist. 70
5.8 Auflistung der veränderten bodenphysikalischen Parameter für die Sensitivitätsanalyse und deren modifizierte Wertebereiche 81
5.9 Vergleich der absoluten und relativen Flächenanteile der drei Gefährdungsklassen im statistischen Modell (GAM) und dem physikalisch basierten Modell (SINMAP) für den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes 89
5.10 Abweichung der Gefährdungsklasse für jedes Pixel ausgehend von der statistischen Modellierung für das nördliche und südliche Untersuchungsgebiet 89

Literaturverzeichnis

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. Histalp–historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region. Int. J. Climatol. 27, 17–46. doi:dx.doi.org/10.1002/joc.1377.

Bell, R., 2007. Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb. University of Bonn, Deutschland.

Bell, R., 2013, pers. Komm. Wissenschaftlicher assistent am institut für geographie und regionalforschung, universität wien.

Bell, R., van Elverfeldt, K., Glade, T., 2010. Blinde Flecken - Grenzen wissenschaftlicher Gefährdungsabschätzungen am Beispiel Hangrutschung. Steiner Verlag. chapter Fokussierung II - Grenzen und Grenzziehungen. pp. 117–134.

Bell, R., Glade, T., Granica, K., Heiss, G., Leopold, P., Petschko, H., Pomaroli, G., Proske, H., Schweigl, J., in Press. Landslide susceptibility maps for spatial planning in lower austria, in: Catani, F., Margottini, C., Trigila, A., Iadanza, C. (Hrsg.), Proceedings of the Second World Landslide Formum – 3-7 October 2011, Rome, Italy.

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. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00454.x.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin 24, 43–69. doi:10.1080/02626667909491834.

Blum, W., Spiegel, H., Wenzel, W., 1996. Bodenzustandsinventur – Konzeption, Durchführung und Bewertung: Empfehlungen zur Vereinheitlichung der Vorgangsweise in Österreich. Technical Report. BMLF und BMWVK. Wien, Österreich.

Bollinger, D., Hegg, C., Keusen, H.R., Lateltin, O., 2000. Ursachenanalyse der hanginstabilitäten 1999. Bulletin für angewandte Geologie 5, 5–38.

Clague, J., Roberts, N., 2012. Landslide hazard and risk, in: Clague, J., Stead, D. (Hrsg.), Landslides: Types, Mechanisms and Modeling. Cambridge University Press, pp. 1–23.

Crozier, M., 1986. Landslides: causes, consequences & environment. Croom Helm, London, Sydney and Dover.

Crozier, M.J., Preston, N.J., 1999. Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country, in: Hergarten, S., Neugebauer, H. (Hrsg.), Process Modelling and Landform Evolution. Springer, Berlin, Heidelberg. volume 78, pp. 267–284. doi:10.1007/BFb0009730.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes, in: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Hrsg.), Landslide – investigation and mitigation. National Academy Press, pp. 36–75.

Damm, B., Terhorst, B., 2010. A model of slope formation related to landslide activity in the eastern prealps, austria. Geomorphology 122, 338–350. doi:10.1016/j.geomorph.2009.11.001.

De Blasio, F.V., 2011. Friction, cohesion, and slope stability, in: De Blasio, F.V. (Hrsg.), Introduction to the Physics of Landslides. Springer Netherlands, pp. 23–52. doi:10.1007/978-94-007-1122-8.

Deb, S.K., El-Kadi, A.I., 2009. Susceptibility assessment of shallow landslides on oahu, hawaii, under extreme-rainfall events. Geomorphology 108, 219–233. doi:10.1016/j.geomorph.2009.01.009.

Dietrich, W.E., Bellugi, D., Real de Asua, R., 2001. Validation of the shallow landslide model, shalstab, for forest management, in: Water Sci. Appl. AGU, Washington, DC. volume 2, pp. 195–227. URL: http://dx.doi.org/10.1029/WS002p0195.

Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996. Landslide recognition. Identification, Movement and Causes. Wiley, Chichester.

eBOD, 2013. Digitale bodenkarte von Österreich. bundesforschungs- und ausbildungszentrum für wald, naturgefahren und landschaft (bfw). (abgerufen am: 19. märz 2013). URL: bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7066.

Eder, A., Sotier, B., Klebinder, K.and SturmlecKle, R., Dorner, J., Markart, G.and ScMar, G., Strauss, P., 2011. Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (HydroBodNÖ): Endbericht. Technical Report. BAW und BFW.

Eeckhaut, M., Hervás, J., Jaedicke, C., Malet, J.P., Montanarella, L., Nadim, F., 2012. Statistical modelling of europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. Landslides 9, 357–369. doi:10.1007/s10346-011-0299-z.

eHYD, 2013. Portal für hydrographische daten Österreichs. bundesministerium für land- und forstwirtschaft, umwelt und wasserwirtschaft. wien, Österreich (abgerufen am: 17. märz 2013). URL: `http://ehyd.gv.at/`.

El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A., 2005. Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation and Applications. Artech House Inc, London.

Garbrecht, J., Martz, L.W., 1996. Comment on 'digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations' by weihua zhang and david r. montgomery. Water Resour. Res. 32, 1461–1462. doi:10.1029/96WR00568.

Gassner, C., Promper, C., Petschko, H.and Glade, T., 2013. Scenarios of future landslide susceptibility – incorporating changes in land cover and climate. Geophysical Research Abstracts – EGU2013-Preview.

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., Crozier, M.J., 2005a. The nature of landslide hazard and impact, in: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (Hrsg.), Landslide Hazard and Risk. Wiley, Chichester, pp. 43–74.

Glade, T., Crozier, M.J., 2005b. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis, in: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (Hrsg.), Landslide Hazard and Risk. Wiley, Chichester, pp. 75–138.

Glade, T., Dikau, R., 2001. Gravitative massenbewegungen: Vom naturereignis zur naturkatastrophe. Petermanns Geographische Mitteilungen 6, 42–55.

Goetz, J.N., Guthrie, R.H., Brenning, A., 2011. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. Geomorphology 129, 376–386. doi:10.1016/j.geomorph.2011.03.001.

Gruber, S., Peckham, S., 2009. Land-surface parameters and objects in hydrology, in: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam et al., pp. 171–194.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S., Swetik, P., 1992. Level I Stability Analysis (LISA) documentation for version 2.0. General Technical Report INT-285. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. Ogden, UT.

Harp, E.L., Michael, J.A., Laprade, W.T., 2008. Shallow landslide hazard map of seattle, washington. Reviews in Engineering Geology 20, 67–82. doi:10.1130/2008.4020(04).

Haslinger, K., Anders, I., Hofstätter, M., 2013. Regional climate modelling over complex terrain: an evaluation study of cosmo-clm hindcast model runs for the greater alpine region. Climate Dyn. 40, 511–529. doi:10.1007/s00382-012-1452-7.

Hettrich, R., Ruff, A., Tranter, C., Geiger, M., Rast, G., 2011. Status und Perspektiven nordalpiner Wildflusslandschaften aus naturschutzfachlicher Sicht. Freiheit für das Wilde Wasser: Die WWF-Alpenflussstudie. WWF Deutschland, Berlin.

Highland, L.M., Bobrowsky, P., 2008. The landslide handbook – A guide to understanding landslides. Reston, Virginia U.S Geological Survey Circular 1325.

Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience 7, 221–238. doi:10.2113/gseegeosci.7.3.221.

Hutchinson, J., 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology andhydrogeology, in: Bonnard, C. (Hrsg.), Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, 10–15 July 1988, Rotterdam. pp. 3–35.

Klebinder, K., Sotier, B., Eder, A., Straus, P., Markart, G., Aigner, H., Holzinger, G., Krammer, C., 2012. Hydrologische bodenkennwerte und abflussreaktionstypen für niederösterreich. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 76, 114–123.

Lan, H., Zhou, C., Wang, L., Zhang, H., Li, R., 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using gis in the xiaojiang watershed, yunnan, china. Engineering Geology 76, 109–128.

Lemenkova, P., Promper, C., Glade, T., 2012. Economic assessment of landslide risk for the waidhofen a. d. ybbs region, alpine foreland, lower austria, in: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A., Leroueil, S. (Hrsg.), Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society through Improved Understanding, Banff, Canada, pp. 279–285.

Meisina, C., Scarabelli, S., 2007. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. Geomorphology 87, 207–223. doi:10.1016/j.geomorph.2006.03.039.

Möller, R., Glade, T., Dikau, R., 2001. Regional landslide hazard assessment using soil-mechanical response units (smru). Zeitschrift für Geomorphologie Suppl. 125, 139–151.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water Resour. Res. 30, 1153–1171. URL: http://dx.doi.org/10.1029/93WR02979.

NÖAtlas, 2013. Geografischer kartendienst der abteilung hydrologie und geoinformation des amts der niederösterreichischen landesregierung (abgerufen: 5. märz 2013). URL: http://atlas.noe.gv.at/.

Neuhäuser, B., Damm, B., Terhorst, B., 2012. Gis-based assessment of landslide susceptibility on the base of the weights-of-evidence model. Landslides 9, 511–528. doi:10.1007/s10346-011-0305-5.

noel.gv.at, 2013. Wasserstandsnachrichten. hochwasserprognosen in niederösterreich. station: Opponitz (mirenau). land niederösterreich. (abgerufen am: 17. märz 2013). URL: http://www.noel.gv.at/Externeseiten/wasserstand/wiskiwebpublic/stat38251.htm.

Pack, R., 2013, pers. Komm. Research associate professor, utah state university.

Pack, R., Tarboton, D., Goodwin, C., 1998. The sinmap approach to terrain stability mapping, in: Paper Submitted to 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998.

Pack, R., Tarboton, D., Goodwin, C., Prasad, A., 2005. SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, technical description and users guide for version 2.0. Utah State University.

Petley, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. Geology, online publ., 927–930. doi:10.1130/G33217.1.

Petschko, H., 2013, pers. Komm. Phd-studentin am institut für geographie und regionalforschung, universität wien.

Petschko, H., Bell, R., Bauer, C., Granica, K., Heiss, G., Leopold, P., Pomaroli, G., Proske, H., Schweigl, J., 2012a. Landslide susceptibility maps for lower austria. methods and challenges, in: Koboltschnig, G., Hübl, J., Braun, J. (Hrsg.), 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 Conference Proceedings - Grenoble/France, International Research Society Interpraevent, Klagenfurt. pp. 479–508.

Petschko, H., Bell, R., Glade, T., Brenning, A., 2012b. Landslide susceptibility modeling with generalized additive models – facing the heterogeneity of large regions, in: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K., Leroueil, S. (Hrsg.), Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society through Improved Understanding. Taylor & Francis, Banff, Alberta, Canada. volume 1, pp. 769–777.

Petschko, H., Bell, R., Leopold, P., Heiss, G.and Glade, T., in Press. Landslide inventories for reliable susceptibility maps, in: Catani, F., Margottini, C., Trigila, A., Iadanza, C. (Hrsg.), Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011, Rome, Italy.

Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T., 2013. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study lower austria. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. 1, 1001–1050. doi:10.5194/nhessd-1-1001-2013.

Petschko, H., Glade, T., Bell, R., Schweigl, J., Pomaroli, G., 2010. Landslide inventories for regional landslide early warning systems, in: Malet, J.P., Glade, T., Casagli, N. (Hrsg.), Proceedings of the International Conference 'Mountain Risks: Bringing Science to Society'. 24-26 November 2010, Firenze, Italy. pp. 277–282.

Promper, C., Glade, T., 2012. Landcover changes for landslide risk evolution first results from lower austria, in: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A., Leroueil, S. (Hrsg.), Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society through Improved Understanding, Banff, Canada, pp. 409–413.

Richwien, W., Lesny, K., 2004. Bodenmechanisches Praktikum, Auswahl und Anwendung von bodenmechanischen Laborversuchen. 11 ed., Verlag Glückauf GmbH, Essen.

Schnabel, W., 2002. Erläuterungen zur geologischen Karte von Niederösterreich 1:200.000. Wien.

Schneider, W., Nelhiebel, P., Aust, G., Wandl, M., Danneberg, O., 2001. Die landwirtschaftliche bodenkartierung in Österreich. Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges. 62, 39–67.

Schwarz, M., Cohen, D., Or, D., 2012. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. Geomorphology 171–172, 190–200. doi:10.1016/j.geomorph.2012.05.020.

Schweigl, J., 2012, pers. Komm. Landesgeologe (niederösterreich), abteilung allgemeiner baudienst – st. pölten.

Schwenk, H., 1992. Massenbewegungen in niederösterreich 1953–1990, in: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt. Geologischen Bundesanstalt. volume 2, pp. 597–660.

Selby, M., 1993. Hillslope Materials and Processes. 2 ed., Oxford University Press, Oxford.

Sidle, R.C., 1992. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. Water Resour. Res. 28, 1897–1910. doi:dx.doi.org/10.1029/92WR00804.

Simons, D.B., Li, R.M., Ward, T.J., 1978. Mapping of potential landslide areas in terms of slope stability. Technical Report. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Flagstaff.

Smoltczyk, U., 2001. Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 6 ed., Ernst & Sohn, Berlin.

Soeters, R., Van Westen, C., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation, in: Turner, A., Schuster, R. (Hrsg.), Landslides: investigation and mitigation (Special Report). National Research Council, Transportation and Research Board Special Report 247, Washington, DC, USA., pp. 129–177.

Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P.G., Hildingsson, A., de Vries, W., 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in european monitoring plots: A stand growth approach. Forest Ecology and Management 258, 1735–1750.

Sotier, B., Klebinder, K., Eder, 2011. Ableitung von bodensubstratklassen aus der geologischen karte von niederösterreich. Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges. 78, 7–13.

Swanston, D.N., 1974. Slope stability problems associated with timber harvesting in mountainous regions of the western United States. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-021. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. Portland.

Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resour. Res. 33, 309–319. doi:dx.doi.org/10.1029/96WR03137.

Terhorst, B., Damm, B., 2009. Slope stability and slope formation in the flysch zone of the vienna forest (austria). Journal of Geological Research 2009, 1–10. doi:10.1155/2009/589037.

Terhorst, B., Kreja, R., 2009. Slope stability modelling with sinmap in a settlement area of the swabian alb. Landslides 6, 309–319. doi:10.1007/s10346-009-0167-2.

Thiebes, B., 2012. Landslide Analysis and Early Warning Systems: Local and Regional Case Study in the Swabian Alb, Germany. Springer Theses, Springer, Heidelberg et al.

Türke, H., 1999. Statik im Erdbau. 3 ed., Ernst & Sohn, Berlin.

Wessely, G., 2006. Geologie der Österreichischen Bundesländer: Niederösterreich. Geologische Bundesanstalt.

ZAMG, 2013. Zentralanstalt für meteorologie und geodynamik. klimadaten von Österreich (1971-2000).

Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R., Montrasio, L., 2013. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in oltrepo pavese, northern italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 559–573. doi:10.5194/nhess-13-559-2013.

Appendices

Anhang A

A.1 Formationen im Bezirk Waidhofen/Ybbs

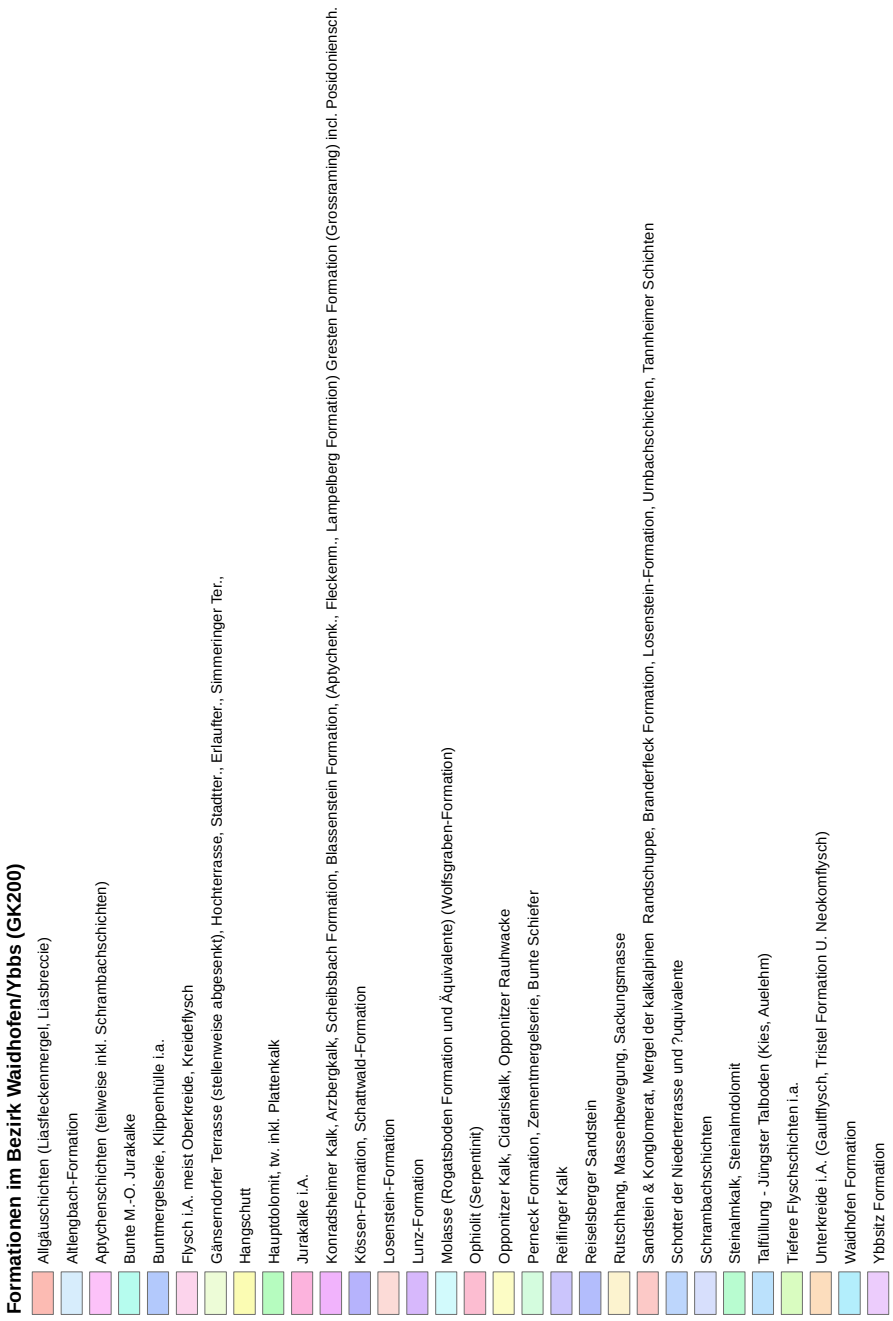


Abbildung A.1: Signaturen der Formationen im Bezirk Waidhofen/Ybbs. Die dazugehörige Karte ist Abb. 4.5 auf Seite 53.

Anhang B

B.1 Rutschungen in Niederösterreich

Province	No. of mapped landslides	No. of landslides in BGR	Difference (Mapped – BGR)	Area of the province in km²
Amstetten	2,712	561	2,151	1,187.33
Baden	219	19	200	754.08
Bruck/Leitha	34	12	22	495.36
Hollabrunn	20	28	-8	1,011.05
Horn	42	12	30	783.04
Korneuburg	157	21	136	627.14
Krems (City & region)	8	77	-69	975.08
Lilienfeld	2,589	55	2,534	932.89
Melk	765	92	673	1,014.95
Mödling	118	18	100	277.68
Neunkirchen	334	89	245	1,151.00
Scheibbs	1,429	360	1069	1,024.60
St. Pölten (City & region)	1,369	191	1,178	1,231.77
Tulln	558	23	535	658.13
Waidhofen/Thaya	27	4	23	669.31
Waidhofen/Ybbs	1,063	177	886	131.31
Wien region	667	37	630	485.20
Wr. Neustadt (City & region)	1,051	44	1,007	1,033.93
Zwettl	0	0	0	1,399.92
TOTAL	*13,162*	*1,827*	*11,335*	*15,843.77*

Abbildung B.1: Vergleich der kartierten Rutschungen von Laserscan-Daten mit verfügbaren Daten aus dem Baugrundkataster (BGK, engl. BGR). Die Unterscheidung erfolgt bezirksweise. Quelle: Petschko et al. (2012a)

Anhang C

C.1 Zuordnung von Formationen zu Substratklassen

S1	(Granat-)Pyroxen-Amphibolit
	Altlengbach-Formation
	Ausspitz-Formation, Einschaltungen von Blockschichten in der Ausspitz-Formation (WZ), Zdanice-Hustopece-Formation (SE) + 151
	Eisgarner Granit, (inkl. Sulzberggranit)
	Granulit
	Greifenstein-Formation (Gablitz-, Irenental-Formation)
	Kohleführende Serie, Dreistettener Konglomerat
	Lunz-Formation
	Phyllit
	Rohrbach- und Ternitz-Formation (Konglomerat - "Nagelfluh")
	Thaya-Batholit (Granit, Granodiorit, Tonalit)
	Werfen-Formation
S2	Allgäuschichten (Liasfleckenmergel, Liasbreccie)
	Aptychenschichten (teilweise inkl. Schrambachschichten)
	Dachsteinkalk, inkl. Anningerkalk i.A. tw. inkl. Dachsteindolomit
	Dachsteinkalk, Lagune
	Dachsteinkalk, Riffbereich
	detritärer (umgelagerter) Leithakalk, Kalk, Kalksandstein
	Gutensteiner Kalk, Dolomit
	Hauptdolomit, tw. inkl. Plattenkalk
	Jura Beckenfazies i.A.
	Jurakalke i.A.
	Jura-Schwellenfazies und Jura i.A.
	Karbonate der Mitteltrias allgemein, Kalk, Dolomit
	Konradsheimer Kalk, Arzbergkalk, Scheibsbach Formation, Blassenstein Formation, (Aptychenk., Fleckenm., Lampelberg Formation) Gresten Formation (Grossraming) incl. Posidoniensch.
	Kössen-Formation, Schattwald-Formation
	Leithakalk, Rakos Kalk-Formation (Karpaten), Zizkov Formation (Mähren), Süßwasserkalk von Ameis
	Marmor, Silikatmarmor
	Opponitzer Kalk, Cidariskalk, Opponitzer Rauhwacke
	Reichenhall-Formation
S3	Älterer Schlier (Silt, Ton; marin)
	Badenium i.A. Ton, Sand, Schotter, Kalk
	Brennberger Blockstrom (Kristallinblöcke in sandig-tegeliger Grundmasse)
	Haller Schlier und Äquivalente (Silt, Feinsand; marin)
	Kaumberg-Formation
	Klikov-Formation (Ton, Silt, Sand; limn)
	Kohleführende Süßwasserschichten, (Ton, Sand, Braunkohle, darauf mächtiger verlehmter Kies)
	Laa-Formation (Kies, Sand, Silt, Ton; marin), Flyschkonglomerat vom Haberg
	Lehm, Verwitterungslehm, Hanglehm
	Leobersdorf-Formation

Abbildung C.1: Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen I. Quelle: Eder et al. (2011)

	Melker Sand, Linzer Sand (Fein- bis Grobsand; marin) Pielacher Tegel (Ton, Silt, Sand; brackisch-marin), Sandstein von Wallsee und Perg
	Neufeld-Formation (Ton, Sand, Braunkohle-Lignit) + Dubnany Formation in Mähren
	Oncophora-Schichten (Sand; brackisch-marin)
	Pannonium undifferenziert (Ton, Sand, Kies)
	Perneck Formation, Zementmergelserie, Bunte Schiefer
	Robulus-Schlier (Ton, Silt, Feinsand: marin)
	Rutschhang, Massenbewegung, Sackungsmasse
	Sandstreifenschlier (Ton, Sand; marin)
	Sarmatium undifferenziert (Ton, Sand, Kies)
	Seeton, limnisches Sediment (Ton, Silt, Sand, tw. organisch)
	St. Marein-Freischling-Formation (Ton, Sand, Kies; limnisch-fluviatil)
	Terrasse von Ornding
	Ton, Sand, Kies, lokal Lignit und Süßwasserkalk
	Tonmergel (Tegel) ?wo CZ
	Untere Gosau Subgruppe (Flachwassergosau)
	Vernässung, Moor
	Zellerndorf-Formation (Ton, Silt, Feinsand; marin), Weitersfeld-Formation (Ton; brackisch-marin)
S4	Alpiner Verrucano, Tattermann-Schiefer (Devin-Formation T), darin ehem. 306 aufgegangen
	Amphibolit
	Bittescher-Gneis, Zweiglimmer-Granitgneis
	Blasseneck Porphyroid (Schürfe im Porphyroid, Klastika unterm Porphyroid)
	Blockschichten von Mauer
	Buschandlwand-, Rehberg-Amphibolit
	Cordierit-Silimanitgneis, Biotit-Plagioklasgneis, Zweiglimmergneis
	Dobragneis, Granodioritgneis von Spitz
	Gföhler Gneis
	grobkörnig
	Hüllschieferserie, Phyllitischer Glimmerschiefer und Paragneis (Mürztaler, Birkfeldner Quarzphyllit) (Leukogranodiorit)
	Migmatitserie von Biotitgneis, Amphibolit, Augitgneis (Raabs-Serie)
	Paragneis, Mischgneis, Glimmerschiefer (Drosendorf-Einheit, Gföhl-Einheit)
	porphyrisch
	Quarzit
	Rastenberger Granodiorit, Durbachit
	Sandstein, Schiefer, Konglomerat (Eisenerzer Schichten, Karbon der Veitscher Decke)
	Weinsberger Granit
	Wettersteindolomit
S5	Buntmergelserie, Klippenhülle i.a.
	Flysch i.A. meist Oberkreide, Kreideflysch
	Laab-Formation, Aggsbach-Member
	Obere Gosau Subgruppe (Tiefwassergosau -Zweiersdorf-Formation, Nierental-Formation)
	Sandstein & Konglomerat, Mergel der kalkalpinen Randschuppe, Branderfleck Formation, Losenstein-Formation, Urnbachschichten, Tannheimer Schichten
	Ton, vorwiegend

Abbildung C.2: Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen II. Quelle: Eder et al. (2011)

	Wolfpassing-Formation
S6	Egerium undifferenziert (?lterer Schlier, Melker Sand, Pielacher Tegel)
	Grund-Formation, Gaindorf-Formation (Kies, Sand, Silt, Ton; marin), Mailberg-Formation (Kalk, Sandstein; marin)
	Hollenburg-Karlstetten-Formation (Konglomerat, Sand, Silt; marin) Ablagerungen des Badenium in der Kremser Bucht und Wachau (Ton, Silt, Sand; marin)
	Talfüllung - Älterer Talboden (Kies, Auelehm)
	Talfüllung - Jüngster Talboden (Kies, Auelehm)
	tonige Fazies i.A., Congerientegel
S7	Gänserndorfer Terrasse (stellenweise abgesenkt), Hochterrasse, Stadtter., Erlaufter., Simmeringer Ter.,
	Hangschutt
	Jüngere Deckenschotter i.a.
	Jüngerer Flugsand
	Jüngerer Steinfeldschotter
	Pliozäne und Pleistozäne Schotter, Marchterrassenschotter und Äquivalente
	Sand
	Sand, vorwiegend
	Schotter der Niederterrasse und Äuquivalente
	Schotter, Bannholzschotter
	Sedimente von Laimbach-Trandorf (Kies, Sand, Silt; fluv.-limn)
	Steinbrunnner Schotter, Zillingdorfer Schotter, Mitterhoferterrasse, Schotter der Parndorfer Platte
	Terrassensedimente Niveau Hochstraßberg und Äquivalente, Ältere Deckenschotter
	Theras-Formation (Kies, Sand; marin-brackisch), Brennholz-Formation (Quarz- und Quarzitschutt, lehmig, sandig)
	Tiefere Terrassenschotter im Allg.
	Zogelsdorf-Formation (Kalksanstein, Sand; marin) Retz-Formation (Fein- bis Grobsand, Kalksandstein; marin)
S8	Altpaläozoischer Phyllit, Quarzit (Polsterquarzit), Tonschiefer, Brekzien (Radschiefer)
	Feinkorngranit, Mauthausener Granit
	Glimmerschiefer, Paragneis
	Grobgneis, Randquarzit, Leukophyllit
	Mylonit (Störungszone i.A.
	Randgranit des Rastenberger Granodioritplutons
	Sericitkalkschiefer
	Silbersbergschiefer, Schiefer, Serizitquarzit
	Wechselgneis
	Wechselschiefer (Graphitphyllit, -quarzit, Phyllit)
S9	Hollabrunn-Mistelbach-Formation (Kies, Sand: fluviatil)
	Korneuburg-Formation
	Mönichkirchen- und Zöbern-Formation ("Blockschotter" - fluviatiler Blockschutt aus Kristallinmaterial)
	Oeynhausener Schotter
	Plio-Pleistozäne Schotter, westl. Amstetten z.T. nur Verebnungsniveaus
	Quartäre Schotter und Sande i.A.
	Schwemmkegel
	Sinnersdorf-Formation ("Blockschotter" in lehmiger Grundmasse - Wildbachschutt)
	Terrasse von Lehen und ?quivalente
	Terrassenschotter
	Terrassensedimente undifferenziert (Kies, Sand, Ton)

Abbildung C.3: Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen III. Quelle: Eder et al. (2011)

S 10	Hohe Terrassensedimente undifferenziert (Kies, Sand, Ton)
	Krumbach-Formation (Ton, Sand, Kies)
	Langau-Formation (Ton, Sand, Kies; marin-brackisch), Riegersburg-Formation (Kies, Sand; marin-brackisch)
	Loipersdorf-Formation (im südlichen Wiener Becken)
	Molasse (Rogatsboden Formation und Äquivalente) (Wolfsgraben-Formation)
	Moräne im Allg. mit Wall (Kies, Sand, Schluff)
	Rißmoräne
	Terrassenschotter, lehmig-siltig bei Hainburg, Gerichtsfeldterrasse
	Tertiäre Sedimente der Subalpinen Molasse zwischen Enns und Mank
	Triesting- und Piesting Schotter, Föllig Schotter und Äquivalente
	Würmmoräne
S 50	Lehm, Löss, undifferenziert
	Löß, Lößlehm

Abbildung C.4: Zuordnung von Formationen in Niederösterreich zu Substratklassen IV. Quelle: Eder et al. (2011)

C.2 Geologische Substratklassen

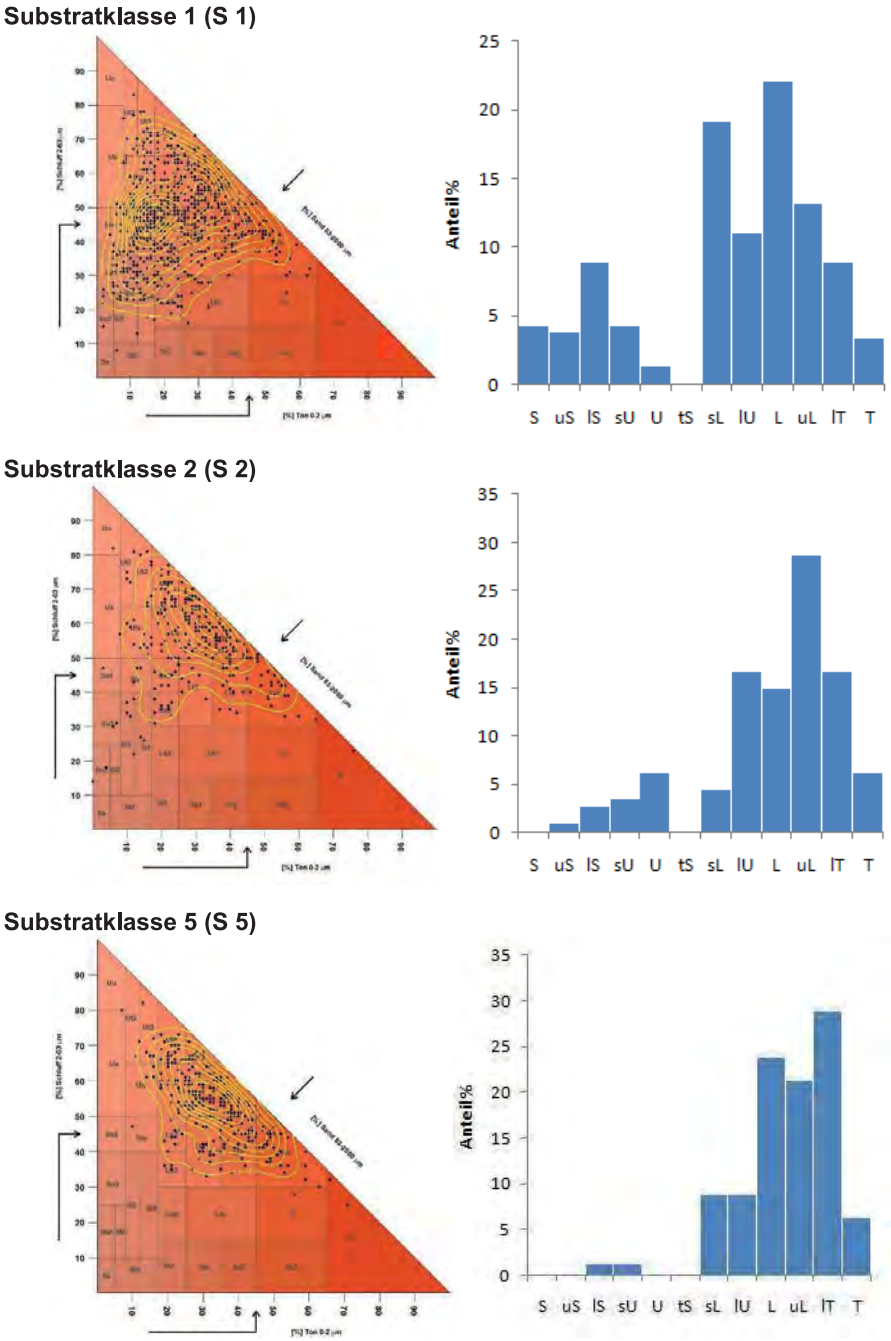


Abbildung C.5: Bodenartenverteilung der Substratklassen I. Quelle: Eder et al. (2011)

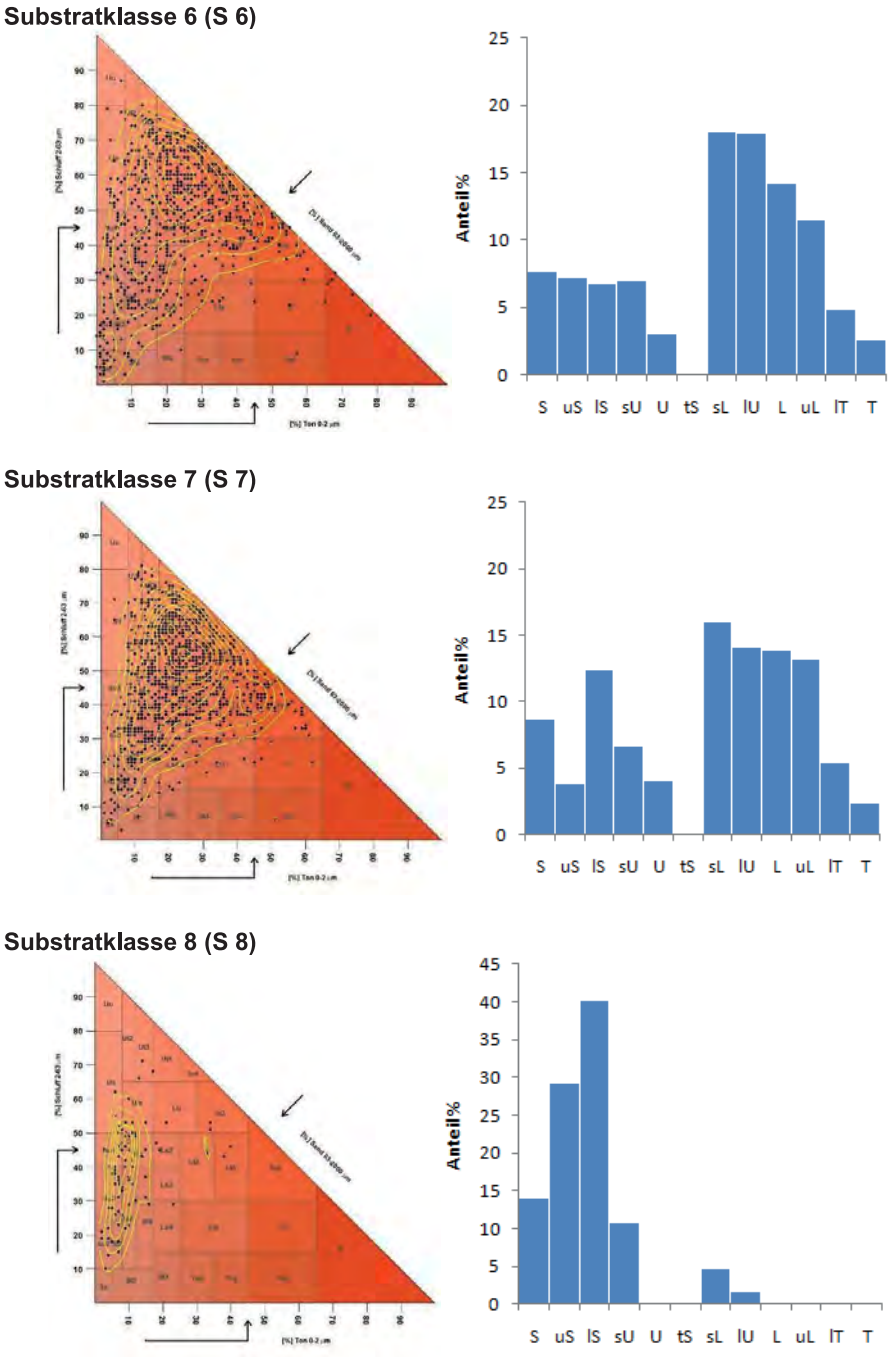


Abbildung C.6: Bodenartenverteilung der Substratklassen II. Quelle: Eder et al. (2011)

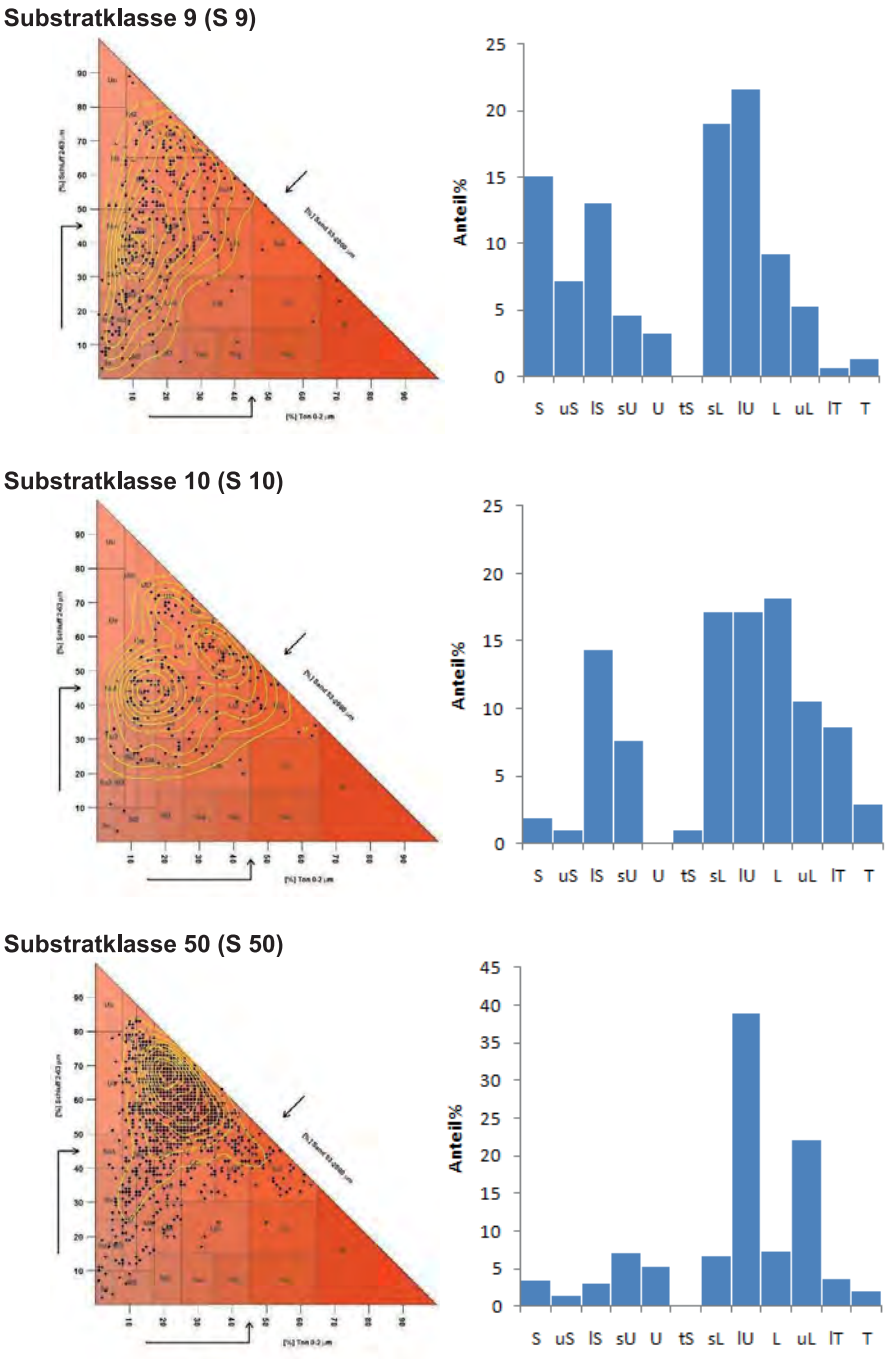
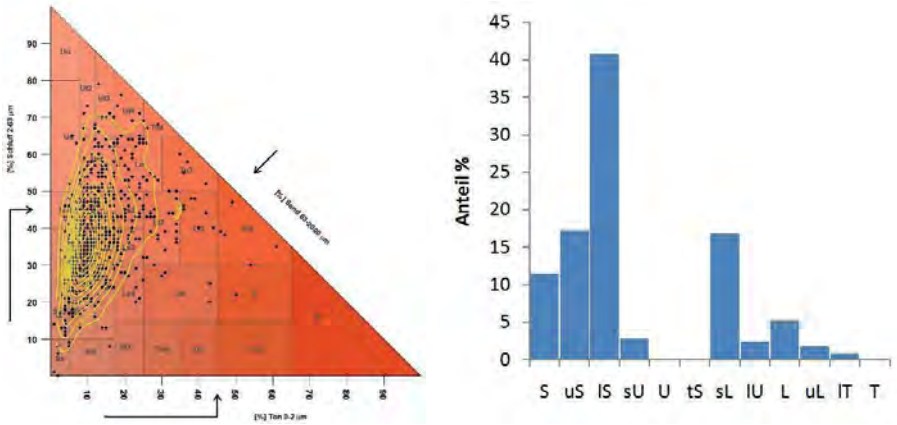


Abbildung C.7: Bodenartenverteilung der Substratklassen III. Quelle: Eder et al. (2011)

Substratklasse 3 (S3)



Substratklasse 4 (S4)

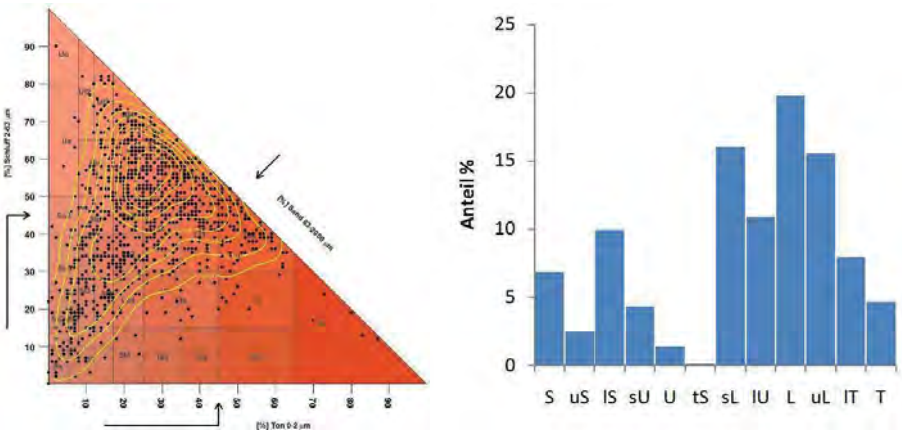


Abbildung C.8: Bodenartenverteilung der Substratklassen IV. Quelle: Eder et al. (2011)

Anhang D

D.1 Gefahrenhinweiskarten für Waidhofen/Ybbs Nord

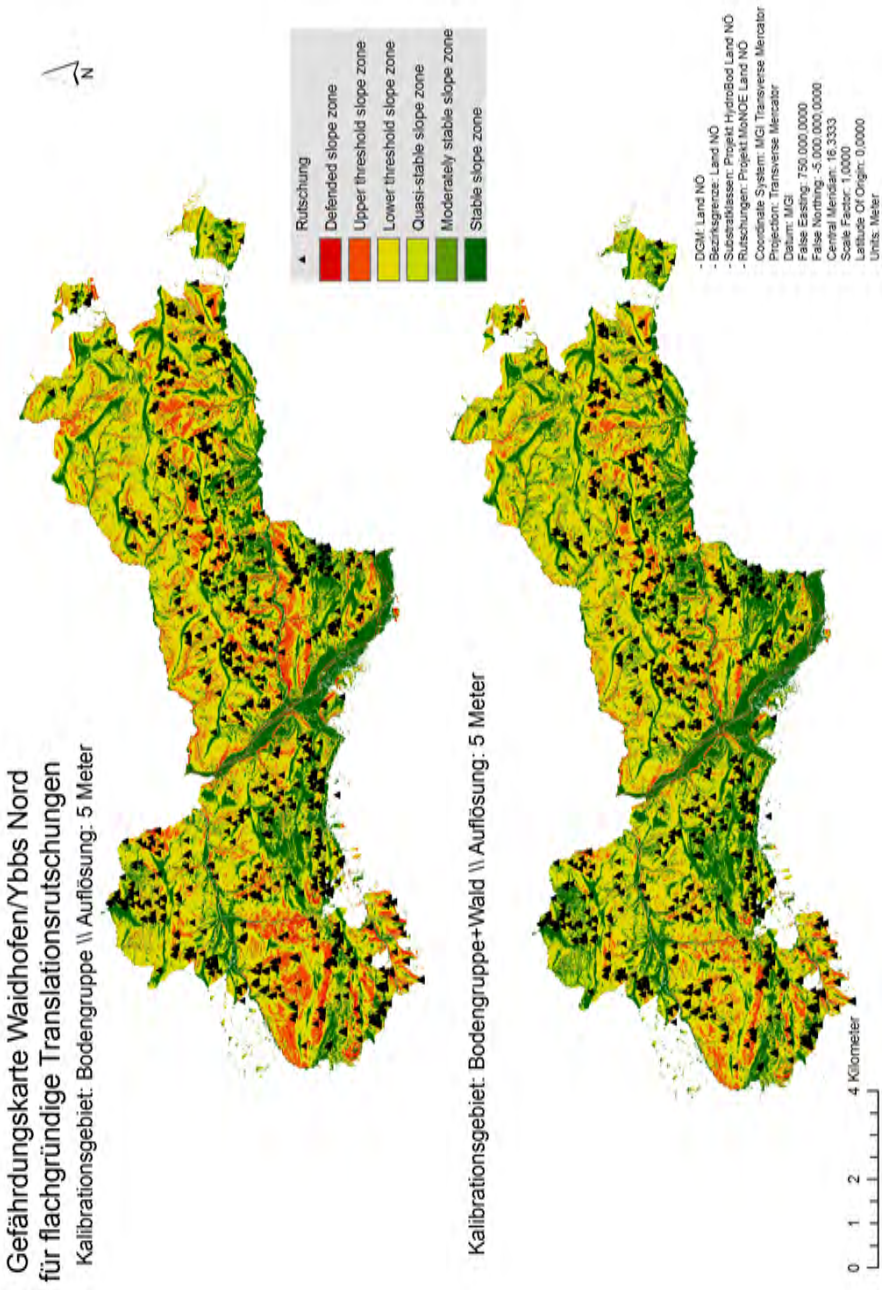


Abbildung D.1: Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 5 Meter.

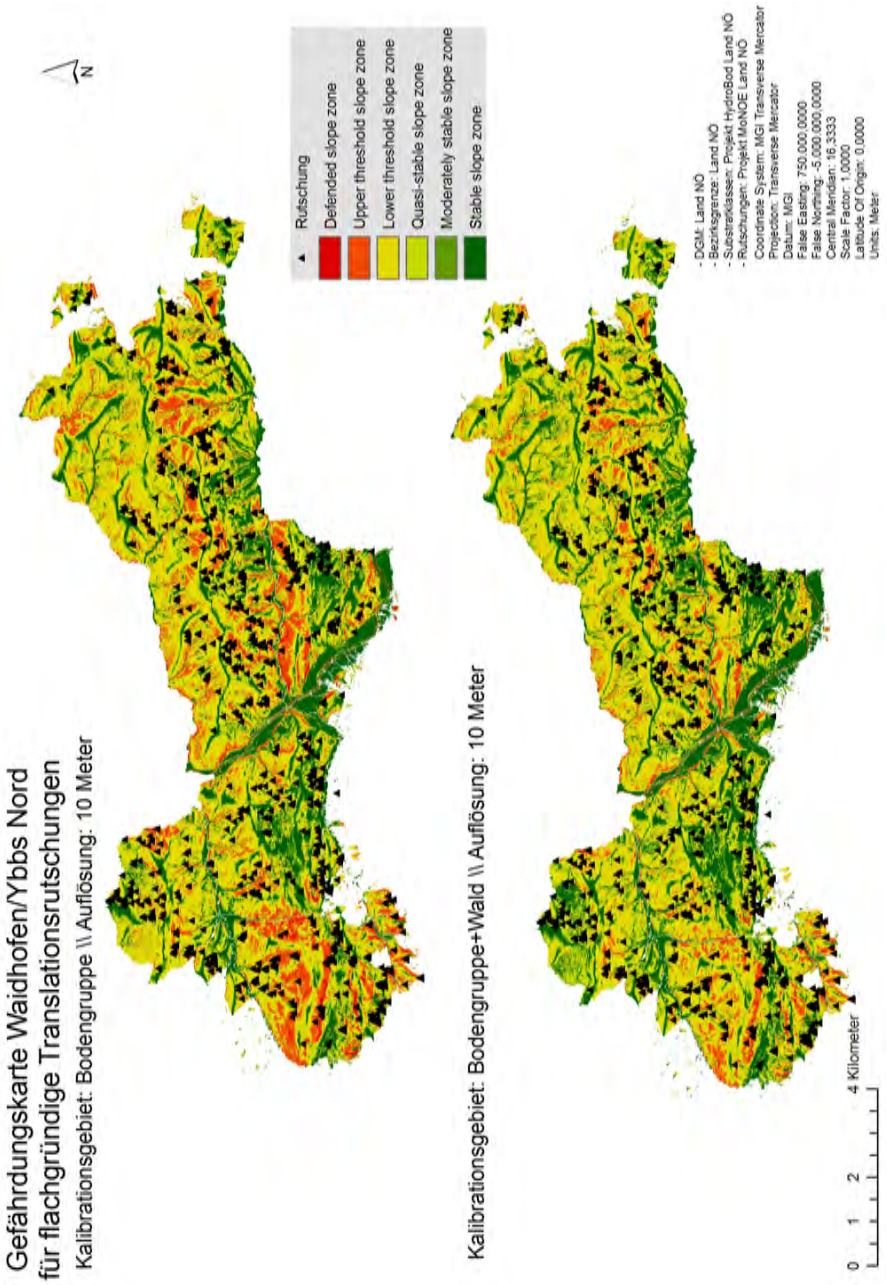


Abbildung D.2: Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 10 Meter.

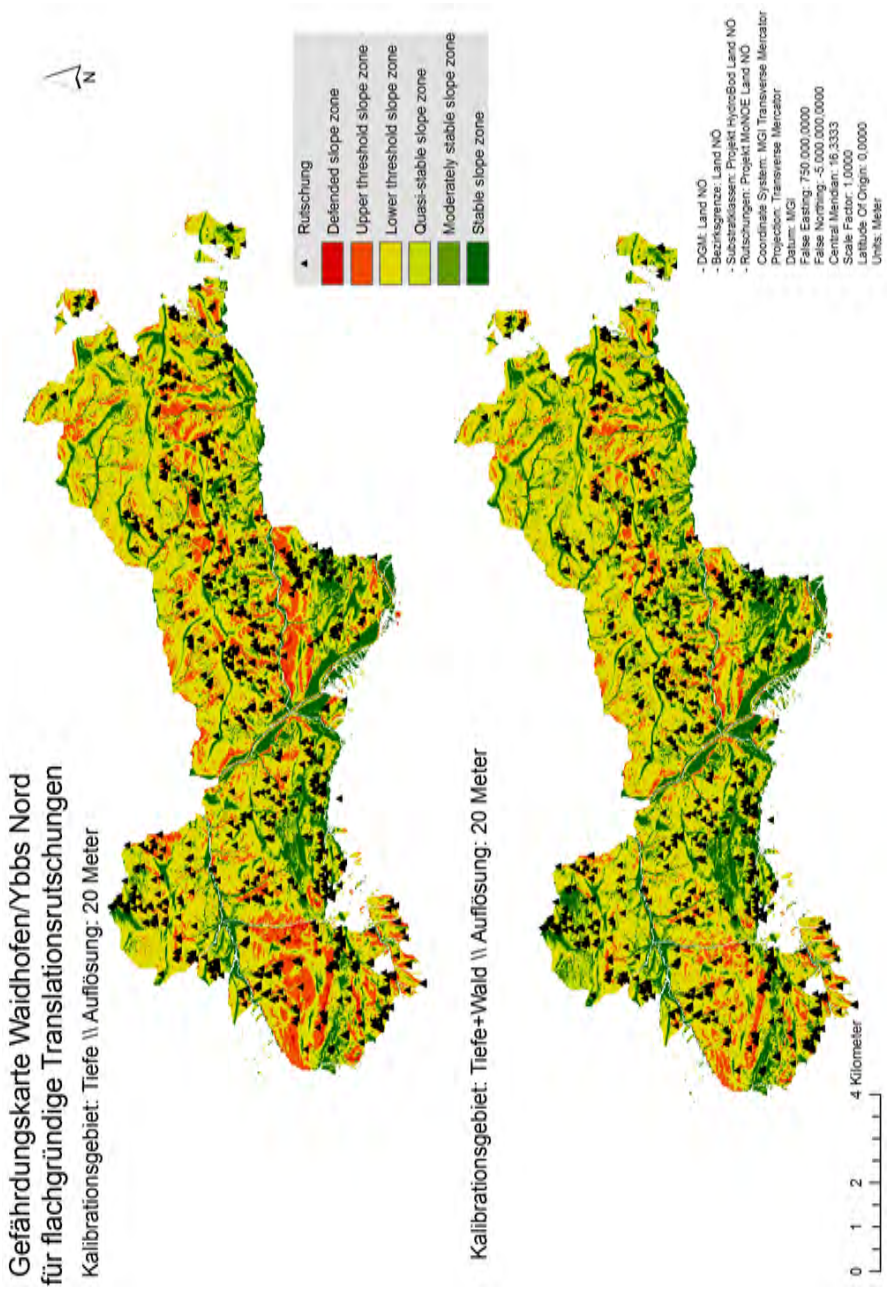


Abbildung D.3: Gefahrenhinweiskarte für das nördliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Tiefe (oben) und Tiefe+Wald (unten) in der Auflösung 20 Meter.

D.2 Gefahrenhinweiskarten für Waidhofen/Ybbs Süd

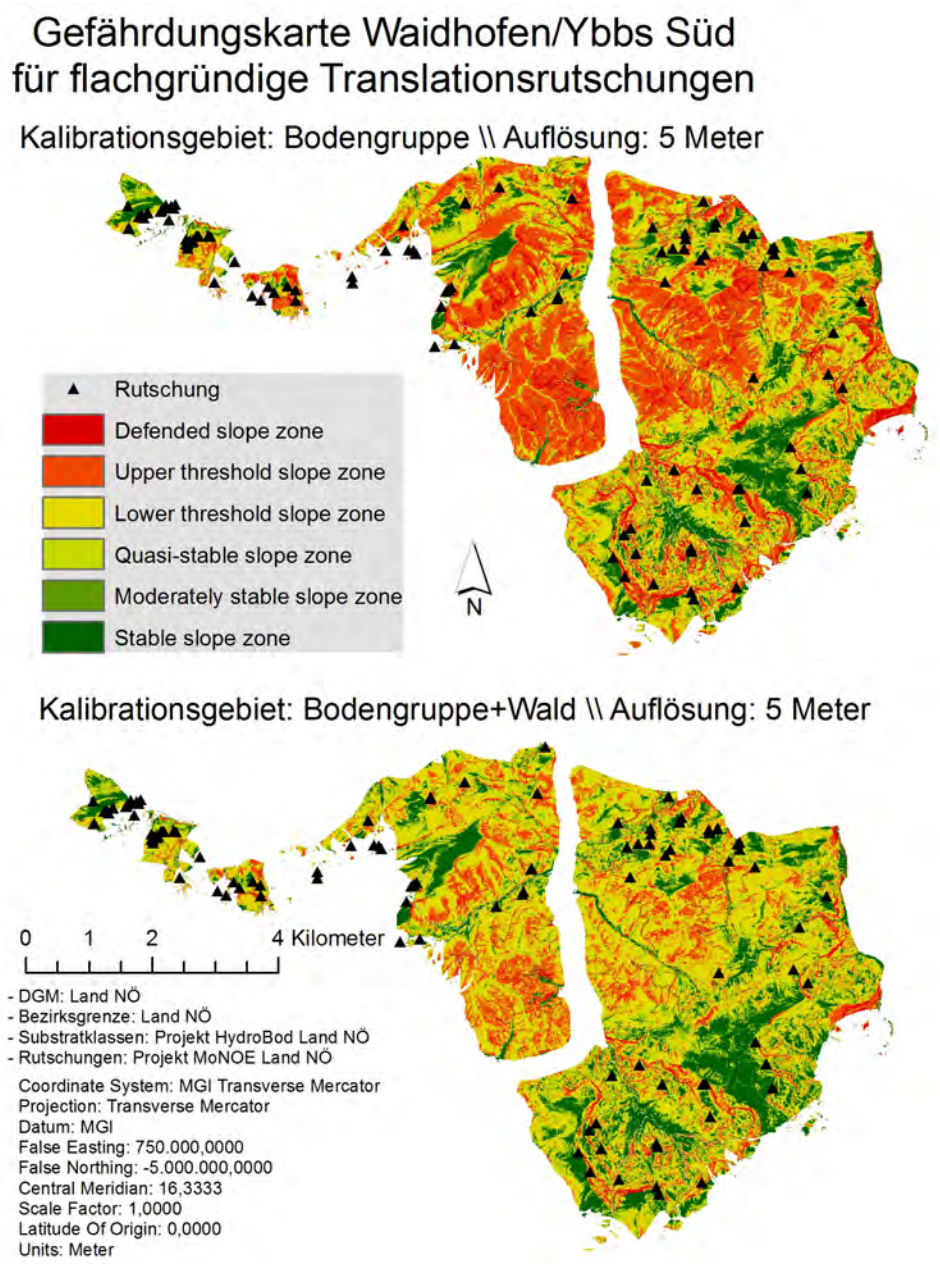


Abbildung D.4: Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 5 Meter.

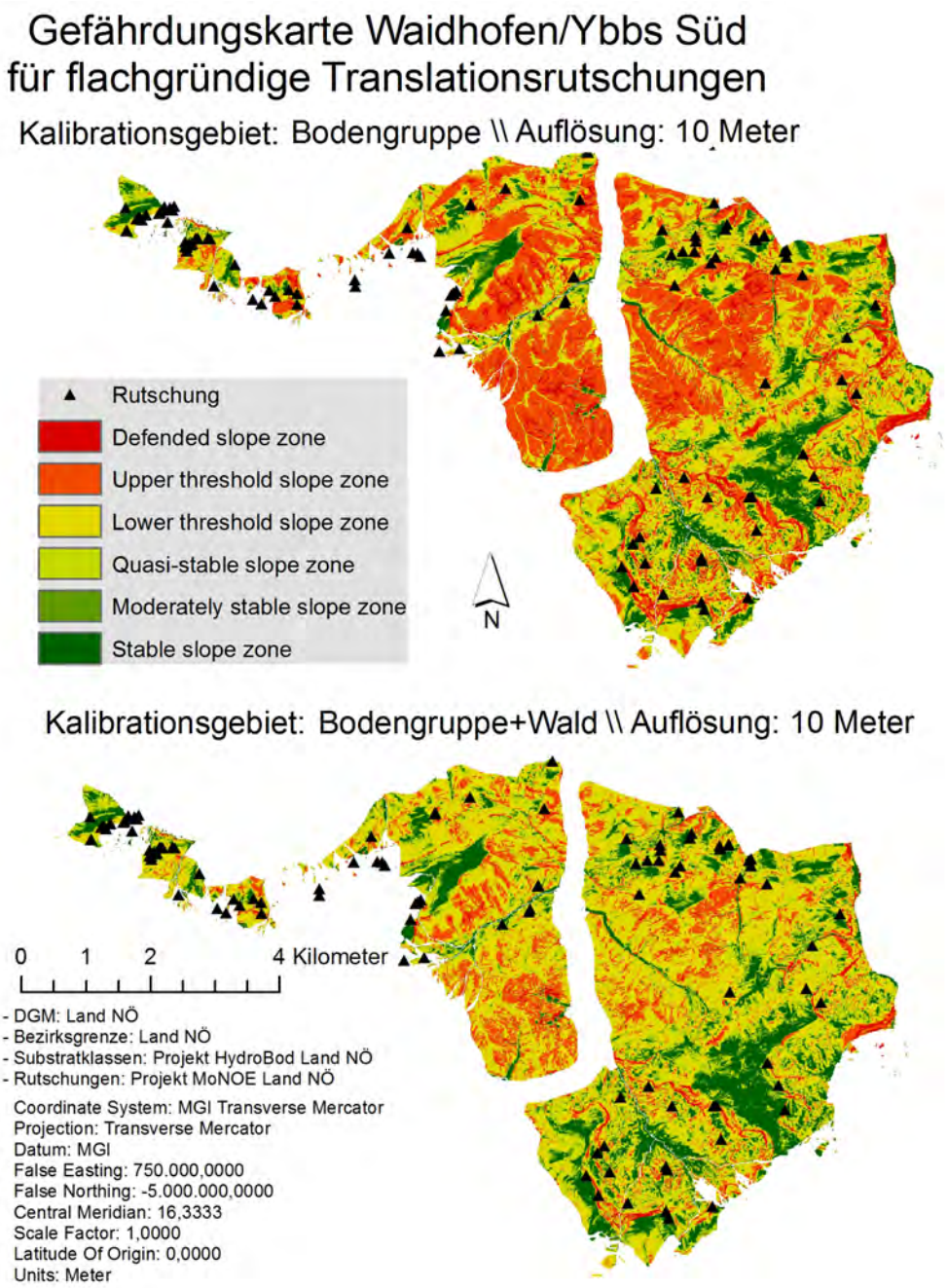


Abbildung D.5: Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Bodengruppe (oben) und Bodengruppe+Wald (unten) in der Auflösung 10 Meter.

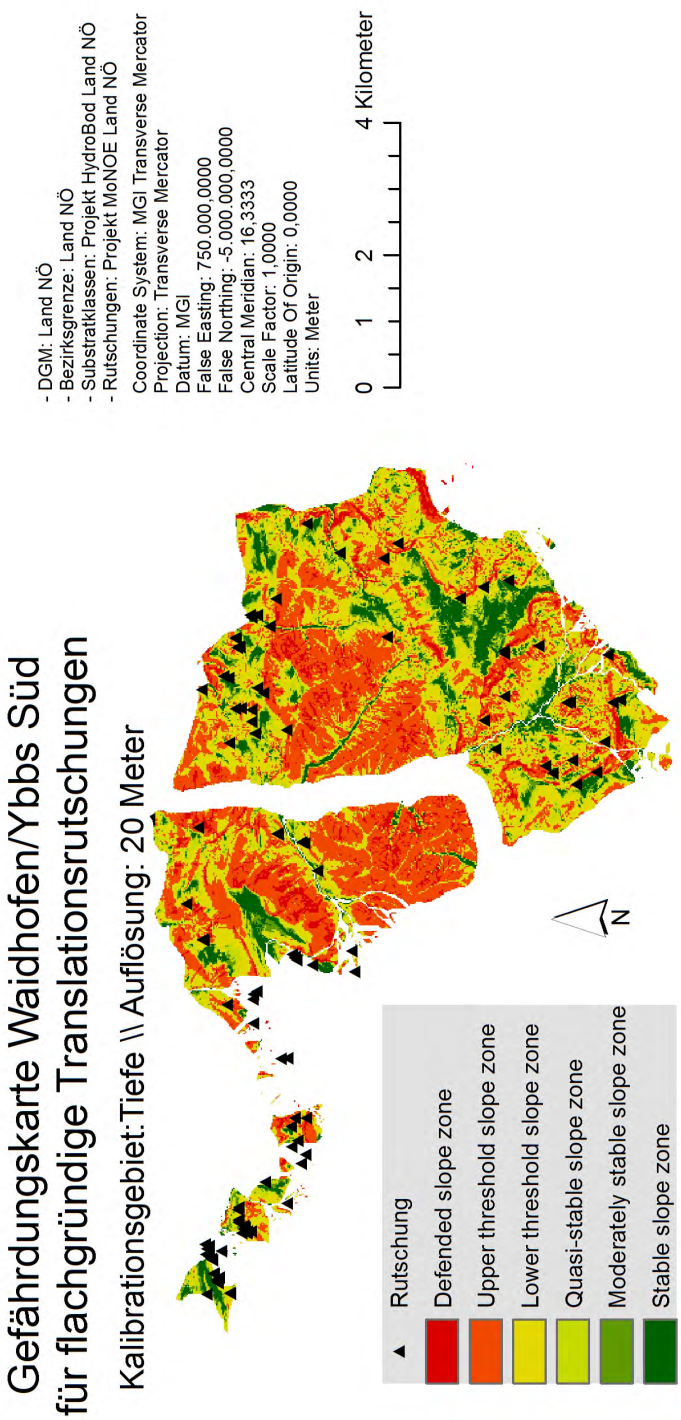


Abbildung D.6: Gefahrenhinweiskarte für das südliche Untersuchungsgebiet mit dem Kalibrationsgebiet Tiefe (oben) in der Auflösung 20 Meter.

Anhang E

E.1 Sensitivitätsanalyse Eingangsdaten – WY Nord

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung T/R							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1 [UM]	300	600	0	15	22,5	33	450	900	420	840	390	780	360	720	330	660
2 [SW]	300	600	0	0	30	41	450	900	420	840	390	780	360	720	330	660
3 [UL]	300	600	0	10	27,5	35	450	900	420	840	390	780	360	720	330	660
							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	270	540	240	480	210	420	180	360	150	300
2	300	600	0	0	30	41	270	540	240	480	210	420	180	360	150	300
3	300	600	0	10	27,5	35	270	540	240	480	210	420	180	360	150	300
Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung T/R MAX							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	300	900	300	840	300	780	300	720	300	660
2	300	600	0	0	30	41	300	900	300	840	300	780	300	720	300	660
3	300	600	0	10	27,5	35	300	900	300	840	300	780	300	720	300	660
							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	300	540	300	480	300	420	300	360	300	300
2	300	600	0	0	30	41	300	540	300	480	300	420	300	360	300	300
3	300	600	0	10	27,5	35	300	540	300	480	300	420	300	360	300	300
Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung T/R MIN							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	450	600	420	600	390	600	360	600	330	600
2	300	600	0	0	30	41	450	600	420	600	390	600	360	600	330	600
3	300	600	0	10	27,5	35	450	600	420	600	390	600	360	600	330	600
							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	270	600	240	600	210	600	180	600	150	600
2	300	600	0	0	30	41	270	600	240	600	210	600	180	600	150	600
3	300	600	0	10	27,5	35	270	600	240	600	210	600	180	600	150	600

Abbildung E.1: Eingabewerte für den Parameter T/R für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord)

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung C MAX

							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1 [UM]	300	600	0	15	22,5	33	0	22,5	0	21	0	19,5	0	18	0	16,5
2 [SW]	300	600	0	0	30	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 [UL]	300	600	0	10	27,5	35	0	15	0	14	0	13	0	12	0	11

			90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1	300	600	0	15	0	13,5	0	12	0	10,5	0	7,5
2	300	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	300	600	0	10	0	9	0	8	0	7	0	5

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung C MIN

							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1	300	600	0	15	22,5	33	13,5	15	12	15	10,5	15	9	15	7,5	15
2	300	600	0	0	30	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	300	600	0	10	27,5	35	9	10	8	10	7	10	6	10	5	10

			40%		30%		20%		10%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1	300	600	6	15	4,5	15	3	15	1,5	15
2	300	600	0	0	0	0	0	0	0	0
3	300	600	4	10	3	10	2	10	1	10

Abbildung E.2: Eingabewerte für den Parameter C für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord)

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung PHI

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1 [UM]	300	600	0	15	22,5	33
2 [SW]	300	600	0	0	30	41
3 [UL]	300	600	0	10	27,5	35

	150%		140%		130%		120%		110%	
	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
	33,75	49,5	31,5	46,2	29,25	42,9	27	39,6	24,75	36,3
	45	61,5	42	57,4	39	53,3	36	49,2	33	45,1
	41,25	52,5	38,5	49	35,75	45,5	33	42	30,25	38,5

	90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	20,25	29,7	18	26,4	15,75	23,1	13,5	19,8	11,25	16,5
2	27	36,9	24	32,8	21	28,7	18	24,6	15	20,5
3	24,75	31,5	22	28	19,25	24,5	16,5	21	13,75	17,5

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung PHI MIN

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	300	600	0	15	22,5	33
2	300	600	0	0	30	41
3	300	600	0	10	27,5	35

	150%		140%		130%		120%		110%	
	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
	33,75	33,75	31,5	33	29,25	33	27	33	24,75	33
	45	45	42	42	39	41	36	41	33	41
	41,25	41,25	38,5	38,5	35	35	33	35	30,25	35

	90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	20,25	33	18	33	15,75	33	13,5	33	11,25	33
2	27	41	24	41	21	41	18	41	15	41
3	24,75	35	22	35	19,25	35	16,5	35	13,75	35

Basiswerte für "Bodengruppen 10 m Waidhofen/Ybbs NORD": Änderung PHI MAX

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	300	600	0	15	22,5	33
2	300	600	0	0	30	41
3	300	600	0	10	27,5	35

	150%		140%		130%		120%		110%	
	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
	22,5	49,5	22,5	46,2	22,5	42,9	22,5	39,6	22,5	36,3
	30	61,5	30	57,4	30	53,3	30	49,2	30	45,1
	27,5	52,5	27,5	49	27,5	45,5	27,5	42	27,5	38,5

	90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	22,5	29,7	22,5	26,4	22,5	23,1	19,8	19,8	16,5	16,5
2	30	36,9	30	32,8	28,7	28,7	24,6	24,6	20,5	20,5
3	27,5	31,5	27,5	28	24,5	24,5	21	21	17,5	17,5

Abbildung E.3: Eingabewerte für den Parameter ϕ für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Nord)

E.2 Sensitivitätsanalyse Eingangsdaten – WY Süd

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung T/R

							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1 [UM]	1500	2000	0	15	22,5	33	2250	3000	2100	2800	1950	2600	1800	2400	1650	2200

							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33	1350	1800	1200	1600	1050	1400	900	1200	750	1000

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung T/R MAX

							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33	1500	3000	1500	2800	1500	2600	1500	2400	1500	2200

							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33	1500	1800	1500	1600	1400	1400	1200	1200	1000	1000

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung T/R MIN

							150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33	2250	2250	2100	2100	1950	2000	1800	2000	1650	2000

							90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX	T/R MIN	T/R MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33	1350	2000	1200	2000	1050	2000	900	2000	750	2000

Abbildung E.4: Eingabewerte für den Parameter T/R für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd)

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": ÄnderungC MAX

								150%		140%		130%		120%		110%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX		C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1 [UM]	1500	2000	0	15	22,5	33		0	22,5	0	21	0	19,5	0	18	0	16,5
								90%		**80%**		**70%**		**60%**		**50%**	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX		C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33		0	13,5	0	12	0	10,5	0	9	0	7,5

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung C MIN

								90%		80%		70%		60%		50%	
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX		C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33		13,5	15	12	15	10,5	15	9	15	7,5	15
								40%		**30%**		**20%**		**10%**			
Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX		C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX	C MIN	C MAX		
1	1500	2000	0	15	22,5	33		6	15	4,5	15	3	15	1,5	15		

Abbildung E.5: Eingabewerte für den Parameter C für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd)

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung PHI

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1 [UM]	1500	2000	0	15	22,5	33

150%		140%		130%		120%		110%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
33,75	49,5	31,5	46,2	29,25	42,9	27	39,6	24,75	36,3

90%		80%		70%		60%		50%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
20,25	29,7	18	26,4	15,75	23,1	13,5	19,8	11,25	16,5

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung PHI MAX

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33

150%		140%		130%		120%		110%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
22,5	49,5	22,5	46,2	22,5	42,9	22,5	39,6	22,5	36,3

90%		80%		70%		60%		50%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
22,5	29,7	22,5	26,4	22,5	23,1	19,8	19,8	16,5	16,5

Basiswerte für "Bodengruppen 5 m Waidhofen/Ybbs SÜD": Änderung PHI MIN

Kal.Geb.	T/R MIN	T/R MAX	C MIN	C MAX	PHI MIN	PHI MAX
1	1500	2000	0	15	22,5	33

150%		140%		130%		120%		110%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
33,75	33,75	31,5	33	29,25	33	27	33	24,75	33

90%		80%		70%		60%		50%	
PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX	PHI MIN	PHI MAX
20,25	33	18	33	15,75	33	13,5	33	11,25	33

Abbildung E.6: Eingabewerte für den Parameter ϕ für die Sensitivitätsanalyse in Waidhofen/Ybbs (Süd)

CURRICULUM VITAE

Ekrem Canli

Personal details

Name:	Ekrem Canli
Date of birth/place	7. May 1985 / Horn
Nationality:	Austrian

Education

2010 – 2013	Master program Geography, **University of Vienna, Austria** with emphasis on **Geomorphology & Risk research** Master thesis: *"Physikalisch basierte Gefährdungsmodellierung flachgründiger Translationsrutschungen in einem geologisch heterogenen Gebiet mittels SINMAP – dargestellt am Bezirk Waidhofen/Ybbs (Niederösterreich)"*
2007 – 2010	Bachelor program Geography, University of Vienna, Austria
1999 – 2006	college of economics (Handelsakademie), Krems an der Donau, Austria with emphasis on Information Technology
1996 – 1999	secondary school (Bundesrealgymnasium), Krems an der Donau, Austria
1993 – 1996	primary school (Volksschule), Krumau am Kamp, Austria

Practical & academic experience

Nov. 2012	project work within the project *ChangingRISKS - Changing pattern of landslide risks as response to global changes in mountain areas*
2009 - 2012	teaching assistant for Physical Geography, Hydrogeography, field work, dating methods (Dept. of Geography)
March 2012	Workshop leader at the EGEA North and Baltic Regional Congress 2012, Sigulda (Latvia). Topic of the workshop: Environmental Justice – Geospatial Discrimination?
Nov. 2011	project work within the project MoNOE - Methodenentwicklung für die Gefährdungsmodellierung von Massenbewegungen in Niederösterreich (‚Method development for landslide susceptibility modelling in LowerAustria')
Jun./Jul. 2011	IPY Polar Field School, University Centre in Svalbard, Norway
Jun. 2009 – Apr. 2010	(co-)organizer of the EGEA Western Regional Congress, Steinach am Brenner (Tyrol): Living in the Alps – Challenges and solutions for a vulnerable world.
Nov. 2009 – May 2013	Freytag & Berndt – cartographic company: editing and producing maps
Sep. 2009	student staff at the ‚Deutscher Geographentag 09' in Vienna
Aug. 2008 – Nov. 2009	federal agency of Statistics Austria (‚Bundesanstalt Statistik Österreich') - Dept. of Population: sampling/elicitation of demographic information

Additional Skills

Languages	German	Mother Tongue
	English	Fluent
	French	Advanced
Software	standard office applications (advanced skills), ESRI ArcGIS (advanced skills), ILWIS (advanced skills), SINMAP (advanced skills), Citavi (advanced skills), Bentley Microstation (good skills), ERDAS Imagine (good skills), CONEFALL (good skills), Adobe Photoshop (good skills), SPSS (good skills)	
Programming/ scripting languages	R (good skills), LaTeX (good skills), Python (basic skills)	