



# DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Räumliche Analyse von gravitativen Massenbewegungen  
mittels multivariater Statistik

—

Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte  
am Beispiel der Region Gasen und Haslau  
(Oststeiermark)“

Verfasserin

Helene Petschko

angestrebter akademischer Grad

Magistra (Mag. rer. nat.)

Wien, im Oktober 2008

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade



## **Erklärung**

Ich versichere

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

Wien, im Oktober 2008

---

Helene Petschko



## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen sehr herzlich bedanken, die zum Zustandekommen und Gelingen dieser Arbeit in unterschiedlichster Form beigetragen haben.

Herr Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade, Ihnen möchte ich besonders dafür danken, dass Sie mir die Arbeit an diesem Thema ermöglicht und meine Begeisterung für die Naturgefahrenanalyse weiter gestärkt haben. Aus Ihrer konstruktiven Kritik und Ihren Anmerkungen zu meiner Arbeit hoffe ich viel für meinen weiteren Werdegang mitnehmen zu können.

Herrn Dr. DI Arben Kociu und Herrn Dr. Nils Tilch möchte ich ein herzliches Dankeschön aussprechen. Diese Diplomarbeit war erst durch die Kooperation mit der Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt möglich, denn dadurch erhielt ich Zugang zu den wichtigsten Eingangsdaten für meine Analyse. Danke für Ihr Vertrauen und Ihre Bereitschaft zu dieser Kooperation.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Rainer Bell für die Hilfe und Unterstützung in den verschiedenen Phasen beim Schreiben meiner Diplomarbeit. Danke für die Geduld, die Zeit und die zahlreichen Tipps.

Bei meinen Büronachbarn Katrin und Benni, möchte ich mich für zahlreiche gute Tipps, Hinweise und Gespräche herzlich bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie für die Unterstützung in allen Lebenslagen bedanken!

In dieser Arbeit verwendete Abkürzungen:

BEV = Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

BFW = Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

DGM = Digitales Geländehöhenmodell

DKM = Digitale Katastralmappe

eBOD = digitale Bodenkarte des BFW aus der landwirtschaftlichen Bodenkartierung

GBA = Geologische Bundesanstalt

GIS = Geographisches Informationssystem

LUIS = Landesumweltinformationssystem der Steiermark

SPM = Spatial Prediction Modeling System

WLW = Wildbach- und Lawinenverbauung

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziele – Problemstellung .....	2
1.2 Arbeitshypothesen.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2. Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1 Gravitative Massenbewegungen .....	4
2.1.1 Klassifikation gravitativer Massenbewegungen.....	4
2.1.2 Mechanismen und Einflussfaktoren.....	6
2.2 Naturgefahrenanalyse.....	9
2.2.1 Definitionen.....	9
2.2.1 Naturgefahrenanalyse und Risikomanagement.....	10
2.2.2 Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten.....	12
2.2.3 Möglichkeiten der Validierung.....	15
<b>3. Daten.....</b>	<b>17</b>
3.1 Geologie.....	17
3.2 Boden.....	17
3.3 Digitale Katastralmappe.....	19
3.4 Gravitative Massenbewegungen.....	19
3.5 Wegenetz.....	20
3.6 Digitales Geländehöhenmodell.....	21
<b>4. Methode.....</b>	<b>22</b>
4.1 Mathematische Grundlagen - “favourability function”.....	22
4.1.1 Das Likelihood Quotienten Modell .....	24
4.2 Datenaufbereitung mit ArcInfo für die Analyse in SPM .....	29
4.2.1 Aufbereitung des Datensatzes Untersuchungsgebiet.....	29
4.2.2 Aufbereitung der kategorischen Datensätze.....	30
4.2.3 Aufbereitung der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen.....	31
4.2.4 Aufbereitung der numerischen Datensätze.....	32
4.3 Analyse mit dem Spatial Prediction Modeling System (SPM).....	33
4.3.1 Datenaufbereitung in SPM.....	34

4.3.2 Empirische Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient.....	35
4.3.3 Berechnung der Gefahrenhinweiskarten.....	37
4.3.4 Zufällige Kreuzvalidierung .....	37
4.4 Entscheidungskriterien für die Bestimmung der besten Parameterkombination und Gefahrenhinweiskarte.....	39
4.4.1 Erfolgsrate.....	39
4.4.2 Vorhersagerate.....	40
4.4.3 Geomorphologische Güte .....	41
<b>5. Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>42</b>
5.1 Allgemeine Fakten über Gasen und Haslau.....	42
5.2 Klima .....	44
5.3 Geologie.....	45
5.4 Landnutzung und Boden.....	46
5.5 Geomorphologie und gravitative Massenbewegungen.....	48
5.6 Ereignisse im August 2005.....	49
5.6.1 Mögliche auslösende Faktoren.....	49
5.6.1.1 Niederschlag.....	49
5.6.1.2 Anthropogener Einfluss.....	53
5.6.2 Folgen – Schäden.....	53
5.6.3 Bisherige Arbeiten im Gebiet.....	54
<b>6. Ergebnisse.....</b>	<b>56</b>
6.1 Ergebnisse aus der Datenaufbereitung in ArcInfo und SPM.....	56
6.1.1 Kategorische Daten.....	56
6.1.2 Numerische Datensätze .....	60
6.2 Ergebnisse aus der Analyse mit dem Spatial Prediction Modeling System.....	62
6.2.1 Empirisches Verteilungsdiagramm und Likelihood Quotient.....	64
6.2.1.1 Rasterweite 10m x 10m.....	64
6.2.1.2 Rasterweite 50m x 50m.....	69
6.2.1.3 Diskussion.....	74
6.2.2 Erfolgsrate.....	75
6.2.2.1 Rasterweite 10m x 10m.....	75
6.2.2.2 Rasterweite 50m x 50m.....	78
6.2.2.3 Diskussion:.....	79
6.2.3 Vorhersagerate.....	80
6.2.3.1 Rasterweite 10m x 10m.....	80
6.2.3.2 Rasterweite 50m x 50m.....	83
6.2.3.3 Diskussion.....	85

6.2.4 Gefahrenhinweiskarten.....	86
6.2.4.1 Rasterweite 10m x 10m.....	86
6.2.4.2 Rasterweite 50m x 50m.....	90
6.2.4.3 Diskussion.....	94
<b>7. Unsicherheiten.....</b>	<b>96</b>
7.1 Datengrundlage.....	96
7.2 Datenverarbeitung mit ArcInfo, SPM .....	98
7.3 Gefahrenhinweiskarte.....	100
<b>8. Diskussion.....</b>	<b>102</b>
<b>9. Perspektiven.....</b>	<b>109</b>
<b>10. Zusammenfassung.....</b>	<b>112</b>
<b>11. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>114</b>
<b>12. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>119</b>
<b>13. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>123</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>1</b>



# **1. Einleitung**

Weltweit führen Naturgefahren immer wieder zu großen Schäden an vorhandener Infrastruktur und persönlichem Eigentum und Menschen werden dadurch gefährdet. Doch oft sind nicht nur gravitative Massenbewegungen, sondern auch ihre möglichen Folgewirkungen von großer Bedeutung. Bis September dieses Jahres haben sich weltweit 412 schadenbringende gravitative Massenbewegungen ereignet, die insgesamt 2.830 Todesopfer forderten (Petley 2008). In dieser Statistik wurden jedoch die gravitativen Massenbewegungen und deren Todesopfer nach dem Erdbeben in der Provinz Sechuan (China) im Mai 2008 nicht berücksichtigt. Aufgrund des hohen Schadensausmaßes der Auswirkungen der dort aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen gibt es zu den Todesopfern noch keine genauen Angaben. Insgesamt wurden mehr als 69.000 Todesfälle in dieser Region infolge des Erdbebens gezählt (CRI 2008).

In Österreich sind immer wieder gravitative Massenbewegungen als Naturgefahren ein bedeutendes Thema. Ereignisse wie jene vom August 2005 in Gasen und Haslau, oder die tiefgründige gravitative Massenbewegung im Gschlieffgraben in Gmunden am Traunsee, die Ende des Jahres 2007 reaktiviert wurde, wurden sehr ausführlich in den Medien behandelt. Im Gschlieffgraben mussten aufgrund von Bewegungsraten bis zu 5m pro Tag, 55 Häuser am Ufer des Traunsees evakuiert werden und es wurden sofort kostenintensive Maßnahmen zur Sicherung der Gschlieffgrabenrutschung in Angriff genommen (Gasperl 2008).

Aufgrund der Folgen und Auswirkungen gravitativer Massenbewegungen ist es im Sinne einer „Katastrophenvorsorge“ wichtig, geeignete Wege zur Identifikation von Gefahren und Risiken zu finden und zu evaluieren. Damit wird ermöglicht die potentielle Gefahr oder das bestehende Risiko für ein Gebiet oder ein Objekt auf lokaler bis regionaler Ebene abzuschätzen und einzugrenzen. Es liegen bereits verschiedene qualitative oder quantitative Methoden vor, um die Gefahr, die für die Bevölkerung oder Gemeinde, die Region oder den Staat besteht zu bestimmen.

In dieser Arbeit soll eine quantitative Methode zur Bestimmung einer Gefahrenhinweiskarte für mögliche zukünftige Anrissgebiete gravitativer Massenbewegungen in der Region Gasen und Haslau in der Oststeiermark getestet werden. Diese Region wurde aufgrund der bei der Geologischen Bundesanstalt vorhandenen Daten zu zirka 500 gravitativen Massenbewegungen gewählt. Diese Daten wurden freundlicherweise im Zuge der Kooperation der Arbeitsgruppe für Geomorphologische Systeme und Risikoforschung des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien mit der Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt für die Analysen zur Verfügung gestellt.

## 1.1 Ziele – Problemstellung

Im Zuge der Diplomarbeit soll eine Gefahrenhinweiskarte hinsichtlich möglicher Anrissgebiete von zukünftigen gravitativen Massenbewegungen mittels multivariater Statistik, genauer dem Likelihood Quotienten Modell von Chung und Fabbri (1993, 1999, 2003, 2005, 2008), erstellt werden. Die Ergebnisse stellen Gefahrenhinweiskarten hinsichtlich möglicher Anrisse von gravitativen Massenbewegungen an Hängen dar. Die Gefahrenhinweiskarten werden für unterschiedliche räumliche Auflösungen erstellt, um den Effekt von unterschiedlich großen Rasterweiten (10m x 10m und 50m x 50m) auf die Eingangsdatensätze und in weiterer Folge auf die resultierenden Gefahrenhinweiskarten aufzuzeigen.

Des Weiteren soll eine Validierung der Ergebnisse durchgeführt werden. Dieser abschließende Schritt ist für die weitere Verwendung der Gefahrenhinweiskarten sehr wichtig, denn sie liefert ein Maß für die Aussagekraft und Interpretationsmöglichkeit der Ergebniskarten.

## 1.2 Arbeitshypothesen

Im Folgenden werden die zentralen Thesen vorgestellt, welche mit der Analyse und den Ergebnissen dieser Arbeit überprüft werden.

1. Mit dem statistischen Modell von Chung und Fabbri (1993, 1999, 2003, 2005, 2008), der Software *Spatial Prediction Modeling System* (SPM) und den von der Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt (GBA) zur Verfügung gestellten Eingangsdaten zu Geologie, Landnutzung, Boden und DGM, kann eine Gefahrenhinweiskarte für gravitative Massenbewegungen, in der Region Gasen/Haslau erstellt werden.

2. Die vorhandenen Daten erfüllen die Anforderungen an die Datenqualität, bieten ausreichend Informationen und können für die Analyse verwendet werden. Nicht alle Datensätze beeinflussen das Ergebnis gleichermaßen.

- Können aus den vorhandenen Daten genügend Parameter für die Analyse abgeleitet werden? Reicht die Datenlage aus, um repräsentative Gefahrenhinweiskarten erzeugen zu können?
- Wie erfolgte die Datenerhebung im Gelände und die Datenverarbeitung mittels ArcInfo? In welchem Maßstab stehen die Daten zur Verfügung? Können Massenbewegungen die nicht unmittelbar aufgrund von erhöhtem Porenwasserdruck (z.B. durch Ufererosion) aufgetreten sind, ausreichend gut aus den Datenbeschreibungen der GBA ausgeschlossen werden?
- Welche Eingangsparameter beeinflussen die Ergebnisse maßgeblich? Welche Datensätze oder Kombinationen von Datensätzen liefern auf Basis der verschiedenen Gütemaße die beste Gefahrenhinweiskarte?

3. Die Wahl der räumlichen Auflösung der Eingangsdatensätze hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis.

- Welchen Einfluss hat die Wahl der räumlichen Auflösung (Auflösung 10m x 10m und 50m x 50m) der Daten auf die Eingangsdaten (speziell auch auf die Daten zu den gravitativen Massenbewegungen) und infolge dessen auf die Ergebnisse? Welche Schlussfolgerungen müssen aufgrund der Lagegenauigkeit und der Größe der gravitativen Massenbewegungen für die Auswahl der „besten“ Gefahrenhinweiskarte gezogen werden?

4. Die zu erstellende Gefahrenhinweiskarte kann bereits aufgetretene Massenbewegungen ausreichend gut abschätzen. Für das Untersuchungsgebiet kann eine aussagekräftige Validierung der Ergebnisse durchgeführt werden.

- Scheinen die Ergebnisse, das Kartenbild aus geomorphologischer Sicht plausibel?
- Stimmt die Verteilung der tatsächlich ereigneten gravitativen Massenbewegungen mit den als gefährdet ausgewiesenen Flächen überein? Wie gut ist die Erfolgsrate des Modells, bei Verwendung aller Massenbewegungen und beschreibt sie einen signifikanten Zusammenhang?
- Können mit einer Auswahl von gravitativen Massenbewegungen ähnliche Gefahrenhinweiskarten erzeugt werden, wie bei der Verwendung von allen gravitativen Massenbewegungen? Ist die Vorhersagerate signifikant?

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Der Einleitung folgend beschäftigt sich das nächste Kapitel, mit den theoretischen Grundlagen gravitativer Massenbewegungen, der Naturgefahrenanalyse und deren Validierungsmöglichkeiten. In Kapitel 3 werden die kategorischen und numerischen Datengrundlagen, die für die Analyse zur Verfügung standen näher erläutert. Die Methode der statistischen Modellierung nach Chung und Fabbri (1993, 1999, 2003, 2005, 2008) wird in Kapitel 4 erläutert. Dabei wird zuerst auf die Grundlagen der *favourability function* und die mathematischen Grundlagen des Modells näher eingegangen. Dann werden die Schritte der Datenaufbereitung in ArcInfo und in der Software SPM (*Spatial Prediction Modeling System*) behandelt. Des weiteren werden in diesem Kapitel die Analyseschritte und Entscheidungskriterien für die Wahl der besten Gefahrenhinweiskarte erklärt. Im folgenden Kapitel 5 werden die wichtigsten Charakteristika des Untersuchungsgebietes und auch die Umstände und möglichen Auslöser für die Ereignisse im August 2005 abgehandelt. Kapitel 6 ist den Ergebnissen der umfangreichen Analysen gewidmet. Hier werden die einzelnen Teilergebnisse aus empirischer Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient, Erfolgsrate, Vorhersagerate und die Gefahrenhinweiskarte jeweils für die unterschiedlichen Rasterweiten (10m und 50m) erläutert und diskutiert. Die Unsicherheiten, die in dieser Analyse beinhaltet sind, werden in Kapitel 7 dargelegt.

Eine umfangreiche Diskussion der Ergebnisse findet sich in Kapitel 8. Kapitel 9 behandelt Perspektiven, die sich für diese Analysen und das Untersuchungsgebiet, auch mit den bereits vorhandenen Datengrundlagen bieten. Abschließend ist im zehnten Kapitel eine Zusammenfassung der gesamten Diplomarbeit wiedergegeben.

## **2. Theoretische Grundlagen**

In den theoretischen Grundlagen werden die wichtigsten Begriffsdefinitionen, Klassifikationen und Methoden bezüglich gravitativer Massenbewegungen und Naturgefahrenanalyse beschrieben. Des Weiteren werden die Möglichkeiten zur Validierung der Ergebnisse erläutert.

### **2.1 Gravitative Massenbewegungen**

Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis der Funktionsweise und der Einflussfaktoren auf die Auslösung und das Verhalten von gravitativen Massenbewegungen erläutert. Des Weiteren wird auf, die in dieser Arbeit verwendete internationale Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen eingegangen. Im Deutschen wird für den Begriff gravitative Massenbewegung oft das Synonym Hangrutschung verwendet (Glade 2005), auch wenn Prozesse gemeint sind, welche keine Rutschen oder Gleiten im eigentlichen Sinn umfassen. Im folgenden Text wird der Begriff gravitative Massenbewegung verwendet. Auch im englischen Sprachraum wurden mehrere Begriffe zur Bezeichnung von gravitativen Massenbewegungen verwendet, durchgesetzt haben sich vor allem die Bezeichnungen „*landslides*“ und „*mass movements*“ (Glade und Dikau 2001). Gravitative Massenbewegungen werden von Glade (2005) wie folgt definiert: „*Die gravitativen Massenbewegungen sind unter dem Einfluss der Schwerkraft hangabwärts gerichtete Fließ-, Kipp-, Gleit- oder kombinierte Prozesse, die Festmaterialien wie Boden, Schutt oder Fels aus einem Quellgebiet über eine bestimmte Strecke bis zur Ablagerung transportieren.*“ (Glade 2005, S.80).

#### **2.1.1 Klassifikation gravitativer Massenbewegungen**

Es bestehen zahlreiche Klassifikationsmöglichkeiten von gravitativen Massenbewegungen, darunter jene von Hutchinson (1977), Varnes (1978), Crozier (1989), Cruden und Varnes (1996) und Dikau et

al. (1996). Varnes (1978) hat unterschiedliche Klassifikationskriterien, die in früheren Klassifikationen verwendet wurden, zusammengefasst. Darunter finden sich Klassifikationen nach der Art der Bewegung, nach dem Ausgangsmaterial, nach der Qualität des Materials, nach geotechnischen Kriterien, nach morphometrischen Charakteristika, nach der Bewegungsrate und nach Alter, Aktivitätsgrad und Bewegungsgeschichte. Seit 1988 wurde durch die UNESCO-Arbeitsgruppe der Internationalen Geotechnischen Gesellschaften zur Inventarisierung von Hangrutschungen eine Standardisierung der Definition von Massenbewegungen und ihrer Eigenschaften angestrebt (WP/WLI International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory 1993). Cruden und Varnes (1996) und Dikau et al. (1996) haben Klassifikationen von gravitativen Massenbewegungen aufgrund von Prozess- und Materialtyp, auf Basis des Standards der UNESCO-Arbeitsgruppe erstellt (Dikau und Glade 2002). Dabei werden folgende Prozesstypen von gravitativen Massenbewegungen unterschieden: Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen und Komplex. Je nach Materialtyp, Fest- bis Lockergestein, können nun unterschiedliche Prozesse auftreten. In Tabelle 2.1 werden die dadurch klassifizierten Prozesse aufgelistet. In der Realität sind die Grenzen der unterschiedlichen Typen nicht klar zu ziehen, und somit ist oft ein fließender Übergang oder eine Mischform zwischen zwei Typen feststellbar.

Tab. 2.1: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach Prozesstyp und Materialtyp nach Cruden und Varnes (1996) und Dikau (1996)

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

Zusätzlich können die Prozesse des Gleitens auch nach ihrer Gründigkeit, der Tiefe der Rutschmasse

unterschieden werden. Dies erfolgt in den Kategorien flachgründig, 0m-2m tief, mittelgründig, 2m – 10m tief, und tiefgründig, mit einer Tiefe von mehr als 10m. Oft werden zur Beschreibung der Prozesse des Gleitens auch Begriffe wie Hangrutschung, oder Rutschung synonym verwendet.

Hangmuren, wie sie auch im Untersuchungsgebiet vorgekommen sind, sind dem Typ des Fließens zuzuordnen. Sie ereignen sich an steilen Hängen (Hangneigung größer als 25°-30°), zeichnen sich durch eine plötzliche Auslösung und hohe Transportgeschwindigkeiten (m/h bis m/s) aus, und stehen mit einem hohen Wassergehalt des Untergrundes in Verbindung (BRPA 2007). Beim Abgang einer Hangmure bildet sich aber keine Gleitfläche, wie im Vergleich zu translationsförmigen Rutschungen, aus (PLANALP 2006).

### 2.1.2 Mechanismen und Einflussfaktoren

Jeder Hang unterliegt Kräften, die eine Bewegung des Hanges zurückhalten, dem Scherwiderstand und Kräften, die eine Bewegung vorantreiben können, dem Scherstress. Das Verhältnis aus Scherwiderstand und Scherstress birgt eine Aussage über die Stabilität des Hanges. Der sogenannte *Factor of Safety* (FoS) bildet diesen Quotienten aus Scherwiderstand zu Scherstress und berechnet somit den Grad der Stabilität. Laut der Coulomb'schen Formel werden Scherwiderstand und Scherstress von der Kohäsion, dem inneren Reibungswinkel, dem Porenwasserdruck und dem Gewicht des Materials, außerdem von der Größe und dem Winkel der Scherfläche beeinflusst (Terzaghi und Peck 1967 in Crozier 1986). Des weiteren sind das Volumen, die Wichte und die Normalkraft des Hangmaterials für die Höhe des Scherwiderstands bzw. des Scherstress ausschlaggebend.

Die Ursachen für die Hanginstabilität und für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen sind vielfältig und können in vorbereitende Faktoren, auslösende Faktoren und bewegungskontrollierende Faktoren unterschieden werden. Glade und Crozier (2005) führen als weiteren Faktor die prädisponierenden Faktoren an. Des weiteren unterscheidet Crozier (1986) drei Stabilitätszustände: stabil, marginal stabil und aktiv instabil. Die destabilisierenden Faktoren verursachen den Wechsel im Stabilitätszustand immer in Abhängigkeit der Größe der Sicherheitsspanne (*Margin of Stability*) was in Abbildung 2.1 dargestellt wird.

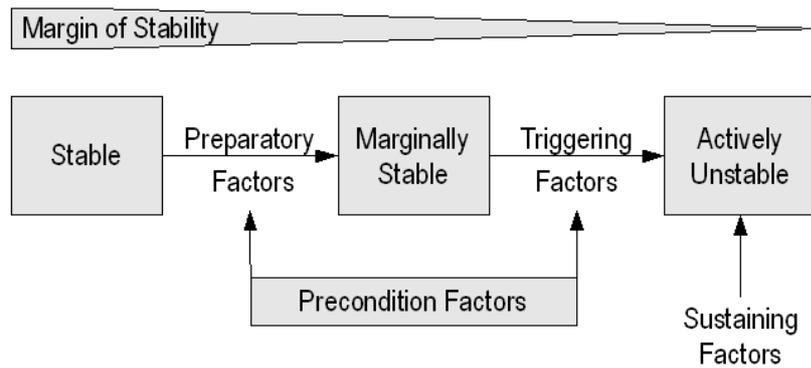


Abb. 2.1: Stabilitätszustände und destabilisierende Faktoren basierend auf Crozier (1989)

Im stabilen Zustand herrscht eine hohe Sicherheitsspanne, d.h. der Hang kann allen destabilisierenden Kräften entgegenhalten und bleibt stabil. Im marginal stabilen Zustand befinden sich Hänge, die momentan nicht in Bewegung sind, aber für Prozesse anfällig sind, wenn die destabilisierenden Kräfte eine bestimmte Schwelle überschreiten. Im aktiv instabilen Zustand ist die Sicherheitsspanne nahe Null und es herrscht ständige, oder unterbrochene Bewegung. Dadurch kann die Größe der Sicherheitsspanne die Sensitivität eines Hanges gegenüber destabilisierender Faktoren widerspiegeln und gemeinsam mit einer Abschätzung des möglichen Effekts der destabilisierenden Faktoren, die auf den Hang einwirken, ein Maß für die Gefährdung oder Instabilität des Hanges bilden (Glade und Crozier 2005). Faktoren, die den Stabilitätszustand eines Hanges verändern, können laut Crozier (1986) und Glade und Crozier (2005) grob in vier Gruppen eingeteilt werden: Vorbereitende Faktoren (*preparatory factors*), auslösende Faktoren (*triggering factors*), bewegungskontrollierende Faktoren (*sustaining factors*) und prädisponierende Faktoren (*predisposing bzw. precondition factors*). Die vorbereitenden Faktoren sind dynamische Faktoren, die den Hang auf Bewegung vorbereiten. Sie machen den Hang anfällig gegenüber Bewegung, aber lösen aktuell keine Bewegung aus. Auslösende Faktoren starten die Bewegung, dabei wird der Hang von einem marginal stabilen Zustand in einen aktiv instabilen Zustand versetzt. Bewegungskontrollierende Faktoren beeinflussen das Verhalten der gravitativen Massenbewegung, sie kontrollieren die Form, Rate und Dauer. Die prädisponierenden Faktoren sind statische Faktoren, deren Bedeutung weniger in der Überschreitung der Stabilitätsgrenze, sondern mehr in der Rolle als Auslöser für andere dynamische destabilisierende Faktoren liegt. Diese können dadurch effizienter wirken (Glade und Crozier 2005). Glade und Crozier (2005) bringen dazu das Beispiel von Hangmaterialien, die bei der Anwesenheit von Wasser ihre Festigkeit schneller verlieren als andere und so als prädisponierender Faktor für den Hang gelten. In Tabelle 2.2 sind für die ersten drei Gruppen, mögliche Faktoren aufgrund der vorhandenen Geologie, Boden, Klima, Vegetation, Hydrologie, Topographie und dem Faktor Mensch angeführt.

Tab. 2.2: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren bei gravitativen Massenbewegungen nach Dikau und Glade (2002)

Ursache	vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	bewegungskontrollierende Faktoren
Geologie	Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. streichen/fallen, tektonische Störungen) Verwitterung Isostasie	Erdbeben Vulkanausbrüche	Gesteinstypen Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. streichen/fallen, tektonische Störungen)
Klima	Lang anhaltender Vorregen Schneeschnmelze Frost-Tau-Zyklen	Niederschlag <sup>1</sup> (Intensität, Menge) schnelle Schneeschnmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)
Boden	Verwitterung geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen subterrane Erosion (z.B. Tunnelerosdion)	nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
Vegetation	Natürliche Vegetationsänderung <sup>1</sup> (z.B. Waldbrand, Trockenheit)	nicht zutreffend	Vegetation
Hydrologie	Schnmelzender Permafrost	schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauhigkeit Weitertransport bewegter Massen
Topographie	Hangexposition <sup>1</sup> Hanghöhe <sup>1</sup>	nicht zutreffend	Hangneigung <sup>1</sup> Hangwölbung <sup>1</sup> Tiefenlinien <sup>1</sup>
anthropogen	Entwaldung Staudammbau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhangs Bewässerung Bergbau künstliche Bewegung (z.B. Sprengung) undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte <sup>1</sup> Hangunterschneidung <sup>1</sup> Auflast <sup>1</sup>	Künstliche Verbauungen Dämme Gerinnebegradigung Gerinneverkleinerung Gerinnevergrößerung

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

## 2.2 Naturgefahrenanalyse

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen und Definitionen zur Naturgefahrenanalyse geklärt werden. Um den Stellenwert dieser Arbeit im Risikomanagement zu verdeutlichen, wird dieses Folgenden kurz mit seinen Bestandteilen erläutert. Außerdem wird in diesem Kapitel ein Überblick über die wichtigsten Möglichkeiten und Methoden der Gefährdungsanalyse gegeben.

### 2.2.1 Definitionen

**Naturereignis:** Ein Naturereignis umfasst natürliche, reliefformende, geomorphologische Prozesse, die über unterschiedliche Zeitspannen auftreten können (z.B. kurzfristig in Form von Erdbeben oder Überschwemmungen, die einige Wochen andauern können) (Glade 2005, S. 79). Der Mensch - das Gesellschaftssystem - wird von diesen Prozessen aus dem Geosystem nicht betroffen.

**Gefährdung - Naturgefahr:** Eine Naturgefahr ist ein möglicher schadenbringender Prozess oder Situation, zum Beispiel ein Erdbeben über einer bestimmten Intensität oder eine gravitative Massenbewegung von ausreichender Größe, Tiefe oder Verlagerung, um einen Schaden oder Bruch zu erzeugen, oder, als Beispiel für eine Situation, das Vorkommen von schwachen Unterbaumaterial. (Gefahr I - Crozier und Glade 2005, S. 33)

**Gefahr:** Der Begriff Gefahr beschreibt die Auftretenswahrscheinlichkeit eines potentiell schadensbringenden [Natur-] Ereignisses in einer bestimmten Zeit und in einem definierten Raum (UNDRO 1991, Varnes 1984). Die Auftretenswahrscheinlichkeit variiert mit der Magnitude des Ereignisses (kleinere Ereignisse treten häufiger auf). (Gefahr II - Crozier und Glade 2005, S. 33)

**Gefährdung – Suszeptibilität:** „Landslide susceptibility is the likelihood of a landslide occurring in an area on the basis of local terrain conditions“ (Brabb 1984, in Guzzetti 2005, S.113). Die Gefährdung oder Suszeptibilität zeigt laut dem Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy (2004) den Grad mit welchem ein Gebiet von gravitativen Massenbewegungen betroffen sein kann an, z.B. gibt sie eine Schätzung darüber ab, wo gravitative Massenbewegungen wahrscheinlich auftreten können. Darin sind keine Aussagen zur zeitlichen Wahrscheinlichkeit (wann oder wie oft treten Ereignisse auf) und zur Magnitude des Ereignisses (wie groß ist die zukünftige gravitative Massenbewegung) enthalten. „In mathematical language, landslide susceptibility ist the probability of spatial occurrence of slope failures, given a set of geo-environmental conditions.“ (Guzzetti 2005, S. 113)

In dieser Arbeit wird hauptsächlich der Begriff der Gefährdung verwendet, doch in anderen Arbeiten kommt auch häufig der synonym verwendete Begriff der Suszeptibilität vor.

**Gefahrenhinweiskarte – Gefährdungskarte - Suszeptibilitätskarte:** Suszeptibilitätskarten oder auch Gefahrenhinweiskarten sind Karten der relativen räumlichen Wahrscheinlichkeit, die Flächen mit unterschiedlichen Levels der Gefährdung durch einen bestimmten Prozesstyp ausweisen (Brabb 1984 in Remondo et al. 2003). Mit der Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte wird die Frage „Wo können gravitative Massenbewegungen auftreten?“ beantwortet.

**Gefahrenkarte:** Die Gefahrenanalyse beinhaltet den Prozess der Identifikation der Auftretenswahrscheinlichkeit eines schadenbringenden Ereignisses (Crozier und Glade 2005, S. 33-34). Die Auftretenswahrscheinlichkeit beinhaltet dass eine Naturgefahr mit einer bestimmten Magnitude über eine bestimmte Dauer in einen bestimmten Gebiet auftritt - „*Prediction of landslide hazard involves determining „where“ landslides are expected, „when“ ohr how frequently they will occur, and the „magnitude“ of the landslides, i.e., how large or destructive the slope failures will be*“ (Guzzetti et al. 2005, S 115).

**Risiko:** Risiko ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit von nachteiligen Effekten auf Gesundheit, Eigentum und Gesellschaft, aufgrund der Gefährdung durch eine Gefahr eines bestimmten Typs und Magnitude, innerhalb einer bestimmten Zeit und Gebiet (Smith, 2004). Die Risikoanalyse ist der übergeordnete Prozess, im Zuge dessen Gefahren und Risiken identifiziert werden und eine Risikoabschätzung erfolgt. Mit der Risikoabschätzung wird die Schadens-Wahrscheinlichkeit und der Schadensgrad von Risikoelementen, durch die Verknüpfung von Gefahren- und Folgenanalyse ermittelt (Crozier und Glade 2005, S. 34).

**Risikoelemente:** Alle von der Naturgefahr bedrohten Attribute, z.B: soziale und physische Infrastruktur, Ressourcen, Grundstücke, produktive und nichtproduktive Aktivitäten, Umwelteigenschaften, Menschenleben und physisches und mentales Wohlbefinden.(Crozier und Glade 2005, S. 33)

**Vulnerabilität:** „Die Empfindlichkeit der Risikoelemente gegenüber der Massenbewegung, häufig ausgedrückt als auftretende Höhe des Schadens im potenziell durch Massenbewegungen beeinflussten Gebiet.“ (Dikau und Glade 2002, S. 41)

### 2.2.1 Naturgefahrenanalyse und Risikomanagement

Das Risikomanagement umfasst alle Methoden und Maßnahmen zur Durchführung von rationalen Taktiken und geeigneten Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos (Crozier und Glade 2005). Die Teilaspekte des Risikomanagements sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Sie umfassen die Risikoanalyse mit der Identifikation von Gefahr und Risiko und der Risikoabschätzung mittels einer Folgen- und Gefahrenanalyse und anschließender Risikoberechnung. Die Risikoanalyse bildet gemeinsam mit der Risikobewertung die Risikobeurteilung. Darauf aufbauend erfolgt der Umgang

mit dem Risiko, mit der Erstellung einer Strategie des Umgangs mit dem vorhandenen Risiko, darauf folgender Maßnahmenplanung, Umsetzungsplanung und Monitoring und Prüfung der Maßnahmen.

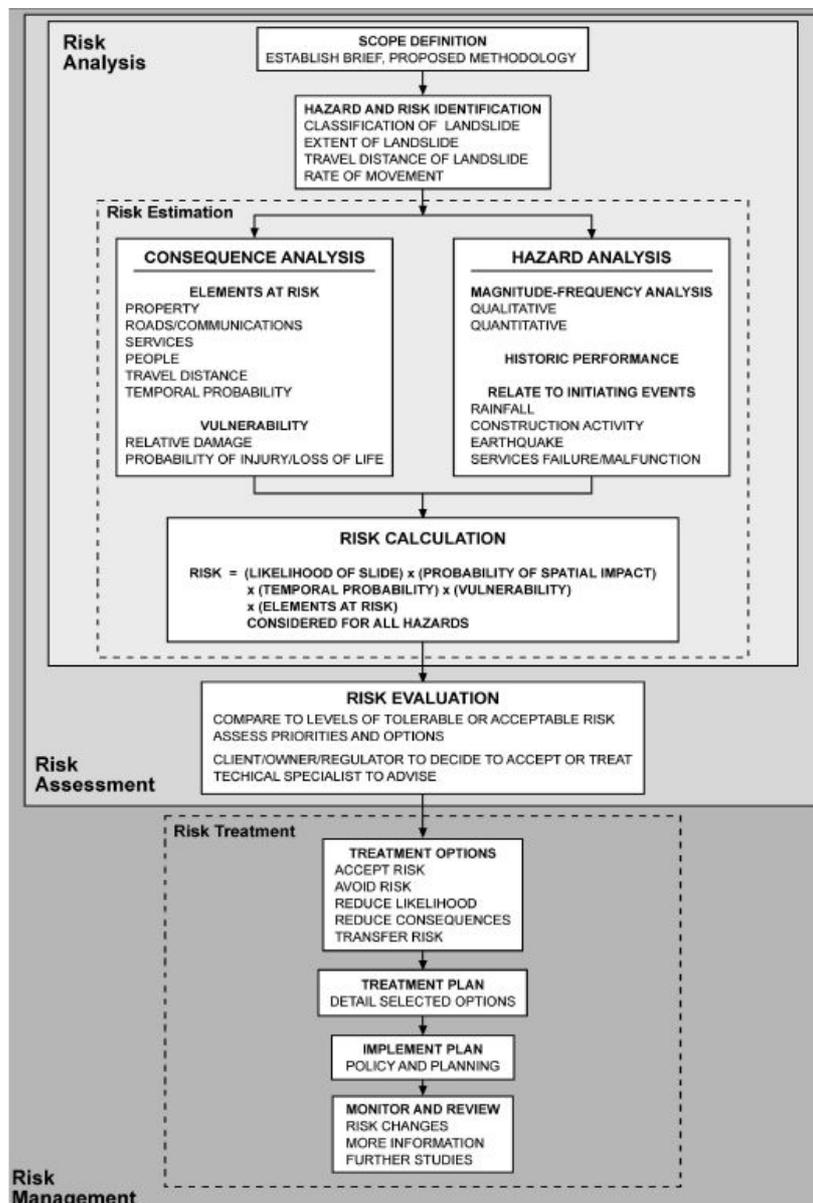


Abb. 2.2: Schritte des Risikomanagements (Crozier und Glade 2005 nach Australian Geomechanics Society 2000)

Die Quantifizierung des Risikos erfolgt im Schritt der Risikoberechnung über die Abschätzung der Gefahr und der Vulnerabilität der potentiell betroffenen Risikoelemente. Die Risikogleichung  $R = H \times E \times V$  beschrieben von Varnes (1984) berechnet das Risiko ( $R$  - Risk) als Produkt der Gefahr ( $H$  - Hazard), den Risikoelementen ( $E$  - Elements at Risk) und der Vulnerabilität ( $V$  - Vulnerability). Mit dieser einfachen Gleichung werden die wichtigsten Faktoren, die das Risiko beeinflussen aufgezeigt. Mit der Gefahr wird die Eintretenswahrscheinlichkeit eines schadenbringenden Ereignisses mit einer bestimmten Magnitude beschrieben. Die Anzahl der Risikoelemente und die Vulnerabilität, die das erwartete Schadensausmaß infolge einer gravitativen Massenbewegung mit einer bestimmten

Magnitude aufzeigt, ausgedrückt über den Quotienten aus Schadensumme und Wert des Objektes, komplettieren die Risikogleichung (Crozier und Glade 2005).

Die Naturgefahrenanalyse beinhaltet das Abschätzen der Gefahr und der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit gravitativer Massenbewegungen, inklusive ihres Wirkungsbereiches und der Auftretenswahrscheinlichkeit des Prozesses. Das „Wo?“ kann in einer Gefahrenhinweiskarte dargestellt werden, durch die Koppelung mit der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Magnitude des Ereignisses entstehen in weiterer Folge Gefahrenkarten. Die Erzeugung von Gefahrenhinweiskarten, was auch Ziel dieser Arbeit ist, stellt somit ein Teilschritt zur Gefahrenanalyse dar, welche immer in Verbindung mit Frequenz und Magnitude von Ereignissen steht.

Oft ist es aber auch sinnvoll eine Naturgefahrenanalyse durchzuführen, ohne dass eine Risikoanalyse nachfolgt. Dies ist gerade bei möglichen Entwicklungen von Siedlungsräumen oder Bauvorhaben wichtig, denn sonst könnte man den falschen Schluss ziehen, dass wenn kein Risiko besteht, auch keine Gefahr besteht. So könnte vernachlässigt werden, dass die Berechnung des Risikos an das Vorhandensein von Risikoelementen gekoppelt ist (Crozier und Glade 2005).

### **2.2.2 Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten**

Es bestehen bereits zahlreiche qualitative und quantitative Methoden zur direkten und indirekten Ermittlung von, durch Anrisse von gravitativen Massenbewegungen, gefährdeten Bereichen. Je nach Methode sind unterschiedliches Expertenwissen und auch unterschiedliche Datengrundlagen von Bedeutung. Grob lassen sich geomorphologische, auf der Analyse von Inventaren basierende, heuristische – Index basierte, deterministische und statistische Methoden unterscheiden. Eine Grundannahme dieser Methoden ist, dass die Bedingungen, die in der Vergangenheit zu gravitativen Massenbewegungen geführt haben auch aktuell wieder in einem potentiell instabilen Zustand resultieren (Van Westen 2000, Van Westen et al. 1997). Also gilt das Statement „*The past and the present are the keys to the future*“ (Varnes et al. 1984, Carrara et al. 1991, Hutchinson 1995). Daher ist bei der Abschätzung der Gefahr durch gravitative Massenbewegungen das Verstehen der Vergangenheit wichtig (Guzzetti et al. 1999). Guzzetti et al. (1999) fassen auch weitere wichtige Grundannahmen bei der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten und Gefahrenkarten zusammen. Die erste Annahme besteht darin, dass nach gravitativen Massenbewegungen morphologische Strukturen beobachtet, klassifiziert und kartiert werden können. Dadurch entstehen Inventare von gravitativen Massenbewegungen, die als wichtige Grundlage dienen. Zweitens wird die gravitative Massenbewegung von mechanischen Gesetzen kontrolliert, die empirisch, statistisch oder deterministisch erfasst werden können. Drittens kann das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen in Raum oder Zeit, von heuristischen Untersuchungen, aus der Analyse der Umweltfaktoren oder von physikalischen Modellen abgeleitet werden. In Tabelle 2.3 sind die Methodengruppen nach ihren Eigenschaften direkt oder indirekt, qualitativ oder quantitativ

eingeteilt. Im folgenden werden diese fünf Gruppen kurz vorgestellt.

Tab. 2.3: Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten zugeordnet nach direkt oder indirekt, bzw. qualitativ oder quantitativ; nach Guzzetti 2005

Methoden	direkt	indirekt	qualitativ	quantitativ
geomorphologische Kartierung	x		x	
heuristisch-Index basiert		x	x	
Analyse von Inventaren		x		x
statistische Modellierung		x		x
deterministisch, Prozess basiert		x		x

Die **Geomorphologische Kartierung** der gravitativen Massenbewegungen ist eine direkte und qualitative Methode, deren Ergebnisse stark vom Vorwissen und der Fähigkeit des Experten abhängen. Dieser muss aktuelle und potentielle gravitative Massenbewegungen und deren Entwicklung und mögliche Folgen erkennen und abgrenzen (Guzzetti 2005). Werden diese Karten von gut geschulten Experten durchgeführt, können die Ergebnisse durchaus viel versprechend und passend sein. Dennoch ist mit dieser Methode ein sehr hoher Subjektivitätsgrad und eine geringe Nachvollziehbarkeit verbunden. Außerdem ist die Quantifizierung der Gefahr mittels geomorphologischer Kartierung problematisch (Guzzetti et al. 1999). So können mitunter von verschiedenen Kartierungsteams unterschiedliche Gefahrenhinweiskarten entstehen, was Van Westen et al. (1999) in einer Studie aufzeigten.

Zu den **heuristischen, Index basierten, Methoden** zählt vor allem die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten über die Kombination der jeweiligen Parameter mit einer bestimmten Gewichtung, die je nach Beitrag zur Auslösung eines Ereignisses vom Experten erfolgt. Diese indirekte, hauptsächlich qualitative Methode und deren Ergebnisse sind wiederum stark vom Prozessverständnis des Experten abhängig. Dieser klassifiziert, reiht und gewichtet Instabilitätsfaktoren nach ihrer Bedeutung für die Auslösung der gravitativen Massenbewegung (Guzzetti 2005). Diese Methoden weisen einen hohen Grad an Subjektivität und eine geringe Transparenz der Abgrenzungsregeln oder Gewichtungskriterien auf und sind mitunter mit langen Aufenthalten im Gelände verbunden (Aleotti und Chowdhury 1999). Um dem entgegen zu wirken werden nachvollziehbare, auf Erfahrung basierende Entscheidungsregeln vom Forscher aufgestellt, die zur Definition von möglicherweise instabilen Gebieten dienen. Damit kann die Gefährdung bezüglich gravitativer Massenbewegungen ausgewiesen werden (Guzzetti 2005).

Die **Analyse von Inventaren** zu gravitativen Massenbewegungen versucht zukünftige Verteilungsmuster der Instabilität von Hängen direkt von der Verteilung der gravitativen Massenbewegungen in der Vergangenheit abzuleiten. Dies wird durch das Erstellen von „*landslide density maps*“ - z.B. Karten, die den Prozentanteil der Fläche zeigen, die von Ablagerungen der gravitativen Massenbewegungen bedeckt ist, durchgeführt (Guzzetti 2005). Eine derartige Dichtekarte kann laut Guzzetti (2005) die Frequenz für die Erstellung der Gefahrenkarte abschätzen, wenn sie ausreichend normalisiert wird. Dennoch sprechen die hohe Zahl von Unsicherheiten und

Fehlern, die mit Inventaren von gravitativen Massenbewegungen in Verbindung stehen, gegen eine Ableitung der Frequenz aus diesem Ansatz.

**Deterministische Ansätze** bedienen sich des *Factors of Safety (FoS)* – der Berechnung der Standsicherheit eines Hanges, oder von den Hängen eines Gebiets. Diese Methoden benötigen unter anderem Angaben zu geotechnischen Parametern, wie zum Beispiel Einflussfaktoren des Schwerwiderstandes und Informationen zum auftretenden Porenwasserdruck. Dabei können sowohl nur bodenmechanische Parameter als auch diese in Kombination mit hydrologischen Parametern ihre Anwendung finden. Ein Beispiel für ein deterministisches Modell auf lokaler bis regionaler Ebene ist das Modell SINMAP – Stability Index Mapping, das von Pack et al. (1998) entwickelt wurde. Wurden diese Modelle früher nur auf einzelne Hänge angewendet so werden damit heute bereits größere Regionen auf ihre Hangstabilität untersucht (z.B. Thiebes 2006). Aufgrund der notwendigen Eingangsparameter wäre eine Analyse der bodenmechanischen Parameter und der Hydrologie des Untersuchungsgebietes wünschenswert, wenn auch damit die Kosten den Nutzen übersteigen können (Van Westen 2000).

**Statistische Analysen** berechnen über statistische Zusammenhänge zwischen der Verteilung der gravitativen Massenbewegungen im Raum und der einzelnen Parameter zu disponierenden und auslösenden Faktoren, eine relative Gefährdung für eine bestimmte Raumeinheit oder Gebiet. Dies kann im Rahmen einer bivariaten oder multivariaten Statistik erfolgen und somit liegt hier eine indirekte, quantitative Methode vor. In einem multivariaten Verfahren werden alle zur Verfügung stehenden Parameter in eine multiple Regressionsanalyse miteinbezogen oder es wird ein Vergleich mit der Verteilung der gravitativen Massenbewegungen über Diskriminantenanalyse erstellt (Van Westen 2000). Der Vorteil der multivariaten Statistik besteht darin, dass die Analyse rein datenorientiert und somit sehr objektiv ist. Van Westen (2000) sieht in der bivariaten Statistik, wo einzelne Parameter oder bestimmte Parameterkombinationen mit der Lage der gravitativen Massenbewegungen verglichen werden, die ideale Verknüpfung von einer vom Experten durchgeführten, direkten Kartierung mit den datenorientierten analytischen Möglichkeiten eines GIS. Mit der Auswahl der Parameterkombination kann der Experte einen Einfluss auf das Ergebnis nehmen, was die Meinung, bzw. das Vorwissen des Experten in die Analyse einbringt und für Van Westen et al. (1997) einen großen Vorteil der Methode darstellt.

Die statistischen Methoden zur Berechnung einer Gefahrenhinweiskarte profitieren stark von der Möglichkeit der Anwendung in einem geographischen Informationssystem (GIS) und weisen daher eine große Bandbreite auf (Aleotti und Chowdhury 1999). Brenning (2005) bietet einen Überblick über häufig angewendete statistische Methoden und betont, dass logistische Regression (u.a. Bell 2007, Brenning 2005, Guzzetti et al. 1999, Guzzetti 2005, Davis et al. 2006) und Diskriminanzanalyse (z.B. Santacana et al. 2003) die am häufigsten gewählten Methoden sind. Chung und Fabbri (1993) haben mit der *favourability function* ein mathematisches Rahmenwerk entwickelt, mit dem räumliche Vorhersagen, wie z.B. von Erzlagerstätten, das Auftreten von Naturgefahren oder für die Auswirkungen von menschlichen Aktivitäten auf die Umwelt, modelliert werden können. Als *favourability function* können zahlreiche unterschiedliche mathematische Funktionen verwendet werden. Dazu zählen das *Fuzzy Set Membership Model* (Chung und Fabbri

2007), das *Empirical Likelihood Ratio Model* (Chung und Fabbri 2003, 2005; Chung 2006; Davis et al. 2006), das *Logistic and Linear Discriminant Analysis Model* (Davis et al. 2006) und das *Bayesian Predictive Discriminant Model* (Demoulin und Chung 2007). In der Diplomarbeit wird das *Empirical Likelihood Ratio Model* oder Likelihood Quotienten Modell für die Region Gasen/Haslau angewandt.

### 2.2.3 Möglichkeiten der Validierung

Die Validierung der Ergebnisse ist laut Chung und Fabbri (2003) der wichtigste Bestandteil der Analysen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Dieser Schritt der Validierung ist unerlässlich, um eine aussagekräftige Interpretation der Ergebnisse und somit eine Abschätzung der Anwendbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Dafür ist die Aufteilung des Eingangsdatsatzes der gravitativen Massenbewegungen ein sehr wichtiger Schritt, denn eine Validierung mit Daten, die bereits in der Berechnung der Gefahrenhinweiskarten enthalten sind, macht die Interpretation gegenstandslos.

Chung und Fabbri (2003) stellen mehrere Möglichkeiten zur Validierung von Gefahrenhinweiskarten vor, die je nach Beschaffenheit der Eingangsdaten zu den gravitativen Massenbewegungen und der Größe des Untersuchungsgebiets sinnvoll angewendet werden können. Grundsätzlich geht es darum, den Datensatz der gravitativen Massenbewegungen in zwei Gruppen aufzuteilen, eine Schätzgruppe und eine Evaluierungsgruppe. Diese Aufteilung kann unterschiedlich erfolgen, wobei Chung und Fabbri (2003) drei Vorgehensweisen anbieten.

Möglichkeiten zur Aufteilung des Datensatzes der gravitativen Massenbewegungen:

- **Zeitliche Aufteilung** des Datensatzes der gravitativen Massenbewegungen: Angenommen man hat einen Datensatz zu gravitativen Massenbewegungen, die sich im Zeitraum zwischen 1970 und 2000 ereignet haben, zur Verfügung. In dem Fall könnte man den Datensatz so aufteilen, dass in der Schätzgruppe alle gravitativen Massenbewegungen sind, die sich von 1970 bis 1985 ereignet haben, und zur Evaluierungsgruppe gehören alle gravitativen Massenbewegungen, die von 1986 bis 2000 aufgetreten sind. Mit der Schätzgruppe wird dann eine Gefahrenhinweiskarte erstellt, die aufzeigen soll, wo sich nach 1985 gravitative Massenbewegungen ereignen können. Über den Vergleich der als gefährdet ausgewiesenen Flächen mit der Lage der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe kann eine Aussage über die Güte der Abschätzung getroffen werden.
- **Räumliche Aufteilung:** Das Untersuchungsgebiet wird in min. 2 Teilgebiete A und B unterteilt, was nur in Gebieten möglich ist, wo die Eingangsparameter über das gesamte Gebiet homogen auftreten. So wird mit den gravitativen Massenbewegungen auf dem Gebiet A eine Gefahrenhinweiskarte berechnet. Diese Berechnung wird auf das Gebiet B ausgeweitet, ohne zusätzliche Informationen zu den dort vorhandenen gravitativen

Massenbewegungen mit einzubeziehen. Dann kann mit den auf dem Gebiet B vorhandenen gravitativen Massenbewegungen eine Validierung dieser Gefahrenhinweiskarte auf dem Gebiet B erfolgen. Im zweiten Schritt ermittelt man die Gefahrenhinweiskarte auf dem Gebiet B mit den dort liegenden gravitativen Massenbewegungen und weitet dieses Muster auf das Gebiet A aus. Dann können die gravitativen Massenbewegungen auf dem Gebiet A zur Validierung der Gefahrenhinweiskarte herangezogen werden.

- **Zufällige Aufteilung:** der Datensatz zu den ereigneten gravitativen Massenbewegungen wird über einen Algorithmus zufällig aufgeteilt. Diese Aufteilung kann in unterschiedlichen Prozentanteilen erfolgen. Dadurch können auch Abschätzungen erfolgen, wie viele gravitative Massenbewegungen tatsächlich vorliegen müssen, um signifikante Ergebnisse zu erlangen.

Die Kreuzvalidierung überprüft, ob gravitative Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe, durch eine Gefahrenhinweiskarte aus der Schätzgruppe „vorhergesagt“ werden können. Diese Überprüfung erfolgt indem die Lage der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe mit der räumlichen Verteilung der am gefährdetsten ausgewiesenen Flächen der Gefahrenhinweiskarte verglichen wird.

Über die zeitliche Aufteilung der Daten könnte man veranlasst sein auch eine Aussage über den Zeitpunkt des zukünftigen Auftretens von gravitativen Massenbewegungen zu treffen. Dies ist aber nur bedingt und mit großer Unsicherheit möglich. In dieser Analyse wurde die Variante der zufälligen Kreuzvalidierung gewählt, da einerseits keine multitemporalen Daten zur zeitlichen Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen vorhanden waren und andererseits die zufällige Aufteilung in Schätzgruppe und Evaluierungsgruppe in anderen Analysen auch sehr gute oder auch bessere Ergebnisse lieferte (Remondo et al. 2003).

## **3. Daten**

Diesen Analysen liegen sowohl kategorische als auch numerische Daten als Basis vor, welche in diesem Kapitel näher beschrieben werden. Kategorische Daten sind Daten, die im Vektor-Format vorhanden sind und über größere Flächen die gleiche Eigenschaft (z.B. Landnutzungsart) aufweisen. Zu den kategorischen Daten die in dieser Arbeit verwendet werden zählen daher Datensätze der geologischen Karte (1: 50.000), der Bodenkarte (1:25.000), der digitalen Katastralmappe mit dem Wegenetz (1:1.000) und Datensätze der gravitativen Massenbewegungen. Die Basis für weitere numerische Daten bietet das digitale Geländehöhenmodell in einer 10m Rasterweite.

### **3.1 Geologie**

Die Geologie wird in Österreich u.a. im Maßstab 1:50.000 flächendeckend veröffentlicht. Dieses Kartenwerk liegt auch für diese Analysen vor. Im Untersuchungsgebiet liegt der Blattschnittbereich der Karten 134 - Passail und 135 - Birkfeld. Die aktuellste verfügbare Version der Karte 134 – Passail wurde von Flügel, Hötzl und Neubauer bearbeitet und im Jahr 1990 von der Geologischen Bundesanstalt (GBA) herausgegeben. Die provisorische geologische Karte 135 – Birkfeld wurde 2005 von der Geologischen Bundesanstalt herausgegeben. Diese entstand im Rahmen des GBA-Projektes „Geofast“ und wurde vom Joanneum Research und GIS-Steiermark kompiliert.

Die Daten zur Geologie im Untersuchungsgebiet liegen in digitaler Form (*Shapefiles*) vor. Es mussten nur noch einzelne Polygone, die entlang des Blattschnittes lagen und der gleichen geologischen Einheit angehörten, zu einer Gesamtfläche verbunden werden. Die Daten enthalten auch Attribute zu eigenen Überlegungen der Mitarbeiter der GBA bezüglich Standfestigkeit und so erfolgte von ihnen bereits eine Zusammenfassung von lithologischen Einheiten mit gleichen oder sehr ähnlichen Eigenschaften der Standfestigkeit, welche auch in der Analyse verwendet wurden. Eine Darstellung der geologischen Karte ist in Anhang A, Abbildung A.3 zu finden.

### **3.2 Boden**

In Österreich wird einerseits die forstliche Standortkartierung, die den Boden auf Waldgebiet heute im Maßstab 1:10.000 aufnimmt (Englisch et al. 2001) und andererseits die landwirtschaftliche Bodenkartierung, wo eine Bodenkartierung auf landwirtschaftlichen Flächen, also nicht bewaldete Gebiete im Maßstab 1:10.000 erfolgt, durchgeführt. Die landwirtschaftliche Bodenkartierung wird

im Maßstab 1:25.000 veröffentlicht (Schneider et al. 2001).

Die **forstliche Standortkartierung** liegt nur für 15% (Stand 2001, Englisch et al. 2001) des gesamten Waldgebietes in Österreich vor. Diese wird von mehreren Instituten (z.B. der Forstlichen Bundes-Versuchs-Anstalt (FBVA) und der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)) aber auch von privaten Forstbetrieben, Landwirtschaftskammern und Zivilingenieuren erstellt. Eine Anleitung für die forstliche Standortkartierung wurde im Jahr 1998 von einer Arbeitsgruppe des Österreichischen Forstvereins erarbeitet und von Englisch und Kilian als Herausgeber publiziert (Englisch et al. 2001).

Die **landwirtschaftliche Bodenkartierung** wird mittels Bodensondierungen, die mit einem Pyreckhauer vorgenommen werden, erzeugt. Die Dichte der Sondierungen beträgt im Durchschnitt eine Probe pro Hektar. Dadurch werden Bodenformen abgegrenzt und in die Feldkarte eingetragen. Die Abgrenzungsgenauigkeit wird durch die Betrachtung der Geländemorphologie, der Struktur der Bodenoberfläche sowie der Vegetation wesentlich verbessert (Schneider et al. 2001). Die digitale Bodenkarte wurde aus der seit 1958 systematisch durchgeführten landwirtschaftlichen Bodenkartierung erzeugt. Dabei wurden alle graphisch und textlich vorhandenen Informationen (Bodenkarten, Profilzeichnungen, textliche Inhalte der Begleitbroschüren) in ein geographisches Informationssystem übertragen. Seit 1. September 2004 ist die digitale Bodenkarte „eBOD“ auf der Homepage des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW 2008) frei verfügbar.

Für das Untersuchungsgebiet gibt es die forstliche Standortkarte „Oststeirisches Bergland – Raum Anger – Sankt Kathrein am Offenegg – Heilbrunn – Gasen – Sankt Erhard“, die im Zeitraum zwischen 1957-1960 von der Forstlichen Bundesversuchsanstalt im Maßstab 1:25.000 kartiert und herausgegeben wurde. Diese wurde von Mitarbeitern der GBA digitalisiert und anschließend mit der landwirtschaftlichen Bodenkartierung im Maßstab 1:25.000 verbunden. Dabei wurden die ursprünglichen Bodenklassen und auch die Kennzahlen, deren Einteilung bei beiden Kartenwerken unterschiedlich erfolgt, beibehalten. In einer Spalte der Attribut-Tabelle ist die Herkunft der Bodenklasse, ob von forstlicher Standortkartierung oder landwirtschaftlicher Bodenkartierung, ersichtlich.

Aus diesem Sachverhalt ergibt sich das Problem, dass keine flächendeckende einheitliche Kartierung für den Parameter Boden vorliegt, wodurch bei der Verbindung beider Karten auch Lücken ohne Informationen zu Bodenklassen entstehen. Des Weiteren liegt auch keine einheitliche Benennung der Bodenklassen vor, weshalb diese nicht zusammengefasst wurden. Dennoch wurde in dieser Arbeit versucht, die beiden vorliegenden Bodenkarten kombiniert zu verwenden und die Lücken und Bodenklassen der forstlichen Standortkartierung wurden mit einer eigenen Kennzahl deutlich ausgewiesen. Eine Darstellung der kombinierten Bodenkarte mit den jeweiligen Kennzahlen findet sich im Anhang, in Abbildung A.1.

### 3.3 Digitale Katastralmappe

Die digitale Katastralmappe (DKM) enthält laut Informationen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV 2008), Angaben zu den Grenzen der Grundstücke, den Grundstücksnummern, den Abgrenzungen der Nutzungen und den Fest- und Grenzpunkten mit den jeweiligen Nummern. Die DKM wird vom BEV und den hier zuständigen Vermessungsämtern geführt. Sie enthält auch grundstücksbezogene Veränderungshinweise über alle Änderungen der Daten der Grundstücke und ist in einem Maßstabsbereich von 1:500 bis 1:5.000 erhältlich. In dieser Analyse wurde eine DKM im Maßstab 1:1.000 verwendet, diese ist auch in Anhang A, in Abbildung A.2 dargestellt. Die DKM liegt für ganz Österreich flächendeckend vor.

Die digitale Katastralmappe entstand durch Digitalisierung der analogen Katastralmappe in den Jahren von 1989 bis 2005. Nun wird sie von den zuständigen Vermessungsämtern laufend durch Grundbuchbeschlüsse, Amtshandlungen der Vermessungsämter, Fernerkundungsdaten und qualitätsverbessernde Maßnahmen aktualisiert. Der genaue Stand (Erscheinungsjahr) der für die Analysen vorliegenden DKM ist nicht bekannt.

### 3.4 Gravitative Massenbewegungen

Alle Details zur Kartierung der gravitativen Massenbewegungen sind im Internen Bericht zur Pilotstudie der Abteilung für Ingenieurgeologie der GBA mit dem Titel „Krisenregion Gasen-Haslau (Bezirk Weiz, Oststeiermark) im August 2005, Erkundung, Recherche und Dokumentation massenbewegungsrelevanter Informationen und deren Standortfaktoren“, verfasst von Nils Tilch, Helene Kautz und Arben Koçiu im August 2007, enthalten. Hier sollen die wichtigsten Aspekte dieser Daten zusammengefasst werden.

Räumliche Informationen zu den im August 2005 ereigneten gravitativen Massenbewegungen liegen einerseits punktförmig und andererseits flächenhaft in digitaler Form (*Shapefiles*) für diese Analysen vor und es werden auch beide Typen verwendet. Zusätzlich zur räumlichen Lage der einzelnen Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen bzw. der gravitativen Massenbewegungsflächen wurden auch zahlreiche andere Parameter, während der Kartierungsarbeiten von Mitarbeitern der GBA zu jeder einzelnen gravitativen Massenbewegung aufgenommen. Zu den von der GBA erstellten Daten sind u.a. Informationen zu verschiedenen gravitativen Massenbewegungstypen wie Vermurungen, gravitativen Massenbewegungen infolge Ufererosion, aber größtenteils flachgründigen Hangrutschungen und Hangmuren enthalten. Diese Daten werden im Folgenden kurz genauer beschrieben:

Die **Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen** wurden in einem Kartierungsmaßstab von 1:10 000 aufgenommen. Dabei wurden die Punkte in der Mitte des Anrisskrone gesetzt. Die Kartierungsgenauigkeit liegt laut der Pilotstudie (Tilch et al. 2007), bei etwa 50m. Die Punkte

wurden nach dem Ereignis im August 2005 aufgenommen. Die erhobenen gravitativen Massenbewegungen sind auf einem Stand vom 31.7.2006. Zu den einzelnen Punkten wurden auch Informationen zu Prozesstyp, Waldverbreitung (Wald – ja/nein), Anthropogene Beeinflussung (Böschung – ja/nein), Art der anthropogenen Beeinflussung (Wegenetz – Straßenböschung – ja/nein, Alte Ackerpflugkante – ja/nein, sonstiger Bau – ja/nein), Bodenprobe (ja/nein), Foto (ja/nein), relatives Alter (0: August 2005, 1: jünger, 2: älter) und weiteren Details in Textspalten dokumentiert.

Die **flächenhafte Aufnahme der gravitativen Massenbewegungen** erfolgte laut Tilch et al. (2007) in einem Kartierungsmaßstab von 1:5.000 bis 1:10.000 und weist somit eine Genauigkeit von unter 50m auf. Bei der Digitalisierung wurde auf die längen- und flächentreue Darstellung der Strukturen und Phänomene, sowie der Teilprozessräume geachtet. Die einzelnen gravitativen Massenbewegungsflächen wurden hinsichtlich Prozessart unterschieden. So ist bei einem Großteil der flächenhaften Informationen eine Aufteilung der Gesamtfläche der gravitativen Massenbewegung in Anriss-, Transport- und Akkumulationsbereich für Fließen oder Gleiten/Rutschen erfolgt. Diese genaue Differenzierung liegt aber nicht für alle gravitative Massenbewegungsflächen vor. Es werden auch weitere Prozessarten wie Bereich mit kleinen Rutschungen, Vermurung, Rutschmasse, flächenhafte Erosion, Quellbereich, Locker- und Festgesteinsrutschung und Lockergesteinsrutschung unterschieden. Außerdem enthält der Datensatz Informationen zur Lokalität, Aufnahmedatum und weitere Anmerkungen z.B. zur Lage, Schäden.

Die Größe der gravitativen Massenbewegungsflächen und ihre Verteilung ist in Tabelle 3.1 angeführt.

Tab. 3.1: Größenverteilung der gravitativen Massenbewegungsflächen

Gesamtgröße alle grav. MB	176.337,6 m <sup>2</sup>
kleinste grav. MB	1,5m <sup>2</sup>
größte grav. MB	9.197,63m <sup>2</sup>
Mittelwert der Größe	460 m <sup>2</sup>
Quartile: min	1,5 m <sup>2</sup>
25%	40,3 m <sup>2</sup>
Median 50%	121,7 m <sup>2</sup>
75%	393,96 m <sup>2</sup>
max	9.197,63 m <sup>2</sup>

### 3.5 Wegenetz

Informationen zum Wegenetz wurden aus zwei unterschiedlichen Quellen bezogen. Die erste Quelle stellt die digitale Katastralmappe dar, die Polygone zu den Wegen enthält, welche leicht in ArcInfo extrahiert werden können. Zweitens liegen Wege, die aus dem Luftbild digitalisiert wurden vor. Die Erhebung dieser Wege wurde von Mitarbeitern der Abteilung für Ingenieurgeologie der GBA

durchgeführt. Somit liegen für die hier durchgeführten Analysen, aktuelle und detaillierte Informationen zum Wegenetz in den Gemeinden vor.

### 3.6 Digitales Geländehöhenmodell

Informationen zu Höhe, Hangneigung, Hangausrichtung, etc. werden in dieser Analyse von einem digitalen Geländehöhenmodell mit einer räumlichen Auflösung von 10m x 10m abgeleitet. Das DGM ist derzeit mit einem Raster mit einer Zellgröße von mindestens 10m flächendeckend für Österreich verfügbar. In naher Zukunft soll das digitale Geländehöhenmodell auch mit einer räumlichen Auflösung von 1m erhältlich sein.

Das DGM wird nach Angaben des BEV (2008), durch photogrammetrische Auswertung von Luftbildern erstellt, was bestimmte Nachteile bezüglich Lagegenauigkeit mit sich bringt. Diese Unsicherheiten sind in Kapitel 7.1 näher beschrieben. Abbildung 3.1 zeigt das digitale Geländehöhenmodell für das Untersuchungsgebiet.

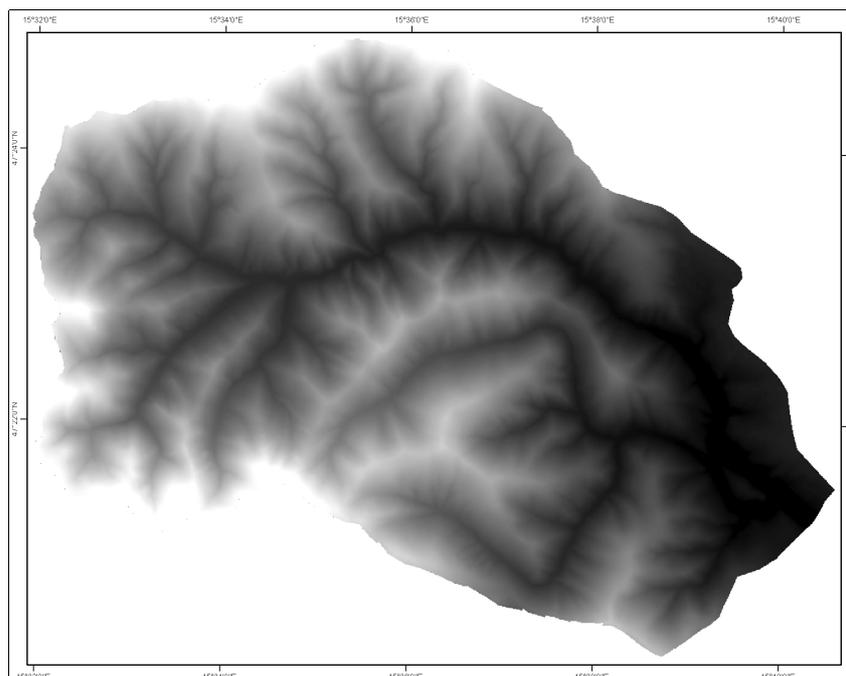


Abb. 3.1: Digitales Geländehöhenmodell im 10m Raster, auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten; BEV

Die weitere Bearbeitung dieser Eingangsdaten wird in den folgenden Kapiteln 4.4 Datenvorbereitung mit ArcInfo für die Analyse in SPM und 4.5.1 Datenaufbereitung in SPM beschrieben. Im Anhang A findet sich auch die Beschreibung der von der Abteilung für Ingenieurgeologie der GBA erhaltenen Daten und die Kennzahlen für die kategorischen Daten.

## **4. Methode**

Für die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte wurde der Ansatz des empirischen Likelihood Quotienten Modells ausgewählt, da dieser bereits häufig angewendet wurde und in zahlreichen Publikationen beschrieben wurde (u.a. Chung und Fabbri 2003, 2005; Chung 2006; Davis et al. 2006). In diesem Kapitel wird diese zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte angewandte Methode nach Chung und Fabbri (1993) beschrieben. Zuerst werden die mathematischen Grundlagen, dann die Schritte zur Datenaufbereitung und abschließend die Analyseschritte näher beschrieben. Die Aufbereitung der Daten erfolgte mittels dem *Spatial Prediction Modeling System (SPM*, SpatialModels Inc. 2003, 2004, 2006) und ArcInfo. Die Analyse erfolgte in SPM in einem zweistufigen Prozess, der von Chung und Fabbri (1993) entwickelt wurde. Dabei wird zuerst die empirische Häufigkeitsverteilung und der Likelihood Quotient für die einzelnen Datensätze berechnet, woraus die Gefahrenhinweiskarten für die jeweiligen Parameterkombinationen abgeleitet werden. In ständigem Vergleich mit der darauf folgenden zufälligen Kreuzvalidierung und geomorphologischer Betrachtung der Ergebniskarten, wird jene Parameterkombination bestimmt, die das beste Ergebnis bei der Vorhersagerate und Gefahrenhinweiskarte zeigt.

### **4.1 Mathematische Grundlagen - “favourability function”**

Der *favourability function* stehen zwei wichtige Grundannahmen voran (Chung und Fabbri 1993):

- a) die räumliche Verteilung von zukünftigen gravitativen Massenbewegungen kann durch räumliche Daten, welche die Geomorphologie des Gebiets charakterisieren, ausgezeichnet werden
- b) zukünftige Ereignisse werden wieder unter ähnlichen geomorphologischen Umständen eintreten

Diese Annahmen sind jenen der quantitativen Ansätze zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten sehr ähnlich, da auch hierbei gilt “The past is the key to the future”.

Ergänzend zu den Grundannahmen müssen folgende wichtige Eigenschaften der Datensätze für die Modellierung überprüft werden damit die Analyse erfolgreich ist (Chung und Fabbri 2005):

- die Datensätze repräsentieren die typischen Bedingungen der Ereignisse ausreichend
- die Bedingungen und Frequenzen des Auftretens von Ereignissen sind im Lauf der Zeit ähnlich
- die Datensätze können zeitlich oder räumlich geteilt werden, um eine Validierung der Ergebnisse durchführen zu können, die ein Maß für die Güte des Modells ist.

Zusätzlich müssen die Datensätze eine Übereinstimmung in Maßstab, Georeferenzierung, Co-

registrierung, Detaildichte, und Konsistenz von räumlicher und zugehörigen nicht-räumlicher Information aufweisen. Die Übereinstimmung im Maßstab kann vernachlässigt werden, obwohl dies aufgrund der unterschiedlichen Detaildichte der Eingangsdaten zu Unsicherheiten der Analyse führt.

Grundsätzlich wird über die *favourability function* ein Vergleich von kategorischen und numerischen Datensätzen mit jenem Datensatz, der die räumliche Verteilung von Anrissen von gravitativen Massenbewegungen enthält, angestellt. Die kategorischen Datensätze, zu Boden, Geologie und Landnutzung, und numerischen Datensätze, u.a. zu Geländehöhe, Exposition und Hangneigung, stellen dabei erklärende Faktoren für die Disposition und Auslösung von gravitativen Massenbewegungen dar. Der Datensatz der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen enthält die Aussage ob auf einem Pixel im Untersuchungsgebiet ein Ereignis war oder nicht. Durch diesen Vergleich der einzelnen Pixel für jeden Datensatz wird die relative Gefährdung hinsichtlich Anrisse gravitativer Massenbewegungen für jedes Pixel im Untersuchungsgebiet berechnet.

Dieser Vergleich der Datensätze wird mathematisch von Chung (2006) und Chung und Fabbri (2005) wie folgt formuliert:

Ein Pixel  $x$  im Untersuchungsgebiet  $A$  hat  $m$  Pixel Werte  $(x_1, \dots, x_m)$ , ein Wert für jeden Datensatz  $m$  und außerdem hat jedes Pixel noch den Wert  $Y(x)$  mit  $Y(x) = 1$  für die Anwesenheit und  $Y(x) = 0$  für die Abwesenheit von gravitativen Massenbewegungen für das Pixel  $x$ .

Die *favourability function*  $g(x : x_1, \dots, x_m)$  für das Pixel  $x \in A$  wird als reelle Funktion gebildet:

1.  $g(x : x_1, \dots, x_m)$  berechnet einen relativen Gefährdungsgrad für das Pixel  $x$  für gegebene  $m$  Pixel-Werte  $(x_1, \dots, x_m)$ , hinsichtlich des Auftretens von gravitativen Massenbewegungen.
2. Bei der Betrachtung von zwei Pixel,  $a$  und  $b$  mit den Werten  $(a_1, \dots, a_m)$  und  $(b_1, \dots, b_m)$  gilt folgendes: Wenn die  $m$  Pixel-Werte  $(a_1, \dots, a_m)$  für das a-te Pixel eine höhere Gefährdung bezüglich gravitativen Massenbewegungen, aufgrund der zugrunde liegenden erklärenden Faktoren aufweist, als die Pixel-Werte  $(b_1, \dots, b_m)$  für das b-te Pixel, dann ist die *favourability function* für  $a$  größer-gleich der *favourability function* für  $b$ :

$$g(a : a_1, \dots, a_m) \geq g(b : b_1, \dots, b_m)$$

3. Die Funktion kann mit allen notwendigen Datensätzen der erklärenden Faktoren erstellt werden.

Wenn diese Funktion  $g(x : x_1, \dots, x_m)$  für jedes Pixel in  $A$  ausgeführt wird kann eine Gefahrenhinweiskarte mit relativen Gefährdungen für  $A$  erstellt werden.

Weitere Anforderungen an mögliche *favourability functions* sind:

4. Numerische und kategorische Daten können gleichzeitig verwendet werden ohne die Anpassung von einem Datentyp an den anderen. In anderen Arbeiten wurde oft nur ein

Datentyp verwendet.

5. Mit der Funktion sollten verschiedene Auflösungen oder Maßstäbe von Datensätzen gleichzeitig verarbeitet werden können, was wichtig ist, wenn verschiedene Auflösungen im Datenbestand vorliegen.

#### 4.1.1 Das Likelihood Quotienten Modell

In Chung und Fabbri 2005 und in Chung 2006 wird das Prinzip des Likelihood Quotienten wie folgt beschrieben: Im Untersuchungsgebiet gibt es Flächen die Anrisse von gravitativen Massenbewegungen enthalten und die restliche Fläche, die frei von gravitativen Massenbewegungen ist. Sollte z.B. die Hangneigung ein wichtiger vorbereitender Faktor für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen sein, wird angenommen, dass sich die Hangneigungswerte innerhalb der Anrissflächen deutlich von den Hangneigungswerten der übrigen Fläche des Untersuchungsgebietes unterscheiden. Aufgrund dieser Annahme sollten die Häufigkeitsverteilungsfunktionen (*frequency distribution functions*) von beiden Gebieten klare Unterschiede aufweisen. Dies kann in einem Diagramm der Empirischen Verteilungsfunktion (*empirical distribution function*) dargestellt werden (siehe 4.5.2).

Beim **empirischen Likelihood Quotienten** handelt es sich um die errechnete Rate dieser zwei Häufigkeitsverteilungen, wodurch der Unterschied zwischen ihnen deutlich aufgezeigt werden kann. Mit dieser Methode kann für alle Datensätze, die für das Untersuchungsgebiet vorhanden sind, der Likelihood Quotient aus der jeweiligen Häufigkeitsverteilungsfunktion berechnet werden wodurch ein Vorhersagemodell erzeugt wird. Dieses zeigt gefährdete Bereiche für Anrisse von gravitativen Massenbewegungen auf. Eine Darstellung des schematischen Ablaufes der Berechnungen zeigt Abbildung 4.1.

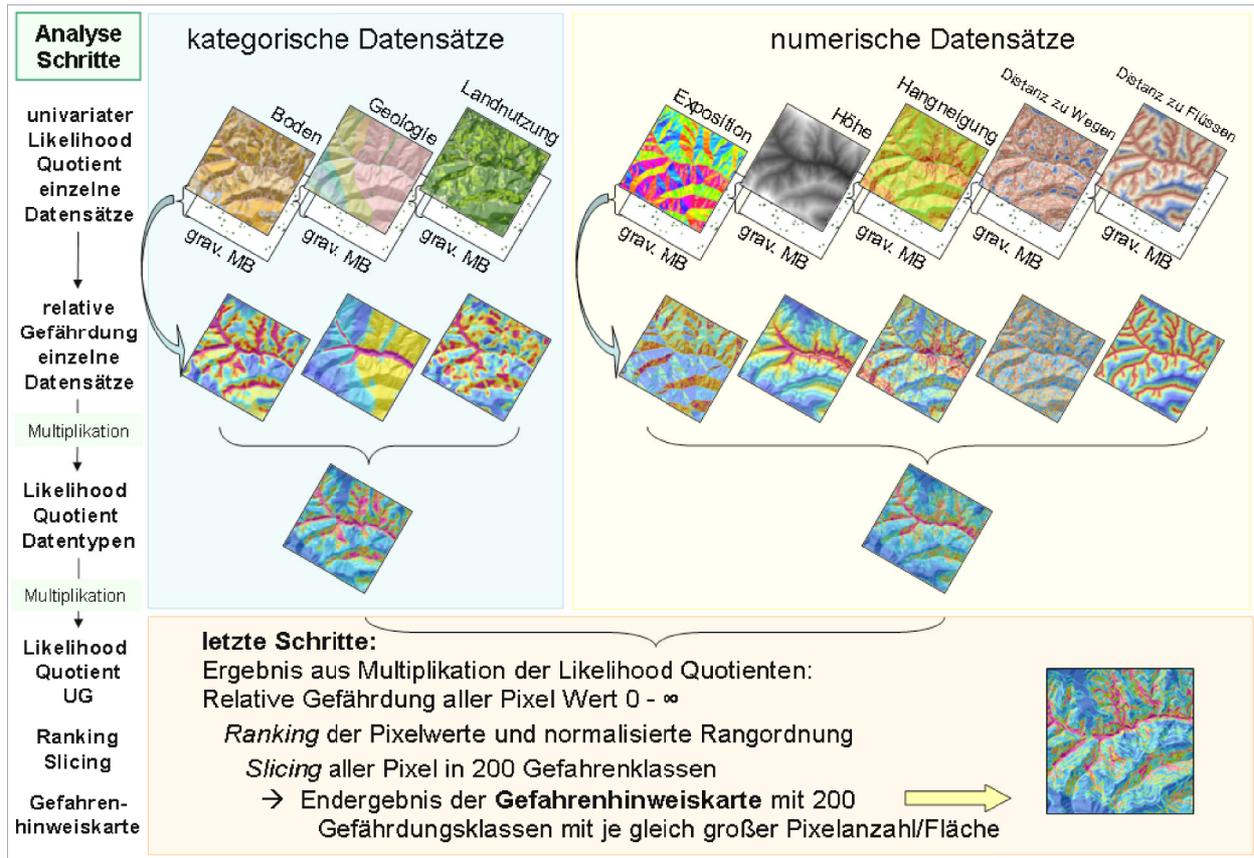


Abb. 4.1: Methode Likelihood Quotient Modell - schematischer Ablauf der Berechnungen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit 12 Gefährdungsklassen (aus ursprünglich 200) mit kategorischen und numerischen Datensätzen; grav. MB = Datensatz Anrisse der gravitativen Massenbewegungen; eigene Darstellung verändert nach Chung und Leclerc (2003).

Die **Berechnung** bedient sich folgender Funktionen (aus Chung und Fabbri 2005 und Chung 2006):

Im Untersuchungsgebiet  $A$  gibt es zwei Teilflächen, eine mit gravitativen Massenbewegungen  $\mathbf{M}$  und jener die keine gravitativen Massenbewegungen  $\overline{\mathbf{M}}$  enthält. Ein Punkt  $x$  mit  $m$  Pixel-Werten  $(x_1, \dots, x_m)$  wird nun genauer betrachtet.

$f\{x_1, \dots, x_m | \mathbf{M}\}$  und  $f\{x_1, \dots, x_m | \overline{\mathbf{M}}\}$  sind die multivariaten Häufigkeitsverteilungsfunktionen, unter der Annahme, dass ein Pixel aus  $\mathbf{M}$  und  $\overline{\mathbf{M}}$  sein kann. Damit definiert sich der Likelihood Quotient (Kshirsagar 1972; Press 1972; Cacaoullou 1973; in Chung 2006) für  $x$ :

$$\lambda(x : x_1, \dots, x_m) = \frac{f\{x_1, \dots, x_m | \mathbf{M}\}}{f\{x_1, \dots, x_m | \overline{\mathbf{M}}\}} \quad (1)$$

Der Likelihood Quotient wird für jedes Pixel abgeschätzt und je höher der Wert, desto wahrscheinlicher sind zukünftige Anrisse für dieses Pixel. So kann eine Karte der relativen Gefährdung bezüglich gravitativer Massenbewegungen erstellt werden.

Dieses Modell erlaubt die gleichzeitige Verarbeitung von kategorischen und numerischen Daten und erfüllt somit die vierte Anforderung an eine *favourability function*. Dazu muss aber eine zusätzliche Annahme getroffen werden:

Hier werden die Werte von Pixel  $x$  für die kategorischen Datensätze  $k$  und die numerischen Datensätze  $h$  getrennt betrachtet, wodurch sich folgende Häufigkeitsverteilungsfunktionen ergeben:

$f\{x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h|M\}$  für die Pixel mit gravitativen Massenbewegungen und  $f\{x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h|\overline{M}\}$  für die Pixel frei von gravitativen Massenbewegungen. Daraus ergibt sich eine Likelihood Quotienten Funktion laut Gleichung (1):

$$\lambda(x : x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h) = \frac{f\{x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h|M\}}{f\{x_{1,\dots}, x_m, y_{1,\dots}, y_h|\overline{M}\}} \quad (2)$$

Um aber nun mit den unterschiedlichen Typen von Datensätzen eine Berechnung der Häufigkeitsverteilungen durchführen zu können muss die Annahme getroffen werden, dass die kategorischen und numerischen Variablen bedingt unabhängig sind. Somit wird zuerst die Häufigkeitsverteilung für beide Datentypen getrennt berechnet und anschließend werden diese multipliziert, um die Häufigkeitsverteilung für beide Datensätze zu erhalten:

$$\begin{aligned} f\{x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h|M\} &= f\{x_{1,\dots}, x_k|M\} \times f\{y_{1,\dots}, y_h|M\} \\ \text{und} \\ f\{x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h|\overline{M}\} &= f\{x_{1,\dots}, x_k|\overline{M}\} \times f\{y_{1,\dots}, y_h|\overline{M}\} \end{aligned} \quad (3)$$

Daraus folgt, dass die Likelihood Quotienten Funktion ein Produkt aus zwei Likelihood Quotienten, jeweils für kategorische und numerische Datensätze ist.

$$\lambda(x : x_{1,\dots}, x_k, y_{1,\dots}, y_h) = \lambda(x : x_{1,\dots}, x_k) \times \lambda(y : y_{1,\dots}, y_h) \quad (4)$$

Die Abschätzung des Likelihood Quotienten erfolgt also für kategorische und numerische Daten getrennt.

Für die **kategorischen Datensätze** können zwei unterschiedliche Vorgehensweisen angewendet werden, denen jeweils unterschiedliche Annahmen zu Grunde liegen (Chung und Fabbri 2005, Chung 2006). Hier wird auf die von Chung (2006) als erstes angeführte Methode näher beschrieben, da diese in der Software SPM ihre Anwendung findet. Details zu weiteren Vorgehensweisen sind in Chung und Fabbri (2005) und Chung (2006) zu finden.

Wie schon für die Gleichung (3) muss auch hier bedingte Unabhängigkeit für alle kategorischen Datensätze vorliegen, damit die Berechnung durchgeführt werden kann. Für  $k$  kategorische Datensätze gilt:

$$\lambda(x : x_{1,\dots}, x_k) = \lambda(x : x_1) \dots \lambda(x : x_k) \quad (5)$$

So wird für jeden einzelnen Datensatz eine univariate Likelihood Quotienten Funktion abgeschätzt.

Dies geschieht indem jede einzelne Kategorie des jeweiligen Datensatzes mit der Verteilung der ereigneten gravitativen Massenbewegungen in Verbindung gesetzt wird, was wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$\check{\lambda}(x : x_i) = \frac{\text{Anzahl von Anrisspixel} \in \text{der } x_i \text{ Kategorie des Datensatzes } i}{\text{Anzahl von Pixel der restlichen Fläche} \in \text{der } x_i \text{ Kategorie des Datensatzes } i} \quad (6)$$

Im nächsten, abschließendem Schritt werden die Quotienten der einzelnen Datensätze multipliziert, womit der Likelihood Quotient für alle kategorischen Datensätze berechnet wird:

$$\check{\lambda}(x : x_1, \dots, x_k) = \check{\lambda}(x : x_1) \dots \check{\lambda}(x : x_k) \quad (7)$$

Chung (2006) beschreibt auch noch eine Möglichkeit eventuell vorhandene Fehler im Verlauf der Grenzen der einzelnen Kategorien zu berücksichtigen. Dies erfolgt mittels der Angabe der so genannten *Neighbourhood Pixel*, die einen Radius der wahrscheinlichen Ungenauigkeit rund um den Grenzverlauf der kategorischen Datensätze beschreiben. Dieser Parameter kann in der Software SPM für jeden kategorischen Datensatz angegeben werden. Dadurch sollen die Ergebnisse des Likelihood Quotienten noch weiter verbessert werden.

Der Likelihood Quotient der **numerischen Datensätze** kann ebenfalls mit mehreren Methoden ermittelt werden, in Chung und Fabbri (2005) und Chung (2006) sind drei dieser Möglichkeiten angeführt, wobei jede dieser Vorgehensweisen unterschiedliche Grundannahmen benötigt. Hier wird das erste Beispiel eingegangen, da dies in der Software SPM implementiert ist und das Prinzip der Berechnungen des Likelihood Quotienten sehr gut abbildet.

Diese Vorgehensweise ist der bei den kategorischen Datensätzen sehr ähnlich. Es ist wieder eine bedingte Unabhängigkeit nötig, um diesen Ansatz anwenden zu können. Man nehme  $h$  numerische Datensätze. Für das Pixel  $x$ , das  $h$  Werte annehmen kann, repräsentiert  $y_j$  einen reellen Wert im  $j$ -ten numerischen Datensatz:

$$\lambda(x : y_1, \dots, y_h) = \lambda(x : y_1) \dots \lambda(x : y_h) \quad (8)$$

Anstatt multivariate Verteilungsfunktionen zu berechnen, wird die Likelihood Quotienten Funktion für jeden einzelnen Datensatz  $j$  in einer univariaten Quotienten Funktion durch die Verbindung mit dem Datensatz der räumlichen Verteilung der Anrisse von gravitativen Massenbewegungen abgeschätzt:

$$\check{\lambda}(x : y_j) = \frac{\check{f}(y_j | M)}{\check{f}(y_j | \bar{M})} \quad (9)$$

durch die Berechnung dieses Quotienten für jeden Datensatz ergibt sich folgende Gleichung zur

Abschätzung des Likelihood Quotienten für alle numerischen Datensätze mittels Multiplikation der univariaten Likelihood Quotienten:

$$\ddot{\lambda}(x : y_1, \dots, y_h) = \ddot{\lambda}(x : y_1) \dots \ddot{\lambda}(x : y_h) \quad (10)$$

Die Kombination der Likelihood Quotienten der kategorischen und numerischen Datensätze führt zum Ergebnis, der Gefahrenhinweiskarte mit einem relativen Gefährdungslevel für jedes Pixel. Dies drückt sich wie folgt aus:

$$\hat{\lambda}(x : x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \hat{\lambda}(x : x_1, \dots, x_k) \times \hat{\lambda}(x : y_1, \dots, y_h) \quad (11)$$

Das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau umfasst insgesamt 937.400 Pixel für 10m x 10m Auflösung und 37.496 Pixel für die 50m x 50m Auflösung. Als Ergebnis der Gleichung (11) erhält man Pixelwerte die einen Wertebereich von 0 bis  $\infty$  aufweisen. Für die Pixel mit den höchsten Werten wird angenommen, dass sie für gravitative Massenbewegungen am meisten anfällig sind, und niedrige Werte stehen für sehr stabile Bereiche (Chung und Fabbri 2007).

Als letzte Schritte zur endgültigen Gefahrenhinweiskarte mit 200 Gefährdungsklassen ist laut Chung (2006) und Chung und Fabbri (2007) ein Ranking und darauf folgend ein Slicing der Gefährdungsklassen notwendig. Beim **Ranking** werden die Pixel Werte absteigend sortiert und mit Rängen 1 – 937.400 bzw. 1 – 37.496 versehen. Dann wird jeder Rang durch die Anzahl von Pixel dividiert womit man standardisierte Ränge mit den Werten  $1/937.400$  bzw.  $1/37.496$  bis 1 erhält. Das gefährdetste Pixel hat nun den Wert 1 und das am wenigsten gefährdete Pixel hat den Wert  $0,000001067$  im 10m Raster bzw.  $0,00000267$  im 50m Raster.

Durch das **Slicing** werden die Pixel in Gefährdungsklassen aufgeteilt. In der Software SPM werden automatisch 200 Gefährdungsklassen erstellt. Diese Klassen enthalten immer die gleiche Anzahl von Pixeln, decken also immer eine gleich große Fläche (z.B.  $1/200$ ) des Untersuchungsgebietes ab. Die 200ste Klasse ist die am gefährdetsten eingestufte Klasse. Durch diese Zuteilung der Pixel in Gefährdungsklassen erhält man eine *predicition map* – eine Gefahrenhinweiskarte.

Für die Darstellung der Ergebnisse in dieser Analyse wurde folgende Klassifikation verwendet: Jede Gefahrenhinweiskarte wird zuerst von SPM mit 200 Klassen der relativen Gefährdung, die jeweils den gleichen Flächenanteilen je Klasse aufweisen, ausgegeben. In dieser Analyse wurden die 200 Klassen in 12 Klassen mit unterschiedlicher Anzahl von Klassen bzw. unterschiedlichem Anteil an der Untersuchungsgebietsfläche zusammengefasst. Folgende Einteilung wurde für die Darstellung der Gefahrenhinweiskarten verwendet, die Prozentanteile beziehen sich auf die beinhaltete Anzahl von Klassen ( $1\% = 2$  Klassen) bzw. den Anteil an der Untersuchungsgebietsfläche (nach Chung und Fabbri 2008): 0% - 25%, 25% - 50%, 50% - 65%, 65% - 70%, 70% - 75%, 75% - 80%, 80% - 85%, 85% - 90%, 90% - 95%, 95% - 99% und 99% - 100% = Top 1%.

## 4.2 Datenaufbereitung mit ArcInfo für die Analyse in SPM

Alle kategorischen und numerischen Daten mussten für die Verwendung in SPM zuerst in ArcInfo aufbereitet werden. Die aufbereitenden Schritte beinhalten einerseits: die Anpassung aller Daten an die Untersuchungsgebiets-Größe (*Clippen* auf den Umriss des Polygons) und andererseits: die Festlegung der räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes (*Extent*, bestimmt die Größe des umschließenden Rechteckes) in den Optionen des *Spatial Analyst* oder durch die Angabe der Ausdehnung in den *Environments* bei der Konvertierung ins Rasterformat. Dadurch liegen die einzelnen Pixel der unterschiedlichen Rasterdatensätze genau deckungsgleich übereinander. Die genaue Anpassung der räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebiet und der Grenzen des Untersuchungsgebiet war notwendig, damit eine fehlerfreie Analyse durchgeführt werden kann. Diese Schritte werden nicht eigens in jedem Unterkapitel angeführt, da diese Schritte für alle Datensätze gleichermaßen durchgeführt werden mussten.

Im nächsten Schritt erfolgte die Umwandlung aller Datensätze in Rasterdaten mit 10m x 10m und 50m x 50m Rasterweite mittels ArcInfo mit dem Befehl *Feature to Raster* im *Spatial Analyst*. Dabei musste der Zuordnungsmodus der einzelnen kategorischen Einheiten zu den Pixeln ausgewählt werden. Hier kamen die Zuordnungsmöglichkeiten über die Pixel-Mitte oder über die maximale Fläche zu tragen. Je nach späterer Anwendung musste der richtige Modus bei der Konvertierung ausgewählt werden. Die fehlerfreie und lückenlose Umwandlung ins Raster-Format war für die weitere Verarbeitung in SPM und die Berechnung der Anrissflächen unbedingt erforderlich. Anschließend erfolgte die Konvertierung der Rasterdateien in so genannte *Float-files*, ein 32bit (4Byte) Format, das in der Software SPM weiterverarbeitet werden kann.

Im Folgenden sollen kurz die Bearbeitungsschritte für die unterschiedlichen Datensätze beschrieben werden. Die Angaben zu den Anforderungen an die Datensätze hinsichtlich Format und Kodierung, wurden aus dem SPM User's Guide (SpatialModels Inc. 2006) und dem Anhang zur Datenvorbereitung mittels ArcInfo (SpatialModels Inc. 2006) entnommen.

### 4.2.1 Aufbereitung des Datensatzes Untersuchungsgebiet

Die Grenze des Untersuchungsgebiets ist vor allem bei nicht rechteckigen Gebieten eine sehr wichtige Information für das Programm SPM, denn damit wird der Analysebereich festgelegt und außen liegende Informationen werden nicht berücksichtigt, wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Wert 1 steht für die Pixel, die das Untersuchungsgebiet markieren und Wert 0 steht für Pixel, die sich außerhalb des Untersuchungsgebiet befinden.

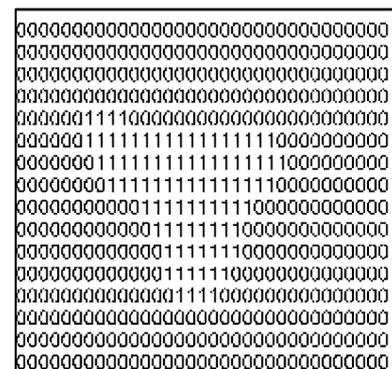


Abb. 4.2: Binärer Code für Ausdehnung des Untersuchungsgebiets; User's Guide SpatialModels Inc. 2006

Zuerst musste das *Shapefile* zur Untersuchungsgebiet-Grenze in einen Rasterdatensatz (10m und 50m Rasterweite) mit dem Befehl *Feature to Raster (cell assignment type – cell center)* im *Spatial Analyst* umgewandelt werden. Dann konnte die binäre Kodierung mit dem Befehl *Spatial Analyst → Reclassify* erstellt werden und über *Conversion Tools → from Raster to Float* in das notwendige Float-File im 32bit Format abgespeichert werden.

### 4.2.2 Aufbereitung der kategorischen Datensätze

Im Unterschied zum Untersuchungsgebiet-Datensatz waren hier die zugehörigen Grenzen, der einzelnen Kategorien in einem eigenen Datensatz für die Analyse notwendig. Daher entstanden für jeden kategorischen Datensatz zwei 8bit Dateien.

Wie in Abbildung 4.3a dargestellt wurden den einzelnen Einheiten der kategorischen Datensätze Kennzahlen zugeordnet, deren Werte zwischen 0 und 255 liegen. Bei der Erstellung des Rasterdatensatzes wird jedem Pixel die jeweilige Kennzahl der vorliegenden Einheit zugeordnet (Abbildung 4.3b). Des weiteren mussten auch Grenzdatensätze mit den binären Werten Null für die Fläche und eins für die Grenze, erstellt werden, was in Abbildung 4.3c gezeigt wird. Die Pixel-Werte entsprechen der Kennzahl der kategorischen Einheit, z.B. 50 für Wiese oder 47 für Weide bei der digitalen Katastralmappe. Eine solche Kennzahl wurde, falls noch nicht vorhanden, jeder Subeinheit zugeordnet, damit später bei den Auswertungen eine eindeutige Identifizierung von z.B. Landnutzungseinheiten durch die Kennzahl möglich ist. Dafür konnten beliebige Zahlenwerte zwischen 0 und 255 ausgewählt werden. Eine genaue Auflistung über die Zuordnung von Kennwerten für die kategorischen Datensätze zu Geologie, digitaler Katastralmappe und Boden findet sich in Anhang C in Kapitel C.1.

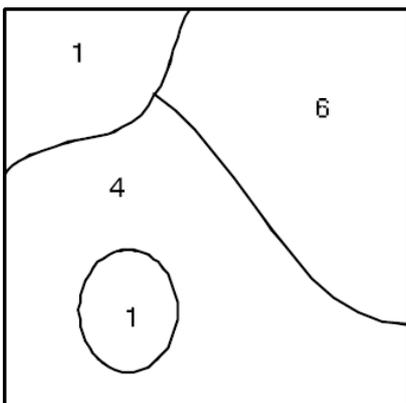


Abb. 4.3a: kategorische Karte mit Einheiten 1, 4, 6; User's Guide SpatialModels Inc. 2006

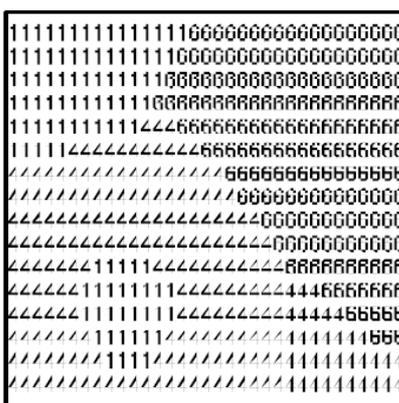


Abb. 4.3b: kategorischer Datensatz im Raster Format; User's Guide SpatialModels Inc. 2006

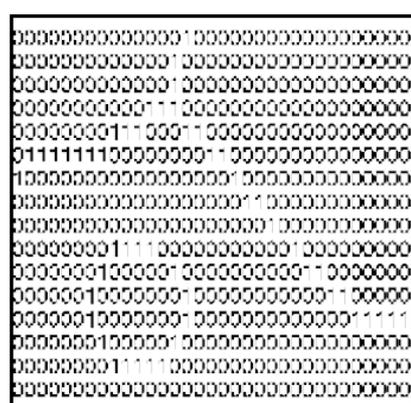


Abb. 4.3c: Grenzen der kategorischen Einheiten im Raster Format; User's Guide SpatialModels Inc. 2006

Die kategorischen Daten wurden in Rasterdaten mit 10m x 10m und 50m x 50m Auflösung mit dem *Spatial Analyst* Befehl *To Raster* → *Feature to Raster* umgewandelt. Dabei dienten die Kennzahlen der kategorischen Einheiten als Basis für die Rasterkonvertierung. Bei der Konvertierung des *Shapefiles* in den Rasterdatensatz, wurde den einzelnen Pixeln jene kategorische Einheit zugeordnet, die in der Mitte des Pixels vorliegt (*cell assignment type - cell center*).

Zusätzlich mussten Grenzdatensätze, die Informationen zum Grenzverlauf der einzelnen kategorischen Einheiten enthalten, von den entstandenen Rasterdatensätzen der kategorischen Daten abgeleitet werden. Dies erfolgte mit Hilfe des ET GeoWizards LT (2005) Tools und den in ArcInfo implementierten Tools zur Rasterkonvertierung. Das ET Geowizards LT Tool wurde von Ianko Tchoukanski entwickelt und wird auf der Support-Homepage der Firma ESRI zur Verfügung gestellt. Diese Erweiterung wurde in der Version 9.4.1 verwendet. Die Befehle zur Erstellung der Grenzdatensätze im Raster-Format lauten: *Raster to Polygon* (*cell assignment type – cell center*; ArcInfo), *Polygon to Polyline* (ET Geowizard LT) und *Polyline to Raster* (ArcInfo), anschließend musste noch eine Reklassifizierung der Pixelwerte auf den Wert 0 (keine Information) und den Wert 1 (Grenzen der kategorischen Einheiten) mit dem Befehl *Spatial Analyst* → *Reclassify* durchgeführt werden. Alle entstandenen Datensätze wurden anschließend in das Float-Format (32bit) transformiert.

#### Spezialfall Bodenkarte:

Damit man Bodeninformationen aus forstlicher Standortkartierung und landwirtschaftlicher Bodenkartierung unterscheiden kann, wurden die ID's der forstlichen Standortkartierung mit dem Wert 100 addiert und in eine Spalte „*spm\_id*“ gemeinsam mit den ID's der landwirtschaftlichen Bodenkartierung kopiert. Dann wurden im vorliegenden Datensatz die Lücken mit Polygonen gefüllt. Dies erfolgte über die Verbindung der Bodenkarte und des Grenzpolygons mit dem Befehl *Union* in den *Analysis Toolbox* → *Overlay* mit der Zusatzinformation *no gaps allowed*. Dadurch entstanden neue Polygone, denen der Wert 200 zugeordnet wurde, um diese Flächen, die keine Informationen zum Boden enthalten, später eindeutig erkennen zu können.

### **4.2.3 Aufbereitung der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen**

Für die Analyse lagen einerseits punktförmige Daten zu den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegung und andererseits flächenhafte Daten zu Anriss-, Transport- und Ablagerungsfläche der gravitativen Massenbewegungen vor. Die Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen mussten aufgrund ihrer punktförmigen bzw. flächenhaften Struktur mit unterschiedlichen Funktionen ins Raster-Format konvertiert werden. Bei den punktförmigen Daten wurde jeder Punkt in ein Pixel der jeweiligen Auflösung umgewandelt. Die Konvertierung der flächenhaften Daten zu den gravitativen Massenbewegungen war schwieriger. Mit der Auswahl des Zuordnungsmodus über die

Pixelmitte wurden viele Flächen mit fehlenden Pixeln im Rasterdatensatz dargestellt. Zwar stimmt die Gesamtfläche der Pixel mit gravitativen Massenbewegungen mit der realen Gesamtfläche besser überein, aber im Hinblick auf die Generierung von Anrissflächen in SPM war dieses Ergebnis der gravitativen Massenbewegungsflächen nicht zulässig. Daher musste als *cell assignment type* der Modus *maximum area* ausgewählt werden. Dadurch wurde die gesamte Fläche der jeweiligen gravitativen Massenbewegung mit Pixeln abgedeckt.

Inhalte wie Polygone zu Vermurungen oder gravitative Massenbewegungen infolge Ufererosion passen nicht zu der hier bearbeiteten Fragestellung und wurden daher gelöscht. Eine genaue Auflistung der Auswahlparameter ist im Anhang A, Kapitel A.2 - Vorbereitung Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen, angeführt. Außerdem lagen in den Basisdaten nicht für alle gravitative Massenbewegungen detaillierte Unterscheidungen zu einzelnen Prozessbereichen (Anriss-, Transport-, Ablagerungsbereich) vor. Daher wurden die einzelnen Polygone der Prozessbereiche, zu einer Massenbewegungsfläche zusammengefasst, um zu gewährleisten, dass alle Flächen gleichermaßen in die Analysen miteinbezogen werden.

Jede gravitative Massenbewegungsfläche oder Anrisspunkt wurde in der neuen Spalte "archiv\_id" von 1 bis n nummeriert. Diese Datensätze wurden in Rasterdaten umgewandelt und reklassifiziert, sodass die Rasterzellen mit gravitativen Massenbewegungen einen Wert von 1 bis n hatten und außen liegende Bereiche den Wert 0 aufwiesen.

Zusätzlich wurde ein weiterer flächenhafter Datensatz angelegt, der nur jene gravitative Massenbewegungen enthält, die größer als 1.000 m<sup>2</sup> sind, um die teilweise sehr kleinen gravitativen Massenbewegungen auszuschließen. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass die sehr kleinen gravitativen Massenbewegungen in der 50m Rasterweite ansonsten stark überrepräsentiert dargestellt werden.

Weitere Informationen sowie die Details zur Vorbereitung der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen mit ArcInfo sind im Anhang A zu finden.

#### 4.2.4 Aufbereitung der numerischen Datensätze

Aus dem digitalen Geländemodell wurden zusätzlich zur Höheninformation auch weitere Karten zu Hangneigungswinkel in Grad, Exposition in Grad und Entfernung zum Flussnetz abgeleitet. Dabei war vor allem auf die korrekte Angabe der Ausdehnung des Untersuchungsgebiets und die richtige Benennung, der ins Float-Format umgewandelten Dateien, mit \*\_32.flt zu achten. Dies ist wichtig, damit in weiterer Folge die Software SPM das richtige Datenformat erkennt.

**Hangneigungswinkel** (*slope*) und **Exposition** (*aspect*) wurden über den *Spatial Analyst* → *Surface Analysis* für die jeweilige Rasterweite (10m x 10m, 50m x 50m) berechnet und auf die richtige Ausdehnung (*Extent*) zugeschnitten.

Die **Distanz zum Flussnetz** wurde aus dem DGM mit den *ArcHydro Tools* und dem *Spatial Analyst* berechnet. Zuerst mussten die Senken im DGM gefüllt werden, dies erfolgte mit dem Befehl *ArcHydro Tools* → *Terrain Preprocessing* → *DEM Manipulation* → *Fill Sinks*. Danach konnte mit dem Befehl *ArcHydro Tool* → *Terrain Preprocessing* → *Flow Direction* die Abflussrichtung und in weiterer Folge mit *ArcHydro Tool* → *Terrain Preprocessing* → *Flow Accumulation* die Abflussakkumulation bestimmt werden. Mit dem Befehl *ArcHydro Tool* → *Terrain Preprocessing* → *Stream Definition*, konnte ein Flussnetz mit unterschiedlicher Anzahl von Zellen definiert werden. Je nach Angabe der Anzahl von Zellen wurde das Gewässernetz feingliedriger, oder nur auf den Hauptstrom reduziert. In dieser Arbeit wurde das Gewässernetz mit 0,2% der Gesamtfläche (=1.186 m<sup>2</sup>) definiert.

Danach musste diese Datei reklassifiziert werden, damit für „Fluss“ der Wert 1 und „kein Fluss“ der Wert *noData* zugeordnet wird. Dies war für die weitere Berechnung der Distanz zum Flussnetz notwendig. Diese Berechnung erfolgte über *Spatial Analyst* → *Distance* → *Euclidian Distance*. Dadurch wurde ein weiterer Rasterdatensatz der Werte zur Entfernung zum Flussnetz enthält, erzeugt.

Der Datensatz zur **Distanz zum Wegenetz** wird auch zu den numerischen Daten gezählt, obwohl das Wegenetz eigentlich als kategorischer Datensatz vorliegt. Die unterschiedlichen Informationen zum Verlauf des Wegenetzes aus digitaler Katastralmappe und aus digitalisierten Linien zu neuen Wegen, wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden kombiniert, um die Distanz berechnen zu können. Dazu wurden die, aus der digitalen Katastralmappe exportierten Wege und die als *Shapefile* vorliegenden kartierten Wege jeweils in einen Rasterdatensatz umgewandelt und reklassifiziert damit der „Weg“ den Wert 1 und das „restliche Gebiet“ den Wert 0 hat. Dadurch konnten die zwei Rasterdatensätze im *Raster Calculator (Spatial Analyst)* addiert bzw. verbunden werden. Damit die Distanz zum Wegenetz mit dem Befehl *Spatial Analyst* → *Distance* → *Euclidian Distance* berechnet werden konnte, musste der Datensatz zuerst nochmal auf die Werte 1 für „Weg“ und *noData* für das „restliche Gebiet“ reklassifiziert werden. Dadurch entstand ein Datensatz, der die Entfernung jeder Zelle zum Wegenetz in Meter enthält.

### 4.3 Analyse mit dem Spatial Prediction Modeling System (SPM)

Im Folgenden wird auf die Schritte der Datenvorbereitung und der Analyse in der Software SPM eingegangen. In der Datenvorbereitung wurden die in ArcInfo erzeugten Dateien im Float-Format nochmals in ein für SPM kompatibles Format (\*.outimage und \*.spg) umgewandelt. Diese Raster-Formate sind für ArcInfo nicht lesbar.

Zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte wurde zuerst versucht anhand der empirischen Häufigkeitsverteilung und dem Likelihood Quotienten der einzelnen Datensätze die erklärenden Parameter für das Ereignis zu bestimmen. Dazu wurde zusätzlich für jeden Eingangsdatensatz eine Gefahrenhinweiskarte erstellt, womit einerseits überprüft wurde, ob die Transformation der Daten

fehlerfrei erfolgte. Andererseits konnte so auch eingeschätzt werden, wo durch die einzelnen Parameter hoch gefährdete Bereiche liegen und welchen Effekt die Aufnahme dieses Parameters in die Kombination auf das Erscheinungsbild der Gefahrenhinweiskarte hat. Außerdem wurden die zugehörigen Vorhersageraten für die einzelnen Parameter berechnet, um die erklärenden Faktoren herausfiltern zu können. Im darauf folgenden Schritt wurden die Gefahrenhinweiskarten zu den einzelnen Parameterkombinationen berechnet und es wurden die zugehörigen Erfolgsraten und die Vorhersageraten bestimmt. Für die Betrachtung und Endbearbeitung der Gefahrenhinweiskarten musste der Umweg über das Open Source GIS – ILWIS Open 3.4 (52 North 2007) genommen werden. Mittels diesem Open Source GIS konnten die neuen Rasterformate importiert und anschließend als ASCII-Datei wieder exportiert werden. In dieser ASCII-Datei musste im nächsten Schritt die richtige Ausdehnung und Zellgröße des Datensatzes in einem Textbearbeitungsprogramm (TextPad oder Notepad) angegeben werden. Dann konnte mit dem ArcInfo Tool *To Raster → ASCII to Raster* über diese ASCII-Datei ein neuer Rasterdatensatz erstellt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Import/Export Schritte mit ILWIS Open 3.4 ist im Anhang B zu finden.

In den nachfolgend erklärten Analyseschritten in SPM werden die jeweiligen Outputs (Dateien, Diagramme) und ihre Deutung beschrieben.

### 4.3.1 Datenaufbereitung in SPM

Die Datenvorbereitung ist in SPM im so genannten *Data Preparation Tool* umgesetzt. Alle für die Analyse notwendigen Datensätze waren nun im 32bit Float-Format vorhanden und mussten im *Bit-Conversion Tool* in das für SPM fehlerfrei verwendbare \*.outimage – Format umgewandelt werden. Hier war zusätzlich die Auswahl der bit-Tiefe möglich, so benötigte man für kategorische Daten und die Untersuchungsgebiets-Grenze nur noch 8bit (1Byte) Dateien, die Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen mussten im 16bit (2 Byte) Format gespeichert werden und die numerischen Datensätze wurden im 32bit (4 Byte) – Format belassen.

Der Datensatz zum Untersuchungsgebiet musste nur im *Bit-Conversion Tool* in eine 8bit Datei umgewandelt werden. In den Analysen wird das \*.outimage – Format verwendet. Das *Data Preparation Tool* bietet in weiterer Folge für jeden Datentyp ein eigenes Vorbereitungs-Tool. Kategorische Datensätze (inklusive Grenzdansätze) werden im *Thematic Data Preparation Tool* ins \*.spg - Format transformiert. Numerische Daten mussten mit dem *Continuous Data Preparation Tool* bearbeitet werden.

Die punktförmigen bzw. flächenhaften Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen bedürfen ebenfalls einer Transformation ins \*.spg – Format was im *Occurrence Data Preparation Tool* durchgeführt wurde. Hier hat man zusätzlich die Möglichkeit Anrissflächen aus den gesamten gravitativen Massenbewegungsflächen berechnen zu lassen. Dieser Schritt war notwendig, damit nicht die Gesamtfläche der gravitativen Massenbewegungen mit Transport und Auslaufbereich in die Analysen miteinbezogen wird. Für die Ermittlung der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen in SPM benötigt man neben den flächenhaften Datensätzen zu den gravitativen

Massenbewegungen auch noch das DGM. Damit ermittelt SPM einen frei wählbaren Prozentsatz der Gesamtfläche, der hangaufwärts am höchsten liegt und somit als Anrissfläche gilt. In dieser Analyse wurde ein Prozentsatz von 10% der Gesamtfläche der gravitativen Massenbewegungen gewählt, der als Anrissfläche (engl.: *Trigger Area*) ausgewiesen wurde. Die so generierten Anrissflächen sind im Anhang A in Abbildung A.4 für das Untersuchungsgebiet dargestellt.

### 4.3.2 Empirische Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient

Das empirische Häufigkeitsverteilungsdiagramm und der Likelihood Quotient bieten eine erste Bewertungsgrundlage der einzelnen Datensätze, denn sie zeigen auf ob und in welchem Maß ein Datensatz zur Erklärung der aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen beiträgt. Diese Diagramme können über zwei Wege im *Spatial Prediction Modeling Module* berechnet und danach in Microsoft Excel erstellt werden:

Einerseits hat man im *Layer-by-Layer* Menü die Möglichkeit für jeden Datensatz einzeln die empirische Häufigkeitsverteilung und den Likelihood Quotienten zu berechnen und als Text-Datei zu speichern. Diese Vorgehensweise wird im *Spatial Prediction Modeling System User's Guide* empfohlen, weil man sich hier genauer mit den einzelnen Datensätzen auseinandersetzen kann und Parameter, wie die Anzahl der *Neighbourhood Pixel* und den *Spread*, genauer anpassen kann (SpatialModels Inc., 2006). Die Anzahl der *Neighbourhood Pixel* bietet eine Möglichkeit, Ungenauigkeiten in der räumlichen Abgrenzung der einzelnen Einheiten eines kategorischen Datensatzes in die Analyse mit einzubeziehen. So wurden in dieser Analyse für die 10m Auflösung 10 Pixel als Fehler angenommen und für die 50m Auflösung ein Pixel.

Die zweite Möglichkeit zur Berechnung der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten führt über das *One-Step Multi-Layer Prediction Image Generation Program*, unter Verwendung des *Empirical Likelihood Ratio Model*, womit eine Gefahrenhinweiskarte für alle Datensätze berechnet wird. In der dabei entstandenen Text-Datei (*Session Log*) sind auch alle empirischen Häufigkeitsverteilungen und Likelihood Quotienten für jeden Datensatz enthalten.

Abschließend mussten die in beiden Varianten entstandenen Text-Dateien in Microsoft Excel importiert werden und so konnten die Diagramme der empirischen Häufigkeitsverteilung bzw. des Likelihood Quotienten dargestellt werden.

Das Diagramm der empirischen Häufigkeitsverteilung (Abbildung 4.4a) ist wie folgt aufgebaut: es zeigt die Anzahl von Pixeln je Landnutzungseinheit, die frei von gravitativen Massenbewegungen sind (gelb) und jene, die gravitative Massenbewegungen enthalten (grün). Aus dem Quotienten (empirischer Likelihood Quotient, Abbildung 4.4b) dieser beiden Balken kann man erkennen, welche Landnutzungseinheiten besonders von gravitativen Massenbewegungen betroffen waren und welche im Gegensatz dazu besonders stabil waren.

Dieses Diagramm wurde für alle numerischen und kategorischen Datensätze, jeweils mit den punktförmigen und flächenhaften Datensätzen zu den gravitativen Massenbewegungen berechnet, um einen Überblick über den Beitrag der einzelnen Parameter hinsichtlich Disposition für gravitative

Massenbewegungen zu erhalten.

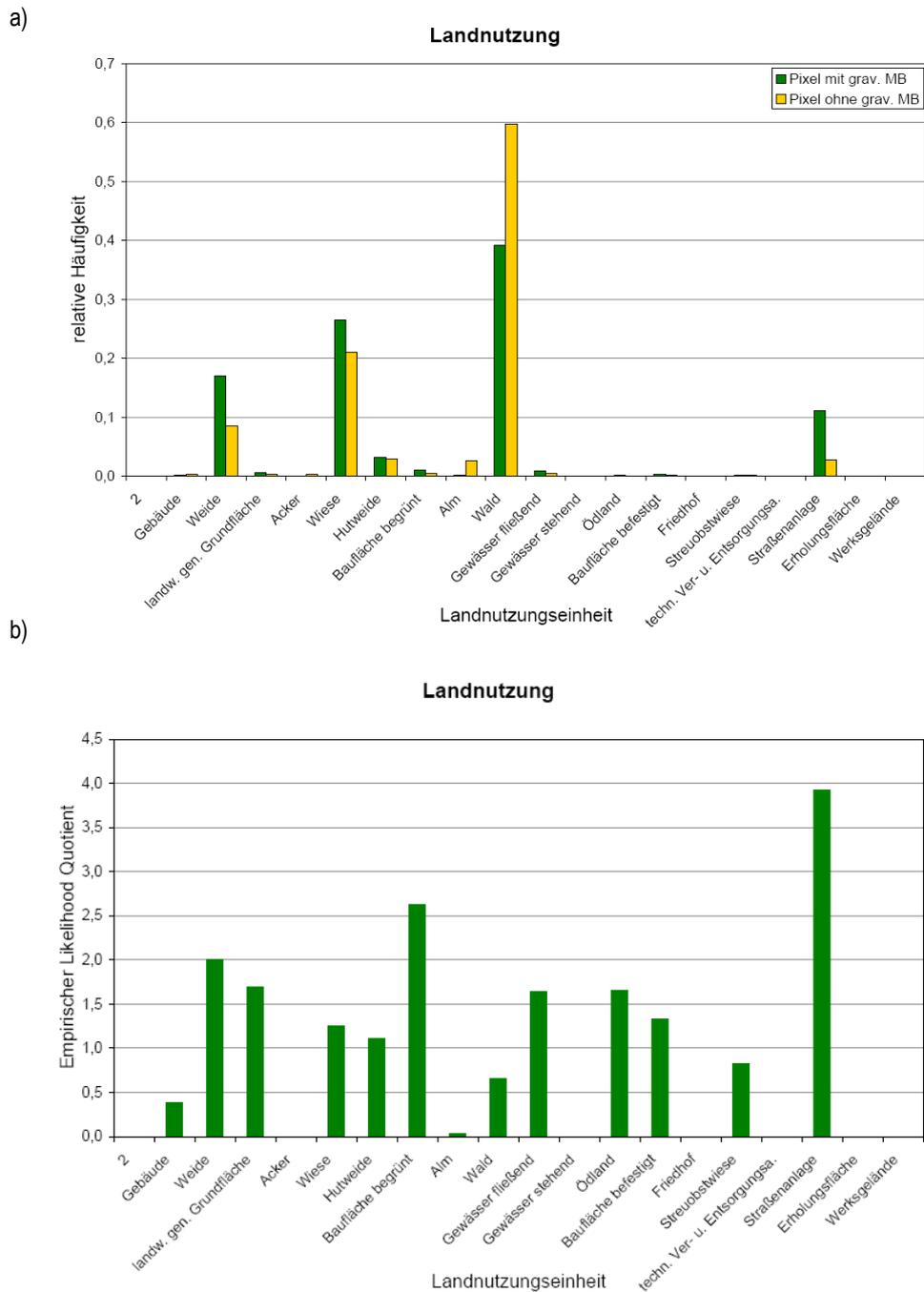


Abb. 4.4: a) Empirisches Häufigkeitsverteilungsdiagramm und b) empirischer Likelihood Quotient für Landnutzung; 10m x 10m Auflösung; berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen (= grav.MB), eigene Berechnung in SPM. Einheit 2 = Fehler

In der empirischen Häufigkeitsverteilung und dem Likelihood Quotienten steckt die erste wichtige Entscheidungshilfe, für die Auswahl der Parameter für die Parameterkombination, mit der die Gefahrenhinweiskarte berechnet wird. Wenn die Werte der empirischen Häufigkeitsverteilung und

des empirischen Likelihood Quotienten eines Datensatzes sehr hoch sind, kann man davon ausgehen, dass dieser Parameter in weiterer Folge auch eine gute Erfolgs- und Vorhersagerate aufweist. Die Parameter müssen eine deutliche Beeinflussung der Disposition aufzeigen, um in die Parameterkombination aufgenommen zu werden.

### 4.3.3 Berechnung der Gefahrenhinweiskarten

Die Gefahrenhinweiskarten wurden mit dem *Empirical Likelihood Ratio Model*, in den *One-Step Multi-Layer Prediction Image Generation Programs* im Menü *Spatial Prediction Modeling*, berechnet. Hier können beliebig viele kategorische und numerische Datensätze, mit einer maximalen Pixelanzahl von 5.000 Pixel je Reihe und Spalte, eingelesen werden.

Den kategorischen Datensätzen musste der jeweilige Grenzdatensatz zugewiesen werden und auch die Anzahl der *Neighbourhood Pixel* (10 Pixel für die 10m Rasterweite, ein Pixel für die 50m Rasterweite) musste angegeben werden. Bei den numerischen Datensätzen konnte der *Spread Parameter* (standardmäßig auf 2% eingestellt) geändert werden, dies erfolgte aber bei diesen Analysen nicht. Wichtig war die zusätzliche Angabe des *Image Types*, damit das Programm mit der richtigen Byte/Bit Anzahl (in dieser Analyse 4Byte/32bit) arbeitet. Außerdem musste noch die Größe der resultierenden Gefahrenhinweiskarte mit *Pixel* (1.090 Pixel bei 10m x 10m Auflösung; 218 Pixel bei 50m x 50m Auflösung) und *Line* (860 Pixel bei 10m x 10m Auflösung; 172 Pixel bei 50m x 50m Auflösung) angegeben werden. Um eine Gefahrenhinweiskarte erzeugen zu können benötigte das Programm als letzte Eingabe, den Datensatz zur räumlichen Verteilung der gravitativen Massenbewegungen. Um einen Vergleich zu erhalten, welchen Effekt die Auswahl von Anrisspunkten oder von Anrissflächen auf die Gefahrenhinweiskarte hat, wurden beide Varianten für beide Rasterweiten berechnet. Außerdem wurden auch Gefahrenhinweiskarten für die Anrissflächen von gravitativen Massenbewegungen die größer als 1000m<sup>2</sup> sind für die 50m x 50m Rasterweite berechnet.

Gespeichert wird die Gefahrenhinweiskarte im 32bit und 8bit \*.spg – Format. Das 32bit Format ist für die weiteren Berechnung der Erfolgsrate notwendig. Im 8bit Format ist bereits die Zusammenfassung zu 200 Klassen der Gefährdung erfolgt. Zusätzlich wird noch eine *Session Log* Datei angelegt, wo alle Einstellungen für die jeweilige Gefahrenhinweiskarte nachgelesen werden können.

### 4.3.4 Zufällige Kreuzvalidierung

Die zufällige Kreuzvalidierung erfolgt im Menü *Cross-Validation* in den *Randomly Selected Occurrences Programs* der Software SPM. Hier kann die Kreuzvalidierung mit zufälliger Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen für das empirische Likelihood Quotienten Modell durchgeführt werden.

Dazu war die Angabe der kategorischen und numerischen Datensätze mit den näheren Einstellungen zu Neighbourhood Pixel und Image Type, der Bildgröße, der Gesamtanzahl von gravitativen Massenbewegungen und dem Anteil der gravitativen Massenbewegung am einzelnen Pixel, damit diese in der Analyse berücksichtigt wird (hier 50%), notwendig. Außerdem musste der Datensatz der gravitativen Massenbewegungsanrisse (Punkte oder Flächen) angegeben werden.

Im nächsten Schritt konnte entschieden werden wie viele gravitative Massenbewegungen zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte herangezogen werden sollten (Größe der Schätzgruppe) und wie oft diese zufällige Auswahl und die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte durchgeführt werden sollte. In dieser Analyse wurden Validierungen für Gefahrenhinweiskarten aus 50%, 25% und 10% aller gravitativer Massenbewegungsanrisse mit je 5 Durchläufen berechnet, um auch Aussagen über die Robustheit der Modellierungen treffen zu können. Dies wurde durch die wiederholte Berechnung der Vorhersagerate mit immer neuer zufälliger Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen in Schätz- und Evaluierungsgruppe, Verhältnis 50% zu 50% möglich. Im nächsten Schritt wurden die besten Parameterkombinationen kleineren Schätzgruppen, mit 25% und 10% aller gravitativer Massenbewegungen berechnet. Nun kann einerseits die Lage der Kurven zur Vorhersagerate aus der mehrmaligen zufälligen Auswahl, und andererseits die Lage der Kurven mit unterschiedlich großer Schätzgruppe verglichen werden. Aus dem Vergleich der Lage der Kurven dieser beider Diagramme, kann die Robustheit der ausgewählten Parameterkombination abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse wurden in einer Text-Datei abgespeichert, welche in Microsoft Excel importiert werden konnte. Die berechneten Vorhersageraten wurden in einem Diagramm dargestellt. Hier wurden keine \*.spg - Dateien der Gefahrenhinweiskarten erstellt, denn die endgültigen Gefahrenhinweiskarten sollten aus allen vorhandenen gravitativen Massenbewegungsanrisse berechnet werden.

Das Ablauf-Schema der zufälligen Kreuzvalidierung wird in Abbildung 4.5 dargestellt.

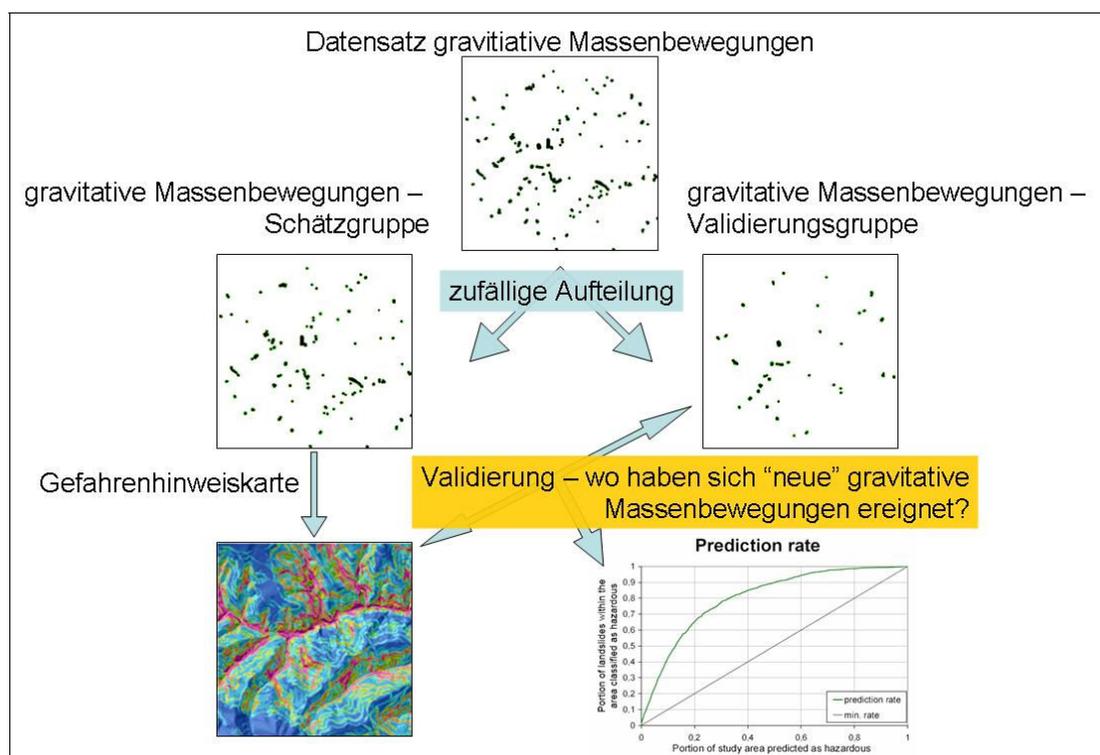


Abb. 4.5: Schema der Validierung mit zufälliger Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen in Schätz- und Evaluierungsgruppe

## 4.4 Entscheidungskriterien für die Bestimmung der besten Parameterkombination und Gefahrenhinweiskarte

Das Programm SPM bietet zur Auswahl der besten Parameterkombination drei Beurteilungsmöglichkeiten. Die empirische Häufigkeitsverteilung und der daraus abgeleitete Likelihood Quotient, die Erfolgsrate und die Vorhersagerate. Die genaue Betrachtung der zugehörigen Diagramme bietet wichtige Aussagen, die zur Aufnahme oder zum Weglassen eines Datensatzes in die Parameterkombination führen können. Details zur empirischen Häufigkeitsverteilung und zum Likelihood Quotienten wurden bereits ausführlich im Kapitel 4.3.2 beschrieben. Im Folgenden werden die statistischen Entscheidungskriterien Erfolgsrate und Vorhersagerate kurz erläutert. Des Weiteren wurde die „geomorphologische Güte“ (Bell 2007) als subjektives Maß zur Bewertung der Gefahrenhinweiskarten zu den Entscheidungskriterien aufgenommen. Diese wird ebenfalls in einem Unterkapitel beschrieben.

### 4.4.1 Erfolgsrate

Die Erfolgsrate (engl. *success rate* od. *fitting rate*) einer Gefahrenhinweiskarte dient zur Abschätzung der Güte der Anpassung der Gefahrenhinweiskarte. Sie wird aus dem Vergleich der Gefahrenhinweiskarte mit den zur Modellierung der Gefahrenhinweiskarte verwendeten gravitativen Massenbewegungen ermittelt (Chung und Fabbri 2003). Die Erfolgsrate einer Gefahrenhinweiskarte wird mit dem *Prediction Rate Table Generation Program* berechnet. Das Programm stellt einen Vergleich der Lage der gravitativen Massenbewegungen mit der Lage der relativen Gefährdungsklassen an. Dazu benötigt es eine Gefahrenhinweiskarte im 32bit Format und den Datensatz der gravitativen Massenbewegungen im 16bit Format und es wird eine Text-Datei mit der Erfolgsrate abgespeichert.

Es wird angenommen, dass das Modell gut funktioniert, also sollten die meisten gravitativen Massenbewegungen auch in den am gefährdetsten ausgewiesenen Gebieten liegen. Daher ist die Erfolgsrate auch immer etwas höher als die Vorhersagerate (Chung und Fabbri 2003).

Die Erfolgsrate kann sowohl für einzelne Parameter, als auch für Parameterkombinationen berechnet werden. In Abbildung 4.6 ist ein Diagramm der Erfolgsrate dargestellt. Auf der x-Achse ist der Anteil an als gefährdet ausgewiesenen Fläche aufgetragen. Zum Beispiel der Wert 0,2 bezeichnet die 20% der gefährdetsten Flächen, die im Untersuchungsgebiet ausgewiesen wurden. Der Anteil an der gefährdetsten Fläche kann frei gewählt werden, so kann der Anteil an den gravitativen Massenbewegungen beispielsweise bei 5%, 10% oder auch 50% abgelesen werden. In dieser Analyse werden 20% der gefährdetsten Fläche als entscheidendes Kriterium angenommen, angelehnt an die Arbeiten von Chung und Leclerc 2003, Remondo et al. 2003a und Remondo et al. 2003b. Damit kann aufgezeigt werden, wie viele gravitative Massenbewegungen sich in 20% der gefährdetsten Fläche ereignet haben, und somit in den hoch gefährdeten Gebieten liegen. Auf der y-Achse ist der

Anteil der gravitativen Massenbewegungen aufgetragen. Dabei handelt es sich um alle Massenbewegungen, die zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte herangezogen wurden.

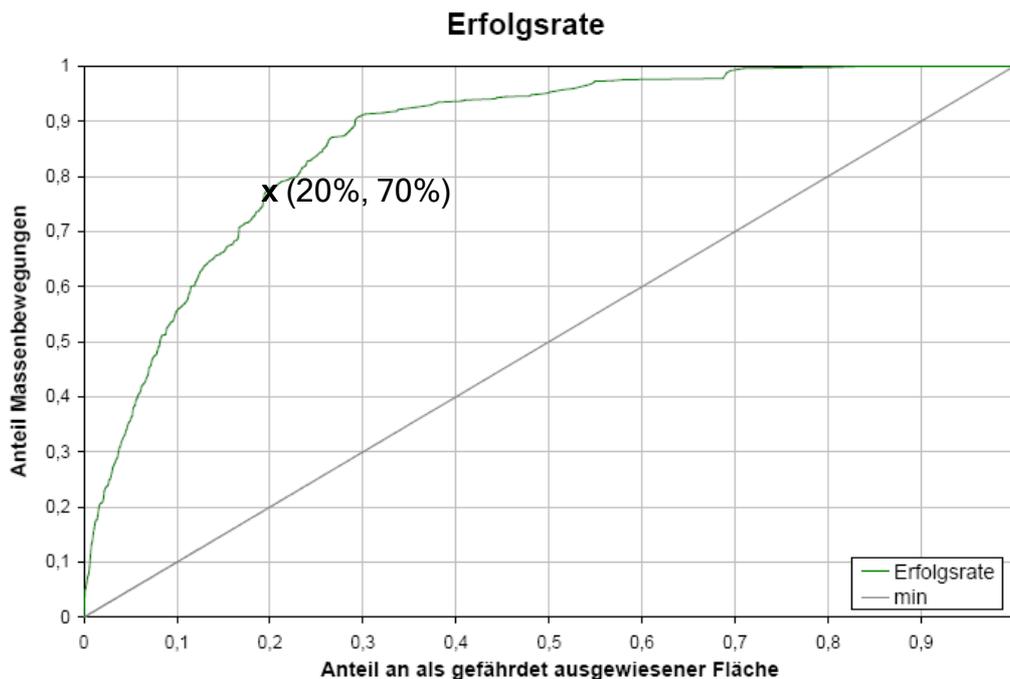


Abb. 4.6: Erfolgsrate: Schema des Diagramms; Beispiel zur Aussage: in 20% der gefährdetsten Flächen liegen 78% aller gravitativen Massenbewegungen. Die Erfolgsrate sollte über der „min-Linie“ liegen, damit ein signifikantes Ergebnis vorliegt. Darunter liegende Kurven, stellen eine zufällige Verteilung dar.

#### 4.4.2 Vorhersagerate

Die Vorhersagerate (engl. *prediction rate*) wird bei der Validierung der Gefahrenhinweiskarte berechnet und ist ein Maß für die „Vorhersagefähigkeit“ der jeweiligen Gefahrenhinweiskarte (Chung und Fabbri 2003). Die Vorhersagerate wurde im Menü *Cross-Validation* mit den *Randomly Selected Occurrences Programs* der Software SPM berechnet. Im Gegensatz zur Erfolgsrate werden hier nicht alle gravitativen Massenbewegungen zur Berechnung der Gefahrenhinweiskarte verwendet, sondern der Datensatz wurde zufällig in Schätzgruppe und Evaluierungsgruppe aufgeteilt, so dass nur jeweils 50%, 25% oder 10% aller Massenbewegungen der Schätzgruppe zur Generierung der Gefahrenhinweiskarte genutzt werden. Die restlichen 50%, 75% oder 90% der Evaluierungsgruppe wurden zur Validierung der Gefahrenhinweiskarte verwendet. Damit wurde verglichen, wie viele gravitative Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe „vorhergesagt“ werden konnten, also wie viel Prozent der gravitativen Massenbewegungen (y-Achse) liegen in den als hoch gefährdet ausgewiesenen Flächen (Anteil der Gesamtfläche, x-Achse). Damit kann eine Aussage über die Güte des Modells getroffen werden. Wie bei der Erfolgsrate werden auch bei der Vorhersagerate, angelehnt an die Arbeiten von Chung und Leclerc 2003, Remondo et al. 2003a und Remondo et al. 2003b, 20% der gefährdetsten Fläche als entscheidendes Kriterium für die Ausweisung von hoch gefährdeten Gebieten angenommen. Damit kann aufgezeigt werden, wieviel

Prozent der gravitativen Massenbewegungen sich in 20% der gefährdetsten Fläche ereignen können. In Abbildung 4.7 ist ein Schema des Diagramms der Vorhersagerate dargestellt.

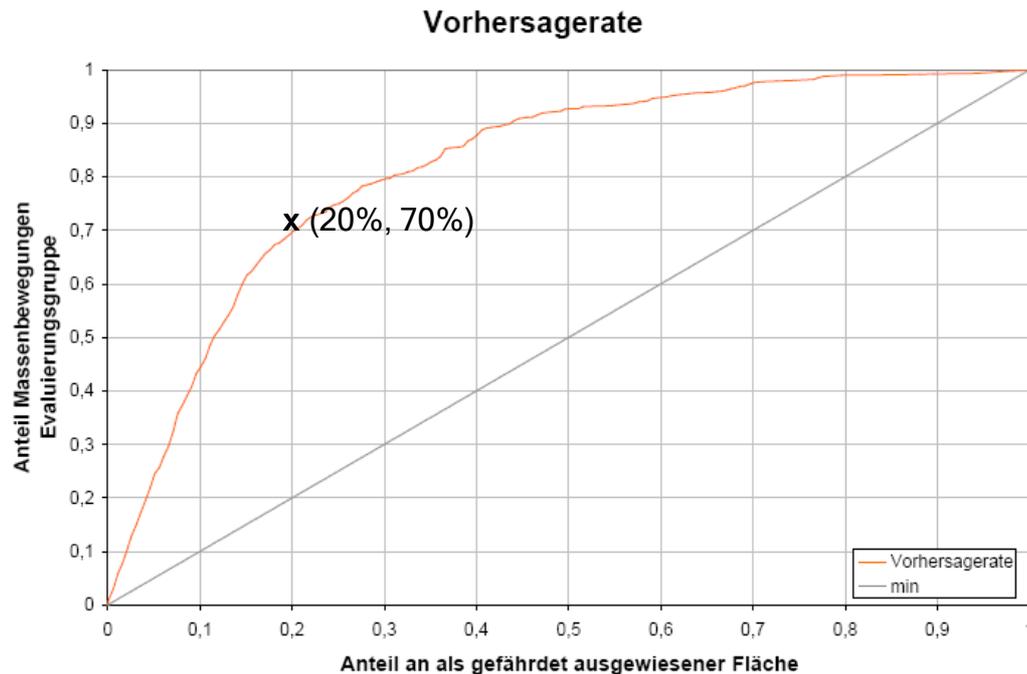


Abb. 4.7: Vorhersagerate: Schema des Diagramms; Beispiel zur Aussage: in 20% der gefährdetsten Flächen liegen 70% aller Massenbewegungen. Die Vorhersagerate sollte über der „min-Linie“ liegen, damit ein signifikantes Ergebnis vorliegt. Darunter liegende Kurven, stellen eine zufällige Verteilung dar.

#### 4.4.3 Geomorphologische Güte

Die geomorphologische Güte (Bell 2007) beschreibt qualitative Anforderungen an die Ergebnisse aus der Modellierung der Gefahrenhinweiskarte. In dem von ihm vorgelegtem Ansatz werden Klassen der geomorphologischen Güte von sehr gering bis sehr hoch unterschieden. Diese Klassen beschreiben, wie gut die tatsächliche Rutschungsgefährdung durch die Gefahrenhinweiskarte wiedergegeben werden kann. Dabei ist die Lage der als gefährdet ausgewiesenen Gebiete entscheidend. Liegt eine hohe Gefährdung auf flachen Gebieten vor, ist die geomorphologische Güte gering. Ein weiterer Grund für eine geringe geomorphologische Güte ist, wenn dort, wo sich bereits viele gravitative Massenbewegungen ereignet haben, eine geringe Gefährdung ausgewiesen wird. Diese Klassen dienen zur Bewertung der Gefahrenhinweiskarte aus einer geomorphologischen Perspektive, womit eine Verbesserung der Ergebnisse aus der statistischen Modellierung aus geomorphologischer Sicht erzielt werden kann. Dies kann auch zur Folge haben, dass eine Karte mit geringeren statistischen Gütemaßen als beste Karte, basierend auf einer hohen geomorphologischen Güte, ausgewählt wird. Ein Nachteil, der durch die Bewertung der Gefahrenhinweiskarten nach geomorphologischer Güte entsteht, ist das gewisse Maß an Subjektivität, dass dadurch in die sonst objektive Analyse miteinbezogen wird. Van Westen (2000) streicht einen positiven Aspekt der Subjektivität hervor: „*However, it should be realised that subjectivity is not necessarily bad, considering that it is based on the opinion of an expert.*“ (Van Westen 2000, S.244).

## 5. Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel soll einerseits über das Untersuchungsgebiet und andererseits über die Ereignisse im August 2005 ein umfassender Überblick gegeben werden.

### 5.1 Allgemeine Fakten über Gasen und Haslau

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Gemeinden Gasen und Haslau mit einer Fläche von 60 km<sup>2</sup> und erstreckt sich auf einer Höhe von 600m NN bis 1.530m NN (Abbildung 5.1).

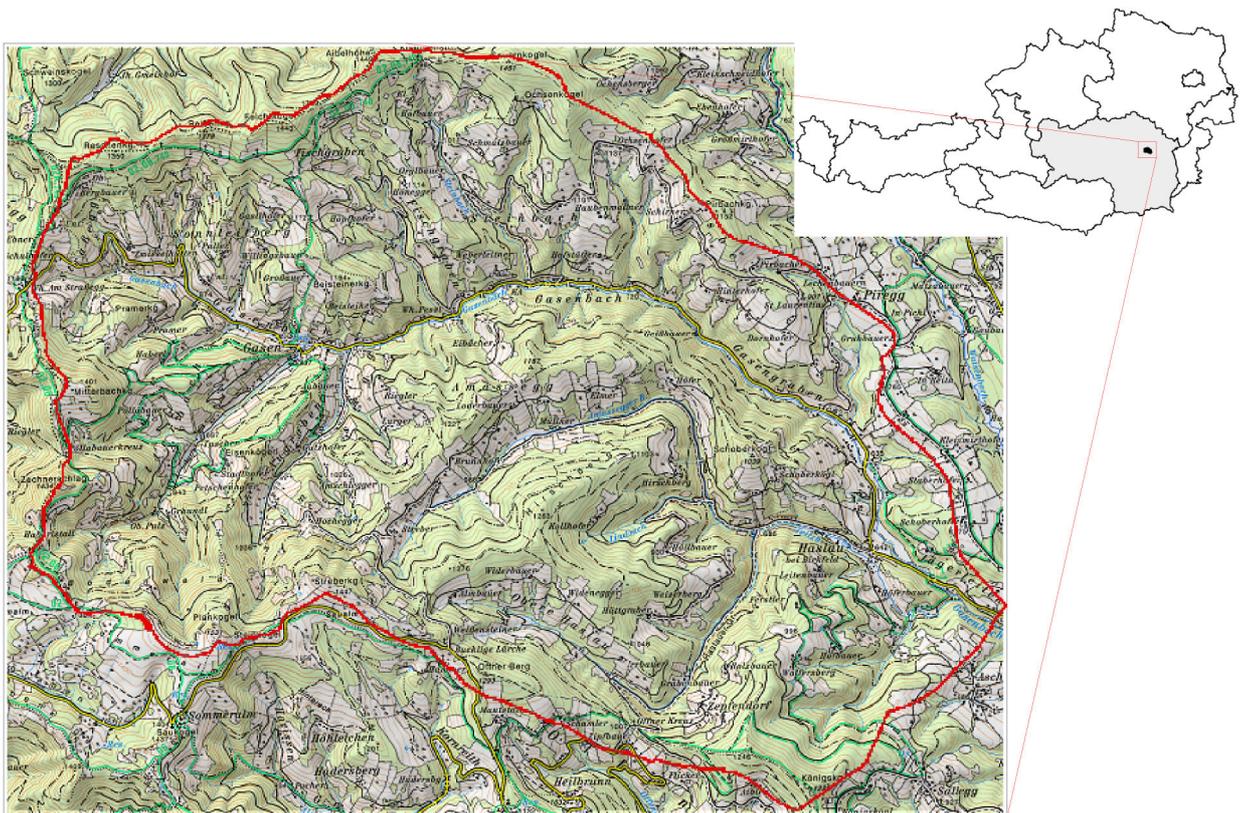


Abb. 5.1: Lage und Topographie des Untersuchungsgebietes; Kartengrundlage ÖK 50 aus AMap Fly - BEV, 2005

Die Gemeinden liegen im Bezirk Weiz in der Nuts III Region Oststeiermark, in den östlichen Zentralalpen, genauer im „steirischen Randgebirge östlich der Mur“ und sind Teil der LEADER II

Region Almenland. Das „steirische Randgebirge östlich der Mur“ umfasst die Gebirgszüge Fischbacher Alpen und Wechsel, welche das Grazer Bergland umschließen. Abgegrenzt wird das steirische Randgebirge im Norden durch die Obersteiermark, die einen Hochgebirgscharakter mit Erhebungen von 1.500m NN bis 2.000m NN aufweist, im Südosten durch das deutlich flachere (bis zu 600m NN) Oststeirische Hügelland, das auch als Riedelland bezeichnet wird. Die LEADER II Region Almenland Teichalm-Sommeralm erstreckt sich über den Nordosten des Grazer Berglandes und südlich der Fischbacher Alpen. Die Gemeinden Gasen und Haslau gehören als Teil der Region Almenland Teichalm-Sommeralm zum größten zusammenhängenden Almgebiet Mitteleuropas (Dax und Hovorka 2003).

Auf dem Gemeindegebiet von Gasen und Haslau fließen u.a. der Gasenbach und der Amassegger Bach. Der Gasenbach fließt in südöstliche Richtung und mündet unterhalb von Birkfeld in die Feistritz. Sein Einzugsgebiet wird im Norden u.a. durch den Sauernkogel (1.451m), die Aibelhöhe (1.449m) und den Feichtkogel (1.443m), im Osten durch den Mitterbachkogel (1.401m) und im Süden durch den Plankogel (1.531m) und den Streberkogel (1.447m) abgegrenzt.

Das Gebiet ist, wie in Abbildung 5.2 gut ersichtlich, durch enge Täler mit einer schmalen Talsohle und einer mittleren Hangneigung von 24° geprägt. Das Landschaftsbild wird außerdem durch zahlreiche Almen und Wiesen und durch die großen Waldgebiete charakterisiert.



Abb. 5.2: Panorama Amassegger Graben; Foto: Ecker 2008

In den zwei Gemeinden leben insgesamt 1.444 Einwohner (im Jahr 2006; Statistik Österreich 2008), auf die Orte Gasen, Amassegg, Mitterbach, Sonnleitberg und Haslau verteilt. Die Bevölkerungsdichte liegt bei ca. 24 Einwohner je km<sup>2</sup>. Die zentralen Orte sind die Dörfer Gasen und Haslau, auf dem restlichen Gemeindegebiet gibt es zahlreiche Einzelgehöfte (Bergbauernhöfe), auf denen nach wie vor auch in höheren Lagen (in 1.200m – 1.500m Höhe) Almwirtschaft betrieben wird.

Wirtschaftlich entwickelten sich die Gemeinden Gasen und Haslau von einem typischen Bergbauggebiet, in dem am Anfang des vorigen Jahrhunderts Arsen, Silber und Magnetit abgebaut wurde, zu eher landwirtschaftlichen Gemeinden. So sind in der Gemeinde Gasen 20,5% der Berufstätigen in der Land- und Forstwirtschaft tätig, in Haslau sind es noch 16,7% (Volkszählung 2001 – Statistik Austria, Berechnung Landesstatistik Steiermark 2008). Diese Anteile der Berufstätigen in der Land- und Forstwirtschaft sind im Vergleich zum Bezirk Weiz mit 9,3% und dem Land Steiermark mit 5,6% sehr hoch. Die Gemeinde Gasen hat außerdem den höchsten Anteil an Bergbauern der Steiermark.

## 5.2 Klima

Das Untersuchungsgebiet ist in den Tallagen der Klimaregion Feistritztal, aber in den Berglagen der Klimaregion Fischbacher Alpen mit Grazer Bergland und Wechsel zuzuordnen, wie in Abbildung 5.3 dargestellt.

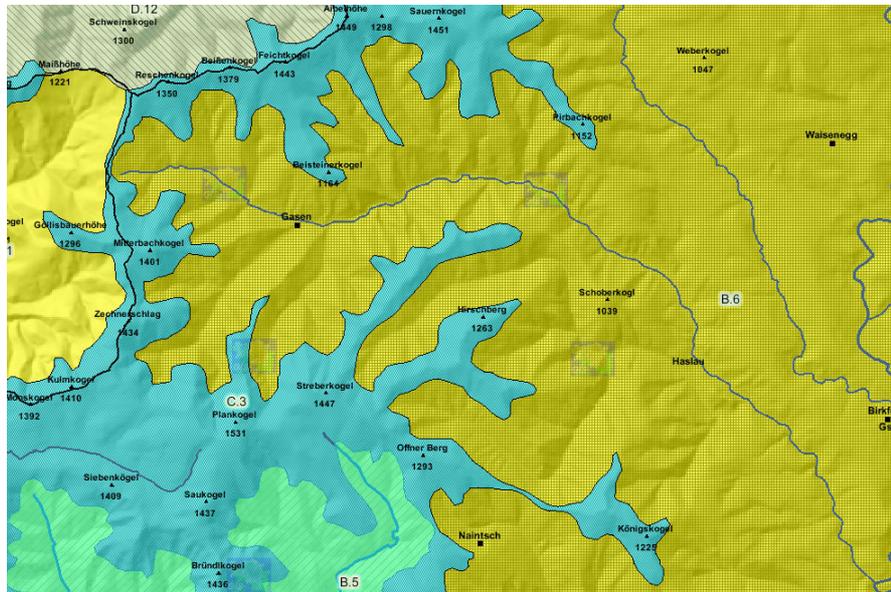


Abb. 5.3: Klimaregionen der Steiermark, Ausschnitt des Untersuchungsgebiets. B.6-Klimaregion Feistritztal, C.3-Klimaregion Fischbacher Alpen mit Grazer Bergland, aus digitaler Atlas Steiermark 2008

Die Klimaregion Feistritztal kennzeichnet laut Landesumweltinformationssystem (LUIS 2008) Talbereiche innerhalb des steirischen Randgebirges, die zumeist eine sehr enge Talsohle aufweisen. Das Klima zeigt hier schwach ausgeprägte kontinentale Charakteristika. In Birkfeld herrscht im Jänner eine Durchschnittstemperatur von  $-3,3^{\circ}\text{C}$  und im Juli von  $17,2^{\circ}\text{C}$ . Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei  $5,9^{\circ}\text{C}$ , dabei sind ca. 125 bis 130 Frosttage, hingegen nur 30 Sommertage im Jahr zu verzeichnen. Die Station Birkfeld liegt in thermisch begünstigter Talrandlage, weshalb diese Werte nur Richtwerte für die Tallagen des Untersuchungsgebiets darstellen. Das Gebiet zählt zu den gewitterreichsten der Steiermark, was sich auch in den hohen 24-h-Niederschlagsmaxima ausdrückt. So liegt der 100jährige Wert für Rettenegg bei 112mm, für St.Johann am Herberstein bei 152mm. Der Jahresniederschlag beträgt in Rettenegg 1.092mm, in Birkfeld 957mm.

Die Schneedecke hält sich in diesem Gebiet ca. 80 bis 90 Tage, aber die Schneesicherheit und Schneemenge ist sehr gering, was sich negativ auf den Wintertourismus auswirkt.

In den höheren Lagen, ab einer Seehöhe von etwa 1.000m spricht man in diesem Gebiet von der Klimaregion Fischbacher Alpen mit Grazer Bergland und Wechsel. Diese Klimaregion ist laut LUIS (2008) gekennzeichnet durch eine gute Durchlüftung, häufig aufliegende Wolken und daher eine erhöhte Anzahl von Nebeltagen. Des weiteren tritt hier eine hohe Jahresniederschlagssumme von 1.200mm bis 1.300mm in Kammlagen auf, mit einem Niederschlagsmaximum im Sommer, wobei

sich an durchschnittlich 40 bis 50 Tagen im Jahr Gewitter ereignen. Die Monatsdurchschnittstemperatur liegt im Bereich der Klimaregion zwischen  $-4,5^{\circ}\text{C}$  und  $-6^{\circ}\text{C}$  im Jänner und  $15^{\circ}\text{C}$  bis  $16^{\circ}\text{C}$  im Juli. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt zwischen  $4^{\circ}\text{C}$  bis  $6^{\circ}\text{C}$  in dieser Klimaregion.

Die Lage des Untersuchungsgebietes zwischen den Fischbacher Alpen und den hohen Erhebungen des Grazer Berglandes beeinflusst das Niederschlagsgeschehen maßgeblich. Wie im Bericht des BFW (Andreca et al. 2007) dargestellt, ist das Untersuchungsgebiet im Winter hinsichtlich nordalpiner und südalpiner Niederschlagslagen gut abgeschirmt, weshalb die Nord- und Südstaulagen hier nicht so niederschlagsintensiv sind wie in den nördlichen bzw. südlichen Randgebieten der Alpen. Im Gegensatz dazu gewinnen im Winter die südostalpinen Niederschlagslagen mit zyklonalen Lagen an Bedeutung, was sich durch eine Niederschlagsarmut im Winter ausdrückt. Im Sommer zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Zu dieser Jahreszeit sind alle nord- und gesamtalpinen Niederschlagslagen von großer Bedeutung, was sich vor allem in kurzzeitigen, an Fronten gebundene Gewitter äußert. Dadurch ergibt sich eine Jahresniederschlagssumme von etwa 1.000mm im Untersuchungsgebiet.

### 5.3 Geologie

Die Geologie im Untersuchungsgebiet ist stark geprägt durch die Lage im ostalpinen Deckenstapel. Dieser Deckenstapel wird im Allgemeinen durch ein unter-, mittel- und oberostalpinen Stockwerk gegliedert (Flügel 1984). Im Untersuchungsgebiet ist das oberostalpine Stockwerk mit dem Grazer Paläozoikum und der höher metamorphen Scholle, dem Angerkristallin, am stärksten repräsentiert, was auch in der geologischen Karte des Untersuchungsgebietes (Abbildung A.3 im Anhang) ersichtlich ist.

Laut Flügel (1984) ist das **Grazer Paläozoikum (GP)**, das vor allem im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes vorkommt, von mehreren Faziesdecken geprägt. Hier ist die Passailer Gruppe mit dem Passailer Pyllit und dem Heilbrunner Phyllit zu finden. Die Passailer Gruppe ist eine epizonale, vulkanogen-sedimentäre Entwicklung von Silt- und Tonschiefern mit Einschaltungen von Sandsteinen und basaltischen Effusiva und bildet eine tiefe tektonische Schuppe im Grazer Paläozoikum. Eine weitere Gruppe des Grazer Paläozoikums bildet die Schöckelgruppe, deren primärer Gesteinsverband stark tektonisch überarbeitet wurde. Hier treten vor allem die Arzberger Schichten auf, die aus einer Folge von dunklen graphitischen Kalken bis Karbonatschiefer, wechsellagernd mit Schwarz- bis Serizitschiefern bestehen.

Zu den **höhermetamorphen Schollen** des oberostalpinen Deckenstockwerkes zählen laut Flügel (1984) Gesteinszüge mit stärkerer voralpidischer Metamorphose, wie das im Untersuchungsgebiet auftretende Angerkristallin. Das Angerkristallin ist durch die Gesteinsvorkommen von Glimmerschiefer und phyllitischem Glimmerschiefer, Marmor und Amphibolit und Grünschiefer geprägt.

Die geotechnischen Eigenschaften des im Untersuchungsgebiet dominierenden phyllitischen Glimmerschiefers werden durch das Trennflächensystem der Glimmerschiefer maßgeblich beeinflusst. Durch den erheblichen Glimmeranteil weisen sowohl Phyllite als auch Glimmerschiefer eine erhöhte Teilbeweglichkeit entlang der Phyllosilikat-Flächen auf, was auch die hydrologische Situation beeinflusst (Andrecs et al. 2007).

Zur Strukturgeologie wurde von der GBA (Tilch et al. 2007) und dem BFW (Andrecs et al. 2007) im Untersuchungsgebiet ein generelles Schieferungseinfallen nach SW-W mit Mittelwerten von  $200^{\circ}$  -  $250^{\circ}$  mit einem Einfallswinkel zwischen  $40^{\circ}$  –  $68^{\circ}$  festgestellt.

### 5.4 Landnutzung und Boden

Die Besiedelung dieses Raumes reicht bis ins Mittelalter zurück. In dieser Zeit wurde auf dem Plankogel nach Silber, Blei und Arsen geschürft (Kohlfürst, in Jeitler 1969).

Nach Jeitler (1969) wurde seit jeher in diesem Gebiet Landwirtschaft betrieben, wenn auch bis in die 1950er Jahre ohne marktwirtschaftliche Ausrichtung. Die Bauern waren Selbstversorger und säten bis in hohe Lagen Getreide und andere Feldfrüchte. Die restlichen waldfreien Flächen waren Hutweiden (mit Sträuchern bewachsen) und Wiesen. Der Weideplatz für das Vieh war dadurch stark eingeschränkt, weshalb auch noch bis Mitte/Ende der 1950er Jahre Waldweiden üblich waren. Im Jahr 1955 gab es im Untersuchungsgebiet eine große landwirtschaftliche Umstellungskampagne, deren Ziel es war, die zum Teil sehr veralterten Selbstversorgerbetriebe zu verbessern, damit eine „moderne“ Landwirtschaft möglich wird, und Gewinne aus der Land- und Forstwirtschaft entstehen. Dabei sollten vor allem die Vieh- und die Forstwirtschaft gut ausgebaut werden, weil diese Wirtschaftsformen im steilen Gelände leichter ausführbar sind. Im Zuge der Umstellung wurden viele Hutweiden entweder aufgeforstet oder gerodet, und Felder wurden zu Grünlandflächen. Durch diese Maßnahmen sind zusätzliche Weideflächen entstanden und die Waldweide wurde weitgehend abgeschafft. Das Betreiben der Waldweide hatte große Auswirkungen auf die Zuwachsraten in Altbeständen der Wälder und durch das Einstellen dieser Praxis konnten die Erträge der Forstwirtschaft zusätzlich erhöht werden. Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Umstellung war die Erschließung der Höfe mit Straßen, die mit LKW befahrbar sind. In einem Generalprojekt der Landeskammer Steiermark wurden im Umstellungsgebiet Gasen- Heilbrunn, bis Ende 1967 120km Hofaufschließungswege und 95km Forstaufschließungswege gebaut.

Dieses Bild einer modernen Landwirtschaft spiegelt sich auch heute noch in den Flächenanteilen der Landnutzung wieder. Laut digitaler Katastralmappe (Tabelle 5.1, BEV seit 1989) sind zirka 60% des Untersuchungsgebietes mit Wald bedeckt. 32% der Fläche sind als Wiese, Weide oder Alm ausgewiesen. Straßenanlagen nehmen knappe 3% des Untersuchungsgebietes ein. Die Karte der digitalen Katastralmappe ist im Anhang in Abbildung A.2 zu finden.

Tab. 5.1: Landnutzungsarten in Prozent an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets, berechnet aus der digitalen Katastralmappe (BEV seit 1989)

Landnutzungsart	Prozentanteil
Wald	59,8 %
Wiese	21,1 %
Weide	8,5 %
Hutweide	2,9 %
Straßenanlage	2,8 %
Alm	2,7 %
Gewässer, Baufläche begrünt, landwirtschaftlich genutzte Fläche, Acker, Gebäude, Baufläche befestigt, Streuobstwiese, Ödland, Erholungsfläche, technische Ver- u. Entsorgungsanlage, Friedhof	jeweils < 1 %

Die Beschreibung der **Bodenklassen** im Untersuchungsgebiet ist durch den großen Anteil von Wald geprägt. In den Waldgebieten überwiegt, laut forstlicher Standortskarte, die Bodenklasse der kolluvialen Braunerde. Leider ist diese Kartierung schon sehr alt und damals nicht von Experten durchgeführt worden, weshalb man sich nicht zu sehr darauf stützen kann.

Die landwirtschaftliche Bodenkartierung ist nur für waldfreie Gebiete vorhanden. Hier überwiegt die Bodenklasse „Felsbraunerde“ an Hängen über 25° Neigung, an Hängen oder Rücken, Kuppen und Oberhängen. In den zahlreichen Gräben kommt die Bodenklasse „Bodenformkomplex“ vor. Für ca. 16% des Untersuchungsgebietes liegen keine Informationen zur Bodenklasse vor.

Die Bodenart wurde vom BFW (Andrecs et al. 2007) an insgesamt 18 gravitativen Massenbewegungen vom August 2005 analysiert und nach den Korngrößenbereichen und Hauptkomponenten eingeordnet. So konnten die Ergebnisse in drei Kategorien unterschieden werden: Feinkörniger Boden mit Schluff und Ton, Feinkörniger Boden mit Schluff und Sand und Gemischtkörniger Boden. Laut ihren Untersuchungen bestehen die Böden der untersuchten gravitativen Massenbewegungen zu 75% aus feinkörnigen Böden. Der Feinkornanteil beträgt mehr als 40% und es überwiegen tonige Schluffe und schluffige Tone. Der feinkörnige Boden aus Schluff und Sand besteht vorwiegend aus sandigem Schluff und der Feinkornanteil liegt wieder über 40%. Die Gemischtkörnigen Böden haben einen Feinkornanteil von maximal 40% und die Korngrößen der aus dem umgebenden Gestein entstanden Komponenten, liegen im Zentimeter bis Dezimeter Bereich. Dazwischen findet sich wiederum feinkörnige Matrix.

## 5.5 Geomorphologie und gravitative Massenbewegungen

Die Mittelgebirgslandschaft des Untersuchungsgebietes ist durch enge Kerbtäler mit keinem bis oft nur sehr schmalen Talboden gekennzeichnet. Der Talboden ist bei Gasen (Dorf), an der Stelle wo der Mitterbach in den Gasenbach mündet, etwas breiter ausgebildet. In manchen Gebieten weisen die oberen Hangbereiche eine geringere Hangneigung im Vergleich zu den steileren Unterhängen auf. Abbildung 5.4 zeigt einen Blick auf den Ort Gasen und die für das Untersuchungsgebiet charakteristische umgebende Landschaft aus der Vogelperspektive.



Abb. 5.4: Blick auf Gasen, im Vordergrund Hangrutschungen vom August 2005; Hubschrauberaufnahme Gemeinde Gasen 2005

Der Faktor Mensch spielt in der rezenten geomorphologischen Formung eine große Rolle. Eine anthropogene Beeinflussung der Geomorphologie erfolgte unter anderem durch die landwirtschaftliche Nutzung, genauer den Ackerbau bis in hohe Lagen, wodurch sogenannte Ackerterrassen entstanden sind. Diese entstanden nach Embleton-Hamann (2007) durch hangparalleles Pflügen wobei die Scholle der Erde immer hangabwärts gewendet wurde, um so eine Verflachung des Terrains und damit eine leichtere Bewirtschaftung zu erzielen. Die im Lauf der Zeit dadurch entstandenen deutlichen Terrassenabsätze, werden als Ackerterrassen bezeichnet. Weitere anthropogenetische Änderungen der Geomorphologie des Untersuchungsgebietes erfolgten durch den Wege- und Straßenbau zur Erschließung der Wälder und Höfe und durch das Anlegen von Böschungen durch Einebnen von Flächen (z.B. für den Hausbau, Sportplatz, oder Flächengewinnung für die Ansiedlung von Industriebetrieben), weil größere ebene Flächen auf dem Gemeindegebiet in der Nähe von Ortschaften fehlen.

Gravitative Massenbewegungen sind, neben der anthropogenen Beeinflussung, als wichtige oberflächenformende Prozesse zu sehen.

Informationen zu früher ereigneten gravitativen Massenbewegungen sind laut BFW (Andrecs et al. 2007) z.B. aus dem Gefahrenzonenplan der WLW (1997) für die Gemeinde Gasen, ersichtlich. Der

älteste Hinweis auf Naturgefahren stammt aus dem Jahr 1891, indem sich zwei Hochwasserereignisse in den Einzugsgebieten des Mitterbaches und des Aubaches ereignet haben. Es wurden in diesem Gefahrenzonenplan aber eher Gefahren durch Hochwasser beschrieben, nur zwei Berichte aus dem Jahr 1972 berichten von zahlreichen „Erdlawinen“.

In Haslau liegt auch ein Gefahrenzonenplan aus dem Jahr 2004 vor. Dieser wurde nach Hochwasserereignissen im August 2004 erstellt und enthält allgemeine Hinweise auf „Rutschungsvorgänge“ (Andrecs et al. 2007). Im Juli 1989 und im Juni 1963 kam es in der Gemeinde Haslau zu Starkregenereignissen, die „Hochwasser, Abrutschungen, Vermurungen und Hangbrüche“ zur Folge hatten (Andrecs et al. 2007).

Die vorherrschenden gravitativen Massenbewegungsarten im Untersuchungsgebiet sind flachgründige Hangrutschungen und Hangmuren. An einzelnen kleinen Gräben treten nach Starkniederschlägen auch Muren auf, was an einigen kleineren Murkegeln erkennbar ist. Hochwasser spielen in diesem Gebiet eine eher untergeordnete Rolle, was sich auch bei den Ereignissen im August 2005 bestätigt hat. Eine nähere Beschreibung dieser Ereignisse erfolgt im nächsten Kapitel.

## **5.6 Ereignisse im August 2005**

In der Nacht von 21. auf 22. August ereigneten sich im Jahr 2005 nach Starkniederschlagsereignissen mehr als 500 gravitative Massenbewegungen, die neben hohen wirtschaftlichen Schäden auch zwei Todesopfer forderten. Im Folgenden sollen kurz die auslösenden Faktoren für diese Ereignisse und auch die aufgetretenen Schäden näher beschrieben werden. Informationen dazu stammen aus den Berichten der Abteilung für Ingenieurgeologie (Tilch et al. 2007) und des BFW (Andrecs, et al. 2007).

### **5.6.1 Mögliche auslösende Faktoren**

Als mögliche auslösende Faktoren werden in den Berichten von der GBA (Tilch et al. 2007) und dem BFW (Andrecs et al. 2007) immer wieder die Faktoren Niederschlag und Vorbefeuchtung der Böden und der anthropogene Einfluss in Form des Anlegens von Forstwegen beschrieben. Im Folgenden werden die wichtigsten Informationen dazu kurz erläutert.

#### **5.6.1.1 Niederschlag**

In Abbildung 5.5 sind die Niederschlagssummen vom 19.8.2005 bis zum 23.8.2005 für jeden Tag und die Gesamtniederschlagssumme vom 19.-24.8.2005 für ganz Österreich dargestellt. Diese

Niederschlagsmengen von bis zu 220 mm/d, sind durch das Genua-Tief, einer so genannten Vb-Wetterlage, entstanden und hatten im Westen Österreichs zahlreiche Hochwasser, hingegen im Osten Österreichs (Oststeiermark) viele gravitative Massenbewegungen zur Folge. Dieses Genua-Tief wanderte vom 20.8. bis zum 21./22.8.2005 vom Süd- Südosten Österreichs über Tschechien und Polen schließlich zum Alpenhauptkamm, wo es durch eine starke Nordanströmung und durch den Stau effekt im Luv der Gebirgskämme weiter verstärkt wurde, und so nicht nur in den Süd-Südöstlichen Gebieten sondern auch im Westen Österreichs für ergiebige Niederschläge sorgte (BMLFUW 2006a).

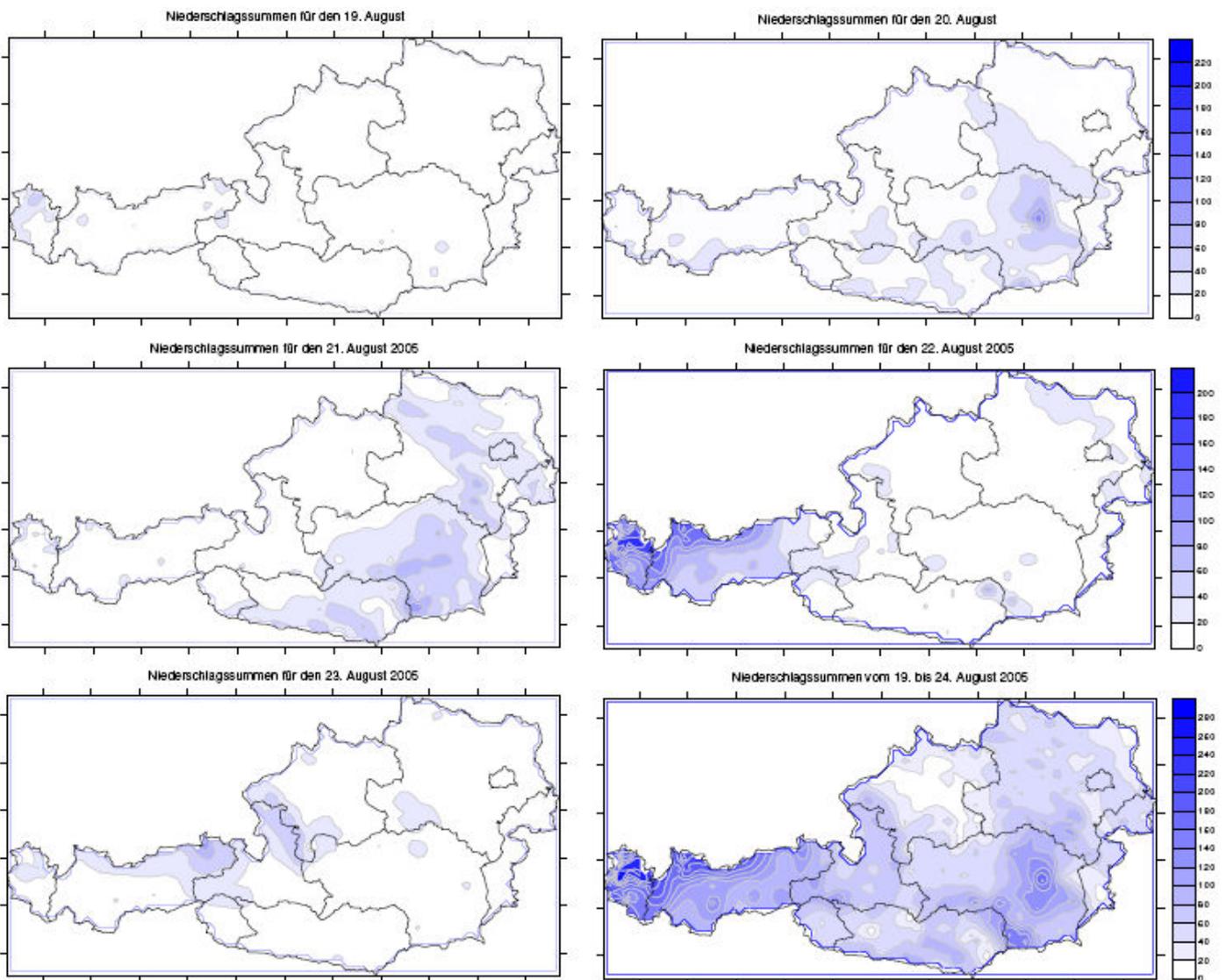


Abb. 5.5: Darstellung der Niederschlagstagesummen vom 19.-23.August 2005; BMLFUW 2006b

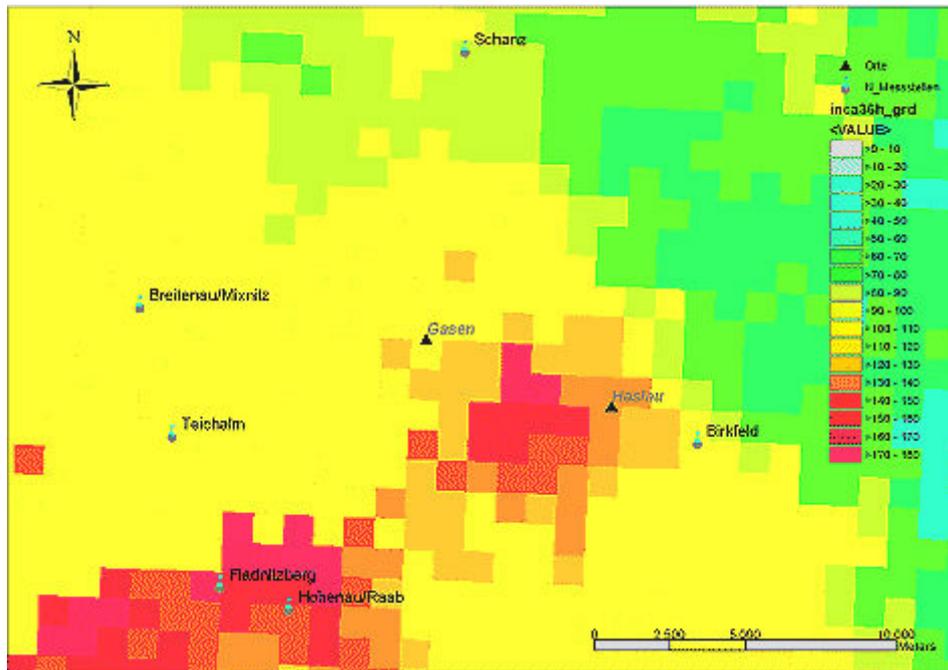


Abb. 5.6: Gesamtniederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet (INCA, 20.8.2005 12:01 - 21.8.2005, 24:00, 1km Raster), und umliegende permanente Messstellen BFW 2007

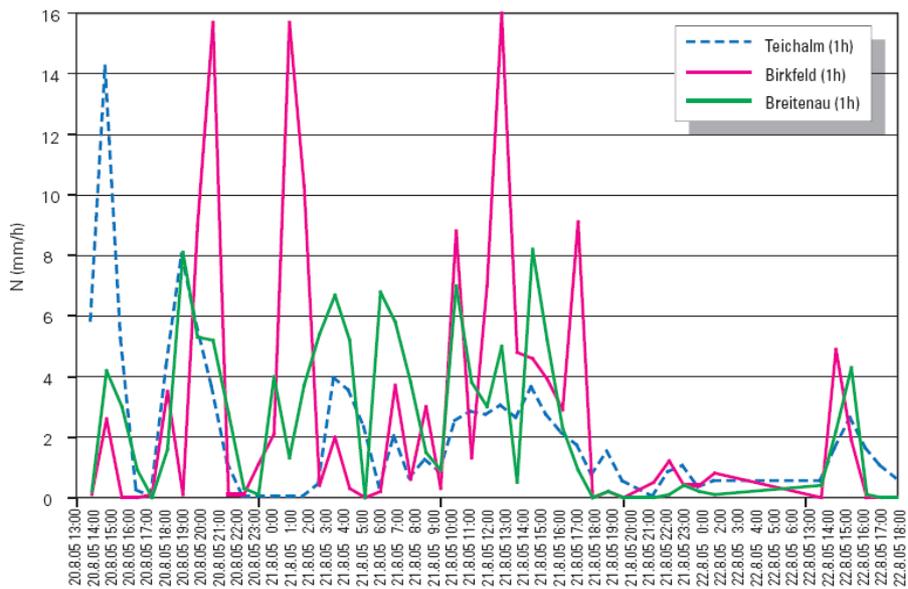


Abb. 5.7: Niederschlagsstundensummen für die umliegenden kontinuierlichen Messstellen des Hydrologischen Landesdienstes der Steiermark. BFW 2007

Im Untersuchungsgebiet gibt es keine permanent eingerichteten Niederschlagsmessstellen, weshalb sich die Aussagen hier auf die umliegenden Messstellen Birkfeld, Teichalm, Breitenau, Hohenau/Raab und Schanz und die aus INCA ermittelten Niederschlagssummen stützen (Abbildung 5.6). Mit Hilfe des von Haiden et al. (2006) entwickelten Nowcasting Systems „INCA“ der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), konnten mittels einer Kombination von Interpolation von Wetterstationsmessdaten mit Radarinformationen, die Niederschlagssummen für das gesamte Gebiet ermittelt werden. Diese zeigen wichtige Informationen zur hohen räumlichen

Variabilität des Niederschlages auf, womit eine bessere Beschreibung der Niederschlagssituation im August 2005 erfolgen kann. Dies liefert auch einen zusätzlichen Aspekt für die Interpretation der aufgetretenen räumlichen Verteilung der gravitativen Massenbewegungen. INCA Daten sind in freiwählbarer Auflösung erhältlich, in Abbildung 5.6 ist die räumliche Variabilität des Gesamtniederschlags mit einer räumlichen Auflösung von 1km dargestellt.

Im Folgenden sollen kurz der Ereignisablauf und die aufgetretenen Niederschlagssummen beschrieben werden. Der Niederschlag setzte im Untersuchungsgebiet am 20.8. 2005 zu Mittag ein und hielt bis in der Nacht von 21.8. auf den 22.8. an. Der Ablauf des Niederschlagsereignisses war durch einzelne konvektive Schauer geprägt, was deutlich in den einzelnen Stundenspitzen zeigt (Andreca et al. 2007).

Die Niederschlagsstundensummen (Abbildung 5.7) mit max 16mm/h (Station Birkfeld) sind nicht außergewöhnlich hoch und liegen sogar unter den Mengen für ein 2-jähriges Ereignis (25mm in 15min; Lorenz und Skoda, 2003 in Andreca et al. 2007). Die Intensitäten des Niederschlages sind also nicht auffällig hoch, im Gegensatz dazu lagen die Tagesniederschlagssummen zum Teil sogar über den 100jährigen Messreihen. So liegt die maximale beobachtete Zweitagesniederschlagssumme der Station Birkfeld bei 90mm (Beobachtungszeitraum 20 Jahre; Hydrographischer Dienst in Österreich, Andreca et al. 2007), aber im Untersuchungsgebiet wurden laut Anrainern 210mm-220mm in 36h gemessen. Mit dem INCA System wurde vom 20.8. 12Uhr bis zum 21.8. 24Uhr (36h) eine Gesamtniederschlagsmenge von 100mm bis zu max. 170-180mm ermittelt.

Es war aber nicht nur der unmittelbar vor oder zu den Ereignissen gefallene Niederschlag für die Auslösung der gravitativen Massenbewegungen von Bedeutung, sondern auch die Vorbefeuchtung des Gebietes war ein bedeutender vorbereitender Faktor (Andreca et al. 2007, Tilch et al. 2007). Wie in Tabelle 5.2 (Andreca et al. 2007) für die umliegenden Messstellen angeführt, kam es auch schon im Juli und Anfang August zu sehr hohen Niederschlagssummen. Die Station Birkfeld, die in der Nähe der Gemeinden Gasen und Haslau liegt, verzeichnet hier 233 mm für den Monat Juli 2005, was im Vergleich zum Durchschnitt von 139 mm aus Messungen der letzten 40 Jahre, ein deutlich höherer Wert ist. Ein ähnliches Bild zeigen auch die anderen Messstationen im Umfeld. Insgesamt gab es bei der Station Birkfeld vor den Ereignissen (1.7.-19.8.2005) zirka 303 mm Vorniederschlag. Gerade auch bei der Vorbefeuchtung muss die räumliche Variabilität des Niederschlages beachtet werden. Denn obwohl die Niederschläge im Ereigniszeitraum bei Haslau deutlich höher waren, kam es im Raum Gasen dennoch zu vielen gravitativen Massenbewegungen, was sich auf die höhere Vorbefeuchtung in diesem Gebiet zurückführen lässt (Andreca et al. 2007). Die Vorbefeuchtung der Böden ist insofern von Bedeutung weil je nach Speicherkapazität der Bodenform nach dem 19.8.2005 für jede Bodenform eine unterschiedliche Bodenfeuchte vorliegt, die u.a. als ein vorbereitender Faktor für gravitative Massenbewegungen gilt. Durch die geringen Niederschlagsintensitäten hatte das Wasser auch genügend Zeit um in den Boden einsickern zu können. So war die Kombination von Vorfeuchte und Bodenform neben der Geomorphologie laut BFW (Andreca et al. 2007) ein wesentlicher Faktor, der das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen beeinflusste.

Tab. 5.2: Vorniederschlagsmengen vom 1.-19. August, 1.-31. Juli und 1. Juli bis 19. August der umliegenden Messstellen des Hydrographischen Landesdienstes der Steiermark, im Vergleich mit den Durchschnittlichen Monatssummen an den Messstellen. Andrecs et al. 2007

Messstelle	Niederschlag 2005			Durchschnitt	
	1.-19.8. (mm)	Juli (mm)	1.7.-19.8. (mm)	Juli (mm) 1961-1990	August (mm) 1961-1990
Birkfeld	71	233	303	139	115
Breitenau/Mixnitz	113	204	317	128	121
Hohenau/Raab	76	280	355	112	122
Schanz (Fischbach)	93	277	370	121	126
Teichalm	93	252	344	151	124

### 5.6.1.2 Anthropogener Einfluss

Laut Pilotstudie der GBA (Tilch et al. 2007) sind 74% aller Abrissbereiche im Bereich von Böschungen, also anthropogen angelegten Hängen, angesiedelt. Bei näherer Betrachtung fallen vor allem die berg- und talseitigen Böschungen des Straßen- und Wegenetzes auf, denn hier sind zwei Drittel aller Abrissbereiche aufgetreten. Weitere Böschungen finden sich bei anderen Hanganschnitten u.a. beim Hausbau, Ansiedlung von Industrie, oder am Sportplatz, wo 4% der Anrisse positioniert waren. Auch Ackerterrassen spiegeln einen anthropogenen Einfluss auf die Anrisse wider, hier ereigneten sich etwa 4% aller gravitativer Massenbewegungen.

### 5.2.2 Folgen – Schäden

Infolge der gravitativen Massenbewegungen waren zwei Todesopfer und zahlreiche Sachschäden in den Gemeinden Gasen und Haslau zu beklagen. Die Opfer befanden sich in einem Haus, das zur Hälfte von einer Hangmure weggerissen wurde. Das Spektrum der im Untersuchungsgebiet aufgetretenen Naturgefahren, reicht von gravitativen Massenbewegungen, wie Hangrutschungen und Muren, bis zu Hochwasser, die ebenfalls das Gebiet im August 2005 prägten.

Das BFW (Andrecs et al. 2007) hat das Ausmaß der Sachschäden in einer Tabelle (5.3) zusammengefasst. Beim Blick auf die Anzahl zerstörter oder beschädigter Objekte fällt auf, dass sehr viele Schäden an Gemeindestraßen und Landstraßen aufgetreten sind. Hochwasser hatten wie schon erwähnt eine geringere Bedeutung im Untersuchungsgebiet, was sich auch in den Schadenszahlen widerspiegelt. Indirekte Schäden wurden in dieser Statistik nicht berücksichtigt, obwohl die Auswirkungen der Ereignisse auf den für die Gemeinden sehr wichtigen Tourismus nicht unterschätzt werden dürfen. Hierzu zählen indirekte Schäden z.B. infolge von Straßensperren, wie im Fall der L104: hier wurde der Hang der „Bergleitung Beisteinerkogel“ durch einen Murabgang

instabil und drohte abzurutschen. Aufgrund dessen wurde die Straße über einen Monat gesperrt, was große wirtschaftliche Schäden für die Fremdenverkehrsbetriebe anrichtete.

Tab.5.3: Ausmaß der Sachschäden in den Gemeinden Gasen und Haslau; in Stück bzw. bei Verkehrswegen in Laufmetern; zerstört = Verkehrsweg, der nicht mehr passierbar ist, Gebäude, das nicht mehr bewohnbar ist, beschädigt = Verkehrsweg, der passierbar ist aber Schäden aufweist, ein Gebäude, das nach Reparaturarbeiten wieder bewohnbar ist; nach Andrecs et al. 2007

Gemeinde	Schadensausmaß							
	Gravitative Massenbewegungen			Hochwasser			Gesamt	
	Schaden s- ereignis- se	zerstört e Objekte	beschädigt e Objekte	Schaden- ereignisse	zerstört e Objekte	beschädigte Objekte	zerstört e Objekte	beschädigt e Objekte
<b>Gemeinde Gasen</b>								
Wohngebäude	5	3	4	4	k.A.	4	3	8
Wirtschaftsgebäude	5	2	3	1	k.A.	1	2	4
Fremdenverkehrsbetriebe	1	k.A.	1	k.A.	k.A.	k.A.	0	1
Bauhütten, Schuppen	3	2	1	4	k.A.	6	2	7
Landesstraßen	7	30	230	4	k.A.	90	30	320
Gemeindestraßen	37	239	1297	5	10	161	249	1458
Vieh	1	1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	0
Sonstiges	22	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Gemeinde Haslau</b>								
Wohngebäude	9	k.A.	10	3	k.A.	4	0	14
Wirtschaftsgebäude	5	1	5	4	k.A.	5	1	10
Fremdenverkehrsbetriebe	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	0
Bauhütten, Schuppen	4	2	2	1	k.A.	2	2	4
Landesstraßen	k.A.	k.A.	k.A.	1	k.A.	20	0	20
Gemeindestraßen	28	535	645	4	k.A.	110	535	755
Vieh	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0	k.A.
Sonstiges	4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

### 5.2.3 Bisherige Arbeiten im Gebiet

Momentan sind im Untersuchungsgebiet die Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt (GBA), das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und die Wildbach (WLV) tätig. Außerdem wurden unter anderem von der Firma Geolith Gutachten bezüglich der Stabilität einzelner Hänge oder Böschungen erstellt, die bei den Gemeinden vorliegen.

Seitens der Abteilung für Ingenieurgeologie der GBA wurde unmittelbar nach den Ereignissen und später im Zuge eines 14-tägigen Geländeaufenthalts, eine Kartierung der gravitativen

Massenbewegungen (insgesamt etwa 500) durchgeführt und anschließend digitalisiert. Außerdem wurden die Angaben zu den gravitativen Massenbewegungen noch mit Informationen aus den Privatschadensausweisen der Gemeinden verbessert, bzw. konnten dadurch noch weitere gravitative Massenbewegungen lokalisiert werden. Diese Arbeiten wurden in einem internen Bericht zur Pilotstudie eingehend beschrieben (Tilch et al. 2007). Außerdem haben Mitarbeiter der GBA auch Suszeptibilitätskarten mit einer bivariaten Statistik und der Methode der neuronalen Netze erstellt (Schwarz et al. 2007).

Das BFW hat ebenfalls Kartierungen von den aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen durchgeführt. Des weiteren liegt ein detaillierter Bericht zu den Ereignissen im August 2005 in Form einer BFW-Dokumentation (Andreacs et al. 2007) vor.

Die WLW, Gebietsbauleitung Ost- und Weststeiermark, ist in den Gemeinden für die Erstellung der Gefahrenzonenpläne und die Errichtung von Schutzverbauungen für Hochwasser und Rutschungen zuständig. Aktuell ist, neben einigen Schutzbauwerken, die Revision des Gefahrenzonenplans für die Gemeinde Gasen im Sommer 2008 erschienen. Entsprechender liegt auf dem Gemeindeamt und bei der Gebietsbauleitung Ost- und Weststeiermark auf.

Auf den Gemeindeämtern sind einige weitere Gutachten erhältlich (Tilch et al. 2007). Es handelt sich dabei einerseits um geologische Gutachten u.a. von Mitarbeitern der Landesregierung Steiermark, statische Gutachten zur Stabilität von Häusern, die von gravitativen Massenbewegungen in Mitleidenschaft gezogen wurden und auch hydrologische Gutachten.

## **6. Ergebnisse**

### **6.1 Ergebnisse aus der Datenaufbereitung in ArcInfo und SPM**

In diesem Kapitel sollen die aus der Datenaufbereitung entstandenen kategorischen und numerischen Datensätze beschrieben werden.

#### **6.1.1 Kategorische Daten**

In diesem Kapitel werden exemplarisch für alle kategorische Datensätze die Ergebnisse der digitalen Katastralmappe und zusätzlich die Ergebnisse der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen vorgestellt. Grund für die Wahl der digitalen Katastralmappe ist, dass diese den größten Maßstab, mit 1:1.000, aller kategorischen Datensätze vorliegt, und hier Änderungen aufgrund verschiedener Rasterweiten in den ursprünglichen Einheiten am deutlichsten sichtbar werden. Die nähere Beschreibung der Ergebnisse des Datensatzes der gravitativen Massenbewegungen ist aufgrund der Änderungen in der Größe der einzelnen Flächen der gravitativen Massenbewegungen, was später noch näher erläutert wird, bedeutend.

Durch die Konvertierung der digitalen Katastralmappe mit einer Rasterweite von 10m entstand ein Datensatz über die Landnutzung mit 19 Landnutzungseinheiten. Diese 19 Einheiten sind jeweils mit einer Kennzahl versehen, was eine eindeutige Zuordnung von Landnutzungsarten ermöglicht. Im Gegensatz zum Datensatz mit einer 10m Rasterweite war die Umwandlung in die 50m Rasterweite nicht ohne Verluste durchführbar. In der 50m Auflösung der digitalen Katastralmappe sind aufgrund ihrer Größe und dem angewendeten Zuordnungsalgorithmus über die Pixelmitte in ArcInfo 9.2, die Kategorien „60 - Gewässer stehend“ und „98 - Werksgelände“ nicht mehr vorhanden. Ein Verschwinden von Einheiten dieser Art ist nur im Fall der digitalen Katastralmappe eingetreten, denn die weiteren kategorischen Daten zu Geologie und Boden zeigen auch nach der Konvertierung alle kategorischen Einheiten auf..

Zusätzlich zur digitalen Katastralmappe musste, wie für jeden kategorischen Datensatz, auch ein Datensatz zum Grenzverlauf der kategorischen Einheiten mit den Werten 0 (keine Grenze) und 1 (Grenze) erstellt werden. Das Ergebnis sowohl des Grenzdatensatzes als auch der eigentlichen Landnutzungskarte ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Bei einem näheren Blick auf die Ergebniskarten mit der 10m Rasterweite und der 50m Rasterweite fällt auf, dass die Wege (schwarze Pixel) schon in der 10m Auflösung nicht mehr zusammenhängend sind und in der 50m Auflösung wird das Wegenetz nur noch durch vereinzelte Pixel dargestellt.

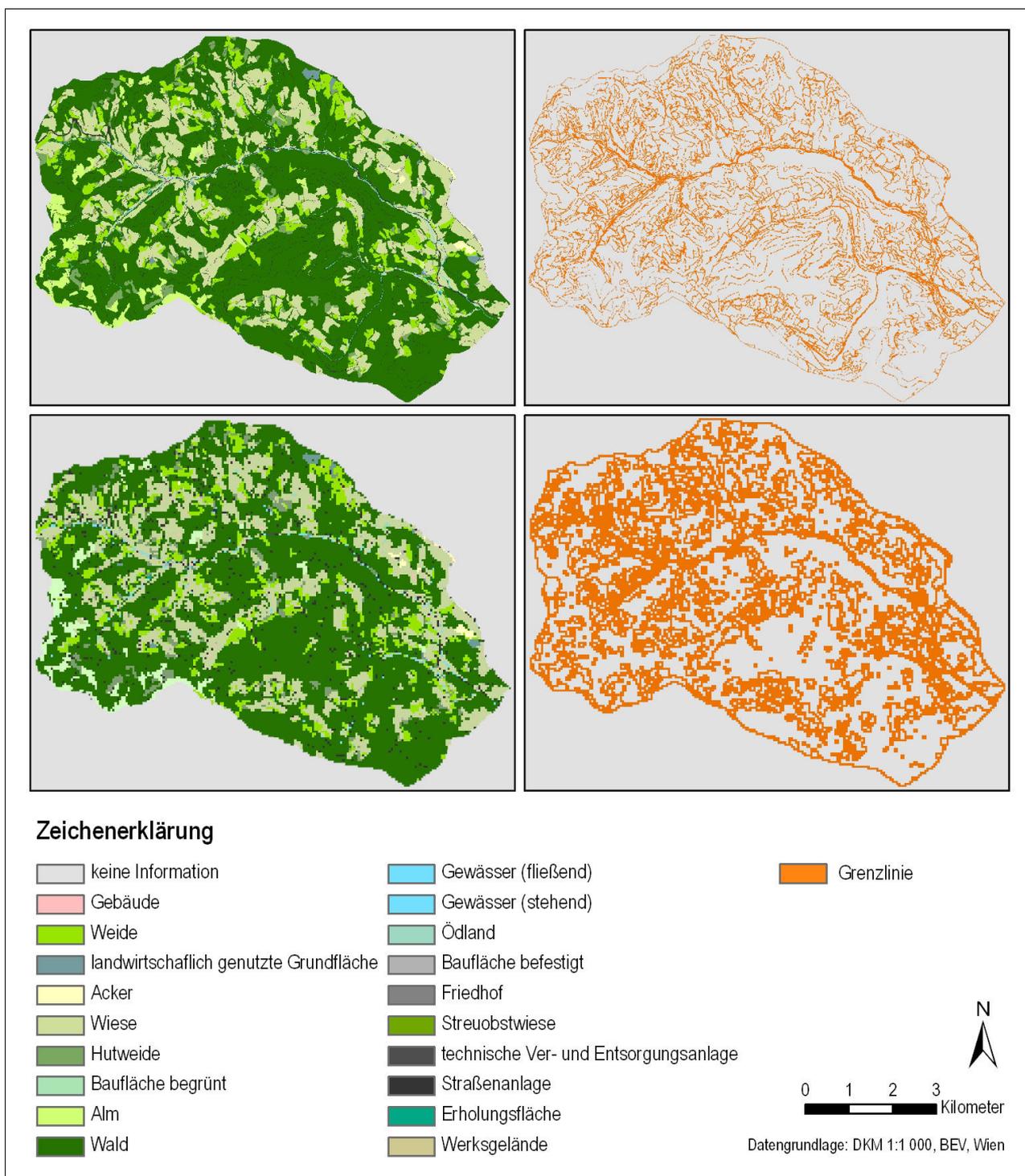


Abb. 6.1: Ergebnis der Rasterkonvertierung der digitalen Katastralmappe in ArcInfo für 10m Rasterweite (oben) und 50m Rasterweite (unten).

In der Datenvorbereitung in SPM werden die Datensätze in das Software kompatible Format \*.spg umgewandelt, wobei die Datensätze mit der richtigen Bit-Anzahl benannt werden müssen, aber sonst werden die Rasterdatensätze nicht weiter verändert.

Durch die **Umwandlung der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen ins Raster-Format** wurden fallweise gravitative Massenbewegungen aufgrund ihrer Nähe zueinander in einem

Pixel zusammengefasst. So sind von ursprünglich 411 gravitativen Massenbewegungspunkten in der 10m Auflösung 409 Pixel, in der 50m nur noch 363 Pixel übrig. Die ursprünglich 383 gravitativen Massenbewegungsflächen weisen ebenfalls Verluste auf. In der 10m Auflösung sind nach der Transformierung ins Raster-Format nur noch 374 gravitative Massenbewegungen enthalten. Für die 50m Auflösung bedeutet diese Umwandlung einen Verlust von 20 gravitativen Massenbewegungsflächen, die nahe an anderen gravitativen Massenbewegungen gelegen sind. In Abbildung 6.2 sind die Ergebnisse der Konvertierung der gravitativen Massenbewegungspunkte und -flächen jeweils für die 10m Rasterweite (oben) und die 50m Rasterweite (unten) dargestellt.

Durch die Verwendung des Zuordnungsmodus der *maximum area* konnte erreicht werden, dass die gesamte Fläche der gravitativen Massenbewegungen von Pixeln bedeckt wird. Ein Nebeneffekt dieses Modus ist, dass nun die Gesamtfläche der Pixel weit größer ist als die reale Gesamtfläche der gravitativen Massenbewegungen. Der Effekt der Auswahl der Rasterweite bei der Konvertierung der gravitativen Massenbewegungsflächen wird auch in Abbildung 6.2 aufgezeigt. Die gelben Punkte und schwarzen Linien auf den grünen Pixeln zeigen die reale Lage und Fläche der gravitativen Massenbewegungen. Aufgrund der durchschnittlichen Größe der gravitativen Massenbewegungen werden vor allem mit der 50m Auflösung Überschätzungen der tatsächlichen Fläche der gravitativen Massenbewegungen erzeugt. Näheres dazu wird bei den Unsicherheiten in Kapitel 7.2 und mit Tabelle 7.1 erläutert.

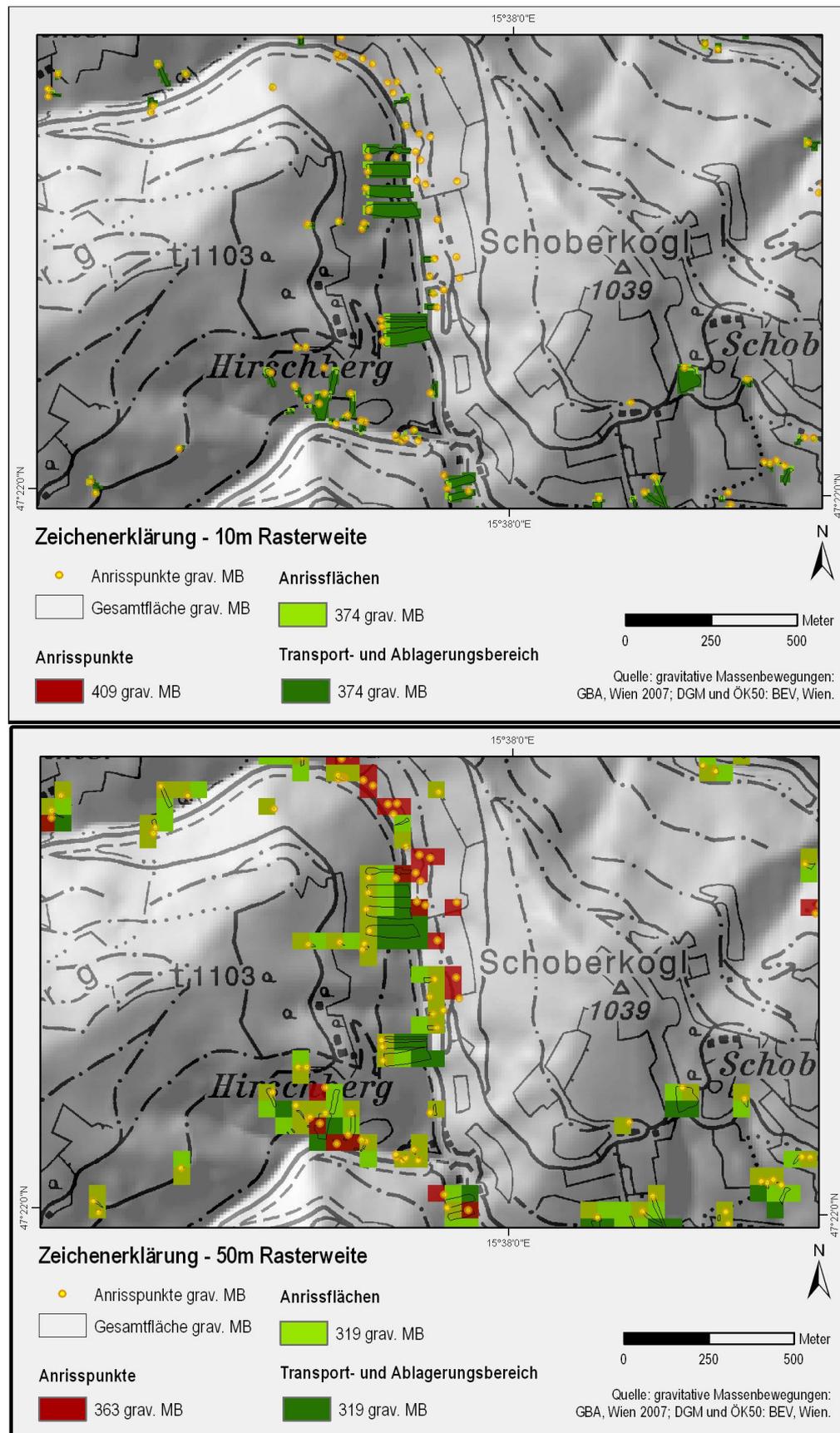


Abb. 6.2: Vergleich der Ergebnisse der Konvertierung und Bearbeitung der verschiedenen Daten zu den gravitativen Massenbewegungen (=grav. MB) dargestellt für den Ausschnitt Hirschberg – Schoberkogel am Amassegger Bach. Aus den als *Shapefile* vorliegenden Punktdaten (gelb) und Flächendaten (schwarze Umrandung) zu den gravitativen Massenbewegungen wurden Datensätze im Raster-Format erzeugt. Die Pixel aus den Punktdaten (rot) verschwinden in dieser Darstellung (speziell bei der Rasterweite von 50m) manchmal unter den Pixeln der Anrissfläche (hellgrün). Dies kann man durch Unterschiede im Hellgrün erkennen. Aus den Gesamtflächen der gravitativen Massenbewegungen (dunkelgrün und hellgrün) wurde in SPM die jeweilige Anrissfläche generiert. Oben in 10m Rasterweite, unten in 50m Rasterweite;

### 6.1.2 Numerische Datensätze

Die Ergebnisse der numerischen Datensätze sollen hier exemplarisch mit den Datensätzen zur Hangneigung und zur Distanz zum Wegenetz beschrieben werden, da diese Datensätze (Abbildung 6.3) einen deutlichen Einfluss auf die resultierende Gefahrenhinweiskarte haben und so die Betrachtung der Ergebnisse der Datenkonvertierung von besonderem Interesse ist. Des weiteren können anhand dieser Beispiele wichtige Veränderungen in den Basisdaten, die aufgrund der Konvertierung zustandekommen erläutert werden.

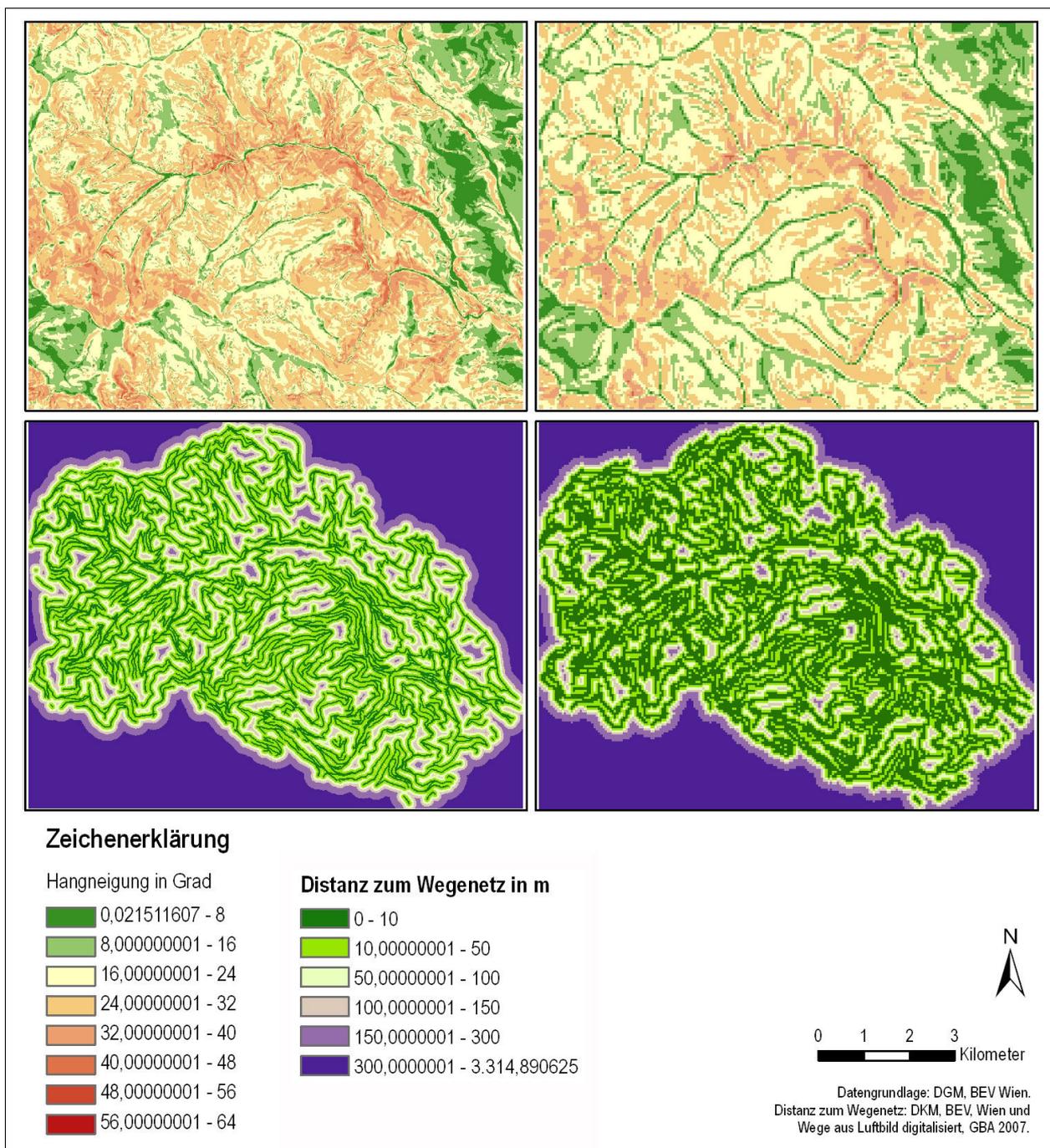


Abb. 6.3: Ergebnisse aus der Berechnung der Rasterdatensätze Hangneigung (oben) und Distanz zum Wegenetz (unten) in ArcInfo; 10m (links) und 50m Rasterweite (rechts).

In Abbildung 6.3 (oben) sind die Ergebnisse aus der Berechnung der **Hangneigung**, mittels des in ArcInfo bereitgestellten Algorithmus dargestellt. Das linke Bild zeigt das Ergebnis für die 10m Auflösung und das Bild rechts zeigt die Hangneigung für die 50m Auflösung. Optisch fällt auf, dass in der 50m Rasterweite nur wenige Bereiche mit einer Hangneigung von über  $40^\circ$  (rot) auftreten. Das in Abbildung 6.4 dargestellte Diagramm bestätigt dieses Ergebnis. Man kann erkennen, dass die Kurve für die 50m Auflösung in den Bereichen mit geringerer Hangneigung deutlich über der grünen Kurve liegt. Des weiteren erreicht die Kurve der Hangneigung in der 50m Rasterweite ihren Höhepunkt schon etwas früher als die Kurve der 10m Rasterweite. Stellt man einen Vergleich der maximalen Hangneigungswerte für die 10m und die 50m Auflösung an, so fällt auf, dass bei der 50m Rasterweite der Wert  $43^\circ$  nicht überschritten wird, hingegen treten bei der 10m Rasterweite Werte bis zu  $60^\circ$  auf.

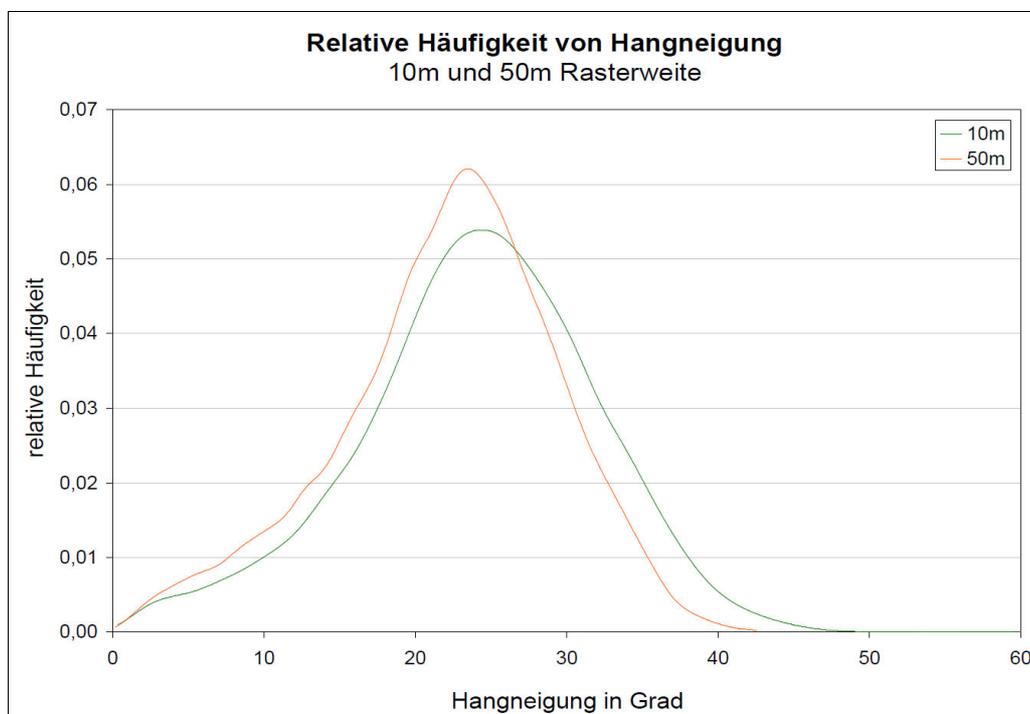


Abb. 6.4: Vergleich der relativen Häufigkeit der Hangneigung für 10m und 50m Rasterweite;

Die **Distanz zum Wegenetz** wurde über die ArcInfo Funktion „Euklidische Distanz“ berechnet. In der Ergebniskarte, die in Abbildung 6.3 (unten) dargestellt ist, kommt das dichte Wegenetz im Untersuchungsgebiet, durch die Pixel mit einer Entfernung von 0m-10m (dunkelgrün) sehr deutlich hervor. In der 10m Auflösung treten auch innerhalb des Untersuchungsgebiets noch vermehrt Bereiche mit einer Distanz zwischen 50m und 100m (helle Bereiche) auf. Die 50m Auflösung zeigt, dass die Wege so dicht beieinander liegen, dass sich die 50m Distanzbereiche schon oft überschneiden, oder direkt nebeneinander liegen. In Abbildung 6.5 ist ein Vergleich der relativen Häufigkeit der Distanz zum Wegenetz für die 10m und 50m Rasterweite dargestellt. Bei der 50m Kurve zeigt sich deutlich, dass immer wieder bei den Werten, die ein Vielfaches von 50 sind, deutliche Spitzen im Verlauf der Kurve auftreten. Hingegen die Kurve für die 10m Rasterweite steigt bis zu einer Entfernung von 20m deutlich an und fällt dann gleichmäßig bis zur maximalen Distanz von 313m ab. Die maximale Entfernung von den Wegen für die 50m Rasterweite liegt bei 300m.

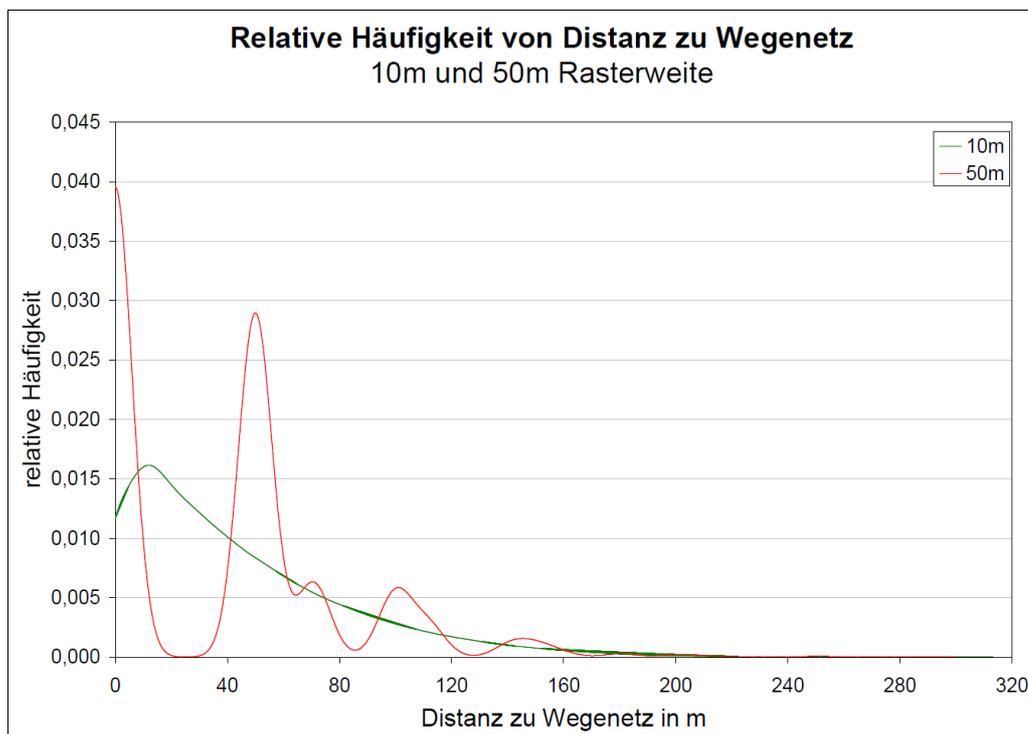


Abb. 6.5: Vergleich der relativen Häufigkeit der Distanz zum Wegenetz für 10m und 50m Rasterweite

## 6.2 Ergebnisse aus der Analyse mit dem Spatial Prediction Modeling System

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Modellierung der Gefahrenhinweiskarte in SPM, jeweils für die 10m Rasterweite und die 50m Rasterweite vorgestellt. Dazu werden die

Ergebnisse aus der Verwendung der Datensätze zu den Anrisspunkten und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen angeführt. Des weiteren werden für die 50m Rasterweite noch Ergebnisse der Verwendung des Datensatzes zu Anrissflächen von gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind angeführt.

Insgesamt wurden sehr viele verschiedene Parameterkombinationen berechnet, verglichen und verworfen oder angenommen. Viele dieser Parameterkombinationen halfen, die erklärenden Faktoren heraus filtern zu können, ohne dass die Kombination selbst gute Ergebnisse brachte. In diesem Kapitel werden aufgrund der Fülle der berechneten Parameterkombinationen, nur die wichtigsten Gefahrenhinweiskarten vorgestellt. Zum Vergleich sind weitere Ergebniskarten zu den anderen wichtigsten Parameterkombinationen in Kapitel C.3 im Anhang zu finden. Des weiteren sind auch die Gefahrenhinweiskarten für die einzelnen Parameter im Anhang in Abbildung C.3 (10m Rasterweite) und C.4 (50m Rasterweite) dargestellt.

Im Detail werden die einzelnen Ergebnisse aus den Parameterkombinationen, die in Tabelle 6.1 angeführt sind, beschrieben. Die Parameterkombinationen werden im folgenden auch durch die Aneinanderreihung der jeweiligen Kürzel der Parameter, die ebenfalls in Tabelle 6.1 angeführt sind, beschrieben. Dies dient der schnelleren Erkennung der angesprochenen Parameterkombination.

Tab. 6.1: Parameterkombinationen die in der vorliegenden Arbeit für die 10m und 50m Rasterweite vorgestellt und verglichen werden;

\*der Parameter Fließakkumulation wurde mit dem Algorithmus, den ArcInfo anbietet berechnet, was sehr schlechte Ergebnisse brachte. Aus zeitlichen Gründen ist hier keine Neuberechnung erfolgt, und der Parameter Fließakkumulation wurde in den Analysen aufgrund schlechter statistischer Gütemaße nicht weiter berücksichtigt.

Parameter (Kürzel)	Kombination												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Boden (b)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Geologie (g)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Landnutzung (n)	x	x	x	x	x	x	x	x					
Hangexposition (a)	x	x	x	x					x			x	
Höhe (d)	x	x	x			x			x		x	x	x
Distanz zum Flussnetz (f)	x									x			x
Distanz zum Wegenetz (w)	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
Hangneigung (s)	x	x		x		x	x	x		x	x	x	x
Fließakkumulation *													

Des weiteren werden in den folgenden Erläuterungen der Ergebnisse, die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen oft kurz als Anrissflächen oder Anrisspunkte bezeichnet. Dies ermöglicht eine kürzere und prägnantere Beschreibung der Ergebnisse.

Die folgende Beschreibung der Ergebnisse orientiert sich nach der Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte und erfolgt für jede Rasterweite (10m und 50m).

## **6.2.1 Empirisches Verteilungsdiagramm und Likelihood Quotient**

Eine Übersicht und Auflistung der Anteile der einzelnen kategorischen Einheiten an allen gravitativen Massenbewegungen und an der Gesamtfläche (Werte der empirischen Häufigkeitsverteilung) und der Likelihood Quotienten, jeweils berechnet mit Anrissflächen (10m Rasterweite) bzw. mit den Anrisspunkten (50m Rasterweite) der gravitativen Massenbewegungen, findet sich im Anhang, in den Tabellen C.2 - Geologie, C.3 – Landnutzung und C.4 – Boden. Vergleichswerte, die durch die Analyse mit Anrisspunkten bzw. Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen berechnet wurden, fehlen in diesen Tabellen und werden im Folgenden extra angeführt.

An den Diagrammen in Abbildung 6.6 und Abbildung 6.8 zu den empirischen Häufigkeitsverteilungen und auch in den Diagrammen in Abbildung 6.7 und Abbildung 6.9 zu den Likelihood Quotienten muss folgendes beachtet werden: die Y-Achse wird mit unterschiedlichen Wertebereichen dargestellt, damit die Schwankungen der Kurven und Balken besser sichtbar werden.

Die empirische Häufigkeitsverteilung und der Likelihood Quotient werden bei den numerischen Datensätzen für jeden auftretenden Wert berechnet und in Form von Kurvendiagrammen dargestellt. Für die numerischen Daten ist der optische Vergleich der Diagramme aussagekräftiger, als die Aufzählung der höchsten Likelihood Quotienten, da hier die flächenmäßigen Anteile der einzelnen Werte jeweils sehr gering sind. Des Weiteren steckt weit mehr Informationsgehalt im Verlauf der Kurven zur relativen Häufigkeit der Pixel und zur relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen und dem Verhältnis der Kurven zueinander, als in den einzelnen Werten. Daher werden in weiterer Folge nur die Maxima und Minima der einzelnen Datensätze und Aussagen zum Kurvenverlauf der relativen Häufigkeiten beschrieben.

### **6.2.1.1 Rasterweite 10m x 10m**

In Abbildung 6.6 sind die Diagramme zur empirischen Häufigkeitsverteilung und in Abbildung 6.7 sind die Diagramme der Likelihood Quotienten der einzelnen kategorischen und numerischen Datensätze, berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, dargestellt. In diesem Kapitel werden auch Ergebnisse aus der Berechnung mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen vorgestellt, jedoch die entsprechenden Diagramme aus der Berechnung mit den Anrisspunkten werden in dieser Arbeit nicht dargestellt.

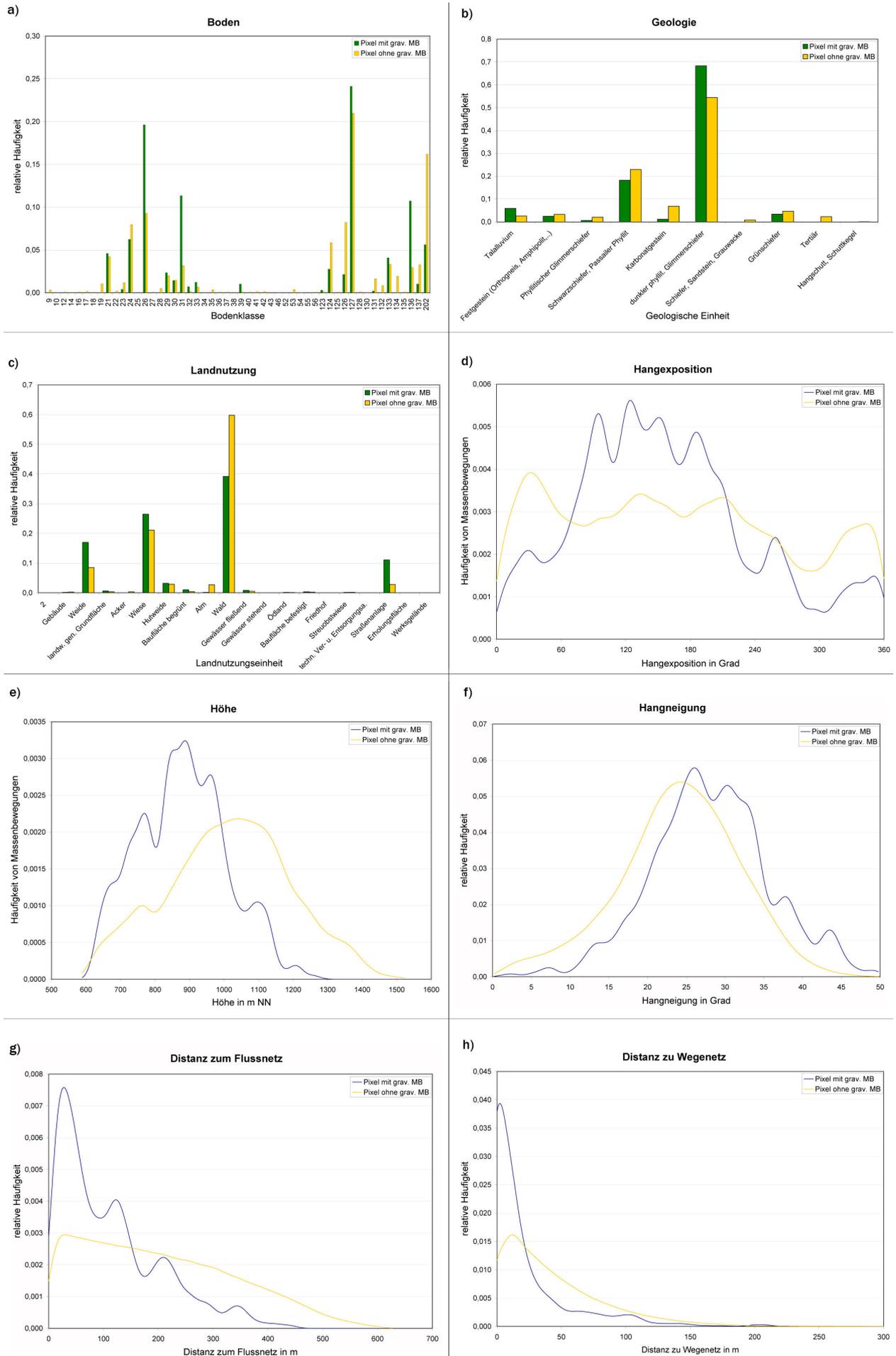


Abb. 6.6: empirische Häufigkeitsverteilung für die Parameter a) Boden, b) Geologie, c) Landnutzung, d) Hangexposition, e) Höhe, f) Hangneigung, g) Distanz zum Flussnetz und h) Distanz zum Wegenetz; Berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für 10m x 10m Rasterweite.

## 6. Ergebnisse

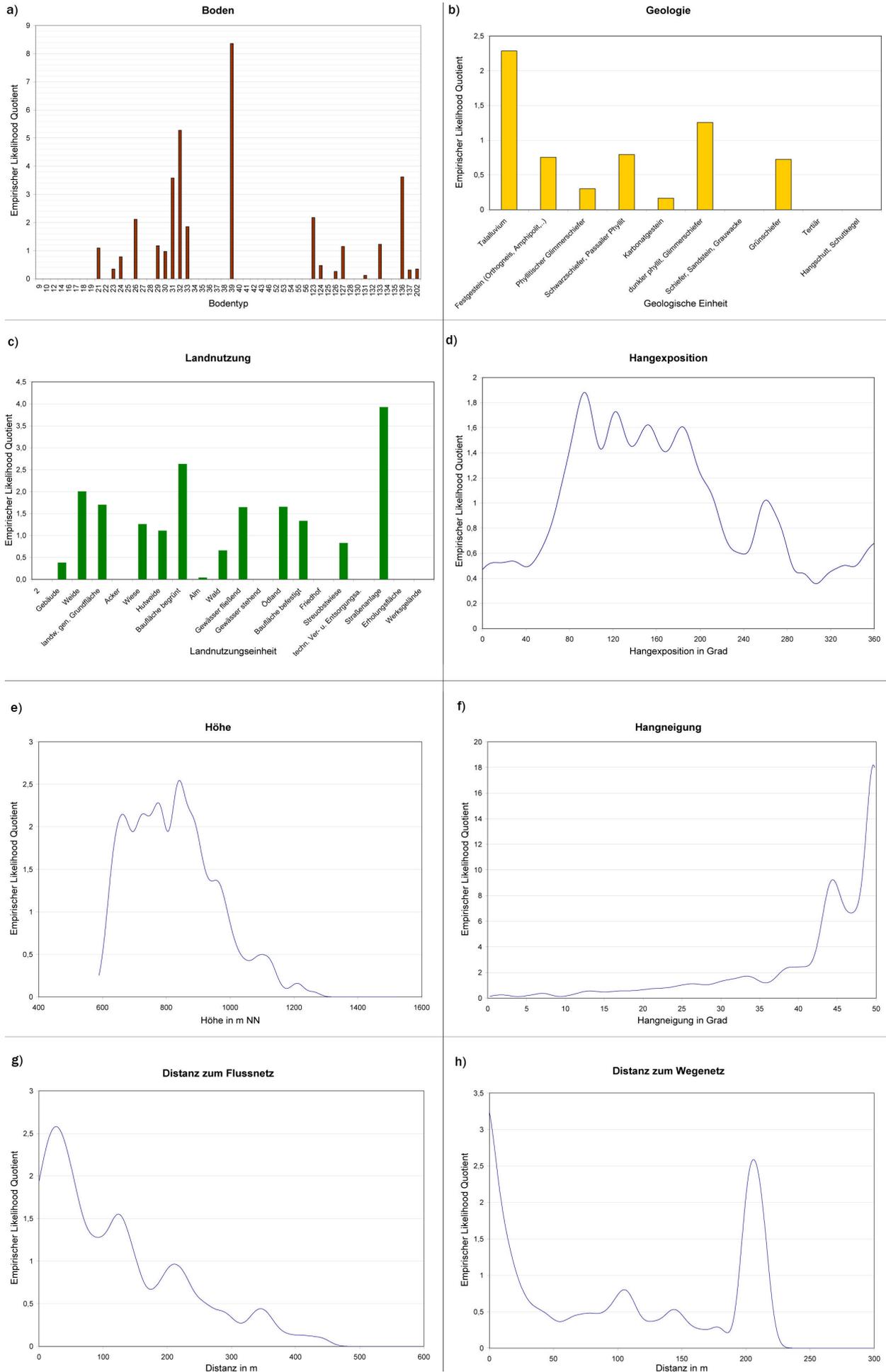


Abb. 6.7: Empirischer Likelihood Quotient für die Parameter Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Hangneigung, Distanz zum Flussnetz, Distanz zum Wegenetz, mit **10m x 10m Rasterweite**; ermittelt mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Berechnet mit SPM, Darstellung in Microsoft Excel.

Im Folgenden werden einige Details zur empirischen Häufigkeitsverteilung und zum Likelihood Quotienten einzelner Datensätze, jeweils für die Berechnung mit den Anrisspunkten und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen beschrieben. Die Beschreibung dieser Datensätze soll die Informationsdichte der Diagramme zur empirischen Häufigkeitsverteilung und zum Likelihood Quotienten aufzeigen, und so auch eine Hilfestellung für das Lesen der weiteren Diagramme zu den anderen, hier nicht näher erläuterten, Datensätzen geben.

Für die kategorischen Datensätze werden die Ergebnisse für den Datensatz der **Landnutzung**, zur empirischen Häufigkeitsverteilung, Abbildung 6.6c), und zum Likelihood Quotienten, Abbildung 6.7c), näher beschrieben. Die Landnutzungsart „Straßenanlage“ erreicht bei der Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen einen Likelihood Quotient von 3,92. Aus dem Diagramm der empirischen Häufigkeitsverteilung kann man lesen, dass die Straßenanlagen 2,82% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets einnehmen und sich hier 11% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen ereigneten. Des weiteren weisen die kategorischen Einheiten „Baufläche begrünt“ und „Weide“ einen hohen Likelihood Quotienten auf. Die Einheit „Baufläche begrünt“ hat einen Likelihood Quotient von 2,6 und beinhaltet 1,02% der gravitativen Massenbewegungen und bedeckt nur 0,39% der Gesamtfläche. Die „Weiden“ haben mit dem Quotienten von 2 den dritt-höchsten Likelihood Quotienten der digitalen Katastralmappe. Sie nehmen auch den dritt größten Flächenanteil mit 8,49% ein und es haben sich 16,97% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen ereignet. Im Vergleich dazu muss der Wald, mit dem größten Flächenanteil von 59,8% und dem größten Anteil an allen gravitativen Massenbewegungen mit 39,16% gesehen werden. Diese Einheit hat einen geringen Likelihood Quotienten von 0,65. Die „Alm“ hat mit einem Likelihood Quotienten von 0,03 den geringsten Wert, bedeckt 2,96% der Fläche und beinhaltet 0,1% aller gravitativen Massenbewegungen.

Bei der Berechnung mit den kartierten Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen zeigt sich ein leicht verändertes Bild. Hier hat die Landnutzungseinheit „Baufläche befestigt“ mit einem Wert von 4,25 den höchsten Likelihood Quotienten. Diese Einheit nimmt nur 0,23% der Gesamtfläche ein und hier ereigneten sich 0,98% aller Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen. Den zweit höchsten Likelihood Quotienten weist die Einheit „Ödland“ mit einem Wert von 3,95 auf. Diese Einheit bedeckt 0,06% der Gesamtfläche und hier fanden sich 0,24% aller Anrisspunkte. Im Gegensatz dazu hat die Einheit „Weiden“ den viert höchsten Likelihood Quotienten mit einem Likelihood Quotienten von 2,62, einem Flächenanteil von 8,49% und einem Anteil an allen Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen von 22%. Somit nimmt die Weide einen ähnlichen Stellenwert wie bei der Berechnung mit den Anrissflächen ein. Den größten Anteil von gravitativen Massenbewegungen beinhaltet die Landnutzungseinheit „Wiese“ mit 33%. Diese Einheit bedeckt 21% des Untersuchungsgebiets und hat einen Likelihood Quotienten von 1,57. Den geringsten Likelihood Quotienten von 0,18 hat die Einheit „Alm“, welche 2,68% der Fläche einnimmt und 0,48% der gravitativen Massenbewegungen beinhaltet. Die größte Landnutzungseinheit „Wald“ mit 59,74% der Fläche hat einen Likelihood Quotient von 0,47 und hier ereigneten sich 28,61% aller gravitativer Massenbewegungen.

Keine Anrisspunkte und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen enthalten die Einheiten „Acker“, „Gewässer stehend“, „Friedhof“, „technische Ver- und Entsorgungsanlage“, „Erholungsfläche“ und „Werksgelände“. Diese Einheiten haben auch sehr geringe Flächenanteile, denn sie nehmen gesamt nur 0,35% der Gesamtfläche ein.

Die Werte für den Likelihood Quotienten der **Hangneigung** liegen, berechnet für die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen (Abbildung 6.7f), bei 18,19 und für die Anrisspunkte bei 10,3. Diese maximalen Likelihood Quotienten der Hangneigung werden bei 49° bzw. 49,27°, nach einem rapiden Anstieg des Likelihood Quotienten ab einer Hangneigung von 40°, erreicht. Diese Hangneigungen kommen auf einem Anteil von weniger als 1% des Untersuchungsgebiets vor und hier ereigneten sich im Durchschnitt 0,7% der gravitativen Massenbewegungen (Abbildung 6.6f). Die meisten Anrissflächen und auch Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen traten rund um eine Hangneigung von 22°-32° auf. Diese Hangneigungswerte nehmen laut der empirischen Häufigkeitsverteilung die größten Flächenanteil im Untersuchungsgebiet ein. Hier liegt der Likelihood Quotient im Bereich von 0,8 bis 1,8. Ab einer Hangneigung von 25° (Anrissflächen) bzw. 23° (Anrisspunkte) übersteigt die Kurve der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen die Verteilungskurve der Hangneigung im Untersuchungsgebiet, wodurch der Likelihood Quotient den Wert 1 übersteigt. Ab diesen 25° bzw. 23° wird der Wert 1 nicht mehr unterschritten.

Die **Distanz zum Wegenetz** weist einen maximalen Likelihood Quotient von 3,24 (Anrissflächen, Abbildung 6.7h) bzw. 3,56 (Anrisspunkte) auf. Dieser maximale Quotient tritt für beide Datensätze der gravitativen Massenbewegungen bei einer Entfernung von Null Metern auf. Hier sind 3,79% (Abbildung 6.6h) bzw. 4,21% (Anrisspunkte) aller gravitativen Massenbewegungen angesiedelt. Der minimale Likelihood Quotient von Null tritt für die Anrissflächen ab einer Entfernung von 240 m, für die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen ab einer Entfernung von 228,6m auf. Die meisten gravitativen Massenbewegungen ereigneten sich in beiden Fällen in einer Entfernung von 0m bis zu 25m. Auffallend ist eine weitere Spitze im Likelihood Quotienten bei einer Entfernung von 200m. Hier wird ein Likelihood Quotient von 2,55 erreicht. Bis zu einer Distanz von 22m (Anrissflächen) bzw. 20m (Anrisspunkte) liegt die Kurve der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen deutlich über der Verteilungskurve der Distanzen im Untersuchungsgebiet. Ab der Distanz von 22m bzw. 20m wird ein Likelihood Quotient von 1 nur noch bei einer Distanz von 200m überschritten.

Weitere Details zu der empirischen Häufigkeitsverteilung und dem Likelihood Quotient anderer Datensätze sind den jeweiligen Diagrammen den Abbildungen 6.6 und 6.7 und den Tabellen C.2 bis C.4 im Anhang zu entnehmen.

### 6.2.1.2 Rasterweite 50m x 50m

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Berechnung der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten, berechnet mit den Datensätzen zu den Anrissen der gravitativen Massenbewegungen in Punkt- und Flächenform, für ausgewählte kategorische und numerische Datensätze in der 50m Rasterweite vorgestellt. Dabei liegt der Fokus eher auf den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen. Dennoch werden zum Vergleich auch Ergebnisse aus der Modellierung der Anrissflächen und der Anrissflächen von gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, angeführt.

Der Datensatz der **Landnutzung** zeigt für die Berechnungsvarianten mit den Anrisspunkten, Abbildung 6.9c, und mit den Anrissflächen, keine Abbildung in dieser Arbeit, einen ungewöhnlich hohen Likelihood Quotienten in der Einheit „Friedhof“. Der Likelihood Quotient liegt bei 64,41 (Anrisspunkte) bzw. 46,3 (Anrissflächen). Diese Einheit nimmt, laut empirischer Häufigkeitsverteilung, 0,004% der Gesamtfläche ein und es ereigneten sich 0,28% (Anrisspunkte) bzw. 0,20% (Anrissflächen) aller gravitativen Massenbewegungen (Abbildung 6.8c) darin. Die Landnutzungsart „Erholungsfläche“ erreicht einen Likelihood Quotienten von 16,10 (Anrisspunkte) bzw. 30,87 (Anrissflächen), der auch im Vergleich zu den anderen Datensätzen sehr hoch ist. Diese Einheit deckt, wie aus dem Diagramm der empirischen Häufigkeitsverteilung ersichtlich, eine Fläche von 0,02% ab und beinhaltet 0,28% bzw. 0,40% aller Anrisspunkte bzw. Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Die größte Landnutzungsart stellt der „Wald“ dar, der mit 60% den größten Anteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes hat. In dieser Einheit ereigneten sich 34,71% bzw. 44,42% aller Anrisspunkte bzw. Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Der Likelihood Quotient ist mit einem Wert von 0,57 (Anrisspunkte) bzw. 0,74 (Anrissflächen) eher im unteren Drittel dieses Datensatzes anzusiedeln. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Landnutzungsart „Weide“ zu legen. Diese nimmt mit 8,24% den dritt größten Flächenanteil ein, beinhaltet 20,94% aller Anrisspunkte bzw. 15,74% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und weist einen Likelihood Quotienten von 2,54 bzw. 1,9 auf.

Keine Anrisspunkte und Anrissflächen von gravitativen Massenbewegungen ereigneten sich auf den Landnutzungseinheiten „Acker“, „Ödland“ und „technische Ver- und Entsorgungsanlage“, außerdem gab es bei den Anrissflächen keine gravitativen Massenbewegungen in der Einheit „Baufläche befestigt“.

Durch die Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, ergibt sich ein verändertes Bild. Abbildungen zur empirischen Häufigkeitsverteilung und dem Likelihood Quotienten sind aus Platzgründen nicht dargestellt. Hier wird der höchste Likelihood Quotient von 4,4 bei der Landnutzungseinheit „Gebäude“ erreicht. Diese Einheit bildet 0,25% der Gesamtfläche und hier traten 1,09% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer 1000m<sup>2</sup> auf. Den zweit größten Flächenanteil nimmt die Landnutzungseinheit „Wiese“ ein, die einen Likelihood Quotienten von 0,82 aufweist. In dieser Einheit haben sich 17,39% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen ereignet. Den

unterschiedlichen Berechnungsvarianten ist gemeinsam, dass der Wald die größte Landnutzungseinheit darstellt. In diesem Fall erreicht der Wald auch den viert höchsten Likelihood Quotienten von 1,07 und es ereigneten sich in dieser Einheit 64,13% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer 1000m<sup>2</sup>. Keine Anrisse von gravitativen Massenbewegungen traten in folgenden Einheiten auf: „landwirtschaftlich genutzte Fläche“, „Acker“, „Baufläche begrünt“, „Alm“, „Gewässer fließend“, „Ödland“, „Baufläche befestigt“, „Friedhof“, „Streuobstwiese“, „technische Ver- und Entsorgungsanlage“ und „Erholungsfläche“.

Die Berechnung der empirischen Häufigkeitsverteilung (Abbildung 6.8f) und des Likelihood Quotienten (Abbildung 6.9f) mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen für die **Hangneigung** hat einen Quotienten von 16,63 bei einer Hangneigung von 42,28° als Ergebnis. Für die Anrissflächen (keine Abbildung in dieser Arbeit dargestellt) wird ein maximaler Likelihood Quotient von 14,64 bei einer Hangneigung von 41,5° erreicht. Wie aus der empirische Häufigkeitsverteilung ersichtlich sind die meisten gravitativen Massenbewegungen, bei der Berechnung mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen, in einem Hangneigungsbereich von 19°-24° und im Bereich von 28° bis 31° aufgetreten. In beiden Abschnitten wird die Verteilungskurve der Hangneigung im Untersuchungsgebiet überschritten. Im Bereich von 19°-24° ereigneten sich von 4,8% bis 6,9% aller Anrisspunkte und im Bereich von 28° bis 31° traten 4,3% bis 2,6% aller Anrisspunkte auf. Doch auch bei geringeren Hangneigungen wird die Verteilungskurve in den Bereichen von 4,9° bis 8,4° und 10,3° bis 12,5° überschritten. Jedoch ist hier die relative Häufigkeit von gravitativen Massenbewegungen geringer und liegt bei maximal 2,2% und der Likelihood Quotient liegt bei maximal 1,58 außer. Ab einer Hangneigung von 35° steigt der Likelihood Quotient kontinuierlich an und erreicht den maximalen Likelihood Quotienten, wie oben beschrieben.

Die Anrissflächen zeigen ein ähnliches Bild. Hier wurde die Verteilungskurve der Hangneigung im Untersuchungsgebiet in den Bereichen von 1,79° bis 8,44°, 10,39° bis 12,8°, 20,8° bis 23,4°, 28° bis 30,64° und ab 35° von der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen überschritten. Im Bereich von 20,8° bis 23,4° und 28° bis 30,64° haben sich maximal 6,47% und 4,22% der gravitativen Massenbewegungen ereignet. Hier liegt der Likelihood Quotient bei maximal 1,08 und 1,13. Für die Bereiche 1,79° bis 8,44° und 10,39° bis 12,8° wird ein maximaler Likelihood Quotient von 1,69 erreicht. Hier ereigneten sich maximal 2,4% der gravitativen Massenbewegungen.

Die Berechnung der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten für die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer als 1000m<sup>2</sup> hat einen maximalen Likelihood Quotienten von 74,6 bei einer Hangneigung von 42° als Ergebnis. Hier sind 2,5% aller gravitativen Massenbewegungen aufgetreten und diese Hangneigung kommt auf einem Flächenanteil von 0,3% des Untersuchungsgebiets vor. Bei einer Hangneigung von 24,7° sind 6,78% aller Anrissflächen größer 1000m<sup>2</sup> aufgetreten und der Likelihood Quotient liegt knapp über 1. Diese Hangneigung weist einen Flächenanteil von 5,97% auf. Ab einer Hangneigung von 24,03° bis 25,55° und ab 28,35° wird die Verteilungskurve der Hangneigung im Untersuchungsgebiet überschritten. Im Bereich von 24,03° bis 25,55° wird dabei der Likelihood Quotient von nur knapp größer als 1

erreicht. Ab einer Hangneigung von  $28,35^\circ$  steigt der Likelihood Quotient zuerst langsam und ab  $37^\circ$  rapide zu einem maximalen Quotienten von 74,6 an.

Hangneigungswerte von  $0,27^\circ$  -  $8,5^\circ$  haben hier einen Likelihood Quotienten von Null.

Die **Distanz zum Wegenetz** zeigt die höchste relative Häufigkeit mit 7,5% aller gravitativer Massenbewegungen (Anrisspunkte, Abbildung 6.8h und Anrissflächen) bei einer Entfernung von Null Metern. Die höchsten Likelihood Quotienten mit einem Wert von 1,91 (Anrisspunkte, Abbildung 6.9h) bzw. 1,92 (Anrissflächen) treten bei einer Distanz von 0m – 20m (Anrisspunkte und Anrissflächen) auf. Bei einer Entfernung von 26m wird in beiden Berechnungsvarianten die Verteilungskurve der Distanz zum Wegenetz im Untersuchungsgebiet von der Kurve der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen unterschritten, wodurch sich ein Likelihood Quotient von kleiner als 1 ergibt, ausgenommen bei einer Entfernung von 192m bis 203m liegt ein Likelihood Quotient von maximal 1,38 vor.

Auch bei der Berechnung des Likelihood Quotienten mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen die größer als  $1000\text{m}^2$  sind erhält man bei einer Distanz von 0m - 20m den maximalen Likelihood Quotienten von 1,34. Der Anteil an den Anrissflächen liegt bei 5,3%, auf einer Fläche von 4% des Untersuchungsgebiets. Ab einer Entfernung von 27m liegt der Likelihood Quotient unter dem Wert 1, was bedeutet, dass die Kurve der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen unter der Verteilungskurve der Distanz zum Wegenetz im Untersuchungsgebiet liegt.

Allen Berechnungsvarianten ist gemeinsam, dass ab einer Distanz von 229m / 171m (Anrisspunkte und Anrissflächen / Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer  $1000\text{m}^2$ ) der Likelihood Quotient gleich Null ist.

## 6. Ergebnisse

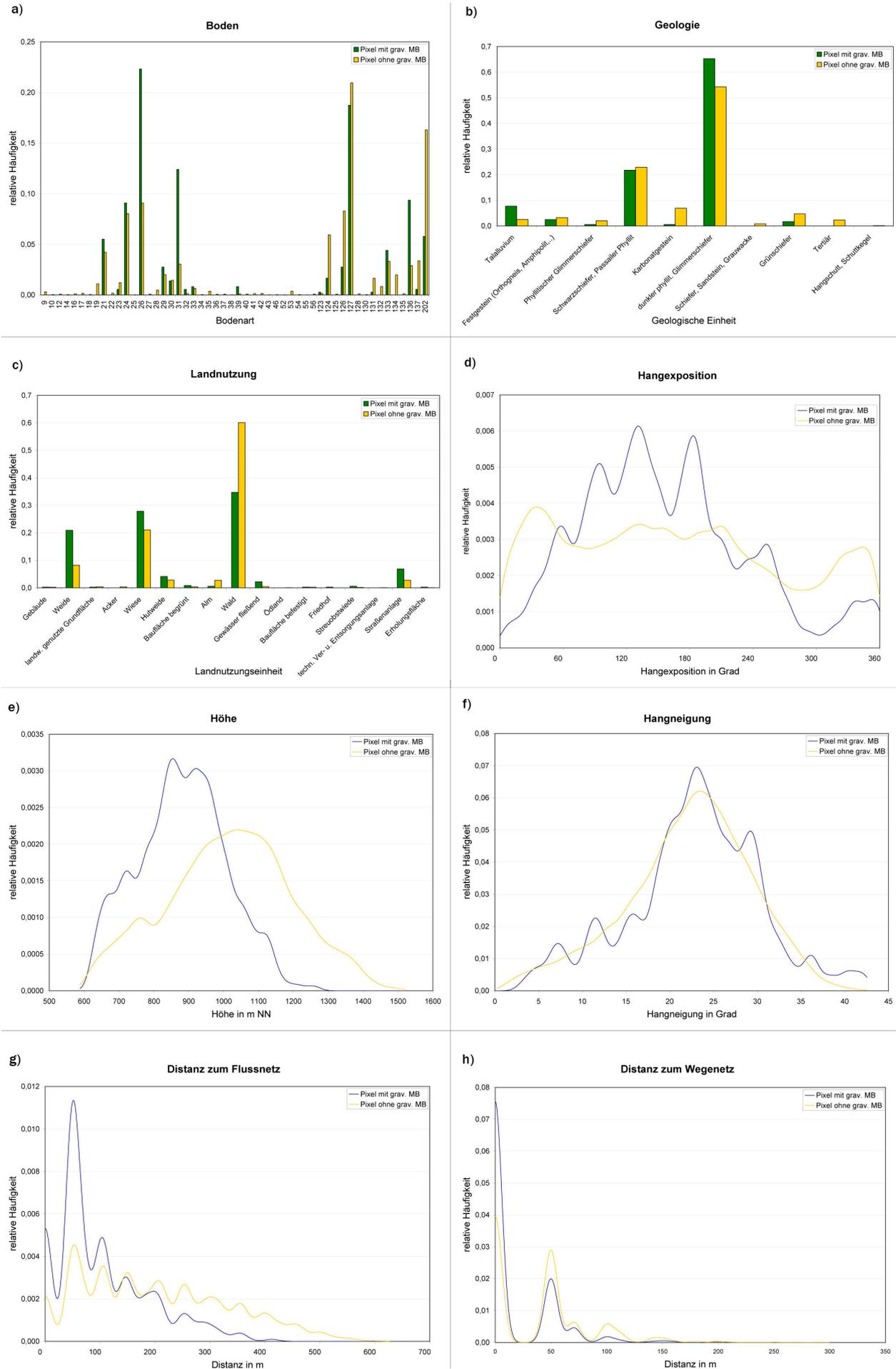


Abb. 6.8: Empirische Häufigkeitsverteilung für die Parameter Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Distanz zum Flussnetz, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz; Berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für **50m x 50m Rasterweite**; Anzahl von Neighborhoodpixel = 1

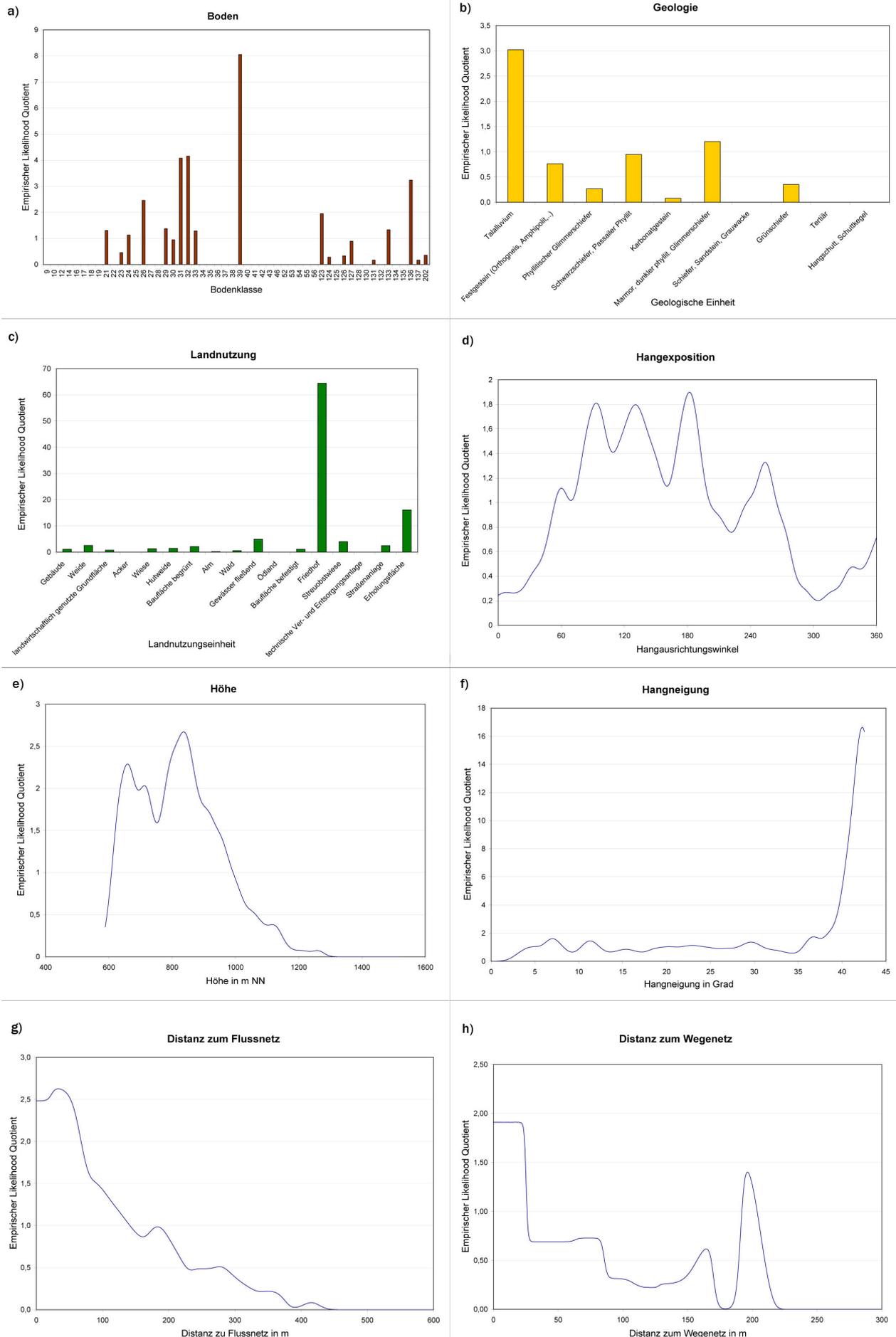


Abb. 6.9: Likelihood Quotient für die Parameter Boden, Landnutzung, Geologie, Hangexposition, Höhe, Hangneigung, Distanz zum Flussnetz, Distanz zum Wegenetz, mit 50m x 50m Rasterweite, ermittelt mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen. Berechnet mit SPM, Darstellung in Microsoft Excel.

### 6.2.1.3 Diskussion

Die empirische Häufigkeitsverteilung und der Likelihood Quotient sind aussagekräftige Gütemaße mit hohem Informationsgehalt, anhand derer sich viele Zusammenhänge und Phänomene der Eingangsdatensätze und ihrer Bedeutung für die Auslösung der Ereignisse aufzeigen lassen. So kam es in der 50m Rasterweite in der Berechnung der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten, durch die Kombination von stark überrepräsentierten Anrissflächen oder Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen mit durch die Konvertierung in Rasterdatensätze beeinflusste Parameter, zu einigen Auffälligkeiten. Zum Beispiel weist der Datensatz der digitalen Katastralmappe in der 50m x 50m Rasterweite den höchsten Likelihood Quotienten für die Landnutzungseinheit „Friedhof“ mit einem überdurchschnittlich hohen Wert von 64,4 auf. Relikte der geringen räumlichen Auflösung zeigen sich auch im unterschiedlichen Kurvenverlauf der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten der numerischen Daten. Diese Unterschiede in den Datensätzen in 10m x 10m Rasterweite und 50m x 50m Rasterweite lassen sich am Beispiel des Datensatzes der Hangneigung aufzeigen. Bei einem Vergleich der Kurvenverläufe der empirischen Häufigkeitsverteilung in 10m x 10m und 50m x 50m Rasterweite fallen in der 50m Rasterweite zusätzliche Spitzen der relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen auf, die in der 10m Rasterweite nicht auftreten. Diese liegen, bei der Berechnung mit den Anrisspunkten, in den Bereichen von  $4,9^\circ$  bis  $8,4^\circ$  und  $10,3^\circ$  bis  $12,5^\circ$ , was aus geomorphologischer Sicht nicht plausibel ist. Ein Erklärungsansatz für dieses Phänomen ist, dass einerseits durch den Algorithmus zur Berechnung der Hangneigung für die Pixel mit 50m x 50m geringere Hangneigungen und sprunghafte Wechsel in der Hangneigung von benachbarten Pixel generiert werden, und andererseits dass die Pixel der gravitativen Massenbewegungen aufgrund ihrer Größe und Lagegenauigkeit auch flachere Bereiche abdecken.

Für die Auswahl der besten Datensätze für die Parameterkombinationen wurden zuerst jeweils die höchsten und niedrigsten Likelihood Quotienten und relativen Häufigkeiten der einzelnen Datensätze verglichen, denn die Höhe des Likelihood Quotienten und der relativen Häufigkeit bietet einen ersten Anhaltspunkt, ob ein Datensatz für die Auslösung des Ereignisses von großer oder geringerer Bedeutung war. So weist der Datensatz „Geologie“ eine maximale relative Häufigkeit der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen von 68,3% auf, im Vergleich dazu ist die Exposition von geringer Bedeutung, denn sie erreicht eine maximale relative Häufigkeit von 0,39%.

Erst durch die gemeinsame Betrachtung von empirischer Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient der einzelnen Datensätze und Einheiten wird eine Aussage über die räumliche Bedeutung und die Anfälligkeit gegenüber Anrissen von gravitativen Massenbewegungen möglich. Daher muss die Höhe des Likelihood Quotienten einer Einheit im Vergleich zur Größe dieser Einheit gesehen werden, um die Bedeutung dieses Wertes für den räumlichen Ansatz zu bestimmen. Ein Beispiel ist die Einheit „Friedhof“ (Abbildung 6.8c und 6.9c) des Datensatzes Landnutzung mit einer Rasterweite von 50m x 50m. Diese Einheit weist einen hohen Likelihood Quotienten auf, hat aber nur einen geringen Flächenanteil und ist deshalb kaum von Bedeutung für das Untersuchungsgebiet. Hingegen der Wald hat die größte Fläche und auch die meisten gravitativen Massenbewegungen,

weshalb dieser von großer räumlicher Bedeutung ist. Dem zufolge kann die alleinige Betrachtung der Höhe des Likelihood Quotienten bei der Wahl der Parameter für die Kombinationen irreführend sein. Daher wurde bei der Auswahl der Datensätze für die Parameterkombination auf eine gute Relation dieser Werte zueinander geachtet um so erklärende Faktoren für das Ereignis 2005 zu bestimmen.

Aus dem Vergleich der Ergebnisse fällt die Landnutzungseinheit „Weide“ auf, die für jede Berechnungsvariante und Rasterweite (10m und 50m) sowohl vergleichsweise hohe Likelihood Quotienten (2 bzw. 2,54) als auch hohe Flächenanteile (8,49% bzw. 8,27%) und eine hohe relative Häufigkeit der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen (16,97% bzw. 20,94%) aufweist. Somit ist die Lage der „Weiden“ für zukünftige Ereignisse besonders bedeutend. Die größte Landnutzungseinheit „Wald“ mit einem Flächenanteil von 59,74% (10m Rasterweite) und 60% (50m Rasterweite) beinhaltet 39,16% (10m Rasterweite) bzw. 34,71% (50m Rasterweite) und weist einen Likelihood Quotienten von 0,65 bzw. 0,57 auf. Aufgrund der hohen Flächenanteile am Untersuchungsgebiet und der hohen relativen Häufigkeit der gravitativen Massenbewegungen ist der Wald im Hinblick auf zukünftige Ereignisse besonders zu beachten.

Mit dieser Herangehensweise können auch für die anderen Datensätze besonders standfeste oder anfällige Einheiten bestimmt werden, und die räumliche Bedeutung der Einheiten der kategorischen Datensätze und der numerischen Datensätze kann so ermittelt werden.

## 6.2.2 Erfolgsrate

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus der Berechnung der Erfolgsrate - „*success rate - fitting rate*“ dargelegt. In Abbildung 6.10 sind die Erfolgsraten für die wichtigsten Parameterkombinationen verglichen und für die 10m x 10m und 50m x 50m Rasterweite jeweils in einem Diagramm dargestellt. Für diese Diagramme dienten die Anrissflächen (10m Rasterweite) bzw. die Anrisspunkte (50m Rasterweite) der gravitativen Massenbewegungen als Grundlage. Im Folgenden werden aber auch die Ergebnisse aus der Berechnung mit den Anrisspunkten (10m Rasterweite) und den Anrissflächen (50m Rasterweite) beschrieben, ohne dass die Diagramme dazu angeführt werden. Die Werte der Erfolgsrate für die Anteile an allen gravitativen Massenbewegungen, die innerhalb der gefährdetsten Flächen liegen, werden im folgenden jeweils bei 20% der gefährdetsten Fläche abgelesen.

### 6.2.2.1 Rasterweite 10m x 10m

In diesem Unterkapitel werden die Erfolgsraten für die besten Parameterkombinationen beschrieben. Dabei werden jeweils die mit den Anrissflächen und den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechneten Erfolgsraten für die 10m Rasterweite erläutert.

Erfolgsrate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen :

Abbildung 6.10a stellt die Erfolgsraten für die Parameterkombinationen berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen dar. Die Erfolgsrate liegt für die 10m Rasterweite bei 20% der gefährdetsten Fläche, in einem Bereich von 73% bis 78% aller Anrissflächen. Die Parameterkombinationen mit den besten Erfolgsraten lauten wie folgt, in Klammer stehen die Kürzel für die Parameterkombination und die Anteile an allen Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen: Kombination 2 (bgnadsw, 78%), Kombination 3 (bgnadw), Kombination 4 (bgnasw) und Kombination 9 (bgadw) weisen einen Anteil von 76% an allen Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen auf und Kombination 12 (bgadsw, 75%).

Des weiteren erreicht die Kombination 1, aus allen Parametern, einen Anteil von 74% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Die Kombination 7 (bgns) liegt mit einer Erfolgsrate von 70% im Mittelfeld aller berechneten Parameterkombinationen. Die Kombination 8 (bgns) schneidet mit einer Erfolgsrate von 62% aller Anrissflächen, bei 20% der gefährdetsten Fläche, am schlechtesten ab.

Erfolgsrate berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen:

Durch die Berechnung der Erfolgsrate mit den Anrisspunkten werden etwas höhere Erfolgsraten im Bereich zwischen 78% und 85% aller Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen erzielt. Zu den Parameterkombinationen mit den höchsten Erfolgsraten zählen (in Klammer sind die Kürzel für die Parameterkombination und die Anteile an allen Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen angeführt): Kombination 2 (bgnadsw, 85%), Kombination 7 (bgns) und Kombination 4 (bgnasw) mit 82%, Kombination 6 (bgndsw, 81%) und Kombination 1 (bgnasdfs, 80%). Des weiteren weisen die Parameterkombinationen Kombination 10 (bgfsw) , Kombination 5 (bgnw) und Kombination 13 (bdfsw) folgende Erfolgsraten auf: Kombination 10 erreicht 72% aller Anrisspunkte der gravitativer Massenbewegungen, Kombination 5 hat einen Anteil von 79% aller Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen und Kombination 13 weist eine Erfolgsrate von 71% auf.

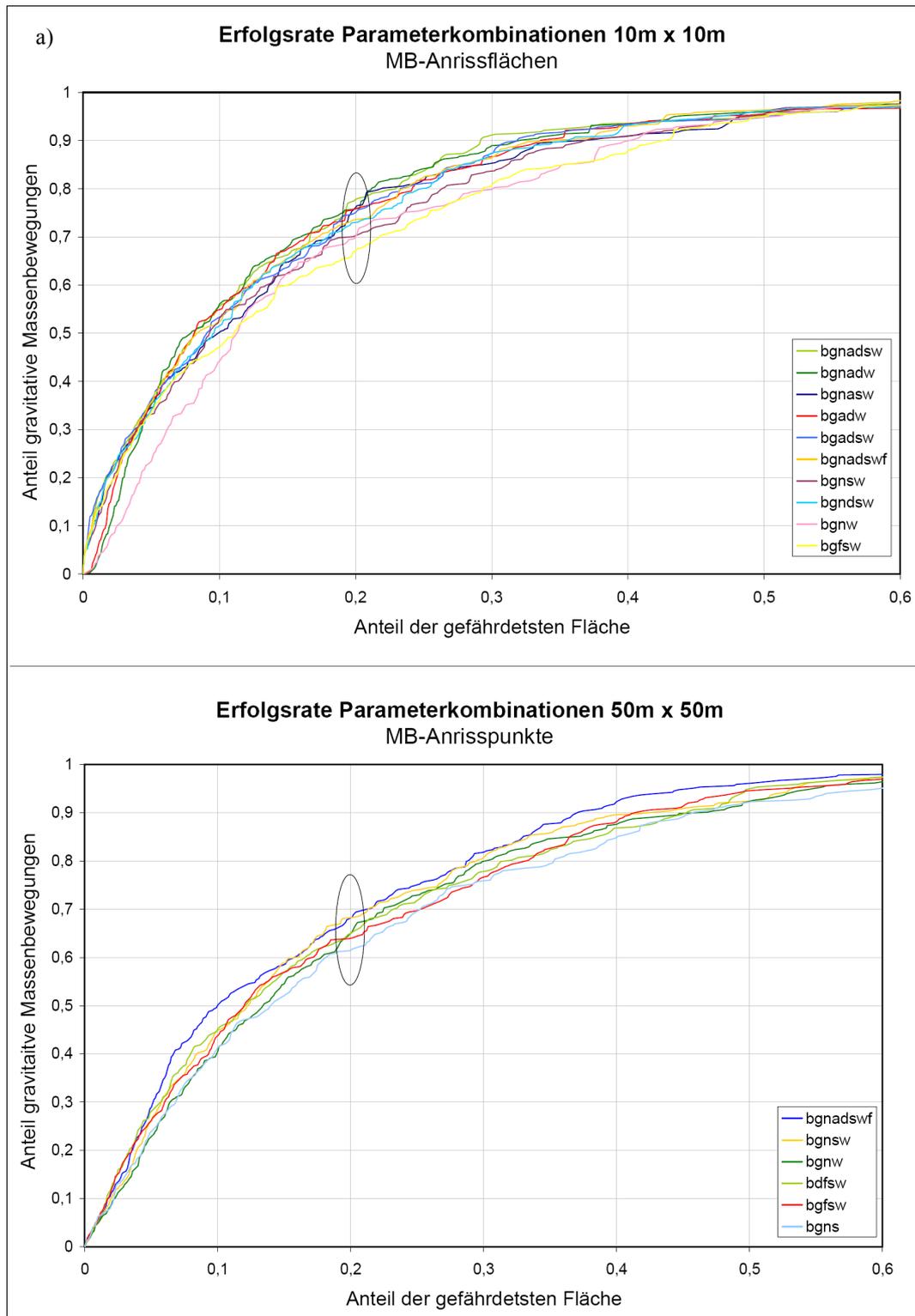


Abb. 6.10: a) Erfolgsrate der Parameterkombinationen für die 10m Rasterweite, berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, b) Erfolgsrate der Parameterkombinationen für die 50m Rasterweite, berechnet mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen.

### 6.2.2.2 Rasterweite 50m x 50m

Die Erfolgsrate liegt generell für die 50m Rasterweite etwas niedriger als für die 10m Rasterweite. Dabei ist die Berechnung der Erfolgsrate/Gefahrenhinweiskarte mit einem Neighborhood Pixel erfolgt. In Abbildung 6.10b sind die Kurven für die Erfolgsrate in der 50m Rasterweite, berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen dargestellt. Die Diagramme zu den Erfolgsraten der anderen Berechnungsvarianten werden in dieser Arbeit nicht angeführt.

#### Erfolgsrate berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen:

Die Erfolgsrate befindet sich für die besten Ergebnisse der 50m Rasterweite in einem Bereich zwischen 62% und 68% aller Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche. Im Detail betrachtet liegen für die besten Parameterkombinationen, bei 20% der gefährdetsten Fläche, folgende Anteile an allen Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen vor: Kombination 1 (bgnadswf) und Kombination 7 (bgns) erreichen eine Erfolgsrate von 68%, die Kombination 5 (bgnw) und Kombination 13 (bdfsw) weisen eine Erfolgsrate von 65% auf, die Kombination 10 (bgfsw) liegt mit einer Erfolgsrate von 64% knapp darunter und die Erfolgsrate der Kombination 8 (bgns) liegt bei 62%.

#### Erfolgsrate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen:

Die höchste Erfolgsrate erreicht hier, bei 20% der gefährdetsten Fläche, die Kombination 1 aus allen Parametern, mit einer Trefferquote von 65% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Darauf folgt die Kombination 7 (bgns) mit 63% der Anrissflächen in 20% der gefährdetsten Fläche. Die weiteren Parameterkombinationen 10, 5 und 13 (bgfsw, bgnw, bdfsw) beinhalten, bei 20% der als gefährdet ausgewiesenen Fläche, zirka 60% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen.

#### Erfolgsrate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer als 1000m<sup>2</sup>:

Aus der Berechnung der Erfolgsrate mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, liegen folgende Ergebnisse vor: Die höchste Erfolgsrate erreicht die Parameterkombination 13 (bdfsw). Hier finden sich in 20% der gefährdetsten Fläche, 63% aller Anrissflächen größer 1000m<sup>2</sup> der gravitativen Massenbewegungen.

Die anderen Parameterkombinationen erreichen Werte zwischen 53% (Parameterkombination 5, bgnw) und 62% (Parameterkombination 1, bgnadswf) aller Anrissflächen größer 1000m<sup>2</sup> der gravitativen Massenbewegungen.

### 6.2.2.3 Diskussion:

Mit allen im Zuge der Analysen berechneten Parameterkombinationen, leider konnten in dieser Arbeit nicht alle angeführt werden, konnten Erfolgsraten im Bereich zwischen min. 50% und max. 85% aller gravitativen Massenbewegungen (Anrisspunkte und Anrissflächen in 10m und 50m Rasterweite) bei 20% der gefährdetsten Flächen erreicht werden. Damit liegen die hier berechneten Erfolgsraten weit über dem Grenzwert von 20% aller gravitativer Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche, der überschritten werden muss, dass eine signifikante und keine zufällige Verteilung vorliegt. Die Analysen zeigen, dass die Parameterkombination mit der höchsten Erfolgsrate mit einer Rasterweite von 10m x 10m nicht automatisch für die 50m x 50m Rasterweite die höchste Erfolgsrate ergibt. Dieser Umstand führte dazu, dass für das Finden der besten Parameterkombination für die 50m x 50m Rasterweite neue bzw. andere Parameterkombinationen berechnet werden mussten. Des weiteren zeigen die Ergebnisse, dass egal ob mit Anrissflächen oder Anrisspunkten einer Rasterweite die Gefahrenhinweiskarte berechnet wurde, immer die selbe Parameterkombination die höchste Erfolgsrate erreichte. Der einzige Unterschied lag in der Höhe der Erfolgsrate, denn bei der Berechnung mit der 10m Rasterweite sind für die besten Parameterkombinationen Unterschiede von 7% zwischen den Anrisspunkten und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen aufgetreten, hingegen bei der 50m x 50m Rasterweite sind Unterschiede von nur 3% im Ergebnis.

Die Berechnung der Erfolgsrate mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer 1000m<sup>2</sup> ergab eine maximale Erfolgsrate von 62%. In diese Berechnung sind nur 45 Anrissflächen von gravitativen Massenbewegung eingegangen, was zeigt, dass auch mit wenig Eingangsdaten bezüglich gravitativer Massenbewegungen mit diesem Modell gute Erfolgsraten erreicht werden können. Dieser Sachverhalt kann für andere Untersuchungsgebiete, mit kleineren Inventaren von großer Bedeutung sein.

Die Erfolgsrate stellt keine unabhängige Validierungsmöglichkeit dar, sondern sie ist ein Maß für die Güte der Anpassung des Modells an die Daten zu den gravitativen Massenbewegungen. Daher wurde den Werten der Erfolgsrate im Vergleich zur Vorhersagerate eine geringere Bedeutung bei der Auswahl der Parameterkombination, die die beste Gefahrenhinweiskarte ergibt, zugemessen.

### 6.2.3 Vorhersagerate

Die Vorhersagerate wurde über die zufällige Kreuzvalidierung berechnet. Sie weist etwas geringere Werte als die Erfolgsrate auf, da nur ein Teil (z.B. 50%) aller gravitativer Massenbewegungen zur Berechnung herangezogen wird.

Um einen besseren Überblick zu gewährleisten, werden im Folgenden die Aspekte der Vorhersagerate der einzelnen Parameter, der Anrissflächen und der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen in Unterkapiteln beschrieben. In Abbildung 6.11 sind die Diagramme zur Vorhersagerate für die Parameter und die Parameterkombinationen, berechnet mit den Anrissflächen (10m Rasterweite) und Anrisspunkten (50m Rasterweite) der gravitativen Massenbewegungen dargestellt. Die Werte der Vorhersagerate für die Anteile an den gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe, die innerhalb der gefährdetsten Flächen liegen, werden im folgenden jeweils bei 20% der gefährdetsten Fläche abgelesen.

#### 6.2.3.1 Rasterweite 10m x 10m

##### Vorhersagerate der Parameter:

Die Vorhersagerate der einzelnen Parameter (Abbildung 6.11a) verhält sich im Allgemeinen, bei einem Vergleich zwischen der Berechnung mit den Anrissflächen und den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen, sehr ähnlich. Für die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegung werden aber um etwa 5% höhere Anteile der gravitativen Massenbewegungen erreicht. Die Datensätze mit der besten Vorhersagerate sind, berechnet mit den Anrisspunkten, der Bodendatensatz und der Datensatz zur Distanz zum Wegenetz. Sie weisen einen Anteil von 60% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe auf. Darauf folgen nachstehende Datensätze mit den jeweiligen Anteilen an den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen: Distanz zum Flussnetz, mit 48%, der Datensatz zur Höhe mit 45%, die Landnutzung mit 43% und die Datensätze zu Geologie, Hangexposition und die Hangneigung mit 30%.

Die Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen ergibt folgendes Bild: der Datensatz zum Boden weist einen Anteil von 55% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe auf. Darauf folgen mit 45% der Anrissflächen (Evaluierungsgruppe) die Datensätze zur Distanz zum Flussnetz und zur Distanz zum Wegenetz. Die weiteren Datensätze mit einer geringeren Vorhersagerate, jeweils mit dem Prozentanteil an den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe angeführt, sind: die Höhe, mit 40% , die Landnutzung, mit 37%, die Hangneigung, mit 28% und die Hangexposition, mit 27%.

### Vorhersagerate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen:

Die besten Parameterkombinationen, berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, weisen eine Vorhersagerate von 64% bis zu 70%, gemessen bei 20% gefährdetsten Fläche, auf.

Eine Rangordnung der Vorhersagerate der besten Parameterkombinationen aus 17 getesteten, lautet wie folgt (in Klammer sind neben den Kürzeln für die Parameterkombination, die Prozentanteile an den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe angeführt): Kombination 7 (bgns<sub>w</sub>, 70%), Kombination 3 (bgnad<sub>w</sub>, 69%), Kombination 5 (bgn<sub>w</sub>, 68%), Kombination 4 (bgnas<sub>w</sub>, 68%), Kombination 2 (bgnad<sub>sw</sub>, 65%), und Kombination 6 (bgnd<sub>sw</sub>, 64%)

Nun kann auch die **Robustheit** der besten Parameterkombination 7 (bgns<sub>w</sub>) beschrieben werden. Werden anstatt 50% nur noch 25% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für die Berechnung der Gefahrenhinweiskarte verwendet, dann liegt die Vorhersagerate anstatt bei 70% der Evaluierungsgruppe nur noch bei 63% der Evaluierungsgruppe. Berechnet man die Gefahrenhinweiskarte mit 10% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen erreicht man einen Anteil an den gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe von 60%.

Die Ergebnisse aus der mehrmaligen zufälligen Auswahl von 50% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für die Schätzgruppe zeigen, dass Anteile an den Anrissflächen der Evaluierungsgruppe von 67% - 73% auftreten, was einen Schwankungsbereich von nur 6% bedeutet.

### Vorhersagerate berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen:

Die Berechnung der Vorhersagerate mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen zeigt, dass hier höhere Vorhersageraten erreicht werden können. Im Folgenden werden die Anteile der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe beschrieben. Die höchste Vorhersagerate erreicht hier die Parameterkombination 3 (bgnad<sub>w</sub>) und liegt bei 77% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Danach folgen die Parameterkombinationen 1 (bgnad<sub>fsw</sub>) und 2 (bgnad<sub>sw</sub>) mit 76%. Die Parameterkombination 7 (bgns<sub>w</sub>) erreicht die selbe Vorhersagerate wie die Parameterkombination 5 (bgn<sub>w</sub>) und diese liegt bei 75%. Die Parameterkombinationen 8 (bgns) und 13 (bdf<sub>ws</sub>) zeigen mit 65% und 55% einen geringeren Anteil an den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe auf.

Zur Robustheit der besten Parameterkombination 3 (bgnad<sub>w</sub>) bei der Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen zeigt sich, dass durch die fünfmalige zufällige Auswahl ein Schwankungsbereich von 10% mit Vorhersageraten von 71% bis 81% der Evaluierungsgruppe entsteht. Durch die Vergrößerung der Evaluierungsgruppe auf 75% aller gravitativer Massenbewegungen liegt der Anteil der „vorhergesagten“ gravitativen Massenbewegungen bei 73%. Werden nur noch 10% aller gravitativer Massenbewegungen in die Schätzgruppe aufgenommen liegt die Vorhersagerate bei 70% der Evaluierungsgruppe.

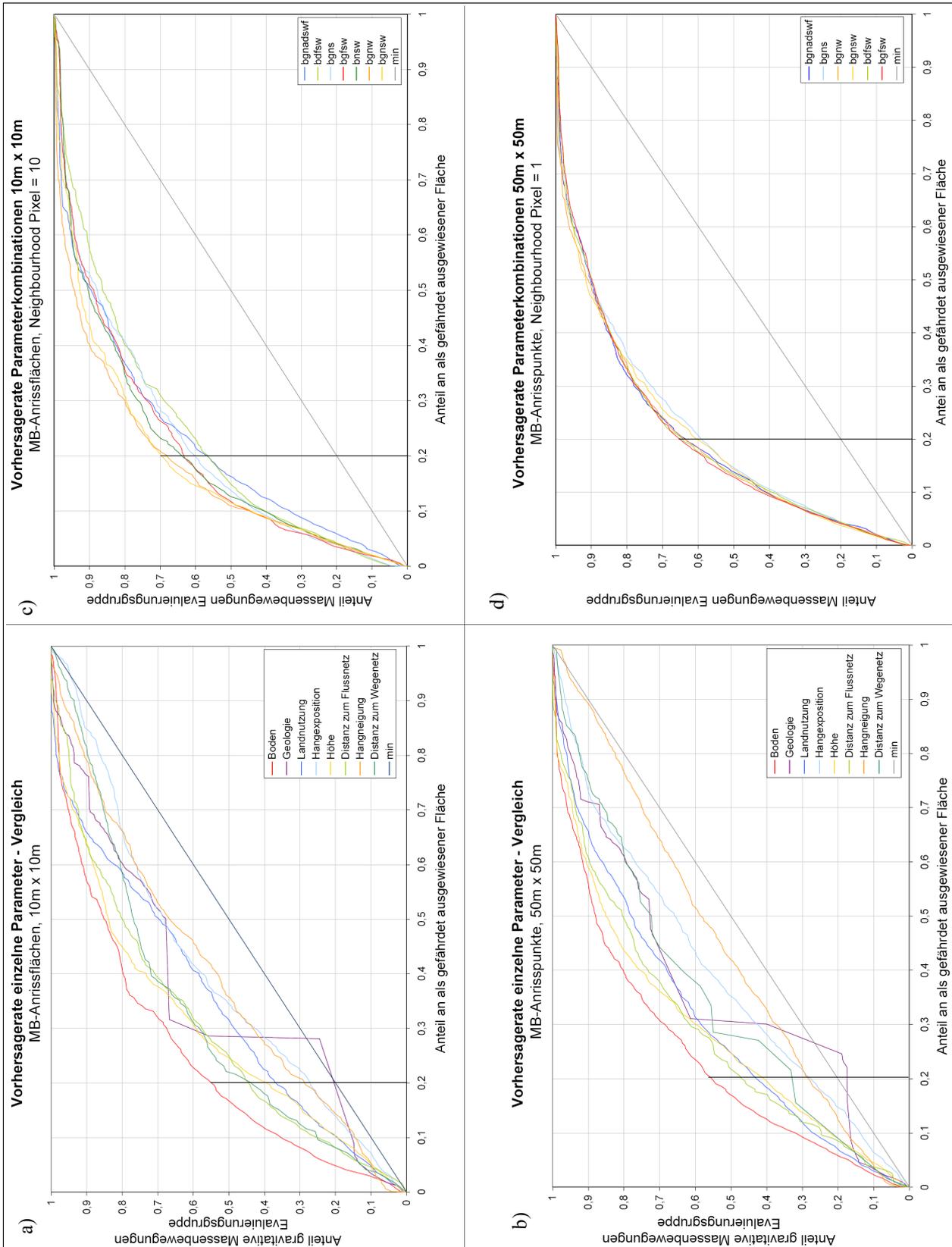


Abb. 6.11: a) und b) Vorhersagerate einzelne Parameter (Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Distanz zum Flussnetz, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz) jeweils für die Rasterweite von a) 10m und b) 50m; Vorhersagerate für ausgewählte Parameterkombinationen in c) 10m Rasterweite, die Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen (=MB), und d) 50m Rasterweite, zur Berechnung wurden die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen herangezogen.

### 6.2.3.2 Rasterweite 50m x 50m

Die Ergebnisse zur Vorhersagerate aus der Analyse mit Datensätzen in der 50m Rasterweite werden im Folgenden bei 20% der gefährdetsten Flächen abgelesen. Hier werden im Gegensatz zu der 10m Auflösung noch die Ergebnisse aus der Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind beschrieben.

#### Vorhersagerate der Parameter:

Die höchste Vorhersagerate erreicht für die Berechnungsvarianten mit den Anrisspunkten und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Datensatz zu den Bodenklassen. Diese liegt bei 55% der Anrisspunkte bzw. 47% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Die zweit-höchste Vorhersagerate erreicht der Datensatz zur Distanz zum Flussnetz. Es können mit diesem Datensatz 47% (Anrisspunkte) bzw. 45% (Anrissflächen) der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe vorhergesagt werden. Es folgen die Parameter „Landnutzung“ mit 43% (Anrisspunkte) bzw. 36% (Anrissflächen) und „Höhe“ mit 40% (Anrisspunkte) bzw. 38% (Anrissflächen) der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Die geringste Vorhersagerate erreicht der Parameter zur Geologie bei der Berechnung mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen mit einem Anteil von nur 18%. Bei der Ermittlung der Vorhersagerate mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen schneidet die Hangneigung, mit einer Vorhersagerate von 21% am schlechtesten ab.

Für die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind liegt der Anteil der Evaluierungsgruppe für den Bodendatensatz bei 26%. Bei dieser Berechnungsvariante erzielt der Parameter „Hangneigung“ die höchste Vorhersagerate mit 34% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Darauf folgt die Höhe mit einer Vorhersagerate von 33% der Evaluierungsgruppe. Die weitere Reihenfolge nach der Vorhersagerate lautet wie folgt (in Klammer sind neben den Prozentanteilen an den Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe, die Kürzel für die Parameterkombination angeführt): Exposition (28%), Boden (26%), Distanz zum Wegenetz (20%), Distanz zum Flussnetz (18%), Landnutzung (9%) und Geologie (8%).

#### Vorhersagerate berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen:

Die Vorhersagerate schwankt für die besten Parameterkombinationen zwischen 58% und 67% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe (Abbildung 6.11d). Hier zeigte die richtige Auswahl der Anzahl der Neighbourhood Pixel einen großen Effekt auf die Höhe der Vorhersagerate. Durch Ändern der Anzahl der Neighbourhood Pixel gewinnen andere Datensätze an Bedeutung und statt der Parameterkombination 3 (bgnadw) hat nun die Kombination 10 (bgfsw) die höchste Vorhersagerate. Aber nicht nur die erklärenden Parameter ändern sich, sondern auch die

Vorhersagerate ist mit nur einem Neighbourhood Pixel für die gleiche Parameterkombination bei 20% der gefährdetsten Flächen um etwa 8% höher.

So ergibt sich für die getesteten Parameterkombinationen mit 50m Rasterweite und einem Neighbourhood Pixel folgende Rangfolge bezüglich der Vorhersagerate (in Klammer ist der jeweilige Anteil an den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe angeführt): Kombination 10 (bgfsw, 67%), Kombination 13 (bdfsw, 64%), Kombination 1 (bgnadswf) und Kombination 5 (bgnw) erreichten 63%, Kombination 7 (bgns, 60%) und Kombination 8 (bgns, 58%)

Bezüglich der **Robustheit** der besten Parameterkombination muss hier festgehalten werden, dass bei der Verkleinerung der Schätzgruppe auf 25% aller Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen die Vorhersagerate um 3% auf 63% der Evaluierungsgruppe sinkt. Bei einer Schätzgruppe von 10% aller Anrisspunkte gravitativer Massenbewegungen sinkt die Vorhersagerate auf 55% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe (vgl. Tabelle 7.2).

Die Parameterkombination 10 (bgfsw) zeigt einen geringen Spielraum der Vorhersagerate bei fünffacher zufälliger Auswahl von gravitativen Massenbewegungen. Die Vorhersagerate schwankt zwischen 64% und 67% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe.

#### Vorhersagerate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen:

Die Vorhersageraten berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel, liegen für die hier bearbeiteten Parameterkombination zwischen 55% und 60%. Die höchste Vorhersagerate zeigen die Parameterkombinationen 7 (bgns) und 5 (bgnw). Drauf folgen die Parameterkombinationen 13 (bdfsw) und 10 (bgfsw) mit einer Vorhersagerate von 58% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Die schlechteste Vorhersagerate weist die Kombination aller Parameter mit 55% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe auf.

#### Vorhersagerate berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer als 1000m<sup>2</sup>:

Die Berechnung der Vorhersagerate mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen größer als 1000m<sup>2</sup> ergibt weit geringere Anteile an den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. So wird hier eine maximale Vorhersagerate von 45% der Anrissflächen der Evaluierungsgruppe für die Parameterkombination 7 (bgns) erreicht. Mit einem Anteil von 41% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe liegt die Kombination von allen Parametern (Kombination 1) knapp darunter. Die Parameterkombination 10 (bgfsw) hat eine Vorhersagerate von 37%. Darauf folgen die Parameterkombinationen 13 (bdfsw) und 5 (bgnw) mit einer Vorhersagerate von 24% bzw. 22%.

### 6.2.3.3 Diskussion

„Forecast without validation is of as little use in science as in common life“ (Jolliffe and Stephenson 2003) – dieses Zitat spiegelt gut die Notwendigkeit zur Validierung wieder. Deshalb wurde auch in diesen Analysen und der Bewertung der Gefahrenhinweiskarten ein besonderes Augenmerk auf die Ergebnisse aus der Validierung gelegt.

Die Validierung über die zufällige Auswahl von gravitativen Massenbewegungen für die Schätz- und Evaluierungsgruppe bot eine schnelle Möglichkeit zur Bewertung der Vorhersagefähigkeit und Robustheit der durchgeführten Modellierungen. Dafür kann man zwei Gründe anführen, einerseits ist die zufällige Auswahl in der Software SPM inkludiert und man kann ohne großen Aufwand mehrere Durchgänge mit unterschiedlich großen Schätz- und Evaluierungsgruppen durchführen. Dazu ist keine manuelle Aufteilung des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen notwendig. Andererseits können auch beliebig viele Durchgänge der Modellierung mit zufälliger Auswahl der Schätzgruppe angegeben werden, womit zusätzliche Aussagen zur Robustheit des Ansatzes getroffen werden können. Chung und Fabbri (2007) empfehlen die zufällige Aufteilung der vergangenen gravitativen Massenbewegungen nicht, weil es im Vergleich zu den Ergebnissen aus der zeitlichen Aufteilung in Schätz- und Evaluierungsgruppe zu einer Überschätzung der Vorhersagerate kommt. Die zufällige Aufteilung bot sich dennoch gut an, da einerseits für diese Analysen keine zeitliche Auflösung der Daten zu den gravitativen Massenbewegungen vorhanden war und andererseits, weil dort, wo sich bereits gravitative Massenbewegungen ereignet haben, großteils das Material für weitere fehlt und an diesem Punkt keine gravitativen Massenbewegungen mehr stattfinden können, wie es bei Reaktivierungen der Fall wäre. Leider kann an dieser Stelle kein Vergleich zur Validierung über die räumliche Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen gegeben werden, womit die Überschätzung der Vorhersagerate eventuell quantifiziert werden könnte.

Die Vorhersagerate ist ein Maß für die Trefferquote einer Modellierung von einer Gefahrenhinweiskarte mit einer Schätzgruppe von gravitativen Massenbewegungen. Die Trefferquote bezieht sich auf die gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe, und zeigt an wie viel Prozent der gravitativen Massenbewegungen dieser Gruppe in den höchst gefährdeten Gebieten liegen und somit „vorhergesagt“ werden konnten. Die besten Gefahrenhinweiskarten, die in dieser Analyse mit einer Rasterweite von 10m, berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, erzeugt werden konnten, weisen eine Vorhersagerate von 70% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in 20% der gefährdetsten Fläche auf. Die Vorhersagerate weist bei dieser Parameterkombination 7 (bgnsw), einen Schwankungsbereich von 6% auf, was im Vergleich zu anderen durchgeführten Modellierungen im Mittelfeld liegt. Mit einer Rasterweite von 50m konnte für die beste Parameterkombination 10 (bgfsw) eine Vorhersagerate von 67% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche erreicht werden. Hier liegt ein Schwankungsbereich von nur 3% vor, was auf eine hohe Robustheit der Parameterkombination schließen lässt. Diese Werte liegen deutlich über den minimal zu erreichenden Grenzwert von 20% der gravitativen Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche, der überschritten sein muss, dass eine signifikante Verteilung vorliegt.

Ein zentrales Problem konnte aber durch die Berechnung der Vorhersagerate der Gefahrenhinweiskarte nicht gelöst werden: „*You told me where, but when will it happen?*“ (Fabbri et al. 2003, S. 498). Diese Frage ist gerade für die Anwender der Gefahrenhinweiskarte von zentraler Bedeutung, da die Antwort darauf unter anderem über den jeweiligen Verbauungsumfang und die Verbauungsmaßnahme entscheiden kann. Zusätzlich könnte man noch die Frage stellen, mit welcher Magnitude eine zukünftige gravitative Massenbewegung auftritt, bzw. welche Reichweiten hier zu tragen kommen könnten. Dieser Aspekt der zukünftig möglichen gravitativen Massenbewegungen ist auch im Hinblick auf die Berechnung des Risikos für einzelne Objekte oder Gemeinden, aber auch für die Planung von Verbauungsmaßnahmen und die Raumplanung in den Gemeinden von großer Bedeutung.

#### **6.2.4 Gefahrenhinweiskarten**

Im Folgenden wird die beste Gefahrenhinweiskarte für die jeweilige Rasterweite vorgestellt und mit den Ergebnissen aus anderen Parameterkombinationen verglichen. Weitere Gefahrenhinweiskarten, die hier nicht abgebildet werden, sind im Anhang in Kapitel C.2 für die einzelnen Datensätze und in Kapitel C.3 für weitere Parameterkombinationen zu finden.

Die Gefahrenhinweiskarten zu den einzelnen Parametern wurden schon durch die Beschreibung des Likelihood Quotienten und der empirischen Häufigkeitsverteilung ausreichend hinsichtlich besonders anfälliger bzw. standfester Einheiten beschrieben welche sich im Erscheinungsbild der Karten deutlich zeigen. Eine weitere wichtige Aussagekraft zur Bewertung der einzelnen Parameter bietet die Vorhersagerate der Datensätze, die bereits eingehend beschrieben wurde. Die Gefahrenhinweiskarten der einzelnen Parameter werden in diesem Kapitel nicht näher erläutert, jedoch zeigen sich bei der Betrachtung der Gefahrenhinweiskarten (Abbildung C.3 und C.4 im Anhang) deutliche Parameter-spezifische Muster, die sich im Folgenden in der Parameterkombination und im Erscheinungsbild der Gefahrenhinweiskarte auswirken.

In der Diskussion sollen Vor- und Nachteile dieser Karten und die geomorphologische Güte behandelt werden. Des weiteren sind zur Auswahl der besten Gefahrenhinweiskarte neue Überlegungen bezüglich Form und Lagegenauigkeit des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen entstanden, welche jedoch aufgrund der engen Zusammenhänge mit den Unsicherheiten der Datensätze in der Diskussion in Kapitel 8 beschrieben werden.

##### **6.2.4.1 Rasterweite 10m x 10m**

Aus den Ergebnissen der Vorhersagerate für die 10m Rasterweite geht hervor, dass die Parameterkombination 7 (bgnsw), berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die höchste Vorhersagerate aufweist. Für die Anrisspunkte hat diese

Parameterkombination die zweit-höchste Vorhersagerate mit 75%. Auch die Erfolgsrate ist mit 70% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche vergleichsweise hoch, wenn auch nicht die höchste Erfolgsrate, die mit den unterschiedlichen Parameterkombinationen erreicht werden konnte.

Die Gefahrenhinweiskarte für diese Parameterkombination 7 (bgnsw) ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Sie zeigt in pink-violetter Farbe (entspricht 1% des Untersuchungsgebietes) die höchst gefährdeten Bereiche und in Blautönen (entsprechen 65% des Untersuchungsgebietes) die wenig gefährdeten Bereiche im Untersuchungsgebiet auf. Bei der Betrachtung der Gefahrenhinweiskarte fällt auf, dass die höchst gefährdeten Bereiche eher in den tieferen Tallagen und in Bereichen mit engeren Talböden liegen. Nicht nur entlang des Gasenbaches, sondern auch im Bereich des Fischbaches, des Steinbaches, und besonders auch beim Amasseger Bach im Bereich der Einmündung von Lindbach und Haslauer Bach treten Gefahrenhinweisbereiche mit einer sehr hohen relativen Gefährdung auf. Außerdem paust sich das Wegenetz mit den linienhaften Strukturen, die auch im Farbton Pink erscheinen, bis in höhere Lagen durch. Weniger gefährdete Bereiche sind generell betrachtet in höheren Lagen und im Südwesten des Untersuchungsgebietes zu finden. Sobald der Talboden etwas breiter wird, wie z.B. bei Gasen oder flussaufwärts von Haslau am Gasengraben sinkt auch die relative Gefährdung. Größere wenig gefährdete Gebiete liegen im Bereich Gasengraben zwischen Eibächer und Geißbauer. Hier sind ab einer Höhe von 760 m NN große blaue Bereiche ausgewiesen. Weitere größere, wenig gefährdete Bereiche findet man im Gebiet des Westhanges des Beisteiner Kogels bis zum Feichtkogel im Nordwesten des Untersuchungsgebietes und in den höheren Bereichen des zentral gelegenen Hirschbergs.

Die Gefahrenhinweiskarte aus der Parameterkombination 7 (bgnsw) weist eine hohe geomorphologische Güte auf. Einerseits sind die einzelnen Parameter aus geomorphologischer Sicht, aber auch aus Sicht der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten, sinnvoll und andererseits entspricht das entstandene Kartenbild sehr gut den tatsächlich ereigneten gravitativen Massenbewegungen. Im Anhang ist in Abbildung C.3 zum Vergleich auch die gleiche Parameterkombination berechnet mit Anrisspunkten dargestellt. Das Erscheinungsbild der Karten fällt sehr ähnlich aus, Unterschiede ergeben sich im Bereich des Amassegger Grabens, wo bei der Berechnung mit den Anrisspunkten etwas geringere Gefährdungen ausgewiesen werden. Hingegen im Bereich um Gasen werden höhere Gefährdungen ausgewiesen.

An dieser Stelle muss auch die Gefahrenhinweiskarte aus der Kombination 5 (bgnw) beschrieben werden (siehe Abbildung C.6 im Anhang). Diese Parameterkombination zeigt einen ähnlich hohen Kurvenverlauf der Vorhersagerate, die sich von den anderen Parameterkombinationen deutlich abhebt. In 20% der gefährdetsten Fläche liegen 68% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe und auch die Erfolgsrate ist ähnlich hoch wie die der Parameterkombination 7 (bgnsw). Jedoch wird bei dieser Parameterkombination die Hangneigung als wichtiger erklärender Faktor vernachlässigt, was sich auch deutlich im Kartenbild äußert. Grob stimmen zwar die weniger gefährdeten Bereiche mit der Gefahrenhinweiskarte aus der Parameterkombination 7 (bgnsw) überein, aber bei näherer Betrachtung fällt auf, dass die höchst gefährdeten Bereiche stark auf den Talboden und die Bereiche um das Wegenetz konzentriert auftreten. Hier werden aber Bereiche mit breiterem Talboden, mit einem höheren Gefährdungslevel ausgewiesen und die hohe Gefährdung

beschränkt sich auf die Nähe zum Wegenetz ohne Rücksicht auf die vorhandene Hangneigung. Die Gefahrenhinweiskarte aus der Parameterkombination 5 (bgnw) zeigt daher trotz der hohen Vorhersagerate kein geomorphologisch plausibles Kartenbild, da die Hangneigung in der Parameterkombination fehlt, und so keine Hangbereiche, sondern hauptsächlich nur Wege, auch in flachen Bereichen, als hoch gefährdet angezeigt werden. Aus diesem Grund wird hier eine geringe geomorphologische Güte zugeordnet.

Mit der Beschreibung einer dritten Parameterkombination kann der Einfluss der Hangneigung auf das Kartenbild aufgezeigt werden. Die Parameterkombination 8 (bgns) dargestellt in Abbildung C.7 im Anhang, zeigt, dass ohne der Hinzunahme der Distanz zum Wegenetz, der Talboden, wenn auch nur sehr schmal, von der hohen Gefährdung ausgenommen wird. Die größeren wenig gefährdeten Bereiche finden sich generell in den höheren Lagen und bei flacheren Hangneigungswinkeln. In dieser Karte werden die höheren Bereiche nicht von den linienhaften Strukturen, die durch die Aufnahme der Distanz zu den Wegen entstehen, durchschnitten. Diese Ausweisung der gefährdeten Bereiche hat eine sehr hohe geomorphologische Güte zur Folge. Die Vorhersagerate dieser Parameterkombination fällt allerdings mit 60% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in 20% der gefährdetsten Fläche deutlich geringer aus. Des Weiteren fehlt in dieser Kombination der Parameter der Distanz zum Wegenetz, der hohe Werte in der empirischen Häufigkeitsverteilung, im Likelihood Quotienten und in der Vorhersagerate aufweist.

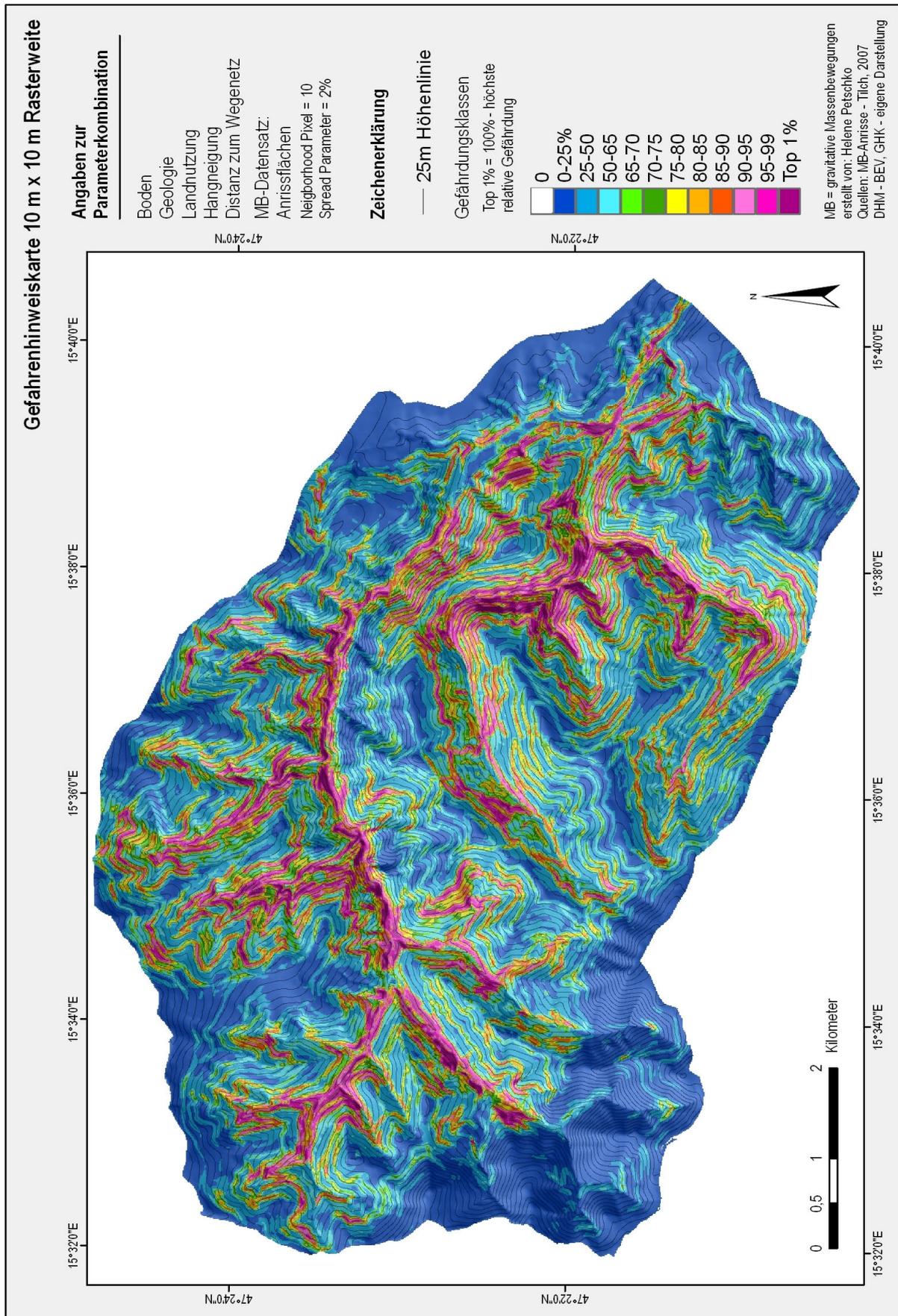


Abb. 6.12: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination 7 (bgns), berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel

#### 6.2.4.2 Rasterweite 50m x 50m

Die Parameterkombination 10 (bgfsw) wurde mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechnet. Sie zeigt deutlich die beste Vorhersagerate mit 67% der gravitativen Massenbewegungen der Schätzgruppe. In Abbildung 6.13 wird die Gefahrenhinweiskarte für die Parameterkombination 10 (bgfsw) dargestellt. Die aufgrund von möglichen zukünftigen Anrissen von gravitativen Massenbewegungen hoch gefährdeten Bereiche liegen in Gerinnenähe, im Bereich des Talbodens und an steilen Hängen. Der Fischbach und der Steinbach zeigen auch an ihren Zuläufen noch eine höhere Gefährdung. Gerade auch im Bereich des Amassegger Baches und des Haslauer Baches finden sich die Gefahrenhinweisbereiche mit dem größten relativen Gefahrenlevel. Dazwischen finden sich deutlicher abgegrenzt in den höheren Lagen jene Bereiche, die eine geringe Gefährdung aufweisen und 65% der Fläche einnehmen dargestellt. Das Wegenetz tritt nicht deutlich in Erscheinung, was auf die Darstellung in der 50m Rasterweite zurückzuführen ist. Im Anhang ist in Abbildung C.6 die Gefahrenhinweiskarte aus der gleichen Parameterkombination berechnet mit den Anrissflächen dargestellt. Das Erscheinungsbild der Karten ist sehr ähnlich. Bei der Berechnung mit den Anrissflächen fällt auf, dass flachere Bereiche mit höherer Gefährdung ausgewiesen werden, was auf die größeren Flächen, die der Analyse zugrunde liegen zurückzuführen ist.

Im Anhang ist eine weitere Parameterkombination 13 (bdfsw) in Abbildung C.9 dargestellt. Bei dieser Parameterkombination fehlt der Parameter Geologie, was im Süd-Westen des Untersuchungsgebietes sichtbar wird. So werden bei der Parameterkombination 10 (bgfsw) kleine Bereiche mit einer mittleren Gefährdung ausgewiesen, welche aber bei Kombination 13 (bdfsw) fehlen. Durch die Aufnahme der Höhe als erklärender Parameter werden die tieferen Lagen im Osten des Untersuchungsgebietes mit einem höheren Gefährdungsgrad ausgewiesen. Hingegen in den höheren Lagen, am Talschluss der Seitenbäche des Gasenbaches, werden geringere Gefährdungsklassen angezeigt.

Der Vergleich der Ergebnisse aus der Parameterkombination 7 (bgfsw) in der 10m und 50m Auflösung zeigt, dass mit der 50m Rasterweite (Abbildung C.10) entlang dem Verlauf des Gasenbaches, auch am Talboden, vorwiegend die höchst gefährdeten Bereiche, ausgewiesen wurden. Generell fällt bei der Gefahrenhinweiskarte dieser Parameterkombination auf, dass im Gegensatz zu den anderen Ergebnissen der 50m Rasterweite nicht pauschal fast alle Talbereiche als höher gefährdet ausgewiesen werden, sondern die höher gefährdeten Bereiche verstreut und punkthaft auftreten.

Die Gefahrenhinweiskarten in der 50m Rasterweite zeigen hinsichtlich der geomorphologischen Güte schlechtere Ergebnisse, dennoch sind die Gefahrenhinweiskarten aus der Parameterkombination 10 (bgfsw), der Parameterkombination 13 (bdfsw) und der Parameterkombination 7 (bgfsw) von mittlerer geomorphologischer Güte. Abstriche müssen hier aufgrund der Ausweisung von hoch gefährdeten Gebieten im Bereich des Talbodens gemacht werden.

In Abbildung 6.14 ist die beste Gefahrenhinweiskarte berechnet aus den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, dargestellt. Für diese

Berechnungsvariante ist auch die Parameterkombination 7 (bgnsw) am erfolgreichsten. Sie weist, im Vergleich zu den mit allen gravitativen Massenbewegungen berechneten Gefahrenhinweiskarten in der 10m und 50m Rasterweite, eine deutlich geringere Vorhersagerate mit 45% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe bei 20% der gefährdetsten Fläche auf. Das Kartenbild ist allerdings deutlich unterschiedlich. Die Talböden werden großteils als wenig gefährdet ausgewiesen. So sind große Bereiche entlang des Gasenbaches als wenig gefährdet eingestuft. Hingegen im Bereich des Amassegger Baches bei der Einmündung von Lindbach und Haslauer Bach und auch am Nordosthang des Schoberkogels, treten die hoch gefährdeten Bereiche konzentriert auf. In Abbildung C.9 im Anhang ist die Gefahrenhinweiskarte aus der besten Parameterkombination der Anrisspunkte in der 50m x 50m Rasterweite Kombination 10 (bgfsw) zum Vergleich dargestellt.

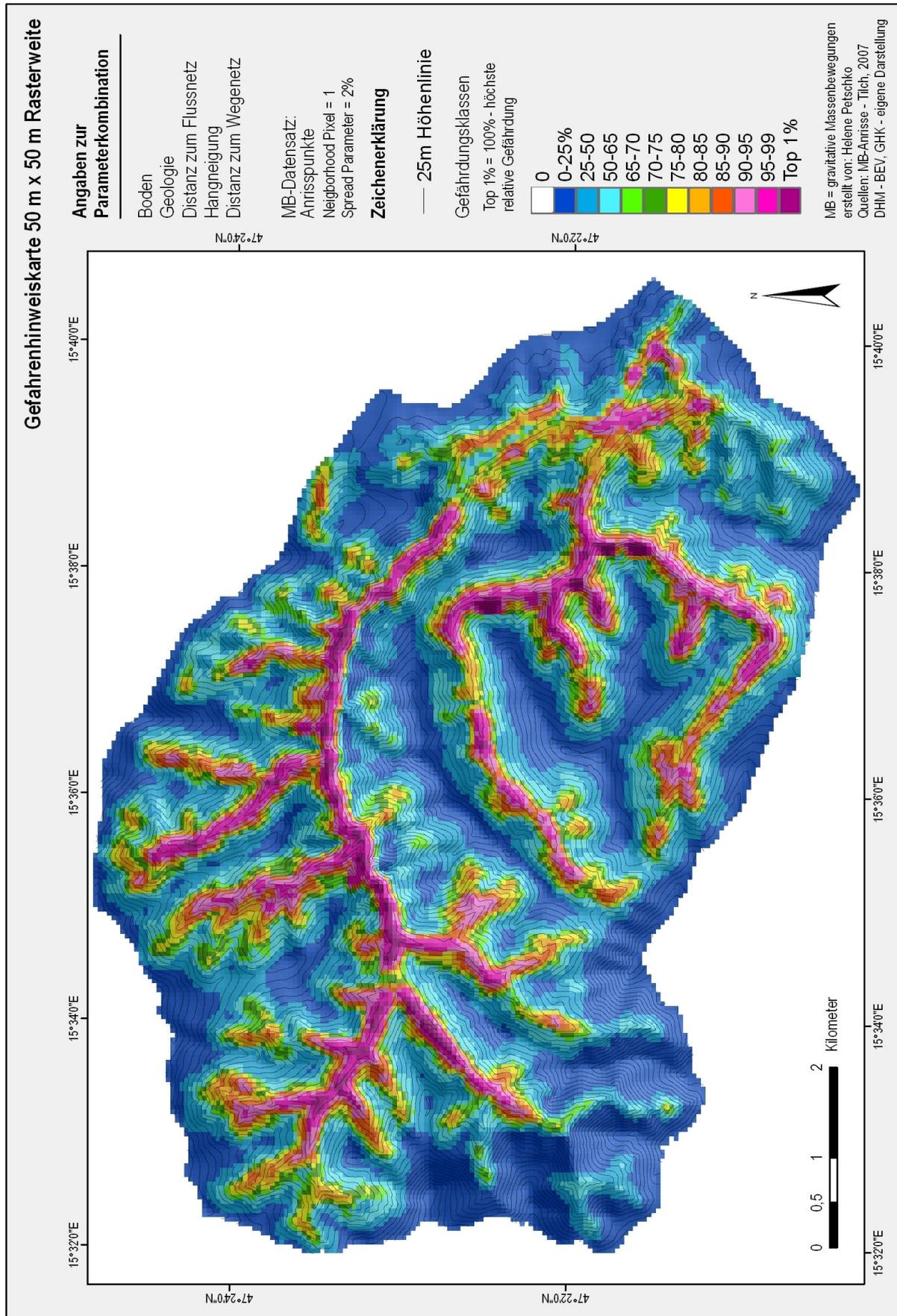


Abb. 6.13: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination 10 (bgfsw), berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel

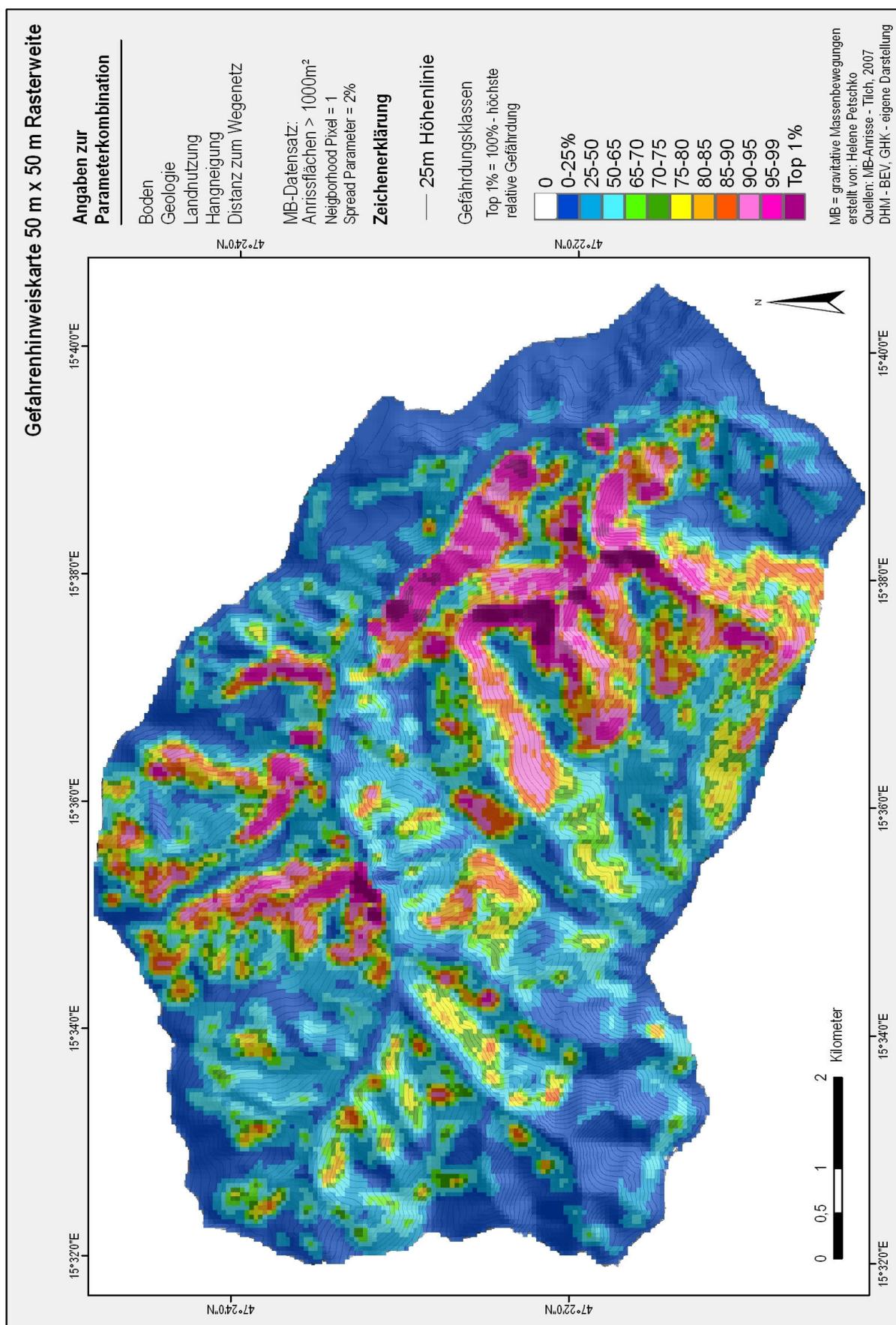


Abb. 6.14: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination 7 (bgns), berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, und einem Neighborhood Pixel

### 6.2.4.3 Diskussion

In die Gefahrenhinweiskarten, die in dieser Arbeit berechnet wurden, sind großteils nur Anrisspunkte, oder Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen aus dem Jahr 2005 in die Analyse eingegangen. Daten zu älteren gravitativen Massenbewegungen standen nicht für die Analysen zur Verfügung, was dazu führt, dass hier ein spezielles Szenario bezüglich der möglichen Auslöser behandelt wurde.

Die Erläuterung der Auswahlkriterien für die einzelnen Parameter und Parameterkombinationen erfolgt im Detail in der Diskussion in Kapitel 8, da sie neben dem Erscheinungsbild und der geomorphologischen Güte auch auf den Unsicherheiten der Analyse, die in Kapitel 7 beschrieben werden, gründen. Überlegungen bezüglich Form und Lagegenauigkeit des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen mussten als zusätzliches Kriterium aufgenommen werden, da die Wahl des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen Einfluss auf das Erscheinungsbild der Karte und somit auf die als gefährdet ausgewiesenen Flächen hat. Hier wurde versucht eine möglichst geringe Überschätzung durch die Pixel in 10m und 50m Rasterweite im Vergleich zur realen Größe der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen und eine hohe Lagegenauigkeit derer zu erzielen. Auf diese Kriterien wird ebenfalls in Kapitel 8 eingegangen.

Die Qualität der **Gefahrenhinweiskarten** wird durch die räumliche Auflösung maßgeblich beeinflusst. Hier zeigte sich, dass sich in der 50m Rasterweite andere Verteilungsmuster der gefährdeten Gebiete ergeben, was unter anderem durch die Pixelgröße bedingt wird, denn dies ist sicher auch ein Relikt der schlechteren Darstellung der Eingangsdatensätze. Dadurch kommt es zu Stande, dass bei der Verwendung aller gravitativer Massenbewegungen der Bereich des Talbodens weitgehend, speziell in der 50m Auflösung, mit einer höheren Gefährdung ausgewiesen wird. Dabei kommt zu tragen, dass die Talböden sehr eng sind, und daher nicht mit einem 50m x 50m Pixel abgebildet werden können. Außerdem verschwindet bei der kleineren räumlichen Auflösung das Wegenetz, welches in der 10m Auflösung noch deutlich sichtbar ist. Ein Hinweis auf das Wegenetz in der 50m Rasterweite tritt bei der Parameterkombination 7 (bgns) auf. Hier scheint die Kombination von Landnutzung und Distanz zum Wegenetz entscheidend für punkthafte Strukturen in der Gefahrenhinweiskarte zu sein. Des weiteren darf auch der Einfluss des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen nicht vernachlässigt werden. Am Beginn der Analysen wurde angenommen, dass die beste Parameterkombination für die 10m Rasterweite auch Hinweise auf die beste Parameterkombination für die 50m Rasterweite gibt, oder dass diese Parameterkombinationen sogar identisch sein könnten. Es zeigte sich aber deutlich, dass für die 50m Auflösung andere Parameter eine tragende Rolle spielten und so, mit anderen Parameterkombinationen, bessere Erfolgs- und Vorhersageraten erzielt werden konnten.

Mit der Berechnung von Gefahrenhinweiskarten mit dem Datensatz zu den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind wurde ursprünglich eine möglichst geringe Überschätzung der realen Größe der gravitativen Massenbewegungen angestrebt. Dies hatte zum Ergebnis, dass eine Gefahrenhinweiskarte für Anrissgebiete von größeren gravitativen Massenbewegungen entstand. Deren Erscheinungsbild unterscheidet sich deutlich von den anderen

Gefahrenhinweiskarten aus der Verwendung von allen Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Einerseits werden durch die Gefahrenhinweiskarten aus dieser Berechnung andere Gefahrenhinweisbereiche für mögliche Anrissflächen von gravitative Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, abgebildet. Andererseits zeigen die Ergebnisse aus der Modellierung mit diesem Datensatz, dass trotz der kleinen Anzahl von Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, signifikante Ergebnisse erzielt werden können. Ein Vergleich mit einer Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite, berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, wäre unter anderem auch im Hinblick auf die Bedeutung des Wegenetzes sehr interessant. Eventuell würden sich hier die Wege deutlicher im Kartenbild zeigen.

Zur **Aussagekraft der Gefahrenhinweiskarten** können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden: Mit dieser Methode wurde eine hohe Gefährdung durch die räumliche Korrelation von Eigenschaften der Parameter, die an einer bestimmten Stelle vorliegen, mit der hohen Anzahl, der sich dort in der Vergangenheit ereigneten gravitativen Massenbewegungen, ermittelt. Dadurch wurde im Zuge der Modellierung der Gefahrenhinweiskarte bei allen Pixeln bzw. Gebieten mit der gleichen Konstellation von Eigenschaften der Parameter ein hohes Gefährdungslevel ausgewiesen. Umgekehrt kann man das auch auf Pixel mit sehr niedrigen Levels der relativen Gefährdung anwenden. Diese werden in SPM so klassifiziert, dass in jeder Klasse die gleiche Pixelanzahl enthalten ist und so immer eine gleich große Fläche abgedeckt wird. Bei der Neu-Klassifizierung von 200 Klassen in 12 Klassen wurde in der Legende der Gefahrenhinweiskarten, nicht die Anzahl der Klassen, sondern der Prozentanteil an der Gesamtfläche angegeben. Für die Anwendung der entstandenen Gefahrenhinweiskarten ist es sehr wichtig eine Aussage bezüglich der Gefährdung zu ziehen, um abzugrenzen ab welcher Klasse es gefährlich und wo noch sicher ist. So kann als Orientierung bezüglich gefährdet oder sicher, die Aussage getroffen werden, dass sich in 20% der gefährdetsten Gebiete, 70% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe (Parameterkombination „bgnsw“ mit 10m Rasterweite) ereignet haben. Laut Chung und Fabbri (2003) kann bezüglich der Gefährdung folgende Aussage gemacht werden: wenn zum Beispiel 80% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in 10% der gefährdetsten Flächen liegen: will man zumindest 80% der gravitativen Massenbewegungen, die sich in Zukunft ereignen, abgrenzen, dann muss man diese 10% der Fläche als hoch gefährdet ausweisen. Dieser spannende Aspekt der Abgrenzung von sicher und gefährdet wird auch von vielen Autoren, die sich mit der Berechnung von Gefahrenhinweiskarten beschäftigt haben nicht näher bearbeitet. Der Experte muss daher eine Entscheidung treffen, wie viel Prozent der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in wie viel Prozent der Fläche vorhergesagt werden müssen, damit eine hohe Gefährdung vorliegt. Diese Wahlmöglichkeit ist aber bereits ein Gewinn, denn andere Ansätze zur Berechnung von Gefahrenhinweiskarten oder auch von Gefahrenkarten versäumen es eine Validierung der Ergebnisse durchzuführen (Guzzetti et al. 2006, Chung und Fabbri 2003). Für den Anwender zeigt diese Gefahrenhinweiskarte auf Pixelebene dargestellt hoch oder weniger gefährdete Bereiche für zukünftige Anrisse von gravitativen Massenbewegungen auf. Jedoch darf die Karte nicht auf Pixelebene ausgewertet werden und angewendet werden und es muss immer die Umgebung miteinbezogen werden.

## **7. Unsicherheiten**

Die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung werden von Unsicherheiten beeinflusst, die u.a. schon bei der Datengrundlage aus mehreren Gründen auftreten können. Weitere Unsicherheiten entstehen in der Datenverarbeitung in ArcInfo, zum Beispiel bei der Auswahl eines Algorithmus zur Berechnung der Hangneigung, und in der weiteren Verarbeitung und Analyse in SPM.

Doch bereits hinter der Auswahl der Methode, der Datengrundlagen und der Parameterkombination und schließlich der Auswahl der besten Gefahrenhinweiskarte stehen viele **subjektive Entscheidungen** und Annahmen, die ebenfalls Unsicherheiten in der Abschätzung der Gefahrenhinweiskarte darstellen.

### **7.1 Datengrundlage**

Einerseits entstehen Unsicherheiten in der Datengrundlage aufgrund von Schwankungen in der Kartierungsgenauigkeit der Lage der einzelnen kategorischen Einheiten und der Grenzverläufe und andererseits entstehen sie aufgrund von Fehlern in der photogrammetrischen Auswertung von Luftbildern. Weitere Fehlerquellen stecken in der Digitalisierung der Karten und auch in der Verbindung zweier Datensätze, wie dies bei den Bodendaten der Fall war. Im Folgenden wird kurz auf die Kartiergenauigkeit, Lücken und Maßstäbe der einzelnen Basisdatensätze eingegangen.

Zur **geologischen Karte** gibt es in der Literatur wenig bis keine Aussagen zu Unsicherheiten und Lagegenauigkeit. Hier lässt sich nur das generelle Problem, das bei der Extrapolation von Punktdaten in die Fläche auftritt und das Problem der Darstellung im Maßstab 1:50 000 anführen.

Die **digitale Bodenkarte** der landwirtschaftlichen Bodenkartierung wird im Maßstab 1: 10 000 aufgenommen und im Maßstab 1:25 000 veröffentlicht. Die Kartierung wird von Experten durch Ziehen und Graben von Bodenprofilen im Abstand von zirka 100m vorgenommen. Die forstliche Standortkartierung wird aufgrund ihres Alters (erstellt 1957 bis 1960), der damals fehlenden einheitlichen Kartierungsanleitung und der Kartierung durch Grundeigentümer, als eher problematisch angesehen (Hagen, persönliche Mitteilung 2008). Eine Quantifizierung der Ungenauigkeiten der Grenzverläufe der Bodeneinheiten und der Zuordnung von Bodenklassen konnte in der einschlägigen Literatur (Schneider et al. 2001 und Englisch et al. 2001) nicht gefunden werden.

Eine weitere Unsicherheit stellt die Verbindung der beiden Bodenkartierungen dar, weil dadurch auch Lücken ohne Bodeninformationen entstehen, zu denen folglich auch keine Aussagen u.a. zur

Bodenklasse oder zur Wasserspeicherkapazität gemacht werden können.

Die **digitale Katastralmappe** liegt im Maßstab 1: 1 000 vor. Die Lagegenauigkeit der einzelnen Landnutzungseinheiten ist laut BEV (2008) davon abhängig, ob es sich um ein Grenzkatastergrundstück handelt, oder ob eine Folgevermessung bereits erfolgt ist. Für ein Grenzkatastergrundstück wird eine Lagegenauigkeit im Zentimeter Bereich angenommen. Wenn nur eine Folgevermessung vorliegt kann man von einer Lagegenauigkeit im Bereich von Dezimeter bis Meter ausgehen. Sonst liegt die Qualität der DKM im Meter-Bereich. Leider konnten keine Angaben gefunden werden ob die vorliegende DKM auf einer Folgevermessung basiert.

Laut einer Auskunft von Mitarbeitern der GBA wurde im Zuge der Kartierungen festgestellt, dass oft Flächen in der DKM als Wald ausgewiesen sind, aber in der Realität hier kein Waldbestand, sondern vielmehr eine Böschung mit Buschwerk vorhanden ist (persönliche Mitteilung, Tilch und Schwarz 2008). Diese Ungenauigkeit wurde vor allem entlang von Wegen zusätzlich zu den Kartierungen erhoben, ist aber nicht flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet vorhanden und konnte daher in den Analysen nicht berichtet werden.

Die **Kartierung der gravitativen Massenbewegungen** ist mit unterschiedlicher Lagegenauigkeit erfolgt. Laut der Pilotstudie der GBA (Tilch et al. 2007) liegt die Lagegenauigkeit der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen bei 50m. Aufgrund der dichten Bewaldung und der engen Täler des Untersuchungsgebiets konnte die genaue Verortung der einzelnen Punkte und Flächen via GPS nicht erfolgen, weil oft das Eingangssignal zu schwach war. So orientierte man sich an der im Maßstab 1:10 000 kopierten ÖK50 und den dort eindeutig identifizierbaren Objekten. Die gravitativen Massenbewegungsflächen konnten aufgrund einer besseren Kartierungsgrundlage (DKM im Maßstab 1:1 000 und Luftbilder) etwas genauer aufgenommen werden, was zu einer Lagegenauigkeit von unter 50m führt.

Eine weitere Unsicherheit verbirgt sich hinter der Vollständigkeit der Kartierung. In dieser Analyse wurden hauptsächlich Daten von gravitativen Massenbewegungen, die sich im August 2005 (darunter auch 12 ältere und 13 jüngere gravitative Massenbewegungen) ereignet haben, verwendet. Ältere Daten könnten gravitative Massenbewegungen beinhalten, die an Standorten mit anderen Standortbedingungen (Eigenschaften der einzelnen Parameter) aufgetreten sind. Diese zusätzlichen Punkte hätten Einfluss auf die resultierende Gefahrenhinweiskarte. Des weiteren ist nicht gewährleistet, ob mit dem vorhandenen Datensatz zu den gravitativen Massenbewegungen flächendeckend, bzw. über alle Parameter gleichmäßig verteilt, Aussagen zu „gravitative Massenbewegung vorhanden“ – ja oder nein – gemacht werden können.

Das **digitale Geländehöhenmodell** wird laut BEV (2008) durch photogrammetrische Auswertung von Luftbildern erstellt. Dadurch kann ein mittlerer Fehler der Lagegenauigkeit in offenen und hügeligen Gebieten, wie dem Untersuchungsgebiet, von ca. 5m erreicht werden. In Waldgebieten ist der mittlere Fehler der Lagegenauigkeit mit 10m-20m etwas höher.

## 7.2 Datenverarbeitung mit ArcInfo, SPM

Die **Konvertierung der Vektordaten** zu Geologie, Boden und Landnutzung in Rasterdaten erzeugt Unsicherheiten bezüglich der Fläche, welche die kategorischen Einheiten jeweils abdecken und bezüglich des Verlaufs der Grenzen der einzelnen Einheiten. Diese Unsicherheiten wurzeln im Zuordnungsalgorithmus der einzelnen kategorischen Einheiten über die Pixel-Mitte. Die dadurch aufgetretenen Fehler sind bei der 50m Rasterweite größer als bei der 10m Rasterweite. Sie lassen sich am Beispiel der digitalen Katastralmappe, die durch die Darstellung im Maßstab 1:1 000 vergleichsweise viele Details abbildet, aufzeigen. Bei der Umwandlung der digitalen Katastralmappe ins Raster-Format tritt ein „Verlust“ des Wegenetzes auf, der vor allem bei der 50m Rasterweite sehr deutlich wird (vgl. schwarze Pixel in Abb. 6.1).

Eine weitere Unsicherheit verbirgt sich hinter der **Umwandlung der gravitativen Massenbewegungsflächen** in die 10m und 50m Rasterweite. Bei einem Blick auf die Größenverteilung der gravitativen Massenbewegungen (vgl. Tabelle 3.1) fällt auf, dass die Hälfte aller eine Gesamtfläche von weniger als 122 m<sup>2</sup> misst. Beim Quartil von 75% aller gravitativen Massenbewegungen weisen die gravitativen Massenbewegungen eine Fläche von 393 m<sup>2</sup> auf. Aus diesem Sachverhalt ergibt sich, dass mit einem Pixel in 50m Auflösung, das eine Fläche von 2500 m<sup>2</sup> abdeckt, mehr als 75% aller gravitativen Massenbewegungen überrepräsentiert dargestellt werden. Diese Überschätzung ist in Tabelle 7.1 quantifiziert. Bei der 10m Auflösung erreicht man eine maximale Überschätzung von etwa 80 166m<sup>2</sup>, dies bedeutet mit der 10m Rasterweite wird für die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen 5mal soviel Fläche abgedeckt, als mit den realen Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Hingegen in der 50m Auflösung wäre eine so geringe Überschätzung wünschenswert. Hier wird bei den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen eine maximale Überschätzung der realen Fläche der gravitativen Massenbewegungen von 1 237 366m<sup>2</sup> erreicht. Dies beschreibt eine 71mal größere Fläche als sie in der Realität vorlag.

Es zeigt sich, dass besonders bei den Anrissflächen eine hohe Überschätzung der realen Fläche auftritt. Dies ergibt sich unter anderem aus der Annahme, dass in der Realität die Anrissflächen 10% der Gesamtfläche aller gravitativer Massenbewegungen einnehmen. Nun sind aber bei diesem Datensatz sowohl gravitative Massenbewegungen, die Abriss- Transport und Ablagerungsbereich unterscheiden, als auch Polygone, die nur die Anrissfläche abdecken, enthalten. Daher stimmt die schlichte Berechnung der Gesamtfläche der Anrissflächen mit 10% der Gesamtfläche der gravitativen Massenbewegungen nicht ganz, wurde aber hier dennoch verwendet. Ein weiteres Detail beeinflusst die Größe der ausgewiesenen Anrissfläche. Bei sehr kleinen gravitativen Massenbewegungen können oft keine Pixel ausgeschlossen werden, sodass die gesamte ursprüngliche Pixelanzahl in die Anrissfläche eingeht.

Tab. 7.1: Vergleich der realen Größe der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen zu der vom Rasterdatensatz abgebildeten Größe für die 10m und 50m Rasterweite. Es wurde auch die Fläche, die von den Punkten abgedeckt wird, mit der realen Größe der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen verglichen.

Reale Größe der gravitativen Massenbewegungen **176337,6 m<sup>2</sup>**, Annahme: daraus berechnete reale Gesamtfläche der Anrissflächen mit 10% = 17633,8 m<sup>2</sup>

Erklärung der Abkürzungen: MB-Ds: Datensatz der gravitativen Massenbewegungen, Anz. Occ.: Anzahl der Ereignisse, Anz. Px.: Gesamtanzahl der Pixel, mfs: Flächen der gravitativen Massenbewegungen, mts: Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen aus SPM, mps: Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen, mts1: Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen die größer als 1000m<sup>2</sup> sind.

	MB-Ds	Anz. Occ.	Anz. Px	Gesamtfläche im Raster-Format in m <sup>2</sup>	Differenz zu realer Polygon/Anrissfläche in m <sup>2</sup>	Quotient Fläche im Raster-Format zu reale Fläche
10x10m	mfs	374	4075	407500	231162,24	2,31
	mts	374	978	97800	80166,22	5,55
	mps	409	409	40900	23266,22	2,32
50x50m	mfs	319	728	1820000	1643662,24	10,32
	mts	319	502	1255000	1237366,22	71,17
	mts1	45	92	230000	212366,22	13,04
	mps	363	363	907500	889866,22	51,46

Bei der **Berechnung der Hangneigung** tritt speziell für die 50m Rasterweite eine „Verzerrung“ der Hangneigung auf. Durch den Algorithmus der Ermittlung der Hangneigung in ArcInfo werden Hangneigungswerte mit geringeren Werten häufiger, was auch mit Abbildung 6.4 veranschaulicht wird. Im Hinblick auf die große Bedeutung dieses Datensatzes für die Hangstabilität und auch für die relative Gefährdung von Pixel darf auch diese Unsicherheit bei der Beurteilung der Ergebnisse nicht außer acht gelassen werden.

Zu den Unsicherheiten die bei der **Umwandlung der Rasterdatensätze in SPM** auftreten könnten, gibt es keine Angaben seitens der Softwareentwickler SpatialModels Inc. Im Zuge der Analysen wurde die Notwendigkeit der richtigen Benennung der Eingangsdaten deutlich. Erfolgt die Benennung nicht mit der richtigen Bit-Anzahl nach dem Underscore (z.B. „\*\_32.flt“), dann werden die Daten von der Software SPM fehlerhaft umgewandelt. So kam es vor, dass ein nach den Erfolgs- und Vorhersageraten plausibel scheinendes Ergebnis, auf einer fehlerhaften Karte basierte. Diese Fehler wurden in weiterer Folge berichtigt, zeigen aber eine Schwäche der Software SPM auf.

Im Zuge der Analysen hat sich herausgestellt, dass der Parameter der **Anzahl der Neighbourhood Pixel** einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Gefahrenhinweiskarte hat. Gerade bei der 50m Auflösung hat die Angabe dieses Parameters große Bedeutung, denn behält man die Standardeinstellung mit 10 Neighbourhood Pixel bei, wird ein Saum von 500m rund um jede kategorische Einheit gezogen, der das Kartenbild maßgeblich verfälscht. Genaue Angaben zum

Effekt der Auswahl der Anzahl der Neighbourhood Pixel werden im SPM - UserGuide nicht gegeben, dies muss in zugehörigen Publikationen von Chung (2006) nachgelesen werden.

### 7.3 Gefahrenhinweiskarte

Die Gefahrenhinweiskarte selbst birgt weitere Unsicherheiten, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Guzzetti et al. (2006) führen 3 Fehlerquellen bei der Erstellung und Bewertung von Gefahrenhinweiskarten an: erstens treten Unsicherheiten bei der Modell-Einordnung bezüglich Typ, Informationsgehalt und Verlässlichkeit der verfügbaren kategorischen Daten auf, zweitens birgt die Klassifikation der einzelnen Analyse-Einheiten (falls diese erfolgt) Fehler und drittens bleibt auch unklar in welchem Maß das Modell tatsächlich fähig ist zukünftige gravitative Massenbewegungen vorher zu sagen. Sie beschreiben des weiteren einen Rahmen, mit dem die Unsicherheit bzw. auch die Qualität der entstandenen Gefahrenhinweiskarten beschrieben und bewertet werden kann, womit auch eine Vergleichsgrundlage für verschiedene Ansätze zur Modellierung von Gefahrenhinweiskarten geboten wird. Dazu müssen einige Eigenschaften der Gefahrenhinweiskarten geprüft werden, was Guzzetti et al. (2006) wie folgt zusammenfassen, in Klammer sind die passenden Stichworte zum in der Analyse verwendeten Ansatz von Chung und Fabbri (2003, 2005; Chung 2006; Fabbri et al. 2003) und angeben:

- bestimmen des Grades der Anpassung des Modells (Erfolgsrate)
- ermitteln der Eignung/Rolle der kategorischen Informationen zur Erzeugung des Modells, und Bewertung der Sensitivität des Modells auf Änderungen in den Daten zu den gravitativen Massenbewegungen und in den kategorischen Daten, die für das Modell verwendet werden. (Likelihood Quotient und Vorhersagerate der einzelnen Parameter, Robustheit der Vorhersagerate bei der Verwendung einer kleineren Schätzgruppe und/oder anderer zufällig ausgewählter gravitativer Massenbewegungen)
- Bestimmen des Fehlers den man aufgrund der probabilistischen Schätzung für jede Analyse-Einheit erhält (es wurden keine Analyseeinheiten zusammengefasst)
- untersuchen der Fähigkeit der Modellschätzung eine Vorhersage von zukünftigen gravitativen Massenbewegungen zu treffen (Vorhersagerate)

Die hier erfolgte Modellierung von Gefahrenhinweiskarten ergibt eine **Erfolgsrate** von bis zu 78% der gravitativen Massenbewegungen (70% bei „bgnsw“ mit 10m Rasterweite; 64% bei „bgfsw“ mit 50m Rasterweite), die in 20% der gefährdetsten Flächen liegen. Wenn man 40% der gefährdetsten Flächen betrachtet, dann liegen schon 90% oder mehr aller gravitativen Massenbewegungen auf diesen Flächen. Daraus lässt sich schließen, dass eine Modellgüte mit einer Trefferquote von 70% aller Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen erreicht werden konnte.

Die **Vorhersagerate** der einzelnen Parameterkombinationen („bgnsw“ und „bgfsw“) liegt in 20% der

gefährdetsten Flächen im Bereich von 70% der gravitativen Massenbewegungen in der Evaluierungsgruppe. Demnach konnten in 20% der Fläche 70% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe vorhergesagt werden. In 40% (10m Rasterweite) bzw. 50% (50m Rasterweite) der gefährdetsten Flächen liegen 90% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Durch die wiederholte zufällige Auswahl von gravitativen Massenbewegungen für die Schätzgruppe kann noch zusätzlich eine Aussage zu Unsicherheiten in der Vorhersagefähigkeit des Modells gemacht werden (Davis et al. 2006). Die Parameterkombination „bg<sub>n</sub>sw“ zeigt in der 10m Rasterweite einen Schwankungsbereich von 6% Anteil an den gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe, jeweils in 20% der gefährdetsten Fläche. In der 50m Rasterweite tritt eine Unsicherheit von 3% (zwischen 64% und 67% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe) bei 5 wiederholten Berechnungen der Vorhersagerate auf. Diese Angaben zur Robustheit der Gefahrenhinweiskarten können auch mit Informationen über das Verhalten der Vorhersagerate bei der Reduzierung der Größe der Schätzgruppe ergänzt werden. In Tabelle 7.2 sind die Veränderungen in der Vorhersagerate bei unterschiedlich großen Verhältnissen von Schätzgruppe zu Evaluierungsgruppe für die besten Parameterkombinationen angeführt. Diese Berechnungen zeigen, dass selbst mit sehr kleinen Datensätzen zu den gravitativen Massenbewegungen (47, bzw. 45 gravitative Massenbewegungen) gute Vorhersageraten erreicht werden können. Die unten angeführten Parameterkombinationen können mit der Verwendung von nur 47, bzw. 45 gravitativen Massenbewegungen für die Schätzgruppe, 60% (10m Rasterweite) bzw. 55% (50m Rasterweite) der gravitativen Massenbewegungen in 20% der gefährdetsten Fläche vorhersagen.

Tab. 7.2: Vorhersagerate bei Reduzierung der Größe der Schätzgruppe von 50% der gravitativen Massenbewegungen auf 25% bzw. 10% für die Parameterkombinationen "bg<sub>n</sub>sw" (10m Rasterweite) und "bg<sub>f</sub>sw" (50m Rasterweite); CV=Vorhersagerate in Anteil der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in % in 20% der gefährdetsten Flächen, MB<sub>v</sub>= Anrissfläche<sub>-1</sub> oder Anrisspunkt<sub>-p</sub> der gravitativen Massenbewegungen

Parameterkombination	CV - 50%	CV - 25%	CV - 10%
bg <sub>n</sub> sw (374 MB <sub>t</sub> )	70% (187 MB <sub>t</sub> )	63% (94 MB <sub>t</sub> )	60% (47 MB <sub>t</sub> )
bg <sub>f</sub> sw (363 MB <sub>p</sub> )	67% (182 MB <sub>p</sub> )	63% (91 MB <sub>p</sub> )	55% (45 MB <sub>p</sub> )

## **8. Diskussion**

In der folgenden Diskussion sollen jene Aspekte der Methode, derer Ergebnisse und Unsicherheiten und der räumlichen Auflösung der Daten, die in vorangegangenen Diskussionen noch nicht behandelt wurden, beleuchtet werden, um daraus Schlüsse für die Aussagekraft der Ergebnisse und für zukünftige Anwendungen zu ziehen. Abschließend werden die zu Beginn der Analysen gestellten Arbeitshypothesen und deren Erreichung überprüft..

Die Datenlage, der durch die von der Geologischen Bundesanstalt zur Verfügung gestellten Daten, zu Boden, Geologie, digitalen Katastralmappe, Anrisspunkte und Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und zum DGM, reichte aus um genügend Eingangparameter für die Gefahrenhinweiskarten in ArcInfo erstellen zu können. So konnten mithilfe des DGM und der Extraktion von kategorischen Daten, wichtige zusätzliche Datensätze zu Hangneigung, Distanz zum Flussnetz und Distanz zum Wegenetz erstellt werden. Ein Blick auf die, im Zuge der Analysen berechneten, Erfolgs- und Vorhersageraten (vgl. Kapitel 6.2.2 und Kapitel 6.2.3) zeigt, dass zahlreiche signifikante Gefahrenhinweiskarten erzeugt werden konnten. Aus der Datengrundlage hätten auch noch weitere Parameter abgeleitet werden können, wie zum Beispiel ein Datensatz zur Krümmung und Wölbung der Hänge im Untersuchungsgebiet oder zum spezifischen Wassereinzugsgebiet. Man hätte auch die kategorischen Daten im Hinblick auf aussagekräftigeren Karten zu Kategorien zusammenfassen können, wie zum Beispiel die Bildung von Kategorien zur Wasserspeicherkapazität der Bodenklassen. Doch die Ergebnisse zeigen, dass auch mit den relativ einfachen Daten, wie sie in Österreich erhältlich sind, bereits gute statistische Gütemaße erreicht werden können. An dieser Stelle muss noch ein weiterer potentiell wertvoller Datensatz angeführt werden. Wie bereits erwähnt, hatte der Niederschlag und seine räumliche Verteilung im Untersuchungsgebiet einen großen Einfluss auf die Auslösung der gravitativen Massenbewegungen, doch leider standen für diese Analyse keine Daten darüber zur Verfügung. Wie sich aber im Laufe der Arbeiten herausstellte, sind Daten zur räumlichen Verteilung des Niederschlages erhältlich, die aus dem Projekt INCA stammen, welches von Mitarbeitern der ZAMG (Haiden 2006) durchgeführt wird. Je nach zeitlichen Ressourcen könnte man beliebig viele Variablen der Analyse hinzufügen, wobei sich dadurch unzählige zusätzliche Kombinationsvarianten ergeben würden.

Jedoch auffallend ist bei den Ergebnissen der Modellierungen, dass durch die Aufnahme von allen verfügbaren Parametern in die Kombination, sich die Qualität des Modells nicht zwangsläufig verbessert. Zu einem ähnlichen Schluss kamen auch Remondo et al. 2003 und Fabbri et al. 2003. Nach Remondo et al. (2003) kann das bedeuten, dass für eine signifikante Gefahrenhinweiskarte die Erzeugung von immer mehr und detaillierteren Datensätzen, die erklärende Faktoren beschreiben, ab einem gewissen Grad nur eine bedingte Verbesserung des Modells ergeben kann. Wie sich in der Analyse über Gasen und Haslau gezeigt hat, reichen auch schon einige wenige Datensätze, um eine gute Gefahrenhinweiskarte zu erreichen.

Eine weitere Problematik zu den Eingangsdaten liegt in den vorliegenden unterschiedlich großen Maßstäben. Zur Auswirkung der Qualität der Eingangsdaten, die durch den vorliegenden Maßstab beeinflusst wird, gibt es einige Untersuchungen unter anderen von Remondo et al. 2003 und Fabbri et al. 2003. Remondo et al. (2003) stellten einen Vergleich der Ergebnisse aus unterschiedlichen Auflösungen der Eingangsdaten an. Sie erhielten als Ergebnis, dass mit steigender Qualität der Eingangsdaten (bessere Auflösung und größerer Maßstab) auch die Qualität des Modells verbessert wird, aber die Unterschiede nur relativ gering sind. Dieser Zusammenhang sollte bei der Kosten-Nutzen Abschätzung für die Anschaffung von Daten berücksichtigt werden. Für die resultierenden Gefahrenhinweiskarten bedeutet ein Unterschied in den Maßstäben der Eingangsdaten, dass manche Datensätze differenzierter in die Analyse eingehen und so kleineren Einheiten bzw. Flächen eine relative Gefährdung zugeordnet wird. Jedoch wird diese Zuordnung durch die Lagegenauigkeit der Eingangsdaten und der Datensätze zu den gravitativen Massenbewegungen beeinflusst, weshalb der Maßstab der Eingangsdaten in Relation zur Lagegenauigkeit der gravitativen Massenbewegungen gewählt werden sollte.

Im Zuge der Analysen wurde der Effekt der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Eingangsdatensätze des Modells auf das Ergebnis untersucht, weshalb die zur Verfügung gestellten Daten in Rasterdatensätze mit 10m und 50m Rasterweite umgewandelt wurden. Schon nach der Konvertierung in Rasterdatensätze sind deutliche Unterschiede in den kategorischen Datensätzen zwischen den zwei räumlichen Auflösungen aufgefallen. Durch die Rasterweite von 50m werden, wie im Beispiel der digitalen Katastralmappe, einzelne, sehr kleine Landnutzungseinheiten im Zuge der Konvertierung nicht mehr dargestellt und können somit in den weiteren Analysen nicht mehr berücksichtigt werden. Außerdem wird aus dem ursprünglich durchgehend verbundenem Wegenetz eine unzusammenhängende Anordnung von einzelnen Pixeln im Raum. Auch bei der Berechnung der Hangneigung ist auffällig, dass durch die Berechnung im 50m Raster eine ungewöhnlich unruhige Verteilung der Hangneigungswerte auftritt. Aufgrund dieser Begleiterscheinungen des gröberen Rasters sollte man für zukünftige Analysen eine Aggregation von kleinräumigen Informationen zum Beispiel in Landnutzungsklassen (z.B. Wald, waldfrei ohne Siedlungsflächen und waldfrei mit Siedlungsflächen) in Betracht ziehen. Für die numerischen Daten sollte ein passender Algorithmus zur Bestimmung der Hangneigung gewählt werden, um so aussagekräftigere Eingangsdatensätze zu erreichen.

Die Software SPM bietet für die **Auswahl der besten Gefahrenhinweiskarte**, vier Entscheidungskriterien, welche aber nicht immer eindeutig zur „besten“ Gefahrenhinweiskarte führten. Diese statistischen Gütemaße sind eine sehr gute Bewertungsgrundlage für die Ergebnisse aus der Modellierung der Gefahrenhinweiskarten. Dennoch musste im Zuge der Analysen festgestellt werden, dass die Zusammenhänge und das Zusammenspiel der einzelnen Parameter nicht klar einzuschätzen sind. Dies äußerte sich zum Beispiel dadurch, dass sich durch die Aufnahme eines Parameters, mit einem hohen Likelihood Quotienten, die Erfolgsrate und Vorhersagerate der Parameterkombination deutlich verschlechterte, was aber zuerst nicht zu erwarten war. Dadurch wurde die Auswahl der Parameter für die Kombination, und somit das finden neuer, besserer

Parameterkombinationen erschwert. Hier wäre eine Automatisierung der Analyse, bzw. der Bildung der Parameterkombinationen und Berechnung der Vorhersagerate wünschenswert und würde eine große Zeitersparnis bedeuten. Generell wurde bei den statistischen Entscheidungshilfen der Vorhersagerate eine höhere Bedeutung zugemessen als der Erfolgsrate. Die Erfolgsrate arbeitet mit Daten zu gravitativen Massenbewegungen, die bereits in die Modellierung der Gefahrenhinweiskarte eingegangen sind. Im Unterschied dazu wird bei der Vorhersagerate ein von der Erstellung der Gefahrenhinweiskarte unabhängiger Teildatensatz von allen gravitativen Massenbewegungen verwendet, was eine höhere Aussagekraft bedeutet.

Die „beste“ Gefahrenhinweiskarte sollte auch der realen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen gut entsprechen, was nicht allein durch die Miteinbeziehung von statistischen Gütemaßen bewertet werden kann. Zusätzlich zu den statistischen Gütemaßen musste auch die sogenannte „geomorphologische Güte“ (Bell 2007) bei der Auswahl der besten Gefahrenhinweiskarte herangezogen werden. Dies erfolgte durch subjektive Betrachtung des Kartenbildes unter Berücksichtigung von geomorphologischen Einflussfaktoren auf die Standsicherheit eines Standortes, wobei auf eine realitätsnahe Ausweisung von Gefahrenhinweisbereichen geachtet wurde. Des Weiteren wurde auf eine, aus geomorphologischer Sicht, plausible Auswahl der Eingangsparameter für die jeweiligen Parameterkombinationen geachtet, ein Weg, den auch Demoulin und Chung 2007 gegangen sind. Demoulin und Chung (2007) sehen eine Stärke in der Modellierung von Gefahrenhinweiskarten durch Geomorphologen, dass diese, plausible Eingangsparameter für das Modell, zur Erklärung des Auslösers der gravitativen Massenbewegung, auswählen können. So können mit den unterschiedlichsten Parameterkombinationen zwar hohe Vorhersageraten erreicht werden, doch oft entstehen damit Gefahrenhinweiskarten, die eine schlechte geomorphologische Güte (nach Bell 2007) aufweisen. Die Argumentation von Demoulin und Chung (2007) kann man mit dem Beispiel der Parameterkombination 5 (bgnw) untermauern. Aus den in der Beschreibung der Gefahrenhinweiskarte angeführten Gründen ist die geomorphologische Güte dieser Karte gering und es zeigt sich, dass auch schon die Auswahl der Parameter für die Kombination mit geomorphologischem Hintergrund erfolgen sollte.

Die Auswahl der Parameter für die Parameterkombination stütze demnach nicht nur sich auf die statistischen Gütemaße sondern auch auf die geomorphologische Plausibilität. Besonders auffallende Parameter, aufgrund ihrer hohen Werte in der empirischen Häufigkeitsverteilung, dem Likelihood Quotienten und der Vorhersagerate, waren die Datensätze zum Boden, zur Distanz zum Wegenetz und zur Distanz zum Flussnetz. Im Folgenden wird kurz auf die Vorhersageraten dieser Parameter eingegangen. Der Parameter „**Boden**“ sticht, bei der Betrachtung der Vorhersagerate der einzelnen Parameter, deutlich mit einem Wert von 55% der Anrissflächen der Evaluierungsgruppe (10m und 50m Rasterweite) in 20% der gefährdetsten Fläche hervor. Dies würde der Annahme von Mitarbeitern der GBA und des BFW entsprechen, dass die Vorbefeuchtung des Bodens und somit die Wasserspeicherkapazität der einzelnen Bodenklassen, von großer Bedeutung für die Auslösung der zahlreichen gravitativen Massenbewegungen war. Diese hohen Werte der Vorhersagerate müssen aber vor dem Hintergrund der lückenhaften Datengrundlage gesehen werden, die teilweise veraltet ist, wie im Fall der forstlichen Standortskartierung. Dennoch sprechen die hohen Vorhersageraten für

eine Aufnahme des Datensatzes, wenn auch durch die Lücken ein Informationsverlust vorliegt. Denn bei der Betrachtung der empirischen Häufigkeitsverteilung und des Likelihood Quotienten fällt auf, dass plausible Bodenklassen als hoch gefährdet ausgewiesen wurden.

Auch die Datensätze zur **Distanz zum Wegenetz** und zur **Distanz zum Flussnetz** zeigen eine sehr hohe Vorhersagerate. Diese liegt für die 10m Rasterweite bei jeweils 45% der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in 20% der gefährdetsten Fläche. Für die 50m Rasterweite erreichen diese Datensätze eine Vorhersagerate von 32% bzw. 47% der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe. Das Wegenetz hat eine große Bedeutung für die Disposition von gravitativen Massenbewegungen, was sich auch dadurch äußert, dass mit der Aufnahme der Distanz zum Wegenetz in die Parameterkombination die Vorhersagerate erhöht werden konnte. Dennoch muss beim Wegenetz als erklärender Variable beachtet werden, dass in der Realität die höhere Disposition durch das Wegenetz nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet gilt. Diese hängt stark von der Bauweise und den, damit verbundenen, erforderlichen Entwässerungen und künstlich angelegten Böschungen ab. Diese Entscheidungen obliegen dem Bauherren, was von dessen Erfahrung und der Einhaltung von gewissen Richtlinien bei der Anlage des Wegenetzes abhängt. Daten zum Zustand der Wege wurden sind jedoch nicht vorhanden.

Die weiteren Datensätze weisen eine Vorhersagerate von minimal 30% (10m Rasterweite) bzw. 27% (50m Rasterweite) der gravitativen Massenbewegungen, in 20% der gefährdetsten Fläche, auf und können somit signifikante „Vorhersagen“ von Anrissen von gravitativen Massenbewegungen treffen. Jedoch zeigt sich erst nach der Kombination der Parameter wie hoch die resultierende Vorhersagerate wird. Leider kann nicht automatisch von hohen bzw. niedrigen Vorhersageraten der Parameter auf eine hohe Vorhersagerate der Parameterkombination geschlossen werden.

Im Zuge der Analysen musste auch festgestellt werden, welchen Effekt die Verwendung von Anrissflächen oder Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen für die resultierende Gefahrenhinweiskarte mit sich bringt. Daher musste eine Entscheidung für oder gegen Anrisspunkte oder Anrissflächen in der jeweiligen Auflösung, bei der Auswahl der besten Gefahrenhinweiskarte, gefällt werden. Dazu wurden alle Parameterkombinationen jeweils mit Anrissflächen und Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechnet, um Aussagen über die Unterschiede in der resultierenden Gefahrenhinweiskarte treffen zu können. In die Überlegungen, ob schlussendlich die Verwendung von Anrissflächen oder Anrisspunkten von gravitativen Massenbewegungen besser für die Erstellung der Gefahrenhinweiskarten geeignet ist, werden verschiedene Aspekte miteinbezogen. Wichtig ist dabei einerseits die unterschiedliche Kartierungsgenauigkeit der Flächen bzw. der Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen (vgl. Kapitel 3.1.4) und andererseits die Größe der realen Fläche der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen (vgl. Kapitel 3.1.4 und Tabelle 3.1) im Vergleich zu der vom Rasterdatensatz abgebildeten Fläche. Wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben, wurden die Flächen der gravitativen Massenbewegungen mit einer höheren Kartierungsgenauigkeit aufgenommen, was bedeutet, dass die daraus generierten Anrissflächen eine größere Lagegenauigkeit als die Anrisspunkte aufweisen. In Tabelle 7.1 sind die Größen der jeweiligen realen und im Raster-Format abgebildeten Flächen für die Anrissflächen und Anrisspunkte verglichen und in Relation gesetzt. Aufgrund der höheren

Lagegenauigkeit der Anrissflächen gegenüber den Anrisspunkten und der zu vernachlässigenden Überschätzung der berechneten Anrissflächen im Vergleich zur realen Fläche der gravitativen Massenbewegungen, wurden für die Analysen mit einer Rasterweite von 10m, die Anrissflächen ausgewählt. Ein weiterer Grund für diese Entscheidung ist die große Bedeutung der räumlichen Ausdehnung der gravitativen Massenbewegungen bei der Berechnung der Gefahrenhinweiskarten, die bei den Anrissflächen im Vergleich zu den Anrisspunkten, deutlich ins Gewicht fällt.

Bei der 50m Rasterweite wird die Lagegenauigkeit unbedeutender und die Überschätzung der realen Fläche der Anrisse der gravitativen Massenbewegungen wird hingegen von größerer Bedeutung. Hier entstehen, durch die Aufnahme der Anrissflächen in die Modellierung der Gefahrenhinweiskarte, Fehler aufgrund der stark überschätzten räumlichen Ausdehnung der gravitativen Massenbewegungen. Daher wurden für die Analysen mit einer Rasterweite von 50m für die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen bevorzugt. Zusätzlich hat man, durch die Auswahl der gravitativen Massenbewegungen die größer als 1000m<sup>2</sup> sind, versucht die Überschätzung der realen Größe, bei der Berechnung der Anrissflächen in der 50m Rasterweite, klein zu halten.

Auf der Basis dieser zur Verfügung stehenden Bewertungskriterien, die in der Diskussion der Ergebnisse und der oben angeführten Diskussion behandelt wurden, wurde für die 10m Rasterweite die Parameterkombination 7 (bgnsw) aus Boden, Geologie, Landnutzung, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz und für die 50m Rasterweite die Parameterkombination 10 (bgfsw) aus Boden, Geologie, Distanz zum Flussnetz, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz als die jeweils beste Gefahrenhinweiskarte ausgewählt.

Aus den vorangegangenen Diskussionen kann folgende **Schlussbewertung der Methode** getroffen werden. Klare Vorteile oder auch Stärken dieser Methode sind in der relativ schnellen Anwendung und dem schnellen Erhalt von Resultaten zu sehen. Es hat sich gezeigt, dass mit den in Österreich vorhandenen Datensätzen zu Geologie, Boden, Landnutzung und Geländemodell, ausreichende Datengrundlagen erstellt werden können. Die Ergebnisse aus der Erstellung der Gefahrenhinweiskarte und Berechnung der Vorhersagerate mit der Software sind sehr zufriedenstellend. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Berechnung der Vorhersagerate als fester Bestandteil der Software besteht und damit auch die Robustheit des Modells ermittelt werden kann. Die Bestimmung der Robustheit zeigt auf, dass für die beste Parameterkombination von Boden, Geologie, Landnutzung, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz, bei einer mittleren Vorhersagerate von 70%, Schwankungen von zirka 6% in den gravitativen Massenbewegungen bei 20% der als gefährdet ausgewiesenen Flächen auftreten. Des weiteren können mit dieser Methode kategorische und numerische Daten gleichzeitig, ohne großen Aufwand in die Analyse miteinbezogen werden.

Schwächen, oder Nachteile, zeigen sich bei der Anwendung dieser Methode in der umständlichen Datenvorbereitung und der mehrmaligen Konvertierung der Daten in unterschiedlichste Datenformate. Außerdem stehen zur Beurteilung der endgültigen Gefahrenhinweiskarte zuerst nur statistische Gütemaße zur Verfügung. Doch hohe statistische Gütemaße bedeuten nicht, dass die Gefahrenhinweiskarte aus geomorphologischer Sicht plausibel ist. Daher ist eine subjektive Bewertung der geomorphologischen Güte notwendig. Des weiteren sind die Ansprüche dieser Methode an die Genauigkeit der Kartierung der gravitativen Massenbewegungen bezüglich Lage und

Ausdehnung hoch und die Sensitivität gegenüber neuer gravitativer Massenbewegungen im Datensatz ist, aus den vorliegenden Analysen, nicht abschätzbar. Leider kann mit dieser Methode, wie bereits erwähnt, kein Zeitpunkt der Auslösung eines erneuten Ereignisses ermittelt werden. So kann die Frage „*You told me where, but when will it happen*“ (Fabbri et al. 2003) nicht beantwortet werden. Auch kann die Berechnung von Reichweiten und Magnituden der möglichen gravitativen Massenbewegungen nicht mit diesem Modell erfolgen. Dies sind beides wichtige Fragestellungen, die in Bezug auf eine weiterführende Risikoanalyse beantwortet werden müssten. Dabei darf aber der Aspekt der sich möglicherweise ändernden Rahmenbedingungen (z.B. durch Klimaänderung oder auch Landnutzungsänderungen) für die Auslösung einer gravitativen Massenbewegung nicht vergessen werden. Dennoch wird mit der Berechnung von Gefahrenhinweiskarten ein wichtiger Schritt in Richtung „Vorbeugung von“ statt „Reaktion auf“ Naturgefahren und Naturrisiken unternommen.

Im Folgenden sind wichtigste Aspekte angeführt, deren Beachtung bei der Durchführung einer ähnlichen Analyse in anderen Untersuchungsgebieten aufgrund der Erfahrungen in dieser Arbeit empfohlen werden. Wünschenswert, wenn auch nicht leicht realisierbar, sind lückenlose Datenbestände, die über das gesamte Untersuchungsgebiet vorliegen. Zum Beispiel die Bodendaten sind gerade bei der Suche nach möglichen Auslösern wichtig, aber leider ist der Kartierungsstand der forstlichen Standortkartierung im Vergleich zur landwirtschaftlichen Standortkartierung eher schlecht. Doch der Boden im Wald ist auch von großer Bedeutung, und sollte daher in den Analysen berücksichtigt werden. Des weiteren sollte ein schneller Zugriff auf gute Kartierungsgrundlagen ermöglicht und sichergestellt werden, damit eine lagerichtige Kartierung der gravitativen Massenbewegungen erleichtert wird. Als zukünftige mögliche Kartierungsgrundlagen, würde sich entweder ein hoch aufgelöstes Luftbild oder eine Schummerung eines Laserscans, mit hoher räumlicher Auflösung in Kombination mit der digitalen Katastralmappe (im Maßstab 1:1000 vorhanden) gut eignen. Außerdem ist die einheitliche und lückenlose Dokumentation der Ereignisse im Zuge der Kartierung der Phänomene und die anschließende digitale Aufarbeitung der Kartierung in einem geographischen Informationssystem und die Erstellung von Datenbanken mit Informationen zu den einzelnen gravitativen Massenbewegungen sehr wichtig. Zukünftige Kartierungen könnten zum Beispiel nach dem Kartierungsstandard DOMODIS von (Hübl et al. 2006) erfolgen, was ein gutes Rahmenwerk zur Standardisierung der Dokumentation von Naturgefahren darstellt. Des weiteren muss auf hohe Lagegenauigkeit der gravitativen Massenbewegungen geachtet werden, welche mit GPS Vermessung der Punkte erreicht werden könnte. Diese Anforderungen an die Daten sind mit hohem Arbeitsaufwand verbunden, vor allem die genaue Bestimmung der Lage der gravitativen Massenbewegungen, aber dieser Aufwand würde sich im Hinblick auf die Funktionsweise der hier angewandten Methode und auch für zukünftige andere Anwendungen lohnen. Die digitale Verfügbarkeit der Daten, auch für andere potentielle Anwender, und die Möglichkeit der ständigen Erweiterung dieser Datensätze und Datenbanken wäre von großem Vorteil. Generell sollte auf eine hohe räumliche Auflösung der Datensätze geachtet werden. Wie sich in den Analysen gezeigt hat, sind die Ergebnisse aus der Berechnung der Gefahrenhinweiskarte in der 50m Rasterweite aufgrund der Unsicherheiten mit Ungenauigkeiten verbunden, die sich im Vergleich

zur 10m Rasterweite sehr stark auswirken. Dennoch kann je nach Fragestellung und Maßstäben der Eingangsdaten die Verwendung von Gefahrenhinweiskarten mit einer Rasterweite von 50m besser geeignet sein als eine Karte in 10m Rasterweite.

Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen, dass die eingangs gestellten Arbeitshypothesen zufriedenstellend bearbeitet werden konnten. Im Zuge der Diskussion der Ergebnisse und der abschließenden Diskussion konnten die Fragen zur Überprüfung der Arbeitshypothesen beantwortet werden. Daher konnten die Hypothesen, wie im Folgenden angeführt, bestätigt werden:

*1. Mit dem statistischen Modell von Chung und Fabbri (1993, 1999, 2003, 2005, 2008), der Software Spatial Prediction Modeling System (SPM) und den von der Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt (GBA) zur Verfügung gestellten Eingangsdaten zu Geologie, Landnutzung, Boden und DGM, kann eine Gefahrenhinweiskarte für gravitative Massenbewegungen, in der Region Gasen/Haslau erstellt werden. Diese Hypothese konnte bestätigt werden.*

*2. Die vorhandenen Daten erfüllen die Anforderungen an die Datenqualität, bieten ausreichend Informationen und können für die Analyse verwendet werden. Nicht alle Datensätze beeinflussen das Ergebnis gleichermaßen. Diese Hypothese konnte bestätigt werden.*

*3. Die Wahl der räumlichen Auflösung der Eingangsdatensätze hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis. Diese Hypothese konnte bestätigt werden.*

*4. Die zu erstellende Gefahrenhinweiskarte kann bereits aufgetretene Massenbewegungen ausreichend gut abschätzen. Für das Untersuchungsgebiet kann eine aussagekräftige Validierung der Ergebnisse durchgeführt werden. Diese Hypothese konnte bestätigt werden.*

## 9. Perspektiven

Im Folgenden werden Perspektiven, die im Hinblick auf das Untersuchungsgebiet und auf weitere Analysemöglichkeiten zur Gefahrenbeurteilung und Risikoabschätzung gemacht werden können ausgeführt.

Die Möglichkeiten für zukünftige Analysen im Untersuchungsgebiet sind sehr vielfältig und beinhalten neben der Anwendung anderer Methoden (z.B. physikalischen Ansatz), auch die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes auf umliegende Gebiete. Einerseits kann versucht werden, die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse noch zu verfeinern, andererseits könnte das Gebiet Gasen und Haslau auch mit anderen Methoden, nicht nur hinsichtlich der Naturgefahr, sondern auch hinsichtlich des Risikos von möglichen Schäden untersucht werden, um ein umfassendes Bild über die vorliegende Situation zu erhalten.

Die bereits zufriedenstellenden Ergebnisse aus der Analyse mit dem *Empirical Likelihood Ratio Model* könnten durch die fundierte Auswahl und Verbesserung von zusätzlichen Datensätzen optimiert werden. Gerade zum Datensatz **Distanz zum Wegenetz**, der in dieser Arbeit als entscheidender Faktor für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen aufgetreten ist, müssten noch Aussagen bezüglich des Zustandes bzw. der Bauweise des Wegenetzes erhoben werden. Der Zustand oder die Bauweise der Wege unterscheidet sich im Untersuchungsgebiet und geht momentan ohne Unterschiede in die Analyse ein. Informationen dazu könnten eventuell bei den ansässigen Bauern oder bei der Gemeinde (Bauamt) erfragt werden. Durch eine genaue Analyse des Zustandes des Wegenetzes im Vergleich zur Lage der dort aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen könnten in Zusammenarbeit mit dem zuständigen Bauamt eventuell auch Empfehlungen für die richtige und sichere Anlage der Wege gemacht werden.

Die Aufnahme folgender **zusätzlicher Datensätze** wäre von großem Interesse, und könnte weitere Hinweise auf mögliche vorbereitende und auslösende Faktoren geben. Daten zur Niederschlagsverteilung zeigen die räumliche Variabilität des Niederschlages und Gebiete mit Niederschlagsmaxima auf, die in die Analyse eingebunden werden könnten. Mit Daten zum spezifischen Wassereinzugsgebiet kann der Abfluss des Niederschlages in die Berechnung aufgenommen werden. Ein Datensatz zur Wölbung zeigt Mulden, wo sich Wasser sammeln kann und konvexe Bereiche, an denen das Wasser sofort abläuft, auf, was ebenfalls in die Analyse eingehen könnte. Außerdem sollte der Datensatz zu den gravitativen Massenbewegungen möglichst vollständig sein. In Österreich soll in den nächsten Jahren ein digitales Geländehöhenmodell, aufgenommen mit flugzeuggetragenen LIDAR-Systemen, erhältlich sein, welches über eine räumliche Auflösung von 1m verfügt. Dies könnte einerseits genutzt werden, um noch detailliertere Analysen, z.B. in 5m Rasterweite durchzuführen, oder um andererseits eine Detailkartierung der vorhandenen gravitativen Massenbewegungen zu erstellen. Dadurch könnte ein umfassender Blick auf das Untersuchungsgebiet geworfen werden, um festzustellen, wo sich früher schon gravitative Massenbewegungen ereignet haben. Wobei aber bedacht werden muss, dass die ansässige

Bevölkerung oft gravitative Massenbewegungen wieder aufgeschüttet hat, um die Flächen wieder uneingeschränkt nutzen zu können. Informationen zu weiteren gravitativen Massenbewegungen vor 2005 würden zusätzliche Analysemöglichkeiten bringen und könnten unter anderem durch die Auswertung von Archivdaten und Gutachten, die auf den Gemeindeämtern vorhanden sind, gewonnen werden. Auch verfügt die Abteilung für Ingenieurgeologie über Archivdaten, deren Inhalt bisher noch nicht genauer bekannt ist. Eine weitere Erhebung dieser Daten würde für eine Validierung über die zeitliche Aufteilung des Datensatzes ermöglichen. Außerdem könnte daraus laut Chung und Fabbri (2007) die Eintretenshäufigkeit von zukünftigen gravitativen Massenbewegungen abgeleitet werden.

Eine **weitere Validierung** der entstandenen Gefahrenhinweiskarte wäre über einen Vergleich mit dem neuen Gefahrenzonenplan der Gebietsbauleitung Ost- und Weststeiermark der Wildbach möglich. Dieser ist für die Gemeinde Gasen im Mai 2008 erschienen und liegt dort auf dem Gemeindeamt und bei der Gebietsbauleitung Ost- und Weststeiermark. Dadurch könnten Vergleiche zu Gefahrenhinweiskarten aus der geomorphologischen Kartierung, wie sie im Zuge der Revision des Gefahrenzonenplans erfolgte, und aus der statistischen Modellierung angestellt werden. Hier wäre die Erhebungstechnik des Geologen der WLW von großer Bedeutung, denn es macht einen großen Unterschied, ob nur in unmittelbarer Nähe zu den Siedlungen oder über das gesamte Untersuchungsgebiet die mögliche Gefahr durch gravitative Massenbewegungen erfasst wurde. Laut der Gebietsbauleitung (Brandstätter, persönliche Mitteilung 2008) handelt es sich um den modernsten Gefahrenzonenplan Österreichs, der in dieser Weise nur noch ein weiteres mal in Österreich erstellt wurde.

In einem weiteren Schritt könnte die Gefahrenhinweiskarte vor Ort stichprobenartig an besonders gefährdeten Gebieten, aber auch an stabilen Gebieten evaluiert werden. Damit könnten besonders gefährdete Gebiete lokalisiert und anschließend einem **Monitoring** unterzogen werden, um eine Aussage über Veränderungsdaten des Hanges über die Zeit zu erhalten. Ein derartiges Monitoring wäre zum Beispiel mit einem terrestrischen Laserscan, aber auch mit der Installation von Inklinometern oder einem geodätischen Vermessungsnetz möglich.

Im Untersuchungsgebiet wäre auch eine **Risikoanalyse** äußerst spannend. Mit der vorliegenden Analyse ist ein Teil der Gefahrenanalyse bereits erfolgt, wobei die Wirkungsanalyse, also die Bestimmung von Reichweiten und dem Grad der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen und des weiteren die Ermittlung der Eintretenshäufigkeit, noch ausständig ist. Zusätzlich zur zeitlichen Auflösung der gravitativen Massenbewegungen und der daraus abgeleiteten Eintretenshäufigkeit benötigt man zur Berechnung des Risikos auch das mögliche Schadensausmaß und die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung an einem bestimmten Punkt (BUWAL 1999). Zur Bestimmung des möglichen Schadensausmaßes können die im Gemeindeamt vorliegenden Privatschadensausweise und die als „Gebäude“ in der digitalen Katastralmappe verzeichneten Polygone als wichtige Basis für weitere Erhebungen dienen.

Eine Wirkungsanalyse, also eine Berechnung der möglichen Reichweiten der gravitativen Massenbewegungen könnte aufgrund der guten Datenlage ebenfalls in diesem Gebiet durchgeführt

werden. Auch dazu wurden Reichweitenmodelle wie z.B. das Modell SlideSim von Firma Geo7 AG (2006, in Giamboni 2008) entwickelt.

Eine Ausweitung der Analyse auf umliegende Gebiete oder die überregionale Ebene wäre interessant. Dieser Ansatz ist aber aufgrund einer Software Beschränkung der Ausdehnung auf 5000 Pixel Breite und 5000 Pixel Länge nur bedingt für regionale Analysen in einem vernünftigen Maßstab (Rasterweite) möglich. Dies könnte mit einer räumliche Aufsplittung der Daten umgangen werden, aber diese birgt wiederum neue Fehler, denn die relative Gefährdung wird dadurch immer nur für einen Teilbereich, und nie für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet. Das könnte bei geringer Homogenität der einzelnen Eingangsdatensätze zu Ungenauigkeiten und Problemen bei der Erstellung der Gefahrenhinweiskarten führen.

## **10. Zusammenfassung**

Im August 2005 sind nach intensiven Regenfällen in der Region Gasen und Haslau in der Oststeiermark, mehr als 500 gravitative Massenbewegungen (auf 60 km<sup>2</sup>) aufgetreten, die hohe ökonomische Schäden verursachten und auch 2 Todesopfer forderten. Nach diesen Ereignissen wurde eine umfassende Kartierung der gravitativen Massenbewegungen von der Geologischen Bundesanstalt (GBA) durchgeführt. Diese Daten dienen als wichtige Grundlage für die vorliegende Analyse und wurden für diesen Zweck im Rahmen einer Kooperation der Arbeitsgruppe für Geomorphologische Systeme und Risikoforschung des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien mit der Abteilung für Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt zur Verfügung gestellt.

Das Ziel der vorliegenden Analyse war, eine Gefahrenhinweiskarte für die Region Gasen und Haslau bezüglich möglicher Anrisse von gravitativen Massenbewegungen zu erstellen und eine Validierung der Ergebnisse durchzuführen. Zusätzlich sollte auch der Effekt der räumlichen Auflösung der Eingangsparameter auf die resultierende Gefahrenhinweiskarte und die Eignung der Eingangsdaten für die angewandte Methode untersucht werden. Als Eingangsparameter lagen neben der räumlichen Verortung der gravitativen Massenbewegungen auch ein Datensatz zur Bodenkarte, die digitale Katastralmappe mit Daten zur Landnutzung, die geologische Karte und ein digitales Geländemodell mit 10m Rasterweite vor. Zusätzlich wurden Datensätze zu Hangneigung, Exposition, Distanz zum Flussnetz berechnet und Distanz zum Wegenetz berechnet. Diese Datensätze wurden für die weitere Analyse mit ArcInfo9.2 in Rasterdatensätze mit einer Rasterweite von 10m x 10m und 50m x 50m umgewandelt.

Die Erstellung der Gefahrenhinweiskarten erfolgte mittels dem statistischen Ansatz des *Empirical Likelihood Ratio Model* von Chung und Fabbri (1993, 2005), das in der Software *Spatial Prediction Modeling System (SPM)*, SpatialModels Inc. 2003, 2004, 2006) implementiert ist. Mit diesem Ansatz wird für jedes Pixel des Untersuchungsgebiets ein relatives Gefährdungslevel, durch den Vergleich des Vorkommens bzw. nicht Vorkommens der gravitativen Massenbewegungen mit den dort vorliegenden Eigenschaften der Eingangsparameter berechnet. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass kategorische und numerische Daten gleichzeitig in einer Parameterkombination verwendet werden können. Außerdem werden zur Bewertung und Auswahl der besten Parameterkombination und der daraus resultierenden Gefahrenhinweiskarte im Zuge der Analysen statistische Gütemaße für jeden Datensatz bzw. jede Parameterkombination berechnet: die empirische Häufigkeitsverteilung und der empirische Likelihood Quotient, die Erfolgsrate und die Vorhersagerate. Über die Berechnung der Vorhersagerate erfolgt die Validierung der Ergebnisse, welche durch die zufällige Aufteilung des Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen in Schätzgruppe und eine unabhängige Evaluierungsgruppe erfolgte. Zusätzlich wurde die Robustheit des Modells über die wiederholte zufällige Auswahl der gravitativen Massenbewegungen für die selbe Parameterkombination getestet.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Rasterweite mit 10m und für die Rasterweite mit 50m, sehr hohe Vorhersageraten für die jeweiligen Gefahrenhinweiskarten erzielt werden konnten. Die besten Parameterkombinationen beinhalten die Datensätze zu Boden, Geologie, Landnutzung, Hangneigung, Distanz zum Wegenetz oder Distanz zum Flussnetz. Mit dieser Parameterkombination in der Rasterweite von 10m, konnten 70% der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in 20% der gefährdetsten Flächen vorhergesagt werden. Diese Vorhersagerate muss aber vor dem Hintergrund der in der Analyse auftretenden Unsicherheiten gesehen werden.

Die Datengrundlage weist Unsicherheiten in der Lagegenauigkeit, in der Vollständigkeit und der realitätsnahen Abgrenzung und Ausweisung von kategorischen Einheiten auf. Des weiteren birgt die Umwandlung der kategorischen Vektordaten in Rasterdaten weitere Unsicherheiten, die stark vom Algorithmus der Zuweisung der kategorischen Einheit zu den einzelnen Pixeln und vom Maßstab der Eingangsdatensätze abhängen. Bei der Modellierung selbst treten Unsicherheiten durch die subjektive Auswahl der Eingangsdatensätze und die nicht genau abschätzbare Reaktion des Modells bei der Integration von zusätzlichen Parametern auf. Die Erstellung der Gefahrenhinweiskarte in der 50m Rasterweite ist allerdings mit mehr Unsicherheiten verbunden, als diese bei der 10m Rasterweite auftreten. Dies ist unter anderem durch die durchschnittliche Größe der gravitativen Massenbewegungen bedingt. Des weiteren verschwinden bei der Konvertierung der Daten in 50m x 50m Rasterweite, je nach Maßstab der Daten, einzelne Einheiten. Daher wäre je nach Fragestellung für zukünftige Analysen entweder die Verwendung einer Auflösung von 10m zu überlegen oder eine dem Maßstab entsprechende Aufbereitung der Eingangsdaten anzustreben. Durch die hohe räumliche Auflösung von 10m werden jedoch hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Lagegenauigkeit der Eingangsdaten gestellt. Entscheidend bei der Auswahl der besten Parameterkombination und der daraus resultierenden Gefahrenhinweiskarte war neben der Betrachtung der statistischen Gütemaße auch die Miteinbeziehung der subjektiven geomorphologischen Güte. Dadurch wurde für jede Rasterweite eine geomorphologisch plausible Gefahrenhinweiskarte mit einer hohen Vorhersagerate als Endergebnis ausgewählt. Aufgrund der Angabe der Vorhersagerate wird für die Anwender der Gefahrenhinweiskarte ein wichtiges Maß für die zulässigen Interpretationsmöglichkeiten gegeben. Die finalen Gefahrenhinweiskarten zeigen Gebiete mit besonders hoher Gefährdung gegenüber möglicher Anrisse von gravitativen Massenbewegungen auf, jedoch kann keine Aussage zum Zeitpunkt oder zur Magnitude dieses möglichen Ereignisses gemacht werden.

Die in Österreich zum Großteil digital vorliegenden Geodaten bieten eine gute Basis für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten mit der Methode nach Chung und Fabbri (1993, 2005). Eine mögliche Verbesserung der Vorhersagerate könnte mit zusätzlichen Datensätzen zum spezifischen Wassereinzugsgebiet und zur Wölbung erreicht werden. Des weiteren ist eine Erhebung des Zustands und der Bauweise des Wegenetzes zur besseren Differenzierung des Datensatzes zu den Wegen wichtig. Diese Analyse basiert großteils auf Daten von gravitativen Massenbewegungen, die sich im Jahr 2005 ereignet haben, welche ein spezielles Szenario bezüglich Niederschlag und Vorbefeuchtung beschreiben. Informationen zu früher aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen wären sehr wertvoll, um ein besseres Bild zur Gefährdungssituation und zu möglichen Auslösern zu erhalten.

## 11. Literaturverzeichnis

Andrecs, P., Hagen, K., Land, E., Stary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F. Und Haiden, T., 2007: Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark), BFW-Dokumentation 6/2007, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, 75 S., Wien.

Bamberger, R., Bamberger, M., Bruckmüller, E., Gutkas, K., Hg. (1995) : *Österreich-Lexikon*. - 2 Bde., Wien (www.aeiou.at).

Bell, R., 2007: Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

BMLFUW Hrsg., 2006a: Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation der Bundeswasserbauverwaltung, des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lanwinenverbauung und des Hydrographischen Dienstes. Wien.

BMLFUW Hrsg., 2006b: Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation – Teilbericht des Hydrographischen Dienstes. Abteilung VII/3 Wasserhaushalt, Wien.

Brabb, 1984. E.E. Brabb, Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. In: *Proc., Fourth International Symposium on Landslides* vol. 1, Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada (1984), pp. 307–324.

Brandstätter, W., 2008: Informationen zu momentanen Arbeiten in Gasen und Haslau. Übermittelt nach persönlicher Anfrage. WLW – Gebietsbauleitung Ost- und Weststeiermark.

Brenning, A., 2005: Spatial prediction models for landslide hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, S. 853-862, European Geosciences Union.

Bau- und Raumplanungsamt (BRPA), Hrsg., 2007: Karte der Boden und Hanginstabilitäten des Kantons Freiburg– Erläuternder Bericht. 18.S., Freiburg.

Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V. Und Reichenbach, P., 1991: GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landform* 16, 427-445.

Chung, C.-J., 2006: Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers & Geosciences* 32, S. 1052-1068.

Chung, C.-J. und Fabbri, A., 1993: The representation of geoscience information for data integration. *Non-renewable Resources*, 2-2, 122-139.

Chung, C.-J. und Fabbri, A., 1999: Probabilistic prediction models for landslide hazard.

Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 65, S. 1389-1399.

Chung, C.-J. und Fabbri, A., 2003: Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards* 30, S.451-472.

Chung, C.-J. und Fabbri, A., 2005: Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M., (Hrsg.) 2005: *Landslide hazard and risk*. Chichester.

Chung, C.-J. und Fabbri, A., 2008: Predicting landslides for risk analysis – spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology* 94, S. 438-452.

Chung, C.-J. und Leclerc, Y., 2003: Use of quantitative techniques for zoning landslide hazard. *Earthquake Hazard Mapping for Landuse and Emergency Planning*.

Committee on the Review of the National Landslide Hazards Mitigation Strategy, Hrsg., 2004: *Partnerships for reducing landslide risk. Assessment of the national landslide hazards mitigation strategy*. Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies, The National Academic Press, Washington, D.C., 143 S..

Crozier, M.J., 1986: *Landslides: causes, consequences & environment*. 245 S.

Crozier, M.J. und Glade, T., 2005: *Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach*. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M., (Hrsg.) 2005: *Landslide hazard and risk*. Chichester.

Cruden, D. und Varnes, D.J., 1996: *Landslide types and processes*. In: Turner, A.K., und Schuster, R.L., Hrsg., 1996: *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, D.C., S. 36-75.

Davis, J.C., Chung, C.J., Ohlmacher, G.C., 2006: Two models for evaluating landslide hazards. *Computers & Geosciences* 32, S. 1120-1127.

Dax, T. und Hovorka, G., 2003: *Regionale Entwicklung im Berggebiet und institutioneller Wandel*. Bundesanstalt für Bergbauernfragen, Wien.

Demoulin, A. und Chung, C.F., 2007: Mapping landslide susceptibility from small datasets: A case study in the Pays de Herve (E Belgium). *Geomorphology* 89, S. 391-404.

Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L., Hrsg. 1996: *Landslide recognition – Identification, movement and causes*. Chichester.

Dikau, R. und Glade, T., 2002: *Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen*. Geographische Rundschau 54, Heft 1, Braunschweig.

Embleton-Hamann, C., 2007: *Geomorphologie in Stichworten, Band III - Exogene Morphodynamik*. 6. Auflage, Berlin, Stuttgart.

Fabbri, A. und Chung, C.-J., Cendero, A., Remondo, J., 2003: *Is prediction of future landslides*

possible with a GIS? *Natural Hazards* 30: 487-499.

Flügel, H.W., 1984: Der ostalpine Deckenstapel. In Flügel, H.W. und Neubauer F., 1984: Steiermark – Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark – 1:200 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Gasperl, W., 2008: 200 Tage Gschlifgraben – eine Zwischenbilanz, download unter: <http://www.forstnet.at/article/articleview/67511/1/18349/>. Die Wildbach Oberösterreich, Gmunden.

Giamboni, M., 2008: SilvaProtect CH – Phase 1, Projektdokumentation. Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung für Gefahrenprävention, Bern: enthält GEOTEST AG, Geo7 AG und OEKO-B AG, 2006: SilvaProtect-CH -Los 1: Prozess Steinschlag / Blockschlag; Los 2: Prozesse Hangmure / Rutschung, Murgang –Schlussbericht.

Glade, T., 2005: Stand, Aufgaben und Probleme der Naturrisikoforschung aus physisch-geographischer Sicht. In: Müller-Mahn, D. und Wardenga, U. 2005: Möglichkeiten und Grenzen integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie. Forum ifl, Heft 2, Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig.

Glade, T. Und Crozier, M., 2005: The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M., (Hrsg.) 2005: *Landslide hazard and risk*. Chichester.

Glade, T., Anderson, M., Crozier, M., (Hrsg.) 2005: *Landslide hazard and risk*. Chichester.

Guzzetti, F., 2005: *Landslide hazard and risk assessment*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. und Reichenbach, P., 1999: Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, S. 181-216.

Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. und Cardinali, M., 2005: Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, S. 115-131. European Geosciences Union.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006: Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81, S. 166-184.

Haiden, T., et al., 2006: *Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) - System overview*. ZAMG, Wien.

Hübl, J., Kienholz, H. und Loipersberger, A., (Hrsg.), 2006: *DOMODIS - Dokumentation alpiner Naturereignisse [Documentation of Mountain Disasters]*. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Klagenfurt.([www.interpraevent.at](http://www.interpraevent.at))

Hutchinson, J.N., 1995: Keynote paper: landslide hazard assessment. In Bell (Hrsg.), *Landslides*. Balkema, Rotterdam, S.1805-1841.

- Jeitler, M., 1969: Wirtschaftliche Veränderungen in der Agrar- und Fremdenverkehrsstruktur des oststeirischen Alpenraumes. Dissertation an der Hochschule für Welthandel, Wien.
- Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B., 2003: Forecast verification. A practitioner's guide in atmospheric science. John Wiley and Sons, Chichester.
- Kobler, A., Jülich, S. und Bloemertz, L., 2004: Risk analysis – a basis for disaster management, Guidelines. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn.
- Lee, E.M. Und Jones, D.K.C., 2004: Landslide risk assessment. London. 454 S.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. Und Goodwin, C.N., 1998: The SINMAP approach to terrain stability mapping. Proceedings of 8<sup>th</sup> Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada. S. 1157-1165.
- Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP), Hrsg., 2006: Dokumentation von Naturereignissen – Feldanleitung. 64 S., Innsbruck/Bern.
- Rapp, M.A., 2007: „Geogene Katastrophen“ - Beispiele aus der Steiermark als Chance für den Geotourismus?! Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt Band 60, S. 241-243, Wien.
- Remondo, J., Gonzalez, A., Diaz de Teran, J.R. und Cendrero, A., 2003a: Landslide susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A case study from the lower Leizaola valley, Guipuzcoa (Spain). Natural Hazards 30, S. 267-279.
- Remondo, J., Gonzalez, A., Diaz de Teran, J.R., Cendrero, A., Fabbri, A. und Chung, C.-J., 2003b: Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain. Natural Hazards 30, S. 437-449.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., Paz, A. und Marturia, J., 2003: A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). Natural Hazards 30, S. 281-295.
- SpatialModels Inc., 2006: Spatial prediction modeling system - User's Guide, Version 2.0. Ottawa.
- Schwarz, L., Tilch, N., Kociu, A., 2007: GIS – gestützte Ausweisung von Bereichen unterschiedlicher Rutschungssuszeptibilität mittels künstlicher Neuronaler Netze am Beispiel der Krisenregion Gasen-Haslau (Obersteiermark). Tagungsband Geoforum Umhausen, Geoforum Tirol, Tirol.
- Smith, K., 2004: Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster. Routledge, London, New York, 306.
- Thiebes, B., 2006: Räumliche Gefährdungsmodellierung flachgründiger Hangrutschungen, GIS gestützte Analyse an der Schwäbischen Alb. Diplomarbeit, Bonn.
- Tilch, N., Kautz, H., Kociu, A., 2007: Interner Bericht zur Pilotstudie Krisenregion Gasen-Haslau

(Bezirk Weiz, Oststeiermark) im August 2005 – Teil 1 Erkundung, Recherche und Dokumentation massenbewegungsrelevanter Informationen. Geologische Bundesanstalt, Fachabteilung Ingenieurgeologie, Wien.

UNDRO, 1991: Mitigation natural disasters, Phenomena, Effects and options. United Nations Disaster Relief, New York.

USGS - National Earthquake Information Center, 2008: Eastern Sichuan, China Earthquake of 12 May 2008. Earthquake Summary Poster download at the Earthquake Hazards Program: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqarchives/poster/2008/20080512.php>

Varnes, D.J., 1978: Slope movements: types and processes. In: R.L. Schuster and R.J. Krizek, Editors, *Landslide Analysis and Control, National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report vol. 176* (1978), S. 11–33 Washington D.C.

IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, Varnes, D.J., 1984: Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. UNESCO Press, Paris.

Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. Und Soeters, R., 1997: Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86, S. 404-414.

Van Westen, C.J., 2000: The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics* 21, S. 241-255.

## Internetquellen:

Bundesamt für Eich und Vermessungswesen (BEV): [www.bev.gv.at](http://www.bev.gv.at), Link zu Produkte und Dienstleistungen mit Datenbeschreibungen zu DGM und DKM, Qualität

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW): <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7066> – Link zur digitalen Bodenkarte (eBOD)

China Radio International (CRI) Online: <http://german.cri.cn/221/2008/07/05/1s96220.htm>, Link zu Bericht zu den Opferzahlen im Erdbeben in Sichuan vom 5.7.2008

Digitaler Atlas Steiermark: <http://www.gis.steiermark.at/>

ESRI Support Homepage zum Download von Erweiterungen: <http://support.esri.com>

Gemeinde Gasen: [www.gasen.at](http://www.gasen.at)

Landesstatistik Steiermark: [www.verwaltung.steiermark.at](http://www.verwaltung.steiermark.at)

Landes – Umwelt – Informationssystem Steiermark (LUIS): <http://www.umwelt.steiermark.at/>, Link

zu den Klimaregionen der Steiermark – mit Darstellung im Digitalen Atlas Steiermark

Ianko Tchoukanski Homepage zum Download des ETGeowizards: <http://www.ian-ko.com>

Petley, D., seit 2007: Dave's landslide blog, <http://daveslandslideblog.blogspot.com/>

Pfarre Gasen: [www.gasen.at/pfarre](http://www.gasen.at/pfarre)

Statistik Österreich: Ein Blick auf die Gemeinde – online. 61711 – Gasen und 61717 – Haslau: <http://www.statistik.at/blickgem/index.jsp>. Wien, 2008.

zuletzt auf Aktualität geprüft am 15.10.2008

## **12. Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1: Stabilitätszustände und destabilisierende Faktoren basierend auf Crozier (1989).....	7
Abb. 2.2: Schritte des Risikomanagements (Crozier und Glade 2005 nach Australian Geomechanics Society 2000).....	11
Abb. 3.3: Digitales Geländehöhenmodell im 10m Raster, auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten; BEV.....	21
Abb. 4.4: Methode Likelihood Quotient Modell - schematischer Ablauf der Berechnungen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit 12 Gefährdungsklassen (aus ursprünglich 200) mit kategorischen und numerischen Datensätzen; grav. MB = Datensatz Anrisse der gravitativen Massenbewegungen; eigene Darstellung verändert nach Chung und Leclerc (2003).....	25
Abb. 4.5: Binärer Code für Ausdehnung des Untersuchungsgebiets; User's Guide SpatialModels Inc. 2006.....	29
Abb. 4.6a: kategorische Karte mit Einheiten 1, 4, 6; User's Guide SpatialModels Inc. 2006.....	30
Abb. 4.7: a) Empirisches Häufigkeitsverteilungs-diagramm und b) empirischer Likelihood Quotient für Landnutzung; 10m x 10m Auflösung; berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen (= grav.MB), eigene Berechnung in SPM. Einheit 2 = Fehler .....	36
Abb. 4.8: Schema der Validierung mit zufälliger Aufteilung der gravitativen Massenbewegungen in Schätz- und Evaluierungsgruppe.....	38
Abb. 4.9: Erfolgsrate: Schema des Diagramms; Beispiel zur Aussage: in 20% der gefährdetsten Flächen liegen 78% aller gravitativen Massenbewegungen. Die Erfolgsrate sollte über der „min-	

Linie“ liegen, damit ein signifikantes Ergebnis vorliegt. Darunter liegende Kurven, stellen eine zufällige Verteilung dar.....	40
Abb. 4.10: Vorhersagerate: Schema des Diagramms; Beispiel zur Aussage: in 20% der gefährdetsten Flächen liegen 70% aller Massenbewegungen. Die Vorhersagerate sollte über der „min-Linie“ liegen, damit ein signifikantes Ergebnis vorliegt. Darunter liegende Kurven, stellen eine zufällige Verteilung dar.....	41
Abb. 5.11: Lage und Topographie des Untersuchungsgebietes; Kartengrundlage ÖK 50 aus AMap Fly - BEV, 2005.....	42
Abb. 5.12: Panorama Amassegger Graben; Foto: Ecker 2008.....	43
Abb. 5.13: Klimaregionen der Steiermark, Ausschnitt des Untersuchungsgebiets. B.6-Klimaregion Feistritztal, C.3-Klimaregion Fischbacher Alpen mit Grazer Bergland, aus digitaler Atlas Steiermark 2008.....	44
Abb. 5.14: Blick auf Gasen, im Vordergrund Hangrutschungen vom August 2005; Hubschrauberaufnahme Gemeinde Gasen 2005.....	48
Abb. 5.1: Darstellung der Niederschlagstagesummen vom 19.-23.August 2005; BMLFUW 2006b 50	
Abb. 5.2: Gesamtniederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet (INCA, 20.8.2005 12:01 - 21.8.2005, 24:00, 1km Raster), und umliegende permanente Messstellen BFW 2007.....	51
Abb. 5.3: Niederschlagsstundensummen für die umliegenden kontinuierlichen Messstellen des Hydrologischen Landesdienstes der Steiermark. BFW 2007.....	51
Abb. 6.4: Ergebnis der Rasterkonvertierung der digitalen Katastralmappe in ArcInfo für 10m Rasterweite (oben) und 50m Rasterweite (unten).....	57
Abb. 6.5: Vergleich der Ergebnisse der Konvertierung und Bearbeitung der verschiedenen Daten zu den gravitativen Massenbewegungen (=grav. MB) dargestellt für den Ausschnitt Hirschberg – Schoberkogel am Amassegger Bach. Aus den als Shapefile vorliegenden Punktdaten (gelb) und Flächendaten (schwarze Umrandung) zu den gravitativen Massenbewegungen wurden Datensätze im Raster-Format erzeugt. Die Pixel aus den Punktdaten (rot) verschwinden in dieser Darstellung (speziell bei der Rasterweite von 50m) manchmal unter den Pixeln der Anrissfläche (hellgrün). Dies kann man durch Unterschiede im Hellgrün erkennen. Aus den Gesamtflächen der gravitativen Massenbewegungen (dunkelgrün und hellgrün) wurde in SPM die jeweilige Anrissfläche generiert. Oben in 10m Rasterweite, unten in 50m Rasterweite;.....	59
Abb. 6.6: Ergebnisse aus der Berechnung der Rasterdatensätze Hangneigung (oben) und Distanz zum Wegenetz (unten) in ArcInfo; 10m (links) und 50m Rasterweite (rechts). ....	60
Abb. 6.7: Vergleich der relativen Häufigkeit der Hangneigung für 10m und 50m Rasterweite; .....	61
Abb. 6.8: Vergleich der relativen Häufigkeit der Distanz zum Wegenetz für 10m und 50m Rasterweite.....	62

Abb. 6.9: empirische Häufigkeitsverteilung für die Parameter a) Boden, b) Geologie, c) Landnutzung, d) Hangexposition, e) Höhe, f) Hangneigung, g) Distanz zum Flussnetz und h) Distanz zum Wegenetz; Berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für 10m x 10m Rasterweite.....	65
Abb. 6.10: Empirischer Likelihood Quotient für die Parameter Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Hangneigung, Distanz zum Flussnetz, Distanz zum Wegenetz, mit 10m x 10m Rasterweite; ermittelt mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen. Berechnet mit SPM, Darstellung in Microsoft Excel.....	66
Abb. 6.11: Empirische Häufigkeitsverteilung für die Parameter Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Distanz zum Flussnetz, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz; Berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen für 50m x 50m Rasterweite; Anzahl von Neighborhoodpixel = 1.....	72
Abb. 6.12: Likelihood Quotient für die Parameter Boden, Landnutzung, Geologie, Hangexposition, Höhe, Hangneigung, Distanz zum Flussnetz, Distanz zum Wegenetz, mit 50m x 50m Rasterweite, ermittelt mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen. Berechnet mit SPM, Darstellung in Microsoft Excel.....	73
Abb. 6.13: a) Erfolgsrate der Parameterkombinationen für die 10m Rasterweite, berechnet mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, b) Erfolgsrate der Parameterkombinationen für die 50m Rasterweite, berechnet mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen.....	78
Abb. 6.14: a) und b) Vorhersagerate einzelne Parameter (Boden, Geologie, Landnutzung, Hangexposition, Höhe, Distanz zum Flussnetz, Hangneigung und Distanz zum Wegenetz) jeweils für die Rasterweite von a) 10m und b) 50m; Vorhersagerate für ausgewählte Parameterkombinationen in c) 10m Rasterweite, die Berechnung mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen (=MB), und d) 50m Rasterweite, zur Berechnung wurden die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen herangezogen. ....	83
Abb. 6.15: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination 7 (bgns), berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel.....	90
Abb. 6.16: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination 10 (bgfsw), berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel.....	93
Abb. 6.17: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination 7 (bgns), berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen, die größer als 1000m <sup>2</sup> sind, und einem Neighborhood Pixel.....	94
Abb. A.1: Bodenkarte 1:25 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau; Quelle: landwirtschaftliche Bodenkartierung eBod, BFW, Wien und forstliche Standortskartierung "Oststeirisches Bergland - Raum Anger-Sankt Kathrein am Offenegg-Heilbrunn-Gasen-Sankt Erhard" 1960, Forstliche Versuchsanstalt, Wien. ....	4
Abb. A.2: Digitale Katastralmappe 1:1 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau; BEV 2001, Wien.....	5

Abb. A.3: Geologische Karte 1:50 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau aus den Blättern 134 - Passail und 135 - Birkfeld; GBA 1990 und 2005, Wien. ....	5
Abb. A.4: Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen vom August 2005 in 10m und 50m Rasterweite, berechnet mit SPM für 10% der höchstliegenden Bereiche der gesamten Flächen der gravitativen Massenbewegungen. ....	6
Abb. B.1: Screenshot ILWIS Open 3.4 - Benutzeroberfläche und Menü für Datenimport (Import General Raster), ILWIS Open 3.4, 52 North, 2007.....	9
Abb. B.2: Screenshot ILWIS Open 3.4 - Benutzeroberfläche und Menü Datenexport (Export); ILWIS Open 3.4, 52 North, 2007.....	10
Abb. C.1: Gefahrenhinweiskarten für die Parameter Geologie, Boden, Landnutzung, Distanz zum Wegenetz, Distanz zum Flussnetz, Höhe, Geologie und Hangexposition nach dem jeweiligen Likelihood Quotient gereiht, mit 10m Rasterweite. Die relative Gefährdung wurde mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen berechnet. ....	16
Abb. C.2: Gefahrenhinweiskarten für die Parameter Landnutzung, Hangneigung, Boden, Geologie, Distanz zum Flussnetz, Höhe, Distanz zum Wegenetz und Hangexposition nach Likelihood Quotient gereiht, mit 50m Rasterweite. Die relative Gefährdung wurde mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechnet. ....	17
Abb. C.3: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgns", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel	19
Abb. C.4: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgnw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel..	20
Abb. C.5: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgns", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel..	21
Abb. C.6: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgfsw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel .....	22
Abb. C.7: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bdfsw", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel.....	23
Abb. C.8: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgns", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel.....	24
Abb. C.9: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgfsw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen die größer als 1000m <sup>2</sup> sind..	25

## 13. Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen nach Prozesstyp und Materialtyp nach Cruden und Varnes (1996) und Dikau (1996).....	5
Tab. 2.2: Auswahl vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren bei gravitativen Massenbewegungen nach Dikau und Glade (2002).....	8
Tab. 2.3: Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten zugeordnet nach direkt oder indirekt, bzw. qualitativ oder quantitativ; nach Guzzetti 2005.....	13
Tab. 3.4: Größenverteilung der gravitativen Massenbewegungsflächen.....	20
Tab. 5.5: Landnutzungsarten in Prozent an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets, berechnet aus der digitalen Katastralmappe (BEV seit 1989).....	47
Tab. 5.1: Vorniederschlagsmengen vom 1.-19. August, 1.-31.Juli und 1.Juli bis 19. August der umliegenden Messtellen des Hydrographischen Landesdienstes der Steiermark, im Vergleich mit den Durchschnittlichen Monatssummen an den Messtellen. Andrecs et al. 2007.....	53
Tab.5.2: Ausmaß der Sachschäden in den Gemeinden Gasen und Haslau; in Stück bzw. bei Verkehrswegen in Laufmetern; zerstört = Verkehrsweg, der nicht mehr passierbar ist, Gebäude, das nicht mehr bewohnbar ist, beschädigt = Verkehrsweg, der passierbar ist aber Schäden aufweist, ein Gebäude, das nach Reparaturarbeiten wieder bewohnbar ist; nach Andrecs et al. 2007.....	54
Tab. 6.3: Parameterkombinationen die in der vorliegenden Arbeit für die 10m und 50m Rasterweite vorgestellt und verglichen werden;.....	63
Tab. 7.4: Vergleich der realen Größe der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen zu der vom Rasterdatensatz abgebildeten Größe für die 10m und 50m Rasterweite. Es wurde auch die Fläche, die von den Punkten abgedeckt wird, mit der realen Größe der Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen verglichen.....	100
Tab. 7.5: Vorhersagerate bei Reduzierung der Größe der Schätzgruppe von 50% der gravitativen Massenbewegungen auf 25% bzw. 10% für die Parameterkombinationen "bgnsw" (10m Rasterweite) und "bgfsw" (50m Rasterweite); CV=Vorhersagerate in Anteil der gravitativen Massenbewegungen der Evaluierungsgruppe in % in 20% der gefährdetsten Flächen, MBt/p= Anrissfläche – t oder Anrisspunkt - p der gravitativen Massenbewegungen.....	102
Tab. C.1: Kennzeichnung von für gravitative Massenbewegungen besonders standfesten, bzw. besonders anfälligen kategorischen Einheiten .....	10
Tab. C.2: Kennzahlen für die geologischen Einheiten, die von Mitarbeitern der GBA je nach Standfestigkeitseigenschaften zusammengefasst wurden und Auflistung der Prozentanteile an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und an der Gesamtfläche und des Likelihood Quotienten für	

10m (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).....11

Tab. C.3: Kennzahlen für die Landnutzungseinheiten der digitalen Katastralmappe und Auflistung der Prozentanteile an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und an der Gesamtfläche und des Likelihood Quotienten für 10m (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).....12

Tab. C.4: Kennzahlen der Bodenklassen und Übersicht Anteil an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und Anteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes, außerdem Likelihood Quotient der einzelnen kategorischen Einheiten des Bodendatensatzes. Für 10m Rasterweite (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).....13

# **Anhang**

## **Anhang A – Daten**

A.1 Durch die Geologische Bundesanstalt zur Verfügung gestellte Daten

A.2 Vorbereitung Datensatz gravitative Massenbewegungen

A.2.1 Datensatz - Anrisspunkte

A.2.2 Datensatz - Flächen

## **Anhang B – Datenkonvertierung in ILWIS**

B.1 Datenimport und Export in ILWIS

B.1.1 Daten Import:

B.1.2 Daten Export:

## **Anhang C - Ergebnisse**

C.1 Kennzahlen, empirische Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient der kategorischen Daten

C.1.1 Geologie

C.1.2 digitale Katastralmappe

C.1.3 Boden

C.2 Parameter – Gefahrenhinweiskarten

C.3 Parameterkombinationen - Gefahrenhinweiskarten

## Anhang A – Daten

### A.1 Durch die Geologische Bundesanstalt zur Verfügung gestellte Daten

Dateiname	Inhalt	Maßstab	Anmerkung	Anmerkung 2
birk_def	DGM für die Region des Untersuchungsgebietes	10x10m, 1201cols, 1001 rows	GaussKrüger_M34; Raster	
ebod.shp	Bodenkarte aus eBod digitalisiert	1:25 000	<i>Lambert Conformal Conic</i> ;	Vektor
boden_ges.gdb	Bodenkarte mit zusätzlichen Infos zu Bodenkennwerten von GBA hinzugefügt. Karte in Abbildung A.1	1:25 000	BMN_M34; Vektor; digitalisiert aus digitaler Bodenkarte (e-bod) in den waldfreien Zonen und der forstlichen Standortskarte "Oststeirisches Bergland - Raum Anger - Sankt Kathrein am Offenegg - Heilbrunn - Gasen - Sankt Erhard" (Stand 1957-1960): 1:25.000. Forstliche Bundesversuchsanstalt, Wien.	Forstliche Standortkartierung nicht sehr zuverlässig, da in diesem Fall nur von Waldeigentümern aufgenommen.
Landnutzung_gas en_dkm_korr.shp = nut_gasen.shp	Landnutzung, Gebäudeflächen, aus der digitalen Katastralmappe; siehe Abbildung A.2	1:1000	GaussKrüger_M34; Vektor	wird halbjährlich aktualisiert, keine Jahresangabe bei Quelle möglich
geofast_clip.shp	Geologische Karte für UG; zusätzliche Informationen zu von der geologischen Karte abgeleitete Parameter der Eigenschaften des Untergrunds, Zusammengefasste lithologische Einheiten; siehe Abbildung A.3	1:50 000	GaussKrüger_M34; Vektor	
geofast_gtln	von Geologie von GBA abgeleitete Parameter für ANN	50x50m	GaussKrüger_M34; Raster	Genauer Verwendungszweck unklar
geofast_reib	von Geologie von GBA abgeleitete Parameter für ANN	50x50m	GaussKrüger_M34; Raster	Genauer Verwendungszweck unklar
geofast_susn	von Geologie von GBA abgeleitete Parameter für ANN	50x50m	GaussKrüger_M34; Raster	Genauer Verwendungszweck unklar
p_mb_31072006_lage_kor.shp = mb_all_p.shp	Massenbewegungs-Anrisspunkte mit Lageinfos, erhoben von GBA, Stand 31.7.2006 Verortungsgenauigkeit 50m; Punkte stimmen oft nicht mit den Anrissflächen überein, liegen daneben.	1:10 000 bis 1:25 000,	GaussKrüger_M34; Vektor, 493 Anrisse. Attribute: Archiv-Nr.: Spalte „GR_ARCHIV“ 8-stelliger Code entsprechend GEORIOS  Prozesstyp: Spalte „MB-Typ“ 1 Anriss 2 Abrissbereich (Gleiten/Rutschen) 3 Abrissbereich (Fließen) „Hangmure“  Vegetation: Spalte „Wald“ 0 Wald-nein baumfrei/Buschwerk 1 Wald-ja  Anthropogene Beeinflussung Spalte „Böschung“ 0 nein 1 ja  Art der anthropogenen Beeinflussung: Wegenetz Spalte „Straboesch“ 0 nein 1 ja	Alte Ackerpflugkante Spalte „Pflugkante“ 0 nein 1 ja sonstiger Bau Spalte „Bauboesch“ 0 nein 1 nein  Bodenprobe: Spalte „Probe“ 0 nicht vorhanden 1 vorhanden  Foto: Spalte „Foto“ 0 nicht vorhanden 1 vorhanden  Relatives Alter: Spalte „Juenger_al“ 0: August 2005 1: jünger 2: älter  Diverse Textspalten mit zusätzlichen Informationen  pxvalue – als ID feld für analyse

P_MB_31072006_lage_kor37_o_u_e_o2.shp = mb_gbaauswahl_p.shp	Für GBA Analysen ausgewählte Massenbewegungs-Anrisspunkte (ohne Uferstandorte; Prozesse, die bis in das Festgestein reichten (z.B. Felsrutschung) und alle Prozessräume, für die Attributierung Wald –ja/nein unklar bleib.), Stand 31.7.2006; siehe Abbildung A.4	1:10 000 bis 1:25 000	GaussKrüger_M34; GaussKrüger_M34; Vektor; 368 Punkte	
Georisiken_Flächen.shp = georisiken_a.shp	Flächenhafte Darstellung der Massenbewegungen, Unterscheidung nach Prozessart/Typ Verortungsgenauigkeit <50m; siehe Abbildung A.4	1:5 000 bis 1:10 000	GaussKrüger_M34; Vektor Für die Analyse wurde ein Feld „Archiv_id“ hinzugefügt, in dem den Elementen einer Rutschung die selbe Kennzahl zugewiesen wurde, weiters wurde ein Feld mit der zugehörigen Bezeichnung zur Spalte „Thema“ angelegt. Nicht alle grav. MB waren in die Teilbereiche Anriss-Transport und Ablagerung unterteilt.	Spalte „ARCHIV_NR“ 8-stelliger Code entsprechend GEORIOS Prozessart/-Typ: <b>Spalte „THEMA“</b> 35: Bereich mit kleinen Rutschungen 39: Vermurung 48: flächenhafte Erosion 92: Rutschmasse 185: Abrissbereich (Gleiten/Rutschen) 207: Quellbereich 217: Locker- und Festgesteinsrutschung 226: Lockergesteinsrutschung 234: Abrissbereich (Fließen) 251: Akkumulationsbereich (Fließen) 252: Akkumulationsbereich (Gleiten/Rutschen) 258: Transportbereich (Gleiten/Rutschen) 267: Transportbereich (Fließen) Angaben zur Lokalität: Spalte „Lokalität“ Anmerkungen: Spalte „Anmerkung“ Aufnahmedatum: Spalte „DATUM“
Georisiken_Linien.shp = georisiken_l.shp	Linienhafte Darstellung von Anrisskante und Seitenerosion	1:5 000 bis 1:10 000	u.a. 471 Anrisslinien; GaussKrüger_M34; Vektor	Stimmen teilweise nicht mit Anrisspunkten überein
Georisiken_Punkte.shp = georisiken_p.shp = quellen_p.shp	Lage von Quellen, besonders feuchte Standorte?	1:5 000 bis 1:10 000	85 Punkte; GaussKrüger_M34; Vektor	135=Quelle, 191=Quellfassung
grenze_oek_bev_bmn34.shp	Grenze des Untersuchungsgebiets	1:50000	GaussKrüger_M34; Vektor	Stimmt nicht mit nut_gasen überein. Wurde an die Grenze des Datensatzes nut_gasen angepasst um hier Lücken zu vermeiden.
wege_erg_luftbild.shp	Zu ÖK aus Luftbildern ergänztes Wegenetz	1:10 000	GaussKrüger_M34; Vektor	Von Mitarbeitern der GBA aus dem Luftbild kartierte Wege.
oek134	Kartenblatt 134 ÖK50; unterschiedliche Layer (u.a. zu Gewässer, Isolinien, Situation, Arbeitskarte,...), und gesamt	1:50 000	GaussKrüger_M34; Raster	
oek135	Kartenblatt 135 ÖK50, aufgeteilt in unterschiedliche Layer (u.a. zu Isolinien, Situation, Arbeitskarte,...), und gesamt	1:50 000	GaussKrüger_M34; Raster	

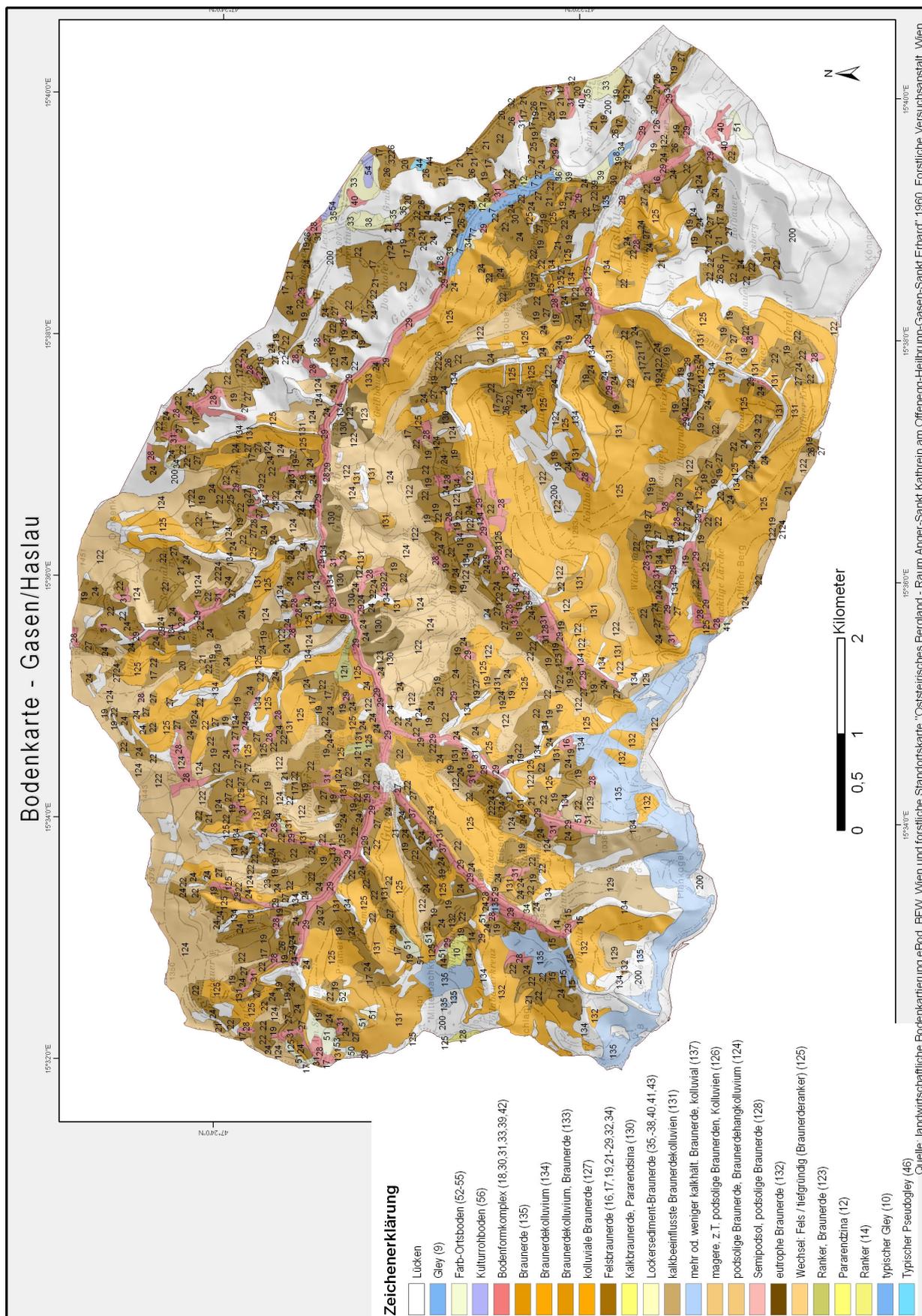


Abb. A.1: Bodenkarte 1:25 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau; Quelle: landwirtschaftliche Bodenkartierung eBod, BFW, Wien und forstliche Standortskartierung "Oststeirisches Bergland - Raum Anger-Sankt Kathrein am Offenegg-Heilbrunn-Gasen-Sankt Erhard" 1960, Forstliche Versuchsanstalt, Wien.

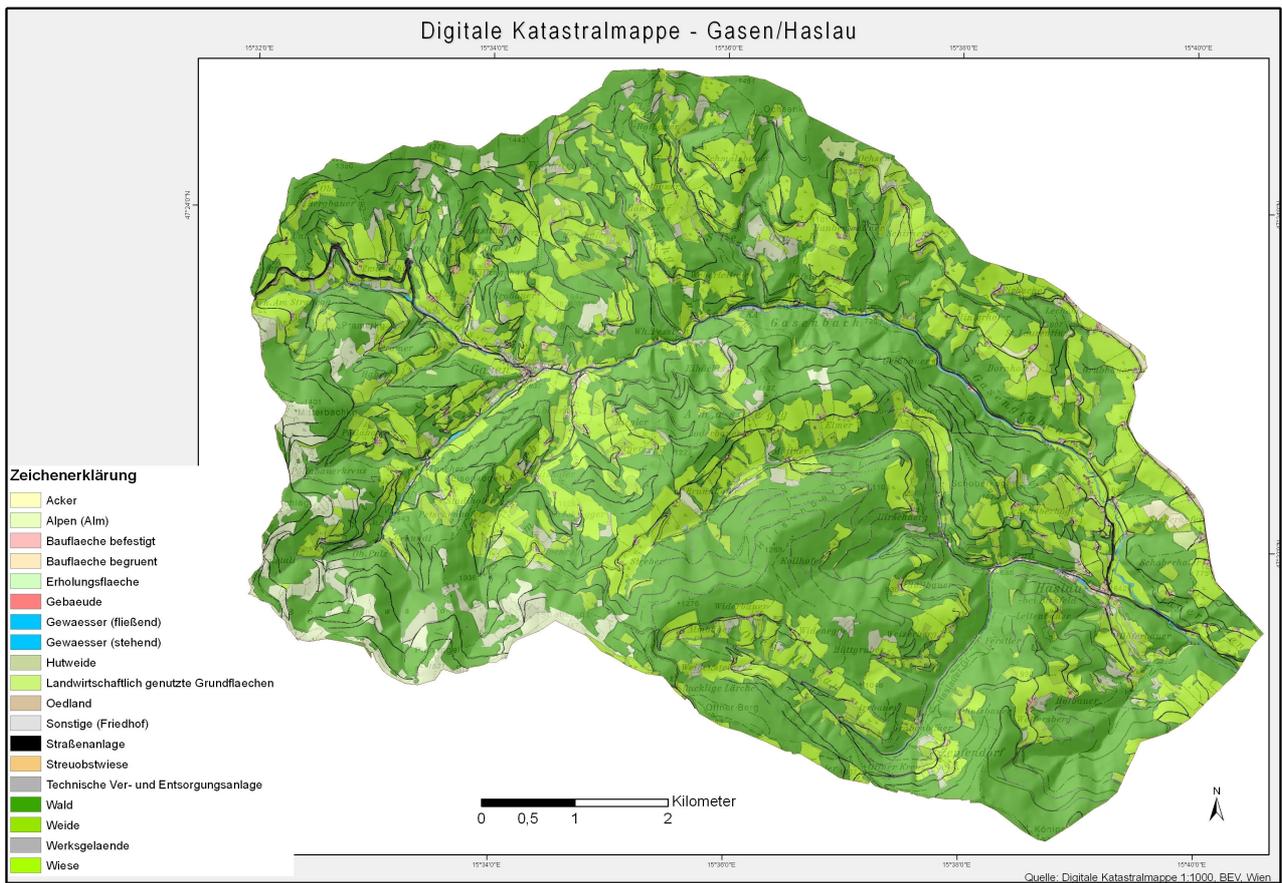


Abb. A.2: Digitale Katastralmappe 1:1 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau; BEV 2001, Wien.

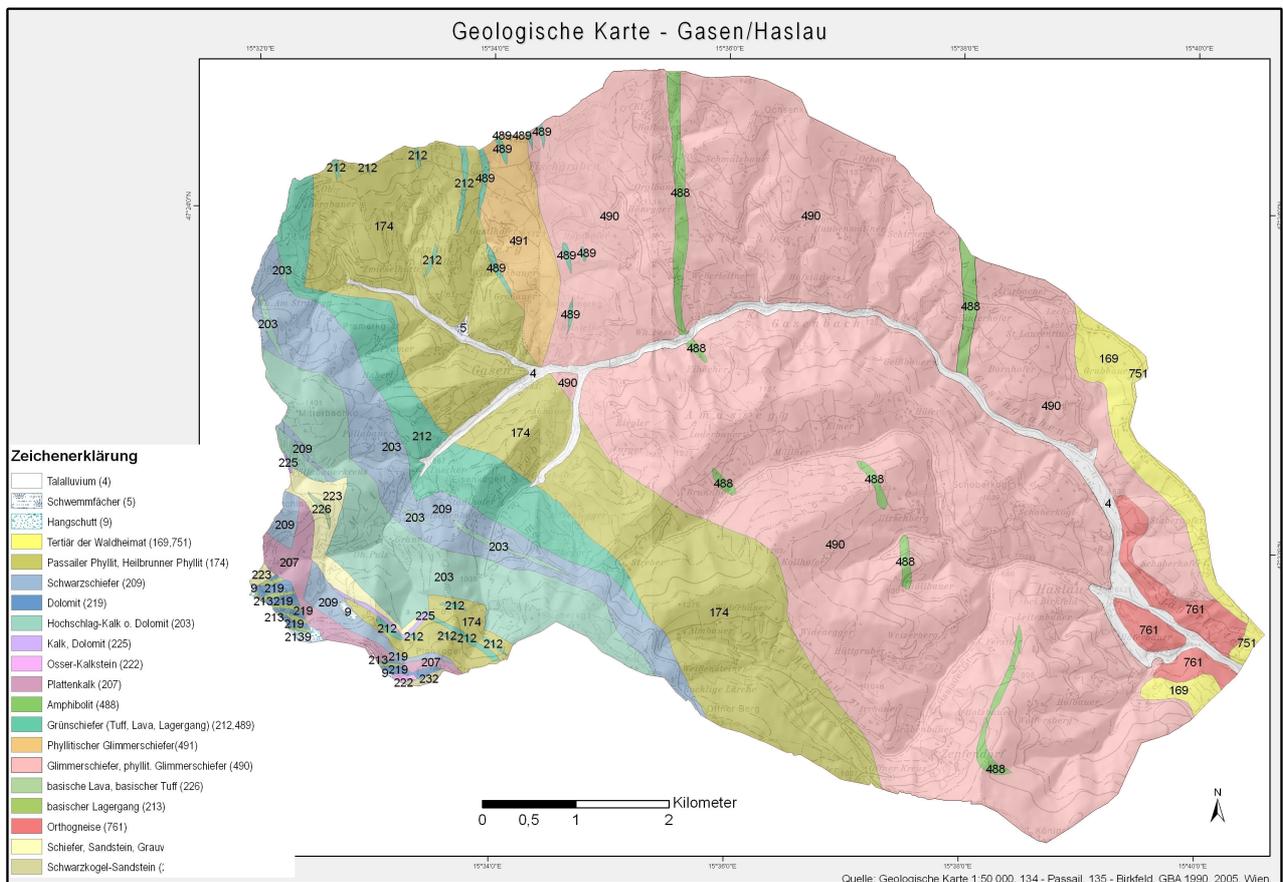


Abb. A.3: Geologische Karte 1:50 000 für das Untersuchungsgebiet Gasen/Haslau aus den Blättern 134 - Passail und 135 - Birkfeld; GBA 1990 und 2005, Wien.

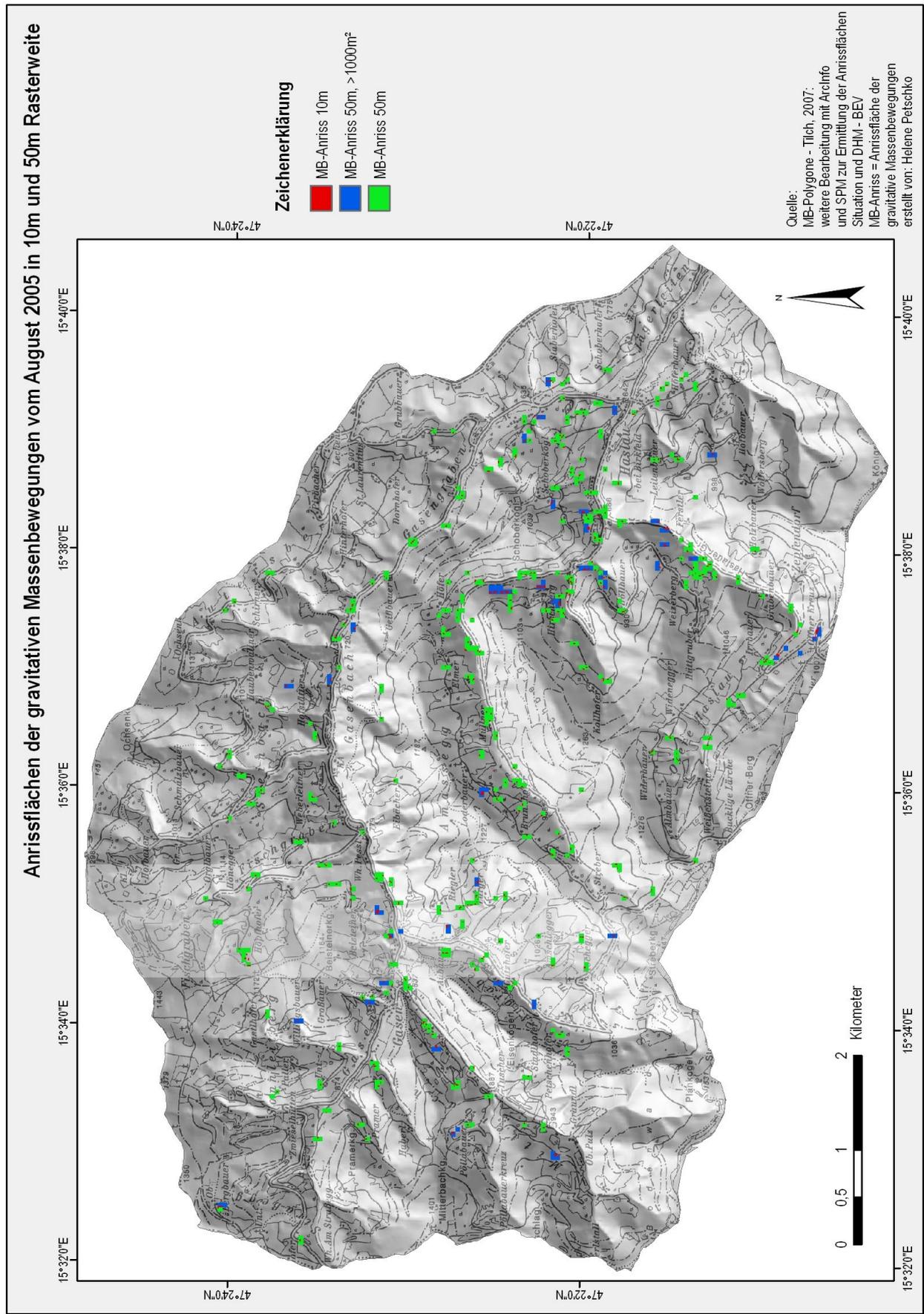


Abb. A.4: Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen vom August 2005 in 10m und 50m Rasterweite, berechnet mit SPM für 10% der höchstliegenden Bereiche der gesamten Flächen der gravitativen Massenbewegungen.

## A.2 Vorbereitung Datensatz gravitative Massenbewegungen

### A.2.1 Datensatz - Anrissepunkte

Hier sollten Punkte die als Ufererosion deklariert sind, ausgeschlossen werden. Informationen dazu enthält die Spalte Ufererosion - Wert 1 kennzeichnet eine gravitative Massenbewegung die sich infolge Ufererosion ereignet hat. Außerdem wurden 2 außerhalb des UG liegende Punkte gelöscht.  
Benennung mps

### A.2.2 Datensatz - Flächen

Eintrag Vermurung gelöscht, nur 1 Quellbereich enthalten, liegt mitten im Polygon der gravitativen Massenbewegung, deshalb vernachlässigbar.

Außerdem wurden Anrisse aufgrund Ufererosion ausgeschlossen. Dieser Schritt erwies sich als problematisch, da die Datenaufnahme nicht einheitlich dokumentiert wurde. So wurde zu manchen gravitativen Massenbewegungen Anmerkungen, wie z.B. Ufererosion angeführt, andere sind jedoch nur durch ihre Lage, z.B. zwischen Straße und Bach beschrieben. Dadurch wird das Ausschließen von gravitativen Massenbewegungen, die sich tatsächlich aufgrund Ufererosion ereignet haben, für die Analysen erschwert. Dennoch wurde versucht, eine Auswahl für die endgültig in die Analyse einfließenden gravitativen Massenbewegungen zu treffen. Um weitere Verwirrungen vorzubeugen wurden hier auch andere Bezeichnungen angeführt die vielleicht auf Ufererosion schließen lassen, in dieser Arbeit aber nicht ausgeschlossen wurden. Flächen mit folgender Bezeichnung/Lokalität wurden aus dem Datensatz der gravitativen Massenbewegungsflächen ausgeschlossen:

- Ufer des Gasenbachs
- Uferböschung
- Übergang Wiese Uferböschung → nicht ausgeschlossen
- Übergang Weide / steile Uferböschung?? Und Übergang Weide/steiles Bachufer bewaldet? => nicht ausgeschlossen
- Talwärtige / talseitige Straßenböschung bis zum Bach?
- Steiles Bachufer => nicht ausgeschlossen
- Steilhang nahe Bach, unterhalb Pflugkante? → nicht ausgeschlossen
- Prallufer
- Fischgraben, zwischen Straße und Bach
- Bergseitige Straßenböschung bis Bach → nicht ausgeschlossen
- Bachwärts von Forststraße → nicht ausgeschlossen
- Bachwärtige Wegböschung → nicht ausgeschlossen

- Bachwärtige Straßenböschung → nicht ausgeschlossen
- Bachufer
- Bachböschung
- Zwischen Straße und Bach
- Weidekante/Bachsteilufer
- Weidekante/Uferkante
- Straßenböschung/Ufererosion
- Alte Wegböschung nahe Bach → nicht ausgeschlossen
- Gemeinde Gasen – Anmerkung aufgrund Ufererosion
- Zufahrt zur Mühle – Anm.: auch aufgrund Ufererosion

→ bei dieser Auswahl insgesamt minus 52 Ereignisse

Dieser Datensatz dient in weiterer Folge zur Erstellung der Anrissflächen mit SPM.

Die Analyse mit Anrissflächen, sogenannten Trigger Areas ist zwingend notwendig, weil sonst auch die Akkumulationsbereiche in die Analyse einfließen und so nicht nur das Ergebnis maßgeblich verfälscht sondern auch das eigentliche Analyseziel verfehlt wird.

## **Anhang B – Datenkonvertierung in ILWIS**

Die Software SPM arbeitet mit einem \*.spg – Format, das nicht in ArcInfo importiert oder bearbeitet werden kann. Dazu ist der Import dieses Formates in einer anderen Software, z.B. PCI Geomatics oder ILWIS (*Open Source GIS*) notwendig, um ein ASCII Format erstellen zu können, welches problemlos in ArcInfo importiert werden kann. Da die Testversion von PCI Geomatics den Import von \*.spg Dateien nicht erlaubt, wurde das *Open Source GIS* – ILWIS 3.4, das frei unter [http://www.ilwis.org/download\\_ilwis.htm](http://www.ilwis.org/download_ilwis.htm) heruntergeladen werden kann, für die Konvertierung verwendet. Diese Software bietet außerdem die Möglichkeit die einzelnen Eingangsdaten zu kontrollieren, ob alles richtig dargestellt wird und keine Fehler in der Konvertierung ins \*.spg-Format aufgetreten sind.

Auch Dateien im Float-Format können importiert und dargestellt werden.

### **B.1 Datenimport und Export in ILWIS**

## B.1.1 Daten Import:

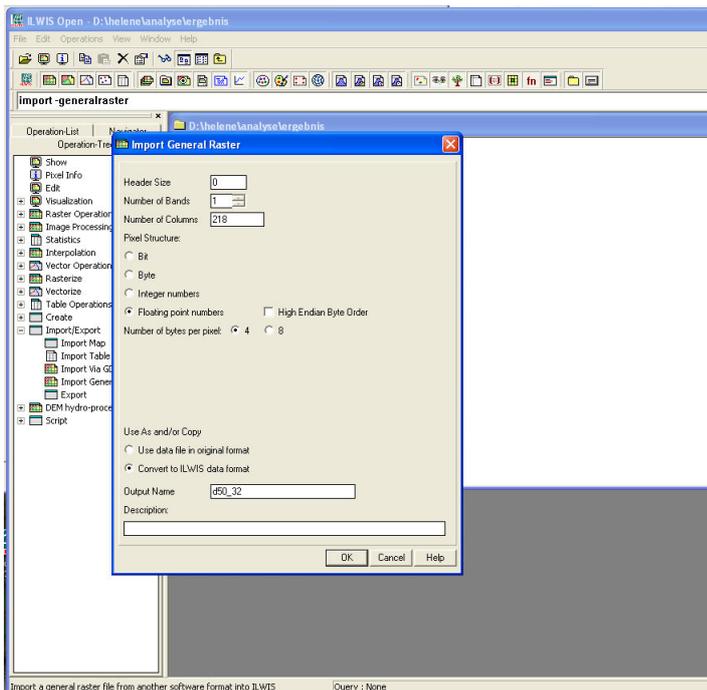


Abb. B.5: Screenshot ILWIS Open 3.4 - Benutzeroberfläche und Menü für Datenimport (*Import General Raster*), ILWIS Open 3.4, 52 North, 2007.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Datenimports in ILWIS 3.4 beschrieben:

*Import/Export* → *Import General Raster*  
→ Auswahl der gewünschten Datei,  
*Import format* = *Use general raster import* → *next*

Im nächsten Fenster (Abbildung B.5) müssen folgende Werte angegeben werden:

*Header size* = 0

*Number of bands* = 1

*Number of columns* = 1090/218

*Pixel Structure*:

- *Integer* (für Datensätze mit

ganzzahligen Werten): *number of bytes per pixel*, 1 für 8bit Raster, 2 für 16 bit Raster, 4 für 32 bit Raster.

- *Floating point numbers* (für Datensätze mit Dezimalstellen): *number of bytes per pixel*, 4 für 32 bit *floating point raster*, 8 für 64bit *double raster*

*Use as and/or Copy*:

→ *Convert to ILWIS data format*

*Output name*: nicht länger als 8 Zeichen

*Description*: Beschreibung zum Datensatz möglich → Klick auf OK und die Datei wird importiert.

### TIPPS:

Beim Öffnen der Importierten Raster auf den „Stretch“ Faktor achten, sollte der Anzahl von Werten entsprechen, z.B. für den Datensatz der gravitativen Massenbewegungen sollte Anzahl von gravitativen Massenbewegungen hier eingegeben werden. Sonst wird der Datensatz im Darstellungsfenster fehlerhaft, z.B. nur in einer Farbe, dargestellt.

Je nach Datensatz unterschiedliche Bit-byte Anzahl, hier je nach ausgewähltem Datensatz *Floating point* oder *Integer* verwenden! Der Datensatz mit gravitativen Massenbewegungen muss als *Integer* mit der jeweiligen Byte Anzahl importiert werden.

## B.1.2 Daten Export:

Im Folgenden werden die Schritte zum Datenexport und somit zur Erstellung von ASCII Dateien Schritt für Schritt beschrieben:

Rechter Mausklick auf gewünschten Datensatz (oder auch aufrufen des Menüs *Export* im *Operation Tree*) und es erscheint das links in Abbildung B.6 dargestellte Fenster.

Danach Auswahl der Export-Funktion  
→

*Method:* → GDAL

*Format:* → ArcInfo ASCII Grid

*Output Filename:* Vorgabe übernehmen

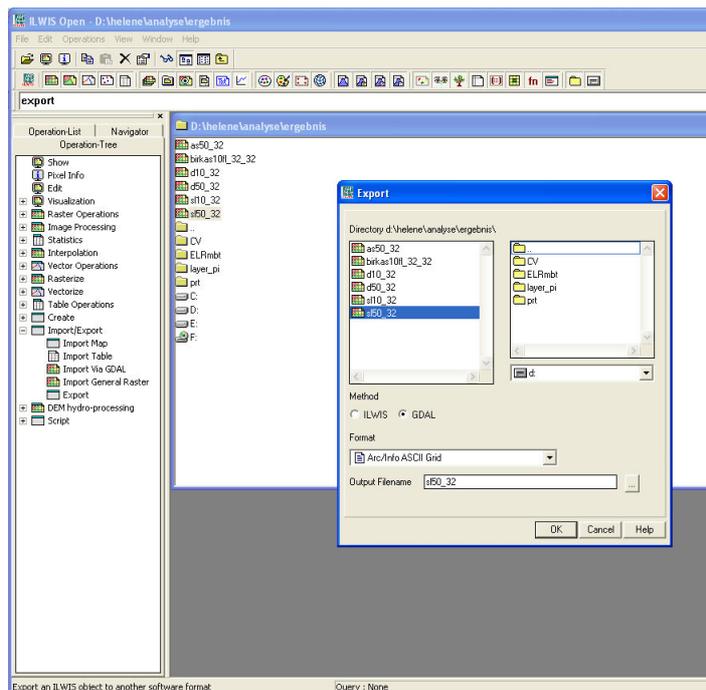


Abb. B.6: Screenshot ILWIS Open 3.4 - Benutzeroberfläche und Menü Datenexport (*Export*); ILWIS Open 3.4, 52 North, 2007

Speicherort ist standardmäßig dort wo Ausgangsfile gespeichert ist. Kann aber auch durch Klick auf das Icon mit den drei Punkten individuell ausgewählt werden. Anschließend entweder den Dateinamen mit \*.asc gleich aus ILWIS exportieren, oder im File Explorer die entstandene Datei mit die Erweiterung \*.asc umbenennen, damit dies auch in weiterer Folge als ASCII - Datei erkannt wird.  
→ Klick auf OK und eine Datei im ASCII Format wird erstellt.

In einem Text-Bearbeitungsprogramm wie **Notepad** oder **TextPad** kann diese ASCII-Datei geöffnet werden. Hier muss die richtige Ausdehnung (links x: -60505 und rechts y: 244495) und Zellgröße (10 bzw. 50) eingetragen werden, damit die Karte in ArcInfo an der richtigen Stelle angezeigt werden kann.

**In ArcInfo:** Über *Conversion Tools* → *to Raster* → *ASCII to Raster* einen Raster erzeugen, der nun in Arc Map dargestellt werden kann. Dabei reichen Integer Werte aus (keine Verwendung vom Float-Format notwendig).

## Anhang C - Ergebnisse

### **C.1 Kennzahlen, empirische Häufigkeitsverteilung und Likelihood Quotient der kategorischen Daten**

Im Folgenden werden die Kennzahlen der kategorischen Einheiten mit ihrer Bedeutung aufgelistet. Zusätzlich wird in den Farben blau und rot noch gekennzeichnet, welche Einheiten besonders standfest, bzw. besonders anfällig bezüglich gravitativer Massenbewegungen, siehe Tabelle C.1 sind.

Tab. C.1: Kennzeichnung von für gravitative Massenbewegungen besonders standfesten, bzw. besonders anfälligen kategorischen Einheiten

	Besonders anfällige Einheiten
	Besonders gering anfällige Einheiten

Die Spalte SPM Ergebnis bezeichnet jene Kennzahlen, die nach der Konvertierung der Datensätze im Float-Format mittels der SPM Data Preparation Tools entstanden sind. Beim Feld „id“ handelt es sich um die in ArcInfo vergebenen Kennzahlen.

Des weiteren sind für jede kategorische Einheit die empirische Häufigkeitsverteilung mit den Prozentanteilen an allen gravitativen Massenbewegungen und an der Gesamtfläche und zusätzlich der jeweilige Likelihood Quotient in den Tabellen C.2 und C.3 angegeben.

Die Werte für die 10m Rasterweite in unten angeführten Tabellen wurden mit SPM für die Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen berechnet. Bei der 50m Rasterweite gingen die Anrisspunkte der gravitativen Massenbewegungen in die Analyse ein. Die Konzentration auf einerseits Anrissflächen für die 10m Auflösung und Anrisspunkte für die 50m Auflösung wird in Kapitel 8 (Diskussion) begründet. In Kapitel 6 der Diplomarbeit werden aber auch Ergebnisse aus der Analyse mit Anrisspunkten (10m Auflösung) und Anrissflächen (50m Auflösung) angeführt.

In den Abbildungen C.1 und C.2 sind die Diagramme der empirischen Häufigkeitsverteilung für jeden Datensatz, sowohl kategorisch als auch numerisch, und beide verwendete Rasterweiten (10m und 50m) abgebildet.

#### **C.1.1 Geologie**

In Tabelle C.2 werden die Kennzahlen zum Datensatz Geologie, die zuerst in ArcInfo zugeordnet wurden und sich dann durch die Konvertierung der Datensätze in SPM verändert haben, erläutert. Zusätzlich werden noch die Prozentanteile an allen aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen

und an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes für jede geologische Einheit und beide räumliche Auflösungen (10m und 50m) angeführt.

Tab. C.2: Kennzahlen für die geologischen Einheiten, die von Mitarbeitern der GBA je nach Standfestigkeitseigenschaften zusammengefasst wurden und Auflistung der Prozentanteile an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und an der Gesamtfläche und des Likelihood Quotienten für 10m (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).

Geologie		10 Rasterweite			50m Rasterweite			
SPM	id	Bezeichnung	%MB	% Gesamtfl.	LQ	%MB	% Gesamtfl.	LQ
3	1	Talalluvium (fluviale und/oder glazifluviale Ablagerung (undifferenziert/heterogen))	5,93%	2,60%	2,2844	7,71%	2,55%	3,0213
4	2	sehr kompaktes und sehr verwitterungsresistentes Festgestein (Orthogneis, Amphibolit, basischer Lagergang, Garbenschiefer)	2,45%	3,26%	0,7536	2,48%	3,25%	0,7629
5	3	Phyllitischer Glimmerschiefer, kompaktes und verwitterungsresistentes Festgestein	0,61%	2,04%	0,3007	0,55%	2,06%	0,2679
6	4	Mäßig kompaktes und verwitterungsanfälliges Festgestein ( Schwemmfächer, Schwarzschiefer, Passailer Phyllit, Heilbrunner Phyllit)	18,20%	22,96%	0,7928	21,76%	22,96%	0,9477
7	5	Karbonatgestein (Kalk oder Dolomit, Plattenkalk, Osser-Kalkstein)	1,12%	6,85%	0,1643	0,55%	6,94%	0,0794
8	6	Marmor, dunkler phyllit. Glimmerschiefer - heterogene Gesteinsparagenese, silikatdominiert, labile Komponente: kompaktes und verwitterungsresistentes Festgestein)	68,30%	54,47%	1,2539	65,29%	54,30%	1,2024
9	7	Schiefer, Sandstein, Grauwacke - heterogene Gesteinsparagenese, silikatdominiert, labile Komponente: mäßig kompaktes und verwitterungsanfälliges Festgestein	0,00%	0,80%	0,0002	0,00%	0,82%	0,0016
10	8	Grünschiefer (Tuff, Lava, Lagergang) - heterogene Gesteinsparagenese, silikatdominiert, labile Komponente: Tuffgesteine (verwitterungsanfällig, veränderlich fest)	3,37%	4,66%	0,7243	1,65%	4,69%	0,3523
11	9	Tertiär (mir noch unklar)	0,00%	2,27%	0,0002	0,00%	2,33%	0,0016
12	10	Hangschutt, Schuttkegel und -Fächer, Blockgletscher, Wildbachschutt, Solifluktionsschutt	0,00%	0,10%	0,0002	0,00%	0,09%	0,0016

### C.1.2 digitale Katastralmappe

Tabelle C.3 beinhaltet die Erklärung der Kennzahlen, die empirische Häufigkeitsverteilung der gravitativen Massenbewegungen und die Prozentanteile der einzelnen Landnutzungseinheiten an der Gesamtfläche. Für die 10m Rasterweite sind hier die Werte aus der Analyse mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen angeführt. Die Ergebnisse zur 50m Rasterweite stammen aus der Berechnung mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen.

Tab. C.3: Kennzahlen für die Landnutzungseinheiten der digitalen Katastralmappe und Auflistung der Prozentanteile an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und an der Gesamtfläche und des Likelihood Quotienten für 10m (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).

Landnutzung - digitale Katastralmappe			10 Rasterweite			50m Rasterweite		
SPM	id	Bezeichnung	%MB	% Gesamtfl.	LQ	%MB	% Gesamtfl.	LQ
43	41	Gebäude	0,10%	0,27%	0,3788	0,28%	0,25%	1,1107
49	47	Weide	16,97%	8,49%	2,0001	20,94%	8,24%	2,5420
50	48	landwirtschaftlich genutzte Grundfläche	0,61%	0,36%	1,6983	0,28%	0,36%	0,7579
51	49	Acker	0,00%	0,31%	0,0002	0,00%	0,35%	0,0016
52	50	Wiese	26,48%	21,09%	1,2557	27,82%	21,04%	1,3224
53	51	Hutweide	3,17%	2,87%	1,1051	4,13%	2,82%	1,4663
54	52	Baufläche begrünt	1,02%	0,39%	2,6257	0,83%	0,38%	2,1473
56	54	Alm	0,10%	2,69%	0,0381	0,55%	2,75%	0,2001
58	56	Wald	39,16%	59,75%	0,6554	34,71%	60,09%	0,5777
61	59	Gewässer fließend	0,82%	0,50%	1,6407	2,20%	0,44%	4,9553
62	60	Gewässer stehend	0,00%	0,01%	0,0002	--	--	--
64	62	Ödland	0,10%	0,06%	1,6513	0,00%	0,06%	0,0016
85	83	Baufläche befestigt	0,31%	0,23%	1,3319	0,28%	0,25%	1,1107
88	86	Friedhof	0,00%	0,01%	0,0002	0,28%	0,00%	64,4187
91	89	Streuobstwiese	0,10%	0,12%	0,8234	0,55%	0,14%	4,0262
96	94	technische Ver- und Entsorgungsanlage	0,00%	0,01%	0,0002	0,00%	0,02%	0,0016
97	95	Straßenanlage	11,04%	2,82%	3,9211	6,89%	2,79%	2,4663
98	96	Erholungsfläche	0,00%	0,02%	0,0002	0,28%	0,02%	16,1047
100	98	Werksgelände	0,00%	0,00%	0,0002	--	--	--

### C.1.3 Boden

Auch für die unterschiedlichen Bodenklassen, des aus landwirtschaftlicher Bodenkartierung und forstlicher Standortkartierung kompilierten Datensatzes, werden in Tabelle C.4 die Kennzahlen und die zugehörigen Bezeichnungen aufgelistet. Des weiteren sind für die 10m und 50m Rasterweite die Prozentanteile an allen gravitativen Massenbewegungen und an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes angeführt. Wichtig ist zu beachten, dass für diese Werte bei der 10m Auflösung mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und bei der 50m Auflösung mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechnet wurden.

Tab. C.4: Kennzahlen der Bodenklassen und Übersicht Anteil an allen gravitativen Massenbewegungen (MB) und Anteil an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes, außerdem Likelihood Quotient der einzelnen kategorischen Einheiten des Bodendatensatzes. Für 10m Rasterweite (berechnet mit Anrissflächen der MB) und 50m Rasterweite (berechnet mit Anrisspunkten der MB).

Bodenklasse			10m Rasterweite			50m Rasterweite			
SPM	id	Bodentyp	Lage,Vorkommen	% MB	% Gesamtfl.	LQ	% MB	% Gesamtfl.	LQ
9	7	Gley	Talböden, Schwemmfächer	0,00%	0,32%	0,0002	0,00%	0,31%	0,0016
10	8	typischer Gley	Mulden und Rinnen auf Talböden und Schwemmfächern	0,00%	0,03%	0,0002	0,00%	0,03%	0,0016
12	10	Pararendzina	Hänge, Rippen, Geländekanten	0,00%	0,09%	0,0002	0,00%	0,09%	0,0016
14	12	Ranker	Talböden, Schwemmkegel- und fächer	0,00%	0,03%	0,0002	0,00%	0,03%	0,0016
16	14	Felsbraunerde	Hänge	0,00%	0,10%	0,0002	0,00%	0,11%	0,0016
17	15	Felsbraunerde	Steilhänge über 25° Neigung	0,00%	0,15%	0,0002	0,00%	0,16%	0,0016
18	16	Bodenformkomplex	Hänge	0,00%	0,05%	0,0002	0,00%	0,05%	0,0016
19	17	Felsbraunerde	Hänge, Kuppen, Rücken, Geländekanten	0,00%	1,06%	0,0002	0,00%	1,09%	0,0016
21	19	Felsbraunerde	Rücken, Kuppen, Oberhänge, Rippen, Geländekanten	4,60%	4,21%	1,0931	5,51%	4,21%	1,3080
22	20	Felsbraunerde	Rücken, Kuppen, Hänge, Geländekanten, exponierte Kanten	0,00%	0,18%	0,0002	0,00%	0,18%	0,0016
23	21	Felsbraunerde	Hänge	0,41%	1,19%	0,3451	0,55%	1,21%	0,4553
24	22	Felsbraunerde	Hänge	6,24%	7,97%	0,7825	9,09%	8,04%	1,1314
25	23	Felsbraunerde	Hänge, Verebnungen, Rücken	0,00%	0,02%	0,0002	0,00%	0,02%	0,0016
26	24	Felsbraunerde	Hänge, Böschungen, über 25° Neigung	19,63%	9,29%	2,1128	22,31%	9,07%	2,4613
27	25	Felsbraunerde	Hänge (vorwiegend Oberhänge), Hangverflachungen	0,00%	0,08%	0,0002	0,00%	0,08%	0,0016
28	26	Felsbraunerde	Unterhänge, Hangfüße, Hangmulden, Verebnungen	0,00%	0,50%	0,0002	0,00%	0,48%	0,0016
29	27	Felsbraunerde	Hänge	2,35%	2,00%	1,1764	2,75%	2,01%	1,3735
30	28	Bodenformkomplex	Rücken, Kuppen, Hänge mit unruhigem Kleinrelief	1,43%	1,48%	0,9695	1,38%	1,45%	0,9473
31	29	Bodenformkomplex	Grabensohlen	11,35%	3,17%	3,5812	12,40%	3,04%	4,0771
32	30	Felsbraunerde	Hangmulden, Hangfüße, randlich vor Quelfluren	0,72%	0,14%	5,2763	0,55%	0,13%	4,1560
33	31	Bodenformkomplex	Hangmulden, von kleinen Rinnen und Gräben durchzogen	1,23%	0,66%	1,8523	0,83%	0,64%	1,2884
34	32	Felsbraunerde	weit gespannte Rücken, Oberhänge, Hangverebnungen	0,00%	0,04%	0,0002	0,00%	0,04%	0,0016
35	33	Lockersediment-Braunerde	Hänge, Hangverflachungen, weite Rücken	0,00%	0,35%	0,0002	0,00%	0,36%	0,0016
36	34	Lockersediment-Braunerde	Talböden, Schwemmfächer	0,00%	0,08%	0,0002	0,00%	0,06%	0,0016
37	35	Lockersediment-Braunerde	Hänge, Unterhänge, Mulden, Hangfüße	0,00%	0,09%	0,0002	0,00%	0,08%	0,0016
38	36	Lockersediment-Braunerde	Talböden, Schwemmfächer, Schleppen	0,00%	0,01%	0,0002	0,00%	0,01%	0,0016
39	37	Bodenformkomplex	von Rinnen und Wannen durchzogene Talböden und Sch...	1,02%	0,12%	8,3589	0,83%	0,10%	8,0523
40	38	Lockersediment-Braunerde	Unterhänge, Hangfüße, Hangmulden	0,00%	0,08%	0,0002	0,00%	0,09%	0,0016
41	39	Lockersediment-Braunerde	Talböden (eher konkave Positionen), Schwemmfächer	0,00%	0,13%	0,0002	0,00%	0,13%	0,0016
42	40	Bodenformkomplex	Quelfluren am Hang	0,00%	0,14%	0,0002	0,00%	0,15%	0,0016
43	41	Lockersediment-Braunerde	auf anstehendem, basischem Gestein am Raasberg und ....	0,00%	0,01%	0,0002	0,00%	0,02%	0,0016
46	44	Typischer Pseudogley	Verebnungen auf Rücken und Sättel, Kuppen	0,00%	0,03%	0,0002	0,00%	0,03%	0,0016
52	50	Farb-Ortsboden	Hänge	0,00%	0,02%	0,0002	0,00%	0,02%	0,0016
53	51	Farb-Ortsboden	Hänge	0,00%	0,38%	0,0002	0,00%	0,38%	0,0016
54	52	Farb-Ortsboden	Hänge	0,00%	0,03%	0,0002	0,00%	0,03%	0,0016

55	53	Farb-Ortsboden	Verebnungen, Hänge	0,00%	0,01%	0,0002	0,00%	0,01%	0,0016
56	54	Kulturohoboden	Rücken, Kuppen, Geländekanten	0,00%	0,09%	0,0002	0,00%	0,09%	0,0016
123	121	Ranker, Braunerde	Rücken, Oberhänge	0,31%	0,14%	2,1747	0,28%	0,14%	1,9521
124	122	podsolige Braunerde, Braunerdehangkolluvium	Rücken, Oberhänge, Sonnenhänge	2,76%	5,86%	0,4708	1,65%	5,94%	0,2783
125	123	Wechsel: Fels/tiefgründig	exponierte Rücken, Hangrippen	0,00%	0,08%	0,0002	0,00%	0,08%	0,0016
126	124	magere, z.T. podsolige Braunerden, Kolluvien	Schattihänge, sonnseitige Mittelhänge	2,15%	8,21%	0,2615	2,75%	8,28%	0,3326
127	125	kolluviale Braunerde		24,13%	20,98%	1,1502	18,73%	20,95%	0,8940
128	126	Semipodsol, podsolige Braunerde	mittlere Hanglagen	0,00%	0,11%	0,0002	0,00%	0,11%	0,0016
130	128	Kalkbraunerde, Pararendsina	Rücken, Steilhänge	0,00%	0,03%	0,0002	0,00%	0,03%	0,0016
131	129	Kalbeeinflusste Braunerdekolluvien	Sättel, Hangverebnungen	0,20%	1,63%	0,1251	0,28%	1,65%	0,1673
132	130	eutrophe Braunerde	Steilhänge, Mittelhänge, schattige Lagen	0,00%	0,83%	0,0002	0,00%	0,83%	0,0016
133	131	Braunerdekolluvium, Braunerde	schattseitige Unterhänge	4,09%	3,34%	1,2262	4,41%	3,31%	1,3317
134	132	Braunerdekolluvium, Braunerde		0,00%	1,93%	0,0002	0,00%	1,98%	0,0016
135	133	Braunerde	Unterhang	0,00%	0,11%	0,0002	0,00%	0,12%	0,0016
136	134		Graben, Schlucht	10,74%	2,97%	3,6202	9,37%	2,89%	3,2400
137	135	mehr od. weniger kalkhält. Braunerde, kolluvial	mäßig geneigte Hänge, Hochfläche	1,02%	3,28%	0,3114	0,55%	3,36%	0,1639
202	200	Lücke		5,62%	16,19%	0,3473	5,79%	16,31%	0,3548

## C.2 Parameter – Gefahrenhinweiskarten

Die wichtigsten Parameter, die in der endgültigen Gefahrenhinweiskarte verwendet wurden, sind unten einzeln hinsichtlich der relativen Gefährdung der einzelnen Kategorien/Wertebereiche bezüglich der Anrissflächen (10m Auflösung) und Anrisspunkte (50m Rasterweite) dargestellt. Die Gefahrenhinweiskarten für die einzelnen Parameter mit der räumlichen Auflösung von 10m, sind in Abbildung C.4 dargestellt. Die Gefahrenhinweiskarten für die 50m Rasterweite sind in Abbildung C.5 abgebildet. Das Aussehen dieser Gefahrenhinweiskarten ist sehr hilfreich, wenn es um die Interpretation von bestimmten Strukturen in der endgültigen Karte geht, denn hier ist der mögliche Einfluss der einzelnen Parameter auf das Kartenbild sehr gut ersichtlich. Zusätzlich sind bei beiden Abbildungen jeweils die höchsten Likelihood Quotienten für jeden Datensatz angegeben.

Die Gefahrenhinweiskarte aus dem Datensatz der Fließakkumulation (spezifisches Wassereinzugsgebiet je Pixel) fehlt an dieser Stelle, weil dieser Datensatz aufgrund wenig aussagekräftiger Ergebnisse nicht weiter in den Analysen verwendet wurde. Dabei muss angemerkt werden, dass zur Berechnung der Fließakkumulation ein sehr einfacher Algorithmus verwendet wurde.

# Gefahrenhinweiskarte für einzelne Parameter 10 m x 10 m Rasterweite

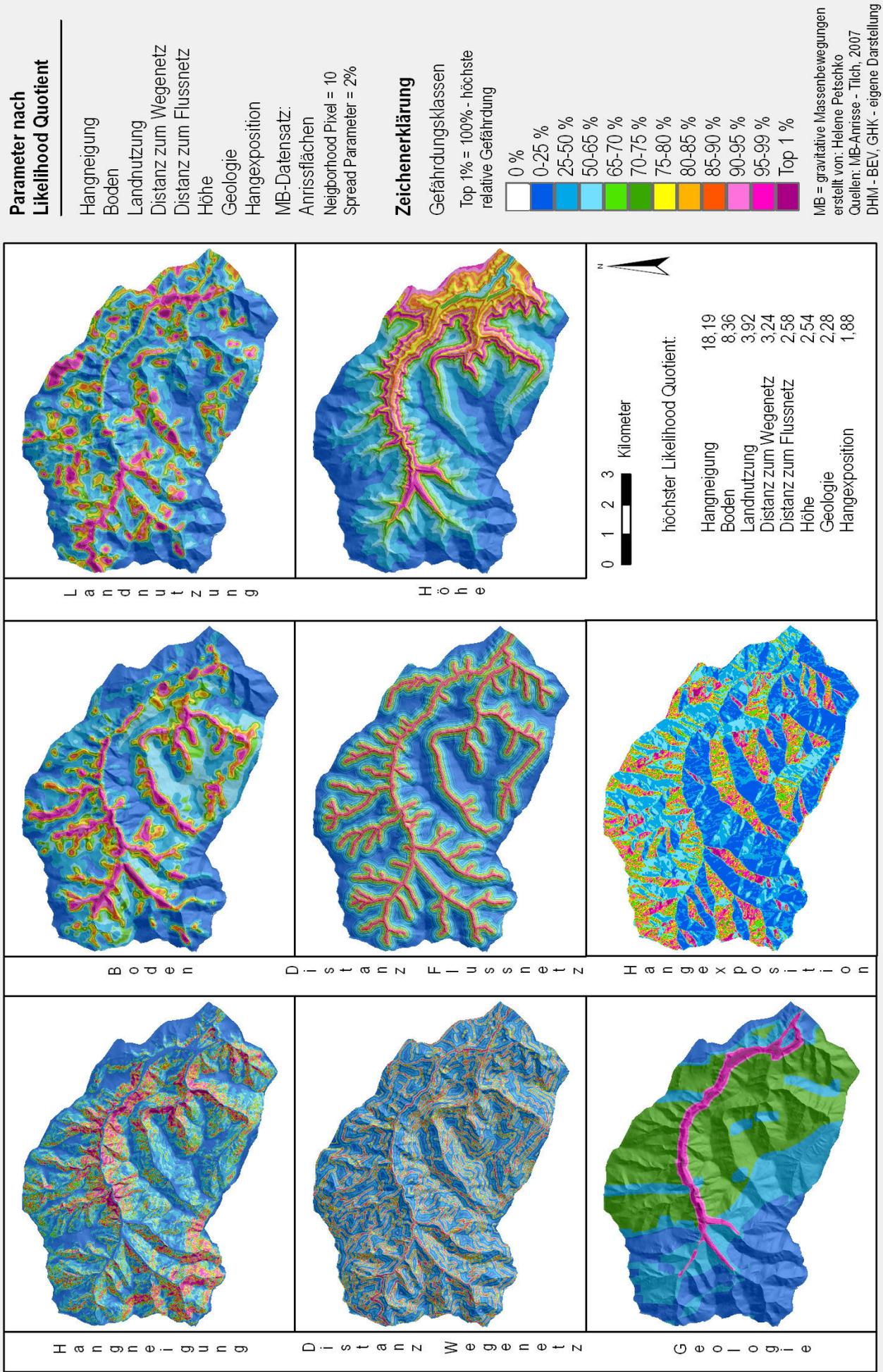


Abb. C.7: Gefahrenhinweiskarten für die Parameter Geologie, Boden, Landnutzung, Distanz zum Wegenetz, Distanz zum Flussnetz, Höhe, Geologie und Hangexposition nach dem jeweiligen Likelihood Quotient gereiht, mit 10m Rasterweite. Die relative Gefährdung wurde mit Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen berechnet.

# Gefahrenhinweiskarte für einzelne Parameter 50 m x 50 m Rasterweite

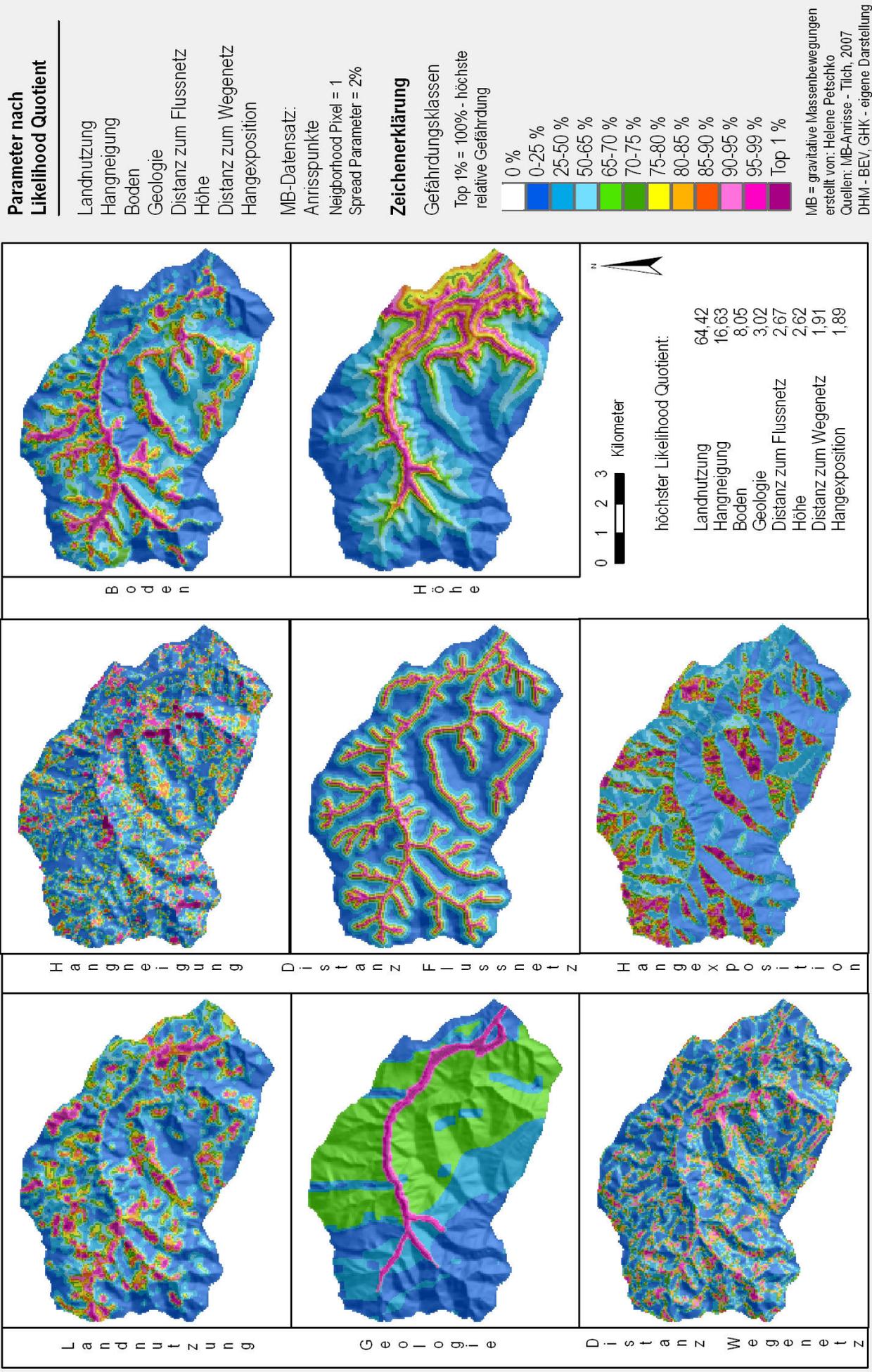


Abb. C.8: Gefahrenhinweiskarten für die Parameter Landnutzung, Hangneigung, Boden, Geologie, Distanz zum Flussnetz, Höhe, Distanz zum Wegenetz und Hangexposition nach Likelihood Quotient gereiht, mit 50m Rasterweite. Die relative Gefährdung wurde mit Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen berechnet.

### **C.3 Parameterkombinationen - Gefahrenhinweiskarten**

Hier werden jene Gefahrenhinweiskarten vorgestellt, die zum Vergleich der besten Parameterkombination dienen sollen. Dabei soll vor allem die Aufnahme oder das Weglassen von Parametern und der daraus resultierende Effekt gezeigt werden.

Für die 10m x 10m Rasterweite werden folgende Gefahrenhinweiskarten dargestellt: bgns (Anrisspunkte), bgnw (Anrissflächen), bgns (Anrissflächen)

Folgende Karten werden hier, aus der Berechnung des in Klammer angeführten Datensatzes zu den gravitativen Massenbewegungen für die 50m x 50m Rasterweite dargestellt: bgfsw (Anrissflächen), bdfsw (Anrisspunkte), bgns (Anrisspunkte)

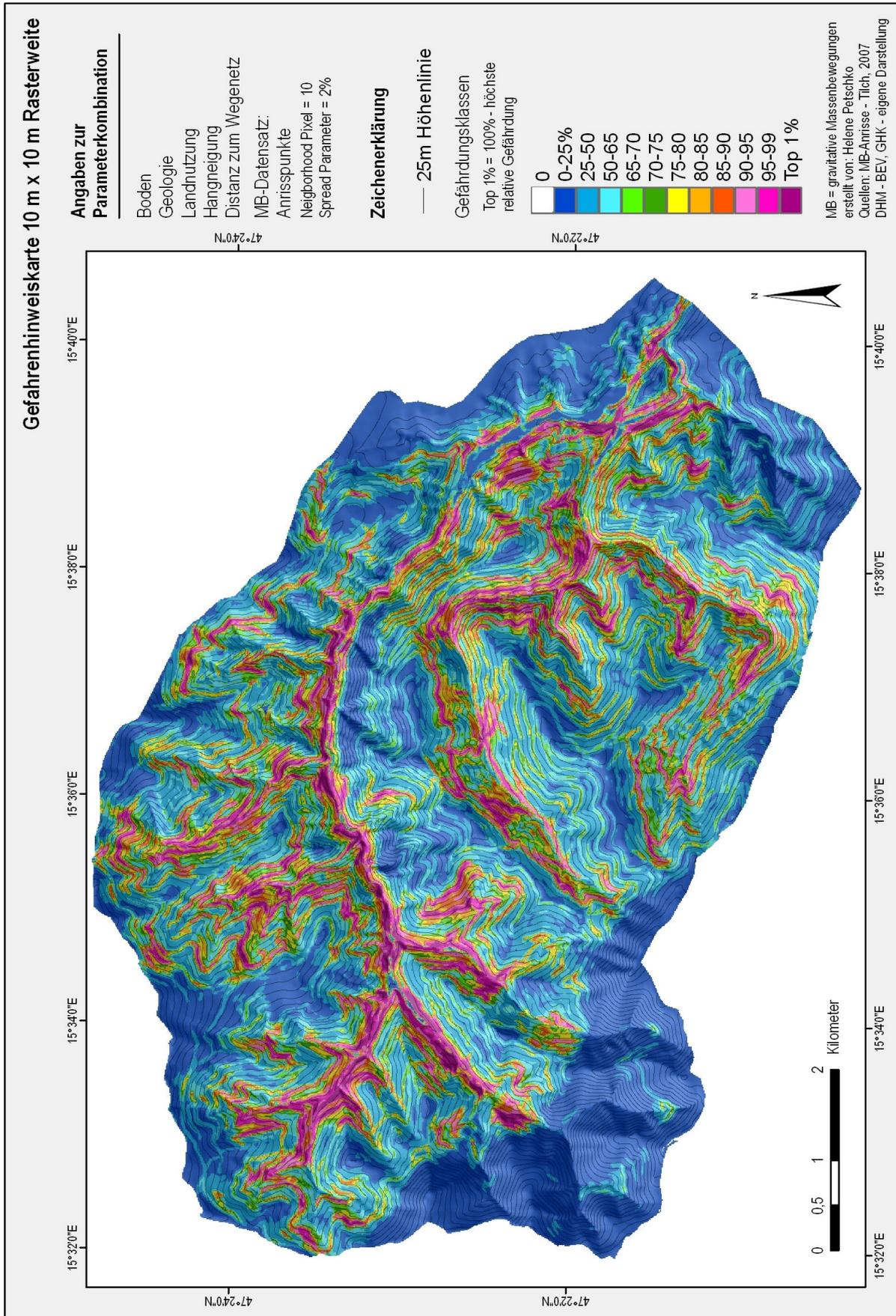


Abb. C.9: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgnsw", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel

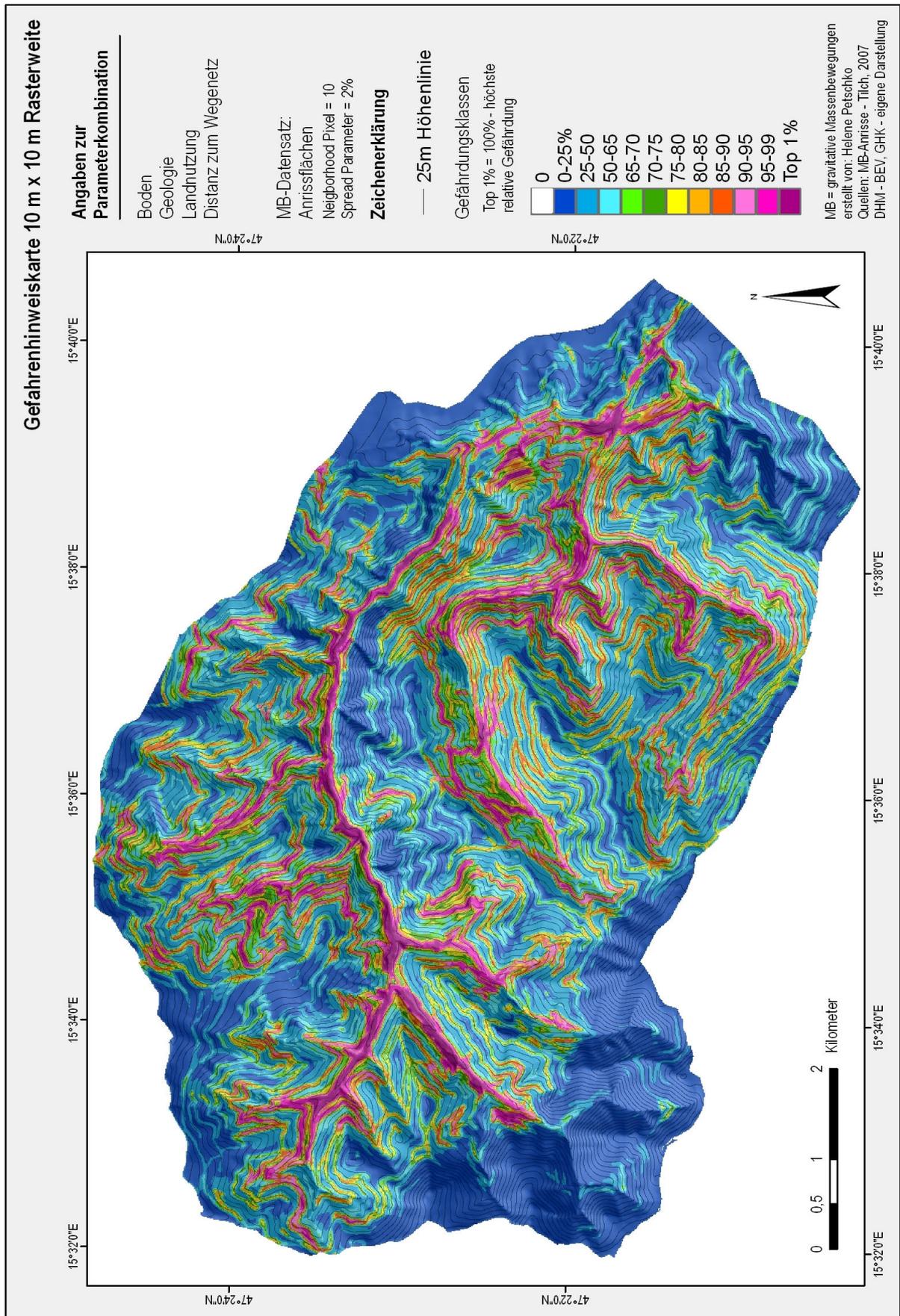


Abb. C.10: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgnw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel

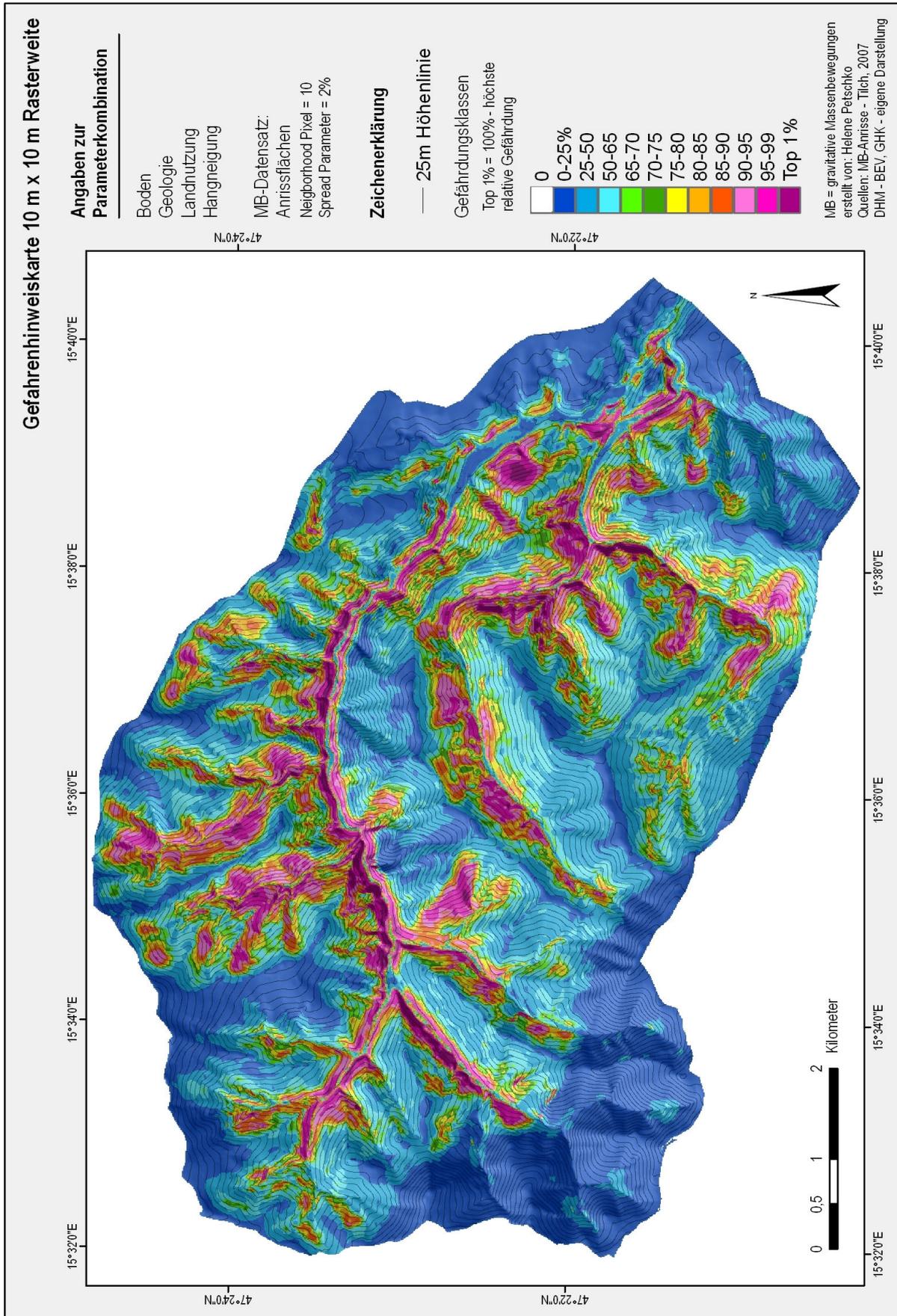


Abb. C.11: Gefahrenhinweiskarte mit 10m Rasterweite für die Parameterkombination "bgns", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und 10 Neighborhood Pixel

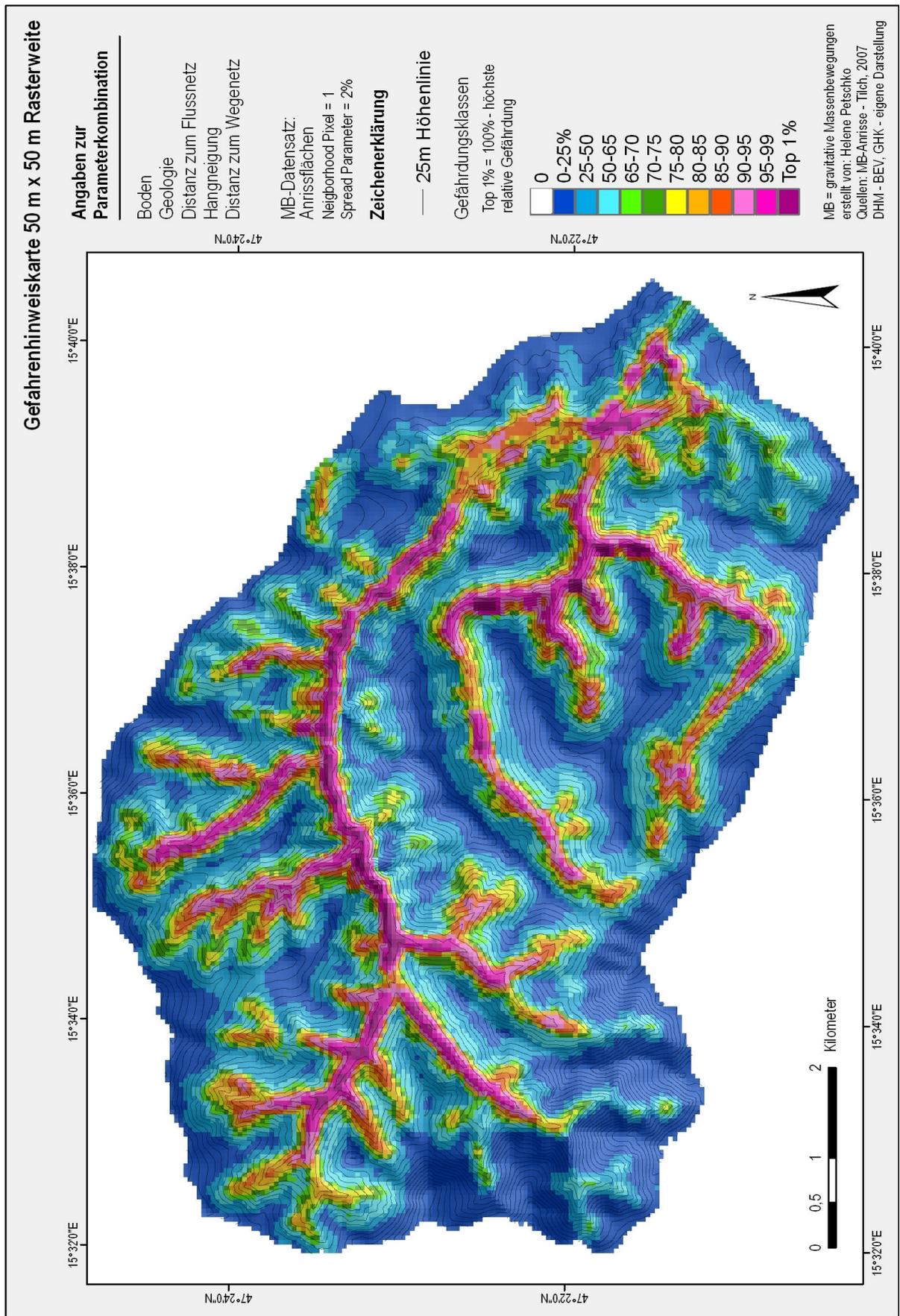


Abb. C.12: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgfsw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel

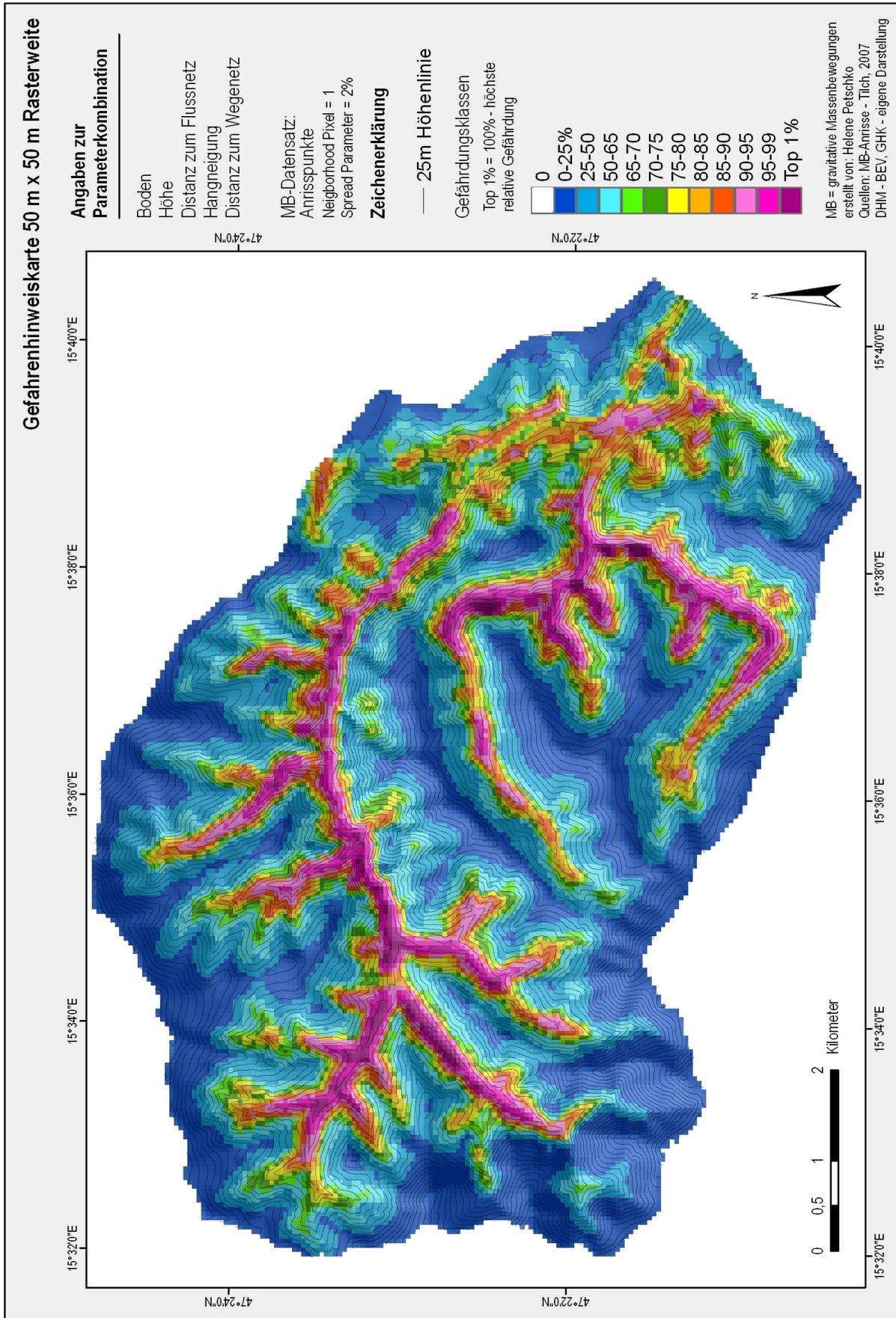


Abb. C.13: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bdfsw", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel

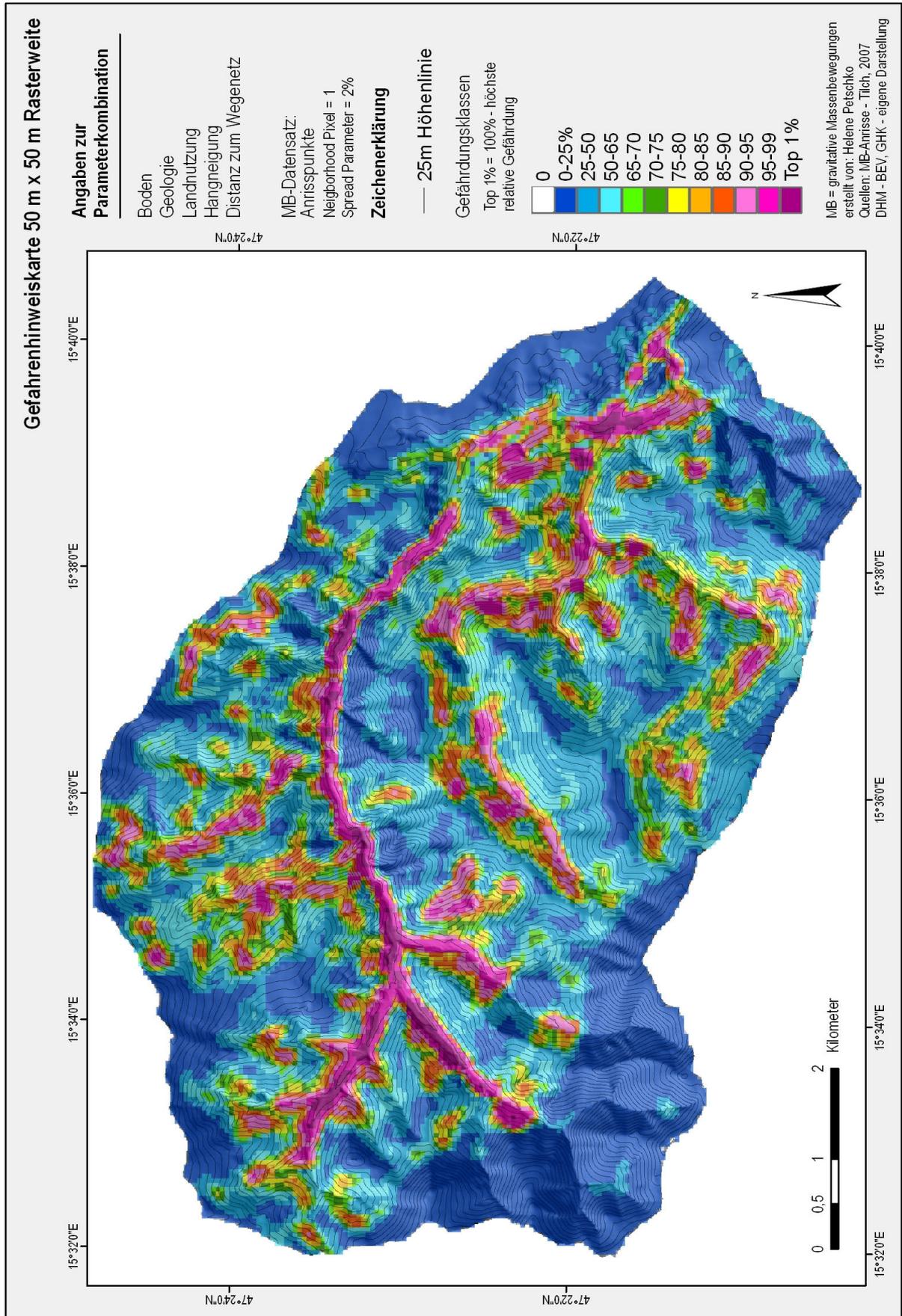


Abb. C.14: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgnsw", berechnet mit den Anrisspunkten der gravitativen Massenbewegungen und einem Neighborhood Pixel

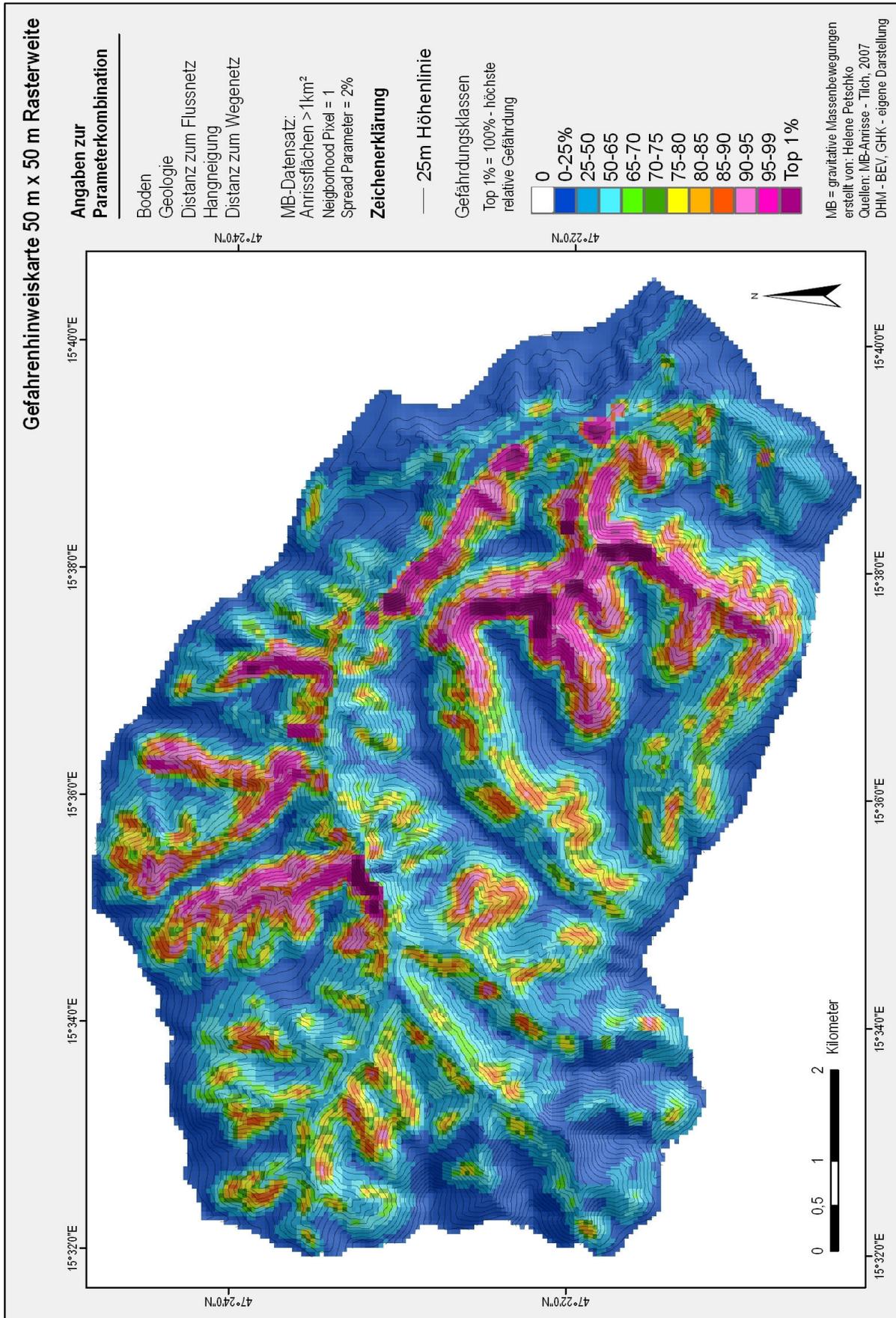


Abb. C.15: Gefahrenhinweiskarte mit 50m Rasterweite für die Parameterkombination "bgfsw", berechnet mit den Anrissflächen der gravitativen Massenbewegungen die größer als 1000m<sup>2</sup> sind.



# CURRICULUM VITAE

## PERSÖNLICHE DATEN

**Name:** Helene Petschko  
**Geburtsdatum:** 16. April 1984  
**Adresse:** Dingelstedtgasse 3/11-13  
1150 Wien

## AUSBILDUNG

**Schulbildung:**  
1998 – 2002: BORG - Bundesoberstufenrealgymnasium St. Pölten.  
Reifeprüfung am 22.6.2002

**Studium:**  
seit Oktober 2002: Studium Theoretische und Angewandte Geographie am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien  
Schwerpunkt: Angewandte Geomorphologie  
Nebenfächer: globale Umweltveränderungen, Geoinformationssysteme und Visualisierung

## BERUFSERFAHRUNG

August 2005: Praktikum NÖ Landesregierung Abteilung Raumordnung – RU2, 3109 St. Pölten

August 2006: Praktikum NÖ Landesregierung Abteilung Wasserbau – WA3, 3109 St. Pölten

Februar 2006 – Juli 2008: Tutorin am Institut für Geographie und Regionalforschung (Universität Wien), Lehrveranstaltungen:  
Einführung in die Geoinformation  
Methoden der GIS-gestützten Datenerfassung  
Physiogeographisches Geländepraktikum (Öztaler Alpen, Obbergurgl)

2006-2008: Mitarbeit „Umweltstadtführer Wien“ (Embleton-Hamann, C., Hrsg., in prep.)

April 2007, 2008: Studentische Hilfskraft bei der EGU (European Geosciences Union) General Assembly

seit August 2008: Mitarbeiterin bei Freytag und Berndt, Abteilung Kartographie (Stadtpläne und Atlanten)

## SONSTIGE KENNTNISSE

**Sprachen:** in Wort und Schrift: Deutsch und Englisch

**EDV-Kenntnisse:** Microsoft Office, Open Office  
ArcView, ArcInfo, ILWIS Open 3.4  
Erdas Imagine, Spatial Prediction Modeling System  
Adobe Photoshop, Adobe Dreamweaver