

Master Thesis

im Rahmen des Universitätslehrganges
Geographical Information Science & Systems (UNIGIS MSc)
am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

GIS-Gestützte, Probabilistische Beurteilung der Gefährdung durch Massenbewegungen

**Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur Multikriterien
Beurteilung der Rutschanfälligkeit dargestellt am Beispiel der
Schwäbischen Alb**

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Bettina Neuhäuser
U1029, UNIGIS MSc Jahrgang 2003

Zur Erlangung des akademischen Grades
"Master of Science (Geographical Information Science & Systems)"
MSc (GIS)

Gutachter:
Ao. Univ-Prof. Dr. Josef Strobl

Wien, April 2005

Erklärung

Ich, Bettina Neuhäuser, geboren am 24.01.1977 in Wien, erkläre, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Dipl.-Ing. Bettina Neuhäuser

Zusammenfassung

Die Gefährdung durch Hangrutschungen ist weltweit zunehmend, in Mitteleuropa vor allem durch die Ausdehnung von Siedlungs-, Verkehrs- und Wirtschaftsinfrastrukturen in Hanglagen. Ziel dieser Arbeit ist die regionale Gefährdungsbeurteilung durch Massenbewegungen in einem Gebiet an der Schwäbischen Alb - ein Mittelgebirge in Süd-Deutschland. Dazu wurde die Methode der Evidenzgewichtung (*Weights-of-Evidence*) nach BONHAM-CARTER (1984, 2002) eingesetzt, wobei es sich um eine GIS-basierte, statistische/probabilistische Methode handelt, welche für die Erkundung von mineralischen Lagerstätten entwickelt wurde. Die Evidenzgewichtung basiert auf der BAYES-Wahrscheinlichkeitstheorie und liefert, aus der Verschneidung mehrerer, gewichteter Faktoren, einen Index für die Eintrittswahrscheinlichkeit des untersuchten Phänomens – im Fall der vorliegenden Arbeit für Massenbewegungen. Voraussetzung war die Kenntnis von bereits aufgetretenen Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet und eine GIS-Datenbasis mit jenen Geofaktoren, welche Hangrutschungen verursachen oder begünstigen. Die Hangrutschungen gingen als Trainingsdaten in die GIS-basierte Analyse ein. Der statistisch gemessene, räumliche Zusammenhang zwischen den Faktoren und den bekannten Hangrutschungen diente als Grundlage zur Gewichtung der Faktoren.

Für diese Arbeit standen nur sehr generelle und grob aufgelöste Daten zur Verfügung. Wichtige Ursachefaktoren konnten, aufgrund fehlender Daten, nicht in die Analyse miteinbezogen werden. Trotzdem konnte mit der Evidenzgewichtung festgestellt werden, welche der vorhandenen Faktoren die größte relative Bedeutung als Hangrutschungsindikatoren haben. Das erstellte Modell trifft somit für seinen räumlichen Geltungsbereich Aussagen über kausale Zusammenhänge in dem natürlichen System von Hangstabilität und -instabilität. Geologie und Bodenform erwiesen sich als sehr gute Indikatoren und gelten als Primärursache für Massenbewegungen. Die Hanggeometrie zeigte sich, entgegen anderer Untersuchungen, als vergleichsweise schwacher Indikator. Dies ist auf das gering aufgelöste SRTM-Höhenmodell zurück zu führen, welches sich nicht für eine Analyse des Kleinreliefs auf regionalem Niveau (1:100.000) eignet.

Bei der Verschneidung der Daten im GIS konnte mit der Evidenzgewichtung ein Index für die Wahrscheinlichkeit, dass in Zukunft Hangrutschungen auftreten, berechnet werden. Die getroffene Einschätzung zeigte sich, im Vergleich mit anderen Gefährdungsbeurteilungen, als zutreffend. Allerdings wurden die Wahrscheinlichkeitswerte tendenziell überschätzt. Als relative Grade der Rutschanfälligkeit betrachtet, haben die Wahrscheinlichkeiten aber Gültigkeit und Aussagekraft. Auch die, mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeit verbundenen, Unsicherheiten konnten quantifiziert werden.

Die Überprüfung des Modells mit Hilfe von unabhängigen Hangrutschungen ergab, dass eine gute Vorhersagekraft des Modells erzielt worden ist: 90% der Hangrutschungen, die nicht in die Modellierung einbezogen wurden, konnten schon mit 10% der Gefährdungskarte (mit höchster Eintrittswahrscheinlichkeit) vorhergesagt werden. Als limitierend bei dieser Methode erwies sich die Modellannahme über die Unabhängigkeit der Faktoren untereinander und die Mindestanzahl an Trainingsdaten, welche notwendig war, um eine stabile Gewichtung der Ursachefaktoren zu erlangen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Bestimmung der Rutschanfälligkeit bzw. des Gefährdungsgrades mit der Evidenzgewichtung möglich ist, dessen Aussagekraft aber von Qualität und Genauigkeit der erfassten Geofaktoren abhängt.

Vorwort

Die Idee zu dieser Master Thesis ergab sich durch meine berufliche Tätigkeit bei VCE Holding GmbH, im Rahmen des EU-Forschungsprojektes OASYS – Integrated Optimization of Landslide Alert Systems (EVG1-2001-00061).

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Helmut Wenzel, Geschäftsführer bei VCE Holding GmbH, bedanken, der mir das Master-Studium ermöglicht hat, sowie immer offen und engagiert für die Thematik der Geoinformatik war und ist.

Großer Dank gilt Frau Dr. habil. Barbara Theilen-Willige, Privat-Dozentin an der Technischen Universität Berlin am Institut für Angewandte Geowissenschaften. Sie stand mir in fachlicher und auch persönlicher Hinsicht mit Rat und Tat zur Seite. Weiters hat Sie durch die Bereitstellung der Auswertergebnisse, die sie aus der Satellitenbildinterpretation gewonnen hat, zur Datenbasis dieser Arbeit beigetragen. Bedanken möchte ich mich auch für die Durchsicht der Arbeit.

Meinen Dank möchte ich auch Herrn Dr. Alessandro Ghinoi vom Department für Erdwissenschaften der Reggio Emilia Universität in Modena (University of Modena and Reggio Emilia) für die zahlreichen Literatur- und Quellenhinweise aussprechen. Er ermöglichte mir dadurch eine rasche Einarbeitung in die Thematik.

Weiters möchte ich mich bei Frau Dr. habil Birgit Terhorst, Privat-Dozentin am Geographischen Institut der Universität Tübingen, für die wertvollen Literaturhinweise und Kommentare zum Untersuchungsgebiet bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie dafür bedanken, dass sie mich in anstrengenden Phasen des Studiums ermutigt und bestärkt hat. Besonderer Dank gilt hier meinem Mann, der die größte Stütze in dieser Zeit war und mir immer hilfreich zur Seite stand. Weiters bedanke ich mich bei meiner Schwägerin für die mühevollen, redaktionellen Durchsicht der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hangrutschungen und Geoinformation.....	1
1.2	Begriffsdefinition und Terminologie	3
1.2.1	Hangrutschungen und Massenbewegungen	3
1.2.2	Gefahr, Gefährdung, Anfälligkeit und Risiko	3
1.2.3	Ursachen und Auslöser	4
2	Problemstellung und Zielsetzung	5
2.1	Ausgangslage.....	5
2.2	Zielsetzung	6
2.3	Methodik.....	7
3	GIS-Gestützte Methoden zur Gefährdungsbeurteilung.....	9
3.1	Lokale Methoden.....	11
3.1.1	Geotechnisch-Deterministische Methoden	11
3.2	Regionale Methoden	12
3.2.1	Geomorphologische Methoden	13
3.2.2	Heuristische Methoden.....	14
3.2.3	Statistische Methoden	16
3.2.4	Favorisierungsmodellierung (favourability modelling).....	20
4	Grundlagen zu Massenbewegungen und Steuerungsfaktoren	27
4.1	Typen von Massenbewegungen.....	27
4.1.1	Stürze (falls)	27
4.1.2	Kippungen (topples)	28
4.1.3	Rutschungen/Gleiten (slides)	28
4.1.4	Driften (lateral spreading).....	31
4.1.5	Fließbewegungen (flows)	32
4.1.6	Kriechbewegungen (creep)	33
4.2	Steuerungsfaktoren und Auslöser	34
4.2.1	Ursachen (Steuerungsfaktoren, interne Faktoren)	34
4.2.2	Auslöser (Trigger, externe Faktoren).....	35
5	Untersuchungsgebiet.....	37
5.1	Lage und Naturräumliche Einordnung.....	37
5.2	Geologie und Geomorphologie.....	39

5.3	Klima und Vegetation	40
5.4	Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet.....	41
5.4.1	Typisierung und Morphodynamik	41
5.4.2	Steuerungsfaktoren	45
6	Modellentwurf	47
6.1	Schematische Darstellung des Modells.....	47
6.2	Methodenwahl Evidenzgewichtung (Weights-of-Evidence).....	49
6.3	Theoretische Basis des Modells.....	50
6.3.1	Die Berechnung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit.....	50
6.3.2	Die Berechnung der Evidenzgewichte.....	51
6.3.3	Die Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit.....	55
6.4	Modellannahmen und Einschränkungen	56
6.4.1	Modellannahmen.....	56
6.4.2	Einschränkungen.....	57
6.5	Analyse der Steuerungsfaktoren	57
6.5.1	Geologie und Hydrogeologie.....	57
6.5.2	Tektonik.....	59
6.5.3	Bodengesellschaften	62
6.5.4	Relief.....	62
6.5.5	Geomorphologie.....	68
7	Durchführung des Modells.....	69
7.1	Analyseparameter	69
7.2	Selektion der Unabhängigen Kriterien	70
7.3	Kriteriengewichtung.....	73
7.3.1	Schätzung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit	73
7.3.2	Gewichtung der Evidenzklassen	74
7.3.3	Reklassifizierung	86
7.4	Multikriterien Beurteilung.....	89
7.4.1	Evidenzgewichtung	89
7.4.2	Eintrittswahrscheinlichkeit	91
7.5	Gefährdungskarte.....	93

8	Bewertung und Validierung	97
8.1	Effektivität des Modells (Erfolgsrate).....	97
8.2	Validierung des Modells (Vorhersagerate).....	98
9	Diskussion	101
9.1	Diskussion der Ergebnisse.....	101
9.2	Diskussion der Methodik.....	102
9.3	Schlussfolgerungen.....	103
	Literatur	105
	Quellen	110
	Abbildungsverzeichnis	111
	Tabellenverzeichnis	113

1 EINLEITUNG

1.1 Hangrutschungen und Geoinformation

Hangrutschungen zählen neben Erdbeben, Vulkanausbrüchen und Hochwasserkatastrophen zu den Naturgefahren, die durch geomorphologische Prozesse hervorgerufen werden. Sowohl Schäden an Siedlungen und Infrastruktur als auch Todesopfer, welche durch Hangrutschungen gefordert werden, sind weltweit zunehmend, sowohl in Entwicklungsländern als auch in entwickelten Ländern. Die CEOS Disaster Management Support Group gibt an, dass jährlich rund 1.000 Menschen durch Massenbewegungen ihr Leben verlieren und Sachschäden in Höhe von etwa 4 Milliarden USD verursachen (SINGHROY ET AL. 2004). Eine der Gründe für diese Zunahme ist die Veränderung des Klimas, welche eine lokal gestiegene Intensität von Regenfällen zur Folge hat und so die Häufigkeit von oberflächlichen und sich schnell bewegenden Hangrutschungen erhöht. Das Bevölkerungswachstum in bestimmten Regionen und die Verdichtung beziehungsweise Expansion von urbanen Ballungszentren und menschlicher Aktivität in gefährdete Gebiete vergrößern die Auswirkungen von Hangrutschungen (TERLIEN 1996).



Abbildung 1: Naturgefahr Hangrutschungen in Europa: In den Dolomiten bei Corvara in Badia, Italien (links) und an der Schwäbischen Alb bei Mössingen, Deutschland (rechts).

Auch in Mitteleuropa, welches durch Naturgefahren eher moderat betroffen ist, haben Hangrutschungen bedeutende, ökonomische und ökologische Folgen. Der hohe Lebensstandard, die Akkumulation von Eigentum sowie die hohe Bevölkerungsdichte machen die Gesellschaft höchst verletzlich gegenüber Naturgewalten. Extremereignisse sind selten. Die vielen kleinen Ereignisse, welche oft in Zusammenhang mit intensiver Bautätigkeit in Steillagen auftreten, verursachen die großen ökonomischen Schäden. Sie beeinflussen Bauten jeglicher Art in negativer Weise, seien es Eisenbahnlinien, Straßen, Brücken, Tunnel, Stollen oder Schächte und verursachen dadurch enorme Kosten für Sanierung, Sicherung und Instandhaltung. Diese Verluste sind nicht nur ökonomischer Art, sondern betreffen auch empfindliche Ökosysteme und wertvolle Kulturlandschaft. Allerdings ist in vielen Ländern wenig über das tatsächliche Ausmaß der Gefährdung und des Risikos durch Hangrutschungen bekannt (REICHENBACH ET AL. 2002).

Im Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit in Süd-Deutschland an den Steilhängen der Schwäbischen Alb gehören Massenverlagerungen zum typischen Erscheinungsbild. Es

kommt immer wieder zu Schäden oder Zerstörungen von forst- und landwirtschaftlich genutzter Flächen, wobei auch Straßen, Forstwege und Siedlungen in Mitleidenschaft gezogen werden (THEIN 2000). Durch die Expansion von Siedlungs-, Verkehrs-, und Wirtschaftsinfrastrukturen in Hanglagen wird deren Gefährdung durch Massenbewegungen größer. Hier gilt es in einer verantwortungsbewussten Landschafts- und Raumplanung detaillierte Angaben über mögliche Gefährdungen zur Verfügung zu stellen (THEILEN-WILLIGE 2002).

Ziel dieser Arbeit ist die regionale Beurteilung der Rutschanfälligkeit eines ausgewählten Gebietes an der Schwäbischen Alb, um die Gefährdung durch Hangrutschungen abzuschätzen. Durch die Anwendung einer probabilistischen Methode sollen Hänge beurteilt werden, welche bisher noch nicht von Hangrutschungen betroffen waren. Es handelt sich also um einen Ansatz der räumlichen Vorhersage, welche sich die Kenntnis der in der Vergangenheit aufgetretenen Hangrutschungen im Gebiet zu Nutze macht. Auf Basis dieser Analyse können Gefahrenhinweiskarten und Karten mit quantitativen Angaben zum Gefährdungsgrad bei bestimmten Parametern erstellt werden. Diese sind ein wertvolles Instrument und Entscheidungsgrundlage für Regionalentwicklung, Kommunalverwaltung sowie private Planungsträger. Gefahrenhinweiskarten gewinnen auch aus rechtlichen und versicherungstechnischen Gründen immer mehr an Bedeutung. In der Praxis jedoch, sind meist nur die Gebiete mit vergangenen Hangrutschungen, ihrer Beschreibung und Charakteristik sowie einige geomorphologische Modelle vorhanden. Nur sehr selten gibt es Darstellungen die Vorhersagen über Hangrutschungen in Raum und Zeit treffen und so eine Einschätzung der Gefährdung ermöglichen. Um VARNES ET AL. (1984) zu zitieren:

„Viele Karten von Hangrutschungen oder ihrer Lagerstätten - alt, neu oder aktiv - wurden weltweit hergestellt, aber es gibt nur eine weit geringere Anzahl von Studien, die weiter gehen und versuchen, den kartierten Gebieten auch Gefährdungsgrade zuzuweisen.“

Auch heute noch ist die Erstellung von vorhersagenden Karten, welche die Gefährdung und das Risiko ausdrücken noch lange keine Praxis geworden, trotz der großräumigen und wiederholten gesellschaftlichen Schäden und ungeachtet der neuen Forschungsbemühungen und Methoden der Geoinformatik, Geowissenschaften und Ingenieurwesen (CHUNG ET AL. 2005).

Aufgrund der Vielfalt an Ursachen- und Steuerungsfaktoren für Hangrutschungen müssen große Datenmengen verarbeitet und analysiert werden, was den Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) unabdingbar macht (GUSENBAUER 1999). Der Einsatz von GIS zur Datenerfassung und Erstellung von Naturgefahren-Inventaren ist aus der Praxis nicht mehr wegzudenken. Neben der reinen Datenerfassungs- und -bearbeitungsfunktion von GIS, stehen durch die räumlichen Analysemethoden und der Möglichkeit statistische und numerische Modelle umzusetzen, eine Fülle von Ansätzen zur Beurteilung von Naturgefahren zur Verfügung. Das Potential von GIS zur Einschätzung von Naturgefahren beginnt bei der Erstellung von Inventaren und geht hin bis zur Prognose und Vorhersage durch Modellbildung und Simulation, wie es in dieser Arbeit gezeigt wird. Weiters reichen die Möglichkeiten von GIS von der Überwachung von identifizierten Gefahrenbereichen bis hin zur Vorbereitung auf den Ernstfall (wie die logistische Planung von Rettungsmaßnahmen). Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf das Gebiet der Prognose und Modellbildung, also der Beurteilung von möglichen Gefahrenbereichen.

1.2 Begriffdefinition und Terminologie

Das Forschungsgebiet der Massenbewegungen ist sehr diversifiziert und uneinheitlich. Die Festsetzung klarer Kriterien sowie eindeutiger Definitionen sind nur in den seltensten Fällen möglich. Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Klassifikationssysteme, Termini und Definitionen. Dies ist auf verschiedene Tatsachen zurückzuführen: Einerseits befassen sich unterschiedliche Disziplinen (Geomorphologie, Geologie, Bodenmechanik, Ingenieurwesen, Raumplanung, etc.) mit dem Phänomen, andererseits wird auch immer wieder versucht regionalen Besonderheiten Rechnung zu tragen, und schließlich gibt es immer noch divergierende Ansichten über Bewegungsablauf und Formenschatz der verschiedenen Massenbewegungen (RODER 2001). Dazu kommt, dass ein Großteil der Arbeiten in englischer Sprache verfasst ist und eine Übersetzung in vielen Fällen nur mit Bedeutungsverlusten möglich ist, woraus sich terminologische Schwierigkeiten ergeben. In dieser Arbeit werden daher oft die englischen Begriffe angegeben. Im Folgenden sollen die wesentlichen Begriffe definiert und somit abgegrenzt werden.

1.2.1 Hangrutschungen und Massenbewegungen

Nach CRUDEN und VARNES (1996) lassen sich Hangrutschungen (landslides) allgemein als Massenbewegungen (mass movement) von Fels, Erdmassen oder Schutt hangabwärts definieren. Die Begriffe Hangrutschung und Massenbewegung werden in den meisten Publikationen synonym verwendet.

Der wesentliche Unterschied von Massenbewegungen zu anderen denudativen Prozessen liegt darin, dass kein Transportmedium vorhanden sein muss. VARNES (1984) definiert eine Massenbewegung als abwärts oder auswärts gerichtete Bewegung einer Böschung welche Material unter Einfluss der Gravitation formt.

1.2.2 Gefahr, Gefährdung, Anfälligkeit und Risiko

Die Begriffe Gefahr, Gefährdung, Anfälligkeit und Risiko werden sehr häufig in der Beurteilung von Naturgefahren verwendet. Oftmals werden diese fälschlich und miteinander austauschbar eingesetzt. Zu Ihrer Abgrenzung wird die allgemein anerkannte Definition nach VARNES (1984) und BRABB (1984) herangezogen.

Die Anfälligkeit handelt laut Definitionen (vgl. Tabelle 1) von einer *räumlichen Vorhersage*, beantwortet also die Frage nach dem „wo“. Die Gefahr dagegen bestimmt auch die *zeitliche und typologische Vorhersage*, und macht daher Aussagen über das „wann“ und „wie“.

Viele der existierenden Gefahrenkarten (*hazard maps*) sind daher genau genommen als Anfälligkeitskarten (*susceptibility maps*) zu definieren, weil diese eine räumliche Vorhersage von Hangrutschungen zum Ziel haben. Meist sagen diese Karten aber nichts über den Zeitpunkt aus, wann diese auftreten könnten (BRABB 1984).

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen

Begriff	Definition
Anfälligkeit Neigung <i>Susceptibility</i> (S)	Die Rutschanfälligkeit (<i>landslide susceptibility</i>) ist die Möglichkeit, dass eine neue Hangrutschung in einem bestimmten Gebiet auftritt und bestimmt diese auf der Basis des Zusammenhangs zwischen den Steuerungsfaktoren für Hanginstabilitäten und der räumlichen Verteilung von in der Vergangenheit aufgetretenen Hangrutschungen (BRABB 1984). Im Deutschen ist auch der Begriff Rutschneigung zutreffend.
Gefahr <i>Hazard</i> (H)	Als Gefahr wird die Wahrscheinlichkeit genannt, mit der ein bestimmter gefährlicher Prozess innerhalb eines bestimmten Zeitraumes und an einem definierten Ort auftritt (VARNES 1984).
Verletzbarkeit <i>Vulnerability</i> (V)	Die Verletzlichkeit bedeutet den Grad des Verlustes eines bestimmten Elementes, wie Bevölkerung oder wirtschaftliche Tätigkeit die sich aus einer Naturgefahr ergibt (VARNES 1984).
Risiko <i>Risk</i> ($R=H*V$)	Das mit der Gefahr verbundene Risiko beschreibt die zu erwartenden sozialen und ökonomischen Schäden und Verluste an Menschenleben, Sachwerten und Dienstleistungen. Dieses Risiko wird einerseits von der Intensität und der Wiederkehrshäufigkeit der Massenbewegung bestimmt, andererseits ist es von der Verletzbarkeit der gefährdeten Objekte abhängig (VARNES 1984)..

In dieser Arbeit wird der Begriff der Rutschanfälligkeit gelegentlich als Gefährdung bezeichnet. Eine Gefährdungskarte (*susceptibility map*) meint allerdings nicht eine Gefahrenkarte (*hazard maps*) im engeren Sinne.

1.2.3 Ursachen und Auslöser

Manche Autoren unterscheiden Ursachen (*preparatory oder causal factors*) und Auslöser (*triggering factors*) von Massenbewegungen. Andere sprechen dagegen von internen und externen Ursachen (*internal/external causes*) (RODER 2001). Da sich diese beiden Klassifikationen aufgrund der gegenseitigen Beeinflussungen nicht exakt voneinander abgrenzen lassen, kommt es bei der Verwendung dieser Begriffe oft zu Verwirrungen. Eine Erläuterung der Termini ist daher unumgänglich.

Nach DIKAU ET AL. (1996) definieren sich die *Ursachen* als kumulative Ereignisse, welche einen Hang auf die Bewegung *vorbereiten*, diese aber nicht notwendigerweise auslösen. Sie werden deshalb auch als *Steuerungsfaktoren* bezeichnet.

Im Gegensatz dazu sind *Auslöser* jene Prozesse, die eine Hanginstabilität "*akut*" werden lassen, diese also tatsächlich *in Gang setzen*.

2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

2.1 Ausgangslage

In den letzten zwanzig Jahren gab es eine Fülle von Forschungsbemühungen zur Beurteilung der Hangrutschungsgefährdung. Der rasante Fortschritt in der Geoinformatik erlaubt immer komplexere Modellierungen. Die Fernerkundung – besonders die wachsende Zahl neuer satellitenbasierter Systeme - aber auch andere Datenquellen, schaffen eine größere Verfügbarkeit von Geodaten, welche für die Gefährdungsbeurteilung herangezogen werden können. Daher hat sich ein großes Methodenrepertoire zur Beurteilung der Hangrutschungsgefährdung entwickelt (vgl. Kapitel 3), welches durch sich ständig weiterentwickelnde Techniken neuen Aufschwung erfährt.

In den letzten Jahren beschäftigten sich einige Untersuchungen auch mit der Beurteilung dieses Methodenspektrums. Studien, die sich mit dem Vergleich früherer Arbeiten auseinandersetzen (CARRARA ET AL. 2001), (CHUNG, FABBRI 2003, 2005), (REMONDO ET AL. 2003), (VAN WESTERN ET AL. 2003) haben folgende Schwächen und Defizite identifiziert:

- Zonierung des Gebietes mit scharfen Grenzen und Boolean'schem Charakter: Sie klassifizieren ein Gebiet zum Beispiel als „gefährdet“ oder „nicht gefährdet“. Selten ist jedoch bei natürlichen Phänomenen so eine scharfe Grenzziehung auch zutreffend (CHUNG, FABBRI 2003).
- Rein qualitative Einstufungen wie „hohe“, „mittlere“ und „geringe“ Gefährdung, ohne dass diese weiter quantifiziert werden. Dadurch ist die Karte nicht allgemein, von Experten und Laien, gleich interpretierbar. Angenommen eine Straße wird geplant, welche ein Gebiet mit hoher Gefährdung durchqueren würde. Was bedeutet „hohe Gefährdung“? Kann man diese „hohe Gefährdung“ beispielsweise mit der Wahrscheinlichkeit, dass der tangierte Straßenabschnitt in den nächsten 50 Jahren von einer Hangrutschung beeinträchtigt werden wird, gleichsetzen? Ohne eine Schätzung dieser Wahrscheinlichkeit, kann der Entscheidungsträger für die Landesplanung lediglich eine ungenaue ökonomische Kosten-Nutzen Analyse durchführen (CHUNG, FABBRI 2003, 2005).
- Keine „unabhängige“ Beurteilung der Gefahrenkarte um deren Aussage zu überprüfen: Meist fehlen Angaben über Verlässlichkeit, Effektivität und Vorhersagepotential des Modells, wodurch die Beurteilung als eine ungetestete Hypothese betrachtet werden muss. Die Validierung der Ergebnisse, oder zumindest eine Beurteilung der Unsicherheiten ist aber unerlässlich, wenn man Verantwortliche in ihrem Entscheidungsprozess unterstützen möchte. Die Kernfrage bei allen diesen Gefahrenabschätzungen ist, wie verlässlich diese Vorhersageergebnisse in Hinblick auf zukünftige Hangrutschungen sind (REMONDO ET AL. 2003).

In der Gruppe der quantitativen Vorhersagemodellierung wurden weitere Schwächen identifiziert (CHUNG, FABBRI 2003):

- Vereinfachung der Eingangsdaten: Häufig werden kontinuierliche Daten wie Hangneigung oder Höhenlagen zuerst in einige wenige Klassen reklassifiziert. Mit dieser Kategorisierung gehen allerdings wertvolle Information verloren.
- Keine Möglichkeit einer Mischung von diskreten und kontinuierlichen Daten: Die im vorherigen Punkt besprochene Umwandlung von kontinuierlichen Daten in diskrete Daten, geschieht häufig aus dem Grund, dass die Mischung dieser beiden Datenmodelle, aufgrund unterschiedlicher Messskalen nicht in das Modell implementiert werden kann. Durch diese Umwandlung verlieren die Daten viel von ihrer ursprünglichen Bedeutung.
- Keine Aussagen über die Modellannahmen: Alle quantitativen Vorhersagemodelle basieren auf bestimmten Grundannahmen des Modells. Um eine korrekte Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen, ist es notwendig die Modellannahmen in die Definition der Vorhersagewerte einzubeziehen.

Die aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Beantwortung dieser Kernfragen nach der *Quantifizierbarkeit der Rutschanfälligkeit*, der *Beurteilung der Unsicherheiten* im Modell und der *Validierung*. Auch die Zielsetzung dieser Arbeit bezieht sich auf diese Aspekte.

2.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine flächendeckende Beurteilung der Rutschanfälligkeit im ausgewählten Untersuchungsgebiet. Dadurch soll die Gefährdung durch Hangrutschungen regional (Zielmaßstab 1:150.000) bewertet sowie die Eignung der angewandten Methode überprüft werden.

Die untergeordneten Ziele der Arbeit sind:

- Anwendung einer probabilistischen Methode: Auf diese Weise sollen Hänge beurteilt werden, die bisher noch nicht von Hangrutschungen betroffen waren, oder wo keine Informationen über Hangrutschungen vorliegen (Regionalisierung).
- Identifizierung jener Steuerungsfaktoren, die maßgeblich am Zustandekommen von Hangrutschungen beteiligt sind und die Rutschanfälligkeit bewirken.
- Quantifizierung der Rutschanfälligkeit, welche über den Grad der Gefährdung im gesamten Untersuchungsgebiet Auskunft gibt.
- Überprüfung der Ergebnisse: Bewertung von Unsicherheiten und der Effektivität des Modells sowie die Validierung des Vorhersagemodells um die Plausibilität der Aussage zu überprüfen.
- Visualisierung der Ergebnisse in einer Gefährdungskarte (*susceptibility map*) für das ausgewählte Gebiet an der Schwäbischen Alb.

2.3 Methodik

Geländeuntersuchungen haben gezeigt, dass Hangrutschungen keinesfalls unkalkulierbare Zufallsereignisse sind, sondern dass sie unter komplexem Zusammenspiel bestimmter geologischer, tektonischer, morphologischer, hydrologischer und bodenkundlicher Ursachen auftreten (GUSENBAUER 1999). Neben direkter Beurteilung der Rutschungsneigung auf Basis geomorphologischer Indikatoren, kann die Rutschanfälligkeit indirekt auf Basis der Steuerungsfaktoren, welche eine Hangrutschung ermöglichen und begünstigen, bewertet werden. Es gilt zu entscheiden, welche Faktoren im Wesentlichen zusammenspielen und wie ausschlaggebend die einzelnen Faktoren für die Hanginstabilität sind. Die Wertigkeit der Faktoren variiert von Gebiet zu Gebiet in Abhängigkeit vom strukturgeologischen Aufbau der Gesteine, ihrer mineralogischen Zusammensetzung, der Bodenentwicklung, dem Bewuchs, der geomorphologischen Situation, den klimatischen Bedingungen sowie anderer Faktoren.

Die Beurteilung der Rutschanfälligkeit ist folglich – wie so viele andere Problemstellungen, welche mit GIS bearbeitet werden - ein Multi-Kriterien-Entscheidungsprozess. Es existiert eine Reihe von theoretischen Ansätzen zu diesem Thema außerhalb der „GIS-Welt“ (MALCZEWSKI 1999). Im GIS-Bereich konzentriert sich der Multi-Kriterien-Entscheidungsprozess darauf, auf welche Art und Weise Faktoren kombiniert werden können, um zu einer integrierten Lösung zu kommen. Folglich ist die Hauptaufgabe von GIS die *Multi-Kriterien-Beurteilung*. In diesem übergeordneten methodischen Rahmen ist die vorliegende Arbeit eingebettet. Für die Kombination von Informationen und Kriterien steht das gesamte Methodenspektrum der multithematischen Analyse in GIS zu Verfügung.

Grundsätzlich – ohne auf spezifische Methoden näher einzugehen – können folgende wesentliche Schritte bei der quantitativen Rutschanfälligkeitsbewertung (CARRARA ET AL. 2001) genannt werden (vgl. Abbildung 2):

- Erhebung, Beschreibung und Typisierung der im Untersuchungsgebiet aufgetretenen Hangrutschungen.
- Identifizieren und Erfassung einer Reihe von Steuerungsfaktoren, die direkt oder indirekt den Massenbewegungsprozess steuern oder mit Hanginstabilität korrelieren.
- Kriteriengewichtung bzw. Schätzung der relevanten Bedeutung dieser Faktoren für das Entstehen von Hangrutschungen.
- Zusammenführen der gewichteten Steuerungsfaktoren zur Berechnung eines Gefährdungsindex.
- Klassifizierung des Gebietes in Bereiche unterschiedlicher Gefährdungsgrade.

Konkret kommt bei dieser Arbeit eine Methode zum Einsatz, welche quantifizierbare Ergebnisse liefert und etwas über die Sicherheit oder Plausibilität der Beurteilung aussagt. Aufgrund dieser Ansprüche wurde die Wahrscheinlichkeitstheorie als Basis für die Analyse der Rutschanfälligkeit herangezogen.

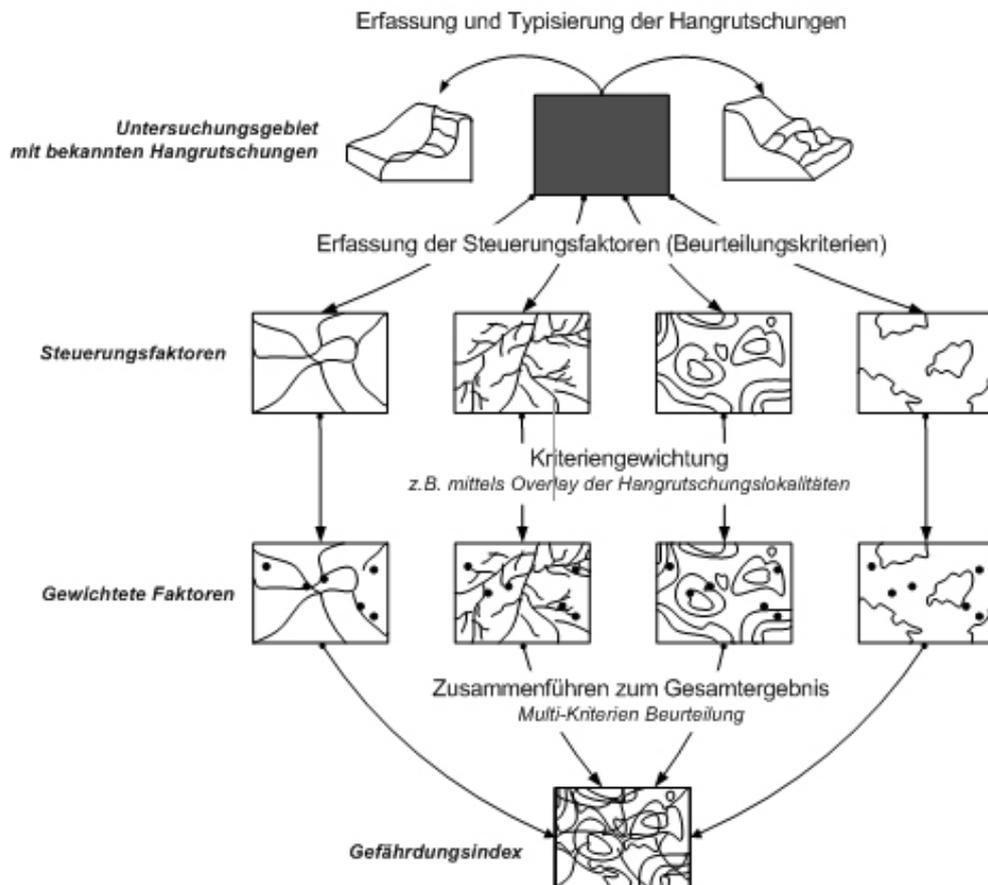


Abbildung 2: Wesentliche Schritte der quantitativen Bewertung der Rutschanfälligkeit

Die Methode der *Evidenzgewichtung (Weights of Evidence)* wird eingesetzt, welche von BONHAM-CARTER ET AL. (1989) für den Bereich der explorativen Mineralogie entwickelt wurde. Diese ist vom Kanadischen Geologischen Dienst (Canadian Geological Survey) in Zusammenarbeit mit dem Amerikanischen Geologischen Dienst (US Geological Survey) in einer GIS-Applikation programmiert worden (KEMP ET AL. 2001)¹.

Diese Methode geht davon aus, dass künftige Hangrutschungen unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen ablaufen und von gleichen Steuerungsfaktoren bedingt werden, wie die in der Vergangenheit aufgetretenen Hangrutschungen des gleichen Typs. Diese historischen Daten sind wesentliche Parameter für die Bestimmung der kausalen Zusammenhänge zwischen Rutschung und den vorliegenden geomorphologischen, geologischen und anderen Bedingungen. Bevor konkret auf die Modellierung eingegangen wird, soll im Folgenden ein Überblick über das Methodenspektrum zur Rutschanfälligkeitsbewertungen gegeben werden. Damit soll die Einordnung der Methodik ermöglicht und die Einführung in die theoretische Basis des Modells erleichtert werden.

¹ Liegt als ArcView 3.x Extension namens ArcSDM (Spatial Data Modelling Using Weights of Evidence, Logistic Regression, Fuzzy Logic and Neural Network Analysis) vor.

3 GIS-GESTÜTZTE METHODEN ZUR GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG

Es gibt eine Reihe von GIS-gestützten Methoden die zur Beurteilung der Gefährdung bzw. Rutschanfälligkeit für ein Ereignis herangezogen werden können. Die einfachste Form der Gefährdungsabschätzung zeigt lediglich die Verteilung oder die Dichte der aufgetretenen Massenbewegungen in einem bestimmten Gebiet. Folgt man allerdings der Definition von Anfälligkeitskarten bzw. Gefährdungskarten (*susceptibility maps*) als räumliche Vorhersage des Auftretens von Hangrutschungen (vgl. Kapitel 1.2.2), so sind diese eher als Inventare zu bezeichnen und nicht als Gefährdungskarten im engeren Sinn.

Während sich die zeitliche Vorhersage schwierig gestaltet, ist die räumliche Vorhersage mit einem großen Methodenrepertoire durchführbar und eine der Kernaufgaben der Geoinformation. Es gibt unterschiedliche Ansätze, das Methodenrepertoire zu systematisieren. HEGG & KIENHOLZ (1992) unterscheiden prinzipiell zwischen *Dispositionsmodellen und Prozessmodellen*.

Prozessmodelle dienen der dynamisch-mathematischen Simulation von möglicher Geschwindigkeit, Energie und Bewegungsbahn eines geomorphologischen Prozesses. Dabei werden Trajektorienmodelle zur Berechnung der Strecken und Reibungsmodelle zur Vorhersage von Reichweite von Massenverlagerungen verwendet (THEIN 2000). In Prozessmodellen wird daher nicht die Rutschanfälligkeit analysiert, sondern der Massenbewegungsprozess an sich. Weiters werden diese häufig in eigener Simulationssoftware durchgeführt, die außerhalb der „GIS-Welt“ angesiedelt sind. Im Folgenden wird daher nicht näher auf diese Methodengruppe eingegangen.

Dispositionmodelle hingegen haben das Ziel, die Rutschanfälligkeit eines Hanges zu bewerten, um potentielle Gefährdungsquellen einzugrenzen. Nach HUTCHINSON (1995) kann man das Dispositionsmodell in kleindimensionale, *lokale bzw. analytische Modelle* und großdimensionale, *regionale Modelle* unterscheiden. Regionale Methoden beurteilen ein größeres Gebiet, im Maßstab 1:25.000 – 1:100.000 oder sogar überregional 1:500.000. Lokale Methoden werden in einer Größenordnung bis 1:10.000 angewendet.

Weiters kann zwischen *direkten und indirekten* Methoden unterschieden werden (SOETERS, VAN WESTEN 1996). Direkte Methoden benötigen einen Experten, der auf Basis von geomorphologischen Kriterien den Gefährdungsgrad unmittelbar bestimmt. Indirekte Methoden sind dadurch charakterisiert, dass sie die Gefährdung mittels der Steuerungsfaktoren bestimmen, welche die Voraussetzungen für Hangrutschungen schaffen (wie Hangneigung, Landnutzung, Gesteinsform).

Andere Systematiken teilen die Methoden in *datenbasierte und wissensbasierte* Methoden ein (BONHAM-CARTER 2002). Die Trennung ergibt sich daraus, ob Expertenwissen oder statistische Parameter ausschlaggebend für die Beurteilung sind.

Abbildung 3 soll einen Überblick über die Methoden geben, sowie die unterschiedlichen Systematiken und deren Überlappung verdeutlichen.

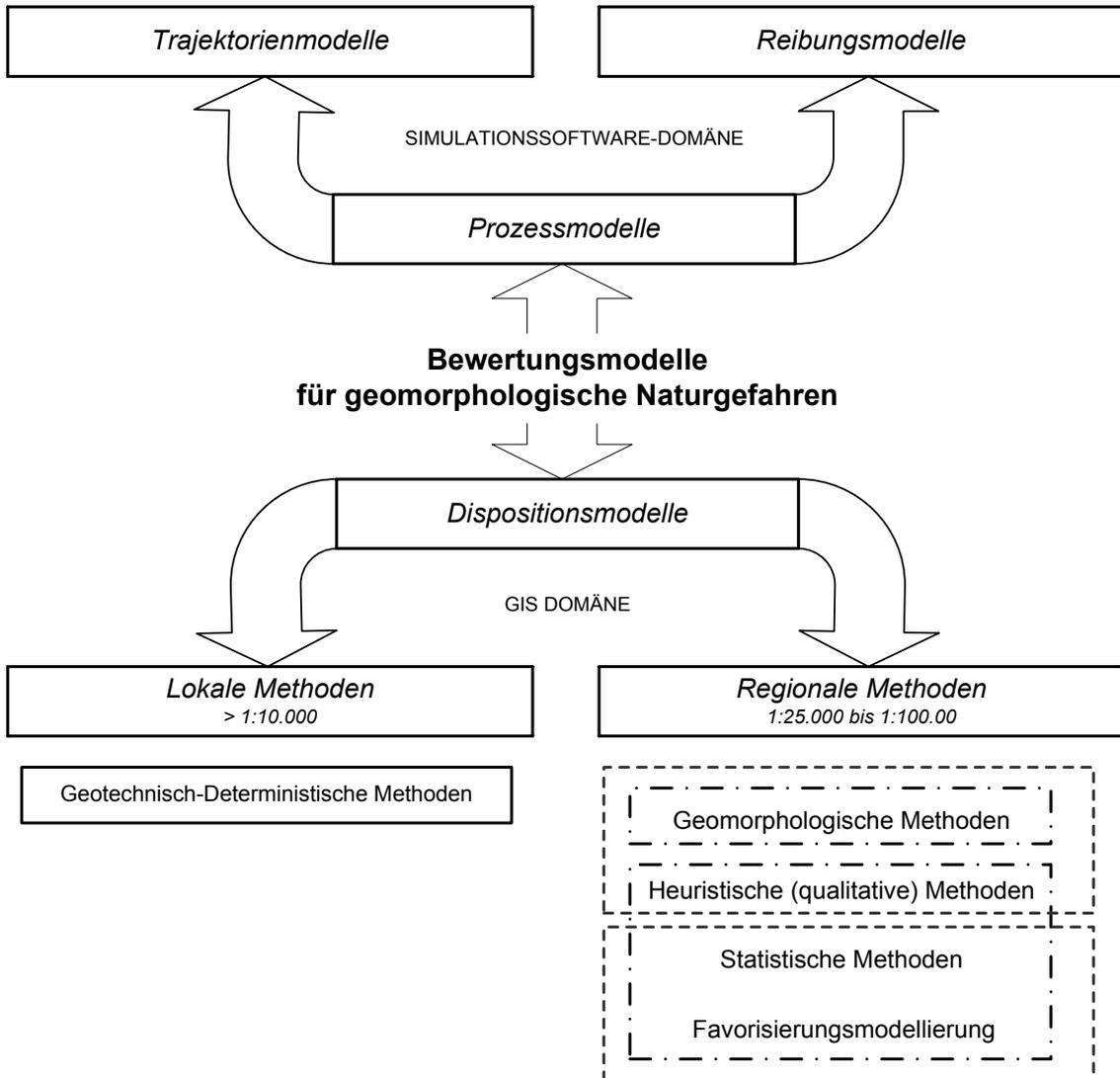


Abbildung 3: Methoden zur Bewertung von geomorphologischen Naturgefahren. Die Methoden können unterschiedlich systematisiert werden. Neben der Trennung nach regionalen und lokalen Methoden, kann man unter direkten und indirekten, sowie wissensbasierten und datenbasierten Methoden unterscheiden.

In Folge soll ein Überblick über die existierenden, GIS-basierte Methoden (Dispositionsmodelle) zur Gefährdungseinschätzung gegeben werden.

3.1 Lokale Methoden

3.1.1 Geotechnisch-Deterministische Methoden

Bei geotechnischen Modellen steht die analytische Beurteilung der Standsicherheit eines bestimmten Hanges im Mittelpunkt. In jedem Hang existieren destabilisierende Kräfte, welche bewegungsfördernd wirken und den stabilisierenden Kräften entgegenstehen. Das angelagerte Material auf einem Hang ist so lange in einem Equilibrium (also stabil), wie die Summe der einwirkenden Scherspannungen die Scherfestigkeit des Hangmaterials nicht überschreitet.

Eine Massenbewegung tritt dann auf, wenn die den Hang aufbauenden Substrate bzw. Gesteine nicht mehr in der Lage sind, der Schwerkraft bzw. der angreifenden Scherspannung zu widerstehen (RODER 2001). In der Bodenmechanik wird der Sicherheitsfaktor F als Quotient aus Scherfestigkeit T_s des Bodens und der über die Gleitfläche wirkenden Scherspannung T_f definiert.

$$F = \frac{T_s}{T_f} \quad (1)$$

Bei der Berechnung des Sicherheitsfaktors werden die bremsenden Momente (*resisting forces*, ergeben die Scherfestigkeit) den treibenden Momenten (*driving forces*, ergeben die Scherspannung) gegenübergestellt. Bei einer Verkleinerung des bremsenden Momentes oder einer Vergrößerung des treibenden Momentes verringert sich der Wert des Sicherheitsfaktors. Wenn der Sicherheitsfaktor einen Wert < 1 annimmt, die treibenden Kräfte also größer als die bremsenden Kräfte werden, kommt es zu einer Massenbewegung (RODER 2001).

Unter Annahme der Form der Gleitfläche (zum Beispiel als Gleitkreis) und der daraus resultierenden Bruchmechanismen, kann die Vorhersage der Scherspannung T_f erfolgen. Diese wird bei der Berechnung des Sicherheitsfaktors F der Scherfestigkeit T_s gegenübergestellt.

Die wichtigsten veränderlichen Parameter, die den Sicherheitsfaktor determinieren, sind Kohäsion, innere Reibung und Lagerungsdichte des Substrats, sowie die Hangneigung. Auch das Porenwasser spielt eine wichtige Rolle, da dieses die Eigenschaften des Hangmaterials wesentlich beeinflusst. Auf Basis der Determinanten des Sicherheitsfaktors lässt sich (meist nur annäherungsweise) die kritische Höhe eines Hanges bestimmen, der den Schwellenwert der relativen Höhe, bei der ein Hang noch stabil ist, darstellt. Sehr stark vereinfacht kann gesagt werden: Je größer die innere Reibung und Kohäsion sind, umso stabiler ist ein Hang, je größer die Lagerungsdichte und Steilheit, desto instabiler ist er. Auf einem stabilen Hang halten sich die oben genannten Faktoren in etwa die Waage. Wird dieses Gleichgewicht gestört, kommt es zunächst zu einer Deformation, schließlich zu einem Versagen des Hanges. Die Auslösung einer Massenbewegung geht demnach direkt oder indirekt auf die Veränderung einer dieser Faktoren zurück (RODER 2001).

Die Bodenfestigkeit ist eine Eigenschaft des Bodens, die durch Feld- und Laborversuche festgestellt wird. Daten wie Tongehalt, Wassergehalt, Scherfestigkeit, Plastizität usw. müssen bei diesen geotechnischen Methoden erhoben werden. Durch *deterministische Stabilitätsgleichungen*, welche auf Daten von Geländeuntersuchungen und bodenmechanische Laboranalysen basieren, können Standsicherheitsfaktoren bestimmt werden.

Es gibt unterschiedliche Stabilitätsberechnungen, welche auf verschiedene Rutschungstypen abgestimmt sind. Mit der Berechnung nach BISHOP und FELLNIUS lassen sich unter Analyse der Rotationsmechanismen tiefgründige Bruchmechanismen modellieren. Sogenannte *Infinte Slope Stability Models* beruhen auf einer hangparallelen Gleitfläche und eignen sich für die Berechnung von flachgründigen Translationsrutschungen.

Stabilitätsberechnungsmethoden können numerisch in ein GIS integriert werden. Die benötigten Parameter, wie Hangneigung, Scherparameter, Lockermaterialmächtigkeit und Porenwasserdruck müssen als Datenschichten (Karten) flächendeckend vorliegen. Dabei kann das Stabilitätsmodell mit einem hydrologischen Modell kombiniert werden, um daraus einen Stabilitätsindex zu berechnen. Eine wichtige Verbesserung der Stabilitätsberechnung, die sich durch Integration in ein GIS ergibt, ist die Möglichkeit morphometrischen Parameter aus einem digitalen Geländemodell zu extrahieren, welche in die Berechnung einfließen (XIE ET AL. 2004).

Die physikalisch-deterministischen Hangstabilitätsmodelle haben einen hohen Grad an Objektivität und Genauigkeit, da in den Stabilitätsgleichungen nur physikalischen Gesetzmäßigkeiten einfließen. Die analytischen Modelle sind jedoch aufgrund aufwendiger Feld- und Laboruntersuchungen, welche die notwendigen Parameter für die Analyse liefern standortbezogen und daher auf ausgewählte Rutschungsgebiete und Hangabschnitte begrenzt. Die aufwendige Datenerhebung macht diese Art der Analyse für regionale Bewertungen zu zeit- und kostenaufwendig.

3.2 Regionale Methoden

Anders als geotechnische Methoden, welche die Hangstabilität eines ausgewählten Hanges bestimmen, haben regionale Modelle eine Gefährdungsabschätzung eines größeren Gebietes zum Ziel und stützen sich hauptsächlich auf geomorphologische Faktoren. Meist erfolgt eine Einteilung in Zonen mit dem Grad der Rutschenfähigkeit oder dem Grad der Instabilität. Diese Rutschenfähigkeitskarten (*susceptibility maps*) haben eine Größenordnung von mittel- bis kleinmaßstäblichen Karten (1:25.000 bis 1:100.000). Regionale und lokale Methoden haben somit unterschiedliche Zielsetzungen, können aber sinnvoll miteinander kombiniert werden, indem durch eine regionale Bewertung jene Hänge identifiziert werden, welche einer lokalen geotechnischen Untersuchung unterzogen werden sollten.

3.2.1 Geomorphologische Methoden

Bei der geomorphologischen Methode erfolgt die Gefahrenbewertung durch einen geschulten Kartierer. Dieser bewertet mit Hilfe des für Massenbewegungen spezifischen Formenschatzes sowie zusätzlichen geologischen und hydrologischen Informationen, die Gefährdung direkt im Gelände oder durch Luft- oder Satellitenbilder (HUTSCHINSON 1995). Dabei werden die Faktoren bestimmter morphodynamischer Prozesse wie Zugrisse, Vernässungen und Rutschbuckel als Hinweise oder „stumme Zeugen“ für Massenbewegungen verwendet. Die Methoden setzen also Expertenwissen über den Massenbewegungsprozess voraus und sind dadurch wissenschaftsbasiert.

Einige Untersuchungen beschränken sich auf die Erfassung vergangener Massenbewegungen, andere beurteilen die Gefährdung für zukünftige Hangrutschungen. Die Fernerkundung, insbesondere die Satellitenradar-Fernerkundung, gewinnt aufgrund der ständigen Weiterentwicklung von Sensoren und Auswertemethoden zunehmend an Bedeutung, auch auf dem Gebiet der Naturgefahrenforschung. Satelliten- und Flugzeugaufnahmen, sowie auf deren Datenbasis erstellte Bildprodukte enthalten Informationen, die in Kombination mit anderen Quellen (wie seismotektonische, strukturgeologische, geomorphologische, geodätische und klimatische Daten) wesentlich zur Erfassung von Hangrutschungen beitragen können (THEILEN-WILLIGE 2003, 2004).

GIS dient bei dieser Methodik meist als Werkzeug zur Datensammlung und Visualisierung. Manchmal kommen auch Analysen – meist aus dem Bereich der uni-thematischen Analyse – zum Einsatz, wie die Ableitung der morphometrischen Parameter aus dem Höhenmodell.



Abbildung 4: Geomorphologische Methode: direkte Beurteilung durch einen Experten, vgl. dazu Abbildung 5 und 6.

Die Beurteilung erfolgt anhand subjektiver Experteneinschätzung. Dies kann als Vor- und Nachteil gesehen werden. Der Nachteil liegt in der Subjektivität der Bewertung, die stark vom Bearbeiter abhängt (SOETERS, VAN WESTEN 1996). Eine Studie in Kalifornien zeigt, dass unterschiedliche Kartierer bei demselben Untersuchungsgebiet zu unterschiedlichen Ergebnissen kamen. Weniger als 10% der als Hangrutschungsgebiete identifizierten Bereiche überschneiden sich (CARRARA ET AL. 2001). Daraus ergibt sich ein hoher Grad an Unsicherheit, der kaum zu quantifizieren ist und schwer bei nachfolgenden Analysen berücksichtigt werden kann.

Der Vorteil der Methode liegt darin, dass regionale Kenntnisse sowie das hohe Expertenwissen einbezogen werden, welches in seiner Komplexität nur sehr schwer numerisch auszudrücken wäre. Experten kommen dadurch zu sehr differenzierten und qualitativ hochwertigen Ergebnissen (THEILEN-WILLIGE 2003, 2004). Die Arbeiten eignen sich um Bereiche mit dem höchsten Risiko zu identifizieren.

3.2.2 Heuristische Methoden

Heuristische Methoden gehen davon aus, dass Hangrutschungen unter komplexem *Zusammenspiel verschiedener Steuerungsfaktoren entstehen, welche in unterschiedlichem Maß zur Hanginstabilität beitragen*. Sind diese Steuerungsfaktoren erfasst, so kann man durch deren Gewichtung und Kombination aller gewichteten Faktoren zur Einschätzung der Gefährdung des Gebietes gelangen.

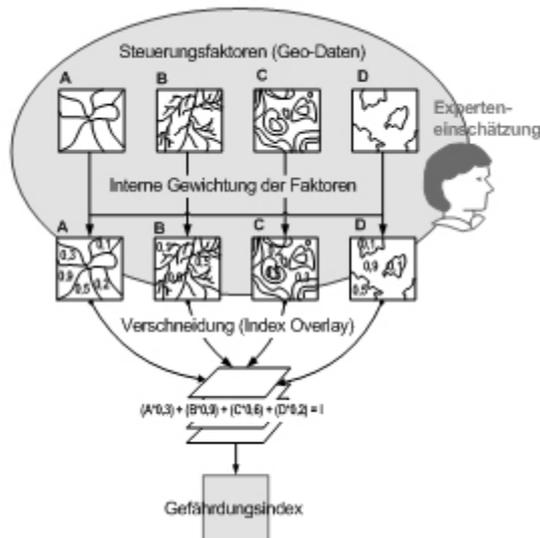


Abbildung 5: Heuristische Methode: indirekt, wissensbasiert, vgl. Abbildung 4 und 6.

Heuristische Methoden beurteilen die Gefährdung also nicht direkt, sondern *indirekt* über die Steuerungsfaktoren, welche durch einen Experten beurteilt werden (vgl. Abbildung 5). Sie sind ebenfalls wissensbasiert, da sie Expertenwissen über den Massenbewegungsprozess erfordern, welches durch genaue Studien und Geländebeobachtungen gewonnen wird (CARRARA ET AL. 2001). Der Einbezug eines Experten in die Beurteilung ist einerseits ein Vorteil es kann aber auch - wie bei der direkten geomorphologischen Bewertung - als Nachteil bewertet werden, weil Subjektivität nicht auszuschließen ist. Durch die Zuordnung von Gewichten und der algebraischen Verknüpfung liegt allerdings ein nachvollziehbares, wenn auch nicht vollständig objektives, Bewertungsmodell vor.

Da für jeden Hangrutschungstyp andere Steuerungsfaktoren in unterschiedlichem Ausmaß ausschlaggebend sind, muss jeder Hangrutschungstyp getrennt voneinander analysiert werden. Prinzipiell lassen sich folgende allgemeine Schritte für ein heuristisches Bewertungsmodell feststellen:

- Erfassung der Steuerungsfaktoren für Hanginstabilität als Datenschicht (GIS-Layer).
- Normalisierung bzw. interne Gewichtung der Steuerungsfaktoren, indem jedem Attribut (Klasse) ein Gewicht zugeordnet wird, welches für den relativen Beitrag zur Hanginstabilität steht.
- Generierung der gewichteten normalisierten Datenschichten durch Reklassifizierung oder Multiplikation der Attributwerte mit den korrespondierenden Gewichten.
- Externe Gewichtung jeder Kriterien-Datenschichten zur Beurteilung der relativen Bedeutung jedes Steuerungsfaktors für Hanginstabilität.
- Generierung des Gefährdungsindex zum Beispiel durch lineare gewichtete Addition der Kriterien-Datenschichten.
- Einteilung des Gebietes in Zonen unterschiedlicher Gefährdungsgrade durch Klassifizierung.

Als erster Schritt müssen die Steuerungsfaktoren für Hangrutschungen, wie morphometrische Parameter, Böden, Geologie, Vegetationsbedeckung oder Oberflächenhydrologie erfasst werden. Den einzelnen Klassen dieser Faktoren werden je nach Rutschneigung intuitiv – nach Ermessen des Bearbeiters – Gewichte zugeordnet. Durch die Gewichtung wird die relative Bedeutung jedes Attributes für den Massenbewegungsprozesses geschätzt. Diese Faktor-interne Gewichtung kann bei kontinuierlichen Daten durch die Einteilung der Attribute in gewichtete Klassen erfolgen. Am Beispiel Hangneigung kann eine Einteilung in Hangneigungsklassen erfolgen, die danach mit Gewichten von nicht „gefährdet“ (0) bis „sehr stark gefährdet“ (100) bewertet werden. Bei der Gewichtung ist von einer Skalierung der Daten auszugehen, die über die einzelnen Themen hinweg abgestimmt ist (GUSENBAUER 2000). Dies ist deshalb notwendig, weil die einzelnen Steuerungsfaktoren nach der Gewichtung zu einem Endergebnis kombiniert werden und dabei die Werte vergleichbar sein müssen. Eine Normalisierung der Daten ist also notwendig, bevor man diese verschneidet.

Es gibt unterschiedlichste Methoden zur Normalisierung der Daten. Sie kann einfach durch die Zuordnung eines neuen Wertes zwischen 0 und 100 (wie oben beschrieben), je nach Bedeutung des Faktors, erfolgen. Ein anderer häufiger Weg ist die lineare Transformation, welche sich besonders für kontinuierliche Daten eignet. Die gängigste Methode ist die Maximalwert-Prozedur (*maximum score procedure*) (vgl. Gleichung 2 und 3), bei der jeder Wert durch den maximalen Wert der Datenschicht dividiert wird:

$$X_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j^{\max}} \quad \text{oder} \quad X_{ij} = 1 - \frac{X_{ij}}{X_j^{\max}} \quad (2), (3)$$

wobei X_{ji} der normalisierte Wert ist der i -ten Datenschicht des j -ten Attributes ist. Nach der Normalisierung liegen die Werte jeder Datenschicht zwischen 0 und 1. Der Vorteil der Methode ist, dass die Werte nach der Normalisierung proportional gleich bleiben (MALCZEWSKI 1999). Neben der linearen Transformation können auch andere Methoden zur Normalisierung herangezogen werden, wie zum Beispiel die *Value/Utility* Funktion, Wahrscheinlichkeiten oder Unschärfe Mengen (*fuzzy sets*). Einige Methoden sind unter den statistischen Methoden (vgl. Kapitel 3.2.3) näher beschrieben.

Anschließend erfolgt durch die Kombination der normalisierten, gewichteten Steuerungsfaktoren die Gesamtbewertung der Gefährdung. Der gängigste Ansatz zur Verknüpfung ist die *einfache additive Gewichtung*, welche auf der gewichteten linearen Addition der Daten beruht (MALCZEWSKI 1999). Dabei wird jedem Steuerungsfaktor ein Gesamtgewicht zugeordnet. Die Gewichtung erfolgt durch das Ermessen des Bearbeiters oder unter Verwendung heuristischer Index- oder Punktesystemen, die in anderen Hangrutschungs-Gefährdungsbeurteilungen entwickelt wurden (GRUNERT, SCHMANKE 1997).

$$A_i = \sum w_i x_{ij} \quad (4)$$

Für die Verknüpfung können, neben den vier fundamentalen algebraischen Operationen, Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division, auch jegliche andere arithmetische oder statistische Operationen verwendet werden (MALCZEWSKI 1999). Diese Kombination erfolgt durch die vertikale (über mehrere Datenschichten), lagebezogene Verschneidung und der Berechnung des Gefährdungsindex.

Die GIS-Basisfunktion, welche bei der Verknüpfung zu Anwendung kommt, ist die so genannte Indexverschneidung (*index overlay*), die (gewichtete) lagebezogene Verschneidung mehrere Datenschichten. Eine Verschneidungsoperation (*overlay*) generiert eine neue Ergebnisdatenschicht als eine Funktion von einer oder mehrerer Eingangsdatenschichten. Je nachdem ob die Ausgangsdaten im Rasterdatenmodell oder im Vektordatenmodell vorliegen, müssen bestimmte geometrische Bearbeitungsschritte durchlaufen werden. Bei Rasterdaten muss gegebenenfalls ein Resampling stattfinden, um die Eingangs raster in ein korrespondierendes Rastersystem zu transformieren. Bei Vektordaten erfordert die Verschneidung unter anderem eine neue topologische Strukturierung der Daten (MALCZEWSKI 1999).

3.2.3 Statistische Methoden

Statistische Methoden beurteilen die Rutschanfälligkeit (wie heuristische Methoden) *indirekt* auf Basis der hangrutschungssteuernden Faktoren. Außerdem basieren sie auf der Grundannahme, dass *zukünftige Hangrutschungen unter den gleichen oder ähnlichen Bedingungen auftreten wie vergangene Hangrutschungen* im Untersuchungsgebiet. Sie setzen die Kenntnis von bereits aufgetretenen Hangrutschungen voraus (CARRARA ET AL. 1992).

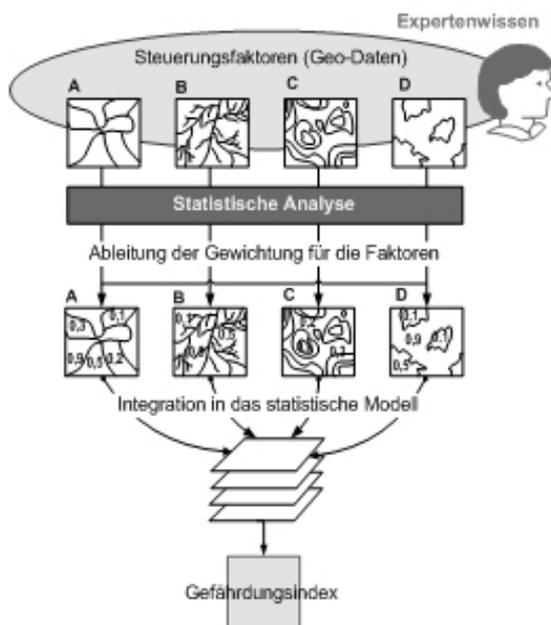


Abbildung 6: Statistische Methode: indirekte Beurteilung, vgl. Abbildung 4 und 5.

Der wesentliche Unterschied zu heuristischen Methoden liegt darin, dass die Gewichtung nicht durch subjektive Bewertung des Bearbeiters erfolgt, sondern durch die statistisch messbare Beziehung zwischen jedem Faktor und den bekannten Hangrutschungslokalitäten. Genauer gesagt wird mittels statistischer Kennwerte die Wirkungsbeziehung zwischen Rutschungen und den Steuerungsfaktoren analysiert, um die signifikanten Faktoren für jeden Hangrutschungstyp zu identifizieren (THEIN 2000). Anders ausgedrückt, werden jene Kombinationen die in der Vergangenheit zu Hangrutschungen geführt haben, statistisch bestimmt. Dadurch kann der *Grad und die Qualität* (Signifikanz) des kausalen Zusammenhangs eines Faktors und den Hangrutschungen beschrieben und daraus eine Gewichtung abgeleitet werden.

Diese Bewertung ist also *datenbasiert.*, wodurch einerseits das hohe Expertenwissen für die Analyse verloren geht, andererseits Subjektivität ausgeschlossen wird und eine hohe Nachvollziehbarkeit erreicht werden kann.

Die Gesamtbewertung erfolgt, wie bei heuristischen Methoden, durch die Kombination aller gewichteten Steuerungsfaktoren. Es ist also möglich eine quantitative Vorhersage für Gebiete zu treffen, in denen bisher noch keine Hangrutschungen aufgetreten sind, aber

ähnliche oder gleiche rutschungsbegünstigende Bedingungen vorliegen. Die Analyse muss für jeden Hangrutschungstyp getrennt erfolgen. Prinzipiell lassen sich folgende allgemeine Schritte für ein statistisches Bewertungsmodell feststellen:

- Selektion/ Erfassung der Steuerungsfaktoren für Hanginstabilität und in der Vergangenheit aufgetretenen Hangrutschungen als Datenschicht.
- Berechnung der statistischen Kennwerte (abhängig von der ausgewählten Methode) für jeden Steuerungsfaktor, wodurch die signifikanten Parameter für die Hangrutschungen bestimmen werden.
- Ableitung der Gewichte für die Attribute (Klassen) in den Steuerungsfaktoren aus den statistischen Kennwerten. Diese repräsentieren die relative Bedeutung der Attribute für die Hanginstabilität.
- Kombination aller Steuerungsfaktoren (abhängig von der ausgewählten Methode) im jeweiligen statistischen Modell.
- Einteilung des Gebietes in Zonen unterschiedlicher Gefährdungsgrade durch Klassifizierung.

Es gibt mannigfaltige statistische Ansätze, welche zur Analyse des Wirkungsgefüges zwischen Steuerungsfaktoren und Hangrutschungslokalitäten herangezogen werden. Grundsätzlich wird zwischen (i) *bivariaten Methoden* und (ii) *multivariaten Methoden* unterscheiden.

Bivariate Methoden untersuchen *zwei* Variablen, folglich den Zusammenhang jeweils eines Steuerungsfaktors und den Rutschungen. Multivariate Methoden können *mehrere* Variablen (Steuerungsfaktoren) mit den Hangrutschungen in Beziehung stellen und somit den gemeinsamen Einfluss der Steuerungsfaktoren analysieren.

Innerhalb dieser beiden großen Gruppen gibt es wiederum eine große Anzahl von Methoden und Kombinationen von Methoden. Im Folgenden wird eine kleine Auswahl der gängigsten statistischen Methoden vorgestellt.

3.2.3.1 *Bivariate Statistische Methoden*

Bivariate statistische Methoden analysieren den Zusammenhang zwischen *zwei Variablen*, einer unabhängigen und einer abhängigen Variable. Hat man einen statistisch signifikanten (also überzufälligen) Zusammenhang zwischen zwei Variablen festgestellt, so kann man eine kausale Beziehung zwischen beiden annehmen. Im Falle der Rutschenfälligkeitsbeurteilung wird der Zusammenhang der prozesssteuernden Faktoren (unabhängige Variable) und den Hangrutschungen (abhängige Variable) untersucht und quantifiziert. Anders gesagt, werden allfällige Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen dem Auftreten von Massenbewegungen (abhängige Variable) und bestimmten geologischen, geomorphologischen und hydrologischen Faktoren (unabhängige Variable) untersucht. In der bivariaten Analyse wird jeder Faktor getrennt von den anderen beurteilt, das heißt einzeln mit den Hangrutschungslokalitäten kombiniert (SÜZEN 2002). Aus der Stärke und Qualität dieses Zusammenhanges kann eine Gewichtung der Steuerungsfaktoren entwickelt werden. Die Kombination der gewichteten Steuerungsfaktoren ergibt den Gefährdungsindex.

Es existiert eine Fülle von statistischen Methoden zur Bestimmung der Abhängigkeit bzw. Einflusses einer Variablen auf eine andere. Dazu gehören *Kreuztabellen* oder *Kontingenztafeln*, *lineare Regression* und *Korrelationsrechnung*.

Eine einfache aber wirkungsvolle Methode ist die Berechnung der Hangrutschungsdichte in jeder Variablenklasse bei der paarweisen Überkreuzung (Kreuztabellen) wie sie von BRABB (1984) UND VAN WESTEN (1993) angewandt wurde. Dabei wird jeder Steuerungsfaktor mit den bekannten Hangrutschungslokalitäten verschnitten und Dichtewerte berechnet.

Die *Flächendichte* wird durch die Anzahl der Pixel, welche eine Hangrutschung beinhalten, durch die Gesamtanzahl an Pixel in der Variablenklasse ermittelt. Die *Anzahldichte* wird durch die Anzahl der Hangrutschungslokalitäten pro Quadratkilometer des Gebietes der Variablenklasse berechnet (SÜZEN 2002). Um den Einfluss jeder Variablenklasse zu beurteilen, werden die ermittelten Dichten der Gesamtdichte der Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet gegenübergestellt.

3.2.3.2 Multivariate Statistische Methoden

Die multivariate Statistik analysiert Zusammenhänge zwischen *mehreren Variablen*. Anders als bei der bivariaten Analyse, geht man von dem Einfluss *mehrerer unabhängiger Variablen* auf eine abhängige Variable aus. Sie bietet die Möglichkeit, Zusammenhänge und kombinierte Wirkung der prozesssteuernden Faktoren zu analysieren. Hier werden somit verschiedene kausale Zusammenhänge erfasst.

Im Bereich der multivariaten Analyse gibt es unzählige statistische Verfahren. Die bekanntesten und gängigsten Methoden in den Geowissenschaften sind die *multiple logistische Regressionsanalyse*, *Diskriminanzanalyse*, *Faktorenanalyse* sowie *Clusteranalyse* (BEGUERIA, LORENTE 1999).

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl einer Methode ist das Messniveau der abhängigen Variablen, also der Massenbewegungen. Liegen diese in metrischer Form vor, kann die lineare Regression zur Anwendung kommen. Hangrutschungen liegen jedoch meist als diskrete, dichotome Daten, also mit binärem Messniveau vor. Das bedeutet, die Daten können nur zwei Werte annehmen, entweder 1 (Hangrutschung vorhanden) oder 0 (keine Hangrutschung vorhanden). In diesem Fall kommt die *logistische Regression (logistic regression)* - eine nicht-lineare Form der Regression - als Auswertungsmethode in Frage. Das Analyseziel ist, die Hangrutschungen (die Zielvariable Y) statistisch zu erklären und dabei den Einfluss der Steuerungsfaktoren (erklärender Variablen X_1, \dots, X_m) auf die Hangrutschungen zu untersuchen.

Der Schlüssel zur quantitativen Beschreibung eines Zusammenhangs zwischen Y und X liegt darin, anstelle von Y die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt des Zielereignisses (Hangrutschung) zu modellieren. Während Y nur die beiden Ausprägungen 1 und 0 besitzt, kann die Wahrscheinlichkeit jede beliebige Zahl zwischen 0 und 1 annehmen. Die Chance, in Wahrscheinlichkeitsverhältnissen (Odds, vgl. Kapitel 3.2.4.2) $P/(1-P)$ ausgedrückt, kann jede beliebige positive Zahl annehmen. Bei der logistischen Regression wird der natürliche Logarithmus der Wahrscheinlichkeitsverhältnisse – die so genannten Logits – verwendet. Zwischen den Logits und den unabhängigen Variablen wird eine lineare Beziehung wie folgt angenommen:

$$\text{Logit}(P) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (5)$$

wobei P die Wahrscheinlichkeit für eine Hangrutschung, X_1, \dots, X_n eine Reihe von n unabhängigen Variablen und $\beta_1 - \beta_n$ die Parameter oder Regressionskoeffizienten darstellen.

Durch das schrittweise Hinzufügen oder Entfernen von Variablen zu diesem Term wird die jeweilige Güte des Modells durch die Veränderung des Chi-Quadrat-Wertes als Maß für die Qualität der Vorhersagewahrscheinlichkeit angezeigt. Somit können diejenigen Faktoren mit den jeweils optimalen Werten ausgewählt und in das Modell aufgenommen werden (WIEGAND 1996). Sobald die Regressionsgleichung ermittelt ist, wird diese zur Vorhersage bzw. Berechnung der Wahrscheinlichkeiten angewendet.

Tabelle 2: Beispiel einer Regressionsgleichung von (GORSEVSKI ET AL. 2000).

$$\log(p/(1-p)) = (-2.2642 + \text{Hangneigung} * 0.4969 + \text{Abflussrichtung} * 0.6039)$$

beziehungsweise

$$p = \exp(-2.2642 + \text{Hangneigung} * 0.4969 + \text{Abflussrichtung} * 0.6039) / (1 + \exp(-2.2642 + \text{Hangneigung} * 0.4969 + \text{Abflussrichtung} * 0.6039))$$

Ein anderer Typ der multivariaten Analyse ist die *Diskriminanzanalyse*. Das Ziel ist zu untersuchen, ob und wie gut sich, aufgrund gegebener Daten, unterschiedliche Gruppen von einander trennen und klassifizieren lassen. Im Falle der Gefährdungsbeurteilung durch Rutschungen, ist das Ziel, die beste Trennung der Einheiten oder Pixel mit Hangrutschungen und jener ohne Hangrutschungen zu erreichen.

Eine Anwendung der Diskriminanzanalyse erfordert, dass zunächst Daten von Elementen (Objekten) mit bekannter Gruppenzugehörigkeit vorliegen. Die Diskriminanzanalyse unterscheidet sich hinsichtlich ihrer Problemstellung somit grundsätzlich von der Clusteranalyse, welche von ungruppierten Daten ausgeht. Durch die Clusteranalyse werden Gruppen erzeugt, durch die Diskriminanzanalyse dagegen vorgegebene Gruppen untersucht.

In der Diskriminanzanalyse wird zum einen von mehreren intervallskalierten Steuerungsfaktoren X_1, \dots, X_j , zum anderen von einer diskreten Gruppierungsvariable, welche die Gruppenzugehörigkeit der Einheit oder des Pixels definiert, ausgegangen. In der Hangrutschungsgefährdungsbeurteilung sind die Gruppen „stabile Hänge“ und „instabile Hänge“ grundlegend. Das bedeutet, dass Gebiet ist vorab in instabile (mit bekannten Hangrutschungen) und stabile Bereiche (keine Hangrutschungen aufgetreten) zu klassifizieren. Im ersten Schritt wird eine Diskriminanzfunktion geschätzt und diese so gewählt, dass sie die beiden Gruppen optimal teilt. Die Steuerungsfaktoren sind dabei die Grundlage für die Formulierung dieser Funktion. Aus den Merkmalsvariablen (vgl. Tabelle 3) werden durch Linearkombination eine oder mehrere Diskriminanzfunktionen gebildet. Die Schätzung der Diskriminanzfunktion hat große Ähnlichkeit mit der Schätzung einer Regressionsfunktion. Die Eigenart der Diskriminanzanalyse ergibt sich erst aus dem zweiten Schritt, welcher dazu dient aus den stetigen Werten der erklärenden Variablen (Steuerungsfaktoren) Gruppenzugehörigkeiten der abhängigen Variable (Hangrutschungen) zu berechnen. Die Parameter der Diskriminanzfunktion sollen nun

derart bestimmt werden, dass sich die stabilen und instabilen Bereiche auf der Diskriminanzvariable Y maximal unterscheiden (GORSEVSKI ET AL. 2000).

Tabelle 3: Gemessene Variable Hangneigung in den Gruppen „stabile Bereiche“ und „instabile Bereiche“ (RICE, PILLSBURY 1982).

Variable	Stabile Gebiete (n=66)			Instabile Gebiete (n= 68)		
	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.
Hangneigung	6.0	41.5	83.0	37.0	63.9	95.0

Tabelle 4: Beispiel einer Diskriminanzfunktion in logarithmischer Form von (RICE, PILLSBURY 1982).

$$x = 13,24 - 4,63 \log(\text{Hangneigung}) - 3,04 \log(\text{Vegetation}) - 1,03 \log(\text{Distanz zum Fluss}) + 0,69 \log(\text{Einzugsgebiet})$$

Problematisch bei der Anwendung der logistischen Regression und der Diskriminanzanalyse ist die Tatsache, dass sich die beiden zu untersuchenden binären Gruppen stark unterscheiden. Da Hangrutschungen sehr seltene Ereignisse sind, ist die Gruppe *mit* Hangrutschungen viel kleiner als jene, in der *keine* Rutschungen aufgetreten sind. Die multivariaten Methoden sind allerdings darauf ausgelegt ungefähr gleich große Gruppen zu analysieren. Dadurch werden die Wahrscheinlichkeiten für Hangrutschungen in diesen Methoden eher unterschätzt (BEGUERIA, LORENTE 1999).

3.2.4 Favorisierungsmodellierung (favourability modelling)

Diese Methodengruppe beruht - wie die statistischen Methoden - auf der Grundannahme, dass zukünftige Hangrutschungen unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen stattfinden, wie jene in der Vergangenheit. Die Kenntnis von bereits aufgetreten Hangrutschungen ist also Voraussetzung. Die bei dieser Modellierung angewandten Favorisierungsfunktionen (*favourability function*) kommen meist in Kombination mit statistischen Methoden zum Einsatz. Eine strikte Abgrenzung zu den statistischen Methoden ist daher nicht immer zutreffend, trotzdem werden sie oft als eigne Methodengruppe behandelt.

Der Ausdruck Favorisierungsfunktion wurde von CHUNG und FABBRI (1993, 2003) als Überbegriff für jene mathematischen Grundlagen eingeführt, die für die *räumliche Vorhersagemodellierung* angewendet werden. Favorisierungsfunktionen werden eingesetzt um einen Index zu berechnen, welcher den *Grad der Wahrscheinlichkeit, der Zuverlässigkeit, Überzeugung oder Plausibilität* angibt, dass die entsprechende Einheit oder Rasterzelle in der Zukunft in ein Hangrutschungsgebiet fällt (GHINOI 2003).

Die Favorisierungsfunktion wird in sehr unterschiedlicher Weise geschätzt, abhängig von der Verfügbarkeit an Eingangsdaten und abhängig von den Annahmen die im Modellierungsprozess getroffen werden. Prinzipiell sind Favorisierungsfunktionen innerhalb der folgenden mathematischen Grundlagen zu finden:

- Wahrscheinlichkeitstheorie (*probability theory*)
- Zadeh's Unschärfe Mengenlehre (*Zadeh's fuzzy set theory*) (ZADEH 1965)
- Dempster-Shafer Theorie (*Dempster-Shafer evidential theory*) (SHAFFER 1976)

Entsprechend den drei genannten Theorien gibt es bestimmte Funktionen, wie die *bedingte Wahrscheinlichkeitsfunktion* (*conditional probability function*) und die *Wahrscheinlichkeitsverhältnisse* (likelihood ratio function), die *Überzeugungsfunktion* (*belief function*) und *Unschärfe-Mengen-Funktion* (*fuzzy membership functions*), welche geeignet sind um ein quantifizierbares Maß für zukünftige Hangrutschungen zu liefern (VAN WESTERN 2003). Generell kann die Favorisierungsmodellierung in folgende wesentliche Schritte eingeteilt werden:

- Selektion/ Erfassung der Steuerungsfaktoren für Hanginstabilität sowie in der Vergangenheit aufgetretenen Hangrutschungen als Datenschicht.
- Bestimmung der Hypothese(n) über das Auftreten von Hangrutschungen.
- Verschneidung der ausgewählten Steuerungsfaktoren mit den bekannten Hangrutschungslokalitäten und Berechnung von Wahrscheinlichkeit, Plausibilität, oder Zugehörigkeit (abhängig von der ausgewählten Methode).
- Ableitung der Gewichte für die Attribute (Klassen) in den Steuerungsfaktoren aus den berechneten Kennwerten.
- Berechnung der Vorhersagewerte mittels Favorisierungsfunktion.
- Einteilung des Gebietes in Zonen unterschiedlicher Gefährdungsgrade durch Klassifizierung.

Im Folgenden wird auf einige Favorisierungsfunktionen näher eingegangen, da diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendet werden.

3.2.4.1 *Bedingte Wahrscheinlichkeit (conditional probability) nach Bayes*

Wahrscheinlichkeiten werden üblicherweise mit Hilfe der Erfahrung über das Auftreten eines Ereignisses in der Vergangenheit unter gleichen Bedingungen berechnet. Diese Wahrscheinlichkeit wird auch als A-Priori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet und kann mit Hilfe von Informationen aus Beobachtungen, Experimenten oder Analysen, welche die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, modifiziert werden (MALCZEWSKI 1999). Bezieht man jene neuen Informationen in die Berechnung der Wahrscheinlichkeit ein, so resultiert daraus die bedingte Wahrscheinlichkeit.

Unter bedingter Wahrscheinlichkeit - auch als A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet – versteht man die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses unter der Bedingung, dass ein anderes Ereignis bereits zuvor eingetreten ist. Wenn man das Ereignis B voraussetzt, ist $P(D|B)$ die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ereignisses D . Anders ausgedrückt ist $P(D|B)$ die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis B das Eintreten eines Ereignisses D zur Folge hat. In gewissem Sinne kann man dieses Ereignis B auch als Ursache für das Ereignis D bezeichnen.

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis, das bei einer bestimmten Ursache auftritt, ist einfach, in den Geowissenschaften tritt jedoch häufig eine andere

Problemstellung auf: Ein Ereignis (wie eine Hangrutschung) ist bereits eingetreten und in Folge sollen nun die Ursachen festgestellt werden. Nun lässt sich zwar die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses für jede dieser Ursachen mit der bedingten Wahrscheinlichkeit berechnen, was aber nicht die Frage beantwortet, mit welcher Wahrscheinlichkeit jede dieser Ursachen ausschlaggebend war. Die Fragestellung führt zur Betrachtung bedingter Wahrscheinlichkeiten mit vertauschten Argumenten (vgl. Gleichung 6). Vereinfacht ausgedrückt, stellt sich die Situation so dar: Die Berechnung von P (Ereignis|Ursache) ist sehr einfach, aber eigentlich ist P (Ursache|Ereignis) gefragt. Für diese Vertauschung der Argumente wird das BAYES Theorem herangezogen (EMBACHER 2003).

Das BAYES Theorem definiert die totale Wahrscheinlichkeit $P(B_i|D)$ für die Ursachen B_i (aus $i \in I$) aus der A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(B_i)$ und der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(D|B_i)$ folgendermaßen:

$$P(B_i | D) = \frac{P(B_i) \cdot P(D | B_i)}{\sum_j P(B_j) \cdot P(D | B_j)} \quad (6)$$

wobei sich die Summe im Nenner über alle Ursachen ($i \in I$) erstreckt, welche als Verursacher in Frage kommen. Dieser Satz lässt sich in natürlicher Weise auf (abzählbar- und überabzählbar-) unendliche Ensembles von Wahrscheinlichkeitsverteilungen wie folgt verallgemeinern:

$$P(B|D) = \frac{P(B) \cdot P(D|B)}{P(A)} \quad (7)$$

Mit Hilfe des BAYES Theorems kann daher (unter Annahme der A-Priori-Wahrscheinlichkeiten für die in Frage kommenden Ursachen) aus der Wirkung eines Ereignisses auf die sie verursachenden Faktoren zurück geschlossen werden (EMBACHER 2003). Das BAYES Theorem erlaubt somit in gewissem Sinne ein Umkehren von Schlussfolgerungen. Vereinfacht ausgedrückt, kann mit Hilfe dieses Terms die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses, bei bekannten Ursachen (die nach BAYES als Evidenzen bezeichnet werden), berechnet werden (MALCZEWSKI 1999).

Die Berechnung der A-Priori und A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit kann zum Beispiel bei einer paarweisen Überkreuzung von Hangrutschungslokalitäten und den Steuerungsfaktoren berechnet und verglichen werden.

3.2.4.2 Wahrscheinlichkeitsverhältnisse (*likelihood ratio, odds*)

So genannte *Odds* und *Odds Ratio* (OR) sind eine Möglichkeit, Anteilswerte zum Beispiel in Kreuztabellen auszudrücken und zu vergleichen. Man kann Odds mit "Chancen" und Odds Ratio mit "relative Chancen" übersetzen, es haben sich aber die englischen Namen Odds und Odds Ratio (OR) eingebürgert. In OR wird das Wahrscheinlichkeitsverhältnis von einander ausschließenden Ereignissen formuliert. Anders ausgedrückt, geben sie das Verhältnis an, dass ein Ereignis eintritt bzw. dieses Ereignis nicht eintritt. Je näher OR an 1 heranrückt, umso geringer ist der Unterschied zwischen den beiden Wahrscheinlichkeiten, je weiter OR von 1 wegrückt (Richtung unendlich oder Richtung 0) desto größer ist der Unterschied zwischen diesen. Eine Wahrscheinlichkeit $P\{D\}$, dass eine Hangrutschung D eintritt, entspricht dem OR $O\{D\}$ von:

$$O\{D\} = \frac{P\{D\}}{1-P\{D\}} \quad \text{bzw.} \quad O\{D\} = \frac{P\{D\}}{P\{\bar{D}\}} \quad (8), (9)$$

Auch bei Odds kann die bedingte Wahrscheinlichkeit angewendet werden, wodurch man anstelle von $O\{D\}$ zu bedingten Odds $O\{D|B\}$ kommt:

$$O\{D|B\} = \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (10)$$

Dieses Wahrscheinlichkeitsverhältnis (*likelihood ratio*) wird häufig auch als *sufficiency ratio* bezeichnet. Setzt man nun die Odds in die Gleichung der bedingten Wahrscheinlichkeit ein (vgl. Gleichung 7) so gelangt man zum gewünschten Ausdruck der bedingten oder A-Posteriori-Odds:

$$O\{D|B\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (11)$$

wobei $O\{D|B\}$ die A-Posteriori-Odds für D unter Präsenz der Evidenz B sind. Gleichmaßen kann die Gleichung für die A-Posteriori-Odds $O\{D|\bar{B}\}$ für D bei *fehlender* Evidenz B wie folgt hergeleitet werden:

$$O\{D|\bar{B}\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (12)$$

Das Wahrscheinlichkeitsverhältnis $P\{\bar{B}|D\}/P\{\bar{B}|\bar{D}\}$ ist somit ein Maß für das Fehlen der Evidenz und wird auch als *necessity ratio* bezeichnet. Das Wahrscheinlichkeitsverhältnis $P\{B|D\}/P\{B|\bar{D}\}$ (*sufficiency ratio*) ist analog ein Maß für das Vorhandensein der Evidenz in Bezug zu den Hangrutschungen.

Wahrscheinlichkeitsverhältnisse werden beispielsweise bei der Regressionsanalyse und der paarweisen Überkreuzung von Hangrutschungen und Steuerungsfaktoren eingesetzt. Auch bei der Methode der Evidenzgewichtung kommen Wahrscheinlichkeitsverhältnisse zur Anwendung. Dabei werden sie dazu verwendet, die einzelnen Steuerungsfaktoren zu gewichten, um ihre relative Bedeutung für Hanginstabilität auszudrücken.

3.2.4.3 Unschärfe Zugehörigkeitsfunktion (*fuzzy membership function*)

Bei der Auswahl der Steuerungsfaktoren für Hangrutschungen können oft kein scharfe Grenzen gezogen werden, ab wann ein Faktor wirksam wird. Der Einfluss mancher Faktoren, wie zum Beispiel die Distanz zu Störungszonen oder die Hangneigung, nehmen graduell ab oder zu, daher ist es oftmals schwierig, einen konkreten Grenzwert festzulegen, ab welchem der Faktor keinen Einfluss mehr hat. Dies kann durch die Modellierung von Übergängen, wofür sich die Theorie der unscharfen Mengen (*fuzzy logic*) nach ZADEH (1965) eignet, vermieden werden. In der klassischen Mengenlehre kann ein Element entweder einer Menge angehören oder nicht. Im Gegensatz dazu arbeiten unscharfe Mengen (*fuzzy sets*) anstelle der tatsächlichen Werte mit unterschiedlichen Zugehörigkeitsgraden. Der Zugehörigkeitsgrad wird üblicherweise durch eine Zahl aus dem Intervall $[0,1]$ beschrieben, wobei der Grad 1 volle Zugehörigkeit und der Grad 0 keine

Zugehörigkeit zur Menge bedeutet. Mit Hilfe einer Zugehörigkeitsfunktion können auf diese Weise Verläufe modelliert werden.

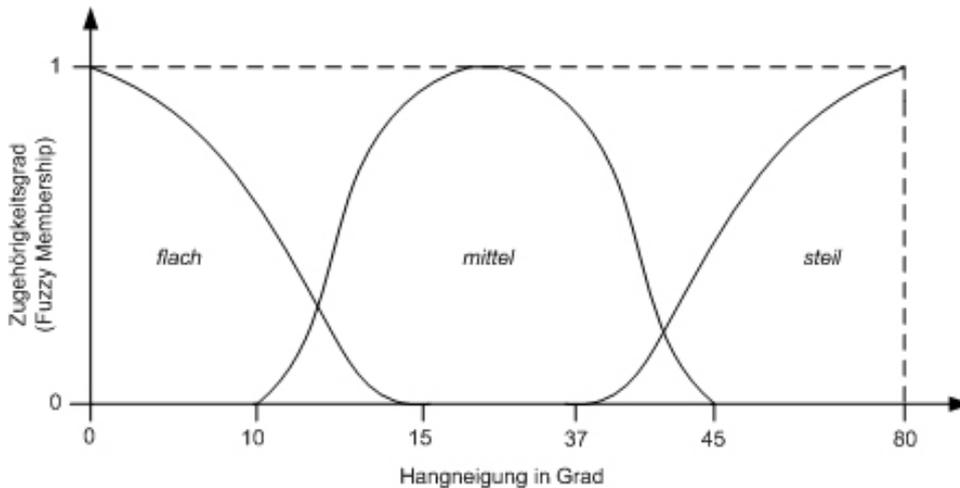


Abbildung 7: Zugehörigkeitsfunktion (fuzzy membership function) für die unscharfe Modellierung des Steuerungsfaktors Hangneigung nach LORUP (2003).

Bei Geodaten wird ein Attribut häufig durch Klassen diskreter Intervalle eingestuft. Die Zugehörigkeitsfunktion kann in diesem Fall als eine Tabelle ausgedrückt werden (vgl. Tabelle 5), welche die Parameterklassen bestimmten Zugehörigkeitsklassen zuordnet. Indem die Hangneigungsstufen in Zugehörigkeitswerte umgewandelt (fuzzifiziert) werden können scharfe Grenzen vermieden werden (LORUP 2003).

Tabelle 5: Fuzzifizieren der Hangneigungsstufen (LORUP 2003), vgl. dazu Abbildung 7.

Fuzzy Set	Hangneigung [°]	Zugehörigkeitsgrad
Flach	<5°	1
	5° bis <15°	1 bis 0 (absteigend)
	>=15°	0
Mittel	<10°	0
	10° bis <20°	0 bis 1 (ansteigend)
	20° bis <35°	1
	35° bis <45°	1 bis 0 (absteigend)
	>=45°	0
Hoch	<37°	0
	37° bis <60°	0 bis 1 (ansteigend)
	>=60°	0

Bei der Rutschanfälligkeitsbewertung müssen alle Steuerungsfaktoren, welche in Form von Karten vorliegen fuzzifiziert werden. Dabei wird die Zugehörigkeit des Faktors zur Menge der „rutschanfälligen Gebiete“ modelliert. Dies kann anhand subjektiver Experteneinschätzung erfolgen. ANABALGAN (1992 IN TANGESTANI 2005) hat ein Bewertungsschema (*landslide hazard evaluation factor, LHEF*) für die wichtigsten Faktoren entwickelt. Dieses Schema ist ein numerisches System der Hauptfaktoren für Hanginstabilität, wie Geologie, Morphologie, Relief, Landnutzung, Landbedeckung und Grundwasserbedingungen. Mit den numerischen Bewertungen kann für jede Parameterklasse eine Zugehörigkeitsfunktion abgeleitet werden.

Liegen mehrere fuzzifizierte Karten vor, so werden sie nach den verschiedenen Regeln der *Fuzzy Logic* kombiniert. Zu diesen Kombinationsregeln gehören „*Fuzzy AND*, *Fuzzy OR*, *Fuzzy Algebraic Product*, *Fuzzy Algebraic Sum* und der *Fuzzy Gamma Operator*“ (TANGESTANI 2005).

3.2.4.4 Überzeugungsfunktion (*belief function*) nach Dempster-Shafer

An die Rutschanfälligkeitsbewertung kann auch in Form von Hypothesen herangegangen werden. In diesem Fall bietet die Dempster-Shafer-Theorie (DS) ein Entscheidungskalkül (SHAFFER 1976). Mittels DS ist es möglich „Wissen“ und „Unwissen“ bzw. Unsicherheiten zu modellieren.

DS basiert auf einer Grundmenge von Hypothesen (*frame of discernment*). In der Hangrutschungsmodellierung geht man von mindestens zwei Hypothesen aus: Hypothese $\{A\}$, das Gebiet ist rutsch anfällig oder Hypothese $\{B\}$, das Gebiet ist nicht rutsch anfällig. Die Steuerungsfaktoren für Hangrutschungen unterstützen entweder die eine oder die andere Hypothese.

Nicht immer ist die Zuordnung der einzelnen Faktoren für die Unterstützung der einen oder anderen Hypothese einfach. Hangneigungen beispielsweise können die eine *und* die andere Hypothese unterstützen, abhängig vom Neigungswinkel. Die Faktoren werden mit Hilfe eines Hypothesenschemas, welches im Fall der Hangrutschungsbeurteilung mit zwei (bzw. eigentlich drei) Hypothesen (A : stabil, B : instabil, AB : stabil und instabil) aufgebaut wird, beurteilt (LORUP 2003).

Eine so genannte *mass function* (m) wird mit Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Faktoren der Hypothesenmenge belegt, dies wird als *basic probability assignment* (BPA) bezeichnet. Somit wird der Grad oder die Stärke, mit der ein Kriterium eine Hypothese unterstützt, beurteilt. BPA s sind Fuzzy-Werte (also im Bereich 0 bis 1) und können folgendermaßen ausgedrückt werden (LORUP 2003):

$$m(A)=BPA[A] \quad (13)$$

wobei $m(A)$ der Grad der Unterstützung einer Hypothese $\{A\}$ durch ein Kriterium ist. Der Wert kann entweder aus empirischen Daten, subjektiven Überlegungen, Simulationen, oder Ähnlichem stammen. Die Summe aller BPA s ist stets 1.

Mehrere solcher Funktionen können mit der Kombinationsregel nach Dempster (*Dempster's rule of combination*) zu einer Einzigem normalisiert werden.

$$m(Z) = \frac{\sum m_1(X) \cdot m_2(Y) \text{ wenn } X \cap Y = Z}{1 - \sum m_1(X) \cdot m_2(Y) \text{ wenn } X \cap Y = \emptyset} \quad (14)$$

wenn $\sum m_1(X) \cdot m_2(Y) = 0$ für $X \cap Y = \emptyset$ dann

$$m(Z) = \sum m_1(X) \cdot m_2(Y) \text{ wenn } X \cap Y = Z$$

Mit Hilfe der *belief function* (vgl. Gleichung 15 und 17) und der *plausibility function* (vgl. Gleichung 16 und 18) können daraus die Grenzen eines Wahrscheinlichkeitsintervalles berechnet werden, dessen Breite das „Nichtwissen“ also Unsicherheit misst. Die *belief function* bezeichnet in DS die Summe aller, eine Hypothese unterstützender *BPAs*:

$$BEL(X) = \sum m(Y) \quad \text{wenn } Y \subseteq X \quad (15)$$

$$PL(X) = 1 - BEL(\bar{X}) \quad \dots \text{ wobei } \bar{X} = \text{not} X \quad (16)$$

$$BEL(\bar{X}) = \sum m(Y) \quad \dots \text{ wenn } Y \cap X = \emptyset \quad (17)$$

$$\text{daher: } PL(X) = \sum m(Y) \quad \dots \text{ wenn } Y \cap X \neq \emptyset \quad (18)$$

Dies ist der Grad an Unsicherheit, eine Hypothese zu verwerfen oder anzunehmen. Jene Bereiche mit ausgeprägtem *belief*-Intervall profitieren am deutlichsten von weiterem Wissen (Untersuchungen, Hinweise, etc.), die entweder die eine oder andere Hypothese unterstützen (LORUP 2003).

4 GRUNDLAGEN ZU MASSENBEWEGUNGEN UND STEUERUNGSFAKTOREN

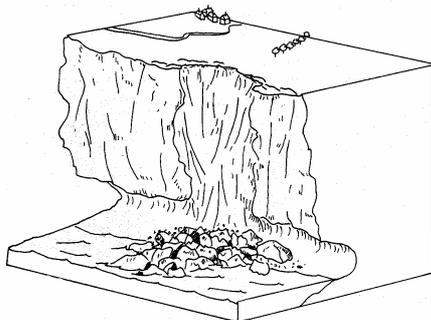
Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt bei der GIS-Methodik. Auf eine detaillierte Diskussion der geomorphologischen Grundlagen, wird daher gezielt verzichtet. In diesem Kapitel soll lediglich ein Überblick über die Grundlagen der Massenbewegungsprozesse gegeben werden. Es existieren verschiedene Klassifikationssysteme für Massenbewegungen, welche auf unterschiedlichen Kriterien basieren. Die Einteilung der Massenbewegungen kann nach Bewegungstyp, Größe und Morphometrie der bewegten Masse, Art des bewegten Materials, der Geschwindigkeit der Bewegung und zahlreichen anderen Kriterien erfolgen. Da Massenbewegungen Teil eines natürlichen Prozessgefüges sind, lässt sich nur schwer eine Typisierung oder Klassifikation finden, die allen Kriterien gerecht wird (RODER 2001). Die eindeutige Definition oder Einordnung einer Massenbewegung ist oft nicht möglich. Eine der bekanntesten Systeme ist jenes von VARNES (1984), der Massenbewegungen nach Bewegungstyp und Art des involvierten Materials einteilt. In dieser Arbeit wird eine vereinfachte Form der Klassifikation nach DIKAU ET AL. (1996) verwendet. Sie ist der Klassifikation von VARNES (1984) sehr ähnlich, allerdings ist sie auf europäische Verhältnisse zugeschnitten.

4.1 Typen von Massenbewegungen

Die einzelnen Typen von Massenbewegungen werden in diesem Kapitel lediglich überblicksartig beschrieben, wobei jene Arten besondere Beachtung finden, welche auch im Untersuchungsgebiet an der Schwäbischen Alb auftreten. Dies sind Translationsrutschungen, Rotationsbewegungen, untergeordnet Stürze, Fließungen und Kriechbewegungen.

4.1.1 Stürze (falls)

Stürze (falls) umfassen Bergstürze, Felsstürze und Steinschläge. Sturzbewegungen treten plötzlich auf und haben ihren Ursprung in steilen Wänden oder Hängen (wie Klippen an Küsten, Uferböschungen von Flüssen, Steilabbrüche am Rande von Plateaus), von welchen sich eines oder mehrere Bruchstücke lösen.



Sie beginnen mit dem Abtrennen von Boden und Fels von einem Steilhang. Die Bewegung erfolgt zumindest teilweise im freien Fall. Beim Aufprall kommt es zur Deformation des Materials (RODER 2001). Da es sich zum Großteil um freien Fall handelt, ist die Geschwindigkeit der Bewegung naturgemäß sehr schnell (DIKAU ET AL. 1996).

Abbildung 8: Sturzbewegung
(DIKAU ET AL. 1996).

Die weitere Unterteilung von Stürzen kann nach Art, Menge und Herkunft des Materials erfolgen. Bei einer Einteilung nach Menge und Korngröße des involvierten Materials werden meist folgende Bezeichnungen verwendet: Abgrusen (auch Abbröckeln/Abrieseln) – Steinschlag – Blocksturz – Felssturz – Bergsturz, wobei letzteres die Bewegung mit dem meisten abstürzenden Material ist (DIKAU ET AL. 1996).

Der *Steinschlag* ist die gängigste Art von Massenbewegungen im steilwandigen Hochgebirgsbereich. Unter Steinschlag werden Vorgänge unterschiedlicher Größenordnungen zusammengefasst. Sie reichen von kaum merklichem Abbröckeln, Abgrusen und Abrieseln kleiner Gesteinssplitter bis zum Niedergang ganzer Gesteinslawinen.

Weitere Formen sind *Fels- und Bergstürze sowie Blockstürze*. Die Unterscheidung von Fels- und Bergsturz wird rein aufgrund der Masse des erfassten Gesteinsmaterials vorgenommen. Beim Blocksturz gehen ganze, homogene Blöcke ab, die sich in Sprüngen talwärts bewegen.

4.1.2 Kippungen (topples)

Nach VARNES (1978 IN DIKAU ET AL. 1996) bestehen Kippungen aus der Vorwärtsrotation einer Masse von Fels, Geröll oder Bodenmaterial um einen Drehpunkt am Hang. Der Vorgang kann mit dem Umfallen von Dominosteinen verglichen werden. Beim Kippen selbst bleibt die Masse intakt, danach kann das Material aber zerbrechen und weiterstürzen, fließen oder rutschen.

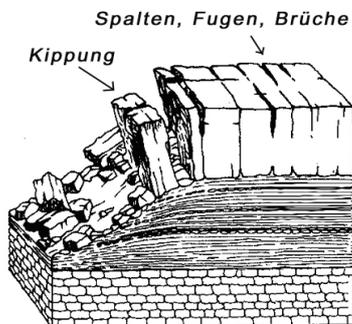


Abbildung 9: Blockdiagramm einer Kippung (DIKAU ET AL. 1996).

Vorbedingung für das Auftreten von Kippungen ist das Vorhandensein von horizontalen und vertikalen Spalten, Fugen und Brüchen oder weicheren Gesteinsschichten, an welchen die Verwitterung besonders stark wirksam werden kann (RODER 2001).

Als Hauptursache von Kippungen gilt die Abtrennung einer Säule von einer Wand, wodurch die gesamte Last des abgetrennten Gesteinsblocks auf eine schmale, möglicherweise aus nicht sehr widerstandsfähigem Gestein bestehende Basis übertragen wird.

4.1.3 Rutschungen/Gleiten (slides)

Nach BUMA und VAN ASCH (IN DIKAU ET AL. 1996) werden Rutschungen generell als die Bewegung von Material entlang einer klar erkennbaren Scherfläche bezeichnet. Nach Form und Anzahl der Gleitflächen werden drei Arten von Rutschungen unterschieden: (i) *Rotationsrutschungen* (rotational slides) beschreiben Bewegungen auf einer gekrümmten (schaufelförmigen) Gleitfläche, (ii) *Translationsrutschungen* (translational slides) weisen eine Bewegung auf einer mehr oder weniger ebenen Fläche auf. Die Kombination dieser beiden Typen, d.h. Rutschungen mit sowohl gekrümmter als auch ebener Bewegungsbahn, bezeichnet man als (iii) *kombinierte Rutschungen* (compound slides).

Die Ursachen von Rutschungen reichen von Übersteilung oder Unterschneidung, Auflast oder auch Entlastung bis zu den entscheidenden Einflüssen von Wasser und Vegetation. Weiters ist eine Wechsellagerung wasserwegiger und schwer durchlässiger bzw. widerstandsfähiger und weicherer Gesteinsschichten den Rutschungen sehr förderlich. Tonig-schluffige Lagen sind als potentielle Rutschbahnen besonders anfällig. Bei hangparallelem Schichteinfallen sind derartige geologische Verhältnisse prädestiniert für Translationsrutschungen (RODER 2001). Als Auslöser werden häufig große Niederschlagsmengen oder Schneeschmelze, aber auch Bodenerschütterung durch Erdbeben oder Vibrationen wirksam.

4.1.3.1 Rotationsrutschungen (rotational slides)

Rotationsrutschungen bewegen sich auf konkav gekrümmten (schaufelförmigen) Gleitflächen. Die Form der Scherfläche bewirkt, dass die Rutschmasse eine gewisse Rückwärtsrotation um eine hangparallele Achse erfährt. Dabei sinkt die Rutschmasse im Abrissbereich ab, im Fußbereich hingegen wird sie angehoben.

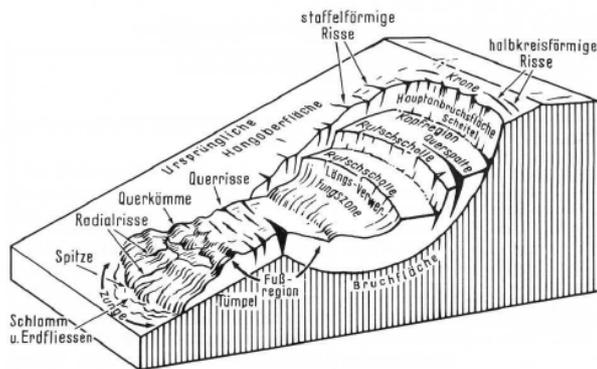


Abbildung 10: Blockdiagramm einer Rotationsrutschung (DIKAU ET AL. 1996).

Die resultierenden Reliefformen (vgl. Abbildung 10) bestehen aus gekrümmten, steilen Abrissflächen mit zahlreichen, meist halbkreisförmigen Rissen. Die Gleitfläche ist konkav oder unregelmäßig gekrümmt. Im Rutschungsbereich sind Vernässungszonen, Nackenseen, Risse, Gräben und Stauchwälle häufig. Der Rutschkörper ist meist zerbrochen und zum Teil in Stufen zerlegt.

Man unterscheidet drei Typen von Rotationsrutschungen: einfache, mehrfache (multiple) und sukzessive Rotationsrutschung. Daneben können diese nach ihrem Auftreten in Fels, Schutt und Bodenmaterial klassifiziert werden (BUMA & VAN ASCH IN DIKAU ET AL. 1996).

4.1.3.2 Kombinierte Rutschungen (compound slides)

Kombinierte Rutschungen haben sowohl eine ebene als auch eine gekrümmte Gleitbahn. Häufig ist der rückwärtige Teil einer kombinierten Rutschung durchsetzt von Scherflächen, die steil in den Hang einfallen. Das Absinken des Hangmaterials zwischen diesen Scherflächen (oft verbunden mit einer leichten Rückwärtsrotation) führt zur Bildung eines Grabens, wodurch unterhalb liegende Hangteile in Form einer Translationsbewegung zum Abrutschen gebracht werden (DIKAU ET AL. 1996).

4.1.3.3 Translationsrutschungen (translational slides)

Translationsrutschungen sind Gleitungen eines Fels- oder Lockergesteinskörpers, die sich auf einer vorgegeben, präformierten Gleitbahn bewegen. Als präformierte Gleitfläche kann jede Heterogenitäts- oder Diskontinuitätsfläche in Frage kommen (Schicht-, Kluft-, Störungsflächen, etc.). Die Gleitflächen verlaufen relativ geradlinig und annähernd parallel

zur Hangoberfläche (RODER 2001). Heterogenitäts- oder Diskontinuitätsflächen können durch Grenzflächen zwischen Bodenhorizonten, zwischen Boden und anstehendem Gestein oder einer Schicht mit geringerer Scherfestigkeit entstehen, wie durch Störungs- und Verwerfungslinien. Translationsrutschungen können in Fels, Schutt und Bodenmaterial auftreten (vgl. Abbildung 11).

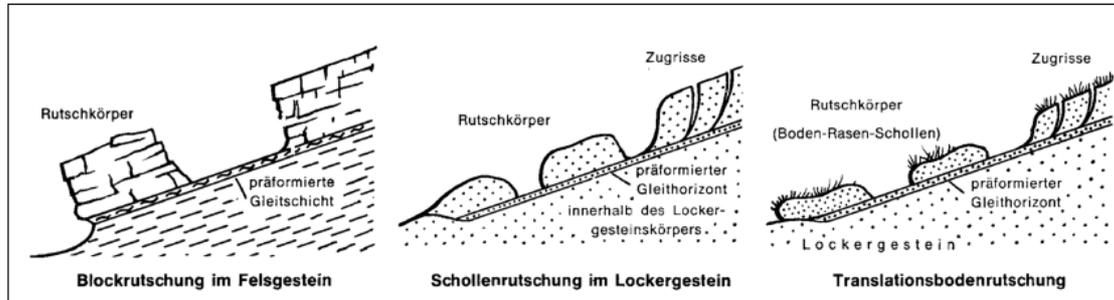


Abbildung 11: Translationsrutschungen (BUNZA ET AL. 1976)

Abhängig von ihrer Morphologie unterscheiden sich Translationsrutschungen wesentlich von Rotationsrutschungen: Risse an der Krone verlaufen in etwa horizontal und folgen mehr oder weniger der Hangkontur. Die Anbruchfläche ist in der Regel nicht bis wenig gekrümmt, verläuft ebenfalls hangparallel und ist im oberen Bereich meist steiler als im unteren Teil. Die Kopfregion – falls überhaupt vorhanden – bleibt relativ unzerstört. Ein Fuß ist aufgrund des Fehlens einer Auftriebszone, wie bei der Rotationsrutschung, nicht vorhanden. Es werden viele verschiedene Arten von Translationsrutschungen unterschieden, die wichtigsten davon sind Blockgleitung, Schollenrutschung (auch Translationsbodenrutschung genannt), Felsgleitung, Schuttrutschung, Schutt-/Erdstrom, Plattenrutschung und Torfrutschung.

Blockgleitungen (block slides) finden sich oft als Teil einer kombinierten Rutschung. Diese treten häufig in stark gefestigten, gefurchten Tonen auf. Da die treibenden Kräfte einer Blockgleitung meist sehr groß sind, ist eine geringe Neigung der basalen Gleitfläche ausreichend (DIKAU ET AL. 1996).

Schollenrutschungen (slab slides) treten in kohärentem, feinkörnigem Boden auf einer präformierten Gleitfläche auf, die sich entweder im Boden selbst befindet, oder die Grenzfläche Boden zu anstehendem Gestein ist. Die Beschaffenheit der Gleitfläche (hangparallel, seicht und glatt) bringt es mit sich, dass die Rutschmasse als einheitlicher Körper abgleitet und nur wenig deformiert wird (DIKAU ET AL. 1996).

Felsgleitungen (rock slides) treten in relativ monolithischen Gesteinsmassen auf. Die Morphologie von Felsgleitungen kann sich je nach Muttergestein, Ausmaß des Auseinanderbrechens von bewegtem Material und Hangneigung stark unterscheiden. Weiters unterscheiden sie sich durch die Art der Bewegung. Bei rascher Bewegung kann das gesamte Material sehr schnell zerbrechen und die Felsgleitung wird dadurch häufig zu einem Sturzstrom oder einer Mure (DIKAU ET AL. 1996).

Translationale Rutschungen von Schutt oder bruchhaft zerlegten Trümmern werden *Schuttrutschungen* (debris slides) genannt. Aufgrund der geringen Kohäsion des Materials, wird dieses bei Bewegung stark verzerrt. Die Geschwindigkeit der Bewegung steigt mit der

Hangneigung und sinkt mit dem Tongehalt des Materials. Stehen große Mengen an Wasser zur Verfügung und begünstigt die Topographie ein Zusammenfließen von Schutt und Wasser, gehen Schuttrutschungen häufig in Muren über.

Ein *Schuttstrom/Erdstrom* (mudslide) setzt sich aus mehreren Bewegungen zusammen, genau genommen müsste er eigentlich als zusammengesetzte Massenbewegung bezeichnet werden: Im oberen Bereich des Schuttstroms oder Erdstroms befindet sich eine steile Rückwand, die durch Stürze, Rotations- oder Translationsrutschungen Schuttmaterial liefert. In Folge rutscht oder fließt das Material in einem oder mehreren steilen, länglichen oder lobenförmigen Kanälen weiter und wird in der flacheren Akkumulationszone am Fuß der Bewegung in Form von Schuttfächern abgelagert (RODER 2001).

Weiters gibt es unter den Translationsrutschungen so genannte *Plattenrutschungen* (sheet slides) und *Torfrutschungen* (peat slides, bog slides)

4.1.4 Driften (lateral spreading)

Mit dem Begriff Driften werden Massenbewegungen beschrieben, bei denen es zur lateralen Ausbreitung von kohäsivem Fels- oder Lockermaterial auf einer sich verformenden weicheren Unterlage kommt, wobei die basale Gleitfläche meist nicht deutlich erkennbar ist. Man unterscheidet zwischen Felsdriften und Schutt- bzw. Bodendriften.

4.1.4.1 Felsdriften (rock spreading)

Felsdriften ist die laterale Bewegung von Felsmassen, genauer gesagt die tief sitzende plastische Deformation von Felsmaterial, die zur Extension und in weiterer Folge zum Zerreißen dieser Felsmassen führt (RODER 2001).

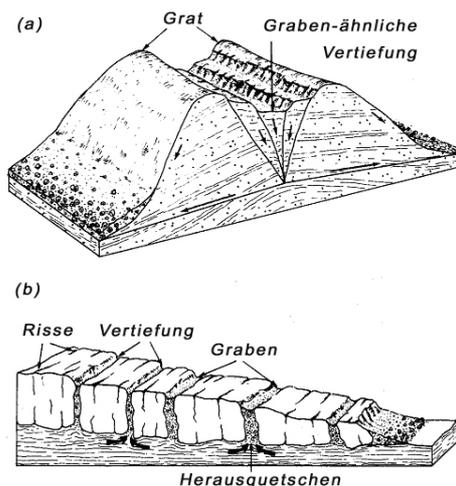


Abbildung 12: Blockdiagramm des (a) Driftens in einer homogenen Felsmasse und (b) Driftens in weichem Untergrund (DIKAU ET AL. 1996).

Felsdriftung kann nach Art und Lagerung der beteiligten Gesteinsmassen in zwei Formen differenziert werden: Einerseits gibt es die Felsdriftung in homogenen Felsmassen (d.h. massiven Gebirgsstöcken), wobei die bewegte Masse zerlegt und in Form einer Abfolge von Horst- und Grabenstrukturen (Doppelkämme) angeordnet wird. Andererseits existiert die Felsdriftung einer kohäsiven Felsmasse, welche auf weicherem, verformbarem Untergrund liegt (wie Kalk auf Schieferthon) und in Folge von plastischen Bewegungen des Untergrundes das "spröde" aufliegende Gesteinspaket zerbricht. Gräben und Absenkungen im Fels sowie ein Herausquetschen des weichen Materials sind die Konsequenz. Als Hauptursache beider Vorgänge werden tief liegende gravitative Vorgänge angesehen (DIKAU ET AL. 1996).

4.1.4.2 Schutt- und Bodendriften (*soil/debris spreading*)

Das Schutt- und Bodendriften (Differenzierung anhand der Korngröße) ist der Kollaps einer empfindlichen Schicht im Untergrund, auf den entweder ein Nachsacken der resistenteren darüberliegenden Bodenschichten oder das allmähliche Nachgeben im ganzen Bewegungsbereich folgt. Die absackenden Blöcke werden während der lateralen Bewegung auf der mobilen Basis häufig zerstört. Das Zerbrechen der bewegten Masse führt zur Bildung einer Horst und Graben-Struktur, die aus einzelnen Schollen besteht (DIKAU ET AL. 1996).

4.1.5 Fließbewegungen (*flows*)

Unter Fließbewegungen versteht man Massenbewegungen mit flüssigkeitsähnlichem Charakter (DIKAU ET AL. 1996). Bei den bewegten Massen handelt es sich um ein Feststoff-Wasser-Gemisch, das große Geschwindigkeiten erreichen kann.

4.1.5.1 Schlammstrom (*mudflow, soil flow*)

Unter dem Begriff Schlammstrom fasst man Bewegungen von feinem, relativ kohäsivem Lockermaterial (wie Ton) zusammen, die aufgrund ihrer Feinkörnigkeit weite Strecken zurücklegen können. Häufig entstehen Schlammströme als Ausbruch einer Fließmasse aus einer Rutschung, die sich in ihrem weiteren Verlauf des öfteren an ein existierendes Abflusssystem halten (RODER 2001). Bevorzugte Bedingungen für Schlammströme sind das Vorhandensein von übermäßig viel Wasser, von wenig konsolidiertem Material und von unzureichend geschütztem Boden (wie durch fehlende Vegetation) (DIKAU ET AL. 1996).

4.1.5.2 Mure (*debris flow*)

Der Massenbewegungstypus der Mure ist gekennzeichnet durch den plötzlichen Kollaps von Hangmaterial, wobei sich grobes und feines Material, vermischt mit unterschiedlichem Anteil von Wasser, in schlammiger Masse talwärts bewegt.

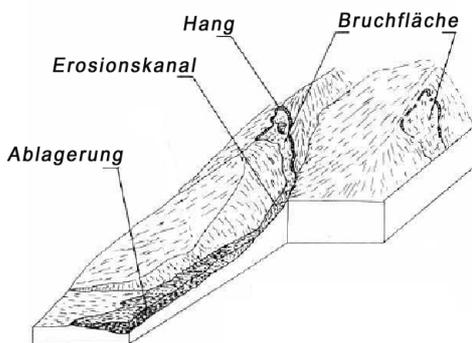


Abbildung 13: Mure
(DIKAU ET AL. 1996)

Dem Wasseranteil entsprechend ist der Übergang zum Flußgeschehen (Wildbach) fließend. Murgänge gehen normalerweise von steilen Hängen (Neigung 30° bis 40°) mit unverfestigtem Untergrund ab, besonders wenn keine Vegetationsdecke vorhanden ist oder diese entfernt wurde. Als Auslöser wird fast immer das Auftreten einer ungewöhnlich großen Menge von Wasser (Starkregenfälle, Schneeschmelze) wirksam.

4.1.5.3 Schichtfließen (*flow slide*)

Schichtfließen ist eine Fließbewegung in kohäsionslosem bis schwach gebundenem Lockermaterial (Feinsand, Schluff, Löß). Es wird meist durch einen plötzlichen übermäßigen Wasserzutritt, aber auch durch Erdbeben, laterale Entlastung sowie Auflast ausgelöst und kann durch Verflüssigung katastrophale Ausmaße annehmen (DIKAU ET AL. 1996).

4.1.6 Kriechbewegungen (*creep*)

Als Kriechen bzw. Gekriech bezeichnet man eine langsam fließende Verformung unter gleich bleibender ständiger Auflast. Kriechbewegungen treten praktisch an beliebigen Hängen auf, da es für sie keine kritische Hangneigung gibt (RODER 2001).

4.1.6.1 Saisonales Gekriech (*seasonal creep*)

Das saisonale Gekriech tritt in Lockermaterial auf und kann verschiedene Ursachen haben. Am bedeutendsten sind die zyklische Veränderung des Bodenwassergehaltes (primär gesteuert durch den Niederschlag), des Bodenvolumens (Temperaturwechsel) und der Bodenfeuchtigkeit (Frostwechsel). Charakteristisch für das saisonale Gekriech ist das kontinuierliche Abnehmen der Bewegung mit zunehmender Bodentiefe, wobei es in etwa 1 m Tiefe meist überhaupt zum Stillstand kommt (RODER 2001).

4.1.6.2 Zufälliges Gekriech (*random creep*)

Zufälliges Kriechen nennt man die zufallsbedingte, kurzfristige Bewegung von Bodenpartikeln, ausgelöst durch beispielsweise das Umfallen von Bäumen oder die Tätigkeit von Bodentieren. Die Bodenpartikel bewegen sich in die entstandenen Hohlräume, ein Vorgang der an tieferen Hangteilen aber rasch wieder zum Erliegen kommt (RODER 2001).

4.1.6.3 Permanentes Gekriech (*permanent creep*): Sackungen

Im Unterschied zum saisonalen Gekriech betrifft das permanente Kriechen tiefer liegende Bodenschichten und kann auch im festen Fels auftreten. Primär wird es von den Auswirkungen der Schwerkraft verursacht, indem auf tiefer liegende Bodenschichten konstanter Druck ausgeübt wird. Eine Form des permanenten Gekrieche ist die Sackung, die auch Talzuschub und Bergzerreißung genannt. Darunter ist ein tieferreichendes, durch Tektonik begünstigtes, gravitationsbedingtes Kriechen von Festgesteinen zu verstehen. Sackungen können nur in jenen Gebieten auftreten, in denen Hänge hoch genug sind, um ein ausreichendes Maß an Druck (durch Schwerkraft) auf den anstehenden Fels auszuüben und wo der Fels gleichzeitig fest genug ist, um nicht zur Gänze nachzugeben. Sackungen sind daher vor allem in übersteilten Tälern oder an Steilküsten zu finden (DIKAU ET AL. 1996).

4.2 Steuerungsfaktoren und Auslöser

Hangrutschungen sind immer das Ergebnis mehrerer, gleichzeitig wirkender Faktoren, welche das Hanggleichgewicht verändern. Massenbewegungen treten dann auf, wenn die den Hang aufbauenden Gesteine nicht mehr in der Lage sind, der Schwerkraft bzw. den angreifenden Scherspannungen Stand zu halten. Aus der Beziehung Scherfestigkeit – Scherspannung lässt sich der so genannte Sicherheitsfaktor ableiten, der die Grundlage für bodenmechanische Hangstabilitätsmodelle bildet (vgl. Kapitel 3.1.1). Es gibt nun Faktoren, welche die Scherfestigkeit herabsetzen und dadurch die Hangstabilität steuern. Sie werden deshalb häufig als Steuerungsfaktoren bezeichnet. Gewisse Auslöser bewirken eine Erhöhung der Scherspannung, wodurch sie das Hanggleichgewicht beeinträchtigen und in Folge eine Hangrutschung bewirken. Eine strikte Trennung zwischen Ursachen und Auslösern ist im Grunde nicht möglich, da die Faktoren direkt als auch indirekt wirken können. Diese Faktoren werden im Folgenden überblicksartig angesprochen.

4.2.1 Ursachen (Steuerungsfaktoren, interne Faktoren)

Steuerungsfaktoren – in der Literatur auch als interne Faktoren oder Ursachen bezeichnet - determinieren die Scherfestigkeit des Hangsubstrates. Eine Herabsetzung der Scherfestigkeit erfolgt durch eine Reduktion der Kohäsionskräfte, wobei eine herabgesetzte innere Reibung im Zusammenhang mit dem Porenwasserdruck oder mit einer Verminderung der Festigkeit des abgelagerten Materials ausschlaggebend ist (RODER 2001).

4.2.1.1 Morphologische Merkmale

Die Veränderung der Hanggeometrie wird aufgrund der dabei erfolgenden Erhöhung der Scherspannung, zu den Ursachen gezählt. Hingegen werden die morphologischen Gegebenheiten auch zu den Steuerungsfaktoren gerechnet, da die Hanggeometrie mit Höhe, Länge, Form, Neigung und Exposition eine wichtige Determinante der Stabilität ist. Sehr weite und steile Hänge sind prädestiniert für Instabilitäten, andererseits können aber auch flachere Hänge für bestimmte Arten von Massenbewegungen, zum Beispiel Fließbewegungen, anfällig sein (DIKAU ET AL. 1996).

4.2.1.2 Geologische, Tektonische und Bodenkundliche Faktoren

Es steht außer Zweifel, dass der geologische Untergrund den bedeutendsten Einfluss auf den Massenbewegungsprozess hat. Die Anfälligkeit eines Hanges für Massenbewegungen ist somit durch lithologische und stratigraphische Gegebenheiten, sowie durch die tektonische Geschichte vorgegeben. Tonhaltige Böden sind beispielsweise besonders instabil. Auch wasserwegsame Schichten auf tonig oder tonig-mergeliger Unterlage sind prädestiniert für ein Abrutschen. Vom tektonischen Standpunkt aus, führen Spalten, Fugen und Störungen unter anderem zu einer erhöhten Anfälligkeit für Instabilität (RODER 2001). Naturgemäß unterliegen die geologischen Gegebenheiten einer permanenten Veränderung. Verschiedenartige Prozesse tragen dazu bei, die physikochemikalischen Eigenschaften des Materials zu modifizieren und damit dessen Scherfestigkeit zu vermindern.

4.2.1.3 Verwitterung

Erst mit der einhergehenden Materialbereitstellung kann eine Gefährdung entstehen, daher spielt die Verwitterung eine zentrale Rolle bei der Entstehung von Massenbewegungen. Unter den Begriff Verwitterung fallen eine große Anzahl physikalischer und chemischer Prozesse, wie zum Beispiel Tau- und Gefrierprozesse oder Trocknungs- und Befeuchtungswechsel, die eine Zerlegung und Auflockerung des Substrates bewirken und folglich zu einer Veränderung des Wasserregimes (Erhöhung von Wassergehalt und Porenwasserdruck) führen (RODER 2001).

4.2.1.4 Klimatische und Hydrologische Faktoren

Neben Temperatur und Exposition ist der Niederschlag der bedeutendste klimatische Parameter. Die Tatsache, dass viele Massenbewegungen in Regenperioden auftreten, hat zu der Annahme geführt, dass der Niederschlag direkt als Auslöser für Hanginstabilitäten verantwortlich ist. Tatsächlich sind die möglichen Auswirkungen von Niederschlag auf die Hangstabilität aber vielschichtig: Niederschlag kann sowohl als Steuerungsfaktor als auch als Auslöser von Massenbewegungen eine Rolle spielen. Die Veränderung der hydrologischen Verhältnisse und des Wasserregimes bewirken zum Beispiel ein Ansteigen des Porenwasserdruckes sowie eine Herabsetzung der Oberflächenspannung und der Kohäsion feinkörniger Böden durch das Entweichen von Luft aus den Zwischenräumen der Partikel (RODER 2001).

4.2.2 Auslöser (Trigger, externe Faktoren)

Auslöser - auch externe Faktoren genannt - führen zu einer Erhöhung der Scherspannung und verursachen dadurch Hanginstabilität. Häufig lösen externe Prozesse aber auch Veränderungen interner Faktoren aus und wirken daher auch als Ursachen.

4.2.2.1 Hanggeometrie

Vorgänge wie die Unterschneidung von Hängen durch natürliche (wie Flüsse, Gletscher) und anthropogene Eingriffe (wie Straßenbau) sowie die Veränderung der Hanggeometrie etwa durch Gletscherschurf, Einschneiden eines Gewässers, menschliche Bautätigkeit oder Abbau von Lagerstätten führen zu Hangversteilung oder Hangerhöhung. Auf steileren oder höheren Hängen lastet insgesamt eine größere Scherspannung. Darüber hinaus wirkt höheres Gewicht auf die potentiellen Gleitflächen ein.

4.2.2.2 (Laterale) Entlastung des Hanges

Jede Entfernung von Material das dem Hang auflastet oder laterale Entlastung wie etwa durch fluviales Einschneiden, den Rückzug von Gletschern oder menschliche Aktivitäten, kann eine Reihe von internen Prozessen wie zum Beispiel laterale Ausbreitung des Hangsubstrates auslösen. Dies zieht die Entstehung von Rissen und Zerrspalten nach sich, wodurch wiederum die Wasserdurchlässigkeit des Hangmaterials erhöht wird, wodurch es zu einer langfristigen Aufweichung und damit einer Herabsetzung der Festigkeit des Materials kommt (SKEMPTON & HUTCHINSON 1969 IN RODER 2001).

4.2.2.3 *Belastung des Hanges*

Auflasten auf einen Hang, verursacht durch Regen, Lawinen, bestimmte Arten von Vegetation und anthropogene Eingriffe, wie etwa die Errichtung von Gebäuden, lassen die Scherbeanspruchung in die Höhe schnellen. In weiterer Folge kommt es häufig zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks, wodurch der Scherwiderstand ehemals zusammenhaltender Schichten beträchtlich herabsetzt wird (DIKAU ET AL. 1996).

4.2.2.4 *Tektonische Aktivitäten*

Tektonische Aktivität macht sich durch regionale Hebung oder Verstellung (*tilting*) bemerkbar. Dadurch kann es zur Hangversteilung kommen, welche zu Instabilitäten führt. Durch die Beanspruchung des Hangmaterials bewirken tektonische Aktivitäten indirekt eine Auflockerung, wodurch die Anfälligkeit für Bewegungen erhöht wird. Im aufgelockerten Material können Verwitterungsprozesse rascher und intensiver angreifen. Prinzipiell gehören tektonische Aktivitäten daher auch zu den Steuerungsfaktoren (RODER 2001).

4.2.2.5 *Seismische Aktivitäten, Schocks und Vibrationen*

Erdbeben, Explosionen oder Vibrationen (wie von Maschinen) sind häufig für das Auftreten von Massenbewegungen verantwortlich. Während eines Erdbebens kommt es im Rhythmus des Wellendurchgangs zu einer Vergrößerung des Porenwasserdrucks. Dies bewirkt eine Erniedrigung der effektiven Normalspannung und damit eine Absenkung des Bewegungswiderstands (SCHNEIDER 2004). Einerseits führen diese Prozesse direkt zu einer erhöhten Scherspannung, andererseits bereiten sie den Hang durch Auflösung des internen Zusammenhangs der Hangmassen sowie Auflockerung des Materials und das folglich leichtere Eindringen von Wasser auf Massenbewegungen vor. Plötzliche Schockeinwirkungen können darüber hinaus spezifische Veränderungen der Materialeigenschaften nach sich ziehen (DIKAU ET AL. 1996).

4.2.2.6 *Vegetation*

Die Auswirkung der Vegetationsbedeckung auf das Hanggleichgewicht ist zweideutig. Einerseits erhöht sie die Stabilität durch Reduktion des Einflusses klimatischer Faktoren auf den Hang (wie Schutz vor Niederschlag, Sonne und Wind), andererseits hat Vegetation auch einen negativen Effekt, da sie den Hang durch ihr Gewicht belastet und Baumwurzeln den Boden auflockern sowie die Infiltration erhöhen (RODER 2001). Abhängig von der Art der Vegetation und damit der Art des Wurzelsystems können sich Pflanzenwurzeln allerdings ebenso positiv auf die Hangstabilität auswirken.

4.2.2.7 *Starkniederschlag*

Abhängig von der Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens ist für die Auslösung einer Massenbewegung nicht nur die Niederschlagsintensität ausschlaggebend, sondern auch die Regenmenge bzw. die Niederschlagsdauer. Innerhalb eines kurzen Zeitraums niedergehende Starkniederschläge sind prädestiniert für die Auslösung von Muren oder Schlammströmen, während eine lange Regendauer eher Rutschungen und komplexe Massenbewegungen zur Folge hat (RODER 2001).

5 UNTERSUCHUNGSGBIET

Das ausgewählte Untersuchungsgebiet liegt in dem deutschen Bundesland Baden-Württemberg, an der Schichtstufenlandschaft (Albtrauf) der Schwäbischen Alb. Das Gebiet ist durch die Universität Tübingen sehr gut erforscht und dokumentiert. Im Rahmen des Projektes „MABIS - Massenverlagerungen in Südwestdeutschland“ (BIBUS, TERHORST 2001), gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, wurden umfangreiche Untersuchungen an der Schwäbischen Alb durchgeführt, wodurch der Zusammenhang zwischen rutschungsbegünstigenden Faktoren und dem Prozess, als auch zwischen den Faktoren untereinander gut erforscht ist (TERHORST 2001). Es gibt eine Reihe von weiteren Forschungsarbeiten des Geographischen Institutes der Universität Tübingen zur Verbreitung, Datierung und geomorphologischen Kartierung der Massenverlagerung an der Schwäbischen Alb (KALLINICH 1999) sowie zum Formenschatz und Ursachekomplexe der Massenverlagerungen (BIBUS 1986), (TERHORST 2001). Neben diesen qualitativen Untersuchungen, wurden auch quantitative Arbeiten durchgeführt, wie die Entwicklung von Risikomodellen, Gefahrenkarten und statistischen Vorhersagemodellen (THEIN 2000), (WIEGANG 1996).

Aufgrund der guten Kenntnis der Massenbewegungen wurde dieses Untersuchungsgebiet ausgewählt, das es bei der Anwendung einer statistische/probabilistischen Methode notwendig ist, Lage und Typ von bereits aufgetreten Massenbewegungen zu kennen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Anwendbarkeit der Methode, deren Ergebnisse den vorhandenen, qualitativen Bewertungen gegenübergestellt und so die Aussagekraft des Modells überprüft werden kann.

5.1 Lage und Naturräumliche Einordnung

Die Schwäbische Alb ist neben dem Schwarzwald das zweite bedeutende Mittelgebirge in Baden-Württemberg und die größte Karstlandschaft Mitteleuropas. Sie erstreckt sich mit einer durchschnittlichen Breite von 40 km vom Hochrhein bei Schaffhausen bis zur Wörnitz im Nördlinger Ries über eine Gesamtlänge von annähernd 220 km. Ihre höchste Erhebung erreicht sie am Lemberg (Südwestalb) mit 1015 m.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind die Massenverlagerungen am Albtrauf der Schwäbischen Alb. Dieser ist die oberste und markanteste Sichtstufe der südwestdeutschen Schichtstufenlandschaft und trennt mit Hangneigungen von teilweise mehr als 45° und Höhenunterschieden von 250 m bis über 400 m das Albvorland von der Albhochfläche (KALLINICH 1999). Als ein Trauf wird in der Geomorphologie eine deutliche Kante bezeichnet, mit der die Stufenfläche in einen Stufenhang übergeht. Mit dem Albtrauf wird jedoch in der Literatur meist nicht nur die eigentliche Kante, sondern der gesamte Stufenhang an der Nordwestseite der Schwäbischen Alb bezeichnet. Daher ist mit der Bezeichnung Albtrauf der Hang der Juraschichtenstufe gemeint, dessen Kante und Oberhang von dem Weißjura gebildet wird (KALLINICH 1999).

Der Albtrauf erstreckt sich von Hochrhein im Südwesten bis zur Riespforte bei Donauwörth im Nordosten (THEIN 2000). Im Süden tauchen die Schichten des Albtraufs unter die jungen

Ablagerungen der Süßwassermolasse. Hier fließt die Donau am Südrand der Alb entlang und bildet die südliche Grenze. Hochfläche und Trauf der Schwäbischen Alb lassen sich weiterhin in die Südwestalb von Hochrhein bis Mössingen, in die Mittlere Alb bis zum Bernhardus bei Schwäbisch Gmünd sowie in die Ostalb bis zum Ries gliedern (vgl. Abbildung 14).

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf den Bereich der Mittleren Alb bis zur Reutlinger Alb (vgl. Abbildung 14). Das Gebiet ist rund 580 km² groß, schließt den Albtrauf zwischen Mössingen und Reutlingen ein und reicht im Norden bis nach Tübingen und im Süden bis Melchingen.

Die kräftige rheinische Erosion hat im Untersuchungsgebiet in Verbindung mit den geologischen und geomorphologischen Verhältnissen die Voraussetzungen für zahlreiche rezente Rutschungen geschaffen. Massenverlagerungen verschiedenster Art sind am Albtrauf ein weit verbreitetes Phänomen (THEIN 2000).

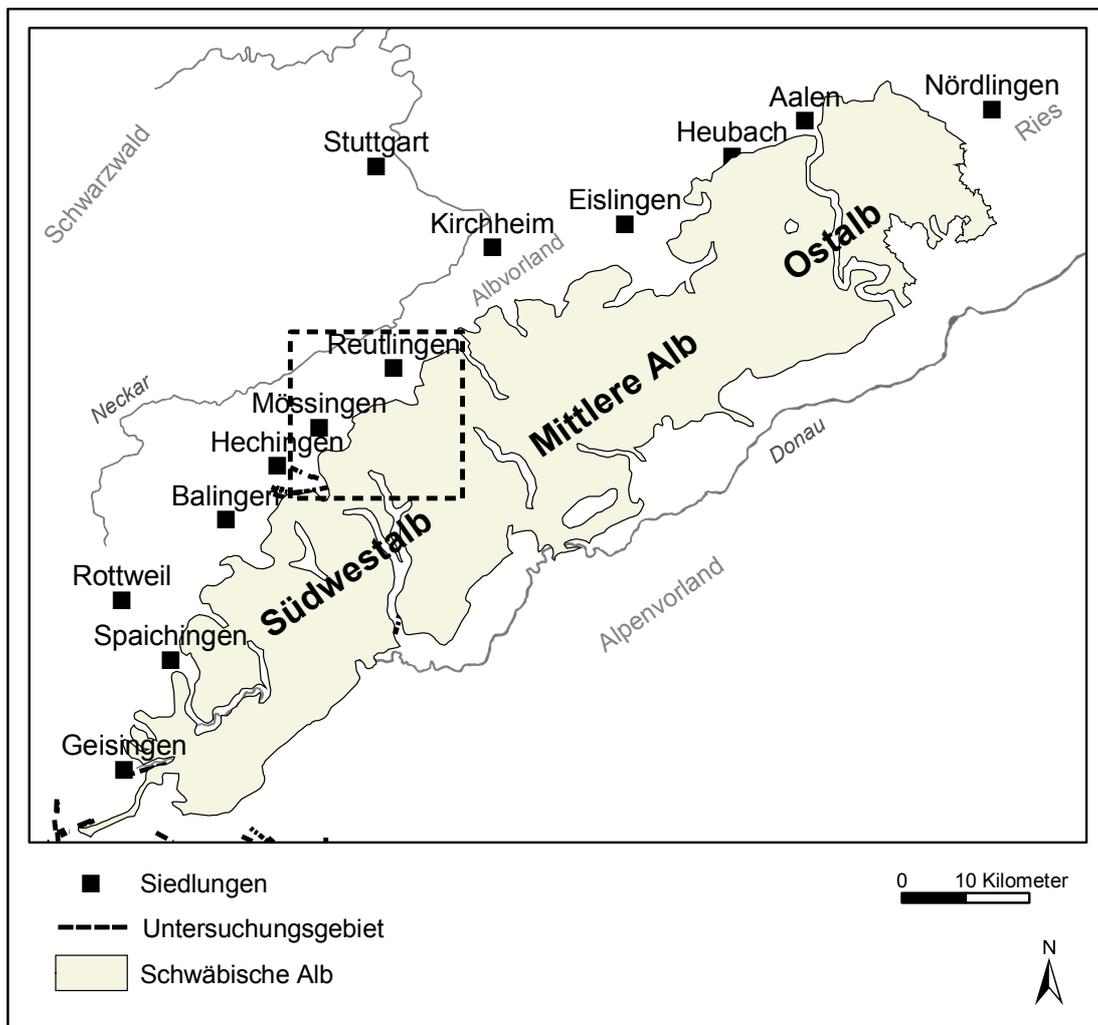


Abbildung 14: Lage des Untersuchungsgebietes am Trauf der Schwäbischen Alb (Albtrauf)

5.2 Geologie und Geomorphologie

Die Schwäbische Alb besteht ausschließlich aus jurassischen Gesteinen. Diese werden stratigraphisch und faziell in drei Abschnitte unterteilt, welche unterschiedlich stark verkarstungsfähig sind.

- Schwarzer Jura oder Lias: Diese älteste und tiefste Schicht tritt nur vor dem nördlichen Albrand an der Oberfläche auf, wo die oberen Schichten bereits abgetragen sind.
- Brauner Jura oder Dogger: Besitzt einen hohen Eisengehalt, der für die bräunliche Färbung verantwortlich ist. Die Schicht ist meist von mehr als 100 m Weißjura bedeckt.
- Weißjura oder Malm: Der Weißjura besteht hauptsächlich aus Kalksteinen (Oxford-Kalke), Mergeln (Oxford-Mergel) und teilweise aus Dolomiten. Die oberste Schicht der Weißjura ist der Stufenbildner des Albtraufs, welcher härter und verwitterungsresistenter als die darunter liegenden Schichten ist. Diese werden also schneller abgetragen und die darauf liegende härtere Schicht bricht immer wieder nach. Dadurch wird eine scharfe Kante, der bekannte Albtrauf, erzeugt.

Bei der Schwäbischen Alb handelt es sich tektonisch um eine Antiklinal-schichtstufenlandschaft (THEIN 2000). Die Schichten fallen durch die einseitige Heraushebung von Schwarzwald und Odenwald im Nordosten mit etwa 2° nach Südosten ein. Diese Schiefstellung ist auch für die unterschiedlichen mittleren Höhenlagen von Südwestalb (1000m), Mittlerer Alb (850m) und Ostalb (750m) verantwortlich. Eine Schichtstufe ist eine Landschaftsform, welche durch Verwitterung entsteht und sich bei flach einfallenden Sedimentschichten zwangsläufig durch den Wechsel von unterschiedlich verwitterungsfähigen (weichen und harten) Lagen bildet (vgl. Abbildung 15).

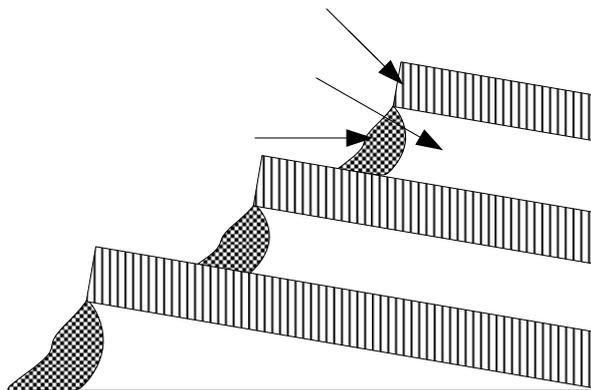


Abbildung 15: Schematischer Aufbau einer Schichtstufe mit Vorsprüngen, Ausräumzonen und Einbuchtungen.

Die harte Schicht wird langsamer abgetragen, die darunter liegende weichere Lage wird schneller verwittert, wodurch die harte Schicht unterhöhlt wird. Sie bricht nach und erhält so eine scharfe Kante, die immer weiter zurückwandert. Dadurch wird die nächste harte Schicht – auch Stufenbilder genannt - freigelegt, wo sich der gleiche Prozess mit der

darunter liegenden, weicheren Schicht wiederholt. So entsteht eine typische Schichtstufenlandschaft, die durch Rückwanderung gekennzeichnet ist. Der Stufenbilder an der Mittleren Alb ist der Massenkalk der Gesteinsfolgen des Weißjura, dessen helle Mergel und Oxford-Kalke und Kimmeridge-Kalke den Trauf und die Hochfläche der Schwäbischen Alb bilden.

Diese Stufenrückwanderung findet am Albtrauf besonders intensiv an der Mittleren Alb statt. Dort lässt sich auch eine relativ hohe Aktivität von Massenbewegungen beobachten. Während der Albtrauf an der Ostalb seit Jahrmillionen praktisch stationär ist, wurde er an der Mittleren Alb und der Südwestalb, besonders durch die Auswirkungen des sich einschneidenden Neckars und seiner Zuflüsse (rheinische Erosion) noch in jüngster Zeit stark zurückverlagert (KALLINICH 1999). Dort zeigt sich eine besonders starke Zerlappung des Traufs (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Hohenstauf (links) und Wackerstein bei Pfullingen (rechts)

5.3 Klima und Vegetation

Von besonderer Bedeutung für Massenverlagerungsprozesse ist die Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet. Diese passt sich wegen der Geländeabhängigkeit des Niederschlages weitgehend dem Stufenrelief an. Die Höhe der Niederschläge wird dabei stark von der vorherrschenden Großwetterlage beeinflusst. Die Leewirkung des Schwarzwaldes macht sich am Albtrauf bemerkbar, der mit durchschnittlichen Jahressummen von 700-900 mm, im Vergleich zum wesentlich tiefer gelegenen Bergland, benachteiligt ist. Im Frühsommer bringen jedoch vorherrschende Nord-West-Strömungen der Jurastufe - aufgrund der Stauwirkung - eine zusätzliche Steigerung der Niederschläge. Im Winter zählt die Schwäbische Alb infolge ihrer Höhenlage im Langzeitmittel 85 bis 100 Schneedeckentage (THEIN 2000).

Berücksichtigt man zusätzlich die durchschnittliche potentielle Jahresverdunstung, so muss die Schwäbische Alb dem humiden Klimabereich zugeordnet werden. Insgesamt wirken sich im Frühjahr bis Frühsommer die Schneeschmelze und die hohen Niederschläge, in Verbindung mit geringerer Verdunstung als im Albvorland, fördernd auf die Rutschungsintensität aus (THEIN 2000).

Die Zusammensetzung und Verbreitung der Vegetation wird hauptsächlich durch das Klima und Standortfaktoren, wie Böden, Nährstoffe, Wasserhaushalt, Relief und Luv- bzw.

Leelagen bestimmt. Am Albtrauf ist der Trockenbuchenwald mit Weißseggen, auf Felsstandorten Steinsamen-Eichenwald mit Flaumeiche und auf Schattenhängen der Platterbsen-Buchenwald verbreitet. Die Rutschungsgebiete mit zahlreichen kleinen Mooren, Vernässungsstellen und Quellen heben sich jedoch deutlich von der Zusammensetzung der übrigen Vegetation ab. Hier dominieren Feuchte liebende Arten wie Erlen, Eschen, Birken, Braunmoose und Seggen (THEIN 2000).

5.4 Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet

5.4.1 Typisierung und Morphodynamik

In den vergangenen zwei Jahrhunderten gab es am Albtrauf neun sehr große und spektakuläre Hangrutschungen, bei denen der Stufenhang auf einer Fläche von einem halben Quadratkilometer und mehr verwüstet wurde. Die Plettenberg Rutschung von 1851 bedeckte eine Fläche von 1,1 km² und die Hirschkopf Rutschung ein Fläche von 0,4 km². Bei der Rutschung am Hirschkopf gliedert der Stufenhang nach extremen Niederschlägen auf einer Breite von über 600 m ab (KALLINICH 1999).

Datum	Lokalität	Breite [m]	Länge [m]	Fläche [km ²]	Volumen [Mio. m ³]
14.05.1787	Ortenberg (Ratshausen)	-	-	0,6	-
07.02.1789	Ortenberg (Ratshausen)	-	-	0,5	-
03.03.1805	Greut (Hausen/Fils)	500	>130	0,1	-
05.10.1851	Plettenberg (Ratshausen)	1000	800	1,1	-
01.07.1953	Bachzimmer	150	150	0,02	0,065
17.10.1960	Bronner Mühle	100	70	0,01	0,2
16.06.1965	Achalm	300	500	0,11	1
16.08.1972	Irrenberg	600	900	0,31	-
12.04.1983	Hirschkopf (Mössingen)	600	1000	0,4	6

Tabelle 6: Verzeichnis der bedeutendsten historischen Rutschereignisse am Albtrauf (KALLINICH 1990).

Aber nicht nur die spektakulären Jahrhundertereignisse, bei denen in der Vergangenheit der Stufenhang in einer Breite von mehreren hundert bis tausend Metern in Bewegung geraten ist, bedrohen den Hang einschließlich Forst, Straßen, Waldwegen und gegebenenfalls Siedlungen. Viel häufiger sind kleinflächige Massenverlagerungen, die am bewaldeten Hang nicht sofort augenscheinlich sind.

Die hohe Anzahl dieser kleinen Rutschungen ist aber ein deutlicher Indikator dafür, dass der Stufenhang vielerorts instabil ist. Nach der Klassifizierung von VARNES (in BIBUS, TERHORST 2001) kann der Haupttypus der Hangrutschungen als *Slump-Earth-Flow*, einer Kombination von Gleit-, Sturz, Kriech- und Fließbewegung, bezeichnet werden. Die Massenverlagerungen am Albtrauf können in folgende zwei Klassen unterteilt werden (KALLINICH 1999):

- *Rezente aktive Bereiche*, welche durch die Schäden an Vegetation, Böden und Wegen zu erkennen sind. Diese Bereiche sind hauptsächlich als *Translationsgleitungen und Fließungen* zu typisieren.
- *Hangabsätze, Stufen und Leisten* die durch *Rotationsgleitungen* entstanden sind, wobei traufnahe Bereiche der Albhochfläche im Verband abgerutscht sind. Fast alle dieser Gleitschollen sind heute stabil, rezente Aktivitäten sind nur im Unterhang an übersteilen Bereichen zu finden.

Die meisten dieser Rotationsrutschungen entstanden während dem Pleistozän. Dies unterstreicht die Wichtigkeit von klimatisch gesteuerten Prozessen, welche höchst wahrscheinlich mit dem schmelzenden Permafrost verbunden waren.

Rezente und subrezente Rotationsbewegungen treten besonders im Bereich der Mittleren Alb auf, wo die aktiven Hangbereiche oft auf den pleistozänen Hangbereichen zu finden sind. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen diesen sekundären Bewegungen und den pleistozänen Rotationsblöcken (BIBUS, TERHORST 2001).

Ein für die Jurastufe typischer Rutschhang ist jener der 1983 durch die Hirschkopfrutschungen entstanden ist. Es handelt sich um ein sehr altes Rutschgebiet das durch die Bewegungen von 1983 reaktiviert wurde (BIBUS 1986).



Abbildung 17: Rezente Massenverlagerung (links) und Verkarstung (rechts) am Albtrauf bei Mössingen

In den Untersuchungen der Universität Tübingen wurden mehr als 650 Rotationsrutschungen an der Schwäbischen Alb identifiziert (KALLINICH 1999), (BIBUS, TERHORST 2001). Ein Teil dieser Hangrutschungen steht durch die Gefährdungskarten aus der Dissertation über Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb (THEIN 2000) für die Untersuchung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung (vgl. Abbildung 19).

Diese Hangrutschungen sind in zwei kleineren Bereichen bei Jungingen und Reutlingen erfasst, welche vom ausgewählten Gebiet der vorliegenden Arbeit eingeschlossen sind.

Mit Hilfe der Rutschanfälligkeitsbeurteilung sollen insbesondere jene Bereiche beurteilt werden, für die keine Informationen über Hangrutschungen vorliegen, also zwischen den von THEIN (2000) untersuchten Hangrutschungsgebieten und über diese hinaus.

Die vorliegenden Rutschungen bestehen zu rund zwei Drittel aus pleistozänen Rotationsschollen, der Rest besteht aus rezenten Rutschungen. Im Durchschnitt beträgt die Fläche aller 72 kartierten Rutschungen rund $0,03 \text{ km}^2$, wobei meist Größen zwischen $0,02 \text{ km}^2$ und $0,04 \text{ km}^2$ überwiegen. Auffällig ist eine einzige rezente Rutschung, welche eine Fläche von $0,4 \text{ km}^2$ einnimmt. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Größenverteilung der Rutschungen im Untersuchungsgebiet.

Pleistozänen Rotationsschollen sind durchschnittlich etwas kleiner als die rezenten Rutschungen, die meisten haben eine Größe von $0,02 \text{ km}^2$ bis $0,04 \text{ km}^2$. Die rezenten Rutschungen sind im Durchschnitt $0,04 \text{ km}^2$ groß. Der Grossteil der rezenten Rutschungen ist jedoch kleiner als $0,01 \text{ km}^2$. Auffallend sind innerhalb der rezenten Rutschungen zwei große Massenbewegungen mit $0,2 \text{ km}^2$ und $0,4 \text{ km}^2$.

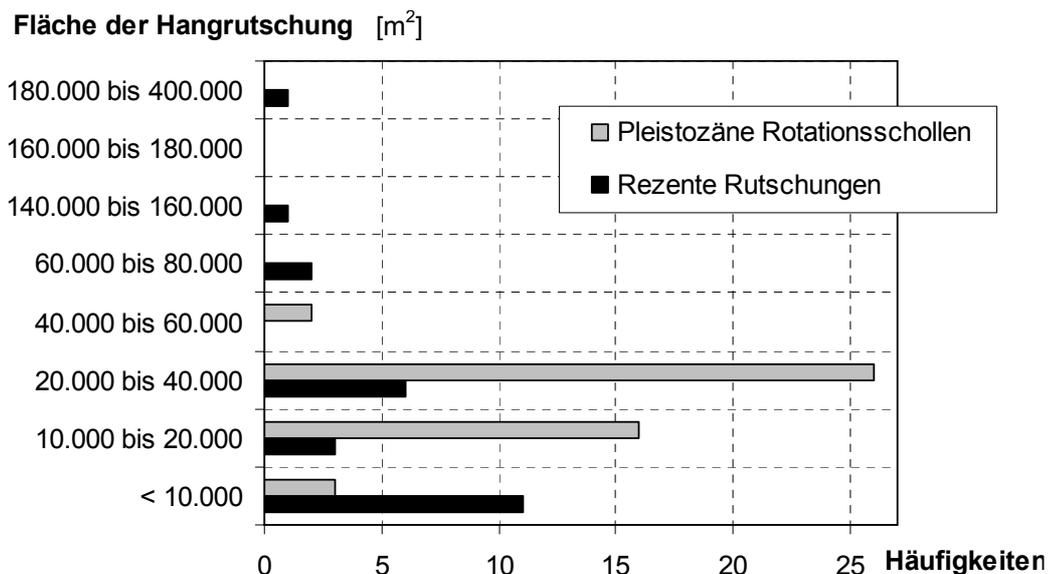


Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Rutschungen in unterschiedlichen Flächen-Klassen. Die meisten Hangrutschungen haben eine Fläche zwischen $0,02$ und $0,04 \text{ km}^2$.

Es handelt sich also um zwei Hangrutschungstypen, die unterschiedliche Entstehungsursachen haben. Für die unter klimatischen bedingten, pleizozänen Gleitschollen können keine Gefährdungskarten im Sinne der Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Ergebnisse erstellt werden. Eine Analyse könnte sich auf potentielle Verbreitungsgebiete für Rotationsschollen beschränken.

Für die Modellierung kommen daher lediglich die rezenten Rutschungen in Frage, welche innerhalb der letzten 200 Jahre aufgetreten sind und auch in diesem Zeitraum in Zukunft bei ähnlichen Bedingungen auftreten können. Diese Rutschungen können daher einer probabilistischen/statistischen Analyse unterzogen werden.

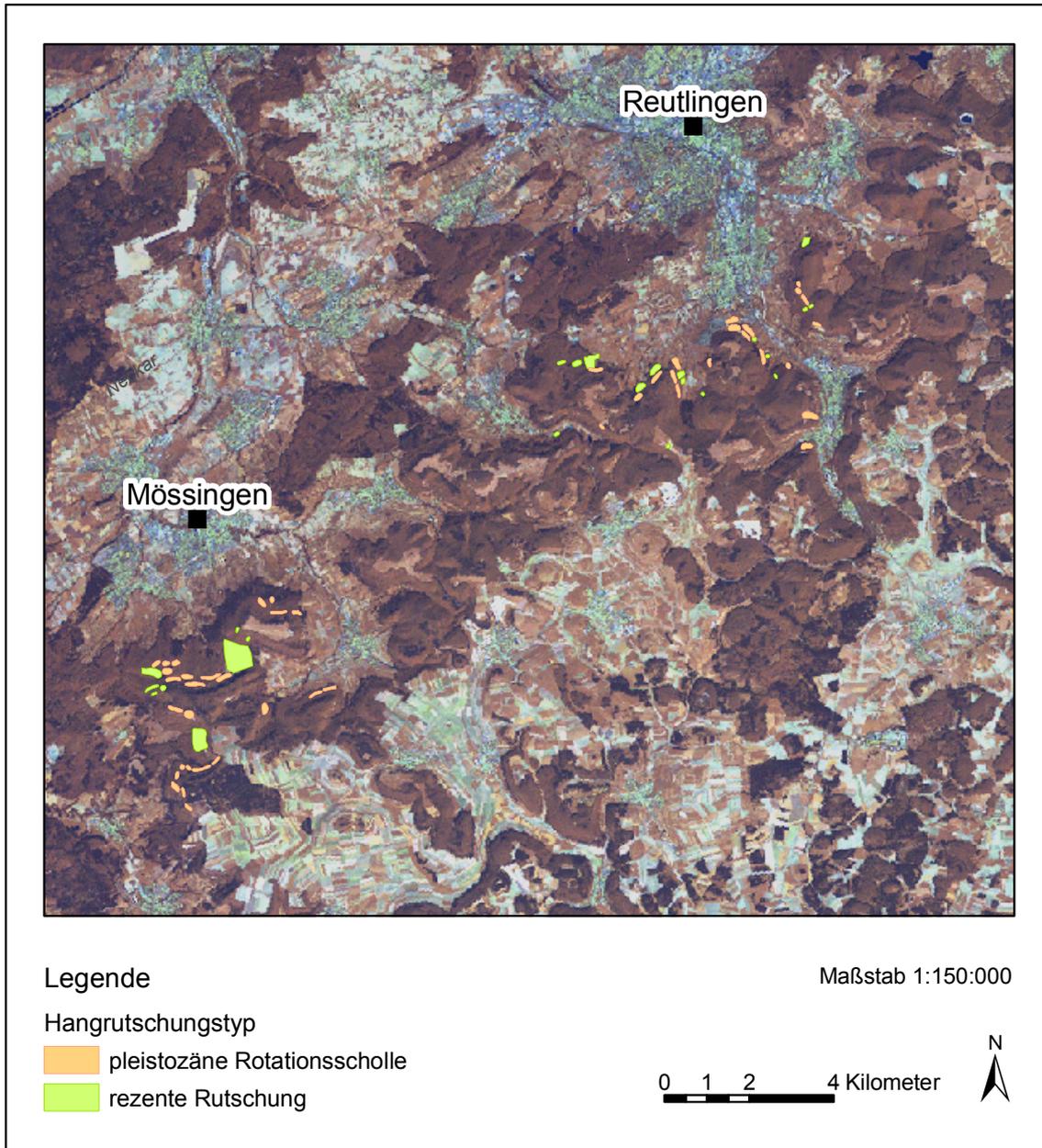


Abbildung 19: Die bekannten Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet, kartiert nach (THEIN 2000). Vom Gebiet bei Jungingen im Westen und vom Gebiet bei Reutlingen im Osten standen Kartierungen von rezenten und pleistozänen Hangrutschungen zur Verfügung.

5.4.2 Steuerungsfaktoren

Die *geologischen Verhältnisse* gelten als Primärursache der Massenbewegungen. Am Albtrauf sind, aufgrund der Wechsellagerung wasserdurchlässiger Kalksteine und Hangschuttmassen mit wasserstauenden Tonen sowie Mergeln, günstige Voraussetzungen für Hangrutschungen gegeben. Die Schwäbische Alb trägt deshalb auch den Namen „Riese auf tönernen Füßen“. Außerdem spielt das plastische Verhalten, der Verwitterungsgrad der Gesteine, fossile Rutschmassen, geohydrologische Bedingungen und die Tektonik eine wesentliche Rolle im dem Prozess.

Verwitterung kann die ansonsten stabil gelagerten Tone im oberflächlichen Bereich in aufgelockerte tonige Hanglehme umwandeln. Bestimmte Tone gehen bei Durchfeuchtung in einen plastischen Zustand über, wodurch die Scherfestigkeit stark herabgesetzt wird. Die Weißjurakalksteine weisen zum Teil eine hohe Zerklüftung auf.

Weiters sind die fossilen Rutschmassen mit ihrer gestörten *Hydrologie* ein wesentlicher Steuerungsfaktor. Es kommt teilweise zu diffusen Hangentwässerungen, das Wasser dringt an anderen Stellen in den Untergrund ein. Hangabwärts kann sich dadurch ein hoher hydrostatischer Druck aufbauen, der bei Überschreitung eines Druckpunktes die Hangrutschung auslöst.

Im Bereich von *tektonischen Störungen* ist die Klüftigkeit des Gebietes größer und somit die Versickerung höher. Entlang dieser Wasserleitbahnen kann eine intensive Verwitterung stattfinden und tiefe Gesteinsschichten werden mit Wasser versorgt.

Das Relief gehört wegen seines Einflusses auf Klima, Abfluss, Erosion und Verwitterung zu den wichtigsten Steuerungsfaktoren von Hangrutschungen. Die Instabilität eines Hanges hängt von dem Verhältnis zwischen bewegungshemmenden und bewegungsfördernden Kräften ab. Die Scherfestigkeit ergibt sich als stabilisierende Kraft aus der materialabhängigen inneren Reibung und der Kohäsion an einer potentiellen Scherfläche. Diese wirkt der rutschungsfördernden Scherkraft entgegen, die in der Höhe und Neigung eines Hanges zum Ausdruck kommt. Ein gehäuftes Auftreten von fossilen und rezenten Hangrutschungen ist in den Hangneigungsklassen von 10 bis 30° ermittelt worden (THEIN 2000).

Ein wichtiger rutschungsauslösender Faktor ist die *Hangform*. Neben der Neigung haben konvexe Hangformen einen höchst signifikanten Einfluss auf den Rutschungsprozess. Dies ist auf den Zusammenhang zwischen Hangwölbung und dem lokalen Oberflächenabfluss zurückzuführen. Tiefenlinien stellen Leitlinien linearer Erosion dar. An der Schwäbischen Alb haben besonders junge und steile Kerbtäler häufiger rezente Rutschungen (THEIN 2000).

Ein wesentlicher Faktor sind die *hydrologischen Voraussetzungen*. Die Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb werden neben den geohydrologischen Verhältnissen, von Niederschlagsereignissen und dem Entwässerungssystem gesteuert.

Zwischen *Niederschlägen* und Rutschungshäufigkeit besteht ein indirekter Zusammenhang. Jahre mit einer erhöhten Rutschungstätigkeit weisen zumeist überdurchschnittliche, monatliche Niederschläge im Frühjahr und Sommer auf. Das Rutschereignis tritt meist mit wenigen Wochen Verzögerung auf, wenn der Untergrund wassergesättigt ist.

Die *Entwässerung* eines Gebietes hängt von seiner Lage im hydrologischen System sowie vom Vorhandensein von Quellen ab. Die rheinische Erosion hat im Untersuchungsgebiet zu einer starken Zerlappung geführt. Dieser Eingriff in die Gewässerläufe resultiert in einer relativ hohen Quelledichte. Die Quellerosion bewirkt das Aufweichen der tonreichen Schichten.

Ein weiterer wichtiger Faktor sind *anthropogene Eingriffe*. Im Stadtbereich Pfullingen und Liechtenstein/Unterhausen kommt es bei fortschreitender Bebauung der Hanglagen häufig zu Nutzungskonflikten mit potentiellen instabilen Bereichen. Durch Baumaßnahmen kam es in den letzten Jahrzehnten vermehrt zu kleineren Rutschungen. Die Hänge des Albtraufs werden hauptsächlich land- und forstwirtschaftlich genutzt, aber auch Straßen- und Forstwegebau sind von Bedeutung. Das Abholzen eines Hanges kann durch Erhöhung des Abflusses und Auslösen von Bodenerosion zu einer Verminderung der Hangstabilität führen. Im Verkehrswegebau wurden Rutschungen hauptsächlich durch Böschungsversteilung und Unterschneidung des Hangfußes ausgelöst (THEIN 2000).

6 MODELLENTWURF

6.1 Schematische Darstellung des Modells

In diesem Modell erfolgt die Beurteilung der Rutschanfälligkeit *indirekt* auf Basis mehrerer Steuerungsfaktoren, welche Hangrutschungen verursachen oder begünstigen. Die Beurteilung der Rutschanfälligkeit ist folglich eine *Multi-Kriterien-Beurteilung*. Die wesentlichen Phasen der Beurteilung sind demnach die Problemdefinition, die Selektion der Beurteilungskriterien, die Kriteriengewichtung, das Zusammenführen der Kriterien zum Kriterienergebnis, die Sensitivitätsanalyse² und schließlich das Abgeben einer Empfehlung in Form einer Gefährdungskarte. Abbildung 20 zeigt den übergeordneten methodischen Arbeitsfluss in den das Modell eingebettet ist (MALCZEWSKI 1999).

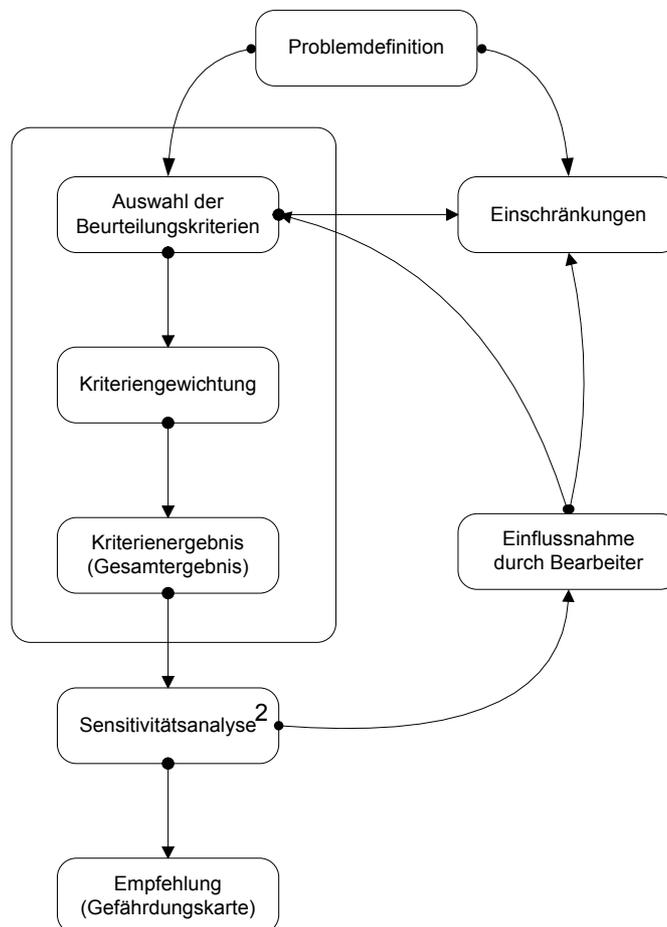


Abbildung 20: Beurteilung der Rutschanfälligkeit als Multi-Kriterien-Beurteilung, nach (MALCZEWSKI 1999).

² Die Sensitivitätsanalyse wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt, da dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

Durch das Modell, gilt es herauszufinden, in welcher Art und Weise die Faktoren bestmöglich kombiniert werden können, um zu einer integrierten Gesamtbeurteilung zu kommen. Dafür wurde die *Methode der Evidenzgewichtung (Weights of Evidence, WofE)* ausgewählt, welche folgendermaßen schematisiert werden kann (vgl. Abbildung 21).

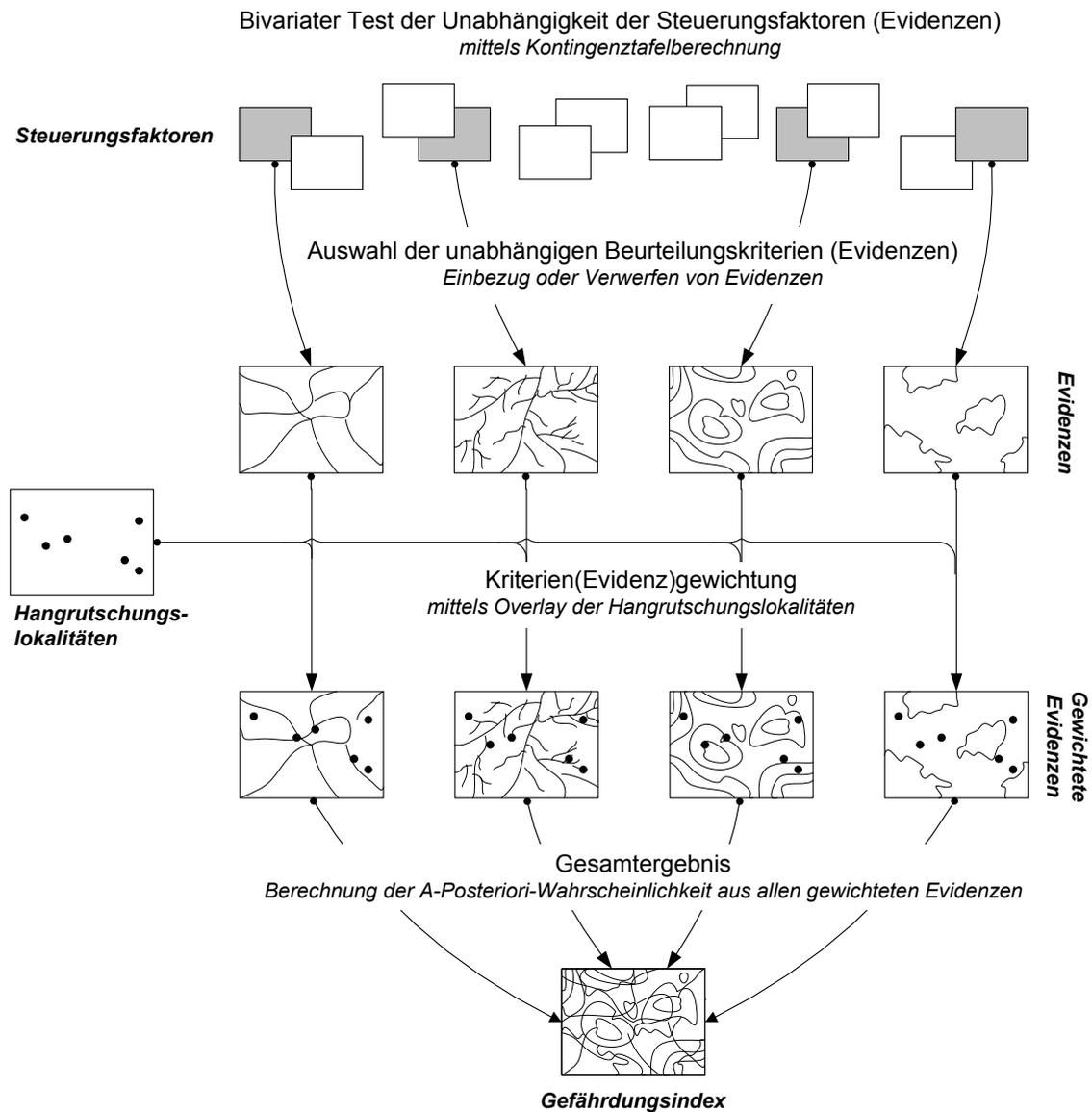


Abbildung 21: Vereinfachte, schematische Darstellung des Modells der Evidenzgewichtung: bestehend aus der Auswahl der unabhängigen Kriterien auf Basis des bivariaten Test der Unabhängigkeit der Steuerungsfaktoren, der Kriteriengewichtung mit Hilfe der Hangrutschungslokalitäten und der Verschneidung der einzelnen Evidenzen zum Gesamtergebnis.

6.2 Methodenwahl Evidenzgewichtung (Weights-of-Evidence)

Die Zieldefinition erfordert die Wahl einer quantitativen Methode, welche Aussagen über die Sicherheit oder Plausibilität der Beurteilung trifft. Diesem Anspruch genügen so genannte Favorisierungsfunktionen (vgl. Kapitel 3.2.4). Die Methode der Evidenzgewichtung (*Weights-of-Evidence*, *WofE*) nach BONHAM-CARTER (ET AL 1989, 2002) stützt sich auf eine Favorisierungsfunktion aus dem Bereich der Wahrscheinlichkeitstheorie, genauer gesagt, auf die bedingte Wahrscheinlichkeitsfunktion und den Wahrscheinlichkeitsverhältnissen (Odds Ratio). Weiters kommt bivariate Statistik zum Einsatz.

Die Evidenzgewichtung (*WofE*) wurde vom Kanadischen Geologischen Dienst (Geological Survey of Canada) in Zusammenarbeit mit dem Geologischen Dienst der USA (US Geological Survey) als GIS-Werkzeug programmiert (KEMP ET AL. 2001)³.

Ursprünglich stammt die Methode aus dem Bereich der quantitativen medizinischen Diagnostik. Sie wurde unter anderem von LUSTED (1968), ASPINALL, HILL (1983), SPEIGELHALTER, KNILL-JONES (1984) verwendet um bestimmte Symptome zur Vorhersage von Erkrankungen zu nützen. Von ASPINALL (1992) wurde sie in der Ökologie, von REBOH, REITER (1983) und MCCAMMON (1989) in der Geologie zur Vorhersage von Abbaustellen verwendet. Diese Studien hatten noch keine räumliche Charakteristik. Erst später wurde das Modell in die GIS-Umgebung übertragen und ermöglichte so die Einbindung von räumlicher Information zur Vorhersage. Von BONHAM-CARTER ET AL. (1989), AGTEBERG, BONHAM-CARTER (1990) und anderen wurde die Evidenzgewichtung in dieser Form im Bereich der explorativen Mineralogie angewendet. In jüngster Zeit erschließt diese auch das Gebiet der geomorphologischen Naturgefahren, insbesondere jenes von Hangrutschungen, Lawinen und Waldbränden.

Wie alle Methoden aus dem Bereich der Statistik und der Favorisierungsmodellierung basiert *WofE* auf der Grundannahme, dass *zukünftige Hangrutschungen unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen auftreten wie vergangene Hangrutschungen* im Untersuchungsgebiet. Sie setzt die Kenntnis von bereits aufgetretenen Hangrutschungen voraus. Die Hangrutschungslokalitäten fließen als so genannte *Trainingsdaten* in die Analyse ein. Weiters müssen die Steuerungsfaktoren, welche eine Hangrutschung ermöglichen oder begünstigen, als GIS-Daten erfasst sein. Diese werden in *WofE* auch als *Evidenzen* bezeichnet.

Mittels paarweiser Überschneidung der Hangrutschungslokalitäten (Trainingsdaten) mit jeweils einem Steuerungsfaktor (Evidenz) wird der statistische Zusammenhang zwischen den Klassen im Steuerungsfaktor und den Trainingsdaten gemessen und somit beurteilt, ob eine Evidenz für die aufgetretenen Hangrutschungen ausschlaggebend war oder nicht. Dies geschieht auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen, wodurch die signifikanten Klassen für jeden Hangrutschungstyp bestimmen und gewichtet werden können. Anders

³ Liegt als ArcView 3.x Extension namens ArcSDM (Spatial Data Modelling Using Weights of Evidence, Logistic Regression, Fuzzy Logic and Neural Network Analysis) vor.

ausgedrückt, werden jene Kombinationen, die in der Vergangenheit zu Hangrutschungen geführt haben, statistisch bestimmt. Eine Gesamtbewertung erfolgt anschließend durch Kombination aller gewichteten Steuerungsfaktoren nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitstheorie, dem BAYES Theorem. Dies ergibt einen Index für die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hangrutschungen, welche als Grad der Rutschanfälligkeit interpretiert werden kann (WANG ET AL. 2002).

Die Schritte bei der Evidenzgewichtung können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Prüfung der bedingten Unabhängigkeit für jedes Paar von Evidenzen hinsichtlich des bekannten Vorkommens von Hangrutschungen, was zur Ablehnung oder Einbezug von einigen Evidenzen führt.
- Berechnung von positiven und negativen Gewichten für jede Evidenz unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen.
- Reklassifizierung der Steuerungsfaktoren um die räumliche Beziehung zwischen den Faktorenkarten und den Hangrutschungslokalitäten zu maximieren.
- Verschneidung der gewichteten Faktoren sowie Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit und Unsicherheit.
- Anwendung eines Gütetests zur Überprüfung der gesamten Annahme über die bedingte Unabhängigkeit.

Es ist also möglich eine quantitative Vorhersage für Gebiete zu treffen, in denen bisher noch keine Hangrutschungen aufgetreten (oder bekannt) sind, gleichzeitig aber ähnliche oder gleiche rutschungsbegünstigende Faktoren vorliegen. Da für jeden Hangrutschungstyp andere Steuerungsfaktoren in unterschiedlichem Ausmaß ausschlaggebend sind, muss jeder Typ getrennt voneinander analysiert werden.

6.3 Theoretische Basis des Modells

Ein grundlegender Zugang der Evidenzgewichtung ist das Prinzip der A-Priori-Wahrscheinlichkeit und der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit nach BAYES'scher Theorie, welches in Kapitel 3.2.4.1 beschrieben wird. Diese werden in Form von logarithmischen Wahrscheinlichkeitsverhältnissen (Odds Ratio) berechnet. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der *WofE* sowie deren mathematische Basis erläutert.

6.3.1 Die Berechnung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit

Zu Beginn erfolgt die Schätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hangrutschungen lediglich auf Basis der bekannten Hangrutschungen (Trainingsdaten), ohne Einbezug weiterer Informationen (Evidenzen). Diese Wahrscheinlichkeit wird auch als A-Priori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet. Die gesamte Fläche des Untersuchungsgebietes t muss in einzelne Basiseinheiten (*unit areas*) mit definierter Fläche u eingeteilt werden. Die Gesamtanzahl der Einheiten im Untersuchungsgebiet ist demnach $T=t/u$. Nur in einem

bestimmten Anteil D dieser Einheiten sind bekannte Hangrutschungen aufgetreten. Die A-Priori-Wahrscheinlichkeit, dass in einer zufällig gewählten Einheit ein Hangrutschungsereignis auftritt, ist demnach

$$P(D) = D/T \quad (19)$$

In Wahrscheinlichkeitsverhältnissen, so genannten Odds Ratios (vgl. Kapitel 3.2.4.2) kann diese Wahrscheinlichkeit als A-Priori-Odds folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$O(D) = \frac{P(D)}{1 - P(D)} = \frac{D}{T - D} \quad (20)$$

Die A-Priori-Wahrscheinlichkeit wird auch für jede Evidenz berechnet und wird in den nachfolgenden Schritten eingesetzt (BONHAM-CARTER 2002).

6.3.2 Die Berechnung der Evidenzgewichte

Nun liegen Evidenzen (wie Hangneigung, Geologie oder Bodenform) vor, welche die A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(D)$ erhöhen oder verringern. Mittels paarweiser Überschneidung der Hangrutschungslokalitäten (Trainingsdaten) mit jeweils einem Steuerungsfaktor (Evidenz) wird der statistische Zusammenhang zwischen den beiden gemessen und somit beurteilt ob und wie signifikant eine Evidenz für die aufgetretenen Hangrutschungen ausschlaggebend war oder nicht. Ein Paar von Gewichten, W^+ und W^- , wird für jede Evidenz berechnet, welches abhängig von der räumlichen Beziehung zwischen den Trainingdaten und der Evidenz ist. Dies erfolgt unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen. Die entscheidenden Parameter sind die Präsenz einer Evidenz B oder das Fehlen dieser Evidenz \bar{B} , also eine binäre Information.

Die Präsenz und das Fehlen einer Evidenz können in Form von Schnittmengen ausgedrückt werden. So ist die Schnittmenge $B \cap D$ jener Bereich, wo eine Evidenz B und Trainingsdaten D vorhanden sind.

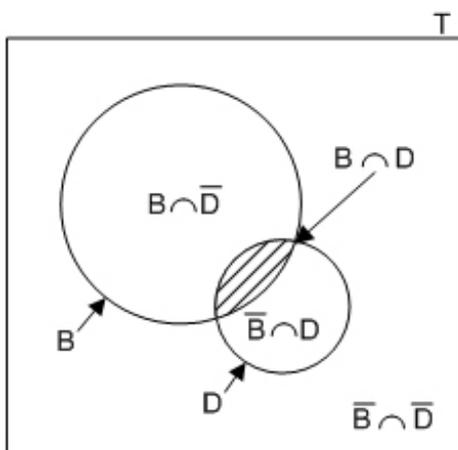


Abbildung 22: Das Konzept der Überlagerung von Trainingsdaten D und einer Evidenz B . Entscheidende Parameter sind dabei die Präsenz und das Fehlen einer Evidenz nach (BONHAM-CARTER 2002).

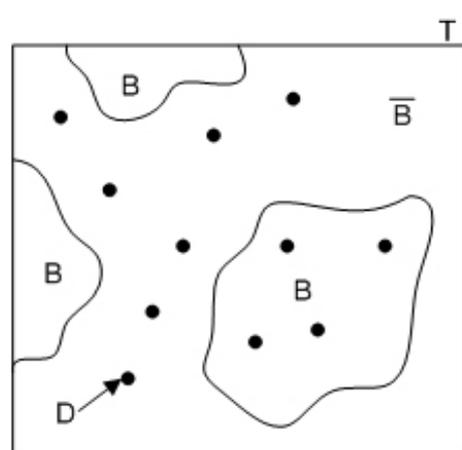


Abbildung 23: Venn Diagramm, zeigt die räumlichen Zusammenhang zwischen einer Evidenz B und den Trainingsdaten D , nach (BONHAM-CARTER 2002).

Diese Präsenz beziehungsweise das Fehlen der Evidenz wird nun zur Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit, nach BAYES die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit bezeichnet, herangezogen. Genau gesagt, werden folgende vier mögliche Wahrscheinlichkeiten berechnet, welche nach einer Verschneidung der Trainingsdaten (Hangrutschungen) und Evidenzen möglich sind (BONHAM-CARTER 2002):

Tabelle 7: Die vier möglichen Kombinationen nach der Verschneidung der Evidenzen und der Trainingsdaten (Hangrutschungen). N steht für die Fläche beziehungsweise Anzahl der Pixel.

	B Evidenz vorhanden	\bar{B} Evidenz nicht vorhanden
D Hangrutschung vorhanden	$N_1 (B \cap D)$	$N_2 (\bar{B} \cap D)$
\bar{D} Hangrutschung nicht vorhanden	$N_3 (B \cap \bar{D})$	$N_4 (\bar{B} \cap \bar{D})$

Für jede dieser Möglichkeiten wird nun eine bedingte Wahrscheinlichkeit (A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit) bestimmt:

Ad N_1) Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei *vorhandener* Hangrutschung D eine Evidenz B *vorhanden* ist

$$P\{B|D\} = \frac{P\{B \cap D\}}{P\{D\}} \quad (21)$$

Ad N_2) Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei *vorhandener* Hangrutschung D eine Evidenz \bar{B} *nicht vorhanden* ist

$$P\{\bar{B}|D\} = \frac{P\{\bar{B} \cap D\}}{P\{D\}} \quad (22)$$

Ad N_3) Die bedingte Wahrscheinlichkeit; dass bei *nicht vorhandener* Hangrutschung \bar{D} eine Evidenz B *vorhanden* ist

$$P\{B|\bar{D}\} = \frac{P\{B \cap \bar{D}\}}{P\{\bar{D}\}} \quad (23)$$

Ad N_4) Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass bei *nicht vorhandener* Hangrutschung \bar{D} eine Evidenz \bar{B} *nicht vorhanden* ist

$$P\{\bar{B}|\bar{D}\} = \frac{P\{\bar{B} \cap \bar{D}\}}{P\{\bar{D}\}} \quad (24)$$

Mit diesen bedingten Wahrscheinlichkeiten werden die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse *sufficiency ratio* (LS), *necessity ratio* (LN) (vgl. Kapitel 3.2.4.2) berechnet, welche ein Maß für die Präsenz oder Abwesenheit einer Evidenz sind.

$$LS = \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad \text{und} \quad LN = \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (25), (26)$$

LS drückt das Wahrscheinlichkeitsverhältnis aus, dass bei vorhandener Evidenz eine Hangrutschung vorhanden bzw. nicht vorhanden ist. LN beschreibt das gleiche Verhältnis bei fehlender Evidenz.

Bei *WofE* werden LS und LN für die Berechnung der Evidenzgewichte verwendet – mit der Besonderheit, dass der *natürliche Logarithmus der Wahrscheinlichkeitsverhältnisse* angewendet wird. Der Vorteil der logarithmischen Skala liegt darin, dass sie um ein Odds Ratio von $O=1$ (dies entspricht einem ausgewogenen Wahrscheinlichkeitsverhältnis von 50:50) und einer Wahrscheinlichkeit von $P=0,5$ zentrieren werden kann (vgl. Abbildung 24). Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit P , Odds Ratio O und dem natürlichen Logarithmus des Odds Ratios $\ln O$ (vgl. Tabelle 8). Die logarithmische Form der Odds Ratios wird auch als *Logits* bezeichnet.

P	O	$\ln O$
0	0	$-\infty$
0,1	1/9	-2,20
0,2	1/4	-1,39
0,4	2/3	-0,41
0,5	1/1	0
0,6	3/2	0,41
0,8	4/1	1,39
0,9	9/1	2,20
1	∞	∞

Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit (P), Odds Ratio (O) und Logits ($\ln O$). Ein Odds Ratio von 1 bedeutet daher eine Wahrscheinlichkeit $P=0,5$. Bei sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten nähert sich das Odds Ratio der Wahrscheinlichkeit an. Durch den natürlichen Logarithmus kann die Skala um ein Odds von 1 zentriert werden.

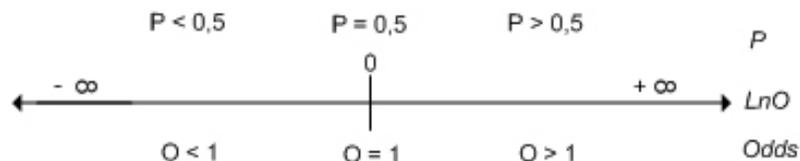


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit (P), Odds Ratio (O) und Logits ($\ln O$).

Das logarithmische Wahrscheinlichkeitsverhältnis LS wird zur Berechnung des Gewichtes verwendet, welches einen *positiven Zusammengang zwischen Trainingsdaten und der Evidenz* (aus einer Menge i an Evidenzen) ausdrückt (d.h. *Evidenz vorhanden*) es wird daher auch als *positives Gewicht* W^+ bezeichnet.

$$W_j^+ = \ln \frac{P\{B_i|D\}}{P\{B_i|\bar{D}\}} \quad (27)$$

Das logarithmische Wahrscheinlichkeitsverhältnis LN wird zur Berechnung des Gewichtes verwendet, welches einen *negativen Zusammengang zwischen Trainingsdaten und der Evidenz* (aus einer Menge i an Evidenzen) ausdrückt (d.h. *Evidenz nicht vorhanden*), daher wird es auch als *negatives Gewicht* W^- bezeichnet.

$$W_j^- = \ln \frac{P\{\bar{B}_i | D\}}{P\{B_i | D\}} \quad (28)$$

Da es sich um räumliche Daten handelt werden für die Berechnung die Flächen bzw. die Anzahl der Pixel herangezogen. Deshalb können Gleichung 27 und 28 auch folgendermaßen dargestellt werden :

$$W_j^+ = \ln \frac{\frac{N_1}{N_1 + N_2}}{\frac{N_3}{N_3 + N_4}} \quad \text{und} \quad W_j^- = \ln \frac{\frac{N_2}{N_1 + N_2}}{\frac{N_4}{N_3 + N_4}} \quad (29), (30)$$

Für jede Evidenzklasse wird sowohl das positive, als auch das negative Gewicht berechnet, beide können größer oder kleiner als Null sein (BONHAM-CARTER ET AL 1989).

Ist das positive Gewicht $W^+ > 0$, also positiv, und das korrespondierende negative Gewicht $W^- < 0$, also negativ, so bedeutet das, dass ein positiver Zusammenhang zwischen den Trainingsdaten und der Evidenz besteht. Die Evidenz tritt nicht zufällig bei einer Hangrutschungslokalität auf, sondern es besteht eine *positive Korrelation*. Je größer das positive Gewicht ist, desto besser eignet sich die Evidenzklasse als Vorhersager für Hangrutschungen.

Ist das positive Gewicht $W^+ < 0$ negativ und das korrespondierende negative Gewicht $W^- > 0$ positiv, so bedeutet das, dass eine *negative Korrelation* zwischen den Trainingsdaten und der Evidenz besteht. Die Evidenzklasse ist dann ein Indikator, dass *keine* Hangrutschung auftritt.

Diese negative Korrelation ($W^+ < 0$ und $W^- > 0$) ist nicht zu verwechseln mit *keiner Korrelation*. Sind die Evidenzen mit den Trainingsdaten *unkorreliert* – es besteht also keine Abhängigkeit zwischen den beiden – dann ist $W^+ = W^- = 0$.

In *WofE* wird ein weiteres Maß eingesetzt, um die Korrelation zu quantifizieren – der *Kontrast* C_w , welcher sich aus der Differenz des positiven und negativen Gewichtes ergibt. Demnach ist der Kontrast wie folgt definiert: $C_w = W^+ - W^-$

Um den Grad der Unsicherheit bei der Berechnung zu beurteilen, werden die Varianzen S^2 für das positive und negative Gewicht nach BISHOP ET AL. (in BONHAM-CARTER 2002) ermittelt. Die Varianz für den Kontrast ergibt sich aus der Summe der Varianzen der Gewichte (vgl. Gleichung 31, 32).

$$s^2(W^+) = \frac{1}{N\{B \cap D\}} + \frac{1}{N\{\bar{B} \cap \bar{D}\}} \quad \text{und} \quad s^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap D\}} + \frac{1}{N\{B \cap \bar{D}\}} \quad (31), (32)$$

6.3.3 Die Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit

Sind die Gewichte für jede Evidenzklasse berechnet, so werden diese nun verwendet, um eine flächendeckende Vorhersage von Hangrutschungen unter Integration aller Evidenzen zu treffen, genauer gesagt um eine Eintrittswahrscheinlichkeit zu berechnen. Dabei wird die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit wiederum unter Einsatz von Wahrscheinlichkeitsverhältnissen, den *Odds*, berechnet. A-Posteriori-Odds werden mit Hilfe der zuvor berechneten A-Priori-Odds (vgl. Gleichung 20) und LS und LN berechnet (AGTEBERG, BONHAM-CARTER 1990).

Die A-Posteriori-Odds für das Auftreten einer Hangrutschung D bei *vorhandener* Evidenz B werden wie folgt berechnet:

$$O\{D|B\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}} \quad (33)$$

Gleichermaßen werden die A-Posteriori-Odds für das Auftreten einer Hangrutschung D bei *nicht vorhandener* Evidenz \bar{B} folgendermaßen berechnet:

$$O\{D|\bar{B}\} = O\{D\} \cdot \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (34)$$

Wie bereits erwähnt, kommt in der *WofE* der natürliche Logarithmus für die Wahrscheinlichkeitsverhältnisse zum Einsatz, woraus sich aus den oben berechneten A-Posteriori-Odds die sogenannten A-Posteriori-Logits ergeben. Der natürliche Logarithmus wird auf beiden Seiten der Gleichungen 33 und 34 angewendet (BONHAM-CARTER 2002). Daraus ergibt sich in vereinfachter Schreibweise (Ersetzen mit W^+ und W^-) die folgenden beiden Ausdrücke:

Die A-Posteriori-Logits einer Hangrutschung D unter *vorhandener* Evidenz B werden berechnet mit:

$$\ln O\{D|B\} = \ln O\{D\} + W^+ \quad (35)$$

Die Berechnung der A-Posteriori-Logits einer Hangrutschung D bei *nicht vorhandener* Evidenz \bar{B} ergeben sich analog mit:

$$\ln O\{D|\bar{B}\} = \ln O\{D\} + W^- \quad (36)$$

Liegen mehrere Evidenzen B_n für die Modellierung vor, so werden diese in folgender Form nach den Regeln von BAYES integriert:

$$\ln O\{D|B_1 \cap B_2 \cap B_3 \cap \dots \cap B_n\} = \ln O\{D\} + \sum_{i=1}^n W^+ \quad (37)$$

bzw.

$$\ln O\{D|\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \bar{B}_3 \cap \dots \cap \bar{B}_n\} = \ln O\{D\} + \sum_{i=1}^n W^- \quad (38)$$

6.4 Modellannahmen und Einschränkungen

Um die Plausibilität von Ergebnissen beurteilen zu können, muss bekannt sein, unter welchen Bedingungen die Resultate erzielt werden. Ein wesentlicher Teil davon, sind die *Modellannahmen*, die vorab getroffen werden sowie die *Einschränkungen* des Modells (CHUNG, FABBRI 2005), (FABBRI ET AL. 2003).

6.4.1 Modellannahmen

Möchte man die Evidenzgewichtung anwenden, so müssen bestimmte Annahmen getroffen werden. Diese Modellannahmen ergeben sich aus statistischen Überlegungen, der generellen Abstrahierung der Realität in ein Modell sowie aus der Anwendung des BAYES Theorems, das bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit zur Anwendung kommt. Die folgenden Modellannahmen werden getroffen:

- *Annahme über das Auftreten von Hangrutschungen:* Die zukünftigen Hangrutschungen treten unter ähnlichen Bedingungen auf, wie jene in der Vergangenheit im gleichen Untersuchungsgebiet.
- *Annahme über die Eignung der Daten:* Die räumlichen Daten, welche die Steuerungsfaktoren für Massenbewegungen repräsentieren sind geeignet um zukünftige Hangrutschungsgefährdung zu beschreiben. Diese Annahme kann akzeptiert werden, wenn ein enger Zusammenhang zwischen den Faktoren und den Auslösern von Massenbewegungen gegeben ist.
- *Annahme der bedingten Unabhängigkeit der Evidenzen:* Die Kombination der Daten erfolgt unter der Grundannahme der bedingten Unabhängigkeit. Das BAYES Theorem, auch als Satz der totalen Wahrscheinlichkeit (vgl. Gleichung 6) bekannt, setzt voraus, dass die Evidenzen voneinander hinsichtlich des Auftretens von Hangrutschungen D unabhängig sind. Die Annahme der bedingten Unabhängigkeit kann für die Evidenzen B_1 und B_2 wie folgt formuliert werden:

$$P\{B_1 \cap B_2 | D\} = P\{B_1 | D\} \cdot P\{B_2 | D\} \quad (39)$$

Dadurch wird angenommen, dass kein Zusammenhang unter den Evidenzen in Bezug zu den Hangrutschungen besteht. Diese Annahme stellt im Grunde eine Vereinfachung dar, allerdings ermöglicht sie, dass die Evidenzen getrennt voneinander beurteilt werden können.

6.4.2 Einschränkungen

Aus den Modellannahmen sowie der Analyse der vorhandenen Beurteilungskriterien ergeben sich bestimmte Einschränkungen des Modells, welche in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen:

- *Einschränkung der Annahme über die Eignung der Daten* aufgrund der Datenlage: Die verfügbaren Daten stellen nur eine kleine Auswahl der für Massenbewegungen relevanten Geofaktoren dar. Daraus ergibt sich eine wesentliche Einschränkung der Aussagekraft der Rutschanfälligkeitsbeurteilung.
- *Einschränkung der Beurteilungskriterien auf unabhängige Steuerungsfaktoren (Evidenzen)*: Die Annahme über die bedingte Unabhängigkeit der Daten erfordert das Testen des Zusammenhangs der Steuerungsfaktoren und folglich das Verwerfen der abhängigen Faktoren (vgl. Kapitel 7.2).

6.5 Analyse der Steuerungsfaktoren

Für die Analyse können nur jene Faktoren miteinbezogen werden, die bereits flächendeckend vorliegen, oder mit vertretbarem Aufwand erstellt werden können. Dieser Umstand, der eine Vereinfachung eines sehr komplexen Prozesses auf wenige Parameter bedingt, führt unweigerlich zu qualitativen Einbußen im Ergebnis. Jene Daten, die für das Arbeitsgebiet zur Verfügung stehen, sind in der folgenden, deskriptiven Analyse näher beschrieben.

6.5.1 Geologie und Hydrogeologie

Die geologischen Verhältnisse gelten als Primärursache für Massenbewegungen. Dies wird dadurch verstärkt, dass sich in der Hangneigung und auch im Bodentyp die geologischen Verhältnisse widerspiegeln. Die Geologie stand in Form der Geologischen Übersichtskarte von Baden-Württemberg zur Verfügung, welche dem Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998), welcher vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg erstellt wurde, entnommen wurde. Die Karte (vgl. Abbildung 25 und 26) zeigen die großen geologischen Baueinheiten der Schichtstufenlandschaft (Trias und Jura) der Albhochfläche und des Albvorlandes mit 13 geologischen Einheiten sowie die hydrogeologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet.

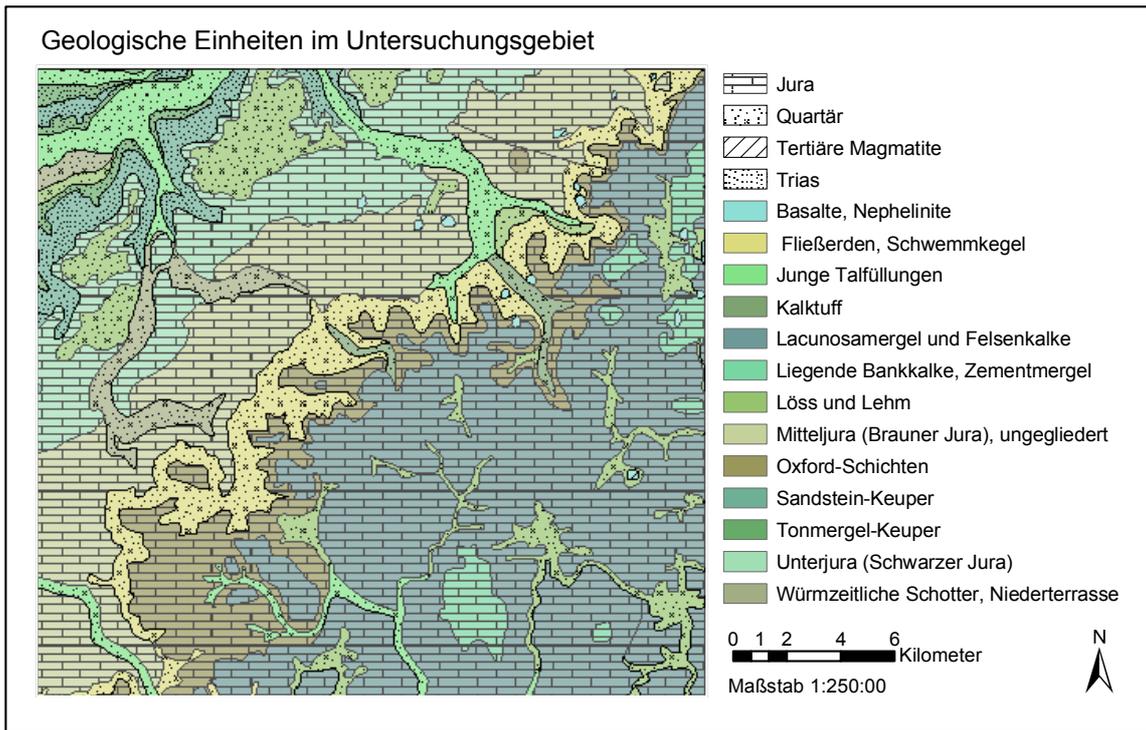


Abbildung 25: Geologische Einheiten aus dem Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998).

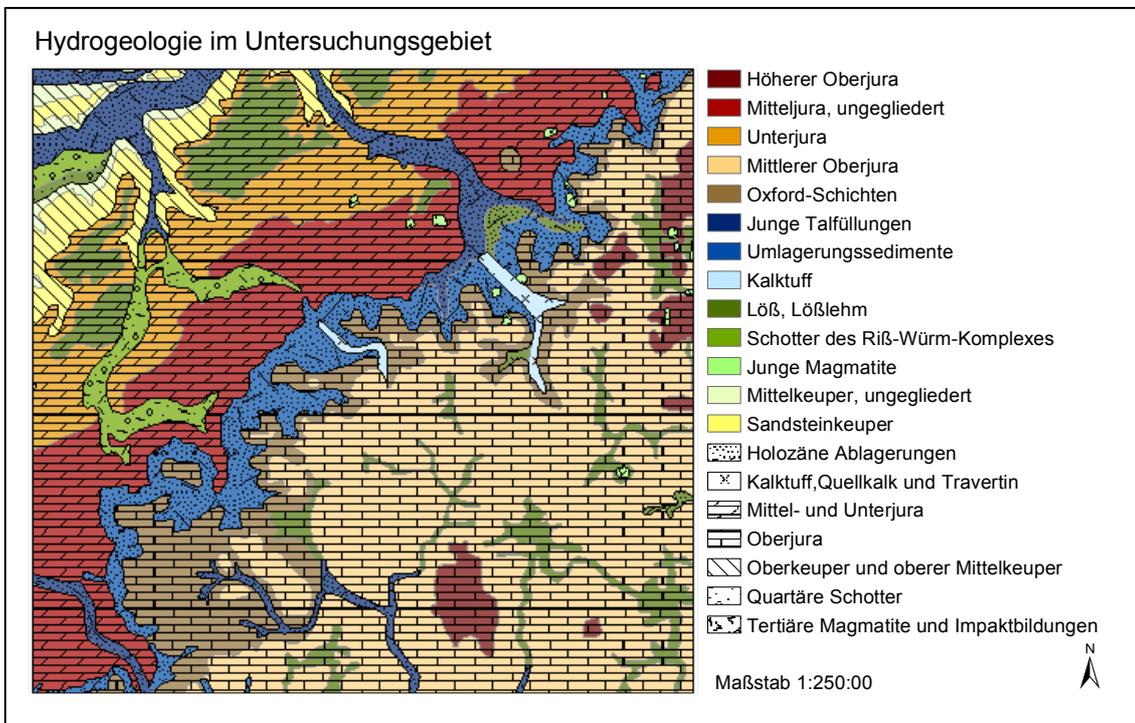


Abbildung 26: Hydrogeologie aus dem Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998). Unterjura = Schwarzer Jura, Mitteljura=Brauner Jura, Oberjura=Weißjura.

Die Traufkante ist eine wichtige morphologische Grenze im Aufbau der Weißjurastufe. Diese kann am ehesten durch die Grenze zwischen Schwarzer Jura/Brauner Jura und Weißjura repräsentiert werden. Die Weißjura enthält die Oxford-Kalke, welche als Stufenbilder wesentliche Bedeutung am Albtrauf haben. Diese Fazies-Grenze liegt durch die Grundwasserlandschaften des Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas vor und musste erst von ihrer Polygoneometrie in eine Grenzlinie umgewandelt werden. Da eine Linie ein Element ohne Ausdehnung ist, wurde eine kontinuierliche *Distanzoberfläche* erzeugt, welche die Entfernung von der Linie als Oberfläche darstellt. Das gewonnene Raster enthält in jeder Zelle die jeweilige euklidische Distanz zur Traufkante.

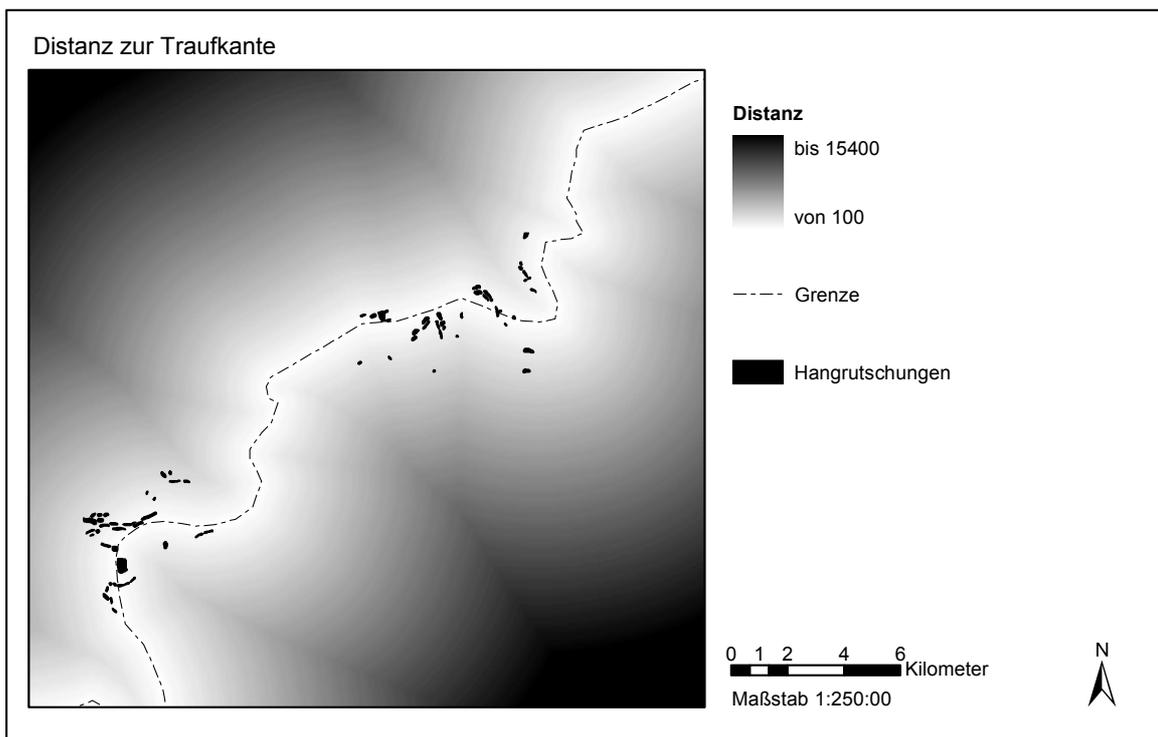


Abbildung 27: Distanz zur Traufkante, repräsentiert durch die Grenze zwischen Weißjura und Schwarzer Jura/Brauner Jura. Hangrutschungen treten in der unmittelbaren Nähe dieser Grenze auf (LGRB 1998).

6.5.2 Tektonik

Störungen sowie groß angelegte Störzonen bewirken eine Zerrüttung, Auflockerung und/oder eine Zerreibung des Gesteins, wodurch die Stabilität des Gesteinsverbandes verringert wird (GUSENBAUER 1999). Als tektonisches Element tritt eine Störung im Nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes auf.

Es gibt eine Reihe von Untersuchungen, welche eine Häufung von Massenbewegungen an Kreuzungsbereichen von Störungszonen (THEILEN-WILLIGE 2004) oder in Bereichen, in denen sich Störungszonen mit Flüssen überkreuzen, identifiziert haben (BRANDLMAYER in GUSENBAUER 1999).

Die Störungen wurden dem Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg entnommen. Weiters standen Daten einer strukturgeologischen Auswertung

(Lineationskartierung) von Satellitenbildern (Radar und LANDSAT ETM) zur Verfügung (THEILEN-WILLIGE 2005).

Bei der Lineationskartierung wird durch einen Experten die strukturelle geologische Situation erfasst, wobei potentielle Kluft-, Bruch- und Störungszonen auf geeigneten Bandkombinationen von Satellitenbildern und topographischen Daten identifiziert werden. Hangneigung und strukturelle geologische Ausgangsbedingungen stellen entscheidende Einflussfaktoren für Massenbewegungen dar. Insbesondere wurden bei der Lineationskartierung potentielle Bruch- und Störungszonen in Hanglagen erfasst (vgl. Abbildung 28), da diese als Initialflächen für Massenbewegungen in Betracht kommen (THEILEN-WILLIGE 2005).

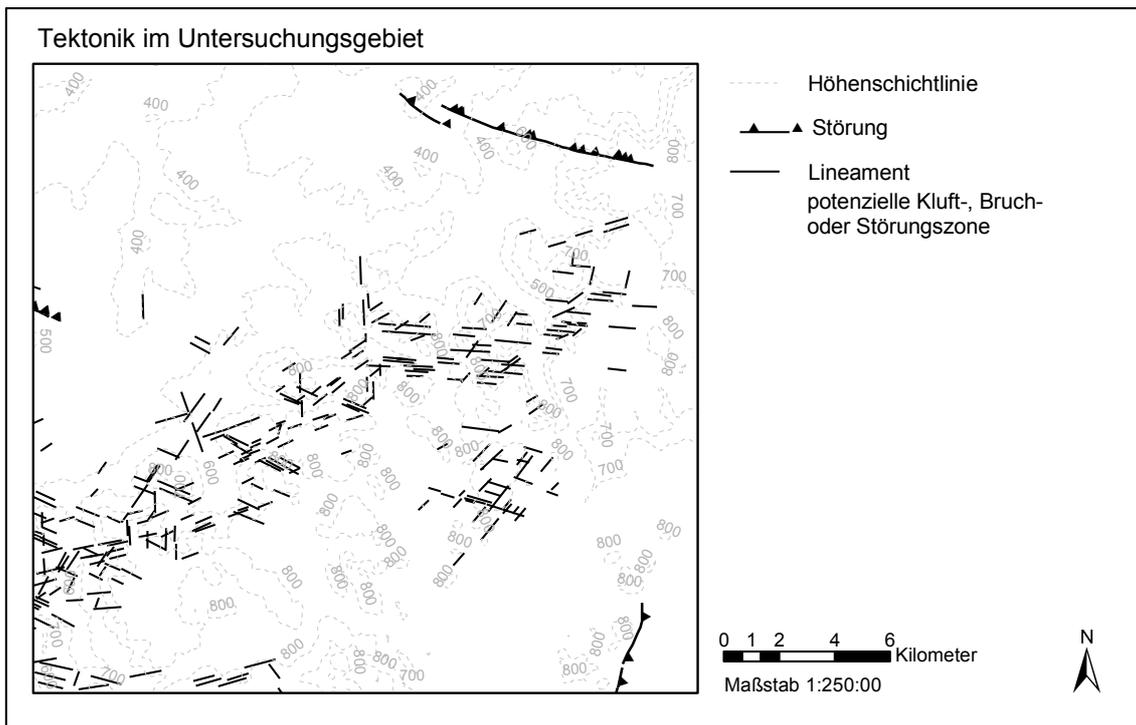


Abbildung 28: Störungen aus dem Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998) und Lineamente aus der strukturellen geologischen Auswertung (THEILEN-WILLIGE 2005).

Da Störungen und Lineamenten geometrisch als Linien erfasst sind, wurde – wie bei der Traufkante – eine kontinuierliche *Distanzoberfläche* erzeugt. Dadurch ist für jede Zelle die euklidische Distanz zu dem nächst gelegenen Lineament oder Störung bekannt (vgl. Abbildung 29).

Da besonders Kreuzungsbereiche von Bruch-, Kluft- oder Störungszonen als Initialflächen von Hangrutschungen in Frage kommen, ist auch eine lokal hohe Konzentration der Lineamente von Interesse. Daher wurde aus den Lineamenten eine kontinuierliche *Dichteoberfläche* berechnet. Damit kann die Verteilung und Konzentration der Lineamente in die Analyse einfließen. Bei der Generierung dieser Oberfläche wird berechnet, wo sich ein Lineament in Relation zu den anderen befindet. Um den Dichtewert einer Zelle zu erhalten, werden alle Linien die innerhalb eines definierten Suchradius fallen, aufsummiert und danach durch die Suchfläche dividiert (vgl. Abbildung 30). Eine hohe Dichte ist somit ein Indikator für eine starke Zerklüftung des Gebietes.

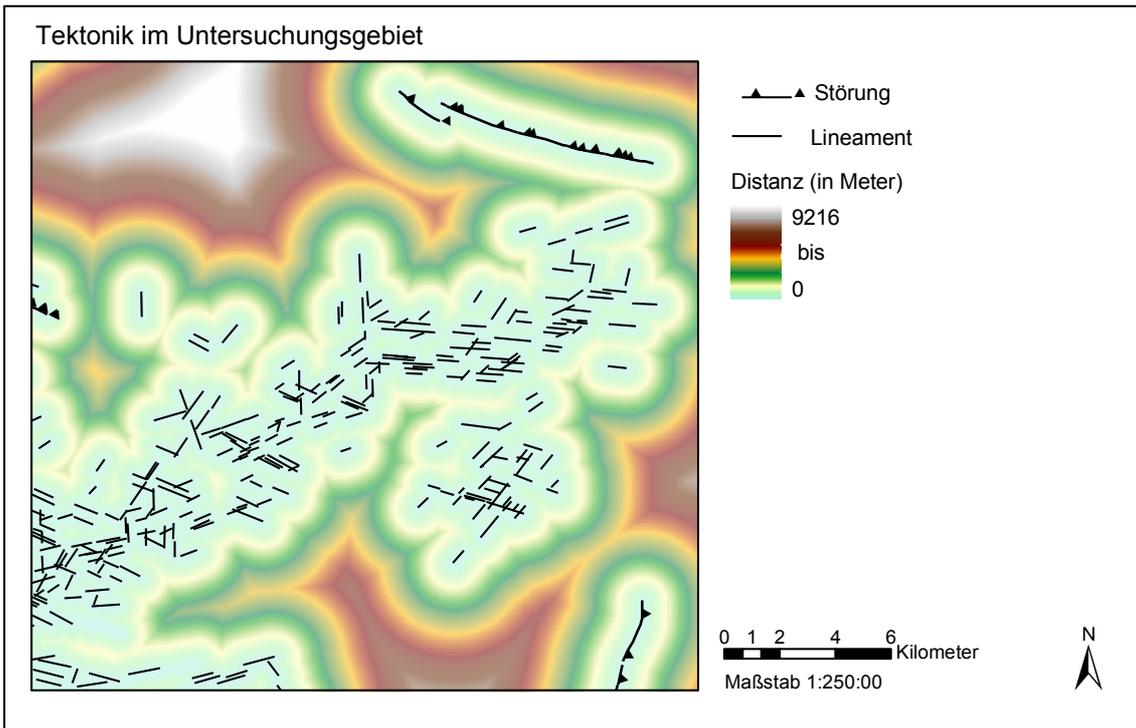


Abbildung 29: Kontinuierliche Distanzoberfläche erzeugt aus den Lineamenten und Störungen.

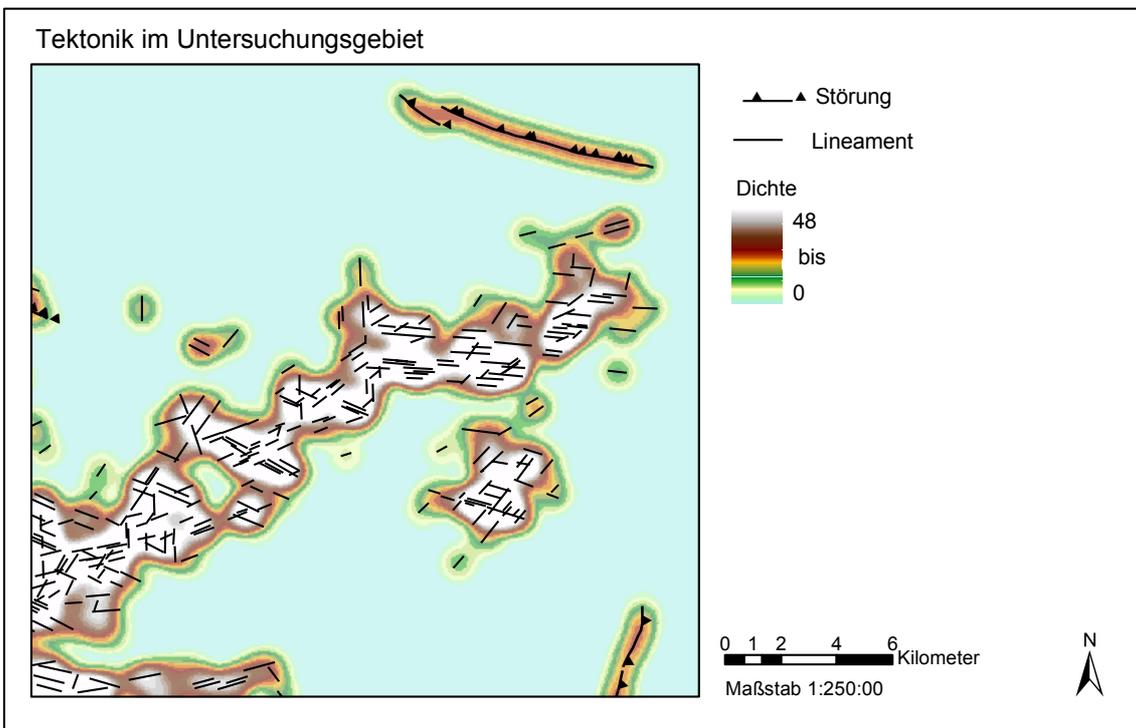


Abbildung 30: Kontinuierliche Dichteoberfläche erzeugt aus den Lineamenten und Störungen.

6.5.3 Bodengesellschaften

Die Bodenform spiegelt die geologischen Bedingungen wieder und steht in Zusammenhang mit den hydrologischen Verhältnissen. Deshalb kommt ihr ebenfalls Bedeutung als Indikator für Massenbewegungen zu.

Für die vorliegende Arbeit stehen die vorherrschenden Bodengesellschaften, welche die Böden auf dem Niveau der Typen, der Subtypen und teilweise der Varietäten beschreibt, zur Verfügung (vgl. Abbildung 31). Die Daten stammen ebenfalls aus dem digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998). Zu den Bodengesellschaften liegen eine morphologische Kurzbeschreibung und Angaben zum geologischen Untergrund vor.

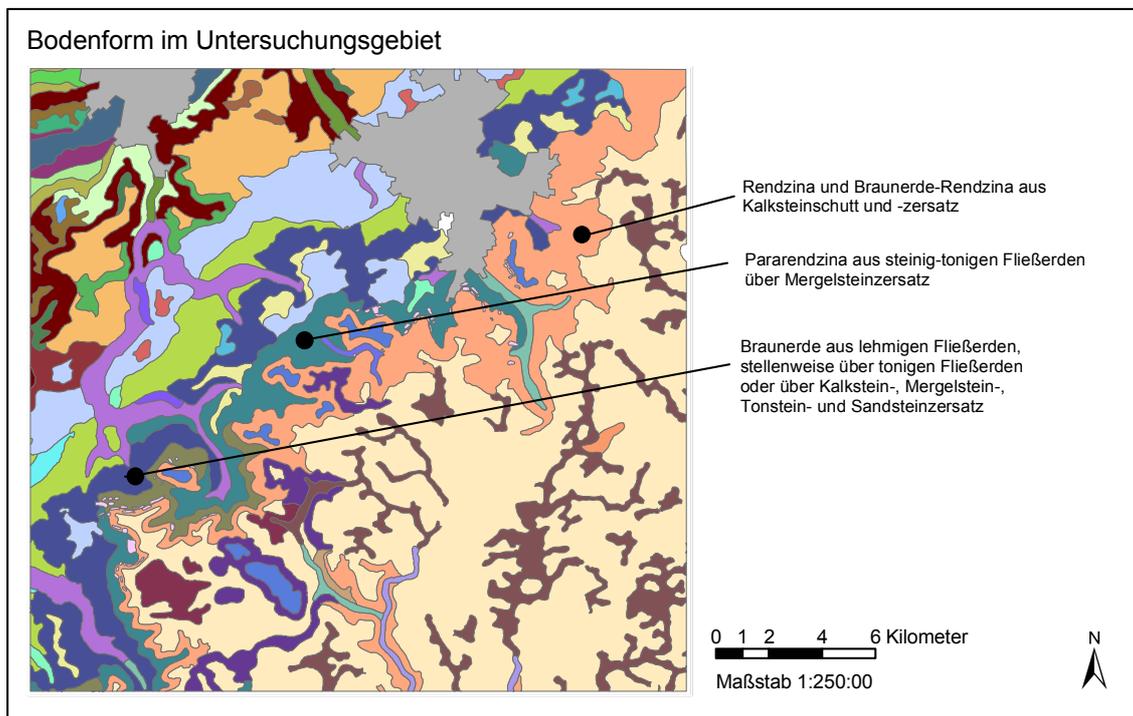


Abbildung 31: Bodenform aus dem Digitalen Geowissenschaftlichen Atlas von Baden-Württemberg (LGRB 1998).

6.5.4 Relief

Da es sich bei Massenbewegungen um einen geomorphologischen Prozess handelt, kommt dem Relief besondere Bedeutung zu. In einem digitalen Geländemodell (DGM) wird das Relief durch eine Punktemenge oder einem Raster mit Höhenwerten und Lagekoordinaten nachgebildet und beschreibt so die Geländeoberfläche.

Für diese Arbeit wurde ein SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) Höhenmodell eingesetzt (SRTM 2003). Mit den am 01. November 2003 vom USGS (US Geological Survey) freigegebenen C-Band Daten von SRTM liegt erstmalig für Europa, südlich des 60sten Breitengrades, ein konsistentes, kontinuierliches, digitales, mittelauflösendes (90 m) Höhenmodell vor. Diese Daten sind gemäß des „*Freedom of Information Acts*“ (FOIA) als freie Geodaten verfügbar. Die Höheninformationen bestehen aus Rohmodellaten und

müssen herstellungsbedingt nachbearbeitet werden um Leerstellen (*voids*) zu korrigieren. SRTM Höhenmodelldaten können aber im Vergleich zu den von Landesvermessungsämtern vertriebenen digitalen Höhenmodellen als gut bezeichnet werden (CZEGKA ET AL. 2004). Die Auflösung von 90 m ist jedoch eine starke Annäherung des Reliefs. Das vorliegende Höhenmodell kann daher nur sehr generelle Auskunft über das Relief geben.

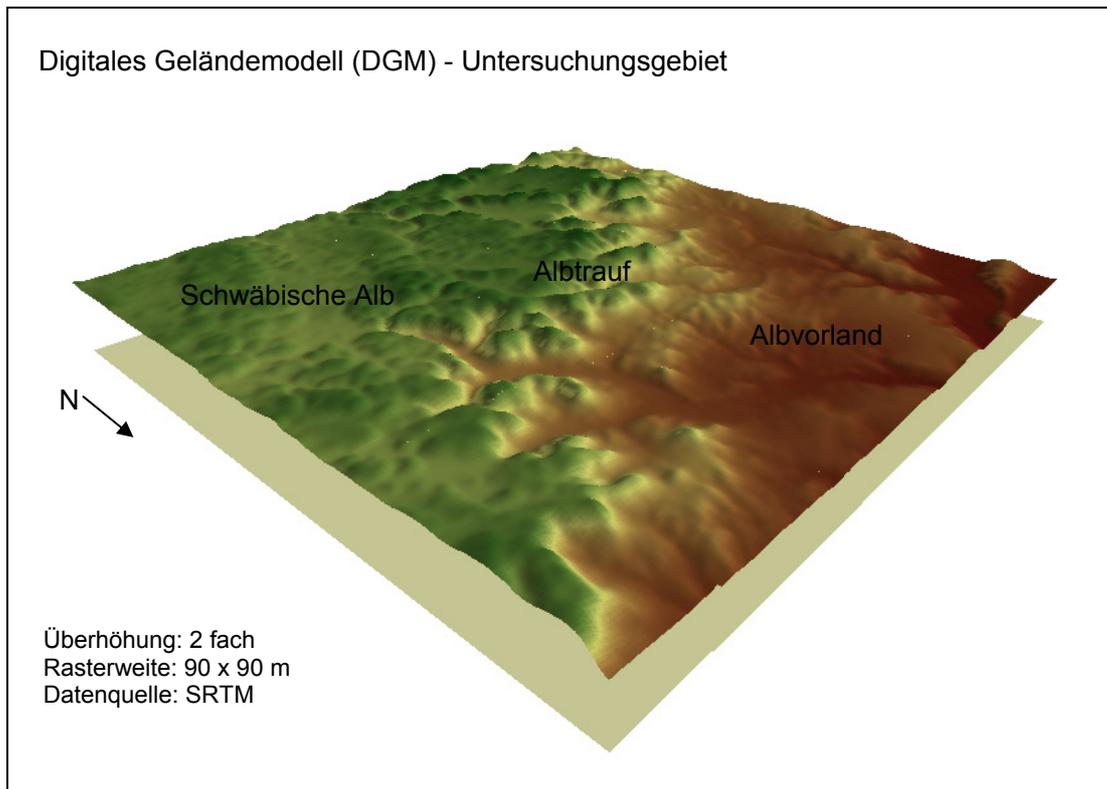


Abbildung 32: Perspektivische Ansicht des digitalen Höhenmodells für das Untersuchungsgebiet (SRTM 2003).

Aus dem Höhenmodell können die reliefgeometrischen Parameter abgeleitet werden, wie Hangneigung (β), Exposition (ψ) und Hangwölbung (χ). Während die absolute Höhenlage einfach aus dem Geländemodell entnommen werden kann, muss die Reliefgeometrie durch Nachbarschaftsanalysen im Raster berechnet werden. Sie stellt weitere Ableitungen der Höhe dar, wobei sich ein Operator bestehend aus 3x3 Rasterzellen über die Zellenmatrix mit den Höheninformationen bewegt (vgl. Abbildung 33a). Nach vorgegebenen Algorithmen wird für die jeweils zentrale Zelle ein Wert berechnet und in einem neuen Datensatz abgespeichert. Um eine realistische Abschätzung der gesuchten Parameter zu erhalten, muss die Geländeoberfläche in der Nähe eines Rasterpunktes zunächst mit Hilfe seiner Nachbarpunkte interpoliert werden. Um eine Geländeoberfläche zu interpolieren, kann eine Flächenfunktion $z=f(x,y)$ an die - durch die 3x3 Submatrix gegebenen - Punkte angepasst werden.

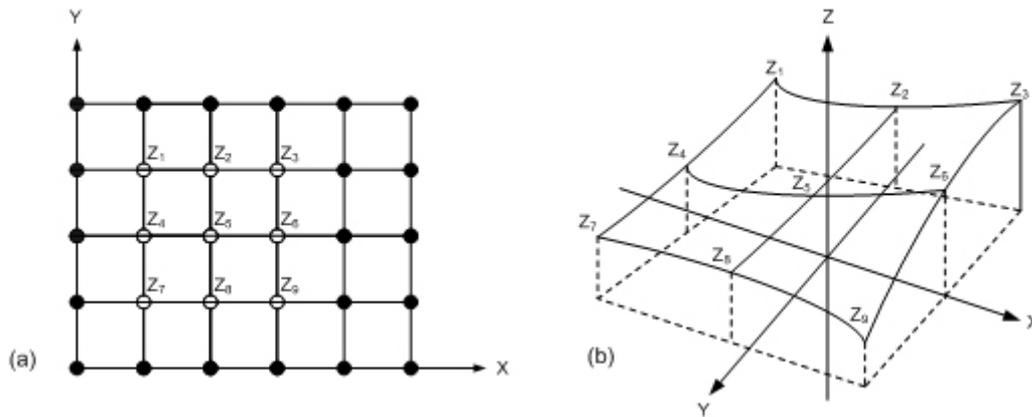


Abbildung 33: (a) Definition einer 3x3 Submatrix, (b) Anpassung einer quadratischen Flächenfunktion an die 9 Elemente einer 3x3 Submatrix nach (ZEVENBERGER, THORNE 1986).

Häufig wird dazu eine quadratische Flächenfunktion nach ZEVENBERGER, THORNE (1986) verwendet, die durch genau 9 Stützpunkte festgelegt ist (vgl. Abbildung 33b):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (34)$$

Nach dem Einsetzen der 9 Werte-Tripel (Z, X, Y) der 3x3 Submatrix in Gleichung 34 erhält man ein bereits lösbares Gleichungssystem. Im Falle quadratischer Raster lässt sich das Gleichungssystem durch ein Finite-Differenzen-Schema derart vereinfachen, dass nur noch Höhenwerte (Z_1 - Z_9) und Rasterweite (λ) in dieses eingesetzt werden müssen. Die einzelnen Funktionskoeffizienten (A - I) sind dann durch Lagrange-Polynome in folgender Weise gegeben:

$$A = [(Z1 + Z3 + Z7 + Z9) / 4 - (Z2 + Z4 + Z6 + Z8) / 2 + Z5] / \lambda^4 \quad (35)$$

$$B = [(Z1 + Z3 - Z7 - Z9) / 4 - (Z2 - Z8) / 2] / \lambda^3 \quad (36)$$

$$C = [(-Z1 + Z3 - Z7 + Z9) / 4 + (Z4 - Z6) / 2] / \lambda^3 \quad (37)$$

$$D = [(Z4 + Z6) / 2 - Z5] / \lambda^2 \quad (38)$$

$$E = [(Z2 + Z8) / 2 - Z5] / \lambda^2 \quad (39)$$

$$F = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4 \lambda^2 \quad (40)$$

$$G = (-Z4 + Z6) / 2 \lambda \quad (41)$$

$$H = (Z2 - Z8) / 2 \lambda \quad (42)$$

$$I = Z5 \quad (43)$$

Z_1 bis Z_9 repräsentieren die systematisch nummerierten Höhenwerten der 3x3 Submatrix mit Z_5 als zentralen Rasterpunkt ($x=y=0$) und der Rasterweite λ (CONRAD 1998). Diese Polynome kommen in der vorliegenden Arbeit bei der Berechnung der Hangneigung und der Hangwölbung zum Einsatz.

Die *Hangneigung* (*slope, slope gradient*) [°] ist jener Winkel, in dem sich die Geländeoberfläche mit einer horizontalen Bezugsebene schneidet. Da sie die gravitativen Kräfte steuert, welche für Massenbewegungen ausschlaggebend sind, ist sie eine Basisgröße für jedes Hangrutschungsmodell. Sie beeinflusst über die Hangabtriebskraft die Abflussraten von Wasser und Sediment (CONRAD 1998). Die Hangneigung wird aus der

maximalen Änderungsrate zwischen einer bestimmten Zelle und ihren Nachbarn berechnet. Errechnet wird die Hangneigung (β) in Grad, als Tangens des Vertikalabstandes durch den Horizontalabstand zur Bezugsebene (BURROUGH 1986).

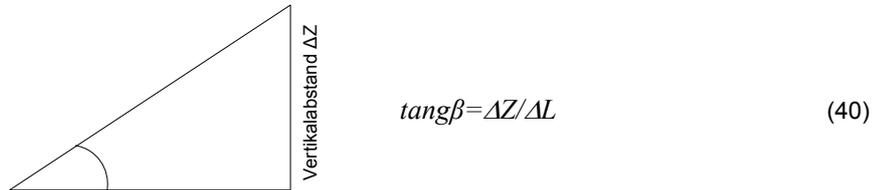


Abbildung 44: Berechnung der Hangneigung nach (BURROUGH 1986).

Praktisch wird sie durch folgenden Gleichungen nach BURROUGH (1986) berechnet⁴, welche mit Hilfe der Polynome 35-43 gelöst werden können:

$$(\Delta Z / \Delta X) = ((A + 2D + G) - (C + 2F + I)) / (8 * \lambda) \quad (41)$$

$$(\Delta Z / \Delta Y) = ((A + 2D + C) - (G + 2H + I)) / (8 * \lambda) \quad (42)$$

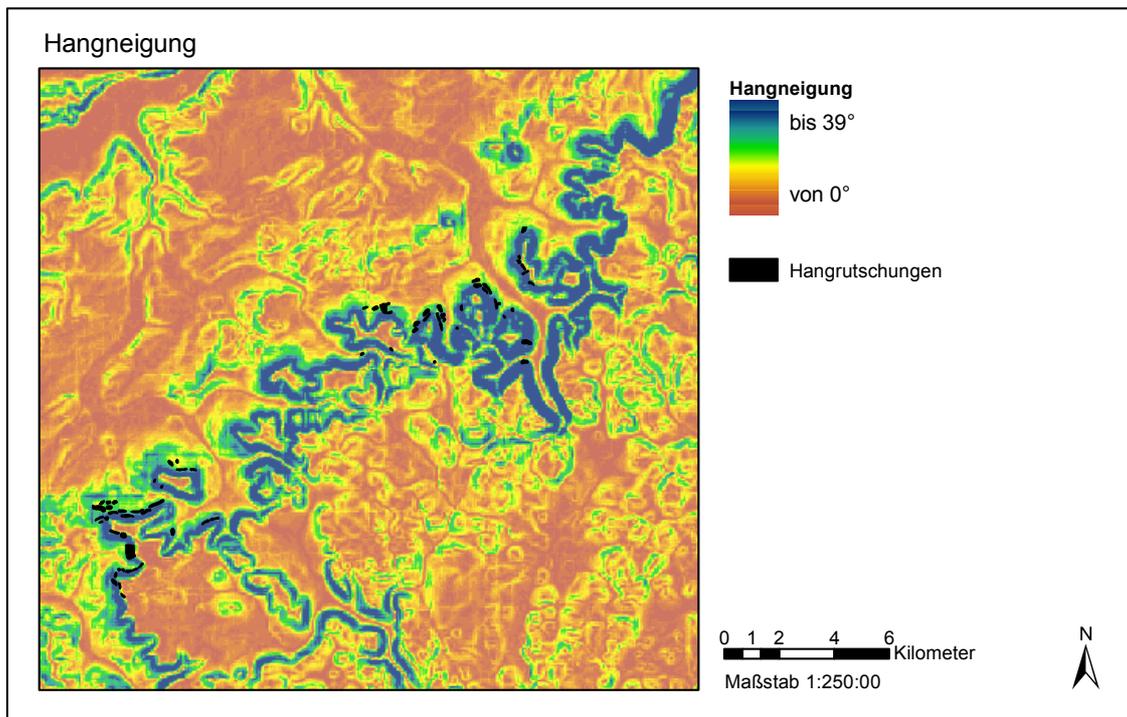


Abbildung 45: Hangneigung abgeleitet von dem SRTM Höhenmodell (Auflösung 90 m).

⁴ Die Berechnung der Hangneigung wurde mittels Spatial Analyst Extension von ESRI ArcView durchgeführt.

Die Hangneigung steht in engen Zusammenhang mit der Lithologie. Nachfolgende Abbildung 46 gibt einen Überblick über die Hangneigungsverteilung der auftretenden, geologischen Großeinheiten. In den steilsten Hanglagen treten Kalktuffe, Hangschutt, Fließerden, Schwemmkegel, sowie die Oxford-Schichten auf.

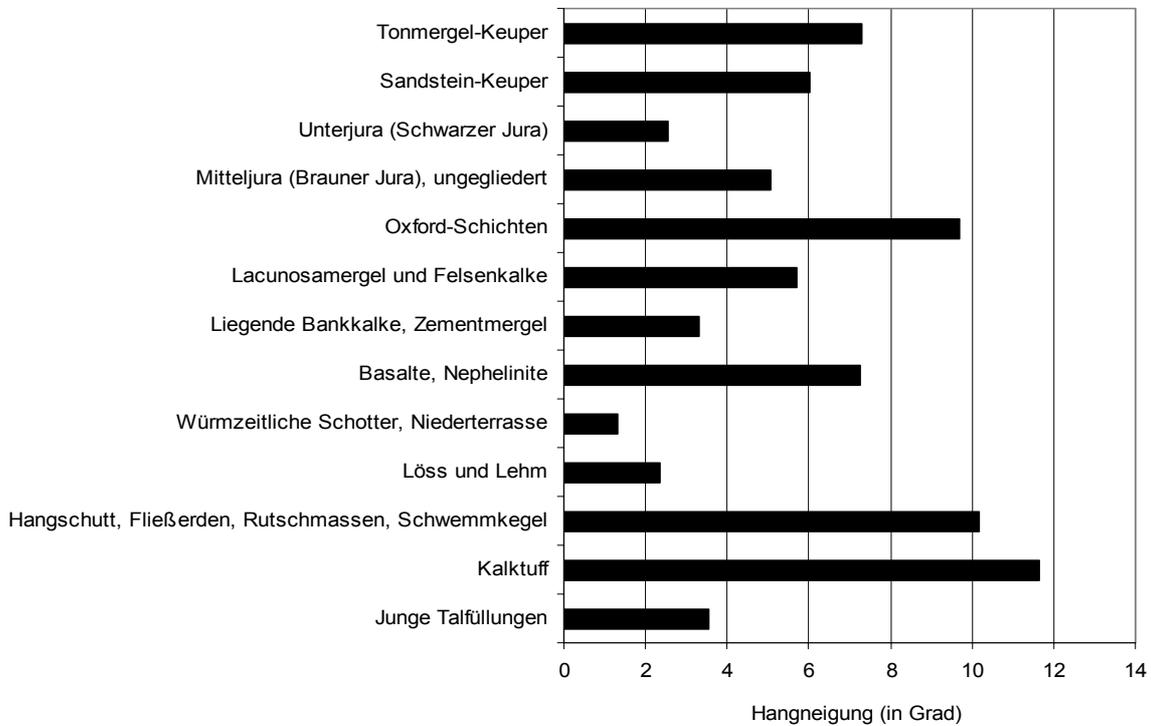
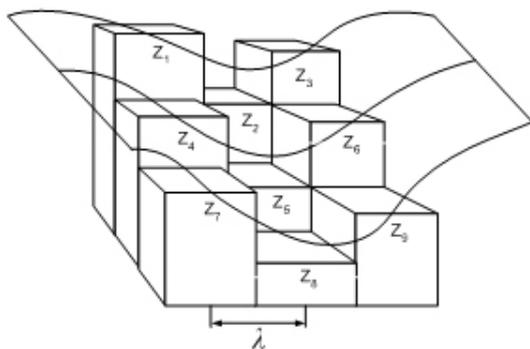


Abbildung 46: Hangneigungen in den Geologischen Einheiten.

Die *Hangwölbung (curvature)* des Oberflächenreliefs kann durch die Wölbungstendenz (konkav, konvex, gestreckt) beschreiben werden. Die gesamte Hangwölbung (χ) setzt sich aus der Vertikal- und Horizontalwölbung zusammen. Die vertikale Wölbung ergibt sich als Änderung der Neigungsstärke und die horizontale Wölbung als Änderung der Exposition (Hangrichtung). Die Wölbungsstärke wird durch den Wölbungsradius ausgedrückt, von dem ein Kreisbogensegment dem Schnitt durch die gewölbte Fläche möglichst genau angenähert werden kann. Die Hangwölbung, die zweite Ableitung der Höhe, kann ebenfalls mit Hilfe der Polynome 35-43 gelöst werden, wobei D der Horizontalwölbung und E der Vertikalwölbung entspricht und wie folgt definiert sind:



$$\chi = -2(D + E) * 100 \quad (43)$$

$$D = [(Z_4 + Z_6) / 2 - Z_5] / \lambda^2 \quad (44)$$

$$E = [(Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / \lambda^2 \quad (45)$$

Abbildung 47: Berechnung der horizontalen und vertikalen Wölbungsrichtung in der 3X3 Submatrix.

Die Wölbung repräsentiert die Höhe mit der sich der Reliefabschnitt über die durchschnittliche Hanghöhe zwischen den benachbarten Rasterzellen erhebt oder einsenkt. Die Werte geben diese in Hundertstel der Höhe (1/100 Zunits) an. Jeder Rasterzelle wird eine relative Wölbungsstärke zugeordnet. Je höher dieser Wert ist, desto stärker ist die Krümmung der gewölbten Fläche. Negative Werte zeigen dabei eine konkave, positive Werte eine konvexe und null eine gestreckte Wölbungstendenz an.

In einer hügeligen Region mit moderaten Relief bewegen sich die Werte zwischen -0,5 bis 0,5, während sich in einer sehr steilen Gebirgsregion mit extremen Relief die Werte zwischen -4 und 4 bewegen. Aus dem 90 m Höhenmodell wurden Hangwölbungen zwischen -1,05 und 1,08 abgeleitet.⁵

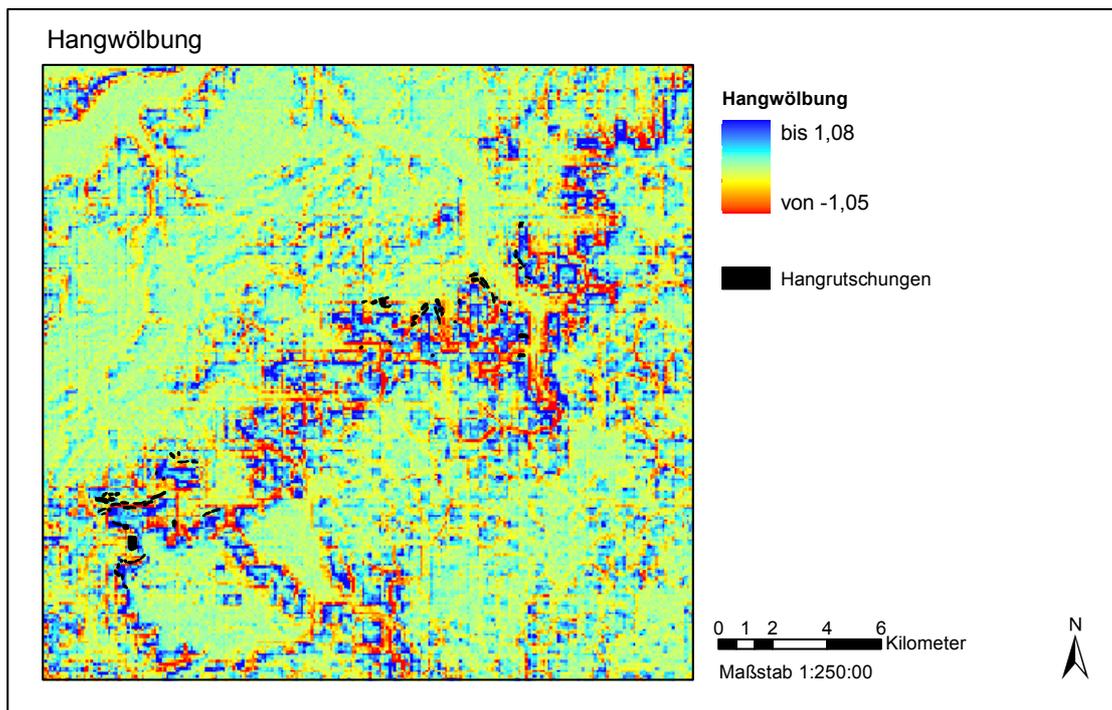


Abbildung 48: Hangwölbung abgeleitet von dem SRTM Höhenmodell (Auflösung 90m).

Neben Hangneigung und Hangwölbung gehört auch die *Exposition (aspect)* [°] zu den Reliefparametern. Die Exposition (ψ) gibt die Himmelsrichtung (von 0° bis 360°) an, in welche der Hang geneigt ist. Die Rolle der Exposition als Steuerungsfaktor für den Massenbewegungsprozess wird in der Literatur strittig diskutiert. An der Schwäbischen Alb werden mögliche Einflüsse von karsthydrologischer Entwässerung und Klima auf den Rutschungsprozess diskutiert. Eine Analyse der Hangrutschungsverteilung innerhalb der Expositionsklassen, lässt auf keinen eindeutigen Zusammenhang schließen. Da die Exposition als Steuerungsfaktor generell in Frage gestellt wird, wird auf diesen Reliefparameter verzichtet.

⁵ Die Berechnung der Hangwölbung erfolgte mittels GRIDTools (SCHÄUBLE 1998).

6.5.5 Geomorphologie

Aus dem Landschaftsökologischen Atlas von Baden-Württemberg, der vom Institut für Angewandte Forschung zur Landschaftsentwicklung und Landschaftsinformatik (IAF) der Fachhochschule Nürtingen (DURWEN ET AL. 1996) erstellt wurde, liegen die großen geomorphologischen Einheiten im Gebiet vor (vgl. Abbildung 49). Diese sehr generelle Darstellung (Bearbeitungsmaßstab 1:200.000) klassifiziert das Gebiet lediglich in große Bereiche wie Hangzone, Hügellandschaft und Flachlandschaften. Weiters enthalten die Standortkomplexe der Karte Angaben zur Bodengründigkeit, Wärmestufen, Feuchtestufen, und Kaltluftgefährdung. Aufgrund des starken räumlichen Generalisierungsgrades ist die Eignung dieser Daten als Steuerungsfaktor aber eher anzuzweifeln.

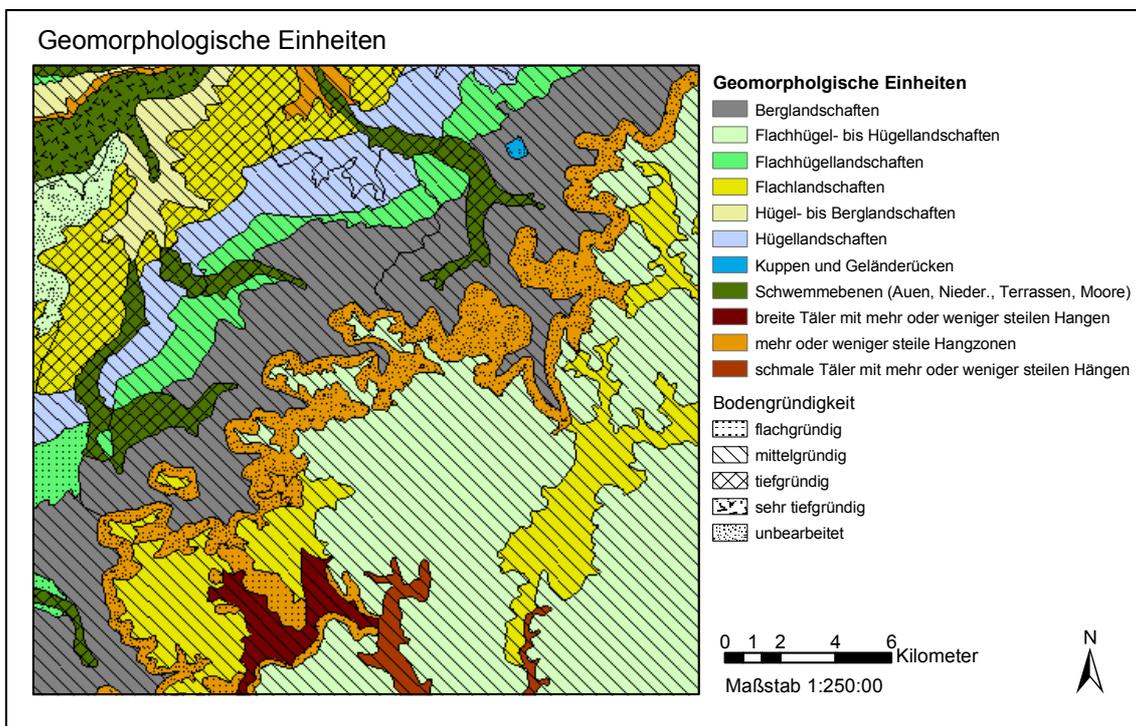


Abbildung 49: Geomorphologische Einheiten, aus dem Digitalen Landschaftsökologischen Atlas von Baden-Württemberg (DURWEN ET AL. 1996).

7 DURCHFÜHRUNG DES MODELLS⁶

7.1 Analyseparameter

Zu Beginn erfordert die Durchführung des Modells die Definition beziehungsweise Auswahl bestimmter Analyseparameter, wie die Größe der *Basiseinheit (unit area)* der Analyse und die *Trainingsdaten*.

Die Trainingsdaten müssen bei *WofE* als dichotome Größe und in Form von Punktdaten vorliegen, also als geometrisches Objekt ohne räumliche Ausdehnung. Die Trainingsdaten sind jene Punkte, welche die bekannten Hangrutschungen repräsentieren.

Wie bereits in Kapitel 5.4.1 erwähnt, handelt es sich bei den pleistozäne Rotationsschollen und den rezenten Rutschungen um zwei unterschiedliche Hangrutschungstypen, welche verschiedene Entstehungsursachen haben. Für die, unter klimatischen Bedingungen des ausgehenden Pleistozäns, aufgetretenen Gleitschollen können keine Gefährdungskarten im Sinne der Eintrittswahrscheinlichkeit zukünftiger Ergebnisse erstellt werden. Eine Analyse könnte sich auf potentielle Verbreitungsgebiete für Rotationsschollen beschränken. Für die Modellierung kommen daher lediglich die rezenten Rutschungen in Frage. Diese sind innerhalb der letzten 200 Jahre aufgetreten und können auch in diesem Zeitraum in Zukunft bei ähnlichen Bedingungen auftreten. Diese Rutschungen können daher einer probabilistischen/statistischen Analyse unterzogen werden.

Die als Polygone vorliegenden Hangrutschungen müssen als Punkte repräsentiert werden. Die Lage sowie die Anzahl der Punkte sind entscheidend für die Modellierung. Die Lage der Punkte kommt bei der räumlichen Verschneidung (*overlay*) der Trainingsdaten mit den Evidenzen zum Tragen und beeinflusst so die Gewichtung der Faktoren. Da es gilt jene Steuerungsfaktoren zu identifizieren, welche eine Hangrutschung verursachen, werden die Punkte im Bereich der Abbruchfläche – also am oberen Ende der Hangrutschungsfläche – gesetzt, denn jene Faktoren, welche im Auslaufbereich der Rutschung vorkommen, müssen diese nicht ursächlich beeinflussen.

Die Anzahl der Punkte ergibt sich durch die Basisgröße. Innerhalb einer Hangrutschung wird pro Basiseinheit ein Punkt festgelegt. Da manche Rutschungen größer als die Basiseinheit sind, werden einige Rutschungen nicht nur durch einen einzigen, sondern durch mehrere Punkte repräsentiert.

Das Untersuchungsgebiet muss für die Analyse in so genannte Basiseinheiten (*unit areas*) unterteilt werden, welche jene räumlichen Größen sind, auf deren Grundlage alle Berechnungen durchgeführt werden. Das Ergebnis des Modells bezieht sich ebenfalls auf die Basiseinheit und gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass künftig in einer Einheit eine Hangrutschung auftreten wird. Sie ist unabhängig von der Zellgröße und dem Einfluss der Trainingsdaten. Um die Basisgröße zu bestimmen, werden die folgenden Überlegungen angestellt: Aus statistischer Sicht gesehen, sollte jede Basiseinheit so klein sein, dass sie nur eine Hangrutschung beinhaltet. Die Basiseinheit sollte aber nicht zu klein sein, so dass

⁶ Das Modell wurde mittels ArcSDM (KEMP ET AL. 2001) ausgeführt.

sie für das Phänomen der Hangrutschung nicht repräsentativ ist und auch die erzielbare Genauigkeit nicht mehr widerspiegelt.

Die meisten Daten, welche für die Modellierung zur Verfügung stehen, stammen vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau von Baden-Württemberg. Der Erhebungsmaßstab der verwendeten Daten ist 1:150.000 bis 1.200.000. Eine Kartiergenauigkeit von einem halben Millimeter ergibt bei diesem Maßstab eine Ungenauigkeit von 100 m. Das Höhenmodell ist mit einer Rasterweite von 90 m aufgelöst. Die Hangrutschungen haben eine durchschnittliche Größe von rund $0,02 \text{ km}^2$. Die kleinste hat eine Fläche von $0,006 \text{ km}^2$. Aufgrund dieser Ausgangsbedingungen wird eine Basiseinheit von $u=0,008 \text{ km}^2$ definiert. Dies entspricht der Genauigkeit der Daten und liegt unter der durchschnittlichen Hangrutschungsgröße. Dadurch sind auch die kleinere Hangrutschungen einzeln erfassbar.

7.2 Selektion der Unabhängigen Kriterien

Die Annahme über die bedingte Unabhängigkeit der Daten erfordert, dass der Zusammenhang der einzelnen Steuerungsfaktoren hinsichtlich der Hangrutschungslokalitäten geprüft werden muss.

Zur Analyse von Abhängigkeiten zwischen zwei oder mehreren Variablen dienen Kontingenztafeln. Im einfachsten Fall liegen bei zwei Variablen so genannte Kreuztabellen vor, im Fall von drei oder mehr Variablen hat man es mit höherdimensionalen Tabellen zu tun.

Die Korrelation von räumlichen Daten und die Bewertung der Signifikanz dieser Korrelation sind nicht so simpel wie bei nicht-räumlichen Daten, da einige Grundannahmen der klassischen Statistik bei räumlichen Daten nicht zutreffen (wie die Annahme der unabhängigen zufälligen Verteilung). Diese Schwierigkeiten können umgangen werden, indem man nicht die *klassisch-statistische*, sondern die *bedingte* Unabhängigkeit untersucht, also die Unabhängigkeit *hinsichtlich der Hangrutschungslokalitäten*. Daher wird die Kontingenztafelberechnung nur für die Rutschungslokalitäten durchgeführt. Die folgende Beziehung gilt es zu überprüfen:

$$P\{B_1 \cap B_2 | D\} = P\{B_1 | D\} \cdot P\{B_2 | D\} \quad (38)$$

Die Gleichung 38 kann so angepasst werden, dass auf der linken Seite die *beobachtete* und auf der rechten Seite die *erwartete oder vorhergesagte* Anzahl von Hangrutschungen steht (vgl. Gleichung 46). Diese Häufigkeiten beziehen sich auf den Bereich wo beiden Evidenzen B_1 und B_2 vorhanden sind.

$$N\{B_1 \cap B_2 \cap D\} = \frac{N\{B_1 \cap D\} \cdot N\{B_2 \cap D\}}{N\{D\}} \quad (46)$$

Sind die vorliegenden Evidenzen bedingt unabhängig so gilt:

$$\frac{N\{B_1\} \cdot N\{B_2\}}{N\{D\}} = \frac{N\{B_1 \cap D\} \cdot N\{B_2 \cap D\}}{N\{D\}} \quad (47)$$

Diese Berechnung entspricht einer (2x2) Kontingenztafelberechnung. Tabelle 9 zeigt in algebraischer Form eine Kontingenztafelberechnung für die Hangrutschungslokalitäten, in der die erwarteten und beobachteten Hangrutschungen gegenübergestellt werden.

Tabelle 9: Algebraische Darstellung der Kontingenztafelberechnung (BONHAM-CARTER 2002).

	B_1 (vorhanden)	\bar{B}_1 (nicht vorhanden)	Gesamt
B_2 (vorhanden)	$N\{B_1 \cap B_2 \cap D\}$	$N\{\bar{B}_1 \cap B_2 \cap D\}$	$N\{B_2 \cap D\}$
\bar{B}_2 (nicht vorhanden)	$N\{B_1 \cap \bar{B}_2 \cap D\}$	$N\{\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap D\}$	$N\{\bar{B}_2 \cap D\}$
Gesamt	$N\{B_1 \cap D\}$	$N\{\bar{B}_1 \cap D\}$	

Der Vergleich der beobachteten Häufigkeiten ist die Grundlage für die Entscheidung über die Unabhängigkeit. Es liegt daher die Grundlage des *Chi-Quadrat* (χ^2)-Tests vor, wobei χ^2 wie folgt definiert ist:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{(\text{Beobachtet}_i - \text{Erwartet}_i)^2}{\text{Erwartet}_i} \quad (48)$$

Die Nullhypothese über die bedingten Unabhängigkeit wird getestet, indem untersucht wird, ob der beobachtete χ^2 Wert den erwarteten (theoretischen) Wert übersteigt - bei einer gegebenen Anzahl von Freiheitsgraden und bei definiertem Signifikanzniveau. Für binäre Daten (0 oder 1) besteht ein Freiheitsgrad von 1. Als Signifikanzlevel wird 95% gewählt, dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von $P=0,05$.

Tabelle 10 zeigt die berechneten Wahrscheinlichkeiten und Tabelle 11 die χ^2 -Statistik für die vorhandenen Daten. Für jede Klasse der Evidenzen wird die beobachtete und erwartete Anzahl der Trainingsdaten (Hangrutschungslokalitäten) berechnet. Eine Wahrscheinlichkeit unter 0,05 deutet auf eine Abhängigkeit der Daten hin. Die Wahrscheinlichkeiten hängen von den χ^2 -Werten ab. Ebenso bedeutet ein hoher χ^2 -Wert, dass mehr Hangrutschungen als erwartet aufgetreten sind, was auf eine Abhängigkeit der Daten hinweist.

Aus dem Test geht hervor, dass Abgängigkeit zwischen dem Evidenzthema *Geologie und Hydrogeologie* besteht. Betrachtet man die beiden Datensätze (vgl. Abbildung 25 und 26), so kann man erkennen, dass diese geometrisch identisch sind. Sie weisen die gleiche Verteilung der Klassen auf und unterscheiden sich lediglich durch die Attributdaten, wodurch Abhängigkeit auf der Hand liegt.

Weiters ist Abhängigkeit zwischen den Evidenzthemen der *Distanz zu den Lineamenten und der Dichte der Lineamente* (vgl. Abbildung 29 und 30) gegeben. Dies ist nahe liegend, da beide Themen auf der gleichen Datenbasis erzeugt wurden.

Abhängigkeit besteht zudem zwischen *Hangneigung und Geomorphologischen Einheiten*. Betrachtet man das Evidenzthema mit den geomorphologischen Einheiten (vgl. Abbildung 49) so kann man erkennen, dass eine hohe Übereinstimmung mit den Steilhängen im Hangneigungs-Thema (vgl. Abbildung 45) gegeben ist.

Tabelle 10: Berechnete Wahrscheinlichkeiten aus dem paarweise Test der bedingten Unabhängigkeit: Wahrscheinlichkeiten unter 0,05 deuten auf eine bedingte Abhängigkeit hin.

Evidenzthema	Hydrogeologie	Lineament-Dichte	Hangwölbung	Hangneigung	Lineament-Distanz	Distanz-Traufkante	Leitbodenform	Geologie
Geomorphe Einheit	1,00	1,00	0,52	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Hydrogeologie		0,87	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Lineament-Dichte			0,98	0,97	0,00	0,75	1,00	0,87
Hangwölbung				0,72	0,99	0,96	1,00	0,92
Hangneigung					1,00	1,00	1,00	1,00
Lineament-Distanz						1,00	1,00	1,00
Distanz-Traufkante							1,00	1,00
Leitbodenform								1,00

Tabelle 11: χ^2 -Statistik aus dem paarweise Test der bedingten Unabhängigkeit: Korrespondierend zu den geringen Wahrscheinlichkeiten, deuten die hohen χ^2 -Werten auf eine Abhängigkeit zwischen den Daten hin.

Evidenzthema	Hydrogeologie	Lineament-Dichte	Hangwölbung	Hangneigung	Lineament-Distanz	Distanz-Traufkante	Leitbodenform	Geologie
Geomorphe Einheit	0,20	0,00	3,23	17,15	0,00	0,11	0,00	0,20
Hydrogeologie		0,28	0,93	0,17	0,08	0,05	0,00	9,99
Lineament-Dichte			0,05	0,05	7,35	0,57	0,00	0,28
Hangwölbung				2,10	0,26	0,63	0,00	0,93
Hangneigung					0,01	0,20	0,00	0,17
Lineament-Distanz						0,16	0,00	0,08
Distanz-Traufkante							0,00	0,05
Leitbodenform								0,00

Die folgenden Evidenzen werden daher nicht in die Analyse eingeschlossen, da sie Abhängigkeiten zu anderen Evidenzen aufweisen:

- Hydrogeologische Einheiten
- Lineament-Distanz (Distanz zu den Störungen und Lineamenten als potentielle Klüfte, Falten und Störungen)
- Geomorphologische Einheiten

Folgende Evidenzthemen sind von den anderen Evidenzen hinsichtlich der Hangrutschungslokalitäten unabhängig und werden in die Analyse einbezogen:

- Geologische Einheiten
- Lineament-Dichte (Dichte von Störungen und Lineamenten als potentielle Klüfte, Falten und Störungen)
- Hangwölbung (gesamte, aus horizontaler und vertikaler Wölbung zusammengesetzte Wölbung des Reliefs)
- Hangneigung (maximale Neigung des Reliefs)
- Distanz-Traufkante (Distanz zur Grenze zwischen Weißjura und Schwarzer Jura/Mittljura)
- Leitbodenform (vorherrschende Bodengesellschaften)

Man muss betonen, dass die ausgewählten Evidenzen nur eine kleine Auswahl der für Massenbewegungen relevanten Geofaktoren darstellt. Wichtige Faktoren, wie die Streichrichtung der geologischen Einheiten, geotechnische Parameter oder genaue geomorphometrische Parameter, können aufgrund fehlender oder gering auflösender Daten nicht miteinbezogen werden. Daraus ergibt sich eine wesentliche Einschränkung der Aussagekraft der Rutschanfälligkeitsbeurteilung, welche bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss (vgl. Kapitel 6.4.2).

7.3 Kriteriengewichtung

7.3.1 Schätzung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit

Die Berechnung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit ist der erste Schritt zur Kriteriengewichtung. Die Schätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hangrutschungen auf Basis der bekannten Hangrutschungen erfolgt ohne Einbezug weiterer Informationen (Evidenzen). Unter Verwendung der A-Priori-Odds (Gleichung 20) und bei einer Basisgröße von $u=0,008 \text{ km}^2$ ergibt die A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(D)$ und deren Standardabweichung σ :

$$P(D) = 0,0057, (\sigma = 0,0009).$$

Das bedeutet, dass in einer zufällig gewählten Basiseinheit im Untersuchungsgebiet, eine Hangrutschung mit 0,57% Wahrscheinlichkeit auftritt. Man kann diesen Wert auch als die durchschnittliche Hangrutschungsdichte betrachten. Diese A-Priori-Wahrscheinlichkeit wird nun durch zusätzliche Informationen (evidenten Steuerungsfaktoren) modifiziert. Das bedeutet, in bestimmten Teilen des Gebietes wird diese Wahrscheinlichkeit erhöht, in anderen gesenkt, je nachdem ob rutschungsbegünstigende Faktoren vorliegen oder nicht. Im nächsten Schritt wird daher untersucht (unter Verwendung der A-Priori-Wahrscheinlichkeit), welche der Steuerungsfaktoren in der Vergangenheit rutschungsbegünstigend gewirkt haben.

7.3.2 Gewichtung der Evidenzklassen

In diesem Schritt werden die Evidenzen auf Klassenebene statistisch untersucht und gewichtet. Primäres Ziel ist es dabei, jene Klassen zu identifizieren, welche mit den Trainingsdaten korrelieren und somit hangrutschungsbegünstigend wirken. Einerseits stellt dies einen Informationsgewinn dar, andererseits werden die ermittelten statistischen Parameter dazu verwendet, die Evidenzen zu reklassifizieren, um so aussagekräftige Klassen für die Zusammenführung der Evidenzen zu schaffen (vgl. Kapitel 7.3.3).

Mittels paarweiser Überschneidung der Hangrutschungslokalitäten (Trainingsdaten) mit jeweils einem Steuerungsfaktor (Evidenz) wird der statistische Zusammenhang zwischen den beiden gemessen. Für jede Evidenz wird eine Reihe statistischer Parameter berechnet, welche von der räumlichen Beziehung zwischen den Trainingsdaten und der Evidenz abhängig sind:

- das Paar von Gewichten, W^+ und W^- : die Maße für die positive und negative Korrelation der Evidenzklassen mit den Trainingsdaten.
- die Standardabweichungen $\sigma(W^+)$ und $\sigma(W^-)$: die Streuungsmaße für die Gewichte.
- der Kontrast C [$C = W^+ - W^-$]: ein allgemeines Maß für die Korrelation der Daten.
- die Standardabweichung des Kontrastes $\sigma(C)$: das Streuungsmaß für den Kontrast.
- der normalisierte Kontrast $s(C)$ [$s(C) = C / \sigma(C)$]: der durch die Standardabweichung normalisierte Kontrast ist ein Maß für die Stabilität bzw. Signifikanz der Gewichte.

Die Gewichte werden, je nach Datentyp (diskret oder kontinuierlich), entweder kategorisch oder kumulativ berechnet. Bei der kategorischen Berechnung werden die statistischen Parameter für jede Klasse getrennt ermittelt. Beispielsweise beeinflussen die geologischen Einheiten die Hanginstabilität auf unterschiedlicher Weise. Sie sind als Polygone repräsentiert und damit eindeutig voneinander abgegrenzt.

Bei der kumulierenden Berechnung werden die Daten zunächst aufsteigend oder abfallend sortiert und dann die Gewichte kumulierend berechnet. Dies ist sinnvoll, weil bei kontinuierlichen Daten der Einfluss des Faktors ebenfalls kontinuierlich zunimmt oder abnimmt. Bei der Hangneigung beispielsweise, nimmt der Einfluss mit abnehmender Neigung ab. Ab einer bestimmten Neigung ist kein Einfluss mehr auf die Hangstabilität geben, daher müssen die Gewichte absteigend kumuliert werden.

An den Gewichten kann man erkennen, welche Klasse in den Steuerungsfaktoren einen statistischen signifikanten Zusammenhang zu den bekannten Hangrutschen haben und welche somit gute Indikatoren für Hangrutschungen sind.

Für jene Klassen in denen keine Trainingsdaten vorliegen, können keine statistischen Parameter berechnet werden. Sie haben offensichtlich keinen Einfluss auf Hangrutschungen, die in der Vergangenheit aufgetreten sind.

Ist das positive Gewicht $W^+ > 0$, und das korrespondierende negative Gewicht $W^- < 0$ so besteht *positive Korrelation* zwischen den Trainingsdaten und der Evidenz. Ist das positive Gewicht $W^+ < 0$ und das korrespondierende negative Gewicht $W^- > 0$ so liegt *negative Korrelation* zwischen den Trainingsdaten und der Evidenz vor. Sind die Evidenzen mit den Trainingsdaten *unkorreliert* – es besteht also keine Abhängigkeit zwischen den beiden – dann ist $W^+ = W^- = 0$ (vgl. Kapitel 6.3.2).

Je größer das positive Gewicht ist, desto besser eignet sich die Evidenzklasse als Vorhersager für Hangrutschungen. Gewichte von 0,1 bis 0,5 haben eine *geringe* Vorhersagekraft, Gewichte von 0,5 bis 1,0 haben *moderate* Vorhersagekraft. *Starke* Vorhersagekraft ist bei Gewichten von 1,0 bis 2,0 gegeben und bei Gewichten über 2,0 liegt eine Evidenz mit *sehr starker* Vorhersagekraft vor (BONHAM-CARTER 2002).

7.3.2.1 Geologie

Die Verscheidung der geologischen Einheiten mit den Rutschungslokalitäten ergibt, dass die geologische Gruppe (4) „Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen, Schwemmkegel“ sowie die (63) „Oxford-Schichten“ die stärkste Korrelation mit den Trainingsdaten haben. Die Gruppe (62) „Lacunosamergel und Felsenkalke der Jura“ sind mit ihrem negativen Kontrast eindeutige Indikatoren für Hangstabilität.

Die Gruppe (40) „Basalte, Nephelinite aus der Gruppe der Tertiären Magmatite“ sind schwach positiv korreliert. Dieser Zusammenhang ist jedoch statistisch nicht signifikant. Alle anderen geologischen Einheiten sind mit den Rutschungslokalitäten unkorreliert, da keine Trainingsdaten in diesen Klassen vorliegen.

Die Gruppe (4) „Fließerden, Hangschutt- und Rutschmassen sowie Schwemmkegel des Quartär“ sind mit einem positiven Gewicht von $W^+=2,15$ (bei geringer Standardabweichung) und einem Kontrast von $C=3,21$ ($s(C)=11,27$) sehr starke und signifikante Indikatoren für Hangrutschungen. Dies ist wenig überraschend, da diese Umlagerungssedimente auf eine hohe Morphodynamik hinweisen. Sie bestehen aus unsortierten Ton, Schluff, und Kies, welche in den Schwemmkegeln zum Teil zwiebelschalenartig geschichtet vorliegen.

Die „Oxford-Schichten der Jura“ (63) sind mit einem positiven Gewicht von $W^+=1,79$ ($\sigma(W^+)=0,2$) und einem Kontrast von $C=2,54$ ($s(C)=8,43$) starke und signifikante Indikatoren für Hangrutschungen. Die teilweise verkarsteten Oxfordeinheiten bestehen zum Großteil aus gebanktem Kalkstein mit Mergelfugen (wohlgeschichtete Kalke).

Auch die „Basalte und Nephelinite aus der Gruppe der Tertiären Magmatite“ (40) sind mit einem positiven Gewicht von $W^+=0,38$ schwach positiv korreliert. Mit einem Kontrast von $C=0,41$ ist dieser Zusammenhang allerdings nicht statistisch signifikant. Diese geologische Einheit hat eine sehr geringe Verbreitung und Ausdehnung und kann nicht als Hangrutschungsindikator betrachtet werden.

Die geologische Gruppe (62) „Lacunosamergel und Felsenkalke der Jura“ haben ebenfalls einen sehr hohen Zusammenhang mit den Hangrutschungen, allerdings im umgekehrten Sinn: Das positive Gewicht ist negativ ($W^+=-2,89$) und das korrespondierende negative Gewicht ist positiv ($W^- = 0,34$). Diese geologische Gruppe ist folglich mit den Rutschungen *negativ korreliert* und ein starker Indikator für Hangstabilität. Lacunosamergel und Felsenkalke bilden oftmals das Karstgrundwasserstockwerk mit gering durchlässiger Basis.

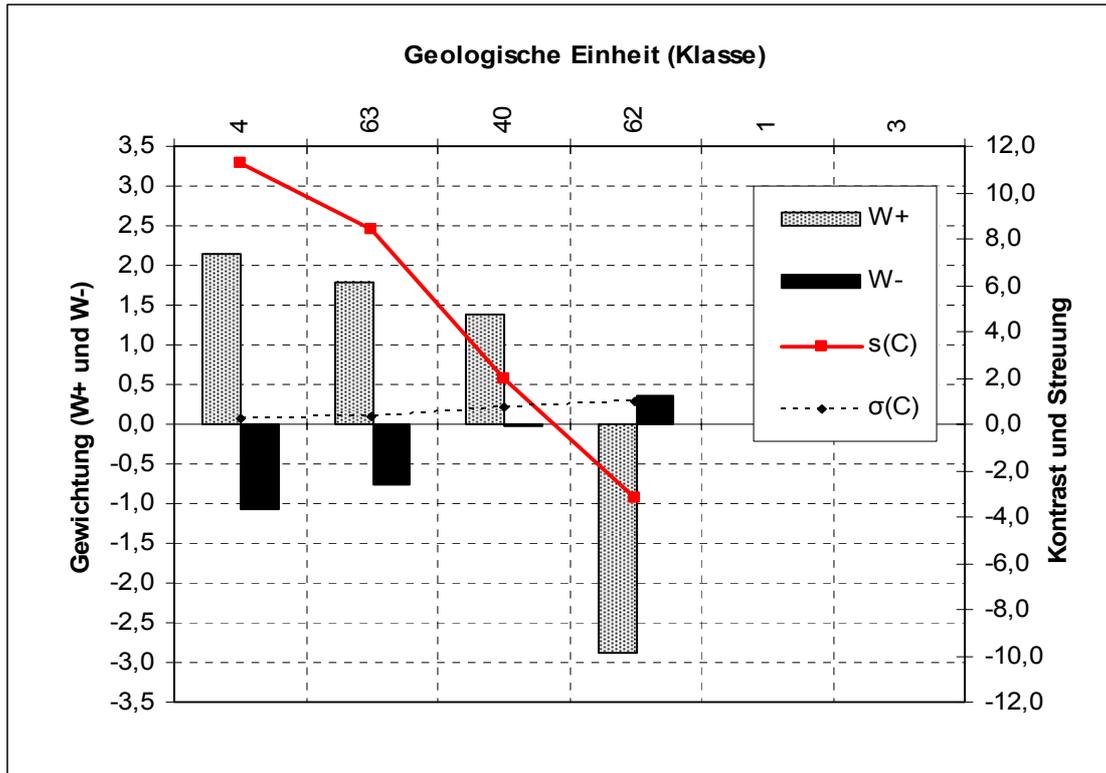


Abbildung 50: Die geologischen Einheiten und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen und Schwemmkegel (4) sowie die Oxford-Schichten (63) sind signifikante Indikatoren für Hangrutschungen. Lacunosamergel und Felsenkalke (40) sind mit ihrem negativen Kontrast eindeutige Indikatoren für Hangstabilität. Alle anderen geologischen Einheiten sind mit den Rutschungslokalitäten unkorreliert, da keine Trainingsdaten in diesen Klassen vorliegen.

Tabelle 12: Die geologischen Einheiten und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$; vgl. dazu Abbildung 50.

Klasse	Beschreibung	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
4	Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen, Schwemmkegel des Quartär	2,15	0,16	-1,07	0,24	3,21	0,29	11,27
63	Oxford-Schichten der Jura	1,79	0,26	-0,75	0,15	2,54	0,30	8,43
40	Basalte, Nephelinite aus der Gruppe der Tertiären Magmatite	0,38	0,71	-0,03	0,13	0,41	0,72	0,56
62	Lacunosamergel und Felsenkalke der Jura	-2,89	1,00	0,36	0,13	-3,25	1,01	-3,22
1	Löss und Lehm des Quartär	-	-	-	-	-	-	-
3	Kalktuff des Quartär	-	-	-	-	-	-	-
	etc.	-	-	-	-	-	-	-

7.3.2.2 Bodengesellschaften

Der Bodentyp (221) bestehend aus „Pararendzinen aus lehmig-tonigen Rutschmassen über Mergelsteinzersatz und Rendzinen aus Hangschutt“ hat eine äußerst hohe Korrelation mit den Trainingsdaten. Mit einem positiven Gewicht von $W^+ = 3,19$ und einem Kontrast von $C = 3,53$ ($s(C) = 12,12$) sind diese Böden eindeutige Indikatoren für Hangrutschungen. Sie treten in den westlichen Hängen des Albtraufs (bei Mössingen) auf, wo bewegtes Relief mit kleinräumig wechselnden Bodenformmustern vorliegt. Örtlich sind hier neben der Leitbodenform auch Subtypen wie Terra Fusca-Rendzinen, Pelosole, Pelosol-Pseudogleye und Gleye zu finden.

Ein weiterer starker Indikator für Hangrutschungen ist der Bodentyp (222) der „Pararendzinen aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinzersatz“ mit einem positiven Gewicht von $W^+ = 2,27$ und einem Kontrast von $C = 2,77$ ($s(C) = 10,30$). Dieser ist die Hauptbodenform der mittel bis stark geneigten Hänge der tief eingeschnittenen Albtäler und des Albanstiegs. Untergeordnet finden sich in dieser Gruppe auch Pelosol-Pararendzinen sowie Rendzinen aus Kalksteinschutt.

Auch der Bodentyp (220) bestehend aus „Rendzinen und Braunerde-Rendzinen aus Kalksteinschutt und -zersatz“ ist positiv korreliert mit den Hangrutschungen. Mit einem positiven Gewicht $W^+ = 0,91$ und einem Kontrast von $C = 1,10$ ($s(C) = 3,67$) hat diese Klasse allerdings nur moderate Vorhersagekraft. Dieser Bodentyp ist auf den steilen Hängen der Albtäler und des Albtraufs zu finden. Sie ist besonders im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets (bei Jungingen) vorherrschend.

Andere Bodenformen, die am Albtrauf vorkommen, wie der kalkhaltige, braune Auenboden, sind mit den Trainingsdaten unkorreliert, weil hier bisher keine Hangrutschungen aufgetreten sind. Dies ist morphologisch auch zu untermauern, da diese Böden die Talauen der Alb, flache Senkenbereiche und hügelige Albhochflächen, sowie die sanften Rücken und schmale Plateaus des Weißjuras und des Tertiärs bilden.

Tabelle 13 und Abbildung 51 zeigen die statistischen Parameter für die Bodentypen auf Klassenbasis.

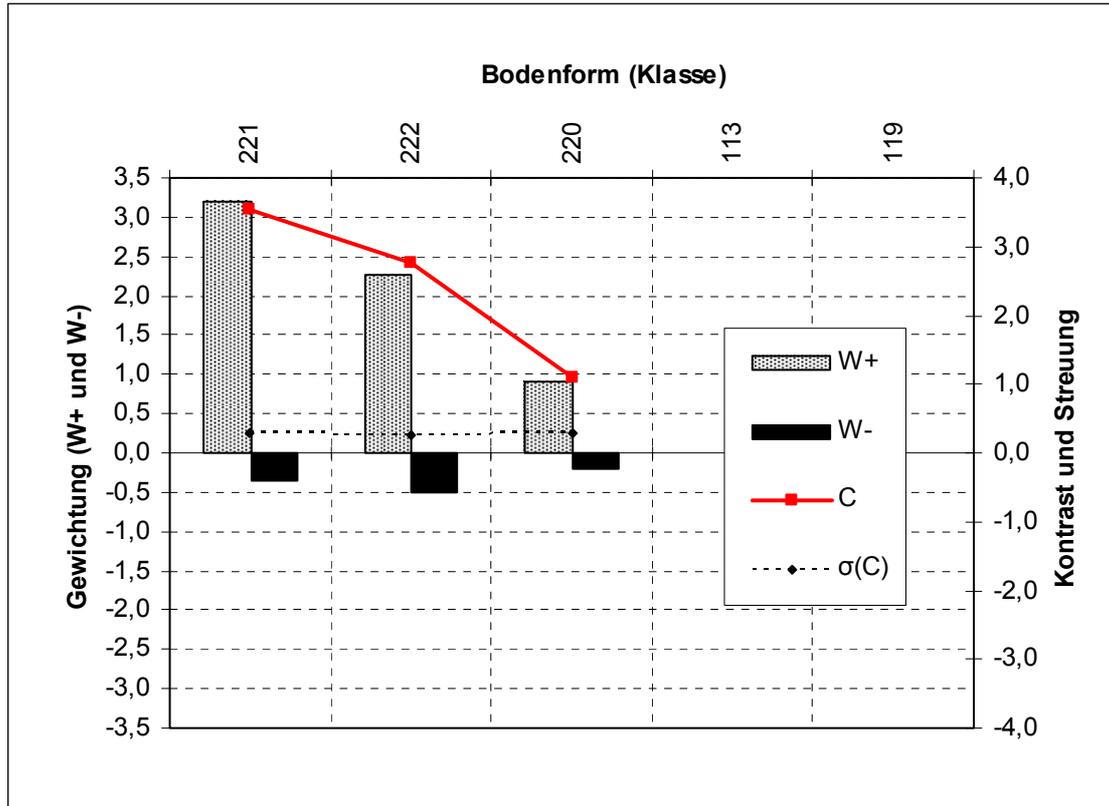


Abbildung 51: Die Bodenformen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. (221), (222) sind signifikante Indikatoren für Hangrutschungen. (220) ist schwach korreliert mit den Hangrutschungen. Alle anderen Bodenformen (113, etc.) sind mit den Rutschungslokalitäten unkorreliert, da keine Hangrutschungen in diesen Klassen vorliegen.

Tabelle 13: Die Bodenformen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$, vgl. dazu Abbildung 51.

Klasse	Kurzbeschreibung	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
221	Pararendzina aus lehmig-tonigen Rutschmassen über Mergelsteinzersatz und Rendzina aus Hangschutt	3,19	0,24	-0,34	0,16	3,53	0,29	12,12
222	Pararendzina aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinzersatz	2,27	0,20	-0,50	0,17	2,77	0,27	10,30
220	Rendzina und Braunerde-Rendzina aus Kalksteinschutt und -zersatz	0,91	0,26	-0,19	0,15	1,10	0,30	3,67
	etc.	-	-	-	-	-	-	-

7.3.2.3 Hangneigung

Für das Untersuchungsgebiet wurden Hangneigungen zwischen 0° und 39° ermittelt. Anders als bei den diskreten Daten über Geologie und Leitbodenform, werden die Gewichte für die kontinuierlichen Hangneigungsdaten kumulierend berechnet.

Aus der Überkreuzung der Hangneigung (β) mit den Trainingsdaten ist ersichtlich, dass Hangrutschungen in einem Neigungsbereich von $\beta=4^\circ$ bis $\beta=27^\circ$ aufgetreten sind. Die positiven Gewichte dieser Neigungsklassen sind durchwegs größer als null und somit mit den bekannten Hangrutschungen positiv korreliert. Bei einer Hangneigung von $\beta=19^\circ$ ist mit $W^+=1,87$ das Maximum der kumulierten, positiven Gewichte erreicht.

Ab einem Gefälle von $\beta < 12^\circ$ verliert die Hangneigung als rutschungsbegünstigender Faktor jedoch an Signifikanz: Bei einem Gefälle von $\beta=12^\circ$ erreicht der normalisierte Kontrast sein Maximum ($sC=9,80$) und nimmt mit kleiner werdender Neigung stetig ab. Der Neigungsbereich, welcher mit den Hangrutschungen in signifikantem Zusammenhang steht, liegt daher zwischen $\beta=11^\circ$ bis $\beta=26^\circ$. Diese Einschätzung deckt sich mit der Analyse von THEIN (2001), der in dem Bereich von 10° bis 30° ein gehäuftes Auftreten von Hangrutschungen identifiziert hat.

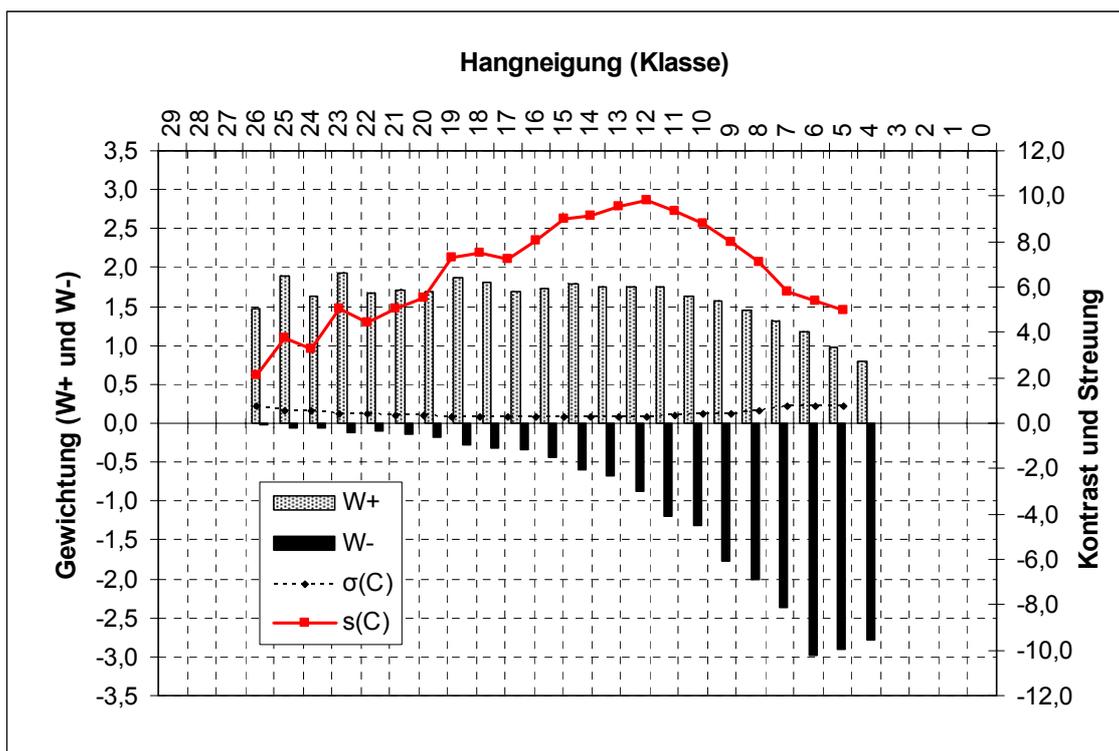


Abbildung 52: Die Hangneigung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Hangneigungen zwischen 11° und 26° sind signifikante, rutschungsbegünstigende Faktoren.

Tabelle 14: Die Hangneigung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$; vgl. dazu Abbildung 52.

(β) Hangneigung [°]	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
39	-	-	-	-	-	-	-
etc.	-	-	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-
26	1,47	0,71	-0,03	0,13	1,50	0,72	2,08
25	1,90	0,50	-0,06	0,14	1,96	0,52	3,77
24	1,62	0,50	-0,06	0,14	1,68	0,52	3,24
23	1,93	0,38	-0,11	0,14	2,04	0,40	5,05
22	1,68	0,38	-0,11	0,14	1,79	0,40	4,42
21	1,70	0,33	-0,14	0,14	1,84	0,36	5,07
20	1,69	0,30	-0,18	0,15	1,86	0,34	5,54
19	1,87	0,25	-0,29	0,16	2,16	0,30	7,30
18	1,81	0,24	-0,33	0,16	2,14	0,29	7,49
17	1,70	0,23	-0,34	0,16	2,04	0,28	7,26
16	1,74	0,21	-0,44	0,17	2,18	0,27	8,06
15	1,79	0,19	-0,59	0,19	2,38	0,27	8,98
14	1,75	0,18	-0,69	0,20	2,44	0,27	9,15
13	1,75	0,17	-0,88	0,22	2,63	0,27	9,57
12	1,75	0,15	-1,20	0,26	2,95	0,30	9,80
11	1,64	0,15	-1,32	0,28	2,95	0,32	9,34
10	1,58	0,14	-1,77	0,35	3,35	0,38	8,77
9	1,44	0,14	-2,01	0,41	3,46	0,43	8,01
8	1,30	0,14	-2,37	0,50	3,67	0,52	7,08
7	1,16	0,14	-2,99	0,71	4,16	0,72	5,77
6	0,98	0,14	-2,90	0,71	3,89	0,72	5,40
5	0,80	0,14	-2,78	0,71	3,59	0,72	4,98
4	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-

7.3.2.4 Hangwölbung

Die aus dem Höhenmodell (90 m Auflösung) abgeleitete Hangwölbung (χ) liegt zwischen -0,4 und 1,1. Aufgrund der groben Auflösung des Höhenmodells sind diese Werte lediglich grobe Annäherungen an das Relief. Sie sind als verallgemeinerte Wölbungstendenz anzusehen.

Die Gewichte wurden kumulierend – beginnend bei den konvexen Bereichen – berechnet. Eine positive Korrelation ist bei konvexen Hangwölbungen von $\chi > 0,1$ bis $\chi = 0,5$ gegeben. Der Kontrast zeigt, dass dieser Zusammenhang bei den Hangwölbungsklassen $\chi > 0,2$ bis $\chi = 0,5$ auch signifikant ist.

Bei gestreckten bzw. flachen Gebieten (Hangwölbung um $\chi = 0$) ist so gut wie keine Korrelation festzustellen.

Konkave Hangwölbungen sind mit den Hangrutschungen negativ korreliert und somit Indikatoren für Hangstabilität. Die negativen Gewichte sind positiv ($W^- > 0$) und die positiven Gewichte sind negativ ($W^+ < 0$). Bei einer Wölbung von $\chi > -0,2$ bis $\chi = -0,1$ ist diese negative Korrelation am größten.

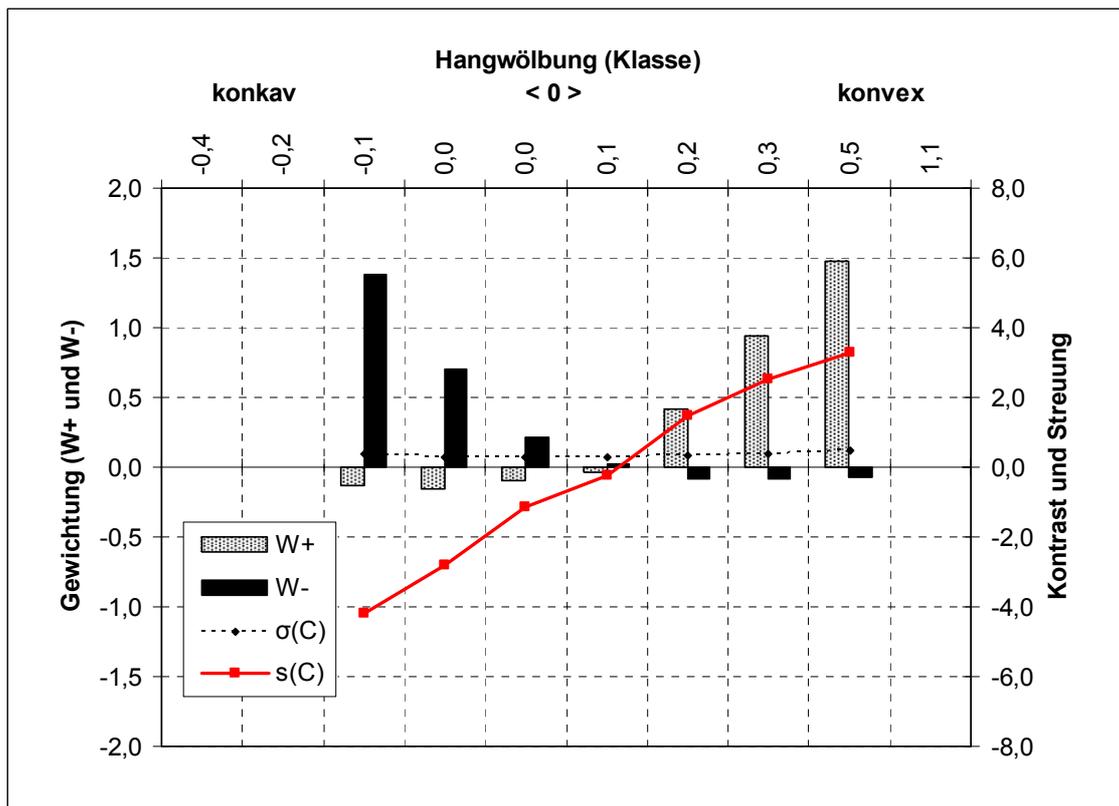


Abbildung 53: Die Hangwölbung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Eine positive Korrelation ist bei konvexen Hangwölbungen von $\chi > 0,1$ bis $\chi = 0,5$ gegeben. Der Kontrast zeigt, dass dieser Zusammenhang bei den Hangwölbungsklassen $\chi > 0,2$ bis $\chi = 0,5$ auch signifikant ist.

Tabelle 15: Die Hangwölbung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$; vgl. dazu Abbildung 53.

(χ) Hangwölbung	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
< -0,4	-	-	-	-	-	-	-
> -0,4 bis -0,2	-	-	-	-	-	-	-
> 0,2 bis -0,1	-0,13	0,14	1,39	0,33	-1,52	0,36	-4,17
> 0,1 bis -0,04	-0,15	0,15	0,71	0,27	-0,86	0,31	-2,80
> -0,04 bis 0	-0,10	0,16	0,22	0,22	-0,32	0,28	-1,15
> 0 bis 0,1	-0,04	0,20	0,03	0,17	-0,06	0,27	-0,24
> 0,1 bis 0,2	0,41	0,30	-0,08	0,15	0,49	0,34	1,46
> 0,2 bis 0,3	0,94	0,38	-0,08	0,14	1,02	0,40	2,52
> 0,3 bis 0,5	1,47	0,45	-0,07	0,14	1,54	0,47	3,29
> 0,5 bis 1,1	-	-	-	-	-	-	-

7.3.2.5 Dichte von Lineamenten und Störungszonen

Ein flächendeckender Dichteraster liegt als Interpolation der Lineamente, welche aus der Interpretation der Satellitenbilder gewonnen wurden, vor (vgl. Kapitel 6.5.2). Die Gewichte werden kumulierend - beginnend bei den höchsten Dichten an Lineamenten und Störungszonen - berechnet. Die Dichtewerte (ρ) sind dimensionslose, relative Bezugsgrößen. Die Dichtewerte wurden zuvor auf ganzzahlige Werte gerundet. Insgesamt sind Dichten zwischen $\rho=0$ bis $\rho=47$ berechnet worden.

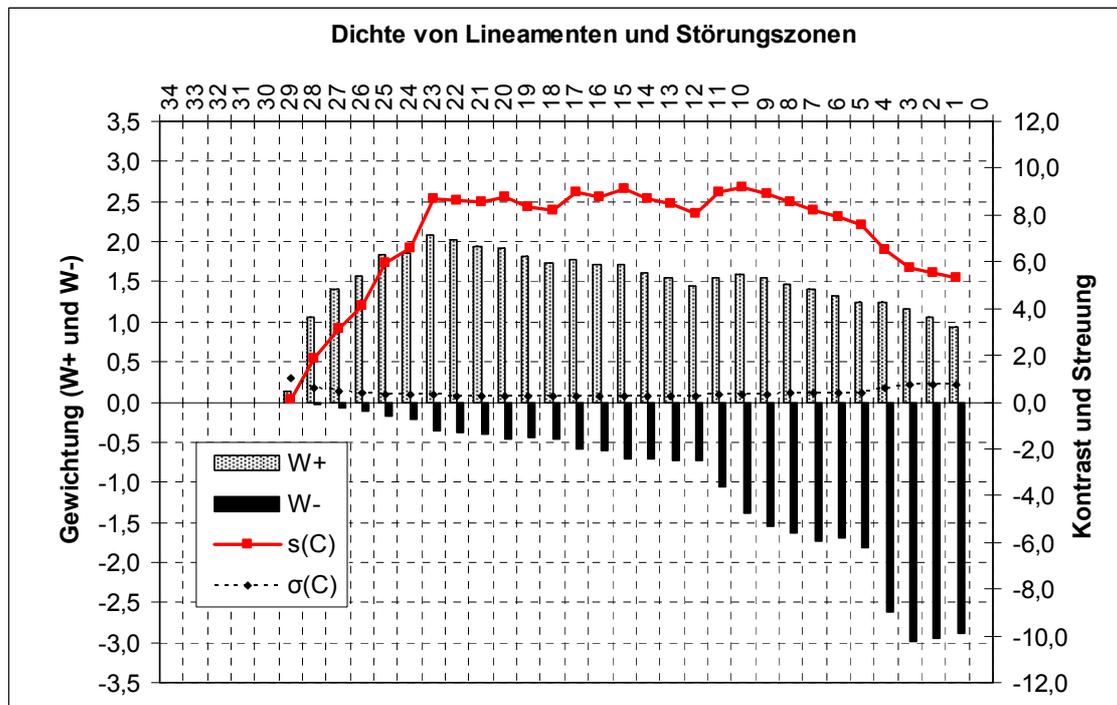


Abbildung 54: Die Dichte von Lineamenten und Störungszonen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator.

Tabelle 16: Die Dichte von Lineamenten und Störungszonen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$; vgl. dazu Abbildung 54.

(ρ) Dichte	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
47	-	-	-	-	-	-	
bis	-	-	-	-	-	-	
30	-	-	-	-	-	-	
29	0,13	1,00	0,00	0,13	0,13	1,01	0,13
28	1,05	0,58	-0,04	0,14	1,09	0,59	1,83
27	1,41	0,45	-0,07	0,14	1,48	0,47	3,15
26	1,56	0,38	-0,11	0,14	1,67	0,40	4,13
25	1,83	0,30	-0,18	0,15	2,01	0,34	5,98
24	1,85	0,28	-0,22	0,15	2,07	0,32	6,55
23	2,09	0,23	-0,36	0,16	2,46	0,28	8,72
22	2,02	0,22	-0,38	0,16	2,40	0,28	8,65
21	1,95	0,22	-0,41	0,17	2,35	0,28	8,55
20	1,92	0,21	-0,46	0,17	2,38	0,27	8,79
19	1,81	0,21	-0,45	0,17	2,26	0,27	8,35
18	1,74	0,20	-0,47	0,17	2,20	0,27	8,21
17	1,78	0,19	-0,59	0,19	2,37	0,27	8,95
16	1,71	0,19	-0,61	0,19	2,33	0,27	8,78
15	1,71	0,18	-0,72	0,20	2,43	0,27	9,09
14	1,61	0,18	-0,71	0,20	2,32	0,27	8,68
13	1,55	0,17	-0,73	0,20	2,28	0,27	8,50
12	1,45	0,17	-0,72	0,20	2,17	0,27	8,07
11	1,56	0,16	-1,05	0,24	2,61	0,29	8,99
10	1,60	0,15	-1,38	0,29	2,99	0,33	9,18
9	1,54	0,15	-1,55	0,32	3,09	0,35	8,87
8	1,47	0,14	-1,63	0,33	3,10	0,36	8,54
7	1,40	0,14	-1,73	0,35	3,13	0,38	8,21
6	1,32	0,14	-1,70	0,35	3,02	0,38	7,91
5	1,25	0,14	-1,81	0,38	3,06	0,40	7,57
4	1,23	0,14	-2,62	0,58	3,85	0,59	6,50
3	1,15	0,14	-2,99	0,71	4,14	0,72	5,75
2	1,05	0,14	-2,94	0,71	3,99	0,72	5,55
1	0,94	0,14	-2,88	0,71	3,82	0,72	5,31
0	-	-	-	-	-	-	

Generell sind Hangrutschungen bei Dichten von $\rho=1$ bis $\rho=29$ aufgetreten. Eine deutliche Korrelation der Dichtewerte mit den Hangrutschungen tritt *bei einer mittleren Lineamentdichte* von $\rho=23$ und $\rho=24$ auf. Dieser Zusammenhang ist bei einem Kontrast von $sC > 8,5$ signifikant. Ab dieser mittleren Dichte sinken die positiven Gewichte sowie deren Signifikanz (ab einer Dichte von $\rho=10$) mit der Konzentration an Lineamenten und Störungszonen. Mit abnehmender Dichte sinkt folglich die positive Korrelation mit den Hangrutschungen. In den Bereichen mit sehr hoher Dichte sind keine Hangrutschungen aufgetreten. Diese Bereiche deuten möglicherweise auf stark zerklüftete Gebiete hin, welche keine typischen Verbreitungsgebiete für den untersuchten Rutschungstyp sind.

7.3.2.6 Distanz zur Traufkante

Die Traufkante wird in dem Modell als Übergang der Weißjura zur Schwarzen Jura/Braunen Jura repräsentiert. Der Weißjura enthält die Oxford-Kalke, welche als Stufenbildner am Albrauf in Erscheinung treten.

Hangrutschungen sind in einer Distanz bis 2100 m von der Traufkante aufgetreten. Die Korrelation mit den Hangrutschungen ist umso größer, je geringer die Distanz zur Traufkante wird.

In einer Distanz von $d=200\text{m}$ bis $d=400\text{m}$ ist die höchste, positive Korrelation von rund $W^+=2,0$ gegeben. Dieser Zusammenhang ist mit einem normalisierten Kontrast von $s(C)=8,7$ bis $s(C)=9,9$ signifikant. Danach nimmt die Korrelation mit zunehmender Distanz von der Traufkante ab. Ein Einfluss ist also bis $d=400\text{m}$ gegeben.

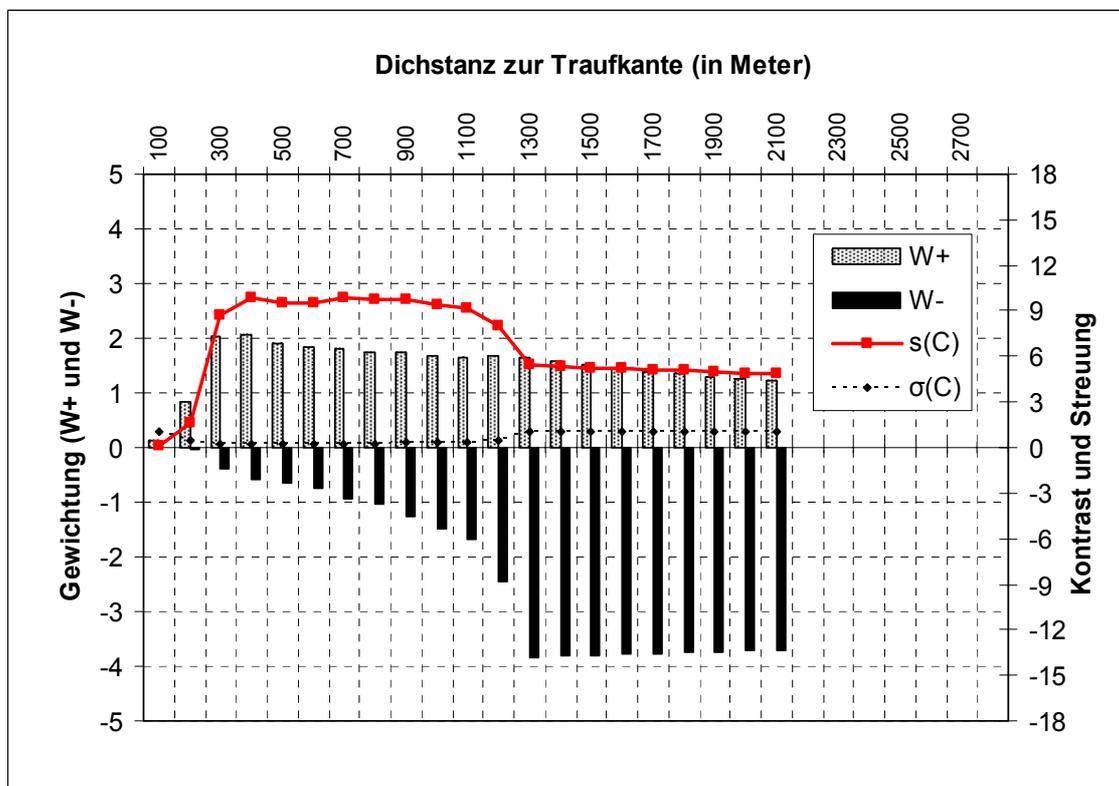


Abbildung 55: Die Distanz zur Traufkante und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Ein Einfluss der Traufkante ist bis zu einer Distanz von $d=400\text{m}$ gegeben.

Tabelle 17: Die Distanz zur Traufkante und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. Die Tabelle zeigt die Gewichte W^+ , W^- , deren Standardabweichungen $\sigma(W^+)$, $\sigma(W^-)$, den Kontrast C , dessen Standardabweichung $\sigma(C)$ und den normalisierten Kontrast $s(C)$; vgl. dazu Abbildung 55.

(d) Distanz [m]	W^+	$\sigma(W^+)$	W^-	$\sigma(W^-)$	C	$\sigma(C)$	$s(C)$
0 bis 100	0,13	1,00	0,00	0,13	0,13	1,01	0,13
>100 bis 200	0,82	0,50	-0,04	0,14	0,87	0,52	1,67
>200 bis 300	2,04	0,22	-0,39	0,16	2,42	0,28	8,71
>300 bis 400	2,05	0,19	-0,58	0,18	2,63	0,27	9,91
>400 bis 500	1,90	0,19	-0,63	0,19	2,54	0,27	9,56
>500 bis 600	1,83	0,18	-0,73	0,20	2,55	0,27	9,56
>600 bis 700	1,82	0,16	-0,94	0,22	2,76	0,28	9,92
>700 bis 800	1,74	0,16	-1,03	0,24	2,77	0,29	9,70
>800 bis 900	1,73	0,15	-1,26	0,27	2,99	0,31	9,70
>900 bis 1000	1,69	0,15	-1,48	0,30	3,18	0,34	9,46
>1000 bis 1100	1,65	0,14	-1,67	0,33	3,31	0,36	9,12
>1100 bis 1200	1,66	0,14	-2,46	0,50	4,13	0,52	7,96
>1200 bis 1300	1,65	0,13	-3,83	1,00	5,48	1,01	5,43
>1300 bis 1400	1,58	0,13	-3,82	1,00	5,39	1,01	5,35
>1400 bis 1500	1,51	0,13	-3,80	1,00	5,31	1,01	5,27
>1500 bis 1600	1,46	0,13	-3,78	1,00	5,24	1,01	5,19
>1600 bis 1700	1,40	0,13	-3,77	1,00	5,17	1,01	5,12
> 1700 bis 1800	1,35	0,13	-3,75	1,00	5,10	1,01	5,06
>1800 bis 1900	1,30	0,13	-3,73	1,00	5,04	1,01	4,99
>1900 bis 2000	1,26	0,13	-3,72	1,00	4,97	1,01	4,93
>2000 bis 2100	1,22	0,13	-3,70	1,00	4,91	1,01	4,87
>2100 bis 2200							
bis							
>15300 bis 15400							

7.3.3 Reklassifizierung

Die zuvor auf Klassenbasis berechneten, statistischen Parameter werden dazu verwendet, um eine optimale Reklassifizierung der Steuerungsfaktoren zu erreichen. Die Reklassifizierung dient dazu, die räumliche Beziehung zwischen den Steuerungsfaktoren und den Trainingsdaten bestmöglich auszudrücken. Dabei werden die Daten in einige wenige Klassen zusammengefasst.

Prinzipiell wäre es auch möglich die Daten mit ihren vielen Klassen in die Berechnung einzubeziehen. Allerdings würde dies die Aussagekraft der Analyse schmälern, da beim Zusammenführen (geometrische Verschneidung nach der vergleichenden Methode, vgl. Kapitel 7.4) aller Steuerungsfaktoren eine so hohe Anzahl an neuen Klassen entstehen würde, welche kaum oder nur schwer interpretierbar ist. In dem vorliegenden Modell würden rund 12.700 koinzidente Kombinationen entstehen. Daher wird vorab eine Reklassifizierung durchgeführt, welche die gewichteten Steuerungsfaktoren in drei aussagekräftige Klassen aggregiert: In eine Klasse, wo (0) keine Trainingspunkte vorlagen und daher keine statistische Auswertung erfolgte, eine Klasse mit jenen Zellen bei denen (1) keine oder negative Korrelationen mit den Trainingsdaten festgestellt wurde und schließlich eine Klasse mit jenen Zellen bei denen (2) positive Korrelation mit den Trainingsdaten vorliegt.

Diese Reklassifizierung ist wesentlich, da für diese ausgewählten Klassen die Gewichte und die anderen Parameter, berechnet werden. Zur Reklassifizierung werden die statistischen Parameter - der Kontrast C und die Anzahl der Trainingspunkte N - die zuvor auf Klassenbasis berechnet wurden (vgl. 7.3.2) herangezogen.

Bei den kategorischen Daten ist diese Zuordnung einfach. Mittels Abfrage (*map query*) können die entsprechenden Klassen abgefragt und reklassifiziert werden (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Generalisierung der kategorialen Daten mittels Reklassifizierung.

Klasse	Beschreibung	Abfrage
0	Keine Trainingspunkte	$N = 0$
1	Keine Korrelation	$C \leq 0$
2	Korrelation	$C > 0$

Bei den kontinuierlichen Daten mit ihren kumulierten Gewichten muss anders an die Reklassifizierung herangegangen werden. Am Beispiel Hangneigung gilt es zu bestimmen, ab welcher Neigung der Einfluss auf Hangrutschungen nicht mehr gegeben ist. Bei der Distanz zur den Lineamenten muss definiert werden, ab welcher Entfernung keine Beeinflussung der Hangstabilität gegeben ist. Der Kontrast C beziehungsweise der standardisierte Kontrast sC wird dazu verwendet einen „Cut-Off“, ab welchem der Einfluss nicht mehr geben ist zu definieren. Ist der Kontrast bei seinem Maximum angelangt, so ist auch der räumliche Zusammenhang zu den Hangrutschungen am größten. Ab diesem Maximalwert nehmen Einfluss und damit auch Kontrast ab (vgl. Abbildung 56).

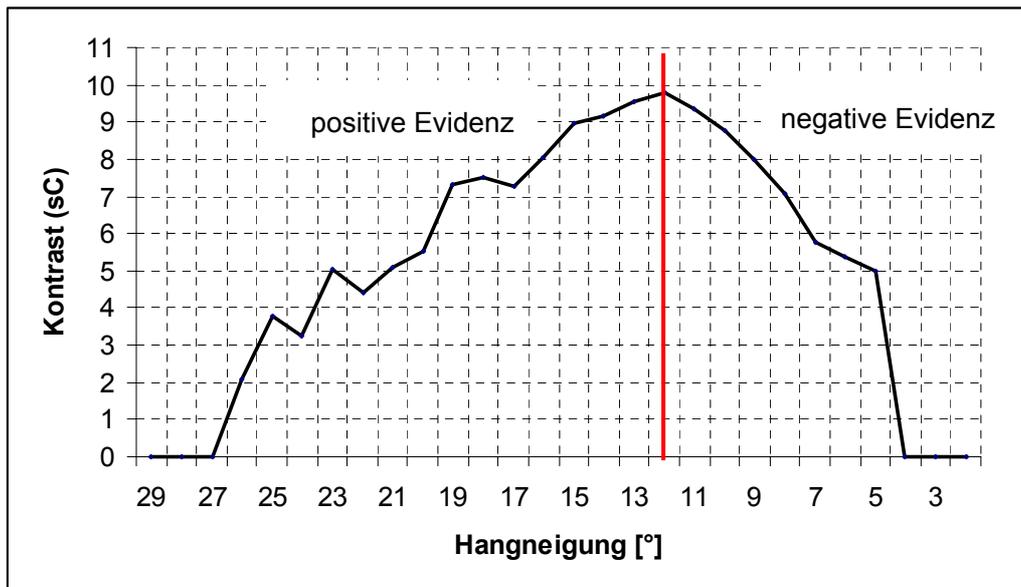


Abbildung 56: Standardisierter Kontrast mit abnehmender Hangneigung. Der Kontrast ist ein Maß für die räumliche Beziehung der Evidenz (Hangneigung) und den Hangrutschungen. Der Kontrast erreicht bei 12° seinen Maximalwert und nimmt mit zunehmender Distanz ab. Steigende Werte deuten auf eine positive Evidenz, absteigende Werte auf eine negative Evidenz hin. Der Maximalwert kann als „Cut-Off“ Wert für die Klassifizierung verwendet werden.

7.3.3.1 Zusammenfassung der Hangrutschungsindikatoren

In Tabelle 19 sind jene Faktoren zusammengefasst, die eine hohe Korrelation mit den Trainingsdaten aufweisen. Diese Faktoren sind daher als die wesentlichen Steuerungsfaktoren für die bisher aufgetretenen Hangrutschungen identifiziert. Da man annehmen kann, dass Hangrutschungen des gleichen Typs unter ähnlichen Bedingungen entstehen, kann man diese Faktoren auch als Indikatoren für zukünftige Hangrutschungen betrachten.

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass besonders die steilen Lagen, welche aus Umlagerungssedimenten wie Kalktuffe, Hangschutt, Fließerden und Schwemmkegel bestehen, gefährdet sind. Diese sind stark tonhältig und schluffig, eine Konsistenz die besonders für Hanginstabilität prädestiniert ist. Aufgrund der wasserstauenden Wirkung der Tone sowie die Wechsellagerung mit wasserdurchlässigen Kalksteinen bewirkt die laut THEIN (2000) die hohe Rutschanfälligkeit.

Die Oxford-Schichten der Weißjura, welche als Stufenbilder die Schichtstufenlandschaft des Albtraufs formen, wurden als Hangrutschungsindikator bestätigt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Analysen von KALLINICH (1999) und THEIN (2001). Insgesamt zeigte sich ein Bereich um 400 m um die Traufkante als besonders rutschungsgefährdet.

Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse spiegeln sich in den Bodenformen wieder. Die Hauptbodenform des Albanstieges und der steilen Hänge der Albtäler (Pararendzina aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinersatz) wurde als wesentlicher Hangrutschungsindikator identifiziert. Dieser Bodentyp wird im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes von Pararendzinen aus steinig-tonigen Fließerden als Hangrutschungsindikator verdrängt. Auch die Bodenformen deuten, wie die Geologie, auf die Bedeutung des Tongehaltes als Ursache hin.

Die Einschätzung des Hangneigungsbereichs zwischen 11° bis 26° als hangrutschungsbegünstigend deckt sich mit der Analyse von THEIN (2001), der ein gehäuftes Auftreten von Hangrutschungen in einem Bereich von rund 10°-30° festgestellt hat.

Tabelle 19: Zusammenfassung der wichtigsten Steuerungsfaktoren.

Evidenz Steuerungsfaktor	Evidenzklasse	W ⁺	sC
Geologische Einheit	Hangschutt, Fließerden, Rutschmassen, Schwemmkegel des Quartär	2,15	11,27
	Oxford-Schichten der Jura	1,79	8,43
Leitbodenform	Pararendzina aus lehmig-tonigen Rutschmassen über Mergelsteinersatz und Rendzina aus Hangschutt	3,19	12,12
	Pararendzina aus steinig-tonigen Fließerden über Mergelsteinersatz	2,27	10,30
Hangneigung	25° bis 26°	1,47	2,08
	24° bis 25°	1,90	3,77
	23° bis 24°	1,62	3,24
	22° bis 23°	1,93	5,05
	21° bis 22°	1,68	4,42
	20° bis 21	1,70	5,07
	19° bis 20°	1,69	5,54
	18° bis 19°	1,87	7,30
	17° bis 18°	1,81	7,49
	16° bis 17°	1,70	7,26
	15° bis 16°	1,74	8,06
	14° bis 15°	1,79	8,98
	13° bis 14°	1,75	9,15
	12° bis 13°	1,75	9,57
11° bis 12°	1,75	9,80	
Hangwölbung	> 0,2 bis 0,3 (konvex)	0,94	2,52
	> 0,3 bis 0,5 (konvex)	1,47	3,29
Dichte von Lineamenten und Störungszonen	26 bis 27	1,56	4,13
	25 bis 26	1,83	5,98
	24 bis 25	1,85	6,55
	23 bis 24	2,09	8,72
	22 bis 23	2,02	8,65
Distanz zur Traufkante	200m bis 300m	2,04	8,71
	300m bis 400m	2,05	9,91

7.4 Multikriterien Beurteilung

Als letzter Schritt erfolgt die multikriterien Beurteilung, die eigentliche räumliche Vorhersage. Alle Steuerungsfaktoren werden dabei mit einander kombiniert und die Eintrittswahrscheinlichkeit für künftige Hangrutschungen (A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit) berechnet.

Die Kombination der Steuerungsfaktoren erfolgt durch die lagebezogene Verschneidung der Daten, wobei alle Evidenzklassen miteinander kombiniert werden und ein neues Raster kreiert wird. Eine Verschneidungsoperation (*index overlay*) generiert eine neue Ergebnisdatenschicht als eine Funktion von einer oder mehrerer Eingangsdatenschichten. Die Funktion welche bei der Evidenzgewichtung zur Anwendung kommt ist die Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit mit Hilfe des BAYES Theorems unter Verwendung der Gleichung 36, 37. Das Ergebnis ist eine Datenschicht mit einem einzigen Index, der die Gefährdung durch Hangrutschungen widerspiegelt (MALCZEWSKI 1999).

Die Verschneidung der Daten erfolgt nach dem Prinzip der vergleichenden Methode (*unique condition*). Jene Zellen bei denen die gleiche Charakteristik oder Bedingungen in den Eingangsdaten vorliegen, werden in der Attributtabelle aggregiert. Konkret bedeutet das, dass nicht jede Zelle eine eindeutige Identifikationsnummer erhält, sondern die koinzidenten Kombinationen von Klassen, die bei der Verschneidung ermittelt werden. Die Anzahl der auftretenden Kombinationen, auch als *unique condition unit* bezeichnet, hängt sowohl von der Anzahl der Faktoren, als auch von der Anzahl ihrer Klassen ab. Für jede dieser Kombinationen wird nach der geometrischen Verschneidung die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit und andere statistische Parameter berechnet.

Bevor aber die Wahrscheinlichkeiten berechnet werden können, müssen für die reklassifizierten Steuerungsfaktoren, die Evidenzgewichte – analog zur Berechnung auf Klassenbasis (vgl. Kapitel 7.3.2)- ermittelt werden.

7.4.1 Evidenzgewichtung

Für die drei Klassen (0) keine Trainingspunkte, (1) keine oder negative Korrelation und (2) positive Korrelation wird für jedes Evidenzthema ein Gesamtgewicht (W^+), der Kontrast (C) und die Konfidenz (= standardisierte Kontrast sC) berechnet. Die Gewichtung gibt die relative Bedeutung der Steuerungsfaktoren für die Entstehung von Hangrutschungen an.

Tabelle 20 und Abbildung 57 geben die berechneten Parameter wieder. Die Klasse (2) besitzt nur positive Gewichte, eine Bestätigung der positiven Korrelation zwischen den Rutschungen und dem jeweiligen Evidenzthema. Je größer das Gewicht, umso höher ist die relative Bedeutung dieser Evidenz als Steuerungsfaktor für Massenbewegungen. Im Gegensatz dazu, sind die Gewichte in der Klasse (1) durchwegs negativ, was die negative Korrelation dieser Klasse bestätigt.

Tabelle 20: Gewichtung der Evidenzen in den Klassen 0 (keine Trainingspunkte), 1 (keine oder negative Korrelation) und 2 (positive Korrelation) .

Evidenzthema	W^+			Kontrast	Konfidenz
	0	1	2		
Leitbodenform	-8,47	-	1,81	10,28	1,03
Geologie	-7,97	-2,89	1,71	9,68	0,97
Lineament-Dichte	-4,31	-1,05	1,65	5,96	0,59
Distanz-Traufkante	-3,69	0,74	1,83	5,52	5,44
Hangneigung	-3,20	-0,88	1,79	4,99	0,49
Hangwölbung	-	-0,15	0,68	0,83	2,68

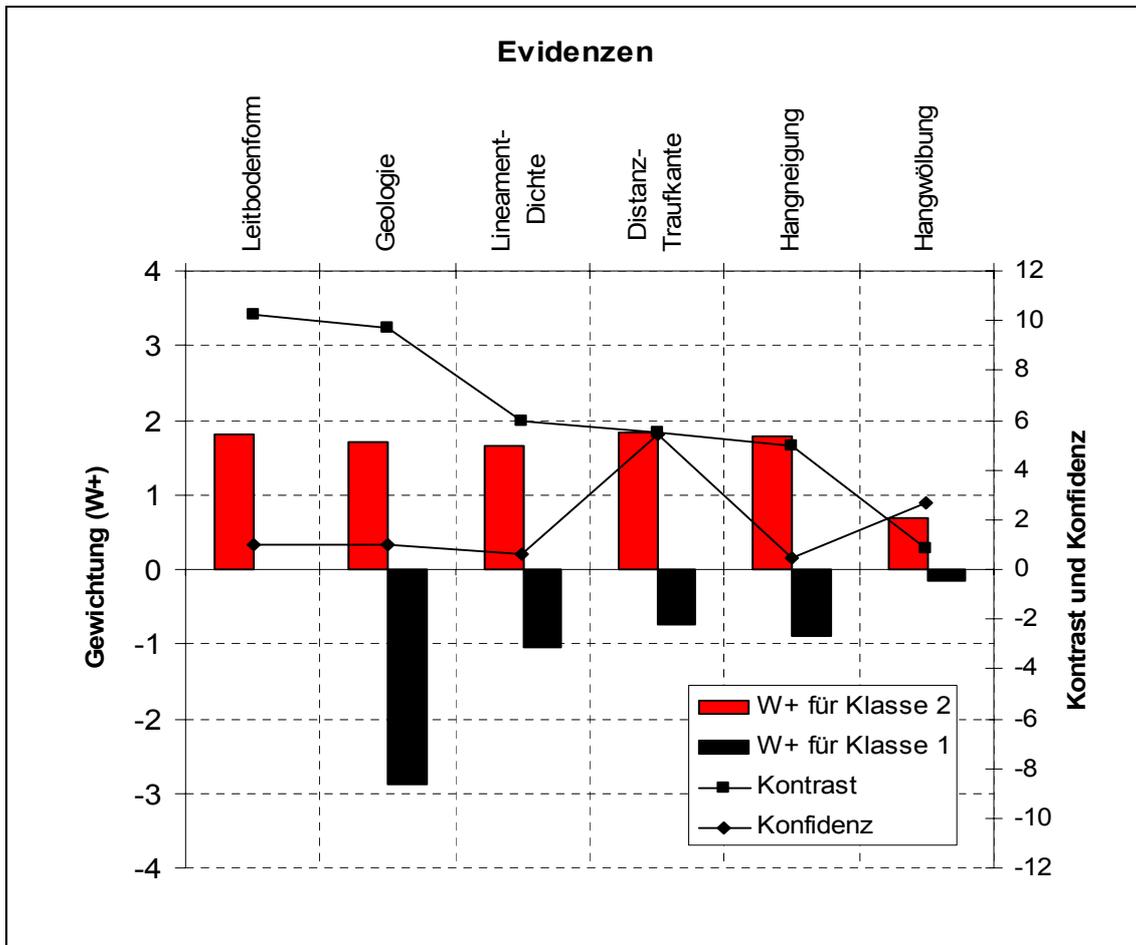


Abbildung 57: Gewicht, Kontrast und Konfidenz für die Klasse (1) (keine oder negative Korrelation) und (2) (positive Korrelation) der Evidenzthemen.

Die *Bodenform und die Geologie* sind mit einem Gewicht von $W^+ > 1,7$ einem Kontrast von $C=10,3$ und $C=9,7$ (bei einer Konfidenz ~ 1) Indikatoren für Hangrutschungen mit *sehr starker Vorhersagekraft*. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Analysen von THEIN (2000) und KALLINICH (1999), welche die geologischen Verhältnisse als Primärursache der Massenbewegungen ansehen. Insbesondere entstehen diese aufgrund der Wechsellagerung wasserdurchlässiger Kalksteine und Hangschuttmassen mit wasserstauenden Tonen sowie Mergeln.

Die Distanz zur Traufkante hat mit einem Gewicht von $W^+=1,83$ ebenfalls *sehr gute Vorhersagekraft*. Auffallend ist bei dieser Evidenz die *sehr hohe Konfidenz* (>5). Dies ist mit den geringen Streuungswerten zu erklären, da sich die Hangrutschungen in einem engen Bereich um die Traufkante befinden, der nur wenig variiert. Die Distanz zur Traufkante ist daher ein äußerst zuverlässiger Indikator bei der Bewertung der Hangrutschungsgefährdung.

Die *Dichte von Lineamenten und Störungszonen (Lineament-Dichte)*, sowie die *Hangneigung* sind mit Gewichten von $W^+=1,65$ und $W^+=1,79$ einem Kontrast $C \sim 5,0$ Indikatoren mit *guter Vorhersagekraft*. Die Konfidenz $< 0,6$ ist bei diesen Evidenzen vergleichsweise gering. Je größer die Konfidenz ist, desto glaubwürdiger sind der berechnete Kontrast und die Gewichte

Die *schlechteste Vorhersagekraft hat die Hangwölbung*, sie geht mit einem Gewicht von $W^+ = 0,7$ in die Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit ein. Ein Kontrast um null, deutet darauf hin, dass diese Evidenz nur schwach positiv und beinahe unkorreliert ist. Da die Hanggeometrie erwiesenermaßen als Ursache für Massenbewegungen am Albtrauf gilt, ist diese geringe Gewichtung mit der Qualität des SRTM Höhenmodells zu begründen. Mit einer Auflösung von 90 m ist das Höhenmodell nicht geeignet um das Kleinrelief auf regionalem Niveau zu untersuchen. Offensichtlich ist keine statistische Signifikanz in den sehr groben Klassen festzustellen.

7.4.2 Eintrittswahrscheinlichkeit

Die zuvor ermittelten Gewichte werden verwendet, um die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit also die Eintrittswahrscheinlichkeit für künftige Hangrutschungen, unter Einbezug aller Evidenzen zu berechnen. Das BAYES Theorem (vgl. Gleichung 37, 38) wird eingesetzt um alle Evidenzen zusammenzuführen. Neben der Wahrscheinlichkeit werden folgende Parameter für jede *unique condition unit* ermittelt:

- Normalisierte Wahrscheinlichkeit, welche die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit reskaliert darstellt, so dass das Gesamtmaß für die bedingte Unabhängigkeit erfüllt ist.
- Summe der ermittelten Gewichte.
- Unsicherheit, die sich aus der Berechnung der Gewichte ergibt (Standardabweichungen).
- Unsicherheit, welche sich aus fehlenden Daten ergibt.
- Gesamte Unsicherheit, die sich der Berechnung der Gewichte und den fehlenden Daten ergibt.

Die berechneten A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten liegen zwischen null und 91% (vgl. Abbildung 59). Bezieht man allerdings die Unsicherheiten, die sich aus den fehlenden Daten und der Streuung bei der Berechnung der Gewichte ergibt in die Wahrscheinlichkeitswerte mit ein, so werden diese deutlich reskaliert. Die Unsicherheiten im Modell liegen zwischen null und 0,60 (vgl. Abbildung 61). Die normalisierten Wahrscheinlichkeiten berücksichtigen diese Unsicherheiten und liegen im Bereich zwischen null und 2,3% (vgl. Abbildung 60).

Abbildung 58 zeigt, dass die normalisierten Wahrscheinlichkeiten eine starke Reskalierung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten bewirkt. Dies lässt vermuten, dass die gesamte bedingte Abhängigkeit für das Modell hoch ist.

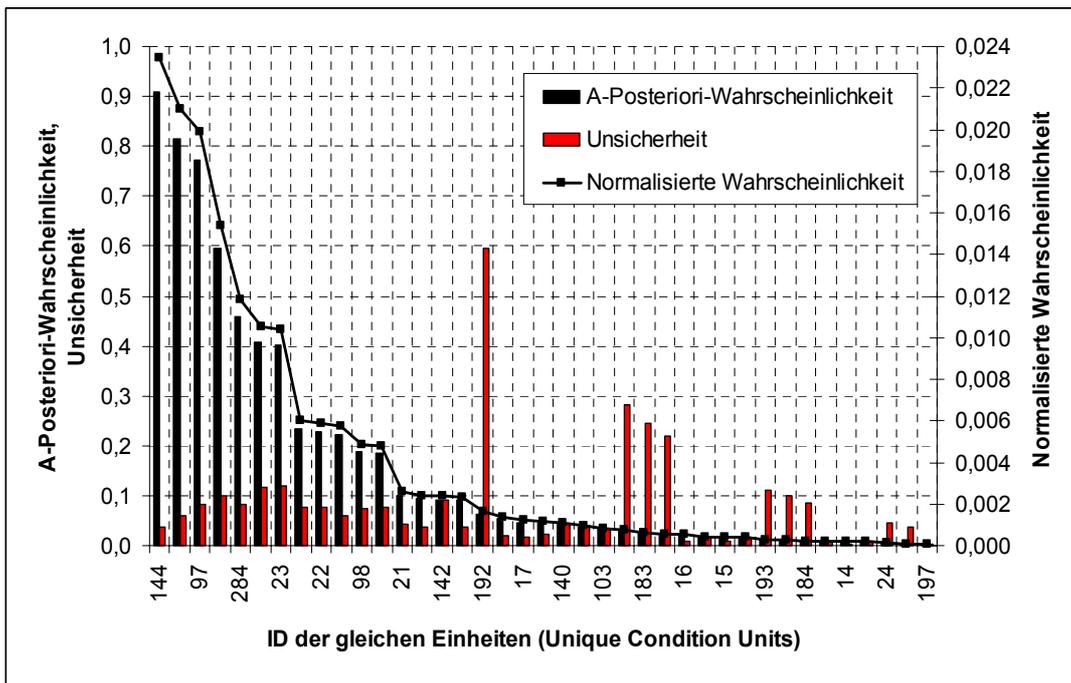


Abbildung 58: Wahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten. Aus Platzgründen sind nur ein Teil der unique condition units dargestellt (bis A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten $>0,003$): Die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit wird durch das Maß für die bedingten Unabhängigkeit des Modells stark reskaliert.

Die Methode der Evidenzgewichtung bietet für die Prüfung der gesamten bedingten Unabhängigkeit zwischen den Evidenzen einen einfachen Test. Das Produkt aus Fläche $N\{A\}$ und A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit P , beide aufsummiert über alle Einheiten, entspricht der Anzahl an Punkten, welche durch das Modell vorhergesagt werden:

$$N\{D\}_{berechnet} = \sum_{k=1}^m P_k \cdot N\{A\}_k \quad (49)$$

wobei $k=1,2,\dots,m$ Pixel der Karte sind. Dieser Gleichung liegt die Annahme zu Grunde, dass die A-Priori-Wahrscheinlichkeit der durchschnittlichen, bekannten Hangrutschungsdichte entspricht. Wenn die berechnete Anzahl von Hangrutschungen viel größer ist, als die tatsächlich bekannte Anzahl, dann ist das ein Zeichen, dass die Chi-Statistik verletzt wurde (vgl. Kapitel 7.2). Ein Verhältnis wird dann berechnet zwischen tatsächlichen Trainingspunkten und der berechneten Anzahl an Punkten. Das Verhältnis liegt immer

zwischen 0 und 1. Ein Wert von 1 zeigt totale bedingte Unabhängigkeit, kommt aber in der Praxis so gut wie niemals vor. Werte kleiner als 1 deuten auf bedingte Abhängigkeit hin, je kleiner der Wert desto größer ist die Abhängigkeit. Ab einem Wert von 0,5 (50%) kann man daher von bedingter Abhängigkeit sprechen. Der Test ergibt einen Wert von 0,03 was drauf hindeutet, dass die Anzahl der Hangrutschungen überschätzt wurde und daher bedingte Abhängigkeiten zwischen den Evidenzen bestehen. Die Reklassifizierung der Daten bewirkte also räumliche Abhängigkeiten der Evidenzklassen hinsichtlich der Hangrutschungslokalitäten. Die Hangrutschungen werden folglich überschätzt, wodurch auch die hohen Werte für die berechneten A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten des Modells erklärt werden. Diese hohen Wahrscheinlichkeiten sind auf die hohe Anzahl von Trainingsdaten zurück zu führen. Jede Hangrutschung wurde nicht nur durch einen einzigen Trainingspunkt repräsentiert, sondern – je nach Größe der Rutschung – durch mehrere Punkte (vgl. Kapitel 7.1). Um stabile Gewichte zu erreichen, darf die Anzahl der Trainingspunkte nicht zu klein sein, sonst nehmen die Varianzen derart zu, dass keine statistische Signifikanz mehr erreicht werden kann. Die Anzahl der Trainingspunkte wurde darauf abgestimmt. Die erzielten Eintrittswahrscheinlichkeiten können daher nicht als absolute Größen betrachtet werden. Als relative Grade der Rutschanfälligkeit betrachtet, liefern die Wahrscheinlichkeiten jedoch ein quantitatives Maß für die Gefährdung durch Hangrutschungen.

7.5 Gefährdungskarte

Das Ergebnis der Evidenzgewichtung ist ein Raster mit kontinuierlichen Werten für die Wahrscheinlichkeit, dass Hangrutschungen auftreten. Eine hohe Wahrscheinlichkeit weist auf eine höhere Rutschanfälligkeit (Gefährdung durch Hangrutschungen) hin.

Um die Gefahrenhinweiskarte leichter interpretierbar zu machen, ist es ratsam, die Wahrscheinlichkeiten in einige wenige Klassen zusammen zu fassen. Bei der Visualisierung in der Gefahrenhinweiskarte wurden die Klassenbreiten so gewählt, dass jede Klasse die gleiche Fläche (gleiche Anzahl von Pixel) umfasst.

Abbildung 59 zeigt die berechneten A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten für die rezenten Rutschungen. Die Überprüfung des Modells ergab, dass diese Wahrscheinlichkeiten überschätzt wurden, daher sollten diese als relative Grade der Rutschanfälligkeit betrachtet werden. Die Karte zeigt weiters die pleistozänen Rotationsschollen, welche nicht in die Modellierung miteinbezogen wurden, jedoch potentielle Verbreitungsgebiete für sekundäre, rezente Bewegungen repräsentieren. Weiters wird in Abbildung 58 die Hangrutschungsgefährdung laut des Landschaftsökologischen Atlas von Baden-Württemberg dargestellt (DURWEN ET AL. 1996). Ein Vergleich mit der, in der vorliegenden Arbeit erzielten Gefährdungsbeurteilung verdeutlicht, dass eine räumlich differenziertere Einschätzung getroffen werden konnte.

Abbildung 60 stellt die normalisierten Wahrscheinlichkeiten dar. Diese beziehen die Güte des Modells mit ein und reskalieren die A-Posteriori-Wahrscheinlichkeiten auf ein geringeres Niveau. Diese Werte sind ebenfalls als relative Rutschanfälligekeitsgrade zu sehen. Abbildung 61 zeigt die gesamte Unsicherheit, welche sich aus fehlenden Daten und Varianzen ergibt.

Gefährdungskarte für rezente Rutschungen (Albtrauf)

Rutschanfälligkeit ausgedrückt durch relative Eintritts-Wahrscheinlichkeiten für Hangrutschungen

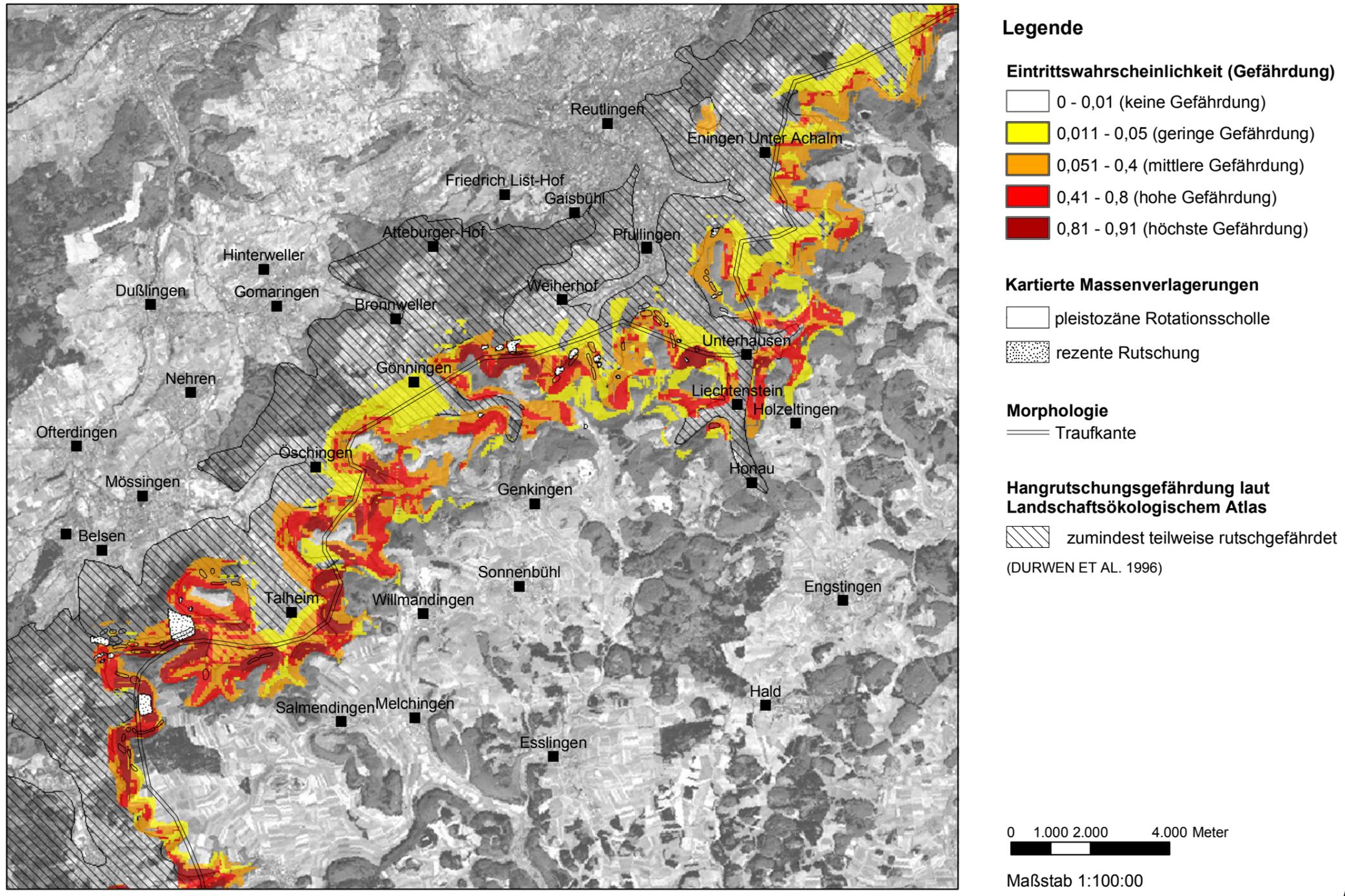


Abbildung 59: Gefährdungskarte für rezente Rutschungen: A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit berechnet durch Evidenzgewichtung

Gefährdungskarte für rezente Rutschungen (Albtrauf) inklusive Unsicherheiten

Rutschanfälligkeit ausgedrückt durch relative Eintritts-Wahrscheinlichkeiten für Hangrutschungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten im Modell

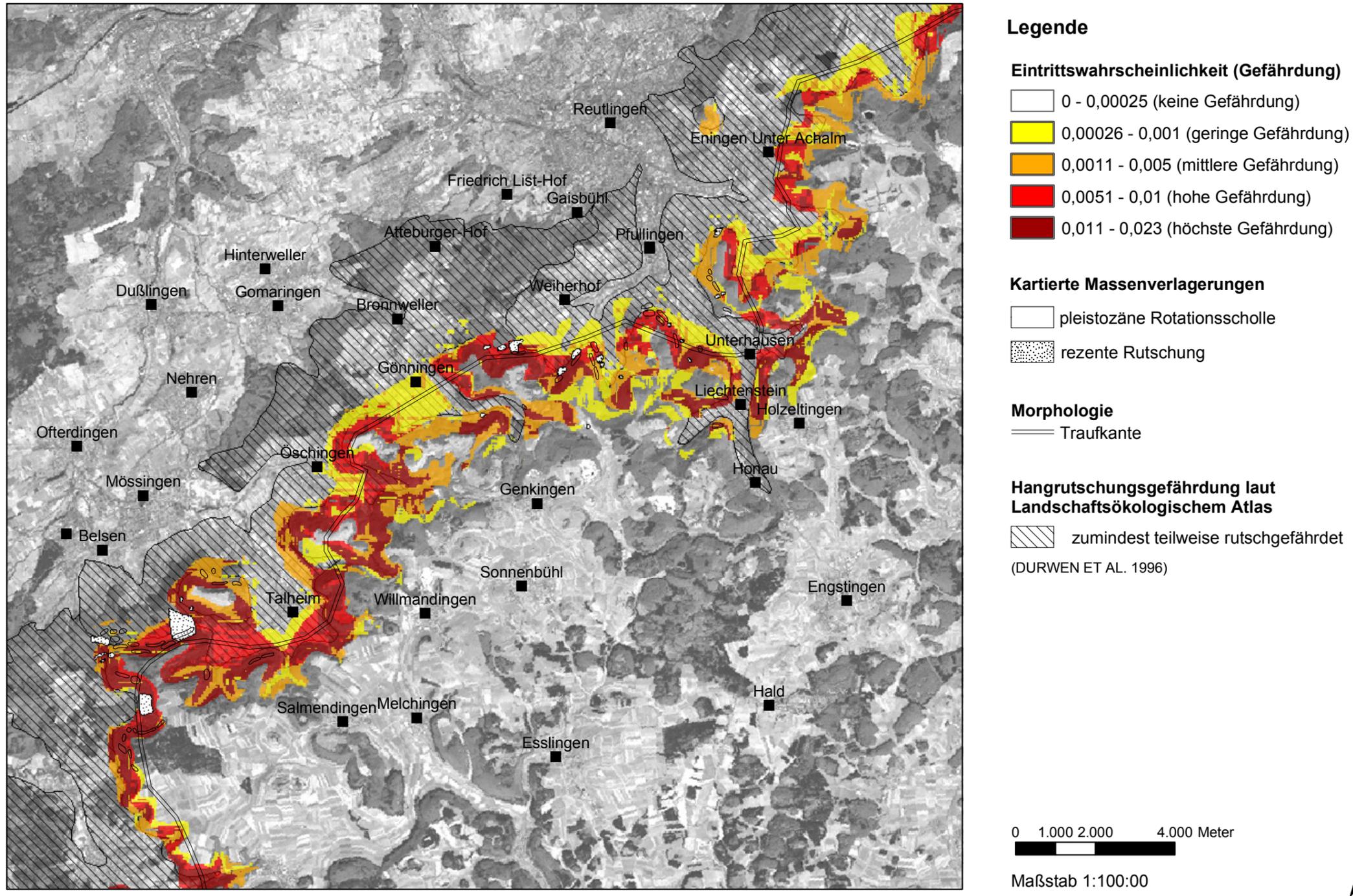


Abbildung 60: Gefährdungskarte für rezente Rutschungen: Normalisierte A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit berechnet durch Evidenzgewichtung

Gesamte Unsicherheit bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten

Unsicherheiten ergeben sich durch die Streuung bei der Berechnung der Gewichte und durch fehlende Daten

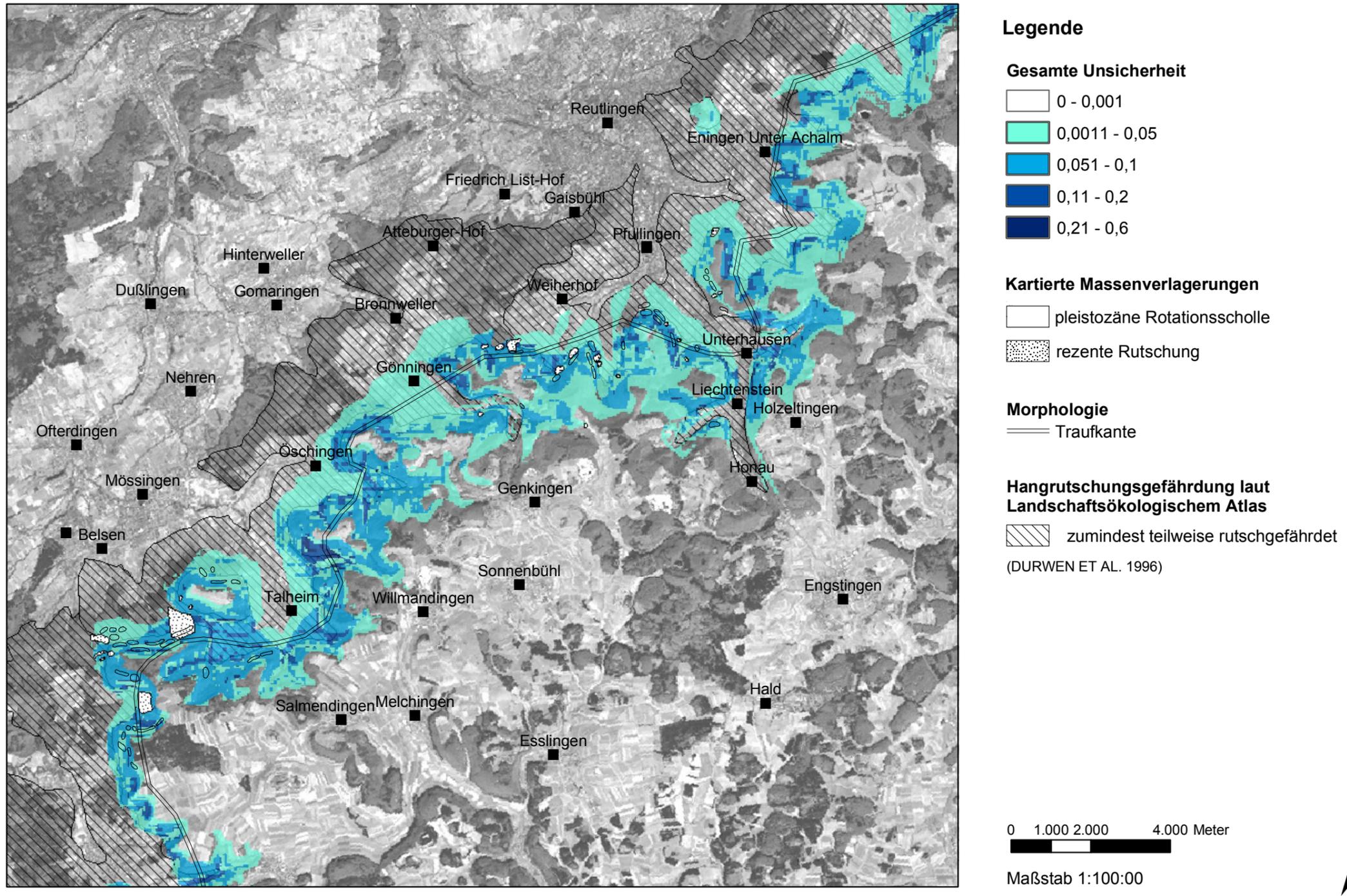


Abbildung 61: Gesamte Unsicherheit bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten

8 BEWERTUNG UND VALIDIERUNG

In der Literatur werden in jüngster Zeit verschiedene Methoden zur Validierung von Gefährdungskarten diskutiert. Darunter sind REMONDO ET AL. (2003), CHUNG, FABBRI (2003), und VAN WESTERN (2003) zu nennen, welche die Berechnung der Erfolgsrate (*success rate*) und Vorhersagerate (*prediction rate*) vorschlagen, die in der vorliegenden Arbeit zur Bewertung des erstellten Modells herangezogen werden.

8.1 Effektivität des Modells (Erfolgsrate)

Häufig werden die erstellten Modelle beurteilt, indem man untersucht, inwieweit die bekannten Massenbewegungen mit der Gefährdungszonierung koinzidiert. Diese Beurteilung kann aber nicht als Validierung der Vorhersagwerte, sondern muss als Bewertung der *Güte oder Effektivität* des Modells bezeichnet werden. Aus diesem Grund, wird jene Kurve, die sich aus der Gegenüberstellung der bekannten Massenbewegungen und der Gefährdungszonen ergibt, als *Erfolgsrate* bezeichnet.

Die Erfolgsrate ist also ein Maß für die Effektivität des Modells und stellt die kumulierten Hangrutschungen dem kumulierten Flächenanteil des Untersuchungsgebietes gegenüber, beginnend mit jenen Bereichen, welche die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen.

Zunächst wird die ermittelte Gefährdungskarte (welche die *unique condition units* beinhaltet) mit den bekannten Hangrutschungen überlagert. Mit Hilfe zonaler Statistik wird die Anzahl der Rutschungen pro *unique condition unit* berechnet. Danach wird die Anzahl der Trainingspunkte, als auch die Flächenanteile der *unique condition unit*, beginnend bei den höchsten Wahrscheinlichkeiten, kumuliert. Die Flächenanteile, der als gefährdet eingestuft Bereiche, werden dem Anteil der erfassten Hangrutschungen gegenübergestellt.

Mit Hilfe der Darstellung (vgl. Abbildung 62) kann man erkennen, wie viele der Hangrutschungen mit den gefährdeten Bereichen erfasst werden. Je steiler die Kurve, desto höher ist die Effektivität des Modells. Mit dem vorliegenden Modell konnten bereits bei 10% des als rutschanfällig klassifizierten Untersuchungsgebietes, 90% der Hangrutschungen erfasst werden. Diese hohe Koinzidenz von Hangrutschungen und Gefährdungsklassen verdeutlicht die hohe Effektivität des Modells.

Nachdem die Hangrutschungen auch in der Modellierung verwendet werden, ist diese Gegenüberstellung jedoch keine Beurteilung der Vorhersagekraft oder Gültigkeit des Modells.

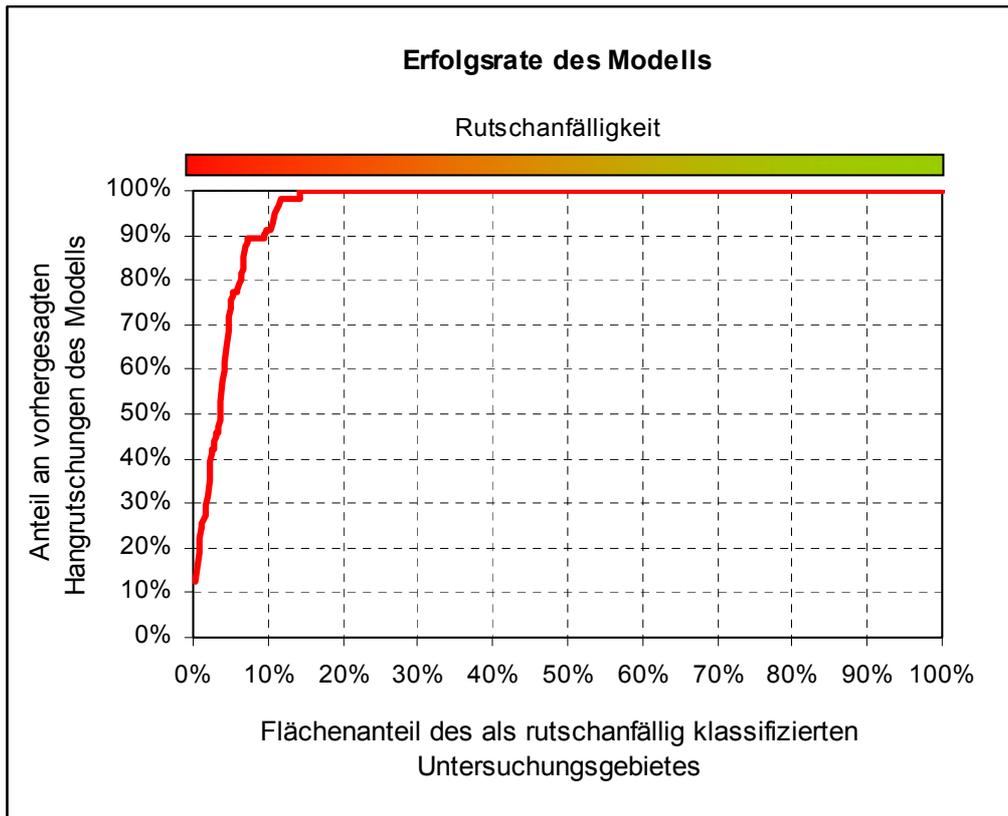


Abbildung 62: Erfolgsrate; Gegenüberstellung der Flächenanteile des Untersuchungsgebietes, welches als rutschanfällig klassifiziert ist und der Anteile der durch das Modell erfassten Hangrutschungen. Es wurden alle Hangrutschungen herangezogen, die in das Modell auch als Trainingsdaten eingeflossen sind.

8.2 Validierung des Modells (Vorhersagerate)

Eine echte *Validierung* ist im Grunde erst möglich, wenn nach Erstellung der Gefährdungskarte, eine Hangrutschung auftritt. Diese „Wait and See“ Strategie ist aber wenig zufrieden stellend, da gleichzeitig mit der Erstellung der Gefährdungskarte eine Maß für die *Gültigkeit bzw. die Vorhersagekraft* des Modells geliefert werden sollte. Dies ist notwendig um die, durch die Gefährdungskarte, aufgestellte Hypothese über das Auftreten von Hangrutschungen, zu testen und zu beurteilen. Besonders wenn die Gefährdungsbeurteilung als Entscheidungsgrundlage oder –hilfe Anwendung finden soll, ist dies eine Grundvoraussetzung.

Eine Möglichkeit der Validierung ist eine Gruppe von Hangrutschungen der Gefährdungskarte gegenüberzustellen, welche *nicht* in die Modellierung als Trainingsdaten eingeflossen sind. Diese Hangrutschungen sind somit vom Modell unabhängig und können als „zukünftige“ Rutschungsereignisse betrachtet werden (CHUNG ET AL. 2003). Die Berechnung der unabhängigen Hangrutschungen, welche durch die - als gefährdet eingestuft - Gebiete erfasst wurden, nennt man die *Vorhersagerate*.

Die Berechnung der Vorhersagerate erfordert die Trennung der bekannten Massenbewegungen in zwei Gruppen: In eine Modellierungsgruppe (Trainingsdaten) und eine Validierungsgruppe. Um die Validierungsgruppe auszuwählen, werden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen:

Eine Möglichkeit ist (a) eine zufällige Auswahl von Hangrutschungen, eine andere Möglichkeit ist (b) die räumliche Trennung. Dabei wird das Modell in *einem* Bereich erstellt und in einem *anderen* Bereich überprüft. Die dritte Möglichkeit ist (c) die zeitliche Trennung der Hangrutschungen. Während die älteren Rutschungen in die Modellierung einfließen, werden die jüngeren zur Modellbeurteilung herangezogen VAN WESTERN ET AL. (2003). Dieser Ansatz wird am ehesten dem Anspruch der „Vorhersage“ gerecht, erfordert aber die Kenntnis über die zeitliche Verteilung der Hangrutschungen in einer meist großen Zeitspanne. Sofern keine historischen Aufzeichnungen vorliegen ist eine Datierung von Hangrutschungen nur durch Expertenbeurteilung möglich.

Für die vorliegende Arbeit stand keine Datierung zur Verfügung. In diesem Bewertungsschritt werden die Trainingsdaten daher nach dem Zufallsprinzip in eine Modellierungs- und Validierungsgruppe eingeteilt und das Modell nochmals mit der Modellierungsgruppe durchgeführt. Die Modellierungsgruppe ist demnach eine kleinere Gruppe als die ursprünglich verwendeten Trainingsdaten (alle Hangrutschungen) im eigentlichen Modell.

Das Ergebnis wird anschließend der Validierungsgruppe gegenübergestellt: Nach der neuerlichen Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit unter Verwendung der Modellierungsgruppe wird nun die Gefährdungskarte mit der Validierungsgruppe überlagert und mittels zonaler Statistik – analog zur Berechnung der Erfolgsrate – die Anzahl der erfassten Hangrutschungen pro *unique condition unit* ermittelt. Anschließend werden die Hangrutschungen sowie der Flächenanteil pro *unique condition units*, beginnend bei der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit, kumuliert.

Indem man mit Hilfe dieser Berechnung (vgl. Abbildung 63) erkennen kann, wie viele der Hangrutschungen mit dem Modell „vorhergesagt“ werden konnten, ist es möglich die Vorhersagekraft des Modells zu beurteilen.

Die Vorhersagerate ist im ersten Teil der Kurve (vgl. Abbildung 60) etwas flacher als die Erfolgsrate (vgl. Abbildung 59). Trotzdem ist die Vorhersagekraft des Modells sehr hoch ist. Bei 10% des Gebietes sind 95% der Hangrutschungen vorhergesagt worden.

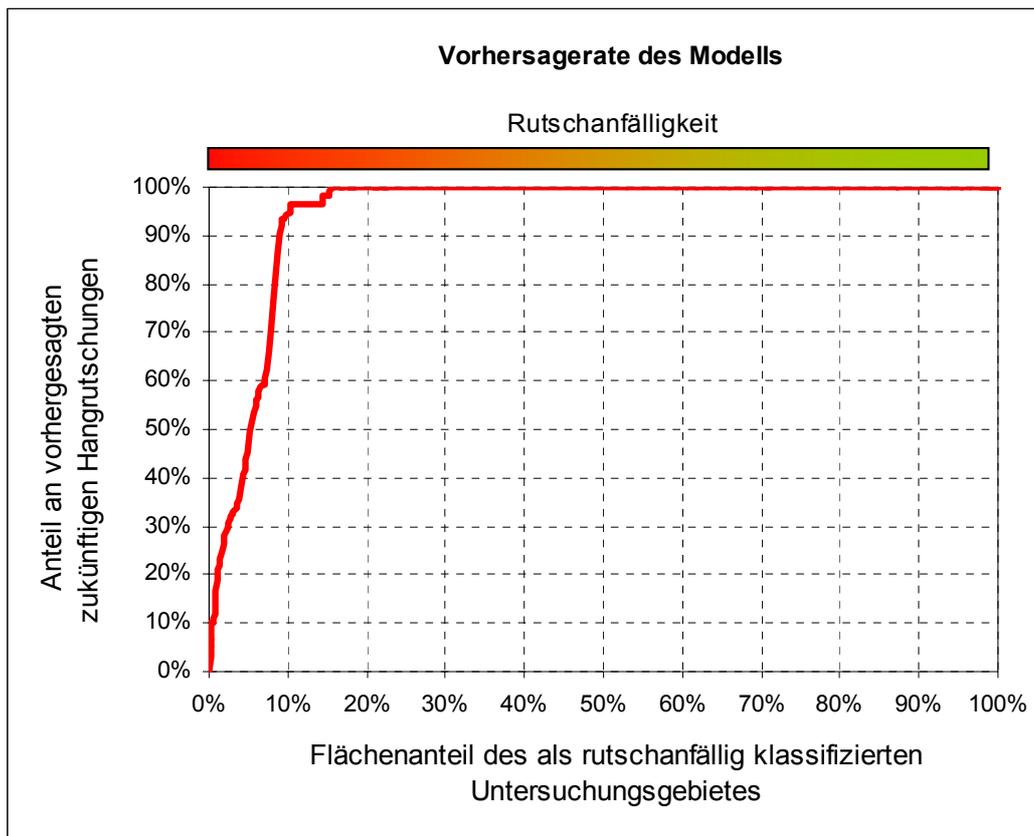


Abbildung 593: Vorhersagerate; Gegenüberstellung der Flächenanteile des Untersuchungsgebietes und der Anteile der vorhergesagten „zukünftigen“ Hangrutschungen. Es wurden jene Hangrutschungen herangezogen, die nicht in die Modellierung als Trainingsdaten eingeflossen sind und somit vom Modell unabhängig sind.

9 DISKUSSION

9.1 Diskussion der Ergebnisse

Mit Hilfe der Evidenzgewichtung konnten in der vorliegenden Arbeit *jene Hänge beurteilt werden, wo keine Informationen über Hangrutschungen vorlagen*. Diese Zielsetzung der räumlichen Vorhersage wurde erreicht.

Die Untersuchung der Effektivität und Vorhersagekraft zeigen, dass das Modell durchaus eine treffende Einschätzung der Rutschanfälligkeit erzielt. Allerdings ist die getroffene Aussage generell, da sie den gesamten Albtrauf als mehr oder weniger gefährdet einstuft. Dies ist allerdings nicht auf die Methode, sondern auf die groben (wenig Detaillierungsgrad) Eingangsdaten zurück zu führen, welche nur einen allgemeinen Überblick über das Gebiet geben. Sowohl der Erfassungsmaßstab der Geologie und Bodenformen, als auch die Auflösung des Höhenmodells geben auf regionaler Ebene nur eine generelle Auskunft über die vorliegenden Bedingungen. Um das Kleinrelief und alle Rutschungen detailgenau zu erfassen, müsste die Auflösung des Geländemodells mindestens 10 m betragen. Mit genaueren Daten hätte auch eine detailliertere Aussage (räumlich differenzierter und geowissenschaftlich präziser) getroffen werden können.

Vergleicht man allerdings die Karte des Landschaftsökologischen Atlas (DURWEN ET AL. 1996), welcher im gleichen Maßstab, wie die analysierten Daten erstellt wurde, so kann durchaus eine größere Differenzierung in der Gefährdungsabschätzung festgestellt werden. *Eine regionale Beurteilung der Rutschanfälligkeit* kann somit als gelungen angesehen werden. Trotz der eingeschränkten Daten, die zur Verfügung standen, konnte ein plausibles Ergebnis erzielt werden.

Die Rutschanfälligkeit, welche über den Grad der Gefährdung Auskunft gibt, konnte durch die berechneten Wahrscheinlichkeiten quantifiziert werden, obwohl die Wahrscheinlichkeiten im Modell systematisch überschätzt wurden. Betrachtet man die Wahrscheinlichkeitswerte nicht als absolute Größen, sondern als relative Werte für die Rutschanfälligkeit, so haben die Werte dennoch Gültigkeit und Aussagekraft.

Weiters konnte durch die Gewichtung der Steuerungsfaktoren, jene Faktoren identifiziert werden, welche die größte relative Bedeutung als Hangrutschungsindikatoren haben. Das erstellte Modell trifft daher für seinen räumlichen Geltungsbereich Aussagen über *kausalen Zusammenhänge* in dem natürlichen System von Hangstabilität bzw. –instabilität.

Informationen zu Unsicherheiten im Modell, Effektivität und Gültigkeit des Modells konnten geliefert werden: Einerseits bietet die Methode der Evidenzgewichtung die Möglichkeit, die Unsicherheiten im Modell zu berechnen, wodurch diese in das Endergebnis integriert werden konnten. Weiters wurden, durch die Berechnung der Erfolgsrate, Informationen über die Effektivität des Modells geliefert. Schließlich konnte, durch die Validierung des Modells mit unabhängigen Hangrutschungsdaten, die Vorhersagekraft und Gültigkeit des Modells ausgedrückt werden.

Die Ergebnisse werfen allerdings die Frage nach dem Einfluss von Datenqualität und Analyseparameter auf das Endergebnis auf:

Der Einfluss durch Unvollständigkeit, Ungenauigkeiten, aufgrund von Messfehlern oder starker Generalisierung der Daten ist in dem vorliegenden Modell nicht quantifiziert. Die *Durchführung einer Sensitivitätsanalyse* wäre folglich empfehlenswert. Sensitivitätsanalyse wird jener Prozess genannt, indem man auf indirekte Weise die Unsicherheiten ermittelt, welche durch fehlerhafte oder ungenaue Eingangsdaten entstehen. Von besonderem Interesse ist dabei, in welchem Ausmaß diese Ungenauigkeiten und Fehler das Endergebnis des Modells beeinflussen.

Neben der Sensitivitätsanalyse, wäre eine Untersuchung des Einflusses der Analyseparameter, welche vor der Modellanwendung definiert werden, empfehlenswert. Von besonderem Interesse wäre, den Einfluss der Größe der Basiseinheit (*unit area*) auf das Endergebnis zu bestimmen.

Die Anzahl der Trainingspunkte trägt entscheidend zur Gewichtung der Faktoren bei und beeinflusst die Stabilität (Standardabweichungen) der Gewichte im Modell. Es müssen genügend Trainingsdaten vorliegen um das Modell durchzuführen. Eine hohe Anzahl von Trainingsdaten bewirkt allerdings, dass die Wahrscheinlichkeiten und die Anzahl der vorhergesagten Hangrutschungen überschätzt werden, wie in dem vorliegenden Modell. Eine Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Größe des Untersuchungsgebietes und Anzahl der Trainingsdaten um eine stabile Gewichtung aber keine statistische Verfälschung des Phänomens zu erzielen, wäre sinnvoll. Dies könnte zu einer wesentlichen Verbesserung des Modells führen.

9.2 Diskussion der Methodik

Subjektivität kann bei der Methode, durch die statistische Gewichtung der Steuerungsfaktoren, weitgehend ausgeschlossen werden. Damit liegt ein neutrales und nachvollziehbares Bewertungsmodell vor.

Im Gegensatz zu den geomorphologischen Methoden, können durch die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten, rein qualitative Gefährdungsklassen mit scharfen Grenzen wie „gefährdet“ und „nicht gefährdet“ vermieden werden. Gegenüber der direkten Expertenbeurteilung sind die getroffenen Annahmen allerdings vereinfachend für den komplexen Massenbewegungsprozess. Die Annahme dass die Hangrutschungen in der Zukunft unter gleichen Bedingungen ablaufen wie in der Vergangenheit führt zu einer Verallgemeinerung, welche unter Umständen nicht immer zur Gänze zureffend ist. Dies ist allerdings ein generelles Problem von statistischen und probabilistischen Beurteilungsansätzen.

Ein wesentlicher Vorteil der Methode ist, dass Aspekte der Unsicherheit im Modell behandelt werden können. Dies betrifft insbesondere Unsicherheiten, die durch starke Varianz der Daten und durch fehlende Daten entstehen. Die Wahrscheinlichkeiten können somit auf ihre Plausibilität überprüft werden und gegebenenfalls die Unsicherheiten bei der Interpretation des Endergebnisses berücksichtigt werden.

Vorteilhaft ist weiters, dass sowohl diskrete als auch kontinuierliche Daten gehandhabt werden können. Allerdings ist durch die kumulierende Berechnung der statistischen Parameter bei kontinuierlichen Daten eine Einflussnahme des Bearbeiters gegeben: Je nachdem ob man die Werte absteigend oder ansteigend kumuliert, ergeben sich andere Gewichtungen für die Klassen.

Die Grundannahme der Evidenzgewichtung über die Unabhängigkeit der Steuerungsfaktoren hinsichtlich des Auftretens von Hangrutschungen, stellte sich bei der Anwendung des Modells als Nachteil heraus. Diese Annahme steht prinzipiell den natürlichen Zusammenhängen der Geofaktoren entgegen und ist daher nicht immer auf die verfügbaren Daten zureffend. Wird diese Annahme verletzt, so resultieren daraus unrealistische Wahrscheinlichkeitswerte. Dieses Problem kann aber umgangen werden, indem die Daten hinsichtlich ihrer Unabhängigkeit getestet werden und nur die unabhängigen Faktoren im Modell miteinander kombiniert werden. Dies erfordert das Verwerfen der abhängigen Faktoren, wodurch die Datenverfügbarkeit und somit die Beurteilungskriterien für die Gefährdungseinschätzung reduziert werden. Aufgrund dessen liegt in *dieser Grundannahme die größte Limitation der Methode*.

In diesem Zusammenhang erwies sich auch die Reklassifizierung der Daten vor der Verschneidung als nachteilig. Einerseits ist Einflussnahme durch den Bearbeiter gegeben, welcher die Klassengrenzen bestimmt, andererseits wurden durch die Generalisierung erneut räumliche Abhängigkeiten zwischen den Daten geschaffen.

Eine weitere wesentliche Einschränkung der Methode ist, dass die Ursachefaktoren (Geologie, Hydrologie, Landnutzung, etc) nicht aber die Auslöser von Hangrutschungen (Erdbeben, Starkregen, etc.) berücksichtigt werden können. Die zeitliche Vorhersage bleibt somit schwierig, weil irreguläre Starkregenfälle oder Erdbeben, welche eine Massenbewegung besonders in tektonisch instabilen Gebieten auslösen können, gar nicht oder nur ungenau vorhergesagt werden können.

9.3 Schlussfolgerungen

Die Gefährdungsabschätzung basiert auf der Annahme, dass bereits aufgetretene natürliche Massenbewegungen unter bestimmten geologischen, geomorphologischen und pedologischen Bedingungen ablaufen. Die Kenntnis über diese Bedingungen, welche durch identifizierbare physische Parameter gesteuert werden, erlaubt Rückschlüsse auf zukünftige Ereignisse.

Mit der Evidenzgewichtung konnte ein quantitatives Modell für Massenverlagerungen und deren Ursachen an der Schichtenstufe der Schwäbischen Alb erzeugt sowie in Gefährdungskarten dargestellt werden. Die berechneten Wahrscheinlichkeiten sind, aufgrund bestimmter Unsicherheiten im Modell, als relative Grade der Rutschanfälligkeit zu betrachten. Es konnte gezeigt werden, wie potentielle Hangrutschungsbereiche identifiziert und klassifiziert werden können.

Weiters konnte die relative Bedeutung der vorliegenden Steuerungsfaktoren für den Massenbewegungsprozess beurteilt werden, wodurch das Modell für seinen räumlichen Geltungsbereich Aussagen über kausale Zusammenhänge in einem natürlichen System trifft. Die Anwendung des Modells auf das Untersuchungsgebiet zeigte eine hohe Vorhersagekraft und Effektivität des Modells.

Die Beurteilung auf regionalem Niveau, ermöglicht nur eine grobe Abschätzung der Hanginstabilität, sie weist allerdings Gebiete aus, die einer Untersuchung im Feld oder sogar einer detaillierten geotechnischen Analyse unterzogen werden sollen. Weiters könnte sie als Entscheidungshilfe bei der Raum- und Landschaftsplanung zum Einsatz kommen, welche über Siedlungsentwicklung, Landnutzung und Infrastrukturplanungen entscheiden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Bestimmung des Gefährdungsgrades genauer gesagt des Rutschanfälligkeitsgrades durch die Evidenzgewichtung möglich ist, die Aussagekraft allerdings davon abhängt, wie genau die Steuerungsfaktoren erfasst sind.

Literatur

- AGTEBERG F.P., BONHAM-CARTER, G.F. (1990): *Deriving Weights of Evidence from Geoscience Contour Maps or the Prediction of Discrete Events*. In: Proceedings of the 22th Regional Symposiums on Computer Applications in the Minerals Industries (APCOM). - Technischen Universität Berlin: S. 381ff.
- ASPINALL, R.J (1992): *An Inductive Modelling Procedure based on Bayes' Theorem for Analysis of Pattern in Spatial Data*. In: International Journal of Geographical Information Systems Vol. 6. - Taylor & Francis: S. 105-121.
- ASPINALL, R.J., HILL, A.R. (1983): *Clinical Inference and Decisions-I: Diagnoses and Bayes' Theorem*. In: Ophthalmic and Physiological Optics Vol. 3. - Blackwell Publishing: S. 295-204.
- BEGUERÍA, S., LORENTE, A. (1999): *Landslide Hazard Mapping by Multivariate Statistics: Comparison of Methods and Case Study in the Spanish Pyrenees*. In: Projektbericht, Damocles (Debris Fall Assessment in Mountain Catchments for Local End-Users), EVG1-Ct-1999-00007: S. 5-16.
- BIBUS, E., TERHORST, B. (2001): *Mass Movements in Southwest Germany: Analyses and Results from the Tübingen Work Group of the MABIS Project*. In: DICKAU R., SCHMIDT, K. (Hrsg.), Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 125. - Gebrüder Borntraeger: S. 93-103.
- BIBUS, E. (1986): *Die Rutschung am Hirschkopf bei Mössingen (Schwäbische Alb): Geowissenschaftliche Rahmenbedingungen – Geoökologische Folgen*. Geoökodynamik Vol. 7. - Geo-Öko: S. 333-360.
- BONHAM-CARTER, G.F. (2002): *Geographic Information Systems for Geoscientist: Modelling with GIS*. - Pergamon: S. 302-334.
- BONHAM-CARTER, G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT, D.F. (1989): *Weights of Evidence Modelling: A New Approach to Mapping Mineral Potential*. In: Statistical Applications in Earth Sciences, Nr.89-9. - Geological Survey of Canada: S. 171-183.
- BRABB, E. (1984): *Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping*. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, Toronto, Nr.1: S. 307-323.
- BUNZA, G. (1992): *Instabile Hangflanken und ihre Bedeutung für die Wildbachkunde*. Forschungsbericht des Deutschen Alpenvereins, Nr. 5: S. 357 ff.
- BURROUGH, P.A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. - Oxford University Press: S. 50.
- CARRARA A., CARDINALI A., GUZZETTI F., REICHENBACH P. (2001): *GIS-Based Techniques for Mapping Landslide Hazard*. Research Centre for Informatics and Telecommunication Systems, National Research Council. [URL:] <http://deis158.deis.unibo.it/gis/chapt0.htm> (2005-02-15): S. 1-8.

- CHUNG, C-J.F., FABRI, A. (2003): *Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping*. In: Natural Hazards Vol. 30. - Kluwer Academic Publishers: S. 451-472.
- CHUNG, C-J.F., FABRI, A. (2005): *Systematic Procedures of Landslide-Hazard Mapping for Risk Assessment using Spatial Prediction Models*. In: GLADE, T., ANDERSON, M.G., CROZIER, M.J.; *Landslide Hazard and Risk Part I, Conceptual Models in Approaching Landslide Risk*; Nr. 4. – John Wiley & Sons, Inc.: S. 5-41.
- CONRAD, O. (1998): *Ableitung Hydrologisch Relevanter Reliefparameter aus Digitalen Höhenmodellen*. Diplomarbeit and der Universität Göttingen. S. 22-30.
- CRUDEN D. M., VARNES D. J. (1996): *Landslide Types and Processes*. In: TURNER, A., SCHUSTER, R. (Hrsg.); *Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247 of the National Research Council*. - Transportation Research Board: S. 36-75.
- CZEGKA, W., BEHREND, K., BRAUNE, S. (2004): *Die Qualität der SRTM-90m Höhendaten und ihre Verwendbarkeit in GIS*. UNIGIS-Update Konferenz 2004. [URL:] http://www.unigis.ac.at/club/u2/2004/unterlagen/SRTM_update2004.pdf (2005-02-17): S. 1-2.
- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L. UND IBSEN, M. (1996): *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. - John Wiley & Sons, Inc.: S. 251.
- EMBACHER F. (2003): *Von Graphen, Genen und dem WWW, Außermathematische Anwendungen im Mathematikunterricht*. Institut für Theoretische Physik der Universität Wien. [URL:] <http://www.ap.univie.ac.at/users/fe/Lehre/> (2004-10-11): S. 35-39.
- FABRI, A., CHUNG, C-J., CENDRERO, A., REMONDO, J. (2003): *Is Prediction of Future Landslides Possible with GIS?*. In: Natural Hazards Vol. 30. - Kluwer Academic Publishers: S. 487-499.
- GHINOI A. (2003): *A New Contribution to the Assessment of Snow Avalanche Susceptibility: Application in Tyrol (Austria) and Alta Val Badia (Dolomites, Italy)*. Dissertation an der Università Degli Studi de Modena e Reggio Emilia: S. 52-63.
- GORSEVSKI P, GESSLER, P, FOLTZ, R. (2000): *Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and GIS*. In: 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4), Nr. 110. - NOAA National Geophysical Data Center - Ecosystem Informatics: S.4-5.
- GORSEVSKI, P., GESSLER, P., FOLTZ, R. (2000): *Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Discriminant Analysis and GIS*. In: GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: Applications for 21st Century: S.3-6.
- GRUNERT, J., SCHMANCKE, V. (1997): *Hangstabilität im Südwesten Bonns: Erstellung einer Stabilitätskarte mit Hilfe eines GIS*. Geographische Rundschau. - Westermann Schulbuchverlag GmbH: S. 37.
- GUSENBAUER, F. (1999): *GIS-gestützte Gefahrenzonenkartierung potentieller Massenbewegungen am Beispiel der Flyschzone zwischen Attersee und Traunsee*. Diplomarbeit an der Paris-Lodron-Universität Salzburg: S.18-35.

- HEGG C., KIENHOLZ H. (1992): *Hangprozesse: Grenzen und Möglichkeiten der Simulation*. In: Beiträge zum Themenkreis 3: Schutz des Lebensraums vor Hochwasser, Muren und Lawinen, Nr.4; Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung. - Interpraevent Tagungspublikation: S. 175-186.
- HUTCHINSON J.N. (1995): *Landslide Hazard Assessment*. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides; Keynote Paper: S.1805.
- KALLINICH, J. (1999): *Verbreitung, Alter und geomorphologische Ursachen der Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb auf der Grundlage von Detail- und Übersichtskartierungen*. In: BIBUS, E., TERHORST, B. (Hrsg.); Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), Reihe D: Geoökologie und Quartärforschung. – Universität Tübingen: S.1.
- LORUP, (2003): *Datenunschärfen – neue Perspektiven mit IDRISI*. In: Lehrgangsunterlagen GIS-Praxis mit IDRISI, ZGIS & IDRISI Resource Center Salzburg: S. 31-36.
- LUSTED. L.B. (1968): *Introduction to Medical Decision Making*. - Charles Thomas, Springfield: S. 271.
- MALCZEWSKI J. (1999): *GIS and Multi-Criteria Decision Analysis*. - John Wiley & Sons, Inc: S. 127-130.
- MCCAMMON, R.B (1989): *Prospector II – The Redesign of Prospector*. AI-Systems in Government: S.88-92.
- REBOH, R., REITER J. (1983): *A Knowledge-Based System for Regional Mineral Resource Assessment*. In: Projektendbericht, SRI Projekt 4119 (14-18-0001-20717): S. 267.
- REICHENBACH, P, CARRARA, ALBERTO, GUZZETTI, F. (2002): *Preface: Assessing and Mapping Landslide Hazards and Risk*. In: Natural Hazards and Earth System Sciences 2. - European Geophysical Society: S. 1-3.
- REMONDO, J., GONZÁLEZ, A., RAMÓN, J., CENDRERO, A., FABBRI, A., CHUNG, C-J. F. (2003): *Validation of Landslide Susceptibility Maps: Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain*. In: Natural Hazards Vol. 30. - Kluwer Academic Publishers: S. 437–449.
- RICE, R., PILLSBURY, N. (1982): *Predicting Landslides in Clearcut Patches*. In: Symposium on Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield Nr. 137: S. 3-6.
- RODER, I. (2001): *Massenbewegungen in der Taxenbacher Enge: Erstellung einer GIS-unterstützten Datenbank als Instrument der Risikoanalyse von Massenbewegungen im Salzachtal zwischen Taxenbach und Lend (Salzburg)*. Diplomarbeit an der Universität Wien: S. 24-54.
- SCHNEIDER, G. (2004): *Erdbeben*. - Spektrum Akademischer Verlag: S. 76.
- SHAFER, G. (1976): *A Mathematical Theory of Evidence*. - Princeton University Press: S.6-18.
- SINGHROY V., GLENN N., OHKURA, H. (2004): *Landslide Hazard Team Report of the CEOS Disaster Management Support Group*; CEOS Disaster Information Server; [URL:] <http://www.ceos.org/pages/DMSG/2001Ceos/Reports/landslide.html> (2004-03-03).

- SOETERS, R., VAN WESTEN, C. J. (1996): *Slope stability recognition, analysis, and zonation: Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. In: TURNER, A.K., SCHUSTER, R.L. (Hrsg.); *Landslides Investigation and Mitigation*. - National Academy Press of the National Research Council: S. 129–177.
- SPIEGELHALTER, D.J., KNILL-JONES, R.P. (1984): *Statistical and Knowledge-Based Approaches to Clinical Decision Support Systems, with Application in Gastroenterology*. In: *Journal of the Royal Statistical Society A*, Teil 1: S. 35-77.
- SÜZEN, M.L. (2002): *Data-driven Landslide Hazard Assessment Using Geographical Information Systems and Remote Sensing*. Thesis on the Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University: S.5 – 39.
- TANGESTANI, M. (2005): *Landslide Susceptibility Mapping Using the Fuzzy Gamma Operation in a GIS, Kakan Catchment Area Iran*. [URL]: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/mi03040pf.htm (2005-02-11).
- TERHORST, B. (2001): *Mass Movements of Various Ages on the Swabian Jurassic Escarpment: Geomorphological Processes and their Causes*. In: DICKAU, R., SCHMIDT, K-H., (Hrsg.); *Zeitschrift für Geomorphologie, Annals of Geomorphology Supplementband 125*. - Gebrüder Borntraeger: S. 105.127.
- THEILEN-WILLIGE, B. (2002): *Massenbewegungen im Bodenseegebiet: Erfassung mit Fernerkundungsmethoden und Demonstration im Gelände bei Sipplingen*. Exkursionsführer zur Exkursion bei der 21. Wissenschaftlichen Jahrestagung (DGPF) in Konstanz: S.1 -8.
- THEILEN-WILLIGE, B. (2003): *Aufbau eines Naturgefahren-Informationssystems in Nordost-Venezuela mit Hilfe von Satellitendaten unter besonderer Berücksichtigung von Erdbeben*. Bericht für die ESA ID AEO.211: S.3.
- THEILEN-WILLIGE, B. (2004): *Fernerkundung und GIS bei der Erfassung der Erdbebengefährdung in der Nordwest-Türkei*. Projektbericht für die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): S.4-15.
- THEIN, S. (2000): *Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb; Statistische Vorhersagemodelle und regionale Gefährdungskarten unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems*. In: BIBUS, E., TERHORST, B. (Hrsg.); *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D: Geoökologie und Quartärforschung*. – Universität Tübingen: S.1-38.
- VAN WESTEN, C.J., RENGERS, N., SOETERS, R. (2003): *Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment*. In: *Natural Hazards Vol. 30*. - Kluwer Academic Publishers: S. 399–419.
- VAN WESTERN C.J., (1993): *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Geologic Hazard Mitigation*. In: *Space Congress, Bremen, Germany, Vol. Environmental Assessment of Geological Hazards*: S. 63-71.
- VARNES D.J. (1984): *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice* United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. - UNESCO Press, Paris: S. 63-66.

- WANG H., CAI G., CHENG Q. (2002): *Data Integration Using Weights of Evidence Model: Application in Mapping Mineral Resource Potentials*. In: Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications: S. 1-3.
- WIEGAND, T. (1996): *Modellierung von Massenverlagerungen und ihre Darstellung in Gefährdungskarten auf Blatt 7719 Balingen mit Hilfe von Geoinformationssystemen*. In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung VIII, Salzburger Geographische Materialien, Heft 24. - Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Salzburg: S. 1-2.
- TERLIEN, M.T.J., VAN WESTEN, C.J., VAN ASCH, T.W.J. (1995): *Deterministic modelling in GIS-based landslide hazard assessment*. In: CARRARA, A. AND GUZZETTI, F. (Hrsg.) Geographical Information System in Assessing Natural Hazards. - Kluwer Academic Publishers: S. 57–77.
- XIE, M., ESAKI, T., ZHOU, G., MITANI, Y. (2004): *GIS-Based Three-Dimensional Slope Stability Analysis and Landslide Hazard Assessment*. In: Projektbericht, Theoretical Geomechanics Term Project ECI-284: S. 2-6.
- ZADEH, L.A. (1965): *Fuzzy Sets*. In: Information and Control: S. 338-353.

Quellen

Datenquellen

- DURWEN, K.-J., WELLER F., TILK C., BECK H., BEUTTLER H., KLEIN S. (1996): *Digitaler Landschaftsökologischer Atlas Baden-Württemberg*. Institut für Angewandte Forschung "Landschaftsentwicklung & Landschaftsinformatik" (IAF) der Fachhochschule Nürtingen: CD Rom.
- LGRB, LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU BADEN-WÜRTTEMBERG (1998): *Geowissenschaftliche Übersichtskarten von Baden-Württemberg 1:350.000*: CD Rom.
- SRTM, SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (2004): SRTM Digital Topographic Data. US Geological Survey's EROS Data Center. [URL]: <ftp://e0mss21u.ecs.nasa.gov/srtm/> (Zugriff am 12. November 2004).
- THEILEN-WILLIGE, B. (2005): Lineationskartierung auf Basis von LANDSAT ETM Daten zur struktureologischen Auswertung. Lehrbeauftragte (PD Dr.habil) am Institut für Angewandte Geowissenschaften auf der Technischen Universität Berlin sowie Inhaberin des Büros für Angewandte Geowissenschaftliche Fernerkundung (BAGF), Birkenweg 2, 78333 Stockach.

Software

- KEMP, L.D., BONHAM-CARTER, G.F., RAINES, G.L. AND LOONEY, C.G. (2001): *Arc-SDM: Arcview Extension for Spatial Data Modelling Using Weights of Evidence, Logistic Regression, Fuzzy Logic and Neural Network Analysis*; [URL]: <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/> (Zugriff am 25. November 2004).
- SCHÄUBLE, H. (1998): *GRIDTools*. [URL]: http://www.terracs.de/German/ArcView_3_x/GRIDTools/gridtools.html (Zugriff am 5. Jänner 2005).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Naturgefahr Hangrutschungen in Europa: In den Dolomiten bei Corvara in Badia, Italien und an der Schwäbischen Alb bei Mössingen, Deutschland.....	1
Abbildung 2: Wesentliche Schritte der quantitativen Bewertung der Rutschanfälligkeit.....	8
Abbildung 3: Methoden zur Bewertung von geomorphologischen Naturgefahren.....	10
Abbildung 7: Zugehörigkeitsfunktion (fuzzy membership function) für die unscharfe Modellierung des Steuerungsfaktors Hangneigung nach LORUP (2003).....	24
Abbildung 11: Translationsrutschungen (BUNZA ET AL. 1976)	30
Abbildung 14: Lage des Untersuchungsgebietes am Trauf der Schwäbischen Alb	38
Abbildung 15: Schematischer Aufbau einer Schichtstufe	39
Abbildung 16: Hohenstauf und Wackerstein bei Pfullingen	40
Abbildung 17: Rezente Massenverlagerung und Verkarstung am Albtrauf	42
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung der Rutschungen.	43
Abbildung 19: Die bekannten Hangrutschungen im Untersuchungsgebiet	44
Abbildung 20: Beurteilung der Rutschanfälligkeit als Multi-Kriterien-Beurteilung.....	47
Abbildung 21: Vereinfachte, schematische Darstellung der Evidenzgewichtung.....	48
Abbildung 22: Das Konzept der Überlagerung von Trainingsdaten D und einer Evidenz B . Entscheidende Parameter sind dabei die Präsenz und das Fehlen einer Evidenz nach (BONHAM-CARTER 2002)	51
Abbildung 23: Venn Diagramm, zeigt die räumlichen Zusammenhang zwischen einer Evidenz B und den Trainingsdaten D , nach (BONHAM-CARTER 2002).....	51
Abbildung 24: Zusammenhang -Wahrscheinlichkeit - Odds Ratio - Logits.	53
Abbildung 25: Geologische (LGRB 1998).....	58
Abbildung 26: Hydrogeologie (LGRB 1998)	58
Abbildung 27: Distanz zur Traufkante (LGRB 1998).	59
Abbildung 28: Störungen (LGRB 1998) und Lineamente aus der strukturgeologischen Auswertung (THEILEN-WILLIGE 2005).	60
Abbildung 29: Kontinuierliche Distanzoberfläche aus Lineamenten und Störungen.....	61
Abbildung 30: Kontinuierliche Dichteoberfläche aus Lineamenten und Störungen.....	61
Abbildung 31: Bodenform (LGRB 1998).....	62
Abbildung 32: Perspektivische Ansicht des digitalen Höhenmodells	63
Abbildung 33: (a) Definition einer 3x3 Submatrix, (b) Anpassung einer quadratischen Flächenfunktion einer 3x3 Submatrix nach (ZEVENBERGER, THORNE 1986).....	64
Abbildung 44: Berechnung der Hangneigung nach (BURROUGH 1986).....	65
Abbildung 45: Hangneigung abgeleitet von dem SRTM Höhenmodell (Auflösung 90 m) ...	65

Abbildung 47: Berechnung der horizontalen und vertikalen Wölbungsrichtung.....	66
Abbildung 48: Hangwölbung abgeleitet von dem SRTM Höhenmodell (Auflösung 90m). ..	67
Abbildung 49: Geomorphologische Einheiten (DURWEN ET AL. 1996).	68
Abbildung 50: Die geologischen Einheiten und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator	76
Abbildung 51: Die Bodenformen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator	78
Abbildung 52: Die Hangneigung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator..	79
Abbildung 53: Die Hangwölbung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator.....	81
Abbildung 54: Die Dichte von Lineamenten und Störungszonen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator.....	82
Abbildung 55: Die Distanz zur Traufkante und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator	84
Abbildung 56: Standardisierter Kontrast mit abnehmender Hangneigung	87
Abbildung 57: Gewicht, Kontrast und Konfidenz für die Klasse (1) (keine oder negative Korrelation) und (2) (positive Korrelation) der Evidenzthemen.	90
Abbildung 58: Wahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten.	92
Abbildung 59: Gefährdungskarte für rezente Rutschungen: A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit berechnet durch die Evidenzgewichtung.....	94
Abbildung 60: Gefährdungskarte für rezente Rutschungen: Normalisierte A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit berechnet durch die Evidenzgewichtung.....	95
Abbildung 61: Gesamte Unsicherheit bei der Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit..	95
Abbildung 62: Erfolgsrate.	98
Abbildung 63: Vorhersagerate	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen	4
Tabelle 2: Beispiel einer Regressionsgleichung von (GORSEVSKI ET AL. 2000).	19
Tabelle 3: Gemessene Variable Hangneigung in den Gruppen „stabile Bereiche“ und „instabile Bereiche“ (RICE, PILLSBURY 1982).	20
Tabelle 4: Beispiel einer Diskriminanzfunktion in logarithmischer Form von (RICE, PILLSBURY 1982).	20
Tabelle 5: Fuzzifizieren der Hangneigungsstufen (LORUP 2003), vgl. dazu Abbildung 7. ...	24
Tabelle 6: Verzeichnis der bedeutendsten historischen Rutschereignisse am Albrauf (KALLINICH 1990).	41
Tabelle 7: Die vier möglichen Kombinationen nach der Verschneidung der Evidenzen und der Trainingsdaten (Hangrutschungen).	52
Tabelle 8: Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit (P), Odds Ratio (O) und Logits ($\ln O$).	53
Tabelle 9: Algebraische Darstellung der Kontingenztafelberechnung.	71
Tabelle 10: Berechnete Wahrscheinlichkeiten aus dem paarweise Test der bedingten Unabhängigkeit.	72
Tabelle 11: χ^2 -Statistik aus dem paarweise Test der bedingten Unabhängigkeit.	72
Tabelle 12: Die geologischen Einheiten und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator. vgl. dazu Abbildung 50.	76
Tabelle 13: Die Bodenformen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator, vgl. dazu Abbildung 51.	78
Tabelle 14: Die Hangneigung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator, vgl. dazu Abbildung 52.	80
Tabelle 15: Die Hangwölbung und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator, vgl. dazu Abbildung 53.	82
Tabelle 16: Die Dichte von Lineamenten und Störungszonen und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator, vgl. dazu Abbildung 54.	83
Tabelle 17: Die Distanz zur Traufkante und ihre Gewichtung als Hangrutschungsindikator, vgl. dazu Abbildung 55.	85
Tabelle 18: Generalisierung der kategorialen Daten mittels Reklassifizierung.	86
Tabelle 19: Zusammenfassung der wichtigsten Steuerungsfaktoren.	88
Tabelle 20: Gewichtung der Evidenzen in den Klassen 0 (keine Trainingspunkte), 1 (keine Korrelation) und 2 (Korrelation)	90