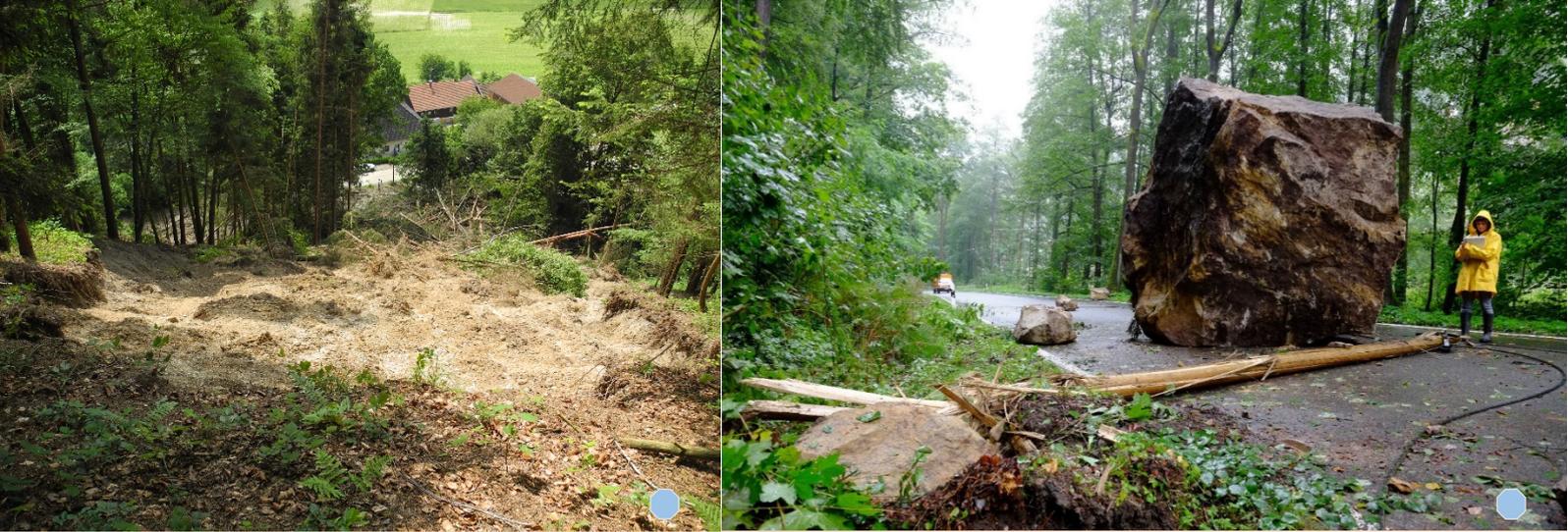


Massenbewegungen in Deutschland (MBiD) – Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit



Ein Kooperationsprojekt
zwischen den Staatlichen Geologischen Diensten
der Bundesländer
Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen
und
der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
im Auftrag des
Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste in Deutschland

– **Abschlussbericht** –

Bearbeitung:

D. Balzer, P. Dommaschk, D. Ehret, M. Fuchs, S. Glaser, S. Henscheid, D. Kuhn,

R. Strauß, J. Torizin und J. Wiedenmann

Augsburg, Freiberg, Freiburg, Hannover und Krefeld

November 2020

Schlagworte

Geogene Gefahren, Deutschland, Massenbewegungen, Hangrutschungen, Modellierungen, Empfindlichkeit, Fallstudien, Empfehlungen.

Zitierhinweis

Balzer, D., Dommaschk, P., Ehret, D., Fuchs, M., Glaser, S., Henscheid, S., Kuhn, D., Strauß, R., Torizin, J. & Wiedenmann, J. (2020): Massenbewegungen in Deutschland (MBiD) – Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit. Ein Kooperationsprojekt zwischen den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Auftrag des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste in Deutschland. – Abschlussbericht: 269 Seiten, 90 Abbildungen, 75 Tabellen; Augsburg, Freiburg, Freiburg, Hannover und Krefeld.

Nutzungshinweis

©Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (Freiburg); Bayerisches Landesamt für Umwelt (Augsburg); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover); Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Landesbetrieb (Krefeld); Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Freiberg).

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Berichts darf ohne Genehmigung der oben genannten Institutionen in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder elektronisches Verfahren – reproduziert werden.

Dieser Bericht inklusive aller Inhalte wurde unter größter Sorgfalt erarbeitet. Eine Garantie für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in diesem Bericht auf Internetseiten Dritter verwiesen wird, sind die oben genannten Institutionen für deren Inhalte nicht verantwortlich. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – ist die Angabe der Quelle gemäß Zitierhinweis erforderlich.

Verwendete Schreibregeln

Der Textteil dieses Berichts wurde in Anlehnung an Norm die [DIN 5008 \(2020\)](#) bzw. an den [DUDEN \(2006\)](#) verfasst.

Verzeichnis der beteiligten Institutionen und Autoren

Institution (Abkürzung), ggf. Bundesland, Sitz der Behörde (in alphabetischer Reihenfolge der Bundesländer; BGR = Bund)	Autor
<u>Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), Baden-Württemberg, Freiburg</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Dr. Dominik Ehret (Dipl.-Geologe) • Dr. Johannes Wiedenmann (Dipl.-Geologe)
<u>Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Dr. Stefan Glaser (Dipl.-Geologe)
<u>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Dr. Dirk Balzer (Dipl.-Geologe) • Dr. Michael Fuchs (Dipl.-Geologe) • Dr. Dirk Kuhn (Dipl.-Geologe) • Dr. Jewgenij Torizin (Dipl.-Geologe)
<u>Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW) Landesbetrieb, Krefeld</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Dr. Stefan Henscheid (Dipl.-Geograph) • Prof. Dr. Roland Strauß (Dipl.-Geologe)
<u>Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Freiberg</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Peter Dommaschk (Dipl.-Ing. Geotechnik)
<u>Externer Beitrag (s. Kapitel 2.6.2.5)¹: Technische Universität (TU) Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachbereich Ingenieurgeologie</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Prof. Dr. Tomás Manuel Fernandez-Steeger (Dipl.-Geologe) • Dr. Anika Braun (M. Sc. Georessourcenmanagement) • Felix Schumann (M. Sc. Geotechnologie)

¹ Um ein effizienteres Lesen der digitalen Berichtsversion zu ermöglichen, sind alle Kapitelnummern, Abbildungen (Abb.), Tabellen (Tab.), Literaturzitate und einige Textboxen über Querverweise verlinkt. Zusätzlich wurden vereinzelt Textmarken als Link eingeführt, die auf eine entsprechende Stelle im Bericht verweisen. Nach erfolgter Aktivierung des jeweiligen Links kann der Leser mit der Tastenkombination Alt + ← an die ursprüngliche Textposition zurückspringen.

Abkürzungsverzeichnis

Alle im Text verwendeten fachspezifischen Abkürzungen sind mindestens einmal im Klartext erläutert (bei Ersterscheinung). In der nachstehenden Tabelle sind daher nur technische Abkürzungen aufgelistet.

<i>Technische Abkürzung</i>	<i>Klartext</i>
<i>Abb.</i>	Abbildung
<i>AG</i>	Arbeitsgruppe
<i>ca.</i>	circa
<i>d. h.</i>	das heißt
<i>ggf.</i>	gegebenenfalls
<i>i. w. S.</i>	im weiteren Sinne
<i>max.</i>	maximal
<i>Mio.</i>	Million
<i>o. g.</i>	oben genannt
<i>s.</i>	siehe
<i>Tab.</i>	Tabelle
<i>u. a.</i>	unter anderem
<i>usw.</i>	und so weiter
<i>z. B.</i>	zum Beispiel

Microsoft® (MS) Excel®, Access®, Word® und Visual Basic® for Applications sind eingetragene Warenzeichen der Microsoft Corporation, Redmond/Washington.

ArcGIS® und Spatial Analyst® sind eingetragene Warenzeichen der ESRI Inc. (Environmental Systems Research Institute), Redlands/Kalifornien.

SPSS® ist ein eingetragenes Warenzeichen der International Business Machines Corporation (IBM), Armonk/New York.

Hinweise zu den Titelfotos:

Linkes Foto: Großer Hanganbruch bei Simbach am Inn (Landkreis Rottal-Inn, Bayern), Foto: Stefan Glaser, LfU Bayern, 10.06.2016.

Rechtes Foto: Felssturz im Kirnitzschtal bei Bad Schandau (Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Sachsen) – Staatsstraße S 165, verlagertes Volumen ca. 120 m³ (großer Felsblock auf der Straße, max. Breite ca. 3,2 m, max. Länge ca. 3,2 m, max. Höhe ca. 3,7 m, Blockvolumen ca. 38 m³), Foto: Christoph Starke, LfULG Sachsen, 02.09.2014.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Faktoren (Trigger) und ursächliche Prozesse, die eine Massenbewegung auslösen können (verändert nach Cruden & Varnes, 1996; Genske, 2008).....	50
Tab. 2-2: Schwellenwerte und Warnstufen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für Starkregenereignisse. . .	52
Tab. 2-3: Übersicht über die im MBiD-Projekt angewandten Methoden zur Abschätzung der Hangrutschungsempfindlichkeit.....	53
Tab. 2-4: Neunstufige Werteskala nach Saaty (1977).	64
Tab. 2-5: Quadratische Matrix für den Gewichtungprozess.....	64
Tab. 2-6: Anwendungsbeispiel zur Füllung der quadratischen Matrix für den Gewichtungprozess.	65
Tab. 2-7: Zufallskonsistenzindex RI nach Saaty (1980).....	65
Tab. 2-8: Überblick über die fünf Testgebiete im MBiD-Projekt, die zugrundeliegenden Auswahl- und Abgrenzungskriterien und die zur Verfügung stehenden Massenbewegungsinventare der jeweiligen SGD.	73
Tab. 2-9: Überblick über die im MBiD-Projekt genutzten thematischen Informationsebenen mit Angaben zur räumlichen Abdeckung, zum Maßstab, zum räumlichen Objekttyp, zum abgeleiteten Parameter und zur Quelle.	76
Tab. 2-10: Übersicht über die im MBiD-Projekt durchgeführten Fallstudien 1 bis 4 mit den korrespondierenden Modellierungsbeispielen in den fünf Testgebieten (Auflistung in chronologischer Folge der Bearbeitung).	80
Tab. 2-11: Verwendete Informationsebenen und gewählte Parameter/Parameterklassen für die Modellierungsbeispiele 1.1 bis 1.5 zur Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit in der Fränkischen Alb und Albvorland (Quellenangaben: Tab. 2-9).	88
Tab. 2-12: Modellierungsbeispiel 1.1: Bewertung der einzelnen Parameter anhand der AUC-Werte für die unterschiedlichen Typen von Massenbewegungen in der Fränkischen Alb und Albvorland.	92
Tab. 2-13: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Rotationsrutschungen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).....	94
Tab. 2-14: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Translationsrutschungen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).....	96
Tab. 2-15: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Felsstürzen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).	97
Tab. 2-16: Modellierungsbeispiel 1.1: Bewertung von überlagerten Modellen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen anhand der AUC-Werte für unterschiedliche Bewegungstypen von Massenbewegungen.	99
Tab. 2-17: Modellierungsbeispiel 1.2: Darstellung der Parameterklassen der GK25 mit positiven statistischen Gewichten größer eins (absteigend sortiert), die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung der Rotationsrutschungen in der Fränkischen Alb mit Vorland liefern.	105
Tab. 2-18: Modellierungsbeispiel 1.2: Vergleich der AUC-Werte zwischen den Modellierungsbeispielen 1.1 (mit GÜK250) und 1.2 (mit GK25).	105
Tab. 2-19: Modellierungsbeispiel 1.3: Anzahl der Rotationsrutschungen in den Parameterklassen der GÜK250 (mit Angabe der PET_ID) in Abhängigkeit von der Festlegung des Bezugspunktes an der Abrisskante bzw. im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung mit korrespondierenden statistischen Gewichten (Auswahl). Verschiebungsbedingte Änderung der Ereignisanzahl und der statistischen Gewichte werden bei Abnahme durch \searrow , bei Zunahme durch \nearrow ausgedrückt.	109
Tab. 2-20: Modellierungsbeispiel 1.3: Anzahl der Rotationsrutschungen in den Hangneigungsklassen in Abhängigkeit von der Festlegung des Bezugspunktes an der Abrisskante bzw. im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung mit korrespondierenden statistischen Gewichten.	

Verschiebungsbedingte Änderung der Ereignisanzahl und der statistischen Gewichte werden bei Abnahme durch \searrow , bei Zunahme durch \nearrow ausgedrückt; \rightarrow : keine oder geringfügige Änderung.	110
Tab. 2-21: Modellierungsbeispiel 1.3: Vergleich der statistischen Gütemaße für die Modelle mit Bezugspunkt an der Abrisskante bzw. Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung; Erläuterung: bei Abnahme \searrow , bei Zunahme \nearrow	110
Tab. 2-22: Modellierungsbeispiel 1.4: Übersicht über die AUC-Werte für den Parameter Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen nach unterschiedlichen Verarbeitungsschritten.....	115
Tab. 2-23: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die Effekte einer Maskierung mit den für unterschiedliche Massenbewegungstypen ermittelten Grenzwerten der Hangneigung auf die statistische Aussagekraft (AUC-Wert) für die Parameter GÜK250, Hang25 und Kurv25.	118
Tab. 2-24: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Einheiten (mit PET_ID) mit statistischem Gewicht $> 0,5$, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp Rotationsrutschung abgeleitet wurden.....	119
Tab. 2-25: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Beschreibungen (mit PET_ID) mit statistischen Gewichten $> 0,5$, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp Translationsrutschung abgeleitet wurden.....	120
Tab. 2-26: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Einheiten (mit PET_ID) mit statistischem Gewicht $> 0,5$, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp Felssturz abgeleitet wurden.	121
Tab. 2-27: Modellierungsbeispiel 1.5: Übersicht über die Modellvarianten Hang25 + GÜK250 bzw. Hang25 + GÜK250 + Kurv25 mit korrespondierenden Angaben zur Anzahl der Klassenkombinationen und zu AUC-Werten der ROC-Kurve für verschiedene Massenbewegungstypen.	122
Tab. 2-28: Modellierungsbeispiel 1.6: Überblick über die Ergebnisse der Evaluierung unter Maßgabe des Inventars aus der Schwäbischen Alb und Albvorland für die Parameter GÜK250 und Hang25.....	125
Tab. 2-29: Fallstudie 2 – Übersicht über die Modellierungsbeispiele und den jeweiligen räumlichen Bezug (hydrogeologischer Raum bzw. Teilraum).	126
Tab. 2-30: Massenbewegungsereignisse im Testgebiet Elbtalgraben, untergliedert nach Prozess- bzw. Bewegungstypen (Quelle: LfULG Sachsen: Stand Dezember 2019).	128
Tab. 2-31: Verwendete Informationsebenen und gewählte Parameter/Parameterklassen für die Modellierungsbeispiele 2.1 - 2.5 (s. Kapitel 2.6.2.1, 2.6.2.2, 2.6.2.3, 2.6.2.4, 2.6.2.5) (Quellen: Tab. 2-9).	131
Tab. 2-32: Modellierungsbeispiel 2.1: Parameter und Modelle mit unterschiedlichen Parameterkombinationen ohne Maskierung für das gesamte Testgebiet Elbtalgraben.	134
Tab. 2-33: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der Parameterklassen der GÜK250 für Sturzprozesse im Elbtalgraben, dargestellt für die Varianten mit Maskierung (Hangneigung $\leq 10^\circ$) und ohne Maskierung.....	136
Tab. 2-34: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GÜK250 für Sturzprozesse als Ergebnis der Verortungskorrektur auf der Basis der Feldbeschreibung im Ereignisinventar des LfULG Sachsen.....	137
Tab. 2-35: Modellierungsbeispiel 2.1: AUC-Werte und Flächenanteile der Sturzeempfindlichkeitszonen Hoch und Sehr hoch, resultierend aus der Modellierung von Sturzprozessen im Elbtalgraben unter Anwendung der maskierten und unmaskierten Parameterkombination Hang25 + GÜK250.....	138
Tab. 2-36: Modellierungsbeispiel 2.1: Übersicht über die AUC-Werte für verschiedene Parameter und deren Kombination im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide für Sturzprozesse.	139
Tab. 2-37: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GK50.....	139
Tab. 2-38: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GK100 (L-J-K).	139
Tab. 2-39: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GÜK250.	140
Tab. 2-40: Modellierungsbeispiel 2.2: Parameterklassen der GÜK1000 in der INSPIRE-konformen Beschreibung der Petrographie.	142
Tab. 2-41: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der konsolidierten Gewichte, Wertespanssen und des Ranges für Hangneigungsklassen (Hang25) auf der Grundlage von sieben Expertenmeinungen.	143

Tab. 2-42: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der konsolidierten Gewichte, Wertespanssen und des Ranges für die Parameterklassen der GÜK1000 auf der Grundlage von sieben Expertenmeinungen aus Bund und Ländern.....	143
Tab. 2-43: Modellierungsbeispiel 2.2: Zonierung der Sturzeempfindlichkeit mit Angabe der prozentualen Anteile für Sturzflächen und für die korrespondierenden Zonenflächen aus den Modellierungen mit AHP und MGE.....	145
Tab. 2-44: Modellierungsbeispiel 2.4: AUC-Werte der KNN-Modelle für die Parameterkombinationen von Hang25 mit einem thematischen Parameter (GÜK250 oder GK50 oder CLC10 oder Bodenfeuchte).	152
Tab. 2-45: Modellierungsbeispiel 2.4: AUC-Werte im Vergleich von KNN- und MGE-Modellen bei Aufteilung des Trainings- und Testdatensatz im Verhältnis 80 : 20.	152
Tab. 2-46: Modellierungsbeispiel 2.4: Flächenverteilung der Zonen der Empfindlichkeit für Sturzprozesse aus den KNN- und MGE-Modellen.....	152
Tab. 2-47: Modellierungsbeispiel 2.5: Anzahl der Rasterzellen für die verschiedenen Ansätze zur räumlichen Diskretisierung der Felssturzereignisse.	154
Tab. 2-48: Modellierungsbeispiel 2.5: Verwendete Informationsebenen, abgeleitete Parameter und deren Transformation.....	157
Tab. 2-49: Modellierungsbeispiel 2.5: Netzwerkarchitekturen für verschiedene räumliche Diskretisierungen. Die Zahlenreihen charakterisieren die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht, der verborgenen Schicht und der Ausgabeschicht des jeweiligen Modells.	158
Tab. 2-50: Modellierungsbeispiel 2.5: Parameterkombinationen für die Parameteranalyse.....	158
Tab. 2-51: Auswahl von Meldungen aus der lokalen Presse über Rutschungsereignisse im Siegtal im Zeitraum 2002 bis 2018 (kein Anspruch auf Vollständigkeit). (Tag des Zugriffs für alle Quellen: 19.05.2020).	165
Tab. 2-52: Übersicht über die genutzten Informationsebenen für das Testgebiet Siegtal (Quellen: Tab. 2-9). .	167
Tab. 2-53: Modellierungsbeispiel 3.1: Beispiel für die flächengewichtete Übertragung der bodenphysikalischen Parameter in die Legendeneinheit der BÜK200 (σ = Standardabweichung für jeweiligen Parameter) im Testgebiet Siegtal.	169
Tab. 2-54: Modellierungsbeispiel 3.1: F-Werte für die bodenphysikalischen Parameter der Legendeneinheiten der BÜK200 im Testgebiet Siegtal, berechnet auf Grundlage der Parametrisierung der Bodenarten im Unterboden bzw. Untergrund pro Bodenform. Eine Legendeneinheit kann durch mehrere Bodenformen beschrieben sein.....	170
Tab. 2-55: Übersicht über die genutzten Informationsebenen für das Testgebiet Simbach (Quellen: Tab. 2-9).	175
Tab. 2-56: Modellierungsbeispiel 4.1: Übersicht über die Wertespanssen der Versagenswahrscheinlichkeit und AUC-Werte für die Modelle Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25.....	180
Tab. 2-57: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die AUC-Werte für die mit dem Infiniten Hangmodell (IHM), mit der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE), mit der Methode der Logistischen Regression (LR) sowie einem Künstlichen Neuronalen Netz (KNN) generierten Modelle für die Kombinationen Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25.	185
Tab. 2-58: Modellierungsbeispiel 4.2: Statistische Gewichte > 1 aus der MGE-Analyse für die Parameter BÜK200 und UeBK25 (LE = Legendeneinheit).	186
Tab. 2-59: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die AUC-Werte für einzelne Parameter, modelliert unter Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen.....	186
Tab. 2-60: Modellierungsbeispiel 4.2: Regressionskoeffizienten und Signifikanzniveaus für die eingeflossenen Parameter des LR-Modells in Kombination von Hang10 + BÜK200.	187
Tab. 2-61: Modellierungsbeispiel 4.1: Regressionskoeffizienten und Signifikanzniveaus für die eingeflossenen Parameter des LR-Modells in Kombination von Hang10 + UeBK25.	188
Tab. 2-62: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die prozentuale Aufteilung der Zonen der klassifizierten Hangrutschungsempfindlichkeit in der Gesamtfläche des Testgebiets je Modell.	191
Tab. 3-1: Überblick über die methodischen Workflows und deren Bezug zu den Fallstudien 1 bis 4.	199
Tab. 3-2: Beispiel zur Berechnung der statistischen Gewichte in Tabellenform für die Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) in MS Excel®.	216
Tab. 3-3: Beispiel zur Berechnung der ROC-Kurve mit AUC-Index in Tabellenform in MS Excel®.	217

Tab. 3-4: Übersicht über die notwendigen Parameter für das Infinite Hangmodell mit Maßeinheiten, Wertespannen und Angabe der Quellen.....	223
Tab. 3-5: Beispiel für Referenzprofile: Die Legendeneinheit (LE) 35 des Blattes CC7942 (Passau) der BÜK200 besitzt zwei Leitbodenformen und eine Begleitbodenform; fett markiert sind die Horizonte, deren Bodenarten zur Verknüpfung und Berechnung der bodenphysikalischen Parameter hinzugezogen wurden.	226
Tab. 3-6: Maximale effektive Lagerungsdichten L_{dmax} für Lagerungsklassen $L_{d1} - L_{d5}$	227
Tab. 3-7: Werte für die Mittlere Trockenrohddichte (g/cm^3) der effektiven Lagerungsdichteklassen (L_{d1} bis L_{d5}).	228
Tab. 3-8: Spezifische Werte der Kohäsion c [kNm^{-2}] und des Winkels der inneren Reibung ϕ [$^\circ$] für unterschiedliche Bodenarten mit geschätzten Standardabweichungen σ für einen Wassergehalt bei Feldkapazität auf Basis der Vielfalt an Gefügeformen.	230
Tab. 3-9: Beispiel für die Monte-Carlo-Simulation in MS Excel® ohne Makro (Teil A: entspricht Tabelle1 in den Formeln) (Einheiten s. Tab. 3-4).	233
Tab. 3-10: Beispiel für die Monte-Carlo-Simulation in MS Excel® ohne Makro (Teil B: entspricht Tabelle2 in den Formeln).	234
Tab. 3-11: Beispielrechnung für eine Hierarchiestruktur mit drei Ebenen (Erläuterungen: Box 3-5).	241
Tab. 4-1: Parameter zur Bestimmung der Hangneigungsgrenzen für einen konzeptuellen Entwurf einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen, LfU Bayern; DGM25 und DGM10 – BKG: s. Tab. 2-9).....	251
Tab. 4-2: Hangneigungsgrenzwerte [$^\circ$] für Empfindlichkeitszonen in den Testgebieten der Fallstudie 1 (Fränkische Alb und Albvorland) und 2 (Elbtalgraben), bestimmt auf der Grundlage von Regressionsgleichungen (Abb. 4-1).	252

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Grundlagen zur Erstellung der Ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte von Baden-Württemberg: a) Schummerungskarte des DGM1, b) geologischer Basisdatensatz, c) Hangneigungskarte und d) daraus abgeleitete Gefahrenhinweisflächen Rutschungsgebiete und Steinschlag/Felssturz (Quelle: LGRB Baden-Württemberg).....	30
Abb. 1-2: Rutschung im Bereich der Bahnlinie am Paderborner Berg (Kreis Höxter, Nordrhein-Westfalen), Foto: GD NRW, 03.11.1998.....	33
Abb. 1-3: Steinschlag am sogenannten Eselsweg unterhalb der Drachenfelsruine (Rhein-Sieg-Kreis, Nordrhein-Westfalen): Foto: 1967 – Archiv J. Kling/Siebengebirgsmuseum Königswinter.....	34
Abb. 1-4: Burgruine Drachenfels bei Königswinter (Rhein-Sieg-Kreis, Nordrhein-Westfalen) – a) mit eingerüsteten Felswänden während der Sicherungsmaßnahmen im Februar 2018; b) nach Abschluss der Sicherungsmaßnahmen im Herbst 2019 (Foto: a + b: Bezirksregierung Köln/GD NRW).	34
Abb. 1-5: Startseite des Ereigniskatasters für Massenbewegungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Quelle: LfULG Sachsen).	35
Abb. 1-6: Übersicht über die Verteilung der erfassten Massenbewegungen im Freistaat Sachsen. Ausschnittsvergrößerung: Schwerpunktgebiet für Massenbewegungen ist das Elbsandsteingebirge (Quelle: LfULG Sachsen).	35
Abb. 2-1: Prinzipskizze einer Rotationsrutschung (Quelle: Highland & Bobrowsky, 2008), (s. Abb. 2-15 und Abb. 2-34).	44
Abb. 2-2: Prinzipskizze einer Translationsrutschung (Quelle: Highland & Bobrowsky, 2008), (s. Abb. 2-13 und Abb. 2-33).	45
Abb. 2-3: Prinzipskizze eines Felssturzes (Quelle: Highland & Bobrowsky, 2008), (s. Abb. 2-14 und Abb. 2-16 sowie Deckblatt, rechtes Foto).....	46
Abb. 2-4: Prinzipskizze zur Verteilung der Kräfte im Infiniten Hangmodell.	59
Abb. 2-5: Analytischer Hierarchieprozess – Beispiel für die Kombination zweier bewerteter Kategorien.....	66
Abb. 2-6: Schema eines künstlichen Neurons.....	67
Abb. 2-7: Konfusionsmatrix nach Fawcett (2006).	70
Abb. 2-8: a) Aufbau der Grenzwertoptimierungskurve; b) Verwendung der Grenzwertoptimierungskurve für die Zonierung der Hangrutschungsempfindlichkeit, z. B. in die drei Zonen Hoch, Moderat und Niedrig.	71
Abb. 2-9: a) Übersicht über die 247 hydrogeologischen Teilräume in Deutschland gemäß Hydrogeologischer Raumgliederung (HYRAUM), Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015 und b) die auf deren Abgrenzung ausgewählten fünf Testgebiete im MBiD-Projekt.	73
Abb. 2-10: Graphischer Überblick über die im MBiD-Projekt realisierten Fallbeispiele 1 bis 4 und die korrespondierenden Modellierungsbeispiele in den Testgebieten.	82
Abb. 2-11: Topographischer Kartenausschnitt der Fränkischen Alb und Albvorland, überlagert mit der Schummerungsdarstellung des DGM25 sowie der Punktdarstellung der kartierten Massenbewegungen unterschiedlichen kinematischen Bewegungstyps (Quellen: Inventar – LfU Bayern; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).....	84
Abb. 2-12: Topographischer Kartenausschnitt der Schwäbischen Alb und Albvorland, überlagert mit der Schummerungsdarstellung des DGM25 sowie der Punktdarstellung der kartierten Massenbewegungen unterschiedlichen kinematischen Bewegungstyps (Quellen: Inventar – LGRB Baden Württemberg; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).....	85
Abb. 2-13: Risse und Schollen im Anbruchbereich der 75 m breiten Translationsrutschung bei Döringstadt (Landkreis Lichtenfels, Bayern) mit einem Tiefgang von ca. 2 bis 3 m über Amaltheenton-Formation im Jahr 2012 (Landkreis Lichtenfels, Bayern), Foto: Johannes Wiedenmann (im Auftrag des LfU Bayern).....	86
Abb. 2-14: Felssturz in Pottenstein (Landkreis Bayreuth, Bayern) mit etwa 5 bis 10 m ³ Volumen am 15.04.2008, Foto: Markus Kügler (LfU Bayern).	86
Abb. 2-15: Rotationsrutschung/Kombinierte Rutschung am Dachlochberg oberhalb der Landhaussiedlung bei Mössingen-Öschingen (Landkreis Tübingen, Baden-Württemberg) vom 02.06.2013: max. ca. 300 m breit,	

bis zu ca. 500 m lang; Kubatur ca. 500 000 m ³ (Foto: Polizeihubschrauberstaffel Baden-Württemberg, 07.06.2013).	87
Abb. 2-16: Felssturz am Plettenberg bei Ratshausen (Zollernalbkreis, Baden-Württemberg) vom 09.03.2013: Breite des Abbruchbereichs ca. 50 m, maximale Reichweite des Felssturzprozesses ca. 150 m, Kubatur des Felssturzes ca. 300 m ³ ; Geologie der abgestürzten Felsmassen: Wohlgeschichtete Kalke-Formation (joW); im Aufschlagsbereich der Sturzmassen wurde in der Lockergesteinsauflage (Hangschutt- und ältere Sturzmassen) eine Translationsrutschung ausgelöst (Foto: Polizeihubschrauberstaffel Baden-Württemberg, 10.03.2013).	87
Abb. 2-17: Darstellung der räumlichen Verteilungsmuster der potenziellen Parameter/Parameterklassen für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit in der Fränkischen Alb und Albvorland (Abkürzungen: Tab. 2-11; Quellenangaben: Tab. 2-9).	89
Abb. 2-18: Modellierungsbeispiel 1.1: Gewichte der Hangneigungsklassen; a) Gewichte der Hangneigungsklassen für Rotationsrutschungen; b) Gewichte der Hangneigungsklassen für Felsstürze; c) Gewichte der Hangneigungsklassen für Translationsrutschungen. Die farbliche Unterteilung der Geigenplots durch die Ampelfärbung steht für die Signifikanz der Gewichte, wobei die grün gefärbten Geigenplots Gewichte ≥ 1 kennzeichnen, gelb gefärbte keine Signifikanz besitzen und die rot gefärbten für signifikant negative Gewichte ≤ -1 stehen. Die blaue horizontale Linie entspricht dem Null-Gewicht, der den durchschnittlichen Erwartungswert im Testgebiet charakterisiert.	93
Abb. 2-19: Modellierungsbeispiel 1.1: Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit für die Fränkische Alb und Albvorland (Ausschnitt) für Rotationsrutschungen aus der Überlagerung des Parameters Hang25 mit den Parametern GÜK250 (a), BÜK200 (b) und BÜK1000 (c) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	100
Abb. 2-20: Modellierungsbeispiel 1.1: Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit für die Fränkische Alb und Albvorland (Ausschnitt) auf der Grundlage der statistischen Modellierung (Methode der Gewichteten Evidenzen) mit der Parameterkombination Hang25 + GÜK250 für Rotationsrutschungen (a), Translationsrutschungen (b) und für Felsstürze (c) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	102
Abb. 2-21: Modellierungsbeispiel 1.2: Abdeckung des Testgebiets Fränkische Alb und Albvorland durch die GK25 (Zahl = Nummer Blattschnitt Topographische bzw. Geologische Karte 1 : 25 000; Quelle: Tab. 2-9).	104
Abb. 2-22: Modellierungsbeispiel 1.3: Schematische Darstellung der Zuordnung von Punkten an der Abrisskante und im Polygonschwerpunkt der Rutschungsablagerung: a) Kartenbild mit Abrisskante als Polylinie mit dem dazugehörigen Punkt an der höchsten Stelle sowie der Rutschungsablagerung als Polygon mit dem markierten geometrischen Schwerpunkt; b) Schnitt über das Profil A – B mit Darstellung der geometrischen Beziehungen.	108
Abb. 2-23: Modellierungsbeispiel 1.3: Modell der Hangrutschungsempfindlichkeit mit der Parameterkombination Hang25 + GÜK250 (Ausschnitt im Bereich der zweiten Schichtstufe nahe Forchheim): a) für Bezugspunkte an der Abrisskante; b) für Bezugspunkte im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	111
Abb. 2-24: Modellierungsbeispiel 1.4: Schematische Darstellung des Distanzkonzepts; a) Fehlzuzuweisung durch Generalisierungseffekte einer thematischen Ebene, z. B. GÜK250. Die rote Linie markiert die generalisierte lithostratigraphische Grenze zwischen den Schichten A und B, die gepunktete Linie die tatsächliche Grenze, gefüllte Punkte die kartierten Rutschungsereignisse; b) Abgrenzung der rutschungsempfindlichen Bereiche innerhalb der Schichten A und B durch eine Distanzklasse.	113
Abb. 2-25: Modellierungsbeispiel 1.4: Verlauf der statistischen Gewichte für Distanzklassen in [m] für den Abstand einer Rasterzelle zu einer beliebigen lithostratigraphischen Grenze. Grüne und rote Quadrate indizieren statistisch signifikante Gewichte mit Werten größer bzw. kleiner eins (-1). Gelbe Quadrate zwischen 1 und -1 sind statistisch nicht signifikant.	114
Abb. 2-26: Modellierungsbeispiel 1.4: Relevante lithostratigraphische Grenzen und ihre statistischen Gewichte für die Distanzklasse < 50 m im Ausschnitt nordöstlich Forchheim (Quellen: DGM25 – BKG; GÜK250 – BGR; Tab. 2-9).	116
Abb. 2-27: Modellierungsbeispiel 1.4: Visueller Vergleich der Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit der Modelle im Ausschnitt nordöstlich Forchheim: a) Hang25 + GÜK250 (s. Modellierungsbeispiel 1.1 bzw. Modellierungsbeispiel 1.3) und b) Hang25 + Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	116

Abb. 2-28: Modellierungsbeispiel 1.5: Visueller Vergleich der Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit der Modelle für den Massenbewegungstyp Rotationsrutschung im Ausschnitt nordöstlich Forchheim: a) Hang25 + GÜK250 ohne Maskierung (s. Modellierungsbeispiel 1.1) und b) Hang25 + GÜK250 mit Maskierung der trivialen Flächen (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	119
Abb. 2-29: Modellierungsbeispiel 1.6: Räumliche Verteilung der statistischen Gewichte für Rotationsrutschungen über die nach dem Symbolschlüssel Geologie (LBEG, 2015) aggregierten Parameterklassen der GÜK250 in der Fränkischen Alb und Albvorland und in der Schwäbischen Alb und Albvorland (Zielgebiet); Graue Flächen markieren Gebiete, in denen eine Übertragung der statistischen Gewichte nicht möglich ist (Grenzen der hydrogeologischen Teilräume gemäß Hydrogeologischer Raumgliederung – HYRAUM, Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015).....	123
Abb. 2-30: Modellierungsbeispiel 1.6: Hangrutschungsempfindlichkeitsmodell (Rutschungen, ungegliedert) für die Schwäbische Alb und Albvorland, resultierend aus der Übertragung des Modells für Rotationsrutschungen aus der Fränkischen Alb und Albvorland; klassifiziert in fünf Zonen, basierend auf der ROC-Kurve aus der Modellevaluierung für den Massenbewegungstyp Rutschung (ungegliedert) (Grenzen der hydrogeologischen Teilräume gemäß Hydrogeologischer Raumgliederung – HYRAUM, Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015).	124
Abb. 2-31: Topographischer Kartenausschnitt des Elbtalgrabens als hydrogeologischer Raum und dessen hydrogeologische Teilräume (Nummern 9102 bis 9108), überlagert mit dem Schummerungsmodell des DGM25 sowie der Punktdarstellung der erfassten Massenbewegungen nach Bewegungstypen; das rote Rechteck kennzeichnet den Ausschnitt im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide, der für die Modellierung mit KNN im Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) gewählt wurde (s. Abb. 2-32) (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen: Tab. 2-30; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).	127
Abb. 2-32: Topographischer Kartenausschnitt des zentralen Teils des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide als Schummerungsmodell des DGM25, überlagert mit den petrographischen Einheiten der GK50 (Anmerkung: auf Grund der hohen Anzahl an petrographischen Einheiten wurde auf eine Legende verzichtet) sowie der Punktdarstellung der erfassten Massenbewegungen des kinematischen Bewegungstyps Sturzprozess; auf diesen Ausschnitt bezieht sich die Modellierung mittels KNN im Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen: Tab. 2-30; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).....	128
Abb. 2-33: Translationsrutschung im Hangbereich unterhalb der Festung Königstein (Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Sachsen): Lockergesteinsbedeckung auf Sandstein abgerutscht, verlagertes Volumen ca. 3000 m ³ (max. Breite ca. 50 m, max. Länge ca. 250 m), Foto: Peter Dommaschk, LfULG Sachsen, 07.08.2010.....	129
Abb. 2-34: Rotationsrutschung im Hangbereich Obervogelgesang bei Pirna (Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Sachsen): Hanganschüttung eines auflässigen Sandsteinbruchs, verlagertes Volumen ca. 1000 m ³ (max. Breite ca. 30 m, max. Länge ca. 110 m), Foto: Peter Dommaschk, LfULG Sachsen, 20.08.2001.....	129
Abb. 2-35: Modellierungsbeispiel 2.1: Sensitivitätsanalyse linearer Elemente am Beispiel von Sturzprozessen; Klasseneinteilung auf der Basis des Verlaufs des kumulativen studentisierten Residuums für a) tektonische Elemente, b) Bahnlinien, c) Straßen.....	134
Abb. 2-36: Modellierungsbeispiel 2.1: Zonierte Empfindlichkeit für Sturzprozesse (= Sturzempfindlichkeit) im südlichen Elbtalgraben a) Parameterkombination Hang25 + GÜK250, unmaskiert; b) Parameterkombination Hang25 + GÜK250, maskiert (Quellen: DGM25 – BKG; Tab. 2-9).	138
Abb. 2-37: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der Sturzempfindlichkeit in fünf Zonen auf Basis der Überlagerung der Parameterklassen Hangneigung (Hang25) und Parameterklassen der GÜK1000 (Petrographie): a) AHP-Modell; b) MGE-Modell. Der Ausschnitt bildet den zentralen Teil des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide ab (Quelle: DGM25 – BKG; Tab. 2-9).....	144
Abb. 2-38: Modellierungsbeispiel 2.3: ROC-Kurven für die beiden Modellszenarien (Szenario 1 – trockenes Modell; Szenario 2 – wassergesättigtes Modell).....	147
Abb. 2-39: Modellierungsbeispiel 2.3: Ausschnitt aus der Karte der Versagenswahrscheinlichkeit für die beiden Modellszenarien (a: Szenario 1 – trockenes Modell; b: Szenario 2 – wassergesättigtes Modell) nördlich der	

Stadt Meißen mit Validierungspunkten in grüner Farbe (flache Rutschungen und Fließprozesse auf dem Schummerungsmodell des DGM10 (Quellen: DGM10 – BKG; Inventar – LfULG Sachsen; Tab. 2-9).	148
Abb. 2-40: Modellierungsbeispiel 2.4: Design des eingesetzten Netzes mit einem nominal skalierten Parameter GÜK250 und einem stetigen Parameter Hangneigung (Hang25).....	149
Abb. 2-41: Modellierungsbeispiel 2.4: Wichtigkeit der Parameterklassen in den Modellen: a) Hang25 + GK50 mit Legendeneinheit (LE) 308: Fluvialer Sandstein, Hang25: Hangneigung, LE 306: Rathewalder Sandstein, LE 312: Pirnaer Oberquader, LE 310: Mittlerer Grünsandstein, LE 29: Lösssand, Sandlöss, LE 313: Konglomerat, Quadersandstein, LE 265: Fein- bis Grobschutt, LE 107: Schluff, z.T. sandig ("Auenlehm"); b) Hang25 + GÜK250 mit Hang25: Hangneigung, LE 18: Quarzsandstein, LE 24: Quarzsandstein, LE 3: Sandstein, Mergelstein, LE 15: Schluff, LE 9: Sandstein, LE 23: Feinsand bis Mittelsand; c) Hang25 + CLC10 mit LE 18: Nadelwald, Hang25: Hangneigung, LE 11: Ackerland, LE 19: Mischwald, LE 2: Gewerbegebiete, LE 14: Grünland; d) Hang25 + Bodenfeuchte (BF) im Frühjahr mit BF Mai, BF April, BF März.....	151
Abb. 2-42: Modellierungsbeispiel 2.4: Vergleich der zonierten Sturzempfindlichkeit im Gebiet der Elbtalkreide; die Modelle beruhen auf der Kombination Hang25 + GÜK250 (a: mit KNN und b: mit MGE modelliert) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).	153
Abb. 2-43: Modellierungsbeispiel 2.5: Räumliche Diskretisierung der Felssturzereignisse im Testgebiet Elbtalgraben.	155
Abb. 2-44: Ergebnisse der KNN-Analysen mit den räumlichen Diskretisierungsansätzen der Felssturzereignisse. SPSS: Standardeinstellung des SPSS® Modelers, Vereinfachung: Vereinfachung zu KNN mit vier verborgenen Neuronen, Bagging: Ensemblemodellierung (Tab. 2-49).....	159
Abb. 2-45: Modellierungsbeispiel 2.5: Exemplarischer Kartenausschnitt der Modelle im Testgebiet Elbtalgraben für die verschiedenen räumlichen Diskretisierungsansätze.....	160
Abb. 2-46: Modellierungsbeispiel 2.5: Faktoren-Karte – Darstellung des Einflusses der Parameter auf die Empfindlichkeitsanalyse mit einem Künstlichen Neuronalen Netz.....	160
Abb. 2-47: Modellierungsbeispiel 2.5: Parameteranalyse. Vergleich der verschiedenen Parameterkombinationen mittels statistischer Kennwerte: fp – Falsch Positiv Rate, tn – Richtig Negativ Rate, tp – Richtig Positiv Rate, fn – Falsch Negativ Rate und Accuracy – Genauigkeit (s. Kapitel 2.3.6)....	161
Abb. 2-48: Modellierungsbeispiel 2.5: Repräsentative Kartenausschnitte für die Parameteranalyse der Kombinationen 1, 3, 10, 12, 14 (s. Tab. 2-50) im Testgebiet Elbtalgraben.	162
Abb. 2-49: Relief im Testgebiet Siegtal, abgeleitet aus dem DGM10 (Quelle: BKG – s. Tab. 2-9 und Tab. 2-52).	165
Abb. 2-50: Ausschnitt aus der Geologischen Karte 1 : 100 000 (GK100) Nordrhein-Westfalen im Bereich des Siegtals; Legendeneinheiten wurden unverändert übernommen (Quellen: DLM250 – BKG; GK100 Nordrhein-Westfalen – GD NRW: nur für Darstellungszwecke; Tab. 2-9).....	166
Abb. 2-51: Die dominierenden Substrate der Legendeneinheiten der BÜK200 im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; BÜK200 – BGR; Tab. 2-9 und Tab. 2-52).	167
Abb. 2-52: Modellierungsbeispiel 3.1: IHM-Modell der Versagenswahrscheinlichkeiten bei voller Wassersättigung des Bodenporenraums im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; Tab. 2-9).	171
Abb. 2-53: Modellierungsbeispiel 3.1: Gruppen der Legendeneinheiten mit ausgeprägten Streuungen durch die Parametrisierung (F-Werte > 1) im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; Tab. 2-9).	172
Abb. 2-54: Luftbildaufnahmen im Zusammenhang mit dem Starkregenereignis vom 01.06.2016 westlich der Ortschaft Simbach: a) Situation ein Jahr vor dem Starkregenereignis; b) ein Monat nach dem Starkregenereignis; c) 3D-Ansicht des Hanges mit einem Hanganbruch ein Monat nach dem Starkregenereignis (Quelle: Google Earth, Tag des Zugriffs: 04.05.2020). (s. Deckblatt, linkes Foto).	173
Abb. 2-55: Topographischer Kartenausschnitt des Testgebiets Simbach im Freistaat Bayern an der Grenze zu Österreich, überlagert mit dem Schummerungsmodell des DGM10 sowie Darstellung der kartierten Hanganbrüche (Quellen: Inventar Hanganbrüche = rote Quadrate – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Topographie – OpenStreetMap contributors CC-BY-SA; Tab. 2-9).....	174
Abb. 2-56: Darstellung der dominierenden Substrate der Leitbodenformen gemäß Legendeneinheiten (LE) der BÜK200 (Parameter) im Testgebiet Simbach, überlagert durch die kartierten Hanganbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern; BÜK200 – BGR; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).....	176
Abb. 2-57: Substrate der Bodenformen gemäß Legendeneinheiten der UeBK25 (Parameter) im Testgebiet Simbach (Quellen: UeBK25 – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).	177

Abb. 2-58: Darstellung der Hangneigung im Testgebiet Simbach auf Basis des DGM10, überlagert durch die kartierten Hang- anbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).	178
Abb. 2-59: Modellierungsbeispiel 4.1: Box-Plots für die abgeleitete Kohäsion sowie deren Standardabweichung für alle im Testgebiet auftretenden Bodenarten gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005).	179
Abb. 2-60: Modellierungsbeispiel 4.1: ROC-Kurven im Ergebnis der Modellierung mit dem Infiniten Hangmodell in den Varianten Hang10 + BÜK200 (blaue Kurve) und Hang10 + UeBK25 (orange Kurve).	181
Abb. 2-61: Modellierungsbeispiel 4.1: Räumliche Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Modellvarianten: a) Modell Hang10 + UeBK25 und b) Modell Hang10 + BÜK200, jeweils überlagert durch die kartierten Hanganbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern, DGM10 – BKG; Tab. 2-9).	181
Abb. 2-62: Modellierungsbeispiel 4.2: Design des eingesetzten KNN, bestehend aus Eingabeschicht, verborgener Schicht und Ausgabeschicht.	184
Abb. 2-63: Ranking der Parameter bzw. Parameterklassen in den generierten KNN-Modellen nach ihrer Wichtigkeit: a) Hang10 + BÜK200; b) Hang10 + UeBK25. Die Quadrate zeigen den Mittelwert, die schwarzen Balken die Standardabweichung für den Mittleren Absoluten Fehler. Farblich umrandete Punkte signalisieren, dass für diese Parameterklassen auch in den statistischen Modellen ein Zusammenhang mit den Hanganbrüchen diagnostiziert wurde (grün: Methode der Gewichteten Evidenzen, MGE; rot: Logistische Regression, LR).	190
Abb. 2-64: Modellierungsbeispiel 4.2: Kartendarstellung der zonierten Hangrutschungsempfindlichkeit, basierend auf der Modellierung mit unterschiedlichen Methoden (IHM, MGE, LR, KNN) für die Modelle mit den Parameterkombinationen Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25 (Quellen: DGM 10 – BKG; Tab. 2-9).	192
Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Anwendbarkeit der betrachteten Modellierungsmethoden unter Berücksichtigung von Informationen unterschiedlicher Maßstabsebenen (k = Tausend).	200
Abb. 3-2: Schematische Darstellung der Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethode in Abhängigkeit vom Maßstab der verfügbaren Informationsebenen; die Zahlen in den farbigen Rauten geben die Mindestanzahl an Rutschungsereignissen wider.	201
Abb. 3-3: Übersicht über die notwendigen Eingangsparameter für eine regionale Empfindlichkeitsanalyse gegenüber einem bestimmten Prozesstyp in einem definierten Zielmaßstab, unterschieden nach Sturz- und Rutschprozess (Rotations- und Translationsrutschungen undifferenziert).	202
Abb. 3-4: Bewertung der Modellierungsmethoden nach ihrer Komplexität und Transparenz.	203
Abb. 3-5: Schematischer Workflow zur Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.	204
Abb. 3-6: Schematischer Workflow zur Anwendung der Logistischen Regression (LR) für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit; der schwarz-gestrichelt umrandete Bereich zeigt die Schritte, die in der Rekursion wiederholt werden müssen, wenn das Modell modifiziert werden soll.	205
Abb. 3-7: Schematische Darstellung der Zerlegung einer nominalen Variable bestehend aus zwei Klassen in zwei binäre Variablen.	210
Abb. 3-8: Prinzipskizze zur Erzeugung eines Trainingsdatensatzes aus Rasterdaten.	212
Abb. 3-9: Prinzipskizze zur Ermittlung der Häufigkeiten von Massenbewegungen in jeder Parameterklasse unter Nutzung der Rasteralgebra.	213
Abb. 3-10: Möglichkeiten der Visualisierung von Analyseergebnissen: a) Prozentuale Flächenanteile von Klassenflächen und Massenbewegungen; b) Wasserfalldiagramm (ab MS Excel® 2016).	218
Abb. 3-11: Schematischer Workflow zur Anwendung der Methode des Infiniten Hangmodells für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.	222
Abb. 3-12: Schematische Darstellung der Generierung von eindeutigen Parameter-Kombinationen durch die Überlagerung von Hangneigung und Bodenkarte.	225
Abb. 3-13: a) Vereinfachtes Datenmodell der begleitenden Sachdatenbank der BÜK200 (BGR: Tag des Zugriffs: 29.09.2020); b) Die Beziehungen in der Sachdatenbank der BÜK200 (MS Access®-Applikation) (Quellen: Krug & Hartwich, 2001).	225
Abb. 3-14: Feinbodenartendiagramm (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005).	228

Abb. 3-15: Diagramme zur Überwachung der Konvergenz der Monte-Carlo-Simulation: a) Konvergenz der Versagenswahrscheinlichkeit; b) Relative Residuen; c) Standsicherheitsfaktor.	235
Abb. 3-16: Schematischer Workflow zur Anwendung des Analytischen Hierarchieprozesses zur Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.....	237
Abb. 3-17: Schematische Skizze einer möglichen Hierarchiestruktur, bestehend aus vier Hierarchieebenen (HEI: Hangrutschungsempfindlichkeitsindex); a, b, c stehen für unterschiedliche Gruppen von Gesteinstypen; a1 – c7 repräsentieren detaillierte Beschreibungen der Petrographie.....	238
Abb. 3-18: Schematischer Workflow zur Anwendung eines Künstlichen Neuronalen Netzes für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit; der schwarz-gestrichelt umrandete Bereich zeigt die Schritte, die in der Rekursion wiederholt werden müssen, wenn das Modell modifiziert werden soll.....	243
Abb. 4-1: Regressionsgleichungen bzw. – kurven für die standardisierten Gewichte aus allen in Tab. 4-1 genannten Testgebieten für Sturzprozesse mit a) Hangneigungsklassen aus dem DGM10 und b) Hangneigungsklassen aus dem DGM25.	251
Abb. 4-2: Konzeptueller Entwurf einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland im Gültigkeitsmaßstab 1 : 250 000 (verkleinert). In einer vierklassigen Abstufung, die auf den Hangneigungsgrenzwerten aus dem DGM25 basiert, werden die Zonen der Sturzempfindlichkeit durch die Häufigkeit der Sturzereignisse charakterisiert (Quellen: DGM25, DLM250 – BKG, angepasst: s. Tab. 2-9).....	253

Verzeichnis der Textboxen

Box 3-1: Pseudocode Binär-Zerlegung eines nominalen Datensatzes	211
Box 3-2: Pseudocode für Logistische Regression in R.	215
Box 3-3: Erläuterungen zur stochastischen Erweiterung des Infiniten Hangmodells.	224
Box 3-4: Erläuterung der Generierung von Zufallszahlen.	232
Box 3-5: Beispielrechnung AHP.	242
Box 3-6: Pseudocode für das Künstliche Neuronale Netz in R.	246

Ausführliche Zusammenfassung

Das Projekt *Massenbewegungen in Deutschland (MBiD)* wurde im Auftrag des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste in Deutschland (DK) als ein Bund-Länder-Projekt unter Beteiligung von vier Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Zeitraum vom 01.01.2018 bis 31.12.2020 implementiert.

Ziel des Projekts war die Prüfung praktischer Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Methoden zur qualitativen und quantitativen Modellierung der natürlichen Hangrutschungsempfindlichkeit unter den in Deutschland existierenden Randbedingungen. Unter der Prämisse der Nutzung offizieller deutschland- oder bundeslandweit abrufbarer, klein- und großmaßstäblicher thematischer Informationsebenen wurde die Hangrutschungsempfindlichkeit auf der Grundlage komplexer Fallstudien unter Berücksichtigung statistischer, physikalisch-basierter und heuristischer Verfahren sowie Verfahren des Maschinellen Lernens modelliert.

In einer iterativen Herangehensweise wurden die Analyseergebnisse zunächst im Hinblick auf den Maßstabseinfluss der verwendeten Informations-/Parameterebenen bzw. auf das verfügbare Rutschungsinventar getestet und bewertet.

Es folgten vergleichende qualitative Untersuchungen zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit bei Anwendung verschiedener Modellierungsverfahren in einem Naturraum sowie Untersuchungen zur Übertragbarkeit eines Modells eines Naturraums in einen geologisch-geomorphologisch vergleichbaren Naturraum. Dabei wurden auch die Optionen für kleinmaßstäbliche Analysen für einzelne oder zusammengesetzte kinematische Prozesstypen von Massenbewegungen auf Bundesebene geprüft und Schlussfolgerungen bezüglich der Erstellung einer Übersichtskarte der Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland (HEÜK) gezogen.

Die Untersuchungen mündeten in der Erarbeitung von praktischen Lösungsansätzen und Empfehlungen (Workflows), die die bedarfsgerechte Auswahl geeigneter Methoden und die Entwicklung von reproduzierbaren Lösungsansätzen zur Modellierung der regionalen Hangrutschungsempfindlichkeit einschließen.

Die Untersuchungsergebnisse und Schlussfolgerungen basieren auf vier Fallstudien mit 14 Modellierungsbeispielen, die in fünf Testgebieten, nämlich der Schwäbischen Alb und Albvorland (Baden-Württemberg), der Fränkischen Alb und Albvorland (Bayern), Simbach (Bayern), dem Elbtalgraben (Sachsen) sowie dem Siegtal (Nordrhein-Westfalen), durchgeführt wurden. Die Testgebiete resultieren aus Vorschlägen der beteiligten SGD unter Maßgabe ihrer Relevanz hinsichtlich Gefährdungspotenzial, vorhandener Informationsgrundlagen und Bearbeitungspriorität im jeweiligen Bundesland.

In den verschiedenen Fallstudien wurden in Abhängigkeit von den verfügbaren Informationen anhand von einem oder mehreren Beispielen für die Prozesstypen Rotations- und Translationsrutschung sowie Felssturz die generelle Anwendung einer Modellierungsmethode, ein Methodenvergleich oder spezielle Teilaspekte einer Modellierungsmethode beispielhaft untersucht.

Die Ergebnisse aus den Fallstudien unter Verwendung der statistischen Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) zeigen, dass für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit die Massenbewegungen nach Prozesstypen differenziert betrachtet werden sollten, da ihnen unterschiedliche Ursachen zugeordnet werden können. Weiterhin belegen alle eingesetzten datengetriebenen Methoden

(MGE, Logistische Regression und Künstliche Neuronale Netze), dass im Maßstab 1 : 250 000 der Parameter Hangneigung als alleiniger Parameter zur Erklärung von Sturzprozessen herangezogen werden kann. Für die Identifizierung der regionalen Empfindlichkeit gegenüber Rotations- und Translationsrutschungen sollte dagegen neben der Hangneigung zumindest der Parameter Petrographie zusätzlich berücksichtigt werden, um neben der statistischen Modellgüte auch einen akzeptablen Plausibilitätsgrad zu erlangen. Damit ergibt sich für die bundesweite Modellierung der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen eine vom Prozesstyp abhängige Machbarkeit. Während die Empfindlichkeit gegenüber Sturzprozessen bundesweit anhand weniger Testgebiete modellierbar ist, sind der Modellierung von Translations- und Rotationsrutschungen Grenzen gesetzt. Das liegt zum einen an einer nicht repräsentativen Auswahl petrographischer Einheiten in den untersuchten Testgebieten, die eine Übertragung der ermittelten statistischen Gewichte auf ganz Deutschland limitieren. Zum anderen ist es die fehlende Verfügbarkeit bundesweit homogenisierter Ereignisinventare, die bei einer möglichen Ausdehnung der Testgebiete den Einsatz datengetriebener Methoden stark einschränkt. Daher ist die Erarbeitung einer deutschlandweiten HEÜK für Rotations- und Translationsrutschungen mit datengetriebenen Methoden derzeit nicht umsetzbar.

Darüber hinaus kann für den Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) explizit gefolgert werden, dass der enorme Aufwand, ein KNN zu designen und zu trainieren, in keinem Verhältnis zum Erkenntnisgewinn steht. Unter Berücksichtigung der qualitativen und quantitativen Merkmale der vorhandenen Inventare ist der Einsatz von KNN für eine bundesweite Modellierung daher gegenwärtig noch keine Option.

Für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit in Gebieten ohne Ereignisinventare wurde auf die Methode des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) zurückgegriffen, mit der sich heuristische Expertenschätzungen mathematisch auswerten lassen. Die Analyseergebnisse zeigen, dass eine deutschlandweite Bearbeitung für Sturzprozesse auf Basis einer expertenbasierten Bewertung der Hangneigung generiert werden kann. Für die Translations- und Rotationsrutschungen müssten auch andere Parameter beurteilt werden (z. B. alle petrographischen Einheiten für Deutschland). Dies wäre seitens der SGD nur mit einem extremen Arbeitsaufwand unter Beteiligung vieler Experten mit entsprechenden regionalen Kenntnissen realisierbar.

Der Einsatz des Infiniten Hangmodells (IHM) kann vor allem für die regionale Modellierung der Potenziale von Translationsrutschungen herangezogen werden. Gleich den heuristischen Verfahren benötigt diese physikalisch-basierte Methode keine Inventare für die Generierung eines Modells (erst bei der Validierung). Daher stellt dieser Ansatz eine pragmatische Möglichkeit dar, mit den vorhandenen Informationsebenen die regionale Empfindlichkeit gegenüber flachgründigen Translationsrutschungen, die oft durch Niederschlagsereignisse getriggert werden (z. B. im Testgebiet Simbach), abzuschätzen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten aus der Modellparametrisierung kann diese Methode für flache Translationsrutschungen gute Ergebnisse liefern, für die deutschlandweite Betrachtung von Rotationsrutschungen und Sturzprozessen ist sie aber nicht geeignet.

Es lässt sich somit schlussfolgern, dass eine Abschätzung und Darstellung der Hangrutschungsempfindlichkeit für das Bundesgebiet (HEÜK) anhand einer einzelnen Methode unter Einbeziehung aller Prozesstypen gegenwärtig nicht möglich ist. Für den Prozesstyp Felssturz ist bundesweit eine datengetriebene Modellierung möglich. Ein konzeptueller Entwurf einer Karte der Felssturz-Empfindlichkeit in Deutschland wurde erarbeitet.

In einem Ausblick werden unter Berücksichtigung aktueller Anforderungen die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf mögliche Aktivitäten im Nachgang des MBiD-Projekts diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	19
1.1	Veranlassung und Rahmenbedingungen.....	19
1.2	Zielstellung	22
1.3	Gefährdungsanalysen von Massenbewegungen: Überblick (Stand: 2019).....	23
1.3.1	Aktuelle Entwicklungen im globalen Kontext.....	23
1.3.2	Aktuelle Entwicklungen auf europäischer Ebene	27
1.3.3	Bearbeitungsstand in den beteiligten SGD der Bundesländer in Deutschland	29
1.3.3.1	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg	29
1.3.3.2	Bayerisches Landesamt für Umwelt.....	31
1.3.3.3	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Landesbetrieb	32
1.3.3.4	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.....	34
1.3.4	Aktivitäten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	36
1.3.5	Universitäre und außeruniversitäre Forschungsansätze in Deutschland.....	40
2	Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit.....	43
2.1	Begriffe, Definitionen und Konventionen	43
2.2	Auslöse-Mechanismen unter Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels	49
2.3	Verwendetes Methodenspektrum	52
2.3.1	Methode der Gewichteten Evidenzen.....	53
2.3.2	Logistische Regression.....	56
2.3.3	Infinites Hangmodell	59
2.3.4	Analytischer Hierarchieprozess	63
2.3.5	Künstliche Neuronale Netze.....	67
2.3.6	Evaluierungsmethoden.....	69
2.4	Testgebiete: Auswahlkriterien und Abgrenzung	72
2.5	Informationsebenen und Parameter: Verfügbarkeit und Maßstabsbezug.....	74
2.6	Fallstudien mit Modellierungsbeispielen	78
2.6.1	Fallstudie 1: Fränkische und Schwäbische Alb (Bayern und Baden-Württemberg).....	83
2.6.1.1	Modellierungsbeispiel 1.1	89
2.6.1.2	Modellierungsbeispiel 1.2	103
2.6.1.3	Modellierungsbeispiel 1.3	107
2.6.1.4	Modellierungsbeispiel 1.4	111
2.6.1.5	Modellierungsbeispiel 1.5	117
2.6.1.6	Modellierungsbeispiel 1.6	122
2.6.2	Fallstudie 2: Elbtalgraben (Sachsen).....	125
2.6.2.1	Modellierungsbeispiel 2.1	130

2.6.2.2	Modellierungsbeispiel 2.2	140
2.6.2.3	Modellierungsbeispiel 2.3	145
2.6.2.4	Modellierungsbeispiel 2.4	148
2.6.2.5	Modellierungsbeispiel 2.5	153
2.6.3	Fallstudie 3: Siegtal (Nordrhein-Westfalen)	164
2.6.3.1	Modellierungsbeispiel 3.1	168
2.6.4	Fallstudie 4: Simbach (Bayern)	172
2.6.4.1	Modellierungsbeispiel 4.1	178
2.6.4.2	Modellierungsbeispiel 4.2	182
2.7	Schlussfolgerungen aus den Fallstudien 1 bis 4	193
3	Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung.....	198
3.1	Kriterien zur Auswahl geeigneter Modellierungsmethoden.....	199
3.2	Anwendung praktischer Arbeitsabläufe (Workflows).....	203
3.2.1	Methode der Gewichteten Evidenzen und Logistische Regression	203
3.2.1.1	Datenvorbereitung	205
3.2.1.2	Analyse	212
3.2.1.3	Nachbereitung.....	220
3.2.2	Infinites Hangmodell	221
3.2.2.1	Datenvorbereitung	221
3.2.2.2	Analyse	231
3.2.2.3	Nachbereitung.....	235
3.2.3	Analytischer Hierarchieprozess	236
3.2.3.1	Datenvorbereitung	236
3.2.3.2	Analyse	239
3.2.3.3	Nachbereitung.....	242
3.2.4	Künstliche Neuronale Netze.....	242
3.2.4.1	Datenvorbereitung.....	244
3.2.4.2	Analyse	247
3.2.4.3	Nachbereitung.....	248
4	Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland	248
4.1	Allgemeine Grundlagen.....	248
4.2	Konzeptueller Entwurf einer Karte der Felssturz-Empfindlichkeit in Deutschland.....	250
5	Ausblick.....	254
6	Literaturverzeichnis	256

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Rahmenbedingungen

Das Projekt *Massenbewegungen in Deutschland (MBiD)* wurde als ein Bund-Länder-Projekt unter Beteiligung von vier Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen sowie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Zeitraum vom 01.01.2018 bis 31.12.2020 implementiert.

Maßgeblich für die Initiierung dieses Kooperationsprojekts war die Bereitschaft des Direktorenkreises der SGD in Deutschland², die ingenieurgeologische Fachexpertise zur räumlichen Abschätzung der Gefährdung durch Massenbewegungen auf Landes- und Bundesebene projektbasiert zu bündeln. Diese Bereitschaft fand ihren Ausdruck im Protokoll der 166. Sitzung des Direktorenkreises am 13. und 14.09.2016 in Erfurt. Unter TOP 7.8 *Geogefahren* wurde der folgende *Beschluss* (Information) festgehalten:

„Die BGR wird die angeregten Testläufe zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten (Suszeptibilitätskarten) in Zusammenarbeit mit einzelnen SGD durchführen und berichten. Erst danach kann über das weitere Vorgehen entschieden werden.“

TOP 7.8 des Protokolls der 166. Sitzung des Direktorenkreises am 13. und 14.09.2016 in Erfurt.

Der hier vorgelegte Abschlussbericht stellt formal somit nicht das Ergebnis einer Arbeitsgruppe gemäß Teil II, § 8 der Geschäftsordnung des Bund-Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) und des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesrepublik Deutschland vom 14.09.2016 dar.

Die Teilnahme einzelner SGD folgte dem Gebot der Freiwilligkeit.

Das MBiD-Projekt steht im Einklang mit den Zielen, Aufgaben und Befugnissen der SGD der Bundesländer ([Christensen, 1998](#)), dem Erlass des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie über die BGR vom 26.11.2019, § 2, insbesondere Abschnitt 1a, 1c und 1d ([Bundesanzeiger: BAnz AT 5.12.2019](#)) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) und dem in Kapitel 1, § 1 (Punkt 2) genannten Zweck des Geologiedatengesetzes (GeoldG) ([Bundesgesetzblatt, 2020: Teil I, Nr. 30](#)) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020).

Mit dem MBiD-Projekt wurde auch eine Willensbekundung aus dem Jahrestreffen des Personenkreises (PK) Geogefahren der SGD³ am 22. und 23.06.2016 in Würzburg umgesetzt (TOP 8 des Protokolls, Stand: 12.08.2016): „Es wird vorgeschlagen, eine regionale Abschätzung der geogenen Gefahren Rutschungen und Subsidenzerscheinungen nach internationalem Standard im Rahmen einer Kooperation

² Offizielle Bezeichnung ab 1974: Konferenz der Direktoren der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ([Homilius, 1998](#)).

³ Der Personenkreis *Geogefahren* (ursprünglich *Gefährdungspotenzialkarten*) der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie wurde entsprechend des Beschlusses der 117. Sitzung des DK implementiert (TOP 13.3 im Protokoll). Er war im Zeitraum 2006 bis 2016 aktiv und mit Experten der SGD der Länder und der BGR besetzt. Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit sind in [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie \(2016\)](#) publiziert.

1 Einleitung

zwischen der BGR und den SGD beispielhaft für zwei Pilotgebiete durchzuführen. Neben den resultierenden Empfänglichkeitskarten sollen auch methodische Handlungsempfehlungen erarbeitet werden. Eine entsprechende Beschlussvorlage soll in die kommende Sitzung des DK eingebracht werden.“

Da im Rahmen der MBiD-Projektaktivitäten keine überregionalen Karten finaler Art, weder in analoger noch in digitaler Form generiert wurden, konnten die aus der INSPIRE-Richtlinie⁴ resultierenden Anforderungen aktuell vernachlässigt werden.

Im Einklang mit den Datenschutzverordnungen der Bundesländer liegen die Urheberrechte über die zur Verfügung gestellten Daten beim jeweiligen SGD. Eine Weitergabe oder Nutzung der Daten für Publikationen ist ohne Genehmigung des Urhebers nicht möglich. Die Veröffentlichung bzw. die Weitergabe von Projektergebnissen bedürfen einer Abstimmung zwischen allen beteiligten Projektpartnern.

Im Rahmen der geowissenschaftlichen Landesaufnahme entwickeln die SGD der Bundesländer auf der Grundlage verfügbarer Informationen landesspezifische Methoden zur Abschätzung ingenieurgeologischer Gefährdungspotenziale. Aus dieser föderalen Herangehensweise resultieren deutschlandweit nicht oder nur partiell vergleichbare Bewertungen bzw. Produkte. Diese spiegeln sich, unabhängig vom Maßstab (der Auflösung), z. B. in voneinander abweichenden Darstellungen der Hangrutschungsempfindlichkeit, wider.

Durch die Beteiligung der BGR ist die Möglichkeit gegeben, Erfahrungen aus internationalen Forschungsprojekten sowie Projekten der Entwicklungszusammenarbeit (EZ) mit dem Schwerpunkt der Gefährdungsabschätzung von Massenbewegungen einfließen zu lassen.

Vor dem Hintergrund materieller Schäden und ökonomischer Verluste durch Massenbewegungen sind die BGR und deren Partnerinstitutionen in diesen internationalen Projekten gefordert, aktuelle geowissenschaftliche Standards anzuwenden bzw. weiterzuentwickeln. In den Partnerländern der deutschen EZ sind die Ergebnisse von Gefährdungs- und Risikoabschätzungen Grundlage für die wissenschaftsbasierte Beratung im Rahmen eines präventiven Naturkatastrophenrisiko-Managements auf allen staatlichen Ebenen. Sie beeinflussen damit weitreichende Verfügungen und risiko-mindernde Maßnahmen durch politische Entscheidungsträger von gesamtgesellschaftlicher Relevanz (s. [Kapitel 1.3.4](#)).

Die im MBiD-Projekt beteiligten Experten haben die Intervention als *Gemeinschaftsaufgabe* unter Beachtung des Subsidiaritätsprinzips innerhalb einer föderalen Verwaltungsstruktur verstanden. Es war und ist nicht gewollt, existierende Methoden und Produkte in den einzelnen SGD der Bundesländer zur Disposition zu stellen. Die Erweiterung dieses Portfolios fokussiert darauf, solche Modellierungsmethoden pilothaft zu prüfen, die ausdrücklich die Möglichkeit einer datengetriebenen Validierung der Modellierungsergebnisse ermöglichen und gleichzeitig ein hohes Potenzial an länderüberschreitender Kompatibilität bieten.

Die Inwertsetzung der Ergebnisse dieses Projekts spiegelt sich explizit in den Empfehlungen zur räumlichen Abschätzung (Modellierung) der Gefährdung durch Massenbewegungen wider (s. [Kapitel 3](#)).

⁴ INSPIRE steht als Abkürzung für *Infrastructure for Spatial Information in Europe*. Dabei handelt es sich um die Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates der Europäischen Union. Ziel dieser Richtlinie ist die Schaffung einer einheitlichen Geodateninfrastruktur in der EU.

Die Umsetzung dieser Empfehlungen in der täglichen Arbeit würde ressourcenschonend in einer sukzessiven Angleichung der Methoden und damit nachfolgend auch in einer verbesserten regionalen Vergleichbarkeit der Ergebnisse münden.

Die praktizierte synergetische Form der Projektimplementierung kann beispielgebend für die gemeinschaftliche fachliche Weiterentwicklung der SGD und BGR in der Zukunft sein. Eine kontinuierliche Erweiterung der geowissenschaftlichen Expertise ist erforderlich, um den Funktionen der SGD in Deutschland als zentrale geowissenschaftliche Fachbehörden, als Träger öffentlicher Belange, als Dienstleistungseinrichtungen für Behörden und die Wirtschaft und als Kuratoren geowissenschaftlicher Archive auch langfristig gerecht zu werden ([Hänel et al., 1998](#)).

Für die SGD ist es von überragender Bedeutung, die handlungsbestimmende Ebene im Bereich der geologischen Gefährdungsabschätzung in Deutschland zu sein bzw. zu bleiben. Eine fehlende, limitierte oder inhomogene Produktpräsenz führt dazu, dass potenzielle Nutzer auf alternative Informationsquellen ausweichen (müssen). Im Themenfeld *Massenbewegungen* werden durch universitäre Forschungsaktivitäten sowie durch Anstrengungen im Rahmen der Entwicklung von Klimaanpassungsstrategien im Infrastrukturbereich auf Bundesebene Produkte generiert, die die SGD, gleichwohl mandatierte staatliche Fachbehörden, in eine Konkurrenzsituation bringen können (s. [Kapitel 1.3.5](#)).

Die SGD in Deutschland sind aber auch gefordert, in einer Welt mit globalen Herausforderungen und grenzüberschreitenden Naturphänomenen und -gefahren ihr Wissen und ihre Fähigkeiten in die internationale Gemeinschaft einzubringen. Als Mitgliedsland der Europäischen Union (EU) ist Deutschland mit seinen SGD in die *Association of the Geological Surveys of the European Community (EuroGeoSurveys)* (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) involviert. Im Vergleich zur Mehrheit der EU-Staaten mit zentralen Geologischen Diensten nimmt Deutschland aufgrund seiner föderalen Struktur darin eine Sonderstellung ein.

Die BGR ist im Themenfeld *Geohazard* in der *Earth Observation and Geohazard Expert Group (EOEG)* (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) mit dem Ziel der eigenen Vernetzung und des Erfahrungsaustausches mit der wissenschaftlichen Gemeinschaft auf europäischer Ebene präsent. Sie agiert im Sinne einer Amtshilfe auch als Mittler von Informationen aus der EOEG in die SGD der Bundesländer.

Die SGD der Bundesländer nehmen bislang nicht an jährlichen Veranstaltungen der EOEG teil, stellen jedoch im Einzelfall bedarfsgerecht Informationen für Abfragen aus der EOEG zu Verfügung.

Der Willensbekundung der EOEG, paneuropäisch harmonisierte Informationen, z. B. über Massenbewegungen, bereitzustellen, können die SGD Deutschlands aus den oben genannten Gründen nicht oder nur bedingt Rechnung tragen. Ausdruck dessen sind u. a. geowissenschaftliche Informationsebenen, die das Bundesgebiet innerhalb der EU informationsfrei oder nur bundeslandspezifisch zeigen (z. B. [Herrera et al., 2018](#)). Dies impliziert, dass potenzielle paneuropäische Agenden und Prozesse zur Verbesserung der ökonomischen Leistungsfähigkeit von Regierungen, Institutionen und Organisationen initiiert und verfolgt werden, die nicht zwingend die Sichtweisen der SGD Deutschlands repräsentieren. Das Bestreben der EOEG, zukünftig eine europäische Rahmenrichtlinie zu Massenbewegungen initiieren zu wollen, ist ein Beispiel.

Mit einer Umsetzung der im MBiD-Projekt gegebenen Empfehlungen würden somit auch verbesserte Voraussetzungen geschaffen, zukünftigen Anforderungen im Zuge von europäischen Harmonisierungsbestrebungen, auch unter Nutzung der von den SGD bereitgestellten Informationen über Massenbewegungen in Deutschland, gerecht zu werden.

1 Einleitung

1.2 Zielstellung

Im Kontext sich wandelnder Anforderungen an regionale Gefährdungsabschätzungen gegenüber natürlichen Massenbewegungen ist global eine irreversible Entwicklung zu konstatieren (s. Kapitel 1.3). Produkte (i. w. S. Gefahrenhinweiskarten oder Gefahrenkarten) sind nicht mehr bzw. nicht mehr allein das Resultat klassischer geologisch-geomorphologischer Kartierungen.

Um mittel- und langfristig eine wissensbasierte Beratung von Entscheidungsträgern in Politik und Gesellschaft durch staatliche geologische Institutionen nach Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten, sind dynamische Modellierungen unter Maßgabe objektiver Validierungsmöglichkeiten in Kombination mit geowissenschaftlichem Sachverstand perspektivisch geboten.

Vor diesem Hintergrund und gemäß der in Kapitel 1.1 genannten Veranlassung und Rahmenbedingungen haben die im MBiD-Projekt beteiligten Institutionen die nachfolgende übergeordnete Zielstellung abgeleitet:

Prüfung praktischer Anwendungsmöglichkeiten von Methoden für die regionale qualitative und quantitative Modellierung der natürlichen Hangrutschungsempfindlichkeit unter den in Deutschland existierenden Randbedingungen. Dadurch sollen Anreize für die SGD geschaffen werden, bestehende Instrumente in diesem Themenfeld zu ergänzen bzw. alternative oder neue Lösungsansätze zu verfolgen.

Um diese Zielstellung zu erreichen, wurden folgende fachliche Schwerpunkte gesetzt:

- Methodische Beiträge sollen auf der Grundlage komplexer Fallstudien in Testgebieten in Deutschland in einem iterativen Erkenntnisprozess unter Berücksichtigung statistischer, physikalisch-basierter und heuristischer Verfahren sowie Verfahren des Maschinellen Lernens (ML)⁵ entwickelt werden;
- Vorauswahl und Prüfung von klein- und großmaßstäblichen thematischen Informationsebenen⁶ (Anforderung: deutschland- oder bundeslandweit offiziell verfügbar), die für die Ableitung relevanter Parameter/Parameterklassen im Hinblick auf die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit geeignet sind;
- Untersuchung von spezifischen Einflussfaktoren auf die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Anwendung klein- und großmaßstäblicher Informations-/Parameterebenen und verfügbarem Rutschungsinventar;
- Vergleichende qualitative Untersuchungen zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit bei Anwendung verschiedener, o. g. Verfahren in einem Naturraum;
- Untersuchungen zur Übertragbarkeit eines Hangrutschungsempfindlichkeitsmodells eines Naturraums in einen geologisch-geomorphologisch vergleichbaren Naturraum;

⁵ Maschinelles Lernen (ML) steht für eine Kategorie von Verfahren, die mittels der Daten Probleme erkennen und lösen können, ohne explizit auf die Lösung des Problems programmiert zu werden. ML ist im engeren Sinne ein Teilbereich der Künstlichen Intelligenz (KI) und wird oft synonym verwendet.

⁶ Die im Bericht verwendeten Maßstabbereiche sind in Anlehnung an das [BKG](#) wie folgt zu verstehen: kleinmaßstäblich 1 : 200 000 bis 1 : 1 000 000; großmaßstäblich > 1 : 200 000.

- Erarbeitung von praktischen Lösungsansätzen und Empfehlungen (Workflows), die die Ableitung von Kriterien zur bedarfsgerechten Auswahl geeigneter Modellierungsmethoden und die Entwicklung von reproduzierbaren Lösungsansätzen einschließen;
- Prüfung der Optionen für kleinmaßstäbliche Analysen der Hangrutschungsempfindlichkeit für einzelne oder zusammengesetzte kinematische Prozesstypen von Massenbewegungen auf Bundesebene.

Es sei explizit darauf verwiesen, dass eine Abschätzung des Risikos (z. B. Schäden, ökonomische Verluste) bzw. der Risiko-Expositionspotenziale (z. B. Bevölkerung, Infrastruktur) durch Massenbewegungen in Deutschland nicht Gegenstand des MBiD-Projekts war.

1.3 Gefährdungsanalysen von Massenbewegungen: Überblick (Stand: 2019)

1.3.1 Aktuelle Entwicklungen im globalen Kontext

Bedingt durch weltweit steigende Schäden und ökonomische Verluste durch Rutschungsereignisse unterschiedlicher Intensität ([s. Global Landslide Catalogue](#)) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) ist die Abschätzung der Gefährdung (und der Risiken) durch Massenbewegungen seit vielen Jahrzehnten und global im Fokus von Geowissenschaftlern, Ingenieuren und Raumplanern. Dadurch hat sich eine Vielzahl von bedarfsorientierten Arbeitsweisen herausgebildet – beginnend bei der Betrachtung eines einzelnen Hanges oder einer Böschung⁷ bis hin zur regionalen Gefährdungsabschätzung.

Die regionale Sichtweise ist besonders für raumplanerische Zwecke von Bedeutung, da eine angepasste (sensitive) Nutzung gefährdeter Flächen einen essenziellen Beitrag zur Prävention oder zur Minderung von Risiken durch Schadensereignisse oder Naturkatastrophen leisten kann ([United Nations, 2015](#)).

Aktuell werden folgende methodische Hauptkategorien gemäß ihrer grundsätzlichen Vorgehensweise unterschieden (z. B. [Corominas et al., 2014](#)) ([s. Kapitel 2.3](#)):

- **Statistische (datengetriebene) Methoden:** Umfassen Verfahren, die versuchen, mithilfe von Beobachtungsdaten die systemischen Prozesse (Ursache-Wirkung) indirekt aus der statistischen Beziehung von abhängigen und unabhängigen Variablen zu beschreiben;
- **Physikalisch-basierte Methoden:** Umfassen ein breites Methodenspektrum, in dem die physikalischen Prozesse in den Vordergrund gestellt und diese mit analytischen oder numerischen Verfahren modelliert werden;
- **Heuristische (wissensbasierte) Methoden:** Eine Kategorie von Methoden, die aufgrund fehlender Daten hauptsächlich auf dem Expertenwissen und damit Erfahrungswerten aufbauen;

⁷ Eine Böschung bezeichnet streng genommen eine künstlich hergestellte Geländeform, die entweder als Ein-, Anschitts- oder als Dammböschung hergestellt wurde. Die seit etwa 100 Jahren konstruierten Böschungen wurden meist auf Grundlage von Standsicherheitsnachweisen erstellt. Entsprechend gering ist die Versagenswahrscheinlichkeit. Dies gilt insbesondere auch für hohe Tagebauböschungen und große Erdbauwerke wie beispielsweise Staudämme. Hänge wurden durch natürliche Vorgänge (z. B. Hebung, Erosion) gebildet und befinden sich oft in einem labilen Gleichgewichtszustand.

1 Einleitung

- **Methoden des Maschinellen Lernens (ML):** Diese Verfahren könnten streng genommen zu den statistischen Verfahren gerechnet werden. Die Verfahren des ML lösen die gleichen Aufgaben unter Nutzung von iterativen Optimierungsalgorithmen zur Fehlerminimierung und zeichnen sich durch einen hohen Automatisierungsgrad aus.

Statistische Methoden

In den letzten 30 Jahren finden auch die statistischen Ansätze einen großen Nutzerkreis für die regionale Analyse der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen (z. B. [Lee et al., 2002](#); [Ayalew & Yamagishi, 2005](#); [Guzetti et al., 2005](#); [Tomonin et al., 2008](#); [Van den Eckhaut et al., 2009](#); [Wang et al., 2013](#); [Teerarungsigul et al., 2015](#)) (s. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2).

Statistische Modelle sind sogenannte datengetriebene Modelle. Auf der Grundlage vorhandener Beobachtungen von Ereignissen, z. B. eine Rutschung (abhängige Variable oder auch Zielvariable) und einer Reihe von Kontrollfaktoren (unabhängige Variablen) können Aussagen über die räumliche (und zeitliche) Verteilung von Massenbewegungen abgeleitet werden. Dabei gilt das Prinzip der Stationarität. Dies bedeutet, dass die Eigenschaften der beobachteten Merkmale, die in der Vergangenheit mit Massenbewegungen assoziiert wurden, auch in der Zukunft solche verursachen können.

Das zu lösende Grundproblem in der Empfindlichkeitsanalyse gegenüber Massenbewegungen lässt sich als eine überwachte binäre Klassifikation darstellen. Das heißt, dass die Zielvariable nur zwei Zustände annehmen kann, nämlich ein Ereignis (z. B. eine Rutschung) und kein Ereignis (z. B. keine Rutschung).

In der mathematischen Schreibweise lässt sich das mit den Booleschen Operatoren (Ereignis = WAHR, kein Ereignis = FALSCH) oder gleichbedeutenden binären Kodierung ausdrücken (Ereignis = 1, kein Ereignis = 0). Da die Klassifikation eine fundamentale Aufgabe innerhalb der Statistik ist, gibt es eine Vielzahl an statistischen Funktionen, sogenannten Klassifikatoren, die zur Lösung des Problems herangezogen werden können. Je nach Verarbeitungsart der unabhängigen Variablen kann bei statistischen Verfahren zwischen bivariaten und multivariaten Methoden unterschieden werden.

[Reichenbach et al. \(2018\)](#) stellten in einem Rückblick auf mehr als 30 Jahre Forschung im Bereich der statistischen Empfindlichkeitsanalysen von Massenbewegungen fest, dass insgesamt mehr als 150 unterschiedliche Klassifikationsmethoden angewandt wurden. Trotz der Vielzahl der vorgeschlagenen Klassifikatoren existieren verhältnismäßig wenige Ansätze, die in praktisch orientierte Arbeitsabläufe übertragen und in Softwareanwendungen implementiert wurden. Die Mehrheit der Anwendungen ist über den Status des akademischen Codes nicht hinausgewachsen. Eine neuere Softwareentwicklung, die statistische Modellierungswerkzeuge für die Analyse der Rutschungsempfindlichkeit anbietet, ist z. B. LAND-SE ([Rossi & Reichenbach, 2016](#)).

Physikalisch-basierte Methoden

Physikalisch-basierte Methoden versuchen, die physikalischen Prozesse im Hang modellhaft abzubilden (s. Kapitel 2.3.3). Das Spektrum der physikalischen Methoden ist ebenfalls sehr weitgefasst (z. B. [Hencher, 1987](#); [Hervás & Bobrowski, 2009](#); [Crosta et al., 2012](#)). Man unterscheidet:

- **Kinematische Analysen:** Strukturelle Analysen eines Hanges mit der Bestimmung des Versagensmechanismus;
- **Analyse der Grenzgleichgewichtszustände:** Bestimmung der Standsicherheit auf der Basis des Kräftegleichgewichts entlang kreisförmiger (Gleitkreisverfahren), aber auch nicht-kreisförmiger Bruchflächen unter Anwendung des Teilsicherheitskonzepts nach Eurocode 7-1 ([DIN EN 1997, 2014](#));
- **Numerische Modelle:** Rigorose Betrachtung der physikalischen Prozesse im Kontinuum, z. B. Finite-Elemente-Methode oder Diskontinuum, z. B. Diskrete-Elemente-Methode.

In der Geotechnik finden für die Berechnung der Standsicherheit einzelner Hänge und Böschungen häufig die Gleitkreisverfahren und als große Unterklasse davon die sogenannten Lamellenverfahren praktische Anwendung. Die methodischen Grundlagen reichen bis in das 19. Jahrhundert zurück. Im 20. Jahrhundert lag der Fokus auf einer sukzessiven Modifizierung und Weiterentwicklung dieser Methoden. Die Berechnungsverfahren haben sich zuerst für Lockergesteine etabliert, gefolgt von den komplexeren Standsicherheitsberechnungen für Festgesteine in den letzten Jahrzehnten. Diese Berechnungsverfahren tragen meist die Namen der Autoren, wie z. B. Fellenius-Methode, Bishop-Methode, Janbu-Methode oder Morgenstern-Price-Methode.

Die Gleitkreisverfahren werden üblicherweise auf 2D-Schnitte, aber auch in 3D angewendet. Die Verfahren gehören zum Standard bei geotechnischen Bemessungen von Böschungen und sind in der [DIN 4084 \(2009-1\)](#) aufgeführt. Es existieren proprietäre, z. B. SLOPE/W ([GEO-SLOPE International, 2014 – 2018](#)) und Open-Source-Softwareapplikationen, z. B. Scoops3D ([Reid et al., 2015](#)), die eine Vielzahl dieser Methoden bereitstellen.

Für einzelne Hänge und Böschungen sind ebenfalls numerische Verfahren von Bedeutung. Hierzu gab es in der jüngeren Vergangenheit eine Reihe von Entwicklungen, die auf den rigorosen physikalischen Ansätzen aufbauen und je nach Fragestellung (z. B. Spannungsanalyse, Bruchversagen, Fließverhalten, Steinschlag) mittels numerischer Verfahren wie Finite-Elemente-Methode (FEM) (z. B. [Quecedo et al., 2004](#)), Finite-Differenzen-Methode (FDM) (z. B. [Nagakawa & Yamada, 2008](#)), Diskrete-Elemente-Methode (DEM) (z. B. [Zhao et al., 2020](#)) und Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (z. B. [Pastor et al., 2009](#)) gelöst werden.

Für regionale Analysen erweisen sich die rigorosen Methoden oft als zu komplex bzw. sind sie nur unter einem massiven Aufwand anwendbar. Sie sind einerseits sehr rechenintensiv und andererseits müssen viele Eingangsparameter sehr gut bekannt sein, um zuverlässige Ergebnisse zu generieren.

Aus diesem Grund wurde in den letzten 30 Jahren immer wieder das Infinite Hangmodell (engl.: infinite slope model) als eine einfache Methode aus der Kategorie der Grenzgleichgewichtszustandsanalysen für regionale Betrachtungen eingesetzt.

Das Modell des infiniten Hanges wurde in vielen Variationen weiterentwickelt und dient als Grundlage zur Bewertung, u. a. von kritischen seismischen Beschleunigungen, kritischem Niederschlag oder Versagenstiefe.

Softwareanwendungen wie z. B. Level I Stability Analysis (LISA) ([Hammond et al., 1992](#)), Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping ([Pack et al., 2005](#)), Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model (TRIGRS) ([Baum et al., 2008](#)), Map-Based Probabilistic Infinite Slope Analysis (PISA-m) ([Haneberg, 2007](#)) und viele weitere Skript-Anwendungen werden häufig im akademischen Bereich eingesetzt. Diese Werkzeuge können genutzt werden, um die regionale

1 Einleitung

Hangstabilität durch stochastisch-physikalische Analysen, teilweise in Kombination mit einer hydrologischen Modellierung, abzuschätzen.

Heuristische Methoden

Für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit in regionalen Maßstäben werden insbesondere heuristische Verfahren (z. B. [Stanley & Kirschbaum, 2007](#); [Ruff & Czurda, 2008](#)) oder eine Kombination aus heuristischen und statistischen Verfahren eingesetzt (z. B. [Kamp et al., 2008](#); [Ozioko & Igwe, 2020](#)). Heuristische Verfahren benötigen keine Beobachtungsdaten (Inventare) und sind somit besonders für globale Übersichtskarten oder regionale Abschätzungen mit geringer Datendichte gut geeignet (s. [Kapitel 2.3.4](#)).

Die Bewertung erfolgt auf der Basis von Expertenwissen. Die Einschätzung kann direkt per Analogieschluss auf andere Hänge oder geomorphologische Einheiten mit vergleichbaren Merkmalen übertragen werden. Dies führt dazu, dass nur qualitative Bewertungen der Gefährdung vorgenommen werden können.

Die heuristischen Vorgehensweisen sind subjektiv und können, sofern bestimmte Entscheidungen nicht explizit oder logisch begründet werden, als intransparent und nicht reproduzierbar betrachtet werden. Die Subjektivität und Nichtreproduzierbarkeit impliziert nicht zwangsläufig eine schlechte Qualität solcher Bewertungen. Eine geowissenschaftliche Fachkraft, die mit einem Untersuchungsgebiet vertraut ist, wird sehr gute Bewertungen abgeben können. Sie kann komplexe Zusammenhänge berücksichtigen, deren Analyse unter Nutzung alternativer Verfahren detaillierte Daten erfordern würde. Die Vertrauenswürdigkeit solcher Analysen nimmt in der Regel in einem Expertennetzwerk zu.

Als Beispiel für ein auf einer heuristischen Analyse basierendem Produkt ist die *Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen* im Darstellungsmaßstab 1 : 2 750 000 im *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser* zu nennen ([Dikau & Glade, 2003](#)) (s. [Kapitel 4](#)). Auch für Frankreich wurde die Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen durch die Europäische Expertengruppe für *Guidelines for Mapping Areas at Risk of Landslides in Europe* mittels heuristischer Prozedur im Maßstab 1 : 1 000 000 modelliert ([Malet et al., 2009](#)).

Zur Erstellung paneuropäischer Gefahrenhinweiskarten wurden heuristischen Methoden auf einem Maßstab von 1 : 200 000 mit statistischen Ansätzen kombiniert ([Günther et al., 2014](#); [Wilde et al., 2018](#)).

Wissensbasierte Ansätze wurden ebenfalls in den USA ([Radbruch-Hall et al., 1982](#); [Brabb et al., 1999](#)) und Kanada ([Bobrowsky & Dominguez, 2012](#)) verfolgt, um Übersichtskarten in kleinen Maßstäben (1 : 2 500 000 bzw. 1 : 6 000 000) zu generieren.

Künstliche Neuronale Netze

Die Künstlichen Neuronalen Netze (KNN) finden seit etwa 20 Jahren Verwendung in der regionalen Analyse von Hangrutschungsempfindlichkeiten. Diese Ideen gehen auf Forschung in den 40er und 50er Jahren des letzten Jahrhunderts zurück bzw. sind inspiriert von den Prinzipien der biologischen Informationsverarbeitung.

Durch das gestiegene Interesse sowie das Angebot an Open-Source-Lösungen für Algorithmen des Maschinellen Lernens (ML) hat sich seit etwa zehn Jahren ein Trend entwickelt, diese Technologien vermehrt einzusetzen. Die Erfolge im Einsatz von KNN in der Internet-Industrie, bei der Anwendung auf riesige Datenmassive (engl.: big data) und insbesondere der Bildanalyse beschleunigten diese Entwicklung.

In den letzten Jahren wurden vereinzelt auch die derzeit populären Deep Learning-Algorithmen zur Rutschungserkennung getestet. Hierbei wird häufig die Erkennung von Massenbewegungsereignissen aus optischen Daten unter Zuhilfenahme von weiteren Geodaten untersucht, wobei die Erfolgsquote derzeit im Bereich etablierter Verfahren aus dem ML oder der Künstlichen Intelligenz (KI) liegt.

Die Künstlichen Neuronalen Netze nehmen neben anderen Verfahren des Maschinellen Lernens einen besonderen Stellenwert ein. Es ist die Kategorie, die am häufigsten mit dem Begriff *Künstliche Intelligenz* assoziiert wird. KNN sind Netze aus künstlichen Neuronen (z. B. [Schmidhuber, 2015](#)). Sie werden als Abstraktion der Vernetzung natürlicher Neuronen im Nervensystem zur Modellbildung in der Informationsverarbeitung eingesetzt.

Die meisten KNN-Studien zur Bewertung der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen verwenden die sogenannten Feed-Forward (FF)-Netze, die eine Multi-Layer-Perceptron-Struktur (MLP) mit einer Zwischenschicht aufweisen (z. B. [Ermini et al., 2005](#); [Lee & Evangelista, 2006](#); [Pradhan & Lee, 2009](#); [Alimohammadlou et al., 2014](#)) (s. Kapitel 2.3.5, 2.6.2.4, 2.6.2.5 und 3.2.4).

Es gibt aktuell viele proprietäre und Open-Source-Anwendungen und Bibliotheken, die Algorithmen zur Erstellung und Berechnung von KNN anbieten. Diese Anwendungen sind auf eine möglichst breite Nutzung orientiert und decken nicht immer die Spezifika der Analyse der Rutschungsempfindlichkeit ab. Es werden aber auch Module angeboten, die auf die Bedürfnisse dieser Aufgabenstellung besser zugeschnitten sind. So bieten LAND-SE ([Rossi & Reichenbach, 2016](#)) und die im [GRASS GIS](#)⁸ (Tag des Zugriffs: 09.09.2020) implementierte Open-Source-Erweiterung *r.landslides* ([Bragagnolo et al., 2020](#)) jeweils einen Workflow zur Analyse der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen mittels KNN.

1.3.2 Aktuelle Entwicklungen auf europäischer Ebene

Mit Stand Ende des Jahres 2019 gibt es keine EU-Standards zur Erfassung von Massenbewegungen bzw. zur Bewertung und zum Management der damit assoziierten Gefahren und Risiken. Allerdings hat sich durch verschiedene EU-finanzierte Projekte im Zusammenhang mit dem 6. und 7. EU-Forschungsrahmenprogramm ein Trend zur Harmonisierung von Methoden, Verfahren und Normen entwickelt. Dies spiegelt sich in der europaweiten Zusammenarbeit von Fachbehörden, von Forschungseinrichtungen und Universitäten wider. So wird die Erarbeitung harmonisierter Richtlinien zur Dokumentation und Bewertung von Massenbewegungen empfohlen, um im Rahmen eines integrierten Risikomanagements die Schäden und Verluste durch Massenbewegungen zu reduzieren und Präventionsstrategien zu unterstützen ([EEA, 2010](#)).

Das Vorhandensein von landesweiten Standards oder länderübergreifender Richtlinien wurde in der Zeitspanne von 2007 bis 2012 durch das Projekt [Risk Assessment Methodologies for Soil Threats \(RAM-SOIL\)](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) im europäischen Rahmen untersucht. Dabei stellten [Malet & Maquire \(2008\)](#) fest, dass nur in vier der 25 betrachteten europäischen Länder (Frankreich, Italien, Schweden und Schweiz) eine offizielle Richtlinie zur Erstellung von Risikoanalysen für Massenbewegungen existiert. Die bereits verankerten Richtlinien beinhalten heuristische Ansätze oder deren Kombination mit datengetriebenen Methoden. Es ist aber auch diagnostiziert worden, dass in einigen Ländern (z. B. Belgien) Richtlinien mit rein datengetriebenen Ansätzen in Vorbereitung sind.

⁸ GRASS (GIS): Geographic Resources Analysis Support System (Geographisches Informationssystem).

1 Einleitung

In der Umsetzung des 7. EU-Rahmenprogramms für Forschung und Technologieentwicklung in den Jahren 2007 bis 2013 wurde mit dem [SafeLand-Projekt](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) auf europäischer Ebene die Thematik der gravitativen Massenbewegungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel umfänglich bearbeitet. Dabei wurden auf der Grundlage einer einheitlichen Terminologie harmonisierte Risikobewertungs- und Managementinstrumente bzw. -strategien für Massenbewegungen auf lokaler, regionaler und europäischer Ebene entwickelt ([Van den Eeckhaut & Hervás, 2012](#)).

Diese Aktivitäten wurden auch im anschließenden Projekt [Landslide Modelling and Tools for Vulnerability Assessment, Preparedness and Recovery Management \(LAMPRE\)](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) im Zeitraum 2013 bis 2015 fortgeführt. Beide Projekte lieferten umfangreiche Dokumentationen mit Empfehlungen und Werkzeugen.

Im Jahr 2015 konstituierte sich die *Earth Observation and Geohazards Expert Group (EOEG)* des Euro-GeoSurveys (s. [Kapitel 1.1](#)). Dieses Expertengremium verfolgt u. a. das Ziel, die Anwendung modernster Erdbeobachtungstechnologie in den Geowissenschaften (Bereiche Bergbau, Geogefahren, Georesourcen und Umwelt) und die Einführung langfristiger In-situ-Beobachtungssysteme zu fördern. Diese Vorgehensweise fokussiert auf die Bereitstellung harmonisierter paneuropäischer geowissenschaftlicher Informationen, um die operative und ökonomische Leistungsfähigkeit von Regierungen, Institutionen, Organisationen, Unternehmen und Individuen zu verbessern ([Herrera, 2019](#)).

Derzeit analysiert und vergleicht die EOEG den aktuellen Sachstand in den Staaten der EU zu folgenden Themen:

-
- **Nationale Hangrutschungsdatenbanken (Verfügbarkeit, Dateninhalte);**
 - **Bewertung der Auswirkungen durch Hangrutschungen (Schäden, Verluste);**
 - **Integration von lokalen und regionalen Gefahrenhinweiskarten zu Hangrutschungen in die Landnutzungsplanung.**
-

In diesem Zusammenhang wurden zwei Übersichtspublikationen erarbeitet ([Herrera, 2018](#); [Mateos et al., 2020](#)) und eine erste Hangrutschungsdichtekarte Europas (Anzahl der Hangrutschungen pro Quadratkilometer) im Kartenportal des [Emergency Response Coordination Center](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) veröffentlicht.

Aufgrund des Fehlens bzw. der Unvollständigkeit von Hangrutschungsinformationen in vielen Ländern Europas sowie der uneinheitlichen Integration von Informationen über diese geologische Gefahr in die Landnutzungs- und die Stadtplanung versucht die EOEG, ein harmonisiertes europaweites Vorgehen im Hinblick auf eine ganzheitliche Bearbeitung von gravitativen Massenbewegungen zu fördern.

Das Fernziel ist die Entwicklung und Umsetzung einer einheitlichen europäischen Richtlinie zur Bewertung und zum Management von Hangrutschungsrisiken. Dadurch sollen die nachteiligen Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten in der Europäischen Union verringert werden ([Herrera, 2019](#)).

Im Jahr 2018 wurde durch das [Joint Research Centre \(JRC\)](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) der Europäischen Kommission die zweite Version der *European Landslide Susceptibility Map (ELSUSv2)* publiziert ([Wilde et al., 2018](#)). Die Karte zeigt die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit von Massenbewegun-

gen (Suszeptibilität) auf dem europäischen Kontinent und basiert auf einem hybriden heuristisch-statistischen Modellierungsansatz. Dabei wurde für sieben klimatisch-physiogeographische Modellzonen unter Berücksichtigung der rutschungsrelevanten Faktoren Hangneigung, oberflächennahe Lithologie und Landnutzung die Rutschungsempfindlichkeit modelliert und durch Inventardaten validiert. Die Autoren weisen darauf hin, dass die ELSUSv2-Karte nur für den kleinmaßstäblichen Überblick geeignet ist und somit nicht zur Gewinnung lokaler Information genutzt werden sollte.

1.3.3 Bearbeitungsstand in den beteiligten SGD der Bundesländer in Deutschland

1.3.3.1 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

Für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg gibt es seit Februar 2014 die vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) in mehrjähriger Arbeit konzipierte und erstellte ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte von Baden-Württemberg (IGHK50).

Die Karte gewährt eine Übersicht geogener Naturgefahren des Landes. Sie wurde für den Zielmaßstab 1 : 50 000 erarbeitet und ist über das [Geoportal des LGRB](#) oder einen WMS-Dienst nach vorheriger Registrierung digital abrufbar. Dargestellt werden die Naturgefahren Massenbewegungen (Rutschungen, Steinschlag/Felssturz), Verkarstung (Dolinen, Erdfälle, Karstsenken) sowie setzungs- und hebungsgefährdeter Baugrund als Flächen- bzw. Punktdaten. Weitere Themen wie erosionsempfindliche und veränderlich feste Gesteine sind in Arbeit.

Die ingenieurgeologische Gefahrenhinweiskarte ist auf die Belange der Raumplanung ausgerichtet und nicht parzellenscharf. Sie dient als erste Grundlage zur Gefahreneinschätzung mit dem Ziel, Schäden durch vorausschauende Planung zu verhindern bzw. zu minimieren. Sie soll auf mögliche geogene Naturgefahren hinweisen und aufzeigen, wo frühzeitig objektbezogene Baugrunderkundungen und ingenieurgeologische Übersichtskartierungen sinnvoll sind. Weder Intensität noch Wahrscheinlichkeit eines möglichen Ereignisses lassen sich aus der ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte ableiten. Die Naturgefahren sind nicht im Detail analysiert, eine Verifizierung der Daten im Gelände erfolgte stichpunktartig. Lokale Gegebenheiten (z. B. Schutzmaßnahmen, Sanierungen, topographische Besonderheiten) sind daher in der Regel nicht berücksichtigt.

Nachfolgend wird die Methodik zur Abgrenzung der Massenbewegungsflächen kurz erläutert.

Die Gefahrenhinweisflächen *Rutschungsgebiete* sind Gebiete mit deutlichen Hinweisen auf aktive oder inaktive Rutschungen inklusive Hangzerreißung. Dargestellt ist der gesamte Prozessraum ohne Angabe der Gleitflächentiefe und ohne Angabe der derzeitigen Aktivität. Rutschungsprozesse sind bereits erfolgt, eine Reaktivierung bzw. Vergrößerung der Rutschung ist möglich. Die Rutschungsgebiete wurden dem geologischen Kartenwerk (Geologische Karte im Maßstab 1 : 25 000; Geologische Karte im Maßstab 1 : 50 000) entnommen bzw. anhand einer fernerkundlichen Auswertung des hochauflösenden Digitalen Geländemodells 1 (DGM1, Gitterweite 1 m x 1 m) sowie dem geologischen Basisdatensatz des LGRB durch erfahrene Ingenieurgeologen unter Berücksichtigung verschiedener Beleuchtungsrichtungen ermittelt.

Die Gefahrenhinweisflächen *Steinschlag/Felssturz* sind potenzielle Ausbruchgebiete für Sturzprozesse (Steinschlag, Blockschlag, Felssturz). Dargestellt sind mittels standardisierter Auswertung (Gestein, Hangneigung) teilautomatisiert abgeleitete Flächen ohne Angabe der Geometrie des vollständigen

1 Einleitung

Prozessraums und möglicher Sturzkörpervolumina. Grundlage für die standardisierte Auswertung bilden der geologische Basisdatensatz mit einheitlicher Generallegende sowie das DGM1, die miteinander verschnitten wurden. Die etwa 480 Legendeneinheiten wurden auf Basis von Expertenwissen hinsichtlich ihres Potenzials, Sturzkörper zu bilden, klassifiziert. Die Mindestneigung potenzieller Ausbruchgebiete wurde – ebenfalls basierend auf Expertenwissen – mit 35° angenommen. Aus kartographischen Gründen wurden die ermittelten Flächen noch gefiltert und Lücken innerhalb zusammenhängender Polygone bis 2000 m² Größe gefüllt und Kleinstflächen < 100 m² gelöscht.

In Abb. 1-1 ist die Vorgehensweise zur Erstellung der Ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte von Baden-Württemberg beispielhaft dargestellt.

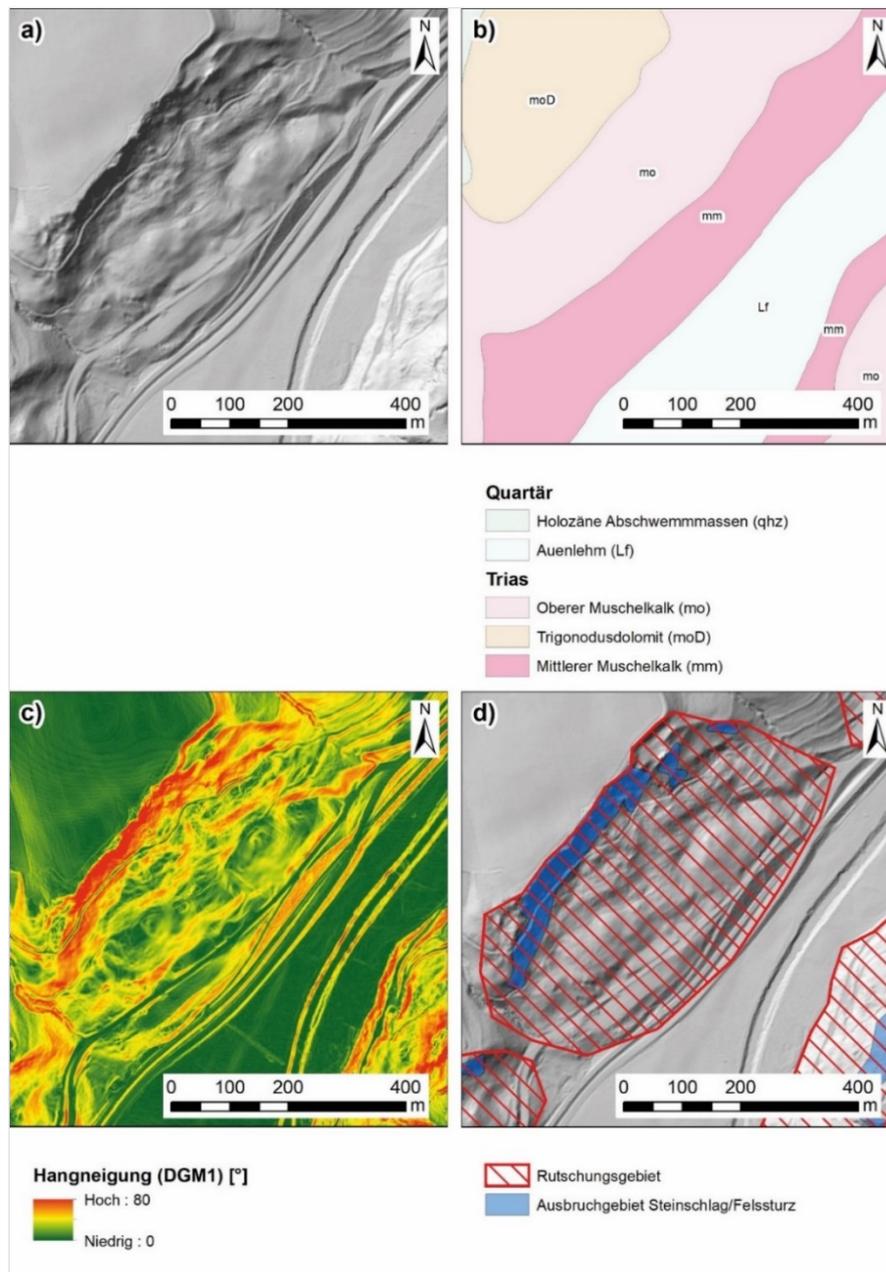


Abb. 1-1: Grundlagen zur Erstellung der Ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte von Baden-Württemberg: a) Schummernkarte des DGM1, b) geologischer Basisdatensatz, c) Hangneigungskarte und d) daraus abgeleitete Gefahrenhinweisflächen Rutschungsgebiete und Steinschlag/Felssturz (Quelle: LGRB Baden-Württemberg).

Rund 2,5 % ($\approx 890 \text{ km}^2$, über 9800 Einzelflächen) der Landesfläche von Baden-Württemberg sind von Rutschungen betroffen. Hierzu zählen vor allem die Hänge des Albtraufs im Mittel- und Oberjura, Ausstriche der Trossingen- und Grabfeld-Formation im Albvorland, Hänge aus feinkörnigen Tertiärgesteinen in Oberschwaben und im Markgräflerland sowie Talhänge aus Mittlerem und Oberem Muschelkalk.

Potenzielle Ausbruchgebiete von Sturzprozessen sind rund 0,6 % ($\approx 210 \text{ km}^2$, knapp 42 900 Einzelflächen) der Landesfläche von Baden-Württemberg. Betroffen sind besonders Steillagen im Schwarzwald und im Odenwald, in der Bodenseeregion, der Albtrauf sowie tief eingeschnittene Flusstäler.

1.3.3.2 Bayerisches Landesamt für Umwelt

Im GEORISK-Kataster des Bayerischen Landesamts für Umwelt werden systematisch alle nennenswerten Ereignisse im Zusammenhang mit Geogefahren erfasst, die dem Geologischen Dienst bekannt sind. Neben aktuellen Ereignissen zählen hierzu insbesondere Bereiche, in denen Landschaftsformen oder *stumme Zeugen* auf bereits erfolgte, postglaziale Massenbewegungen hinweisen. Aktuell (Stand Juli 2020) sind in Bayern 1216 Sturzereignisse, 9078 Rutschungen, 505 Fließprozesse und 58 526 Subrosionsformen erfasst.

Eine vollständige Erfassung aller Prozesse ist nicht zu erreichen. In Projekten zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarte für Geogefahren wird aber versucht, für die jeweiligen Projektgebiete die relevanten erfolgten Ereignisse möglichst flächendeckend zu erfassen. Bereits fertig bearbeitet sind die Landkreise mit Alpenanteil und weite Bereiche der Frankenalb mit ihrem Vorland (ca. 45 % der Landesfläche). In diesen Gebieten liegt die Mehrzahl der erfassten GEORISK-Objekte. Die Kenntnisse in den restlichen Gebieten sind noch lückenhaft, die Bearbeitung hat begonnen oder ist in Planung.

Die *Gefahrenhinweiskarte für Geogefahren* zeigt im Gegensatz zu den GEORISK-Objekten nicht bereits erfolgte Ereignisse, sondern stellt mögliche zukünftige Prozessräume dar. Die GEORISK-Objekte dienen als Hintergrundinformation hierfür, da erfahrungsgemäß Prozesse dort am wahrscheinlichsten sind, wo bereits Ähnliches erfolgt ist. Hinzu kommen verschiedene Kartenwerke, Expertenwissen und Modellierungs-Algorithmen. Für die verschiedenen Prozesse werden unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der Gefahrenhinweisflächen angewendet (s. [Methoden-Bericht zur Gefahrenhinweiskarte Bayern](#)):

- **Stein- und Blockschlag** wird auf Basis des deterministischen 3D-Steinschlagmodells nach [Krummenmacher et al. \(2005\)](#) und [Zinggeler & Pfeiffer \(2009\)](#) modelliert. Die Ausweisung von Gefahrenhinweisflächen berücksichtigt keine bestehenden baulichen Schutzmaßnahmen. Ein Wald hat natürlicherweise eine bremsende Wirkung auf stürzende Steine und soll mit seiner langfristigen Schutzwirkung berücksichtigt werden. Zwei Szenarien werden in der Gefahrenhinweiskarte dargestellt: Rote Gefahrenhinweisflächen kennzeichnen ein realitätsnahes Szenario, in dem die Prozessräume von Stürzen mit den dämpfenden Effekten des aktuellen Waldbestands modelliert werden. In einem zweiten, konservativen Szenario wird der Steinschlagprozess ohne Einfluss eines Waldes berechnet (orange Gefahrenhinweisflächen).
- **Felssturz** wird in bekanntermaßen gefährdeten Gebieten anhand von Pauschalwinkelmodellen nach [Evans & Hungr \(1993\)](#) oder [Meißl \(1998\)](#) modelliert. Die Entscheidung, welches der Modelle zum Einsatz kommt, fällt nach [Mayer & v. Poschinger \(2005\)](#). Die ermittelten Flächen werden mit den roten Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag zusammengefasst.

1 Einleitung

- **Tiefreichende Rutschung:** In Gebieten mit bekannten tiefreichenden Rutschungen (≥ 5 m), die aktiv oder reaktivierbar sind, wird mithilfe von Karten und Expertenwissen der mögliche künftige Prozessraum abgeschätzt. Mögliche Ausweitungen nach oben, unten oder zur Seite werden dabei berücksichtigt, rote Gefahrenhinweisflächen werden dargestellt.
- **Rutschanfälligkeit:** Auf Grundlage von Karten und Expertenwissen werden orange Gefahrenhinweisflächen für Gebiete erstellt, in denen zwar bislang keine tiefreichende Rutschung stattgefunden hat, in denen sich aber unter ungünstigen Umständen eine solche entwickeln kann.
- Die Gefährdung durch **flachgründige Hanganbrüche** wurde bislang ausschließlich für die Alpenlandkreise auf Basis des Sicherheitsgrades modelliert ([Selby, 1993](#)). Für die Disposition wurden die Ansätze nach [Liener \(2000\)](#) und [Tobler et al. \(2013a\)](#) verwendet, für die Prozessräume die Methode nach [Tobler et al. \(2013b\)](#). Rot-schraffierte Gefahrenhinweisbereiche kennzeichnen ein realitätsnahes Szenario, in dem die Prozessräume von Hanganbrüchen mit den schützenden Effekten des aktuellen Waldbestands modelliert werden. In einem zweiten, konservativen Szenario wird der Hanganbruchprozess ohne Einfluss eines Waldes berechnet (orange-schraffierte Gefahrenhinweisflächen). Als Worst-Case-Szenario trägt es zukünftigen Veränderungen des Waldbestands Rechnung, die sich möglicherweise durch Kahlschlag, Waldbrand, Durchforsten oder Schädlingsbefall ergeben.
- **Erdfälle/Dolinen:** Um bekannte Erdfälle und Dolinen wird ein Puffer von 50 m Radius gelegt und als rote Gefahrenhinweisfläche dargestellt.
- **Großflächige Senkungsgebiete:** Die betroffenen Flächen werden aufgrund von Karten und Expertenwissen ermittelt und als rot-schraffierte Gefahrenhinweisflächen dargestellt.
- **Verkarstungsfähiger Untergrund:** Auf Grundlage der Geologischen Karte 1 : 200 000 werden Gebiete mit verkarstungsfähigen Gesteinen (teilweise auch unter Überdeckung) ausgewiesen. Eine Kartendarstellung erfolgt wegen der zwangsläufigen Unschärfe nicht, das Thema wird aber bei der Standortauskunft Geogefahren berücksichtigt.

Die GEORISK-Objekte und Gefahrenhinweiskarten sind im [UmweltAtlas Bayern](#) (Tag des Zugriffs: 07.10.2020) publiziert. Hier ist es auch möglich, durch die Eingabe einer Adresse oder durch Anklicken eines Punktes auf der Karte eine mehrseitige PDF-Standortauskunft zu erhalten, die alle vorliegenden Informationen zu den Geogefahren an dieser Koordinate zusammenfasst. Grundlagen, Methoden, Publikationen und zahlreiche Links sind auf den [Internetseiten des LfU](#) bereitgestellt.

1.3.3.3 Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Landesbetrieb

In Nordrhein-Westfalen (NRW) sind die Gebiete, in denen an natürlichen Hängen Massenbewegungen auftreten können, bekannt. [Prinz & Strauß \(2018\)](#) geben eine Übersicht zu rutschungsgefährdeten Schichteinheiten in Mitteleuropa. Dort werden auch diejenigen Gesteinseinheiten diskutiert, in denen in der Landesfläche von NRW Rutschungen auftreten können. Weite Bereiche Nordrhein-Westfalens sind durch Mittelgebirge geprägt. Dort sind Steilhänge im Wesentlichen auf tief eingeschnittene Flusstäler beschränkt. Als Testgebiet wurde exemplarisch das tief eingeschnittene Siegtal ausgewählt. Dort treten verstärkt nach Starkregen-Ereignissen oberflächennahe Rutschungen innerhalb der Deckschichten auf (s. [Kapitel 2.6.3](#): Abb. 2-49 und Abb. 2-50).

Im Folgenden sollen zwei weitere Gebiete in NRW exemplarisch hervorgehoben werden. Im ersten Fall werden Rutschungen in natürlichen Hängen beschrieben. Im zweiten Fall werden Massenumlagerungen in künstlich angelegten Böschungen diskutiert.

Ein besonderer Fall von Rutschungen kommt im Ausstrichbereich der Unterkreidetransgression am Ostabhang des Eggegebirges zwischen Bad Driburg-Neuenheerse und Willebadessen in Ostwestfalen vor. Dort stehen Sandsteine der Osning-Formation (Unterkreide) über Ton- und Mergelsteinen der Arnstadt-Formation (Steinmergelkeuper) an. In niederschlagsreichen Jahren (etwa ab 1200 mm Jahressumme) kommt es an dieser diskordanten Schichtgrenze zu Vernässungen innerhalb des Steinmergelkeupers, der dann mehrere Meter tief aufweichen kann. In der Folge werden Rutschungen ausgelöst, deren Bewegungsrate mehrere Dezimeter pro Tag aufweisen kann. Die dort entlangführende Bahnstrecke wurde seit 1848 vielfach durch Rutschungen unterbrochen (Abb. 1-2). Von 1997 bis 2003 wurde zur Vermeidung weiterer Betriebsunterbrechungen mit einer Investitionssumme von 280 Millionen Euro von der DB AG eine 12 km lange Umfahrungsstrecke errichtet.



Abb. 1-2: Rutschung im Bereich der Bahnlinie am Paderborner Berg (Kreis Höxter, Nordrhein-Westfalen), Foto: GD NRW, 03.11.1998.

Ein anderer Fall sind Steinschlagereignisse. Diese kommen immer wieder entlang von Felsböschungen vor. Viele dieser Felsböschungen wurden zum Festgesteinsabbau oder Verkehrswegebau angelegt. Das Steinschlag-Risiko steigt zum einen mit von der Geländeoberfläche ausgehenden Verwitterung der anstehenden Gesteine und zum anderen durch Hangzerreißung entlang von steilstehenden Trennflächen an. Allgemein zugängliche Böschungsbereiche müssen im Hinblick auf ihre Standsicherheit untersucht werden und dann möglicherweise durch technische Maßnahmen gesichert werden. Der Drachenfels bei Königswinter ist das bekannteste Beispiel in Nordrhein-Westfalen. Dort wurde seit der Römerzeit bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts Trachyt abgebaut. In den 1960er Jahren kam es zu verstärkten Steinschlagereignissen (Abb. 1-3).

1 Einleitung



Abb. 1-3: Steinschlag am sogenannten Eselsweg unterhalb der Drachenfelsruine (Rhein-Sieg-Kreis, Nordrhein-Westfalen): Foto: 1967 – Archiv J. Kling/Siebengebirgsmuseum Königswinter.

Die Gefährdung war nur durch umfangreiche Sicherungsmaßnahmen von 1970 bis 1973 zu beseitigen (Thomaß, 1977). Es wurden unter anderem 40 m bis zu 45 m lange Felsanker bzw. Spannglieder eingebaut. Die technischen Sicherungen mussten nach 50 Jahren teilweise erneuert werden. Es wurden erneut umfangreiche Vernagelungen, Netzverspannungen sowie Spritzbetonsicherungen erforderlich. Ferner mussten sieben Spannglieder ausgetauscht werden. Durch eine Investition von 3,5 Millionen Euro ist ein sicherer Besuch der jährlich etwa 500 000 Touristen am Drachenfels für die nächsten 50 Jahre gewährleistet (Abb. 1-4a und b).

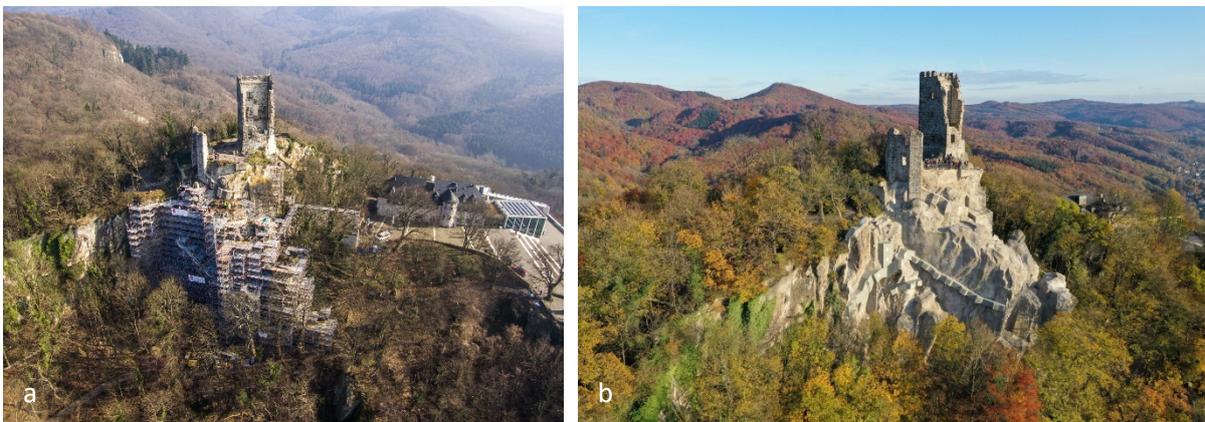


Abb. 1-4: Burgruine Drachenfels bei Königswinter (Rhein-Sieg-Kreis, Nordrhein-Westfalen) – a) mit eingerüsteten Felswänden während der Sicherungsmaßnahmen im Februar 2018; b) nach Abschluss der Sicherungsmaßnahmen im Herbst 2019 (Foto: a + b: Bezirksregierung Köln/GD NRW).

1.3.3.4 Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Im Ereigniskataster des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) werden systematisch alle nennenswerten Ereignisse im Zusammenhang mit geogenen Naturgefahren (Massenbewegungen) im Freistaat Sachsen erfasst, die dem Geologischen Dienst bekannt sind. Das Ereigniskataster ist angelehnt an die Mindestanforderungen Ereigniskataster des Leitfadens der [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie \(2016\)](#).

Aktuell (Stand September 2020) sind in Sachsen 754 Massenbewegungsereignisse erfasst, davon 586 Sturzereignisse (Stein- und Blockschlag/Felsstürze), 115 Rutschungsereignisse und 53 Murgangereignisse (Geröll-/Schlammlawinen).

Eine vollständige Erfassung aller Massenbewegungsereignisse ist nicht zu erreichen. Im Freistaat Sachsen gibt es keine Meldepflicht für derartige Ereignisse.

Gefahrenhinweiskarten für geogene Gefahren wurden bisher im Freistaat Sachsen noch nicht erarbeitet. Die Abb. 1-5 und Abb. 1-6 geben einen Einblick in das Ereigniskataster.



Abb. 1-5: Startseite des Ereigniskatasters für Massenbewegungen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Quelle: LfULG Sachsen).

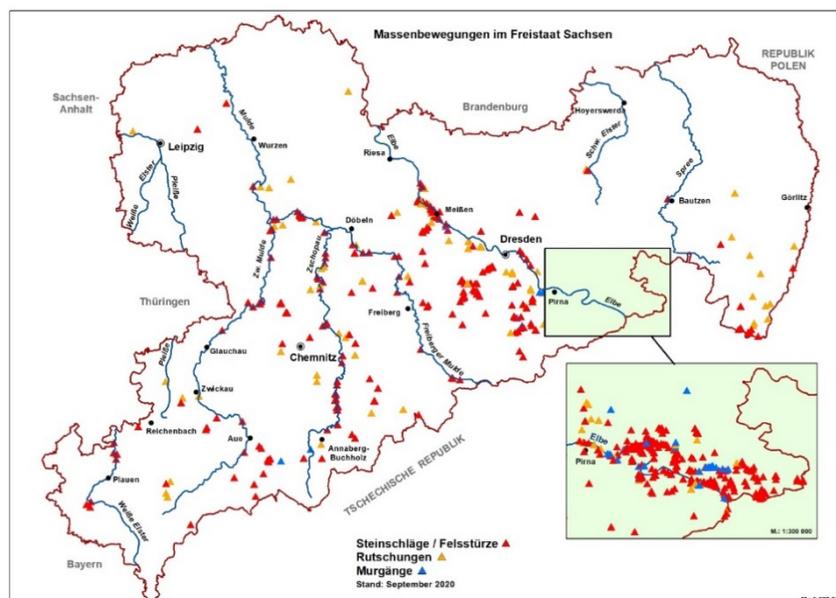


Abb. 1-6: Übersicht über die Verteilung der erfassten Massenbewegungen im Freistaat Sachsen. Ausschnittsvergrößerung: Schwerpunktgebiet für Massenbewegungen ist das Elbsandsteingebirge (Quelle: LfULG Sachsen).

1 Einleitung

Die Massenbewegungen (Sturz-/Rutsch- und Fließprozesse) im Freistaat Sachsen konzentrieren sich auf die Mittelgebirgsregionen (Vogtland, Erzgebirge, Elbsandsteingebirge) sowie auf tief eingeschnittene Fluss- und Bachtäler.

Aufgrund der latenten Gefährdung durch Felsstürze im Elbsandsteingebirge wurde im Mai 2018 das grenzübergreifende [EU-Projekt Georisk](#) gestartet. Federführend sind die Karls-Universität Prag und die Technische Universität Bergakademie Freiberg. Weitere Kooperationspartner auf deutscher Seite sind das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Referat Ingenieurgeologie), das Landesamt für Straßenbau und Verkehr – Niederlassung Meißen und das Amt für Straßen- und Hochbau des Landkreises Sächsische Schweiz-Osterzgebirge.

An ausgewählten Lokalisationen sollen Gebirgsklassifizierungen durchgeführt und ingenieurgeologische Modelle zur Standfestigkeit erstellt und in einem sich noch im Aufbau befindlichen Expertensystem (GIS) grenzüberschreitend erfasst werden. Hierbei hilft auch ein punktuell installiertes Monitoring- und Frühwarnsystem, welches mögliche Felsbewegungen misst und im Falle ungewöhnlicher Bewegungen ein Warnsignal sendet.

Zusammen mit der Analyse der Daten ist geplant, numerische Berechnungsmethoden hinsichtlich der allgemeinen Felsstabilität zu definieren und verbesserte präventive Sicherungsmaßnahmen abzuleiten. Die Ergebnisse fließen in die Berechnungen und die Verifizierung prognostischer ingenieurgeologischer Risikomodelle ein. Darüber hinaus werden ingenieurgeologische Präventions- und Sicherungsmaßnahmen für verschiedene beispielhafte Felssituationen erarbeitet, um so einen soliden Handlungsspielraum für Behörden und Ämter zu ermöglichen. Die Resultate fließen einerseits in Handlungsempfehlungen ein und dienen andererseits der Konzipierung zukünftiger Monitoring-Strategien und der Verbesserung von Risikomodellen. Diese Risikomodelle finden Berücksichtigung bei der Planung zukünftiger grenzüberschreitender Verkehrsprojekte.

1.3.4 Aktivitäten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Die Aktivitäten der BGR im Bereich *Massenbewegungen* resultieren aus den folgenden unterschiedlichen Aufgabenstellungen bzw. Projektkonstellationen mit dem Ziel einer wissenschaftsbasierten Politikberatung:

- Technische Zusammenarbeit;
- Internationale geowissenschaftliche Zusammenarbeit und Forschung;
- Nationale geowissenschaftliche Zusammenarbeit.

Technische Zusammenarbeit

Die BGR ist eine Durchführungsorganisation (DO) der deutschen Entwicklungszusammenarbeit (EZ)⁹ im Auftrag des [Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung \(BMZ\)](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020).

⁹ Die Entwicklungszusammenarbeit (EZ) umfasst die Finanzielle Zusammenarbeit (FZ) und die Technische Zusammenarbeit (TZ).

In dieser Funktion berät die BGR das BMZ in geowissenschaftlichen Fragestellungen im entwicklungs-politischen Kontext und implementiert bilaterale oder multilaterale (regionale) Projekte der Techni-schen Zusammenarbeit (TZ) mit Partnerländern und -organisationen der deutschen EZ.

Alle beauftragten Interventionen zielen auf wirkungsorientierte Veränderungen im Einklang mit den übergeordneten entwicklungspolitischen Intentionen wie Armutsbekämpfung, Stärkung der politi-schen Teilhabe der Bevölkerung, der guten Regierungsführung sowie dem Erhalt der Umwelt und der natürlichen Ressourcen ab.

In Abstimmung mit anderen internationalen Gebern unterstützt die BGR die Partnerländer u. a. im Management von geogenen und klimainduzierten Katastrophenrisiken. Entsprechend ihrer Expertise unterstützt sie dabei staatliche Partnerinstitutionen (z. B. Geologische Dienste, Behörden des Katastro-phenrisiko-Managements) auch im Bereich der Gefährdungsanalyse von Naturgefahren (Schwerpunkt: Massenbewegungen).

Die Beratung umfasst die Entwicklung von Werkzeugen (z. B. nationale Rutschungsinventardatenban-ken, nutzerfreundliche Software-Applikationen für die Modellierung), die exemplarische Modellierung der Rutschungsempfindlichkeit in Pilotgebieten der deutschen EZ und die Institutionalisierung von standardisierten Prozeduren. Die partizipativ generierten Produkte (z. B. Karten) bilden die Grundlage der Diskussion mit politischen Entscheidungsträgern im Netzwerk relevanter Behörden.

Die umfassende fachliche Aus- und Weiterbildung erfolgt als *Training-on-the-Job* oder durch eigen-ständige Fortbildungsmaßnahmen. Diese Leistungen werden überwiegend durch BGR-Personal am Projektstandort unter kontinuierlicher fachlicher Begleitung durch Kurzzeit-Experten der BGR er-bracht.

Im Partnerland Pakistan setzt die BGR seit dem Jahr 2009 mehrere TZ-Projekte um. Bis zum Jahr 2016 lag der Fokus der Kooperation mit dem [Geologischen Dienst Pakistans](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) auf der räumlichen Gefährdungsabschätzung von Massenbewegungen. In der Provinz Khyber Pakhtunkhwa (Distrikt Mansehra)¹⁰, Fokusgebiet der deutschen EZ in Pakistan, wurde exemplarisch für das Kaghan- und Siran-Tal die Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen analysiert. Die Infra-struktur in diesen beiden Tälern wurde infolge des Kaschmir-Erdbebens im Jahr 2005 massiv durch Rutschungen geschädigt und die Stadt Balakot vollständig zerstört.

Auf der Grundlage einer bivariaten statistischen Modellierung (Methode der Gewichteten Evidenzen) (s. [Kapitel 2.3.1](#), [2.6.1](#) und [3.2.1](#)) wurde unter Berücksichtigung des Rutschungsinventars und sieben unabhängiger Variablen (Parameter) ein Modell mit fünf Suszeptibilitätsklassen generiert und das Er-gebnis in Kartenform im Maßstab 1 : 50 000 publiziert ([GSP, 2012](#)).

Diese Testphase bildete die Basis für eine flächendeckende Analyse der Rutschungsempfindlichkeit für den Distrikt Mansehra sowie den nordwestlich angrenzenden Distrikt Torghar. Zur Verbesserung der Modell-Parameter wurde unter Nutzung fernerkundlicher Informationen zusätzlich die Landnutzung distriktweit kartiert ([Fuchs & Khalid, 2015](#)). Die Modellierung erfolgte in methodischer Anlehnung an die Teilgebiete im Kaghan- und Siran-Tal. Die räumliche Darstellung der Hangrutschungsempfindlich-keit wurde im Maßstab 1 : 200 000 kartiert. Die Ergebnisse sind in [Torizin et al. \(2017\)](#) publiziert.

¹⁰ Zum Vergleich: In Deutschland entspricht die Provinz administrativ dem Bundesland, der Distrikt dem Land-kreis.

1 Einleitung

Von 2003 bis 2016 war die BGR im Themenfeld Katastrophenrisiko-Management zeitweise mit zwei TZ-Projekten in Indonesien präsent. Pilotgebiete lagen auf den Inseln Java, Ende und Lombok sowie im Nachgang des Tsunami im Jahr 2004 auf der Insel Sumatra (Banda Aceh, Provinz Nanggroe Aceh Darussalam). Partner war jeweils der [Geologische Dienst Indonesiens](#) (Badan Geologi) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020).

Unter Berücksichtigung der landesweiten Bedrohung durch Massenbewegungen wurde das Thema Gefährdungsabschätzung von Massenbewegungen ab dem Jahr 2010 zentraler Teil der Projektaktivitäten. Durch die zeitlich parallel laufenden Aktivitäten in Pakistan war ein hoher Grad an Synergie gegeben, entwickelte Prozesse und Werkzeuge ([Balzer & Kuhn, 2011](#); [Balzer & Torizin, 2011](#); [Kuhn, 2011](#); [Torizin, 2012](#)) in vergleichbarer oder angepasster Form auch in Indonesien zu nutzen.

Die nationalen Rutschungsdatenbanken in Pakistan (LIDAP)¹¹ und Indonesien (LIDIA)¹² sind bis auf administrative Informationen nahezu identisch. Vergleichbar mit der Arbeitsweise in Pakistan wurde am Beispiel der Insel Lombok ein standardisierter Prozess zur räumlichen Gefährdungsabschätzung entwickelt und im Badan Geologi institutionell verankert. Der Entwurf einer Karte der Rutschungsempfindlichkeit der Insel Lombok auf der Basis einer bivariaten statistischen Modellierung ist in [Torizin et al. \(2013\)](#) publiziert.

Jenseits der komplexen Ausbildung des Projektpartners stand in den Jahren 2015 bis 2017 die fachliche Beratung der Fortbildungsakademie des indonesischen Ministeriums für Energie zur Erstellung eines Ausbildungscurriculums im Bereich Gefährdungsabschätzung von Massenbewegungen (Training of Trainers) im Mittelpunkt.

Internationale geowissenschaftliche Zusammenarbeit und Forschung

Gemäß ihrem Auftrag als Ressortforschungseinrichtung des [Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) und Geologischer Dienst des Bundes ist die BGR gehalten, die eigene Expertise durch wissenschaftlich-technische Kooperationen und Forschungsprojekte auch im internationalen Rahmen kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Seit dem Jahr 2016 kooperiert die BGR in einem sechsjährigen Projekt mit dem [Chinesischen Geologischen Dienst](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) im Sektor geogene Gefährdung. Im Forschungsprojekt *Landslide Hazard and Risk Assessment Lanzhou, Province Gansu (LHARA)* untersuchen die Partner die zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Rutschungsempfindlichkeit im sich demographisch und ökonomisch-infrastrukturell rasant veränderndem urbanen und periurbanen Gebiet der Stadt Lanzhou.

Lanzhou, Hauptstadt der Provinz Gansu, liegt im zentralen Löss-Plateau Chinas am Gelben Fluss ([Tian et al., 2017](#)). Zur Entwicklung der Infrastruktur wurden seit den 2000er Jahren morphologische Eingriffe in den Löss-Sedimenten (mit Profilmächtigkeiten bis zu 320 m) auf einer Fläche von ca. 35 km² getätigt ([Fuchs et al., 2019](#)).

Der wissenschaftliche Fokus schließt unterschiedliche Maßstabsebenen mit entsprechenden methodischen Untersuchungen ein.

Im regionalen Maßstab (1 : 50 000) wurde die Rutschungsempfindlichkeit unter Berücksichtigung der morphologischen Veränderungen für unterschiedliche Zeitschnitte statistisch modelliert (Jahre 2000, 2012, 2016) ([Torizin et al., 2018](#)).

¹¹ LIDAP: Landslide Inventory Database for Pakistan.

¹² LIDIA: Landslide Inventory Database for Indonesia.

Im lokalen Maßstab (1 : 10 000) liegt der fachliche Akzent auf der physikalisch-basierten Modellierung unter Berücksichtigung von physikalischen Bodenparametern zur Berechnung des Standsicherheitsfaktors. Im ortsspezifischen Maßstab (1 : 2000) wird eine numerische Modellierung einzelner Rutschungsereignisse vom Versagensmechanismus bis hin zur Ausbreitung der Ablagerungsmassen (engl.: runout) angestrebt.

Seit dem Jahr 2019 arbeitet die BGR mit dem [Norwegischen Geologischen Dienst](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) im Projekt *Massenbewegungen in Arktischen Regionen (MAR)* auf Spitzbergen zusammen. [Spitzbergen \(oder Svalbard\) ist ein von der globalen Klimaerwärmung besonders stark betroffenes Gebiet](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020). Obwohl menschliche Eingriffe in die Umwelt minimal sind, werden durch die zunehmenden Auftauprozesse im Permafrost vermehrt Massenbewegungen beobachtet. Somit ist die Region ein ideales Labor, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaftsentwicklung im Allgemeinen und die Auslösung von Massenbewegungen im Speziellen in den Polarregionen zu untersuchen.

Neben ingenieurgeologischen Felduntersuchungen, Bathymetrie- und DGPS-Messungen sowie Altersdatierungen ist eine photogrammetrische Vermessung exponierter Teilbereiche der Landoberfläche unter Nutzung einer Drohne ein Kernelement dieses Projekts.

Eine Drohne wurde erstmals im August 2019 eingesetzt. Das auf dem 78. Breitengrad gelegene Untersuchungsgebiet wurde bei Voruntersuchungen im Jahr 2017 als prähistorisches Felssturzgebiet identifiziert ([Kuhn et al., 2019](#); [Kuhn et al., 2020](#)). Aufgrund zunehmender Rutschungsaktivität und denkbarer Risikoszenarien für den Schiffsverkehr und die naheliegende Hauptstadt Longyearbyen ist dieses Gebiet im Fokus von Untersuchungen. Vor allem die Reaktivierung alter Gleitflächen in Kombination mit dem schnellen Sturz großer Felsmassen in den Fjord könnte sogenannte Verdrängungswellen erzeugen, die eine latente Bedrohung für die umliegenden Küstenbereiche darstellen. Dementsprechend werden derzeit detaillierte Kartierungen des Gebiets durchgeführt, um die Gefährdungspotenziale besser beurteilen zu können.

Nationale geowissenschaftliche Zusammenarbeit

Im Zeitraum 2006 bis 2008 hat das [Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie \(LUNG\) Mecklenburg-Vorpommern](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) in Kooperation mit der BGR ein Projekt im Steilküstenbereich des Nationalparks Jasmund auf der Insel Rügen verfolgt (Abschnitt A: Lohme bis Fahrnitzer Ufer; Abschnitt B: Sassnitz bis Fahrnitzer Ufer). Ziel des Projekts waren grundlegende Untersuchungen zur Rutschungsempfindlichkeit in den pleistozänen Sedimenten bzw. zur Abbruchsneigung in den kreidezeitlichen Sedimenten ([Günther & Thiel, 2009](#)). Im Ergebnis der Projektaktivitäten wurde vom LUNG [die Gefahrenhinweiskarte von Mecklenburg-Vorpommern: Massenbewegungen auf Jasmund/Rügen im Maßstab 1 : 10 000](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) publiziert ([LUNG, 2011: 1. Auflage; 2013: 2. Auflage](#)).

Darüber hinaus wurde im Steilküstenbereich des [Nationalparks Jasmund](#) (Tag des Zugriffs: 16.09.2020) auf der Insel Rügen, Höhe Wissower Klinken, über einen Zeitraum von fünf Jahren ein Monitoring zur Dokumentation und Analyse von Hanginstabilitäten mittels eines Terrestrischen Laserscanners durchgeführt. Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen eines BGR-internen Projekts in Abstimmung mit dem LUNG bzw. dem Nationalpark Jasmund.

1 Einleitung

Durch multitemporale Messungen (zwei Messungen pro Jahr, jeweils im Frühjahr und Herbst) wurden Aussagen über die Erosionsanfälligkeit und Versagensmechanismen der Kreide- sowie der eingeschuppten Pleistozän-Sedimente getroffen und Volumenbilanzierungen durchgeführt. Durch die Quantifizierung der Massenverlagerungen und Küstenabbrüche wurden Prognosen für die zukünftige landwärtige Küstenverlagerung durch natürliche Prozesse abgeleitet ([Kuhn & Prüfer, 2014](#)).

1.3.5 Universitäre und außeruniversitäre Forschungsansätze in Deutschland

Außerhalb der staatlich mandatierten Aufgaben der SGD der Länder im Rahmen der geowissenschaftlichen Landesaufnahme sowie der Aktivitäten der BGR mit dem Schwerpunkt in Partnerländern der deutschen Entwicklungszusammenarbeit wird das Thema *Massenbewegungen* in Deutschland auf verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichen fachlichen Zielstellungen verfolgt.

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Forschungsaktivitäten zu Massenbewegungen in Deutschland im Bereich der Universitäten und Hochschulen sind sowohl in geologisch-ingenieurgeologischen Fachbereichen (z. B. Technische Universität Berlin, Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Universität Mainz, Technische Universität München) als auch in Bereichen der physischen Geographie mit Schwerpunkt in Geomorphologie und Landschaftsdynamik (z. B. Universitäten Bonn, Eichstätt, Heidelberg, Leipzig, Tübingen, Vechta, Würzburg) angesiedelt.

Projekte sind häufig über externe Mittel der Deutschen Forschungsgemeinschaft oder der Europäischen Union finanziert bzw. kofinanziert. Die Ergebnisse resultieren nicht selten aus der Anfertigung von Graduiertenarbeiten.

Die Forschungsarbeiten fokussieren auf unterschiedliche Teilaspekte, die beispielhaft an lokale Rutschungsereignisse oder kleinräumige Potenzialanalysen in rutschungsempfindlichen Regionen (deutsche Mittelgebirge, Alpenvorland, Alpen) gekoppelt sind. Mit der umfassenden Verfügbarkeit Geographischer Informationssysteme (GIS) ist seit den späten neunziger Jahren des 20. Jahrhunderts ein deutlicher Anstieg von Forschungsaktivitäten zu konstatieren.

Thematisch wurden und werden Modellierungen der regionalen Rutschungsempfindlichkeit (z. B. [Dikau & Schmidt, 2001](#); [Damm et al., 2009](#); [Klose et al., 2014](#); [Jäger, 2016](#)), Triggermechanismen (z. B. [Meyenfeld, 2009](#)), Rutschungsdatenbanken (z. B. [Damm & Klose, 2015](#)), Mitigationsmaßnahmen an Rutschungen (z. B. [Wohlers et al., 2017](#)) bis hin zum Monitoring und zur Frühwarnung (z. B. [Bell et al., 2010](#)) erforscht.

Für die SGD in Deutschland liefern die Forschungsergebnisse wertvolle Informationen, die für die Erweiterung bestehender SGD-Inventare, für ingenieurgeologische Untersuchungen einzelner Lokationen oder im Hinblick auf die ingenieurgeologische Landesaufnahme im lokalen und regionalen Maßstab hilfreich sein können.

Etwas differenzierter müssen solche Ergebnisse oder Produkte beurteilt werden, die einen überregionalen, hier bundesland- oder gar deutschlandweiten, Anspruch erheben, der jedoch nicht durch einen staatlichen Auftrag wie bei Fachbehörden begründet ist.

Als Beispiel sei hier die *Rutschungsdatenbank für die Bundesrepublik Deutschland* und die auf dieser Grundlage sowie weiterer Faktoren abgeleitete Karte der Rutschungsempfindlichkeit für das Land Niedersachsen aufgeführt ([Damm & Klose, 2015](#)). Die genannte Rutschungsdatenbank umfasst acht Teilgebiete, deren Inventare aus unterschiedlichen Quellen stammen (z. B. Publikationen, Felddaten, Behördenarchiven). Die Inventare der SGD sind nicht Teil dieser Datensammlung.

Ein Ansatz der Verknüpfung von interdisziplinärer Forschung und praxisnaher Anwendung wird im Bundesland Rheinland-Pfalz verfolgt. Als An-Institut ist die [Forschungsstelle Rutschung \(FSR\) e.V.](#) (Tag des Zugriffs: 30.04.2020) an die Johannes-Gutenberg-Universität Mainz angebunden.

Hervorzuheben ist die Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz, die in Kooperation mit dem [Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz \(LGB\)](#) (Tag des Zugriffs: 30.04.2020) entwickelt wurde und fortlaufend aktualisiert wird. Dabei handelt es sich um ein Inventar der in diesem Bundesland beobachteten Rutschungen, Felsstürze, Steinschläge, Erdfälle und Tagesbrüche, die überwiegend auf der Erfassung im Gelände beruhen. Laut [LGB-Internetauftritt](#) (Tag des Zugriffs: 30.04.2020) sind mit Stand vom 01.06.2012 insgesamt 2291 Ereignisse der genannten Typen erfasst worden.

Als aktuelles Forschungsprojekt der FSR sei das Massenbewegungs-Informationssystem Rheinland-Pfalz (MABEIS) erwähnt. Das MABEIS wird als Gemeinschaftsprojekt mit dem Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz im Auftrag des Landesbetriebes Mobilität Rheinland-Pfalz und dem LGB im Zeitraum 2018 bis 2020 entwickelt.

Auf der Bundesebene sind die Aktivitäten der im [Expertennetzwerk des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur \(BMVI\)](#) (Tag des Zugriffs: 04.05.2020) involvierten sieben Ressortforschungseinrichtungen und Fachbehörden zu nennen¹³. Dieses Netzwerk bündelt fachübergreifend Akteure und Ressourcen, um ([Zitat](#): Tag des Zugriffs: 04.05.2020) „...die Kompetenzen auf eine breitere gemeinsame Basis zu stellen, intensiver miteinander zu vernetzen und so Wissens- und Technologietransfer zu fördern. Das Netzwerk intensiviert den Dialog zwischen Experten aus Wissenschaft und Forschung, der Industrie und Wirtschaft sowie der Politik und Verwaltung.“

Aus Sicht des MBiD-Projekts ist von den aktuell sechs fachlichen Forschungsthemen das Themenfeld 1: *Klimawandelfolgen und Anpassung* von Interesse, da hier im Hinblick auf die Exposition von verschiedenen Verkehrsträgern u. a. [Gefährdungsanalysen zu Hangrutschungen im Bereich des Bundesstraßen- und Schienennetzes](#) (Tag des Zugriffs: 04.05.2020) durchgeführt wurden bzw. werden ([Lohregel et al., 2020](#)).

Im Ergebnis von öffentlichen Auftragsvergaben resultieren Abschlussberichte verschiedener Forschungsprojekte im Auftrag der BAST (z. B. [Krauter et al., 2012](#); [BEAK, 2019a und 2019b](#)) sowie im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes ([BEAK, 2018](#)).

Deutschland gehört zu den Erstunterzeichnern (07.11.1991) des [Übereinkommens zum Schutz der Alpen \(Alpenkonvention\)](#) (Tag des Zugriffs: 18.08.2020), welches im Jahr 1995 in Kraft getreten ist. Deutschland hat einen Anteil von 5,84 % des Alpenraums mit insgesamt 284 Gemeinden im Bundesland Bayern.

In der Alpenkonvention verfolgen die acht Länder des Alpenraums sowie die EU das Ziel einer ([Zitat](#): Tag des Zugriffs: 04.05.2020) „...grenzüberschreitenden Zusammenarbeit, um die bedeutendste Bergregion Europas zu schützen und nachhaltig zu entwickeln.“

Das Thema Naturgefahren wird von der Arbeitsgruppe Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP) vertreten, um ([Zitat](#): Tag des Zugriffs: 04.05.2020) „...gemeinsame Strategien zur Vorbeugung gegen Naturgefahren in den Alpen zu entwickeln und entsprechende Anpassungsstrategien auszutauschen.“

¹³ Bundesamt für Güterverkehr (BAG), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Deutscher Wetterdienst (DWD), Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF beim EBA).

1 Einleitung

In Bayern koordiniert das [Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz](#) (Tag des Zugriffs: 04.05.2020) die Angelegenheiten der Alpenkonvention.

Im Rahmen des transnationalen Kooperationsprogramms [Interreg Alpine Space](#) wurde im Zeitraum November 2016 bis Dezember 2019 unter Beteiligung von sechs Ländern bzw. 15 Institutionen das [EU-Projekt RocktheAlps](#) (Tag des Zugriffs: 19.08.2020) unter Federführung des National Research Institutes of Science and Technology for Environment and Agriculture (IRSTEA) (Sitz: Grenoble) implementiert.

Aus Deutschland war die [Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft \(LWF\)](#) (Tag des Zugriffs: 19.08.2020) involviert.

Ziel des Projekts war eine erste vereinheitlichte Steinschlag-Modellierung des gesamten Alpenraums unter Berücksichtigung von Anbruch- und Prozessräumen in Kombination mit der Kartierung des Waldes im Hinblick auf dessen Schutzfunktion. Die [Projektergebnisse](#) (Tag des Zugriffs: 19.08.2020) liefern einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Umsetzung einer Richtlinie zur Steinschlag-Risikoprävention bzw. -Mitigation im Alpenraum.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

2.1 Begriffe, Definitionen und Konventionen

In der internationalen Fachliteratur, wie auch im deutschsprachigen Raum der D-A-CH-Staaten¹⁴, existieren verschiedene Konzepte zur Benennung, Klassifikation und Bearbeitung von gravitativ gesteuerten Massenbewegungen.

So werden Massenbewegungen z. B. nach geomorphologischen Kriterien, nach Art des betroffenen Materials, der Bewegungskinetik oder dem Aktivitätsgrad unterschieden. Dies hat zur Folge, dass sich eine uneinheitliche Terminologie entwickelt hat, die zu Missverständnissen in der nationalen, wie auch in der internationalen Kooperation führen kann. Dementsprechend ist eine eindeutige Definition der genutzten Begriffe erforderlich, die im Folgenden auf die in diesem Bericht genutzten Fachtermini begrenzt wird.

Die aufgeführten Begriffserläuterungen stellen im Wesentlichen sinngemäße deutsche Übersetzungen der allgemein akzeptierten *Landslide Hazard and Risk*-Definitionen dar, die von internationalen Konsortien erarbeitet wurden ([TC32, 2004](#); [Fell et al., 2008](#); [UNISDR, 2009](#); [Corominas, 2010](#); [Corominas et al., 2014](#)). Sie basieren auf der Systematik von [Varnes \(1978\)](#), die durch [Cruden & Varnes \(1996\)](#) erweitert und durch [Hungr et al. \(2013\)](#) präzisiert wurde. Damit werden auch die Empfehlungen der [UNESCO Working Party for Landslide Inventory \(WP/WLI, 1993\)](#) (Tag des Zugriffs: 17.08.2020) unterstützt, die im Zuge der internationalen Harmonisierungsbestrebungen die oben genannte Systematik übernahm.

Für Abweichungen davon werden gesonderte Quellennachweise angegeben. Spezielle methodenbezogene Definitionen sind in den entsprechenden Kapiteln separat erläutert. Für weitergehende Begrifflichkeiten, die in diesem Bericht nicht explizit erwähnt werden, wird auf existierende Glossare verwiesen, wie den webgestützten [Multilingual Glossary des LfU Bayern](#) (Tag des Zugriffs: 17.08.2020) oder dem Glossar des europäischen [SafeLand-Projekts](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) ([Corominas & Mavrouli, 2011](#)).

Gravitative Massenbewegungen (engl.: mass movements, landslides)

Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man hangabwärts gerichtete, der Schwerkraft folgende Bewegungen von Fels- und/oder Lockergesteinen ([Varnes, 1978](#); [Cruden & Varnes, 1996](#); [Dikau et al., 1996](#); [Arbeitskreis 4.2 Böschungen, 1997](#)). Ohne Bezug auf den Bewegungsmechanismus werden sie im deutschsprachigen Raum häufig generalisierend auch als *Hangrutschungen* bezeichnet. In vergleichbarer Weise wird in der englischsprachigen Nomenklatur der Begriff *Landslides* synonym für gravitative Massenbewegungen verwendet.

In diesem Bericht werden somit oberflächennahe Subsidenzerscheinungen und Kollapsstrukturen, wie Setzungen und Erdfälle sowie Schneelawinen und Eisfälle, nicht zu den gravitativen Massenbewegungen gezählt.

¹⁴ D-A-CH: Apronyme Bezeichnung für den deutschsprachigen Raum, bestehend aus Deutschland, Österreich und Schweiz.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Der Klassifikation von [Varnes \(1978\)](#) und des PK Geogefahren ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie, 2016](#)) (s. [Kapitel 1.1](#)) folgend, werden in diesem Bericht gravitative Massenbewegungen nach der Art der Bewegung differenziert. Folgende zwei kinematischen Grundtypen bzw. Prozesse wurden exemplarisch in den komplexen Fallstudien berücksichtigt (s. [Kapitel 2.6](#)):

- **Fallen/Stürzen;**
- **Gleiten/Rutschen (rotationsförmig/translationsförmig).**

Die Prozesstypen *Fließen*, *Kippen*, *Driften* und *Komplex* wurden nicht betrachtet.

Gleit-Rutschprozesse

Rutschungen sind hangabwärts gerichtete gleitende Bewegungen von Fest- und/oder Lockergesteinen. Sie entstehen an definierten Gleitflächen oder dünnen Scherzonen, die meist an Heterogenitäten oder Schwächezonen im Untergrund gebunden sind. Je nach Form der Gleitflächen wird zwischen Rotations- und Translationsrutschung unterschieden.

Rotationsrutschung

Rotationsrutschungen weisen eine oft zylindrische, konkav nach oben gekrümmte Bruchfläche (schaufelförmig) auf, an der die Bewegung des Gleitkörpers rotational um eine hangparallele Achse aus dem Hang heraus erfolgt. Rotationsrutschungen sind typisch für homogene Materialien wie Schüttungen und Auffüllungen. In natürlichen Fest- und Lockergesteinen folgen die Gleitflächen meist Inhomogenitäten und Diskontinuitäten (Abb. 2-1, Abb. 2-15 und Abb. 2-34).

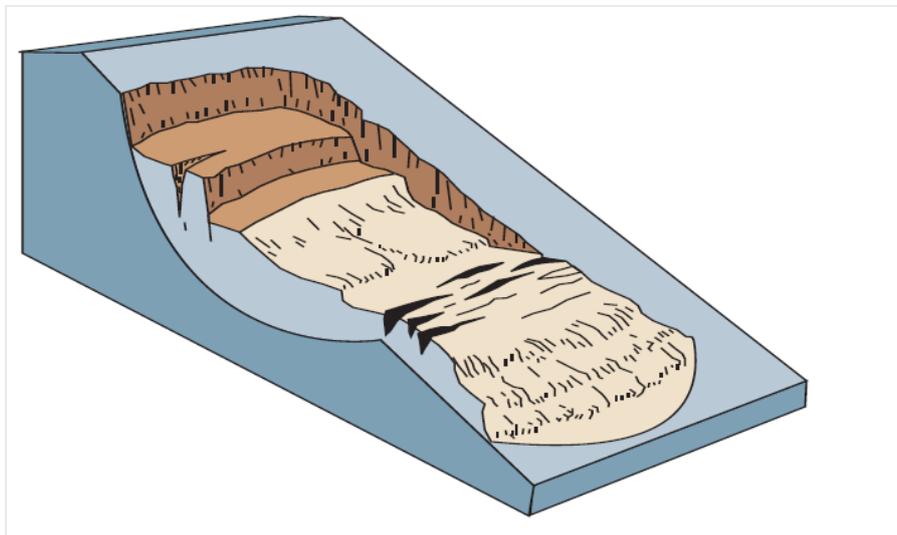


Abb. 2-1: Prinzipskizze einer Rotationsrutschung (Quelle: [Highland & Bobrowsky, 2008](#)), (s. [Abb. 2-15](#) und [Abb. 2-34](#)).

Translationsrutschung

Bei Translationsrutschungen gleitet die Rutschmasse entlang einer relativ ebenen, meist oberflächenparallelen Bruchfläche mit geringer Rotationsbewegung nach unten. Translationsrutschungen sind meist flacher als Rotationsrutschungen, können aber über beträchtliche Distanzen fortschreiten, wenn die Bruchfläche ausreichend geneigt ist. Diese Art von Rutschung erfasst sowohl unverfestigte Lockergesteine als auch ausgedehnte Felsplatten, die am Übergang zwischen Locker- und Festgestein oder

entlang geologischer Diskontinuitäten wie Verwerfungen oder Bankungsfugen abgleiten (Abb. 2-2, Abb. 2-13 und Abb. 2-33).

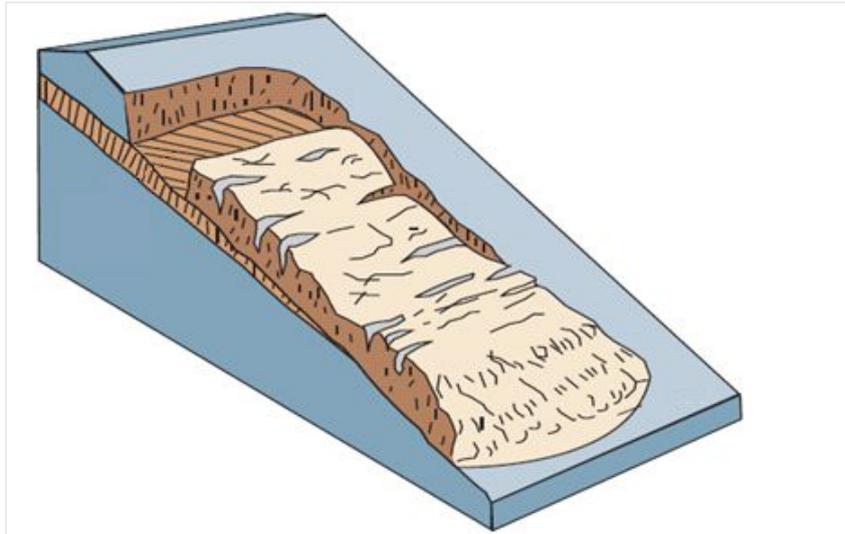


Abb. 2-2: Prinzipskizze einer Translationsrutschung (Quelle: [Highland & Bobrowsky, 2008](#)), (s. Abb. 2-13 und Abb. 2-33).

Im Alpenraum werden flachgründige Translationsrutschungen (Tiefe: ≤ 2 m), welche meist ein Volumen von mehreren 10er bis zu einigen 100er m^3 aufweisen und die Lockergesteins- oder Verwitterungsdecke erfassen, auch als Hanganbrüche bezeichnet. Wichtige Parameter für ihr Auftreten sind Hangneigung, die Rutschungsanfälligkeit der Deckschichten, die Möglichkeit des Zutritts von Oberflächen- oder Hangwasser und die Vegetation ([LfU Bayern, 2020](#)) (Tag des Zugriffs: 17.08.2020).

Felssturz

Stürze sind abrupte, abwärts gerichtete Bewegungen von Fels oder Lockermaterial oder beidem, die sich von steilen Hängen oder Klippen an Diskontinuitäten lösen. Das Material fällt anschließend hauptsächlich durch Fallen, Springen oder Rollen nach unten. Der Aufprall verursacht oft ein Abprallen und Zerschneiden des herabfallenden Materials, welches seine Bewegung springend, rollend oder rutschend fortsetzt, bis das Gelände flacher wird (Abb. 2-3, Abb. 2-14 und Abb. 2-16).

Je nach Volumen (V) der Sturzmasse unterscheidet man ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie, 2016](#)):

- Stein-/Blockschlag mit $V < 10 \text{ m}^3$;
- Felssturz mit $10 \text{ m}^3 < V < 1 \text{ Mio. m}^3$;
- Bergsturz mit $V > 1 \text{ Mio. m}^3$.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

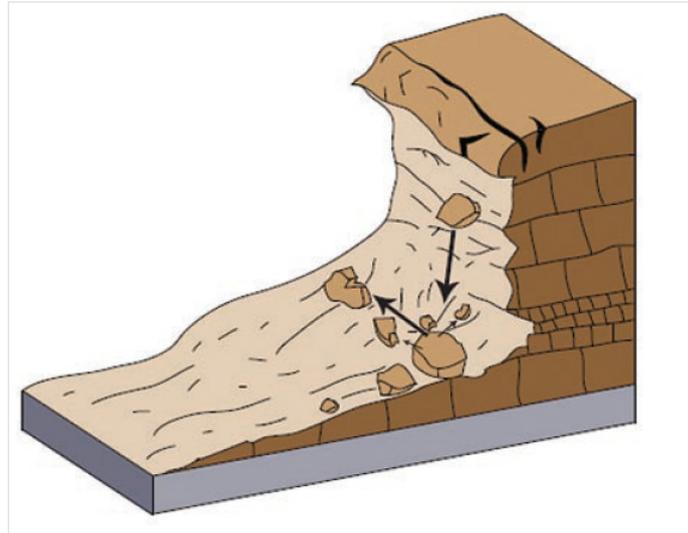


Abb. 2-3: Prinzipskizze eines Felssturzes (Quelle: [Highland & Bobrowsky, 2008](#)), (s. Abb. 2-14 und Abb. 2-16 sowie [Deckblatt, rechtes Foto](#)).

Naturgefahr (engl.: natural hazard)

Natürliche Prozesse oder Phänomene, einschließlich geologischer Vorgänge, die zum Tod, zu Verletzungen oder anderen gesundheitlichen Auswirkungen, zu Sachschäden, zum Verlust von Lebensgrundlagen und Dienstleistungen, zu sozialen und wirtschaftlichen Störungen oder zu Umweltschäden führen können ([UNISDR, 2009](#)).

Gefährdung bzw. Gefahr (engl.: hazard)

Ein Zustand oder Ereignis mit dem Potenzial, unerwünschte Konsequenzen/Folgen hervorzurufen. Die Beschreibung der Hangrutschungsgefährdung sollte den Ort, das Volumen (oder die Fläche), die Klassifizierung und Geschwindigkeit der potenziellen Massenbewegungen und des daraus resultierenden transportierten Materials sowie die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens innerhalb eines bestimmten Zeitraums umfassen ([Corominas et al., 2014](#)).

Gefahrenhinweiskarten, allgemein (engl.: susceptibility map oder hazard index map)

Gefahrenhinweiskarten sind nach objektiven wissenschaftlichen Kriterien erstellte Übersichtskarten mit Hinweisen auf Naturgefahren (auch geogener Art), die erkannt und lokalisiert, jedoch nicht im Detail analysiert und bewertet sind. Gefahrenhinweiskarten enthalten im Gegensatz zu Gefahrenkarten noch keine Angaben zu Eintrittswahrscheinlichkeit, Häufigkeit und möglicher Intensität einer Naturgefahr ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie, 2016](#)).

Hangrutschungsempfindlichkeit (engl.: landslide susceptibility)

Die Hangrutschungsempfindlichkeit, auch Rutschungsempfänglichkeit oder Rutschungssuszeptibilität, kennzeichnet die Anfälligkeit einer Fläche/eines Gebiets im Hinblick auf das Auftreten von Rutschungen. Sie ist ein Maß für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Massenbewegungstyps in einem bestimmten Gebiet und kann qualitativ oder quantitativ angegeben werden. Die Suszeptibilität gibt aber keine Aussage über die zeitliche Eintrittswahrscheinlichkeit und die Magnitude oder Intensität eines Ereignisses ([Fell et al., 2008](#)).

Karte der Hangrutschungsempfindlichkeit, auch Gefahrenhinweiskarte für gravitative Massenbewegungen (engl.: landslide susceptibility map)

Eine Karte, in der die räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeiten für bestimmte Massenbewegungstypen dargestellt sind (Darstellungsform: Zonierung). Die Auftretenswahrscheinlichkeit kann entweder qualitativ (z. B. als gering, mittel, hoch) oder quantitativ (z. B. als Dichte in Anzahl Ereignisse pro Quadratkilometer oder betroffene Fläche pro Quadratkilometer) angegeben werden. Die Karte zeigt, wo welche gravitativen Massenbewegungen auftreten können. Sie gibt keine Information darüber, mit welcher zeitlichen Wahrscheinlichkeit, in welcher Frequenz und mit welcher Magnitude Einzelereignisse eintreten können ([Fell et al., 2008](#)).

Hangrutschungsgefährdungskarte oder Gefahrenkarte für gravitative Massenbewegungen (engl.: landslide hazard map)

Eine Karte, in der die unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Massenbewegungen bestimmter Magnitude/Intensität in einem bestimmten Zeitraum ausgehalten sind (Darstellungsform: Zonierung). Die Karten sollten den gesamten Prozessraum vom Ursprung der Massenbewegung bis zum Endpunkt der resultierenden Massenablagerungen (Auslaufzonen, engl.: runout) ausweisen ([Corominas et al., 2014](#)).

Hangrutschungswahrscheinlichkeit (engl.: landslide probability)

Im Rahmen der Analyse der Hangrutschungsgefährdung werden folgende Wahrscheinlichkeiten unterschieden:

- **Räumliche Wahrscheinlichkeit** (engl.: spatial probability): Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Gebiet durch Massenbewegungen betroffen sein kann;
- **Zeitliche Wahrscheinlichkeit** (engl.: temporal probability): Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem bestimmten Zeitraum ein auslösendes Ereignis eine Massenbewegung hervorruft;
- **Größe/Volumen-Wahrscheinlichkeit** (engl.: size/volume probability): Die Wahrscheinlichkeit, dass ein eingetretenes Massenbewegungsereignis eine bestimmte Größe/Volumen aufweist;
- **Reichweiten-Wahrscheinlichkeit** (engl.: reach probability): Die Wahrscheinlichkeit, dass ein eingetretenes Massenbewegungsereignis eine bestimmte hangabwärts gerichtete Reichweite aufweist ([Corominas et al., 2014](#)).

In [Kapitel 1.2](#) wurde darauf verwiesen, dass eine Betrachtung der Risikopotenziale durch Massenbewegungen in Deutschland (Schäden, ökonomische Verluste) nicht Gegenstand des MBiD-Projekts war. Um jedoch die inhaltlichen Unterschiede zwischen *Gefahr/Gefährdung* und *Risiko* aufzuzeigen, sind nachfolgend wichtige Definitionen im Kontext *Risiko* aufgeführt.

Risiko (engl.: risk)

Das Risiko ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit und die Schwere einer schädlichen (Ein-) Wirkung auf die sogenannten [Risikoelemente](#).

Das Risiko ist eine Funktion der Verletzlichkeit (Vulnerabilität) der Risikoelemente in einem spezifischen Raum und der Gefährdung durch eine Gefahrenquelle mit bestimmter Auftretenswahrscheinlichkeit und Magnitude/Intensität (Risiko = Gefährdung x Exposition x Vulnerabilität).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Es wird ausgedrückt als der erwartete Schaden oder Verlust (z. B. von Menschenleben, Sachschäden oder Störungen der Wirtschaftstätigkeit), der durch den Eintritt eines bestimmten Schadensereignisses für ein bestimmtes Gebiet und einen bestimmten Bezugszeitraum auftritt ([Crozier & Glade, 2005](#); [Fell et al., 2008](#)).

Exposition (engl.: exposure)

Alle bedrohten (vulnerablen) Elemente, die in einer gefährdeten Zone präsent sind und dadurch potenziellen Schäden und Verlusten ausgesetzt sein können ([UNISDR, 2009](#)).

Vulnerabilität (engl.: vulnerability)

Bedingungen, bestimmt durch physische, soziale, ökonomische oder ökologische Faktoren oder Prozesse, die eine Gemeinschaft, ein System oder Vermögenswerte in Bezug auf die Auswirkungen (Schaden) eines Gefahren-Ereignisses empfänglich machen. Es kann in physische, soziale, ökonomische und ökologische Vulnerabilität unterschieden werden ([UNISDR, 2009](#)).

Risikoelemente (engl.: elements at risk)

Alle bedrohten (vulnerablen) Elemente eines bestimmten Gebiets, die von einem Gefahrenereignis betroffen werden können, wie z. B. die Bevölkerung, Gebäude und Infrastruktureinrichtungen, wirtschaftliche Aktivitäten oder die belebte Umwelt ([Fell et al., 2008](#)).

Konsequenzen (engl.: consequences)

Die Folgen oder potenziellen Folgen, die sich aus dem Auftreten einer Massenbewegung ergeben. Sie können qualitativ oder quantitativ im Hinblick auf Verlust, Beschädigung, Verletzung oder Verlust von Leben ausgedrückt werden ([Fell et al., 2008](#)).

Die Konsequenzen ergeben sich aus dem Schadenspotenzial der exponierten Risikoelemente (z. B. Gebäudewert, Anzahl betroffener Personen) sowie deren Vulnerabilität, ausgedrückt auf einer Skala von 0 (kein Schaden oder Verlust) bis 1 (Totalverlust).

Hangrutschungs-Risikokarte oder Risikokarte für gravitative Massenbewegungen (engl.: landslide risk map):

Eine Karte, in der die Wahrscheinlichkeiten von Schäden/Verlusten dargestellt sind (Darstellungsform: Zonierung), die durch bestimmte Massenbewegungstypen in einem bestimmten Zeitraum auftreten können.

Bodenkundliche Begriffe

Im Kontext der nachfolgenden Kapitel dieses Berichts wird wiederholt auf bodenkundliche Begriffe verwiesen, die nachfolgend kurz erläutert werden.

- **Bodenform:** Beinhaltet einheitliche Bodenbildungsbedingungen – geringste Variabilität im Substrat, in der Schichtmächtigkeit, dem Grundwasserstand und dem Relief, Beschreibung der Bodentypen auf Varietäten-Niveau;
- **Bodenformengesellschaft:** Besitzt gleiche bodenbestimmende Faktoren, andere Faktoren mit geringer Variation (Subtypen-Niveau);
- **Feldkapazität:** Wassermenge, die ein zunächst wassergesättigter Boden gegen die Schwerkraft nach zwei bis drei Tagen noch halten kann;

- **Gefügeform:** Beschreibt die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile des Bodengefüges. Das Bodengefüge beeinflusst maßgeblich den Wasser- und Lufthaushalt, die Durchwurzelbarkeit, die Verfügbarkeit der Nährstoffe und ähnliche bodenkundliche und pflanzenphysiologisch wichtige Eigenschaften;
- **Leitbodenassoziation:** Vereinigung von Leitbodengesellschaften im Verbreitungsgebiet, das durch dominante bodenbildende Faktoren gekennzeichnet ist (Klassen- und Typen-Niveau);
- **Leitbodengesellschaft:** Hervorhebung flächendominanter Bodenformen, die regelhaft mit Begleitbodenformen vergesellschaftet sind (Typen-Niveau);
- **Pedotransferfunktion:** Erlaubt die Ableitung von aufwändig messbaren Bodenparametern aus einfachen messbaren Bodenparametern, wie z. B. die tabellarische Ableitung der Kohäsion oder des Winkels der inneren Reibung als Funktion von Bodenart und Gefügeform;
- **Substrat:** Das Substrat ist das Material, aus dem die Festsubstanz des Bodens besteht; Substrate charakterisieren somit die bodenbildenden Ausgangsgesteine sowie deren Verwitterungs-, Umlagerungs- und Verlagerungszustand;
- **Unterboden:** Unterer, meist humusärmerer Teil des Solums¹⁵ zwischen Oberboden und Untergrund, der im Allgemeinen die B- und feinerdereichen C-Horizonte umfasst;
- **Untergrund:** Bereich unterhalb des Unterbodens, der nicht durch Verwitterung und Bodenbildung beeinflusst ist (einschließlich Lockersedimente).

2.2 Auslöse-Mechanismen unter Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels

Grundsätzlich beruhen gravitative Massenbewegungen immer auf Veränderungen des Hanggleichgewichts, die durch ein Ungleichgewicht zwischen haltenden und antreibenden Kräften ausgelöst werden. Sie sind auf geologische, morphologische, physikalische oder menschliche Ursachen zurückzuführen, die oft in Kombination auftreten und bei ungünstigem Zusammentreffen zu einer Massenbewegung führen können ([Cruden & Varnes, 1996](#); [Crozier & Glade, 2005](#); [Genske, 2008](#)).

Das Auftreten einer Hanginstabilität wird dabei von einer Vielzahl langfristig wirkender vorbereitender Faktoren, wie der Verwitterung oder Veränderung der Hanggeometrie, beeinflusst. Darüber hinaus steuern die Art und Orientierung des Trennflächengefüges maßgeblich die Disposition eines Hanges zur Instabilität. Der Bewegungsprozess selbst wird aber durch einen meist kurzzeitig auftretenden Auslöser (engl.: trigger) bewirkt, der einen im Grenzgleichgewicht befindlichen Hang destabilisiert und die Bewegung auslöst ([Glade et al., 2005](#)).

Der Auslöser bzw. der Trigger ist per Definition ein externer Stimulus, der durch eine plötzliche Erhöhung der Scherspannungen oder Reduktion der haltenden Kräfte im betroffenen Hang eine nahezu sofortige Reaktion in Form einer Massenbewegung auslöst (z. B. [Wieczorek, 1996](#); [Highland & Bobrowsky, 2008](#)). Beispiele von ursächlichen Prozessen, die eine Massenbewegung auslösen können, sind in Tab. 2-1 gelistet.

¹⁵ Das Solum (lat. Boden) ist ein Begriff aus der Bodenkunde und bezeichnet einen Bodenkörper, ohne die Streuschicht (L) und das Ausgangsgestein (C) mit einzubeziehen. Werden diese mit einbezogen, spricht man vom Pedon (Quelle: [Wikipedia](#) – Tag des Zugriffs: 17.08.2020).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-1: Faktoren (Trigger) und ursächliche Prozesse, die eine Massenbewegung auslösen können (verändert nach [Cruden & Varnes, 1996](#); [Genske, 2008](#)).

Auslösender Faktor (Trigger)	Ursächliche Prozesse
Zunahme der antreibenden Scherspannungen	<ul style="list-style-type: none">• Veränderung der Hanggeometrie durch erosive Hangunterschneidung oder konstruktive Eingriffe;• Zusätzliche äußere Belastung eines Hanges, z. B. Gebäude oder Verkehrsanlagen;• Schneller Aufstau oder Absenkung des Stauwasserspiegels von Wasserreservoirien (Dämme);• Dynamische Beanspruchungen, z. B. durch Erdbeben, Sprengungen oder Bautätigkeiten.
Abnahme der Scherfestigkeit	<ul style="list-style-type: none">• Veränderung der Bergwasserhältnisse, z. B. durch Infiltration von Regenwasser, Schneeschmelze, Bewässerung, Leckagen an Versorgungsleitungen;• Porenwasserüberdruck durch zyklische Belastung, z. B. Bodenverflüssigung.

In Deutschland werden Massenbewegungen vorwiegend durch Niederschlagsereignisse, Stürme oder abrupte Temperaturwechsel in Kombination mit rascher Schneeschmelze ausgelöst. Diese natürlichen Vorgänge werden oft zusätzlich durch menschlichen Einfluss überlagert (z. B. [Damm & Klose, 2015](#); [Klose et al., 2015](#); [Glade et al., 2017](#)). Die Massenbewegungen treten insbesondere auf:

- in den perialpinen und alpinen Gebirgsregionen, wo auch der abnehmende Permafrost als kontrollierender Faktor zunehmend Bedeutung erlangt (z. B. [Krautblatter et al., 2010](#); [Huggel et al., 2012a](#); [Glade et al., 2017](#));
- in den Mittelgebirgen (z. B. [Dikau & Schmidt, 2001](#); [Bock et al., 2013](#));
- an den norddeutschen Steilküsten (z. B. [Günther & Thiel, 2009](#); [Kuhn & Prüfer, 2014](#); [Damm & Klose, 2015](#));
- entlang junger Flusstäler (z. B. [Fissele & Kobler, 1973](#); [Blume & Remmele, 1989](#)).

Untergeordnet müssen auch seismische Erschütterungen als Auslöser von Massenbewegungen in Betracht gezogen werden. Diese konzentrieren sich auf den Oberrheingraben, die Niederrheinische Bucht, die Schwäbische Alb, das Vogtland und die Alpenregion (z. B. [Tyagunov et al., 2006](#); [Meyenfeld, 2009](#)).

Durch seismische Ereignisse wie auch durch menschlichen Einfluss ausgelöste Massenbewegungen an künstlichen Böschungen oder im Bergbau und Altbergbaubereich (z. B. Böschungsversagen im rekultivierten Braunkohlen-Tagebau in Nachterstedt/Sachsen-Anhalt im Jahr 2009) werden im Bericht nicht weiter diskutiert.

Aufgrund des Klimawandels müssen die für Deutschland relevanten wetter- bzw. klimabedingten Einflussfaktoren für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen zunehmend beachtet werden (z. B. [Glade, 2017](#)).

Auf der Grundlage der derzeitigen [Klimamodelle und Klimaprojektionen](#) (Tag des Zugriffs: 21.09.2020) geht man davon aus, dass für alle repräsentativen Szenarien (repräsentative Konzentrationspfade – engl.: representative concentration pathways) mit einer globalen Temperaturerhöhung zu rechnen ist (z. B. [IPCC, 2012](#)). Dies führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Veränderungen in der Häufigkeit, der

Intensität, der räumlichen Ausdehnung, der Dauer und des Zeitpunktes von Wetterextremen wie Starkniederschlägen, Stürmen, Hochwasser oder Dürren, aber auch zu einem generellen Anstieg des Meeresspiegels (z. B. [Seneviratne et al., 2012](#); [IPCC, 2014](#); [Lehmann et al., 2015](#); [Munich Re, 2017](#)).

Nach den Ergebnissen der Klimamodellrechnungen des [DWD](#) (Tag des Zugriffs: 21.09.2020) muss in Deutschland bis zum Jahr 2050 mit folgenden Änderungen gerechnet werden:

-
- Zunahme der Sommertemperaturen um 1,5 °C bis 2,5 °C;
 - Erhöhung der Wintertemperaturen um 1,5 °C bis 3 °C (dadurch weniger Frosttage);
 - Verringerung der Sommer-Niederschläge um bis zu 40 % (Zunahme von Hitzewellen);
 - Erhöhung der Winter-Niederschläge um bis zu 30 %.
-

Während die globale Erwärmung messbar belegt ist, lassen sich die Auswirkungen der damit verbundenen langfristigen Klimaveränderungen und der kurzfristigen regionalen Klimavariationen auf geologische und hydrologische Gefahren, wie z. B. Massenbewegungen und Überschwemmungen, derzeit noch nicht eindeutig bestimmen oder vorhersagen (z. B. [Crozier, 2010](#); [Glade et al., 2017](#)). Dies liegt u. a. an den Unsicherheiten der szenario-gesteuerten globalen Klimaprognosen und dem Fehlen von hochaufgelösten, regionalen Klimaprojektionen (engl.: downscaled projections).

Die Bewertung der Klimaauswirkungen auf zukünftige Massenbewegungen wird dadurch erschwert, dass sich klimatische Veränderungen und das Auftreten von Massenbewegungen in unterschiedlichen geographischen und zeitlichen Dimensionen auswirken (z. B. [Huggel et al., 2012b](#); [Gariano & Guzzetti, 2016](#)). Auch ist es aufgrund der Datenlage schwierig, massenbewegungsrelevante Faktoren natürlicher, klimatisch bedingter und anthropogen gesteuerter Art eindeutig zu differenzieren (z. B. [Crozier, 2010](#)).

Aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen ist somit ein eindeutiger Trend bezüglich der Frequenz von Massenbewegungen, also der Anzahl von Ereignissen pro Jahr, sowie die ursächliche Zuordnung (Attribution) einzelner Ereignisse zum Klimawandel derzeit noch nicht möglich (z. B. [Bock et al., 2013](#); [Glade, 2017](#)). Es wird jedoch erwartet, dass die mit dem Klimawandel verbundene zunehmende Erwärmung und die veränderten regionalen Niederschlagsmuster das Auftreten von Massenbewegungen in Deutschland beeinflussen (z. B. [Munich Re, 2017](#); [UBA, 2019](#)). Da der Permafrost in den Hochgebirgsregionen als stabilisierender Faktor an Bedeutung verliert, werden zunehmend Hanginstabilitäten (Steinschlag, Felsrutschungen) und hangabwärts gerichteter Massentransport, z. B. durch Muren, erwartet (z. B. [LfU, 2008](#); [Krautblatter et al., 2010](#); [Huggel et al., 2012b](#); [Damm & Felderer, 2013](#); [Krautblatter et al., 2013](#)).

Durch den Temperaturanstieg wird auch eine Erhöhung der Frequenz und Intensität von Extremwetterereignissen wie Stürme und Starkregenereignisse prognostiziert (z. B. [IPCC, 2014](#)). Ein Extremwetterereignis ist definitionsgemäß ein mit Wetterbedingungen wie Hitze, Sturm oder Starkniederschlag verbundenes Ereignis, das am gegebenen Ort und zur gegebenen Jahreszeit selten ist (z. B. [Birkmann et al., 2011](#); [IPCC, 2012](#)).

In Deutschland treten in diesem Zusammenhang zunehmend Starkregenereignisse in den Vordergrund, da sie schwer vorherzusagen sind und große Schäden hervorrufen können (z. B. [Hübl et al., 2017](#); [KLIWA, 2019](#); [HLNUG, 2020](#)). Als *Starkregen* werden Niederschläge mit ungewöhnlich hoher Intensität bezeichnet, d. h. mit großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Der [Deutsche Wetterdienst \(DWD\)](#) (Tag des Zugriffs: 20.08.2020) hat für Starkregenereignisse Schwellenwerte und Warnstufen festgelegt (Tab. 2-2).

Tab. 2-2: Schwellenwerte und Warnstufen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für Starkregenereignisse.

Warnereignis	Schwellenwert	Warnstufe
Starkregen	15 bis 25 l/m ² in 1 Stunde	2: Amtliche Warnung vor markantem Wetter
	20 bis 35 l/m ² in 6 Stunden	
Heftiger Starkregen	25 bis 40 l/m ² in 1 Stunde	3: Amtliche Unwetterwarnung
	35 bis 60 l/m ² in 6 Stunden	
Extrem heftiger Starkregen	> 40 l/m ² in 1 Stunde	4: Warnung vor extremem Unwetter
	> 60 l/m ² in 6 Stunden	

Starkregen kann zu schnell ansteigenden Wasserständen mit Sturzfluten und Überschwemmungen führen, häufig einhergehend mit Bodenerosion. Auch sind sie ein Hauptauslöser für flache [Hanganbrüche](#) und schnellfließende Massenbewegungen wie Schlammströme und Murgänge (engl.: debris flows) (s. Kapitel 2.6.4). Es kann daher prognostiziert werden, dass im Zuge der Klimaveränderung, insbesondere in den Mittelgebirgen und in den Alpen- und Voralpenregionen, lokale Zunahmen von flachgründigen Massenbewegungen auftreten. Durch die Niederschlagszunahme und die dadurch bedingte erhöhte Wasserinfiltration können ruhende, tiefgründige Rutschungen reaktiviert bzw. bereits aktive Hangbewegungen beschleunigt werden.

An den Küsten wird durch den Meeresspiegelanstieg und/oder häufigere Sturmereignisse eine verstärkte Küstenerosion (Abrasion) prognostiziert, die sich auch in einer Zunahme von rutschungsbedingten Küstenabbrüchen manifestieren könnte ([Günther & Thiel, 2009](#); [IPCC, 2012](#); [Kuhn & Prüfer, 2014](#)).

2.3 Verwendetes Methodenspektrum

Die Methoden zur Abschätzung der regionalen Hangrutschungsempfindlichkeit lassen sich in vier Hauptkategorien einteilen (s. Kapitel 1.3.1):

- Statistische Methoden (s. Kapitel 2.3.1 und 2.3.2);
- Physikalisch-basierte Methoden (s. Kapitel 2.3.3);
- Heuristische Methoden (s. Kapitel 2.3.4);
- Methoden des Maschinellen Lernens (s. Kapitel 2.3.5).

Die Vielfalt der methodischen Ansätze und ihrer Modifikationen erlaubte es im Rahmen des MBiD-Projekts nicht, alle Methoden anzuwenden. Daher wurden für jede Hauptkategorie stellvertretend die Methoden ausgewählt, die in den letzten zwanzig Jahren weltweit besonders häufig zum Einsatz kamen und dadurch eine größere praktische Relevanz erlangt haben. Zusätzlich wurden Methoden involviert, denen aktuell eine besondere Bedeutung zugesprochen wird und die im methodischen Vergleich nicht fehlen sollten (Tab. 2-3).

Tab. 2-3: Übersicht über die im MBiD-Projekt angewandten Methoden zur Abschätzung der Hangrutschungsempfindlichkeit.

Methodische Hauptkategorie	Angewandte Methoden im MBiD-Projekt
Statistische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) (engl.: Weights of Evidence) • Logistische Regression (LR) (engl.: Logistic Regression)
Physikalisch-basierte Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Infinites Hangmodell (IHM) (engl.: Infinite Slope Model)
Heuristische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Analytischer Hierarchieprozess (AHP) (engl.: Analytic Hierarchy Process)
Methoden des Maschinellen Lernens	<ul style="list-style-type: none"> • Künstliche Neuronale Netze (KNN) (engl.: Artificial Neural Networks)

2.3.1 Methode der Gewichteten Evidenzen

Einführung

Die Gewichtung der Beweise (Evidenzen) charakterisiert einen Entscheidungsprozess, bei dem geprüft wird, ob eine Beweislage die eine oder die andere Seite der Argumentation unterstützt. Diese Herausforderung wird von Menschen im Alltag in vielen Situationen kognitiv-intuitiv gemeistert. Mehr formell werden solche Ansätze in Bereichen der Ökonomie, der Medizin, bei Rechtsfragen und in den Naturwissenschaften genutzt.

Die European Safety Authority (EFSA) veröffentlichte 2017 [allgemeine Richtlinien](#) (Tag des Zugriffs: 20.08.2020) für die Nutzung dieser Methodik in wissenschaftlichen Anwendungen. Daraus geht hervor, dass unter dem Oberbegriff sowohl heuristische als auch statistische Ansätze verstanden werden, die helfen, die Evidenzen in einer wissenschaftlichen Problemstellung unterstützend zu integrieren.

Im Kontext des MBiD-Projekts liegt der Fokus auf der quantitativen statistischen Analyse.

Die Methode der Gewichteten Evidenzen, kurz MGE, gehört zu den bivariaten statistischen Verfahren. Aufgrund ihrer Struktur ist die Methode in die Kategorie der Bayes-Klassifikatoren einzuordnen, da die Funktionen aus dem *Satz des Bayes* abgeleitet wurden. Die Methode hat ihren Ursprung in der medizinischen Diagnostik und wird dort bis heute zur Analyse von klinischen Tests eingesetzt.

In geowissenschaftlichen Anwendungen hielt die Methode in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts im Kontext der Analyse räumlicher Daten in der Rohstofferkundung Einzug (z. B. [Bonham-Carter et al., 1989](#)).

Folgende Merkmale sind herauszuheben:

- Es handelt sich um eine generative Methode. Die Faktoren werden einzeln gewichtet. Die Überlagerung der Faktoren im finalen Modell erfolgt nach einem vorgegebenen, datengenerierenden Modellschema, welches meist linear ist.
- Es gilt die Annahme der Unabhängigkeit der Faktoren, auch wenn diese Kondition nicht immer erfüllt werden kann. Diese sehr vereinfachende Annahme ist auch namensgebend für die Klassifikator-Kategorie *Naive Bayes*.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die Methode ist ein probates Instrument in der regionalen Empfindlichkeitsanalyse von Massenbewegungen, auch wenn der Höhepunkt des Einsatzes in akademischen Studien bereits überschritten zu sein scheint.

Der aktuelle Trend zeichnet sich durch die Nutzung von komplexeren multivariaten statistischen Verfahren (s. Kapitel 2.3.2) und Verfahren des Maschinellen Lernens (s. Kapitel 2.3.5, 2.6.2.4, 2.6.2.5 und 3.2.4) aus. Dennoch ist hervorzuheben, dass die Methode der Gewichteten Evidenzen immer wieder durch seine Robustheit überzeugt und ein leistungsfähiges Instrument der datengetriebenen Analyse ist.

Die BGR setzt die Methode der Gewichteten Evidenzen als Referenzmethode für ein statistisches Verfahren mittlerer Komplexität sowohl in Projekten der Technischen Zusammenarbeit als auch in Forschungsprojekten ein. Aus Gründen der Effizienz und Praktikabilität wurde diese Methode in eine autonome Open-Source-Anwendung überführt¹⁶.

Aktuelle Forschungsansätze und Erweiterungen der Methode liegen vor allem im Bereich der Analyse von Unsicherheiten (z. B. [Torizin et al., 2016](#); [Torizin et al., 2018](#); [Torizin et al., 2020](#)).

Mathematische Grundlagen

Die Methode baut auf der Auswertung von relativen Häufigkeitsverteilungen der Beobachtungen in spezifischen Merkmalsklassen auf. In geowissenschaftlichen Analysen mit Raumdaten sind diese oft mit rasterbasierten Daten assoziiert und werden auf der Basis der Rasterpixelanzahl dargestellt. Die detaillierten Grundlagen sind z. B. in [Bonham-Carter \(1994\)](#) zu finden.

Die Grundgleichung der Methode wird vom Satz des Bayes:

$$P(S|N) = \frac{P(N|S)}{P(N)} P(S),$$

unter Anwendung von logarithmierten Chancen (engl.: odds) abgeleitet.

Damit ergibt sich eine Chance eine Rutschung S beim Auftreten eines bestimmten Merkmals N zu finden als:

$$\ln[O(S|N)] = \ln \left[\frac{P(N|S)}{P(N|\bar{S})} \right] + \ln \left[\frac{P(S)}{P(\bar{S})} \right],$$

worin $O(S|N)$ die Chance auf Rutschung S bei gegebenem Merkmal N , $P(N|S)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit für Merkmal N , vorausgesetzt, es wurde eine Rutschung detektiert; $P(N|\bar{S})$ die bedingte Wahrscheinlichkeit für Merkmal N , vorausgesetzt, es wurde keine Rutschung detektiert; $P(S)$ die a-priori Wahrscheinlichkeit einer Rutschung; $P(\bar{S})$ die a-priori Wahrscheinlichkeit von Nicht-rutschung sind.

Das Gewicht wird in Abhängigkeit des Auftretens des erklärenden Merkmals (engl.: evidence) in Form sogenannter logarithmierter Likelihood-Verhältnisse (auch Logits genannt) berechnet.

Wird in einer Rasterzelle das Merkmal beobachtet, erhält die Rasterzelle das Gewicht w^t :

¹⁶ Landslide Susceptibility Analysis Tool (LSAT) ([Torizin, 2012](#)).

$$w^+ = \ln \left[\frac{P(N|S)}{P(N|\bar{S})} \right] = \ln \left(\frac{\frac{\text{Anzahl der Pixel Rutschungen mit Merkmal } N}{\text{Anzahl der Pixel Rutschungen gesamt}}}{\frac{\text{Anzahl der Pixel Nichtrutschungen mit Merkmal } N}{\text{Anzahl der Pixel Nichtrutschungen gesamt}}} \right),$$

wird kein Merkmal beobachtet, erhält die Rasterzelle ein Gewicht w^- :

$$w^- = \ln \left[\frac{P(\bar{N}|S)}{P(\bar{N}|\bar{S})} \right] = \ln \left(\frac{\frac{\text{Anzahl der Pixel Rutschungen ohne Merkmal } N}{\text{Anzahl der Pixel Rutschungen gesamt}}}{\frac{\text{Anzahl der Pixel Nichtrutschungen ohne Merkmal } N}{\text{Anzahl der Pixel Nichtrutschungen gesamt}}} \right).$$

Die Varianz der Gewichte wird nach [Bonham-Carter \(1994\)](#) als:

$$s^2(w^+) = \frac{1}{N \cap S} + \frac{1}{N \cap \bar{S}},$$

und:

$$s^2(w^-) = \frac{1}{\bar{N} \cap S} + \frac{1}{\bar{N} \cap \bar{S}},$$

angegeben, worin $N \cap S$ die Anzahl der Rasterzellen mit Rutschung und Merkmal N , $N \cap \bar{S}$ die Anzahl der Rasterzellen mit Merkmal N und ohne Rutschung, $\bar{N} \cap S$ die Anzahl der Rasterzellen mit Rutschung und ohne Merkmal N , sowie $\bar{N} \cap \bar{S}$ alle Rasterzellen ohne Rutschung und ohne Merkmal N sind.

Für mehrere unabhängige Variablen ergibt sich für eine beliebige Rasterzelle:

$$z = O(S|N_1 \cap N_2 \cap \dots \cap N_n) = \ln[O(S)] + \sum_{i=1}^n w_i x_i.$$

Eine Transformation in die a-posteriori Wahrscheinlichkeit P_{post} kann mittels der folgenden logistischen Funktion durchgeführt werden:

$$P_{post} = \frac{1}{1 + e^{-z}}.$$

Die Varianz der a-posteriori Wahrscheinlichkeit ergibt sich als:

$$s^2(P_{post}) = [1/S + \sum_{i=1}^n s^2(w_i^k)] \times P_{post}^2.$$

Erweiterungen der Methode

Die Unsicherheitskennwerte in der Methode der Gewichteten Evidenzen entstanden für nichtraumbezogene Beobachtungen, die als Punktprozesse betrachtet werden können und basieren ursprünglich auf parametrischen Verteilungsannahmen von Punktdaten.

In den räumlichen Analysen zur Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen werden auch komplexere Geometrien verwendet, wie z. B. Polygone. Diese bilden natürlich zusammenhängende Cluster und beeinflussen die Verteilungscharakteristiken. Es wird daher empfohlen, sich nicht auf parametrische Unsicherheitskennwerte zu verlassen, sondern direkt die Unsicherheiten auf der vorliegenden Datenstruktur zu bestimmen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Eine empfehlenswerte Methode hierfür ist die wiederholte randomisierte Stichprobe (engl.: random subsampling) oder auch die sogenannte Monte-Carlo-Kreuzvalidierung (engl.: Monte-Carlo cross validation). Dabei wird die Berechnung der Gewichte mittels mehrerer zufällig gezogener Stichproben durchgeführt. Üblicherweise wird mit einer Anzahl von 70 % bis 80 % des Trainingsdatensatzes gerechnet (z. B. [Torizin et al., 2018](#); [Torizin et al., 2020](#)).

2.3.2 Logistische Regression

Einführung

Die Logistische Regression, kurz LR, zählt zu den multivariaten statistischen Klassifikationsverfahren. Ähnlich der multivariaten linearen Regression werden bei der LR für mehrere unabhängige Variablen Regressionskoeffizienten bestimmt, um den Wert einer Zielvariable schätzen zu können. Die Besonderheit der LR ist, dass die Zielvariable eine dichotom [0|1] kodierte diskrete Variable ist.

Im Bereich der Empfindlichkeitsanalysen gegenüber Massenbewegungen wird die Logistische Regression sehr häufig eingesetzt. Obwohl die Methode in der Anwendung sehr einfach erscheint, sind auch Fehler im Aufbau der Studien zu finden. Einer dieser Fehler ist die falsche Handhabung von Variablen unterschiedlicher Skalenniveaus, z. B. einer nominalskalierten Variable auf rationalem Skalenniveau. Das Vermischen der Skalen-Messniveaus führt zu falschen Ergebnissen, die sich vor allem dadurch auszeichnen, dass die Eingabereihenfolge der nominalen Parameterklassen im Ergebnis eine Rolle spielt. Vom Sachverhalt entspricht es in etwa der Verletzung des Kommutativgesetzes der Addition. Das heißt, die Reihenfolge der Eingabeparameter dürfte das Modellergebnis nicht beeinflussen. Fehler, die durch Vermischung der Skalenniveaus entstehen, bleiben oft unentdeckt. Dies ist der Robustheit der numerischen Lösungsverfahren geschuldet, die fast immer ein Ergebnis liefern, unabhängig davon, ob die Eingangsdaten richtig oder falsch aufbereitet wurden.

Mathematische Grundlagen

Um die Anwendung der Logistischen Regression besser zu verstehen, wird häufig Bezug auf die lineare Regression genommen. Der linearen Regression liegt die Annahme zugrunde, dass die abhängige Variable sich in linearer Abhängigkeit durch die Regressionsgleichung:

$$Y_i = a + bX_i + \varepsilon$$

beschreiben lässt. Dabei ist Y_i die abhängige Variable, a ein Verzerrungsterm (Schnitt mit der Y-Achse), b der Regressionskoeffizient, X_i ist die unabhängige Variable und ε die stochastische Standardabweichung.

Die Qualität eines linearen Regressionsmodells ist mit dem Bestimmungskoeffizienten R^2 charakterisiert, der eine Beziehung zwischen der erklärten Varianz und der Gesamtvarianz darstellt. Je höher R^2 ist, desto besser passt das lineare Modell zu den Eingabedaten. Für die multivariate lineare Regression mit mehr als einer unabhängigen Variable kann der Effekt jeder einzelnen unabhängigen Variablen auch unter Verwendung des [t-Tests](#) (Tag des Zugriffs: 23.10.2020) statistisch nachgewiesen werden. Die lineare Regression stößt allerdings an ihre Grenzen, wenn die abhängige Variable (auch Zielvariable) nicht kontinuierlich ist. Kontinuierlich bedeutet, dass der vorhergesagte Wert theoretisch stetig ist und einen Wertebereich von $-\infty$ bis $+\infty$ umfasst. Bei einer nicht-kontinuierlichen Zielvariable werden die Werte nicht auf dem rationalen Skalenniveau gemessen. In diesem Fall sind die Fehler üblicherweise auch nicht normalverteilt. Darüber hinaus können kategorische Daten nur eine begrenzte

Anzahl diskreter Werte innerhalb eines bestimmten Intervalls annehmen (z. B. [Nelder & Wedderburn, 1972](#)). Die Logistische Regression zielt darauf ab, mit dichotomen Variablen umzugehen. Der LR-Ansatz kann aus der linearen Regression abgeleitet werden. Ausgehend vom Problem des linearen Regressionsmodells im Umgang mit dichotomen Variablen ist es das Ziel, eine Gleichung zu entwickeln, die den Term $a + bX_i$ auf der rechten Seite erhält. Dieser Teil der Regressionsgleichung ist einfach zu interpretieren und gilt für den Wertebereich von $-\infty$ bis $+\infty$. Auf der linken Seite muss durch eine geeignete Transformation ein Ausdruck entstehen, der die Behandlung der dichotomen Variablen (Wertebereich $[0, 1]$) ebenfalls in diesem Wertebereich ermöglicht.

Die Näherung erfolgt über die Betrachtung der Wahrscheinlichkeiten π , dass eine abhängige Variable Y_i einen Wert von 1 hat. Die Wahrscheinlichkeit hat einen Wertebereich zwischen 0 und 1. Die erste Transformation ist die Anwendung der sogenannten Chancen oder der Wahrscheinlichkeitsverhältnisse (s. [Kapitel 2.3.1](#)). Die Chancen geben ein Verhältnis zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit und ihrer komplementären Wahrscheinlichkeit an:

$$\frac{\pi}{1-\pi} = \frac{\pi}{1-\pi}$$

Die komplementäre Wahrscheinlichkeit wird üblicherweise durch ein überstrichenenes Symbol der Wahrscheinlichkeit ausgedrückt.

Diese erste Transformation liefert einen Wertebereich zwischen 0 und ∞ . Somit ist eine weitere Transformation erforderlich, um den linken Wertebereich auch auf $-\infty$ zu erweitern. Dies wird durch Anwendung des natürlichen Logarithmus erreicht:

$$\ln\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \text{Logit}(\pi).$$

Das Ergebnis der Transformation ist das sogenannte Logit. Das Logit bietet den gewünschten Wertebereich von $-\infty$ bis $+\infty$.

Nun können beide Seiten der Regressionsgleichung geschrieben werden. Die somit erhaltene Gleichung wird auch als das Logit-Modell bezeichnet:

$$\ln\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = a + bX.$$

Das Auflösen der Gleichung nach π liefert die logistische Funktion, die die nichtlineare Abhängigkeit zwischen der abhängigen dichotomen Variablen und mindestens einer unabhängigen Variablen X beschreibt. Die logistische Funktion hat den mathematischen Ausdruck:

$$\pi = \frac{e^{a+bX}}{1 + e^{a+bX}} = \frac{1}{1 + e^{-(a+bX)}}.$$

Die logistische Funktion ist eine punktsymmetrische Sigmoidfunktion. Die Kurve läuft asymptotisch gegen die Werte 0 und 1. Diese starke Abflachung der Kurve an beiden Enden in der Nähe der Extremitäten der Funktion kennzeichnet einen *Sättigungseffekt*. Dieser kann so interpretiert werden, dass eine weitere Änderung des bestimmten Parameters keinen weiteren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit hat.

Die Logistische Regression ermöglicht die Verwendung von Variablen auf unterschiedlichen Skalenniveaus wie kontinuierlichen (z. B. Hangneigung, Höhe, Entfernung, Dichte) und kategorischen Variablen (z. B. Landnutzung, Lithologie). Die direkte Verwendung kontinuierlicher Variablen hat zum Vorteil,

dass keine Diskretisierung notwendig ist und damit potenzieller Informationsverlust vermieden werden kann. Die kategorischen Variablen sind bei der Anwendung in dichotome Variablen zu überführen. Daher muss z. B. eine Landbedeckungsvariable, die aus fünf Kategorien besteht (z. B. Wald, offenes Gebiet usw.), in fünf Eingabedatensätze (sogenannte Dummy-Datensätze) konvertiert werden, die nur noch 1 oder 0 führen. Der Dummy-Datensatz für die Klasse Wald enthält nun Werte von 1 für jede Zelle, die als Wald in der Landbedeckung gekennzeichnet ist, andernfalls ist der Wert der Zelle 0.

Die Berechnung der logistischen Regression erfolgt üblicherweise nicht analytisch, sondern numerisch. Zur Lösung der nichtlinearen Gleichungen (Maximum-Likelihood-Schätzung) werden iterative Algorithmen wie die Newton-Raphson-Methode verwendet.

Die Logistische Regression gehört zum Standardrepertoire verschiedener Softwarepakete, z. B. IBM [SPSS® Statistics](#) (Tag des Zugriffs: 20.08.2020). Darüber hinaus ist sie in vielen Bibliotheken, z. B. für die Programmiersprachen *R* ([R Core Team, 2019](#)) und [Python](#) (Tag des Zugriffs: 20.08.2020), verfügbar. Obwohl die Logistische Regression ein statistisches Verfahren ist, das weit vor der Ära des Maschinellen Lernens (ML) eingesetzt wurde, ist sie heute mit diesem fest verbunden.

Das Lösen von linearen Gleichungssystemen in den computergestützten Verfahren lässt sich besonders effizient mittels der Vektoranalysis durchführen. In der Vektorschreibweise lässt sich die Gleichung der logistischen Funktion wie folgt ausdrücken:

$$h_{\theta}(x) = g(\theta^T x),$$

worin $h_{\theta}(x)$ der Schätzwert für die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes x , g die logistische Funktion, θ^T der transponierte Zeilenvektor der Gewichte und x der Parametervektor ist.

Die zugehörige Fehlerfunktion $J(\theta)$ oder auch Kostenfunktion (engl.: cost function) definiert die Abweichung des Schätzwerts von dem tatsächlichen Wert (Beobachtung) als Funktion des Gewichts θ :

$$J(\theta) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [y \ln(h_{\theta}(x)) + (1 - y) \ln(1 - h_{\theta}(x))].$$

Die Lösung der Aufgabe besteht darin, die Gewichte so zu schätzen, dass der Fehler minimiert wird. Dies erfolgt iterativ, z. B. mit dem stochastischen Gradientenverfahren. Hierzu wird die Ableitung der Kostenfunktion für x mit einem bestimmten Gewicht berechnet. Diese hat die Form:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} J(\theta) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (h_{\theta}(x) - y)x_j,$$

und ergibt den Fehlerbetrag für $h_{\theta}(x)$ als:

$$\theta_j = \theta_{j-1} - \alpha \frac{\partial}{\partial \theta_j} J(\theta),$$

wobei α die sogenannte Lernrate oder Schrittweite kennzeichnet, mit der das Gewicht θ in die durch den Fehlerterm vorgegebene Richtung verändert werden soll.

In unterschiedlichen Softwarepaketen, die die Logistische Regression als Algorithmus anbieten, taucht im Kontext der Analyse und möglicher Einstellungen oft der Begriff der Regularisierung auf.

Die Regularisierung ist eine Methode innerhalb des Maschinellen Lernens, um das *Überlernen* der Modelle zu vermeiden. Das Ziel, die Verhinderung des zu detaillierten Lernens ist dadurch erreicht, dass

die Komplexität des Modells durch einen zusätzlichen Gewichtsterm belegt wird. Regularisierte Modelle zeichnen sich im Ergebnis durch eine höhere Allgemeingültigkeit bei einem größeren Fehler aus.

Herausforderungen bei der Anwendung

Eine der zentralen Herausforderungen bei der Analyse von räumlichen Daten mittels Logistischer Regression ist das Finden eines geeigneten Stichprobenansatzes. Aufgrund der Komplexität können bei großen Datenmengen erhebliche Rechenzeiten entstehen. In vielen Fällen ist eine Stichprobe unumgänglich. Dabei müssen nicht nur die Ereignisse (Beobachtungsdaten), sondern auch eine repräsentative Anzahl an Datenpunkten (Rasterzellen) ohne Ereignisse in die Stichprobe einfließen. Die Wahl der Stichprobenstrategie (z. B. gleichverteiltes zufälliges Ziehen; stratifizierte Stichprobe) kann maßgeblich das Ergebnis beeinflussen und stellt eine zu beachtende Unsicherheit dar, die Sensitivitätsanalysen und explizite Vergleiche mit den alternativen Stichprobenahme-Strategien erfordern.

2.3.3 Infinites Hangmodell

Einführung

Das Infinite Hangmodell, kurz IHM, ist eine einfache physikalisch-basierte Methode zur Hangstabilitätsanalyse. Die Methode wurde von (Skempton & De Lory, 1957) eingeführt und seitdem vielfach erweitert (s. unten).

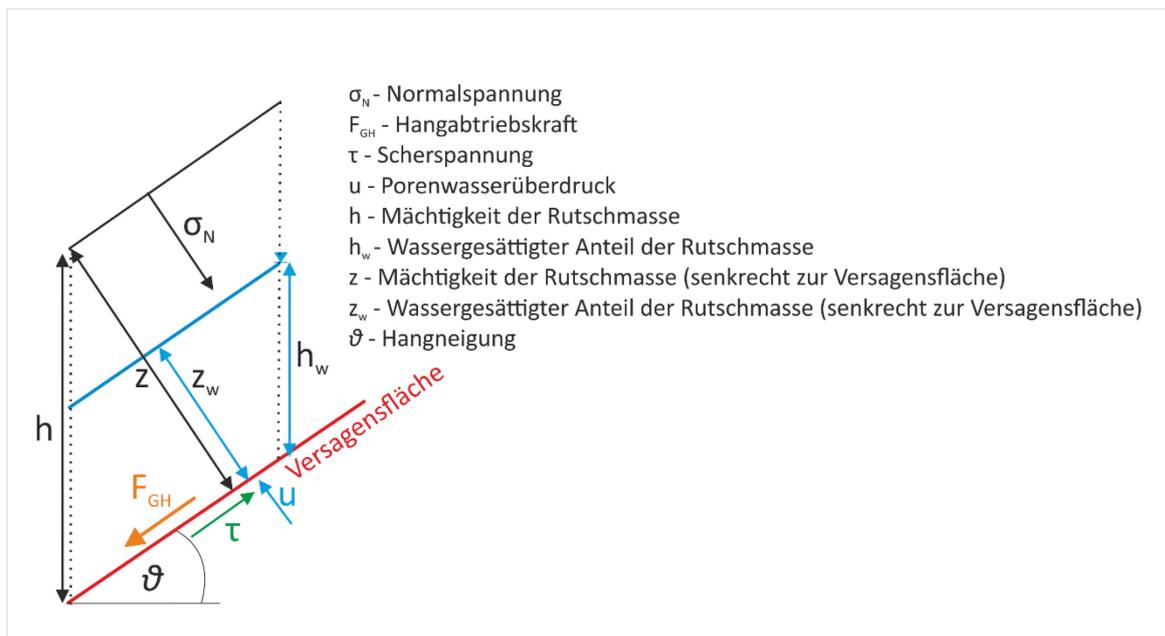


Abb. 2-4: Prinzipskizze zur Verteilung der Kräfte im Infiniten Hangmodell.

Das Modell determiniert die Kräfteverhältnisse, die auf einen Materialblock auf einer geneigten Ebene wirken (Abb. 2-4). Dabei ist die Analyse vergleichbar mit sogenannten Lamellenverfahren, wobei der infinite Hang aus einer Lamelle besteht, deren Ränder als unendlich ausgedehnt angenommen werden. Die Hangneigung ist konstant und die potenzielle Rutschfläche ist streng hangparallel. Weitere Annahmen stellen sicher, dass keine zusätzlichen Kräfte lateral an den Rändern der Lamelle zu beachten sind. Durch diese Annahmen reduziert sich das Problem auf die eindimensionale Betrachtung des Kräfteverhältnisses zwischen den haltenden Kräften und den antreibenden Kräften. Das Kräfteverhältnis ergibt

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

die dimensionslose Größe des Standsicherheitsfaktors. Die Eindimensionalität des Modells ermöglicht eine einfache Implementierung in GIS-gestützten Rasteranalysen.

Mathematische Grundlagen

Die Widerstandskräfte leiten sich aus den Eigenschaften des Materials ab und werden auf der Basis des Mohr-Coulomb-Bruchkriteriums formuliert:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi,$$

worin c' - die effektive Kohäsion [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$]; σ - die Normalspannung [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$]; u - der Porenwasserüberdruck [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$]; τ - die Scherspannung [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$] und φ - Winkel der inneren Reibung [$^\circ$] sind.

Die antreibenden Kräfte werden durch die Hangabtriebskraft approximiert, die hangabwärts und parallel zum Hang wirkt und maßgeblich durch die Masse des Körpers und die Hangneigung bestimmt wird:

$$F_{GH} = m g \sin \vartheta,$$

mit F_{GH} - Hangabtriebskraft [kg m s^{-2}], m - Masse des Körpers [kg], g - Schwerebeschleunigung [m s^{-2}], ϑ - Hangneigungswinkel [$^\circ$].

Der Standsicherheitsfaktor SF ergibt sich aus dem Kräfteverhältnis:

$$SF = \frac{\tau}{F_{GH}} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \varphi}{m g \sin \vartheta}.$$

Mit $\gamma_s = g \rho_s h$ (ρ_s = Dichte des Materials), $h = z \cos \vartheta$ und $\sigma = g z \cos^2 \vartheta$ ergibt sich nach [Mankelov & Murphy \(1998\)](#) die Beziehung:

$$SF = \frac{c' + [(\gamma_s - m\gamma_w)z \cos^2 \vartheta] \tan \varphi}{\gamma_s z \sin \vartheta \cos \vartheta},$$

die durch weitere Umformung durch drei Terme charakterisiert werden kann ([Jibson et al., 2000](#)):

$$SF = \frac{c'}{\gamma_s z \sin \vartheta \cos \vartheta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \vartheta} - \frac{z_w \gamma_w \tan \varphi}{z \gamma_s \tan \alpha},$$

worin SF - Standsicherheitsfaktor (dimensionslos); c' - Effektive Kohäsion [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$]; φ - Winkel der inneren Reibung [$^\circ$]; ϑ - Hangneigung [$^\circ$]; γ_s - Materialwichte [$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-2}$]; γ_w - Wichte des Wassers [$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-2}$]; z - Mächtigkeit der Rutschmasse [m]; w - Feuchtigkeitsindex (Fraktion von 1, dimensionslos) z_w - Wasserstand [m] sind.

Der erste Term beschreibt den Einfluss der Kohäsion und entfällt für nichtbindige Materialien. Der zweite Term repräsentiert den Einfluss des Winkels der inneren Reibung. Dieser entspricht dem Winkel eines Schüttkegels von trockenen, nichtbindigen Materialien. Der dritte Term spezifiziert die Wirkung des Porenwasserdrucks und damit den Auftrieb, welcher der Normalspannung entgegenwirkt und dadurch die Scherfestigkeit verringert. Das Modell nimmt sehr vereinfacht den Grundwasserspiegel parallel zum Hang an. Das Verhältnis Wasserstand z_w zur Gesamtmächtigkeit z wird bei statischen Berechnungen herangezogen. Das stark vereinfachende Modell wird aber nur zur Untersuchung von flachen Translationsrutschungen herangezogen, deren Tiefe gering ist. Es werden Versagenstiefen bis zu

2 m postuliert (z. B. [Fuchs et al., 2014](#)). Vergleiche mit anderen numerischen Methoden ergaben eine adäquate Modellgenauigkeit für kleine Tiefe-Länge-Verhältnisse von < 0.1 (z. B. [Milledge et al., 2012](#)). Umstellungen der Gleichung lassen unterschiedliche Fragestellungen zu, wie z. B. die Berechnung der Versagenstiefe bei der Annahme, dass der Porendruck im Moment des Versagens null wird (z. B. [Terlien, 1998](#)):

$$z = \frac{c'}{\gamma_s \sin \vartheta \cos \vartheta - \gamma_s \cos^2 \vartheta \tan \varphi}$$

Erweiterungen durch hydrologische Modelle

In der Vergangenheit hat das Modell einige Modifikationen und Erweiterungen erfahren. Um die räumliche Verteilung der Durchfeuchtungstiefe in Abhängigkeit vom Relief, vom Niederschlag und von der hydraulischen Leitfähigkeit des Materials besser zu fassen, wird das Infinite Hangmodell mit hydraulischen Modellen (Infiltrationsmodellen) gekoppelt.

So wurde für Modelle mit einem Gleichgewichtsabfluss (engl.: steady state recharge) ein Feuchtigkeitsindex m eingeführt (z. B. [Claessens et al., 2005](#); [Pack et al., 2005](#))

$$m = \frac{Ra}{bT \sin \vartheta} = \frac{z_w}{z}$$

worin R – Niederschlag [m], a – Einzugsgebiet der Rasterzelle [m²], b – Auflösung des Rasters [m], T – hydraulische Leitfähigkeit [ms⁻¹], z_w – Wasserstand [m], z – Gesamtmächtigkeit [m] und ϑ – Hangneigung [°] sind.

Ein Konzept für transiente Infiltration wurde im Softwarepaket TRIGRS ([Baum et al., 2008](#)) umgesetzt. Hier wird die Durchfeuchtungsfront dynamisch an Niederschlagsmengen gekoppelt und Infiltrationsraten mittels der Richards-Gleichung modelliert. Das Ergebnis ist eine dynamische Standsicherheit in Abhängigkeit von der Intensität und Dauer eines Niederschlagsereignisses.

Auch andere Infiltrationsmodelle wie das Green-Ampt-Modell wurden in der Vergangenheit an das Infinite Hangmodell gekoppelt (z. B. [Muntohar & Liao, 2009](#)).

Gekoppelt an hydraulische Modelle ermöglicht das Modell, die Schwellenwerte wie den kritischen Niederschlag (z. B. [Claessens et al., 2005](#)) zu ermitteln:

$$R_{cr} = T \sin \vartheta \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left[1 - \frac{(\sin \vartheta - c)}{(\cos \vartheta \tan \varphi)} \right]$$

worin R_{cr} die kritische Niederschlagsmenge [m] ist.

Weiterführende geotechnische Betrachtungen versuchen, das einfache Modell auch für ungesättigte Böden unter Beachtung der Änderungen der Saugspannung (engl.: matric suction or suction stress) zu erweitern (z. B. [Fredlund & Rahardjo, 1993](#); [Fredlund & Xing, 1994](#); [Lu & Godt, 2008](#)).

Erweiterungen durch seismische Lastannahmen

Das Modell kann ebenfalls für sogenannte pseudodynamische Analysen mit einer seismischen Last erweitert werden. Dabei wird die seismische Bodenbewegung in Form einer horizontalen Kraft als maximale Bodenbeschleunigung (engl.: peak ground acceleration, PGA) [ms⁻²] oder durch den seismischen Koeffizienten K_s [ms⁻²] berücksichtigt (z. B. [Mankelov & Murphy, 1998](#)). Die Einbeziehung des Terms der seismischen Last führt zur Gleichung:

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

$$SF_{DYN} = \frac{c' + (z\gamma_s \cos^2 \vartheta - z\rho_s K_s \cos \vartheta \sin \vartheta - \gamma_w z_w \cos^2 \vartheta) \tan \varphi}{\gamma_s \sin \vartheta \cos \vartheta - z\rho_s K_s \cos^2 \vartheta},$$

worin ρ – Materialdichte [kgm^{-3}] und K_s [ms^{-2}] – seismischer Koeffizient [ms^{-2}] sind.

Die PGA bemisst einen einmalig auftretenden maximalen Wert der Bodenbeschleunigung. Aufgrund der kurzen Dauer ist ein effektives Versagen des Materials eher unwahrscheinlich, selbst wenn es eine Verformung gibt. Der seismische Koeffizient K_s wird in der Regel niedriger angesetzt (z. B. 60 % des PGA-Werts) und wird als ein Kennwert interpretiert, der die Dauereffekte der Bodenerschütterung besser abbildet. Es gibt jedoch keine klare Richtlinie, die begründet, in welcher Proportion zur PGA der K_s anzusetzen ist.

Erweiterung durch Monte-Carlo-Simulation

Das Infinite Hangmodell lässt sich mit einer *Monte-Carlo (MC)-Simulation* erweitern. Dazu werden die Parameter in statistischen Verteilungen, z. B. gleichverteilt oder normalverteilt, angenommen. Die Parameter können direkt aus Laboranalysen entnommen oder aus kompilierten Tabellenwerken oder Schätzungen abgeleitet werden.

Die MC-Simulation wird für N Iterationen wiederholt. Dabei wird für jeden iterativen Schritt der Wert des Parameters zufällig aus der jeweils für den Parameter angenommenen Verteilung gezogen. Als Grenzwert für das Versagen kann dabei der Standsicherheitsfaktor (SF) von ≤ 1 angenommen werden. Über die Anzahl der Iterationen wird ermittelt, wie häufig der Standsicherheitsfaktor bei gegebenen Parameterverteilungen unter die Versagensgrenze fällt. Die Häufigkeit, also die Summe aller Versagensfälle in N Iterationen geteilt durch die Anzahl der Iterationen, liefert die Versagenswahrscheinlichkeit $P(SF \leq 1)$. Für die variablen Parameter c' , φ und ρ_s lässt sich die Prozedur wie folgt ausdrücken:

$$P(SF \leq 1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \left\{ 1 - \left[\frac{f(c'_i)}{f(\rho_{si})} \frac{z \sin \vartheta \cos \vartheta}{g} + \frac{\tan f(\varphi_i)}{\tan \vartheta} - \frac{z_w \rho_w \tan f(\varphi_i)}{z f(\rho_{si}) \tan \vartheta} \right] \right\},$$

$$H: \mathbb{R} \rightarrow \{0,1\}; H_i(x) = \begin{cases} 1: x \geq 0 \\ 0: x < 0 \end{cases},$$

mit $H_i(x)$ als die *Heavyside-Funktion*, definiert über alle reellen Zahlen, so dass für positive Zahlen eine 1 und für negative Zahlen eine 0 zurückgegeben wird; mit $f(x_i)$, der Zufallsvariable aus der jeweiligen Verteilung für die Ziehung i .

Die Monte-Carlo-Erweiterung wurde in unterschiedlichen Software-Lösungen berücksichtigt, wie z. B. LISA ([Hammond et al., 1992](#)) oder PISA-m ([Haneberg, 2007](#)). Viele akademische Studien setzen auf eine skriptbasierte Berechnung der Monte-Carlo-Simulation in den Programmiersprachen Python, Matlab oder R.

Herausforderungen in der Anwendung

Eine der größten Herausforderungen für die Anwendung des Infinite Hangmodells ist die Parametrisierung des Modells mit bodenphysikalischen Kennwerten. Diese müssen dem Anspruch genügen, im Rahmen der angenommenen statistischen Verteilungen für eine Referenzfläche (z. B. eine Bodenform oder lithologische Einheit) hinreichend repräsentativ zu sein.

Ansatz im MBiD-Projekt

Im MBiD-Projekt wurde das Infinite Hangmodell, erweitert durch eine Monte-Carlo-Simulation, jedoch ohne dynamische Kopplung an Infiltrationsmodelle, genutzt. Die Verknüpfung von räumlichen Daten und die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgte in ArcGIS® und einer Python-Anwendung (BGR-Script, nicht publiziert). Eine detaillierte Anleitung zur Modellparametrisierung und Berechnung wird in [Kapitel 3.2.2](#) bereitgestellt.

2.3.4 Analytischer Hierarchieprozess

Einführung

Der Analytische Hierarchieprozess, kurz AHP, ist eine im Jahr 1980 eingeführte Methode zur Entscheidungsfindung, bei der schwer quantifizierbare Entscheidungsmerkmale verglichen werden ([Saaty, 1980](#)). Das Verfahren stellt einen genauen Ansatz zur Quantifizierung der Gewichte von Entscheidungskriterien dar.

Anwender des Analytischen Hierarchieprozesses zerlegen zunächst ihr Entscheidungsproblem in eine Hierarchie von leichter verständlichen Unterproblemen, von denen jedes unabhängig analysiert werden kann. Sobald die Hierarchie aufgebaut ist, erfolgt eine systematische Bewertung der Hierarchieelemente durch Experten. Die relative Wichtigkeit von Hierarchieelementen wird dabei durch paarweise Vergleiche abgeschätzt.

Die Vorzüge eines paarweisen Vergleichs lassen sich am folgenden Beispiel beschreiben:

Liegen mehrere Merkmale oder Kriterien vor, die eine Entscheidung beeinflussen, kann ein Kriterien-Ranking prinzipiell auch in einem einfachen gewichteten Modell durch einen Experten erfolgen. Die Logik der Expertenentscheidung ist im einfachen gewichteten Modell weder nachvollziehbar noch mathematisch überprüfbar. Über einen paarweisen Vergleich aller Kriterien lässt sich jedoch die Konsistenz der Gewichtsvergabe mathematisch überprüfen. Eine zufällig abgegebene Schätzung der Gewichte wird in diesem Vergleichssystem mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit inkonsistent ausfallen, wie bereits intuitiv am Beispiel von drei Merkmalen A, B, und C gezeigt werden kann. Wird A geringfügig wichtiger als B und viel wichtiger als C bewertet, ergibt sich aus diesen zwei paarweisen Vergleichen folgende logische Beziehung:

$$A > B > C.$$

Es wäre somit inkonsistent, wenn im paarweisen Vergleich zwischen B und C, C als wichtiger bewertet werden würde. Die Beziehung zwischen B und C ist zwar mit dem logischen Ausdruck noch nicht quantitativ gefasst, aber die Freiheitsgrade der Rangordnung sind bereits auf nur die eine Möglichkeit reduziert, so dass C zwangsläufig B nachgeordnet sein muss.

Werteskala

[Saaty \(1977\)](#) schlug für AHP-Anwendungen eine neunstufige Werteskala vor, um die Wichtigkeit eines Merkmals gegenüber einem anderen Merkmal zu charakterisieren. Dabei sollte die Werteskala folgenden Anforderungen genügen:

- Die Skala bildet die Unterschiede in menschlichen Empfindungen bei Entscheidungsprozessen möglichst vielfältig ab;

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

- Basierend auf den psychologischen Experimenten von [Miller \(1956\)](#) wird unterstellt, dass ein Individuum kaum in der Lage ist, mehr als 7 ± 2 Objekte miteinander zu vergleichen.

Theoretisch gibt es keinen objektiven Grund, die Werteskala auf die natürlichen Zahlen 1 bis 9 zu begrenzen. Daher entstanden im Laufe der Zeit unterschiedliche Werteskalen, die für bestimmte Fragestellungen als besser geeignet angesehen wurden, wie z. B. invers-linear, logarithmisch, quadratisch (z. B. [Ishizaka & Labib, 2011](#)). Wenn in der Fachliteratur von der klassischen, linearen oder einfach nur von der Saaty-Skala gesprochen wird, ist meist die neunstufige Skala gemeint.

Die Tab. 2-4 zeigt die Haupteinteilung der Wichtigkeitsstufen der Saaty-Skala mit dazugehöriger Definition und Erklärung. Die Zwischenstufen 2, 4, 6 und 8 sind immer dann anzuwenden, wenn Kompromisse zwischen den definierten Skalenwerten eingegangen werden müssen.

Tab. 2-4: Neunstufige Werteskala nach Saaty (1977).

Wichtigkeit	Definition	Erklärung
1	Gleiche Wichtigkeit.	Zwei Merkmale sind gleich wichtig oder tragen gleichermaßen zur Entscheidungsfindung bei.
3	Ein Merkmal ist etwas wichtiger als das andere.	Basierend auf den Erfahrungswerten wird ein Merkmal dem anderen leicht bevorzugt.
5	Ein Merkmal ist wesentlich wichtiger als das andere.	Basierend auf den Erfahrungswerten wird ein Merkmal dem anderen deutlich bevorzugt.
7	Ein Merkmal ist viel wichtiger als das andere.	Ein Merkmal wird stark bevorzugt und seine Wichtigkeit ist in der Praxis untermauert.
9	Absolute Dominanz eines Merkmals.	Die Beweise für die Wichtigkeit eines Merkmals finden die höchstmögliche Bestätigung.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte.	

Gewichtungsprozess

Der paarweise Gewichtungsprozess ist durch den folgenden detaillierten Ablauf charakterisiert:

- A. *Aufstellen der Matrix:* Zu vergleichende Kriterien (z. B. A, B, C, D) werden in einer Matrix gegenübergestellt. Die quadratische Matrix ist symmetrisch. Die Hauptdiagonale wird durch das Verhältnis der einzelnen Kriterien mit sich selbst gebildet und ist somit immer mit 1 gefüllt (Tab. 2-5).

Tab. 2-5: Quadratische Matrix für den Gewichtungsprozess.

	A	B	C	D
A	1			
B		1		
C			1	
D				1

- B. *Der paarweise Vergleich:* Die Matrix bekommt zwei Einträge, die sich über die Hauptdiagonale reziprok verhalten. Die Lesart der Matrix ist Zeile zu Spalte, z. B. A ist viel wichtiger als B. Der Zellenwert für den Vergleich A zu B bekommt den Wert 7, der Zellenwert für den Vergleich B zu A erhält $1/7$ (Tab. 2-6).

Tab. 2-6: Anwendungsbeispiel zur Füllung der quadratischen Matrix für den Gewichtungsprozess.

	A	B	C	D
A	1	7	A/C	A/D
B	1/7	1	B/C	B/D
C	C/A	C/B	1	C/D
D	D/A	D/B	D/C	1

- C. **Berechnung des beitragsgrößten Eigenwerts und dazugehörigen Eigenvektors:** Die Gewichte für einzelne Kriterien werden über den n -dimensionalen Eigenvektor abgebildet, wobei n die Anzahl der zu bewertenden Kriterien und damit auch den Rang der Matrix darstellt.

Der beitragsgrößte Eigenwert und der entsprechende Eigenvektor (rechtsseitig) kann vereinfacht mit der Potenzmethode, auch bekannt als *Von-Miseses-Iteration*, aus einer quadratischen Matrix abgeleitet werden. Hierzu erstellt man zunächst einen normierten Vektor, indem man Zeilensummen bildet und diese mit der Summe der Matrix normiert.

Danach wird die Matrix quadriert. Für die quadrierte Matrix wird ebenfalls ein normierter Vektor gebildet. Die beiden Vektoren werden subtrahiert. Ist die Differenz in einzelnen Komponenten größer als ein vordefinierter Schwellenwert, in der Regel liegt dieser bei $1e-5$, wird die Matrix erneut quadriert. Der neu normierte Vektor und der normierte Vektor aus dem vorhergehenden Schritt werden erneut subtrahiert.

Die Operation wird solange wiederholt, bis der Schwellenwert für alle Vektorkomponenten erfüllt ist. Der *invariante* normierte Vektor ist der Eigenvektor der Matrix. In der Regel konvergiert die Lösung für lineare Matrizen in wenigen Iterationen, etwa 4 bis 6.

- D. **Konsistenzprüfung:** Für die absolut konsistente Paarvergleichsmatrix gilt $\lambda_{max} = n$. Je größer der Unterschied, desto inkonsistenter ist die Schätzung des Experten. [Saaty \(1977\)](#) führt den Konsistenzindex CI (engl.: consistency index) als ein geeignetes Maß ein, um die Konsistenz zu charakterisieren:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1},$$

wobei λ_{max} der maximale Eigenwert und n der Rang der Matrix sind. Der CI ist mit einem Zufallskonsistenzindex RI (engl.: random consistency index) ins Verhältnis zu setzen. Der RI leitet sich aus einem Zufallsexperiment mit vielen zufällig besetzten Matrizen auf der neunstufigen Skala ab. Tab. 2-7 gibt einen Überblick über den RI in Abhängigkeit vom Matrixrang. In der AHP-Analyse werden kleine Inkonsistenzen toleriert. Grundsätzlich gilt: wenn das Verhältnis aus CI und RI kleiner 0,1 (~10 %) ist, kann die Schätzung akzeptiert werden.

Tab. 2-7: Zufallskonsistenzindex RI nach SAATY (1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

[Alonso & Lamata \(2006\)](#) nutzten numerische Verfahren, um ein allgemeines Gleichungssystem für die Bestimmung des Konsistenzverhältnisses CR (engl.: consistency ratio) in Abhängigkeit vom Eigenwert und vom Rang der Matrix n abzuleiten:

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

$$CR = \frac{\lambda - n}{(2,7699n - 4,3513) - n}$$

Sowohl beim CI als auch beim CR gilt es zu beachten, dass die Konsistenz kein Maß für die Güte einer Schätzung ist. Beide Konsistenzindizes sind ein Maß, ob ein Ergebnis weniger zufällig entstanden ist. Das Ergebnis ist also nicht nur geraten, sondern kann als Produkt einer logischen Überlegung (Expertise) aufgefasst werden.

Analytischer Hierarchieprozess für die Bewertung der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen

Für die Analyse von Massenbewegungen wird nicht die komplette AHP-Methode im Sinne des Vergleichs der Alternativen genutzt. Vielmehr bedient man sich des mathematischen Modells der Gewichtung und der Konsistenzprüfung, ohne den letzten Schritt der Entscheidungsfindung zwischen mehreren Alternativen anzuwenden.

Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass im praktischen Anwendungsfall in der Regel keine Alternativen vorliegen und die Aufgabe auf eine relative Rangordnung der Merkmale in Bezug auf einen bestimmten Prozess, wie z. B. Sturzprozess, Hanganbruch, Fließprozess, fokussiert wird und die Zielvariable binär ist. Aus diesem Grund wird vordergründig ein Graph (Entscheidungsbaum) erstellt, in dem die hierarchische Struktur des Modells abgebildet wird.

Hat man allerdings ein hierarchisches Modell für alle Prozesse erstellt, kann es auch verwendet werden, um der Frage im klassischen Sinne der Methode nachzugehen, z. B. welcher Prozesstyp in einem bestimmten Gebiet unter zu berücksichtigenden Kriterien eher zu erwarten ist (Abb. 2-5).

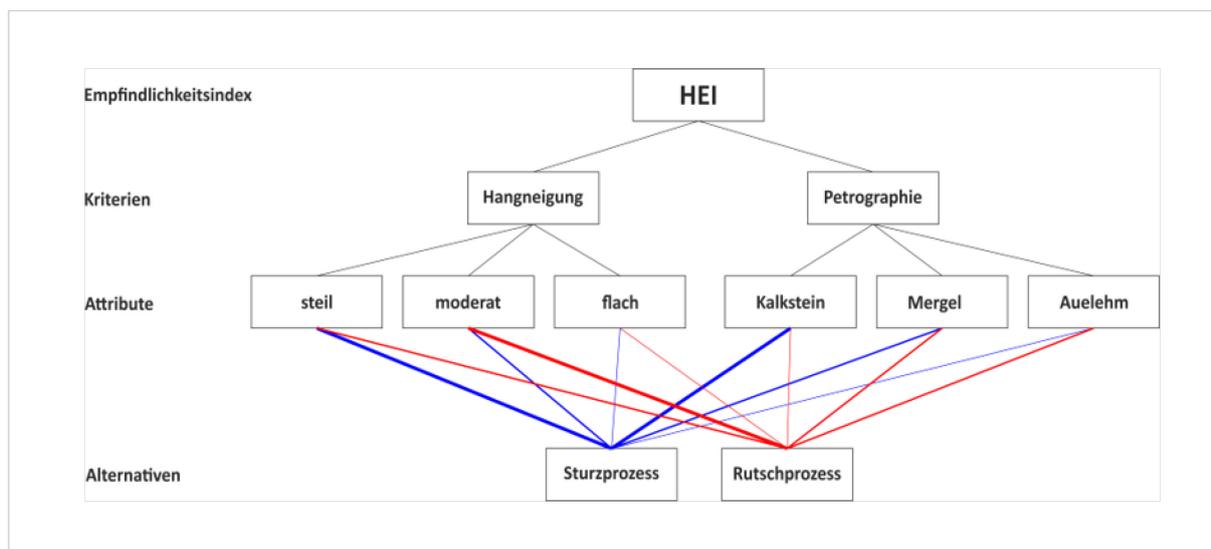


Abb. 2-5: Analytischer Hierarchieprozess – Beispiel für die Kombination zweier bewerteter Kategorien.

Die Gewichtung der hierarchischen Ebenen erfolgt wissensbasiert, die Bestimmung der Empfindlichkeit klassisch mit der Produktbildung über die Hierarchieebenen.

Sind die einzelnen Attribute und Kriterien mit Gewichten versehen, lässt sich der Hangrutschungsempfindlichkeitsindex (HEI) für eine der Alternativen am Beispiel der Hierarchie aus der Abb. 2-5 wie folgt bestimmen:

$$HEI = w_H H_i + w_P P_i,$$

worin w_H und w_P das Gewicht für die übergeordnete hierarchische Ebene Hangneigung und Petrographie und H_i und P_i die jeweiligen Attribute der Hangneigung (H) und der Petrographie (P) sind.

2.3.5 Künstliche Neuronale Netze

Einführung

Die häufigste Form von KNN, die bis heute im Bereich der Empfindlichkeitsanalysen von Massenbewegungen angewandt werden, sind die vollständig vorwärts-gerichteten Neuronale Netze (engl.: feed forward) (s. Kapitel 1.3.1).

Der Aufbau eines KNN hat üblicherweise eine Eingabeschicht, eine oder mehrere (verborgene) Zwischenschichten (engl.: hidden layer) und eine Ausgabeschicht (Abb. 2-40). Die Anzahl der Zwischenschichten bestimmt die Tiefe eines KNN. Dieser Aufbau wird auch als das Multi-Layer-Perceptron (MLP) bezeichnet. Die Schichten sind mit Neuronen besetzt, in denen die Informationsverarbeitung stattfindet (Abb. 2-6).

Über die Eingabeschicht werden die Eingangssignale (Parameter) gewichtet und an die Neuronen der verborgenen Schicht weitergegeben. In den Neuronen der verborgenen Schichten und der Ausgabeschicht erfolgt die Summierung der gewichteten Eingangssignale und die Zuführung zu einer Aktivierungsfunktion (meist eine stetige nichtlineare Funktion, wie z. B. die Sigmoid- oder Tangens-Hyperbolicus-Funktion). Die Aktivierungsfunktionen sind Transformationsfunktionen, die den Signaleingang des Neurons in einem bestimmten Wertebereich, z. B. zwischen 0 und 1, skalieren. Überschreitet man nach der Anwendung der Aktivierungsfunktion einen Schwellenwert, leitet das Neuron ein entsprechendes Signal an die nächste Schicht weiter.

Theoretisch ist die Anzahl der verborgenen Schichten und ihrer Neuronen in einem KNN nicht begrenzt. Sie richtet sich nach der Komplexität, sowie Nichtlinearität der Aufgabenstellung und der verfügbaren Rechenleistung. Die Ausgabeschicht stellt den Endpunkt der Signalverarbeitung in einem MLP dar und gibt das Ergebnis zurück.

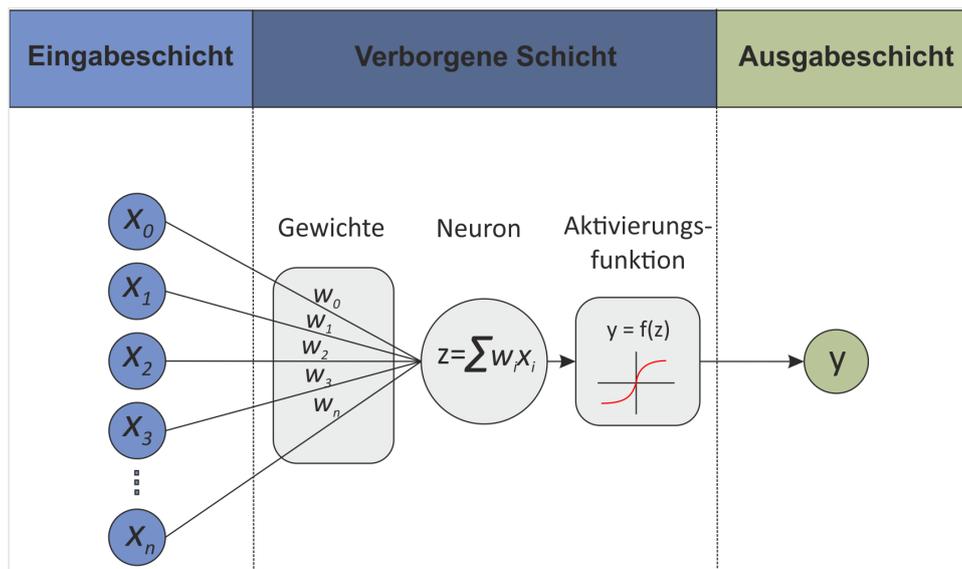


Abb. 2-6: Schema eines künstlichen Neurons.

Wie lernt das KNN?

Lernen charakterisiert bei Künstlichen Neuronalen Netzen den Prozess der zielgerichteten Gewichts-anpassung der Verbindungen zwischen den Neuronen, um die Ausgabe zu optimieren. Ziel des mit dem Lernen verbundenen Trainings ist es, iterativ die Gewichte so einzustellen, dass das Netz einen unbekanntem funktionalen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabe optimal darstellen kann.

Nach dem Aufbau der Netz-Struktur wird jedem Neuron meist zufällig ein niedriges individuelles Anfangsgewicht zugeordnet. Beim Training berechnet das KNN die Ausgabegröße mit den Gewichten, vergleicht diese mit den realen Zielwerten und gibt bei Abweichung vom Zielwert den Fehlerbetrag zurück.

In der nächsten Trainingsepoche werden die Gewichte entsprechend eines Lernalgorithmus angepasst. Die Optimierung der Gewichte erfolgt bei den meisten Verfahren durch Betrachtung der Fehlerfunktion bzw. deren Gradient. Die Schrittweite dieser Anpassung ist die sogenannte Lernrate. Die Richtung (und bei manchen Algorithmen auch der Betrag der Lernrate), in die ein Gewicht verändert werden soll, wird anhand des Gradienten der Fehlerfunktion ermittelt, z. B. im Verfahren des steilsten Abstiegs (engl.: gradient descent).

Die Anpassung wird iterativ so lange durchgeführt, bis das Netz konvergiert, d. h. die Schätzungsfehler minimiert sind und sich das Modell durch weiteres Training nicht mehr verbessert. Um eine Überschätzung – ein *Auswendiglernen* der Daten – durch das Netz zu vermeiden, kann dies durch die Regularisierung oder durch Vorgabe der maximalen Anzahl an Trainingsepochen, die das Netz durchlaufen darf, begrenzt werden.

Herausforderungen in der Anwendung

Ähnlich zur Logistischen Regression (s. Kapitel 2.3.2) ist auch beim Einsatz eines KNN eine geeignete Stichprobenstrategie zu entwickeln. Zusätzlich ergeben sich viele Freiheitsgrade in der Wahl der Netzarchitektur, wie z. B. Anzahl der Neuronen in der verdeckten Schicht bzw. die Anzahl der versteckten Schichten. Bis heute gibt es jedoch keine geschlossene mathematische Lösung, die es ermöglicht, aus der Struktur der Eingangsdaten die optimale Netzarchitektur festzulegen. Diese muss daher auf der Grundlage von empirischen Daumenregeln und explorativen Untersuchungen abgeschätzt werden. Verfügbare fortgeschrittene Algorithmen bieten allerdings durch Einschaltung von Sensitivitätsanalysen und/oder einer automatisierten iterativen Suchfunktion eine Netzoptimierung an.

Obwohl KNNs als datengetriebene und damit sehr objektive Methoden gelten, bleibt doch ein solider Anteil an Subjektivität erhalten. Diese Subjektivität wird durch die Vorauswahl von Einflussfaktoren bedingt, die in der Analyse berücksichtigt werden sollen. Die Vorauswahl ist nicht durch feste Vorgehensweisen reglementiert und bietet damit große Freiheitsgrade für den Bearbeiter, die Analyse nach seinem Grundverständnis der Prozesse zu orientieren und vorzuprägen.

Eine grundlegende Herausforderung im Bereich der Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit ist das Zurückgreifen auf qualitätsgesicherte Referenzdaten, insbesondere für das Training. Soll das KNN später richtige Entscheidungen treffen, müssen die gelernten Beispiele der Realität entsprechen. Werden viele *falsche* oder nicht repräsentative Beispiele gelernt, wird die Ausgabe des KNN ebenfalls sehr große Unsicherheiten aufweisen.

Eine weitere Problematik liegt in der Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Die Schwachstelle der Analyse mittels KNN ist die weitgehende Intransparenz, wie das Netz zu einer Entscheidung gekommen ist. Dies hat nicht zuletzt die Bezeichnung der Black-Box-Modelle für diese Verfahren geprägt.

Einen Vorstoß in die Richtung, die versteckte Logik besser zu erfassen, wird durch die sogenannte erklärbare Künstliche Intelligenz angestrebt. Dieser Teilbereich wird z. B. in der Analyse des [Fraunhofer Instituts im Jahr 2018](#) (Tag des Zugriffs: 20.08.2020) mit der höchsten Priorität für die künftigen Forschungsaufgaben eingestuft. Es sollen Möglichkeiten gesucht und Instrumente entwickelt werden, die Ausgaben eines KNN erklärbar zu machen.

2.3.6 Evaluierungsmethoden

Um die Vorhersagequalität eines Modells besser einschätzen zu können, müssen alle Modelle evaluiert (validiert) werden. Die wahrscheinlich einfachste Möglichkeit ein Modell zu evaluieren ist abzuwarten, bis neue Ereignisse eintreten. Dies ist jedoch weder zufriedenstellend noch praktikabel.

Unter normalen Umständen (ohne extreme Trigger-Ereignisse) handelt es sich bei Massenbewegungen um seltene Ereignisse. Somit müsste eine große Zeitspanne verstreichen, um für ein regional begrenztes Gebiet genügend Beobachtungen für eine belastbare Evaluierung zu sammeln. Daher ist es unvermeidlich für die Evaluierung eines Modells, Daten zu erheben, die die Aussagen des Modells untermauern könnten. Dies erfolgt unabhängig davon, mit welcher Methode das Modell erstellt wurde.

Liegen Beobachtungen von Massenbewegungen (Inventare) vor, lassen sich die statistischen Evaluierungsmethoden, wie etwa die Konfusionsmatrix oder die Grenzwertoptimierungskurve, direkt anwenden. Wenn keine Inventare vorhanden sind, können Informationen aus anderen vermeintlich höher aufgelösten Modellierungen (z. B. aus geotechnischen Analysen) herangezogen werden, um die Ergebnisse eines lokalen oder regionalen Modells einzuschätzen.

Auch indirekte Informationen, wie bereits installierte geotechnische Sicherheitsmaßnahmen an einem Hang oder einer Böschung, können als Hinweise dienen. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn die Details zu lokalen geotechnischen Analysen nicht vorhanden sind oder, aus Zeit- und Kostengründen oder anderweitigen Restriktionen, nicht erhoben werden können. Die indirekten Daten können zur qualitativen (visuellen) Interpretation herangezogen werden oder ebenfalls in die statistischen Evaluierungsmethoden als Proxys für potenzielle Ereignisse einfließen.

Bei der Interpretation statistischer Evaluierungsverfahren mittels allgemeiner Metriken ist grundsätzlich Vorsicht geboten. Diese sagen lediglich aus, wie gut ein Klassifikator generalisiert. Statistische Evaluierungsmethoden treffen per se keine Aussagen über die Plausibilität eines Modells (z. B. die räumliche Verteilung der Muster). Somit ist es durchaus möglich, zwei alternative Modelle mit unterschiedlichen räumlichen Verteilungen der Gefahrenhinweise zu erhalten, die gleiche oder ähnliche statistische Indizes aufweisen. Die Interpretation solcher Metriken sollte daher immer im Kontext der erzeugten Muster unter Einbeziehung von geowissenschaftlichem Sachverstand erfolgen.

Konfusionsmatrix

Eine Möglichkeit, binäre Klassifikatoren zu evaluieren und miteinander zu vergleichen, bietet die Vier-Feld-Konfusionsmatrix nach [Fawcett \(2006\)](#) (Abb. 2-7). Diese ist durch folgende Einträge charakterisiert:

- **Richtig Positiv (RP)**: Raster-Pixel ist eine Rutschung, und das Modell hat es als solche klassifiziert.
- **Falsch Negativ (FN)**: Raster-Pixel ist eine Rutschung, aber das Modell hat es fälschlicherweise als Nichtrutschung klassifiziert.
- **Falsch Positiv (FP)**: Raster-Pixel ist keine Rutschung, aber das Modell hat es als Rutschung klassifiziert.
- **Richtig Negativ (RN)**: Raster-Pixel ist keine Rutschung, und das Modell hat es richtig als Nichtrutschung klassifiziert.

	Tatsächlich Positiv (P)	Tatsächlich Negativ (N)
Positiv Geschätzt (sP)	Richtig Positiv (RP)	Falsch Positiv (FP)
Negativ Geschätzt (sN)	Falsch Negativ (FN)	Richtig Negativ (RN)

Abb. 2-7: Konfusionsmatrix nach [Fawcett \(2006\)](#).

Aus der Konfusionsmatrix lassen sich folgende Standardkennwerte ableiten:

- *Falsch Positiv Rate* = $\frac{FP}{N}$;
- *Richtig Positiv Rate (Sensitivität)* = $\frac{RP}{P}$;
- *Präzision (= Genauigkeit)* = $\frac{RP}{RP+FP}$;
- *Spezifität* = $\frac{RN}{FP+RN}$.

Die Konfusionsmatrix ist optimal anwendbar, wenn das Modellierungsergebnis durch eine klare Entscheidungsgrenze (z. B. Grenzwert beim Standsicherheitsfaktor) in *Rutschung* und *Nicht-Rutschung* klassifiziert werden kann.

Grenzwertoptimierungskurve

Die Grenzwertoptimierungskurve (engl.: receiver operating characteristics, ROC) oder auch ROC-Kurve ist ein Instrument zur Charakterisierung der Güte eines Klassifikators. Die Grenzwertoptimierungskurve basiert auf den Kennwerten, die man aus einer Vier-Feld-Konfusionsmatrix (Wahrheitsmatrix) für einen binären Klassifikator ableiten kann.

Der sogenannte ROC-Raum (engl.: ROC space) wird durch die Richtig Positiv-Rate auf der y-Achse und der Falsch Positiv-Rate auf der x-Achse aufgespannt. Damit zeigt das ROC-Diagramm das Verhältnis zwischen der Trefferquote (auch Sensitivität oder Richtig Positiv-Rate) und dem Fehlalarm (auch Falsch Positiv-Rate) auf ([Fawcett, 2006](#)). Das Verhältnis ist, anders als in der Konfusionsmatrix, auf der Grenzwertoptimierungskurve durchgehend für jeden Punkt definiert. Somit kann die Konfusionsmatrix als Darstellung eines beliebigen Punktes auf der Grenzwertoptimierungskurve verstanden werden. Damit lässt sich bei Bedarf ein optimaler Entscheidungsgrenzwert für eine Klassifikation ermitteln. Die Grenzwertoptimierungskurve kann sowohl bei datengetriebenen als auch bei heuristischen Ansätzen zur Anwendung kommen. Damit lassen sich Modelle miteinander vergleichen, vorausgesetzt, sie bilden den

gleichen ROC-Raum ab. Ein quantitatives Maß für die Qualität eines Modells ist der standardisierte Flächeninhalt unter der Kurve (engl.: area under curve, AUC oder area under ROC, AUROC).

Dieser AUC-Index liefert üblicherweise einen Wert zwischen 0,5 und 1. Für die Beurteilung der Güte eines Modells kann folgende Abstufung der AUC-Indizes genutzt werden (z. B. [Tape, 2001](#)):

- > 0,9: ausgezeichnetes (exzellentes) Modell;
- 0,8 bis 0,9: gutes Modell;
- 0,7 bis 0,8: mäßiges Modell;
- 0,6 bis 0,7: schlechtes Modell;
- 0,5 bis 0,6: ungenügendes Modell.

Auf der Basis der Grenzwertoptimierungskurve lässt sich eine Zonierung der Empfindlichkeitsklassen durchführen (Abb. 2-8).

Die Sensitivität auf der y-Achse des Diagramms bildet die kumulative Anzahl oder Fläche der Ereignisse ab. Die x-Achse kann dagegen als die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets interpretiert werden. Mathematisch ist es nicht ganz korrekt, da die Rutschungsflächen selbst auf der x-Achse nicht abgebildet werden. Aufgrund von einem meist sehr kleinen Verhältnis der Rutschungsflächen zur Gesamtfläche ist diese Abweichung jedoch vernachlässigbar. Damit lässt sich das Diagramm als Fläche der Rutschungen über dem Gesamtgebiet deuten.

Soll z. B. eine Empfindlichkeitsklasse *Hoch* generiert werden, die 80 % aller bekannten Rutschungsflächen beinhaltet, wird von der y-Achse bei Wert 0,8 eine waagerechte Linie bis zur Grenzwertoptimierungskurve gezogen. Der Punkt auf der Kurve gibt den Schwellenwert für die Klassengrenze an. Der entsprechende x-Wert gibt annähernd den prozentualen Anteil der Zonenfläche an. Über die Wertetabelle zur Grenzwertoptimierungskurve und darinstehenden Klassengewichten lässt sich eine Verknüpfung an die räumlichen Daten erstellen.

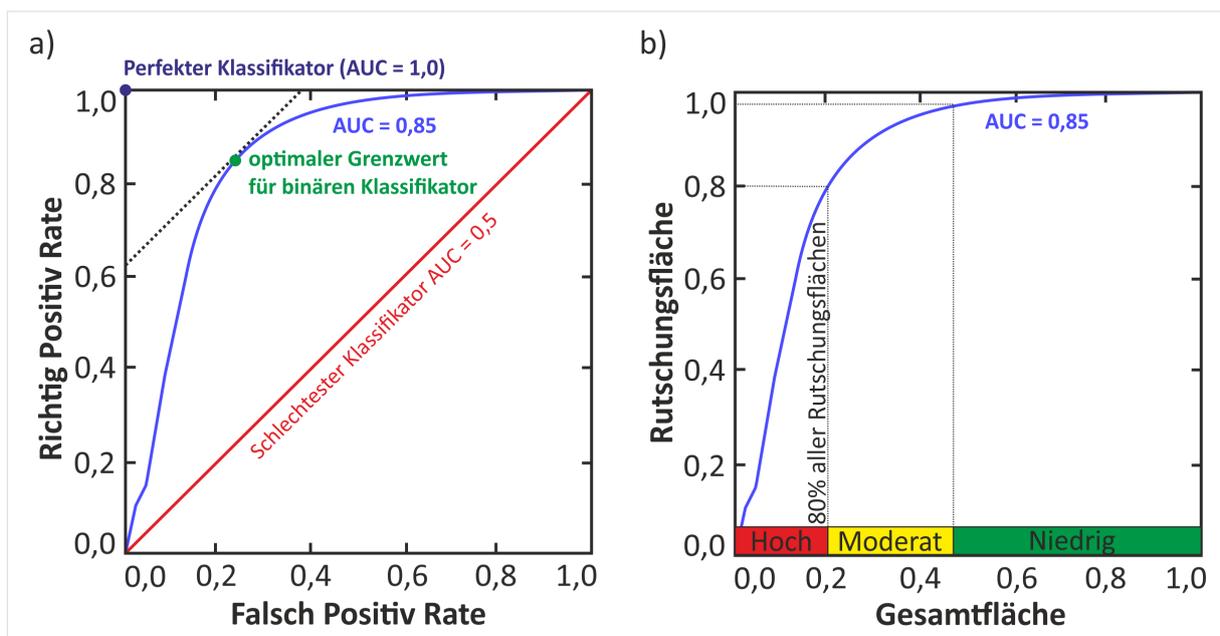


Abb. 2-8: a) Aufbau der Grenzwertoptimierungskurve; b) Verwendung der Grenzwertoptimierungskurve für die Zonierung der Hangrutschungsempfindlichkeit, z. B. in die drei Zonen Hoch, Moderat und Niedrig.

2.4 Testgebiete: Auswahlkriterien und Abgrenzung

Für die Durchführung methodischer Fallstudien wurden insgesamt fünf Testgebiete in den im MBiD-Projekt beteiligten Bundesländern ausgewählt (Abb. 2-9; Tab. 2-8) (s. Kapitel 2.6). Die Testgebiete wurden von den jeweiligen SGD auf der Basis folgender Kriterien vorgeschlagen:

- Die Gebiete zeichnen sich durch eine latente Gefährdung durch Massenbewegungen aus;
- Die Gebiete haben eine hohe Bearbeitungspriorität im Bundesland;
- Die Gebiete sind hinreichend durch Informationsgrundlagen für die Modellierungen vorbereitet;
- Die Gebiete eignen sich zum Vergleich verschiedener Modellierungsmethoden bzw. zum Test auf Übertragbarkeit zwischen den Gebieten.

Die Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen ist von den allgemeinen Gegebenheiten des jeweiligen Naturraums abhängig. Die Testgebiete sollten daher möglichst durch gewachsene naturräumliche Gliederungen abgegrenzt werden, z. B. im Sinne von [Meynen & Schmithüsen \(1962\)](#).

Als einzige deutschlandweit flächendeckend verfügbare Landschaftsgliederung im Vektorformat wurde die [Hydrogeologische Raumgliederung \(HYRAUM\), Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015](#) (Tag des Zugriffs: 23.08.2020) im Maßstabsäquivalent 1 : 500 000 identifiziert.

Die Systematik der hydrogeologischen Raumgliederung ist in [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie \(2016\)](#) publiziert¹⁷. Die drei Testgebiete Schwäbische Alb und Albvorland (Baden-Württemberg), Fränkische Alb und Albvorland (Bayern) sowie Elbtalgraben (Sachsen) wurden auf dem Gliederungsniveau hydrogeologischer Raum respektive hydrogeologischer Teilraum ausgewählt (Tab. 2-8).

Zusätzlich wurden zwei kleinere Gebiete im Süden Bayerns (Simbach) und im Osten Nordrhein-Westfalens (Siegtal, östlich Bonn) in die Fallstudien einbezogen, in denen durch starke Niederschläge Rutschungen ausgelöst wurden.

¹⁷ Zitat (Quelle: [BGR Produktcenter](#); Tag des Zugriffs: 23.08.2020): „...Für die bundesweite Kartendarstellung der hydrogeologischen Großräume, Räume und Teilräume wurden die überwiegend im Maßstab 1 : 500 000 erarbeiteten Entwürfe und Einzelbearbeitungen der Länder in eine einheitliche Nomenklatur überführt und zu einer digitalen Karte zusammengefasst. Insgesamt wurde das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland in 10 hydrogeologische Großräume, 36 hydrogeologische Räume und 247 hydrogeologische Teilräume untergliedert...“.

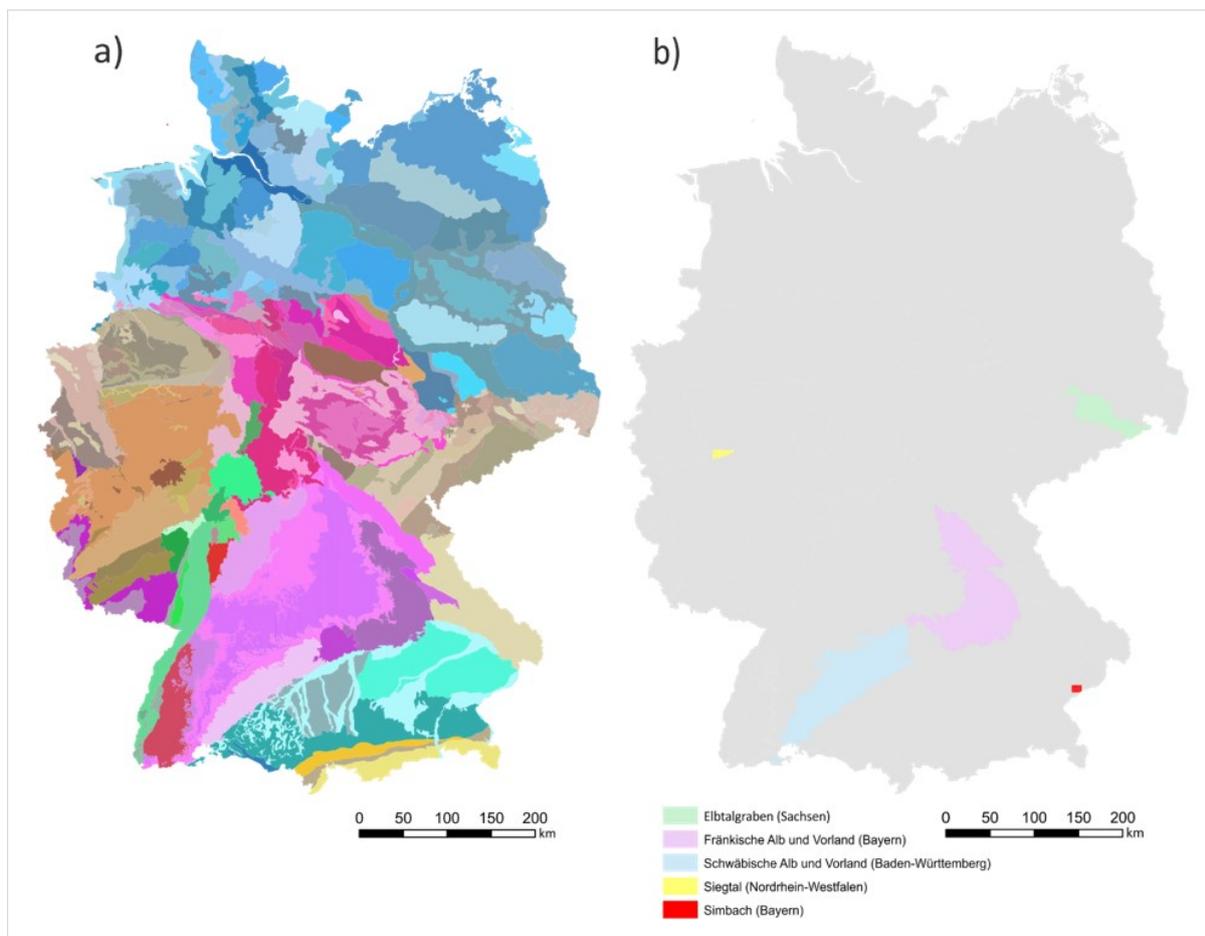


Abb. 2-9: a) Übersicht über die 247 hydrogeologischen Teilräume in Deutschland gemäß [Hydrogeologischer Raumgliederung \(HYRAUM\), Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015](#) und b) die auf deren Abgrenzung ausgewählten fünf Testgebiete im MBiD-Projekt.

Tab. 2-8: Überblick über die fünf Testgebiete im MBiD-Projekt, die zugrundeliegenden Auswahl- und Abgrenzungskriterien und die zur Verfügung stehenden Massenbewegungsinventare der jeweiligen SGD.

Testgebiet (Bundesland): Flächengröße in km ²	Auswahl- und Abgrenzungskriterien	Inventar an Massenbewegungen (Quelle: jeweiliger SGD ¹⁸)
Schwäbische Alb und Vorland (Baden-Württemberg): 7349	Zwei hydrogeologische Teilräume, die geomorphologisch eine Einheit bilden und für das LGRB Baden-Württemberg hinsichtlich der Gefährdungsabschätzung von Massenbewegungen ein Schwerpunktgebiet der Bearbeitung darstellen.	<ul style="list-style-type: none"> • 4761 Rutschungen • 7577 Felsstürze
Fränkische Alb und Vorland (Bayern): 8535	Zwei hydrogeologische Teilräume, die geomorphologisch eine Einheit bilden und in denen Massenbewegungen durch das LfU Bayern intensiv kartiert und mit Bezug zur regionalen Gefährdung analysiert werden.	<ul style="list-style-type: none"> • 1632 Rotations- und kombinierte Rutschungen • 220 Translationsrutschungen • 350 Sturzprozesse

¹⁸ Die Klassifikation der Massenbewegungstypen in Deutschland weist regionale Abweichungen auf, so dass eine Vergleichbarkeit nicht zwangsläufig gegeben ist. Daher werden in den Fallstudien die Bezeichnungen der jeweiligen SGD genutzt.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

<i>Testgebiet (Bundesland): Flächengröße in km²</i>	<i>Auswahl- und Abgrenzungskriterien</i>	<i>Inventar an Massenbewegungen (Quelle: jeweiliger SGD¹⁸)</i>
<i>Elbtalgraben (Sachsen): 1948</i>	Hydrogeologischer Raum mit acht Teilräumen, die eine regionalgeologisch-tektonische Einheit bilden und für die das Inventar an Massenbewegungen durch das <i>LfULG</i> Sachsen systematisch erfasst wird. Eine regionale Gefährdungsabschätzung wurde noch nicht durchgeführt.	<ul style="list-style-type: none"> • 369 Sturzprozesse • 68 Rutschprozesse • 26 Fließprozesse
<i>Simbach am Inn (Bayern): 89</i>	Testregion mit einer signifikanten Anzahl von Hanganbrüchen, die nach einer längeren, intensiven Niederschlagsperiode und einem lokalen Starkregenereignis im Sommer 2016 verursacht wurden. Aus diesem Grund wurde das Testgebiet vom <i>LfU</i> Bayern vorgeschlagen.	<ul style="list-style-type: none"> • 121 Hanganbrüche
<i>Siegtal (Nordrhein-Westfalen): 177</i>	Testregion, in der lokale Starkregenereignisse flache Rutschungen ausgelöst haben. Eine lokale Gefährdungsabschätzung durch den <i>GD NRW</i> steht noch aus.	<ul style="list-style-type: none"> • 10 flache Rutschungen nach Niederschlagsereignissen (in der lokalen Presse thematisiert)

2.5 Informationsebenen und Parameter: Verfügbarkeit und Maßstabsbezug

Eine deutschlandweite oder jegliche regionale (z. B. bundeslandweite) Abschätzung der Gefährdung durch Massenbewegungen erfordert homogenisierte Datensätze, auf deren Grundlage die Analysen durchgeführt werden können.

Das Auftreten von Massenbewegungen wird durch räumlich sehr unterschiedlich ausgeprägte Parameter, die häufig im Kontext der Analyse auch als Faktoren oder unabhängige Variablen bezeichnet werden, beeinflusst.

Die Parameter können direkt oder indirekt aus thematischen Informationsebenen gewonnen werden. Die Nutzung von regionalspezifischen Parametern sowie ihre Ableitung und Kombination aus den verschiedensten Informationsebenen stellt eine wesentliche Herausforderung bei der Anwendung statistischer Verfahren dar. Somit ist die Betrachtung der räumlichen Aussagekraft von erstellten Modellen auch maßgeblich vom Generalisierungsgrad der verfügbaren thematischen Informationsebenen abhängig.

Um zu ergründen, inwieweit homogene Datensätze in verschiedenen Maßstäben für derartige Analysen herangezogen werden können, wurden alle relevanten und zugänglichen Informationsebenen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zusammengestellt. Sie beschreiben die inhärenten Eigenschaften eines betrachteten Ausschnitts der Erdoberfläche (Tab. 2-9) und repräsentieren topographische, morphologische, geologische, bodenkundliche, hydrologische und klimatische Entitäten. Alle Daten liegen im Koordinatensystem ETRS89/UTM Zone 32N (EPSG 25832) vor.

Dabei ist ausdrücklich zu betonen, dass keine der vorliegenden Informationsebenen unter der Prämisse erarbeitet wurde, räumliche Auftretenswahrscheinlichkeiten gravitativer Massenbewegungen zu analysieren!

Die zusammengestellten Informationen repräsentieren thematische Ebenen, die entweder direkt als potenzielle Parameter in den Analysen eingesetzt werden können oder aus denen sich Parameter indirekt ableiten lassen.

Im letzteren Fall bezeichnet man die thematischen Ebenen als Proxys. Dabei handelt es sich um Parameter, die einfach zu beobachten sind, deren räumliche Verteilung hinreichend bekannt ist und die stellvertretend für einen tatsächlichen Einflussfaktor, der nur schwer feststellbar ist oder dessen räumliche Verteilung nicht genau bekannt ist, in die Analyse integriert werden.

Die verfügbaren thematischen Ebenen sind Produkte umfassender räumlich-geometrischer und inhaltlicher Generalisierung (Aggregation). Die DGM10 und DGM25 wurden unter anderem auf der Grundlage der topographischen Karte 1 : 10 000 bis 1 : 25 000 erarbeitet und besitzen eine Anwendungsgültigkeit für den Maßstabsbereich 1 : 50 000 bis 1 : 100 000.

Die geologischen und bodenkundlichen Karten im Maßstab 1 : 25 000 und 1 : 50 000 gelten als Grundlagenkarten. Sie wurden aus Konzeptkarten und Feldaufzeichnungen mit definierter Aufschlussdichte erstellt ([Rossiter, 2000](#); [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie, 2002](#)).

Die UeBK25 stellt ein Produkt deduktiven Kartierens dar, bei dem durch Überlagerung morphologischer und geologischer Information bodenkundliche Inhalte abgeleitet und kartiert wurden.

Die digitale IGK25 ist ein Produkt reiner Aggregation aus der GK25 mit Interpretation der petrologischen Beschreibungen nach ingenieurgeologischen Kriterien.

Die geologischen und bodenkundlichen Parameter im Maßstab 1 : 200 000 bis 1 : 250 000 wurden durch räumlich-geometrische Generalisierung aus Karten im Maßstab 1 : 25 000 bis 1 : 50 000 erarbeitet.

Die HÜK250 ist das Ergebnis der Interpretation der GÜK250-Legendeneinheiten (LE) mit Ableitung und Aggregation hydrogeologischer Attribute.

Geologische Karten grenzen Einheiten nach stratigraphisch-petrologischen Gesichtspunkten voneinander ab, wobei in der Regel die oberen 2 m der Erdoberfläche beschrieben werden.

Die Festigkeitseigenschaften der Gesteine, die einen wesentlichen Parameter in der Analyse zur Rutschungsempfindlichkeit darstellen, müssen nicht zwangsläufig zwischen zwei Einheiten verschieden sein.

Ein weiterer Effekt der Generalisierung besteht darin, dass bereits in den großmaßstäblichen Karten 1 : 25 000 bis 1 : 50 000 geringmächtige Lockergesteinsdecken nicht immer konsequent dargestellt werden können. Je kleinmaßstäblicher die geologische Karte diese Einheiten darstellt, umso stärker kommt der stratigraphische Aspekt der Abgrenzung zum Tragen, wobei heterogene Ablagerungen in einer Legendeneinheit zusammengefasst und beschrieben sind.

Die Bodenkarten beschreiben den gleichen Ausschnitt der Erdoberfläche wie die geologischen Karten. Die Bodenkarten spiegeln näherungsweise den Aufbau der Bodendecke wider, wobei die Böden oft allmählich ineinander übergehen. Die Legendeneinheiten werden durch Bodenformen beschrieben ([s. Kapitel 2.1](#)), die je nach Maßstabsfestlegung in unterschiedlichen Aggregationsniveaus zusammengefasst werden ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005](#)).

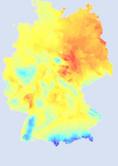
Die Legendeneinheiten der genutzten Bodenkarten liegen als Bodenformen pro Einheit für die Maßstäbe 1 : 25 000 oder 1 : 50 000 vor, die der BÜK200 werden auf dem Niveau der Leitbodengesellschaft beschrieben.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-9: Überblick über die im MBiD-Projekt genutzten thematischen Informationsebenen mit Angaben zur räumlichen Abdeckung, zum Maßstab, zum räumlichen Objekttyp, zum abgeleiteten Parameter und zur Quelle.¹⁹

Informations-ebene (Abkürzung)	Räumliche Abdeckung	Thema, Maßstab bzw. Auflösung	Objekt- typ	Parameter	Quelle ¹⁹
BÜK200		Bodenübersichtskarte von Deutschland (mit Sachdatenbank), 1 : 200 000	Polygon	<ul style="list-style-type: none"> Leitbodengesellschaft Bodenform Bodenphysikalische Kennwerte (Trockenrohdichte, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung) 	BGR
GÜK250		Geologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 250 000	Polygon, Linie	<ul style="list-style-type: none"> Petrologie Tektonische Elemente 	BGR
GÜK1000		Geologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 1 000 000	Polygon	<ul style="list-style-type: none"> Gesteinsgruppen (INSPIRE-konforme Petrographie) 	BGR
BÜK1000		Bodenübersichtskarte von Deutschland, 1 : 1 000 000	Polygon	<ul style="list-style-type: none"> Leitbodenassoziation 	BGR
HÜK250		Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 250 000	Polygon	<ul style="list-style-type: none"> Verfestigung des oberen Grundwasserleiters Durchlässigkeitsbeiwert des oberen Grundwasserleiters 	BGR
CLC10		Corine Landbedeckung von Deutschland (Stand: 2012), Mindestflächengröße 10 ha	Polygon	<ul style="list-style-type: none"> Landbedeckung in drei Ebenen Landnutzung 	BKG
DGM25		Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 25 m x 25 m	Raster	<ul style="list-style-type: none"> Hangneigung Exposition Wölbung 	BKG
DGM10		Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 10 m x 10 m	Raster	<ul style="list-style-type: none"> Hangneigung Exposition Wölbung 	BKG
DLM250		Digitales Landschaftsmodell von Deutschland, 1 : 250 000	Polygon, Linie	<ul style="list-style-type: none"> Straßennetz Schienennetz 	BKG

¹⁹ Tag des Zugriffs für alle Quellen: 23.08.2020.

Informations- ebene (Abkürzung)	Räumliche Abdeckung	Thema, Maßstab bzw. Auflösung	Objekt- typ	Parameter	Quelle ¹⁹
Bodenfeuchte		Vieljährige Raster der monatlichen Bodenfeuchte für Deutschland, Gitterweite 1 km x 1 km	Raster	• Bodenfeuchte	DWD
Niederschlag (REGNIE8110)		30-jährige mittlere Niederschlagshöhe für Deutschland (1981 bis 2010), Gitterweite 1 km x 1 km	Raster	• Niederschlag	DWD
BK50		Bodenkarte von Sachsen (mit Sachdatenbank), 1 : 50 000	Polygon	• Bodenform • Bodenphysikalische Kennwerte (Trockenrohdichte, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung)	LfULG
GK50		Geologische Karte von Sachsen, 1 : 50 000 (Ausschnitt Elbtalkreide)	Polygon	• Petrologie	LfULG
GK100 (L-J-K)		Geologische Karte Lausitz-Jizera- Karkonosze, 1 : 100 000 (Ausschnitt Elbtalkreide)	Polygon	• Petrologie	LfULG
GK25		Geologische Karte von Bayern, 1 : 25 000	Polygon	• Petrologie	LfU
UeBK25		Übersichtsbodenkarte von Bayern (mit Sachdatenbank), 1 : 25 000	Polygon	• Bodenform • Bodenphysikalische Kennwerte (Trockenrohdichte, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung)	LfU
dIGK25		(Digitale) Ingenieurgeologische Übersichtskarte von Bayern, 1 : 25 000	Polygon	• Baugrundtypen	LfU
BK50		Bodenkarte Nordrhein-Westfalen, 1 : 50 000	Polygon	• Bodenform	GD NRW

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

An die Bodenkarten sind in der Regel Sachdatenbanken gekoppelt. Darin werden die Bodenformen durch Profile beschrieben. Neben einer Vielzahl profil- und horizontbezogener bodenkundlicher Parameter existieren standardisierte Beschreibungen der Bodenarten. Die horizontbezogenen Bodenarten bieten die Verknüpfung mit den bodenphysikalischen Eigenschaften Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung.

Die topographischen Ebenen aus dem DLM250 und dem CLC10 führen die Attribute der Bedeckung der Erdoberfläche in Form der Landnutzung.

Die klimatischen Parameter Niederschlagshöhe und Bodenfeuchte sind Produkte der Regionalisierung punktueller Messwerte über Raum und Zeit.

So muss neben der Betrachtung des Zwecks einer thematischen Ebene auch deren Abstraktionsgrad berücksichtigt werden, um den spezifischen Nutzen in der Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit besser abschätzen zu können.

2.6 Fallstudien mit Modellierungsbeispielen

Um die Anwendungsmöglichkeiten der in [Kapitel 2.3](#) vorgestellten Modellierungsmethoden zu überprüfen, wurden in den fünf Testgebieten (s. [Kapitel 2.4](#)) im Rahmen des MBiD-Projekts vier Fallstudien durchgeführt.

Eine Fallstudie besteht aus einem oder mehreren (maximal sechs) Modellierungsbeispielen, in denen die generelle Anwendung einer Modellierungsmethode, ein Methodenvergleich oder spezielle Teilaspekte einer Modellierungsmethode in einem festgelegten Testgebiet beispielhaft untersucht wurden.

In der Summe wurden 14 Modellierungsbeispiele realisiert. Die Teilaspekte behandeln z. B. die Abschätzung der Effekte auf die Modellierungsergebnisse durch Selektion und Modifikation der Modellparameter (Tab. 2-10). Die Ergebnisse jeder Modellierung wurden evaluiert (s. [Kapitel 2.3.6](#)).

Da die Anwendbarkeit einzelner Modellierungsmethoden maßgeblich von der Qualität und Dichte der vorliegenden Informationen abhängt, wurden nicht in allen Testgebieten die gleichen bzw. gleich viele unterschiedliche Modellierungsmethoden eingesetzt.

Das Ziel der vorliegenden Fallstudien war nicht die Erstellung neuer Gefahrenhinweiskarten. Es galt, aufbauend auf bevorzugt deutschlandweit vorhandenen (kleinmaßstäblichen) Informationsebenen, die Mindestanforderungen für die eingesetzten Modellierungsmethoden herauszuarbeiten bzw. zu formulieren.

Darüber hinaus wurden Modellierungsbeispiele integriert, um Vorschläge für die Nutzung und den Einsatz nur regional verfügbarer (großmaßstäblicher) Datengrundlagen abzuleiten.

Darauf aufbauend galt es, praktische Handlungsempfehlungen und Anregungen für eine optimale Nutzung dieser Modellierungsmethoden in den SGD zu entwickeln (s. [Kapitel 3](#)).

Die Tab. 2-10 gibt einen Überblick über die durchgeführten Fallstudien mit Verweis auf das Testgebiet, die Modellierungsbeispiele, die eingesetzten Modellierungsmethoden, die spezifischen Ziel- und Fragestellungen und die verwendeten Informationsebenen. Die Spalte *Rutschungsinventar* gibt an, ob Rutschungsinformationen in den Modellierungsprozess einbezogen wurden. In der Spalte *Kapitel* verknüpft die Nummer das entsprechende Kapitel im Bericht.

Die fortlaufende Nummerierung der Fallstudien in Tab. 2-10 entspricht der chronologischen Reihenfolge, in der die Fallstudien im MBiD-Projekt bearbeitet wurden.

Dabei wurden die Erkenntnisse aus den ersten Fallstudien auf die nachfolgenden Fallstudien übertragen. Durch diese iterative Vorgehensweise sollte die generelle Anwendbarkeit der jeweiligen Modellierungsmethoden auf den kleinsten gemeinsamen Nenner gebracht werden.

In der Fallstudie 4 (Simbach) wurde im Modellierungsbeispiel 4.2 (s. [Kapitel 2.6.4.2](#)) eine Vergleichsstudie unter Integration mehrerer Modellierungsmethoden durchgeführt.

Die Abb. 2-10 komprimiert bzw. visualisiert die wichtigsten Informationen der Tab. 2-10 graphisch.

Im [Kapitel 3](#) werden jenseits der Textbeiträge zu den einzelnen Modellierungsbeispielen (s. [Kapitel 2.6](#)) zusätzliche praktische Hinweise mit empfehlendem Charakter für eine zukünftige Modellierung unter Nutzung der verwendeten Methoden gegeben. Zur besseren Orientierung stellt die Tab. 3-1 den Fallstudien 1 bis 4 die korrespondierenden methodischen Arbeitsabläufe (Workflows) unter Angabe der Kapitelnummern gegenüber.

Mit Abschluss des MBiD-Projekts stehen die aus der Bearbeitung der regionalen Fallstudien 1 bis 4 resultierenden Informationen dem jeweiligen im MBiD-Projekt beteiligten SGD vollumfänglich zur Verfügung. Skripte können bei Bedarf bei der BGR (Fachbereich B4.4, Arbeitsbereich Ingenieurgeologische Gefährdungsanalysen) nachgefragt werden.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-10: Übersicht über die im MBiD-Projekt durchgeführten Fallstudien 1 bis 4 mit den korrespondierenden Modellierungsbeispielen in den fünf Testgebieten (Auflistung in chronologischer Folge der Bearbeitung).

Nummer Fallstudie	Name Testgebiet	Nummer Modellierungsbeispiel	Modellierungsmethode (Abkürzung)	Ziel- und Fragestellung	Verwendete Informationsebenen	Kapitel im Bericht
1	Fränkische Alb und Vorland	1.1	MGE	Vorauswahl von deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (s. Kapitel 2.5) und Ableitung relevanter Parameter/Parameterklassen sowie deren Prüfung im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 • BÜK200 • BÜK1000 • CLC10 • REGNIE8110 	2.6.1.1
		1.2	MGE	Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) durch die Nutzung großmaßstäblicher thematischer Informationsebenen (hier: GK25) (soweit lokal oder regional verfügbar) in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GK25 	2.6.1.2
		1.3	MGE	Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) durch Anpassung der geometrischen Verortung von Massenbewegungen in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 	2.6.1.3
		1.4	MGE	Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) unter Berücksichtigung des Parameters <i>Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen</i> in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 	2.6.1.4
		1.5	MGE	Abschätzung der Auswirkungen einer Maskierung (Ausparung) von Flächen mit geringer Hangneigung in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 	2.6.1.5
	1.6	MGE	Prüfung der Übertragbarkeit eines Hangrutschungsempfindlichkeitsmodells eines Naturraums (Fränkische Alb und Albvorland) in einen geologisch-geomorphologisch vergleichbaren Naturraum (Schwäbische Alb und Albvorland).	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 	2.6.1.6	
2	Elbtalgraben	2.1	MGE	Validierung der Anwendbarkeit der Erkenntnisse aus der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit in den Modellierungsbeispielen 1.1 bis 1.3 sowie 1.5 der Fallstudie 1 (Fränkische Alb und Albvorland) in einem anderen Naturraum (Elbtalgraben) am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK250 • DLM250 • LIK100 • GK50 	2.6.2.1

Nummer Fallstudie	Name Testgebiet	Nummer Modellierungsbeispiel	Modellierungsmethode (Abkürzung)	Ziel- und Fragestellung	Verwendete Informationsebenen	Kapitel im Bericht
3		2.2	AHP	Prüfung der Anwendung eines heuristischen Verfahrens zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode des Analytischen Hierarchieprozesses und Vergleich der Modellergebnisse mit der statistischen Modellierung (Methode der Gewichteten Evidenzen).	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GÜK1000 	2.6.2.2
		2.3	IHM	Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines physikalisch-basierten Verfahrens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Nutzung einer detaillierten Bodenkarte (hier: BK50) am Beispiel der Methode des Infiniten Hangmodells.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM10 • BK50 	2.6.2.3
		2.4	KNN	Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines Verfahrens des Maschinellen Lernens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel eines vorwärts-gerichteten (feed-forward) Künstlichen Neuronalen Netzes.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM25 • GK50 • GÜK250 • CLC10 • Bodenfeuchte 	2.6.2.4
		2.5	KNN	Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines Verfahrens des Maschinellen Lernens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel eines vorwärts-gerichteten (feed-forward) Künstlichen Neuronalen Netzes. Diese Vergleichsstudie der Technischen Universität Berlin zum Modellierungsbeispiel 2.4 fokussiert auf eine objektive Bewertung der Modellierungsergebnisse unter Maßgabe abweichender Modellparametrisierungen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM10 (25) • GÜK250 • CLC10 • Bodenfeuchte 	2.6.2.5
		3.1	IHM	Aufstellung von Verknüpfungsregeln zur Ableitung von regionalen bodenphysikalischen Kennwerten aus der BÜK200; beispielhafte Modellierung der Empfindlichkeit gegenüber Translationsrutschungen.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM10 • BÜK200 	2.6.3.1
4	Simbach	4.1	IHM	Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines physikalisch-basierten Verfahrens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Nutzung von Bodenkarten mit unterschiedlichen Maßstäben (UeBK25; BÜK200) am Beispiel der Methode des Infiniten Hangmodells, einschließlich des Vergleichs der Modellierungsergebnisse.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM10 • UeBK25 • BÜK200 	2.6.4.1
		4.2	IHM MGE LR KNN	Qualitativer Vergleich von Methoden zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit (IHM, MGE, LR, KNN) in <i>einem</i> Testgebiet.	<ul style="list-style-type: none"> • DGM10 • UeBK25 • BÜK200 	2.6.4.2

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Fallbeispiel - Testgebiet	Modellierungsbeispiel					
1 - Fränkische Alb	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
	- Vorauswahl deutschlandweit verfügbarer Informationsebenen: DGM10, DGM25, GÜK250, BÜK200, BÜK1000; CLC10, REGNIE8110); - Ableitung Parameter/-klassen	Prüfung Minderung Generalisierungseffekte: Nutzung größermaßstablicher Informationsebenen, Bezug: DGM25, GK25	Prüfung Minderung Generalisierungseffekte: Anpassung geometrische Verortung Rutschungen, Bezug: DGM25, GÜK250	Prüfung Minderung Generalisierungseffekte: Berücksichtigung Parameter „Distanz zu litho-stratigraphischen Grenzen“, Bezug: DGM25, GÜK250	Abschätzung Auswirkungen bei „Maskierung“ von Flächen mit geringer Hangneigung, Bezug: DGM25, GÜK250	
	Modellierung MGE	Modellierung MGE	Modellierung MGE	Modellierung MGE	Modellierung MGE	
	1.6					
	Prüfung Übertragbarkeit Hangrutschungsmodell (Fränkische Alb) auf vergleichbaren Naturraum (Schwäbische Alb), Bezug: DGM25, GÜK250					
2 - Elbtalgraben	Modellierung MGE					
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
	Validierung Anwendbarkeit Erkenntnisse aus Fallstudie 1 (Modellierungsbeispiele 1.1 bis 1.3 sowie 1.5) in einem anderen Naturraum, Bezug: DGM25, GÜK250, DLM250, LK100, GK50	Prüfung heuristisches Verfahren und Vergleich der Modellergebnisse mit der statistischen Modellierung (MGE), Bezug: DGM25, GÜK1000	Prüfung physikalisch-basiertes Verfahren unter Nutzung detaillierter Bodenkarte, Bezug: DGM10, BK50	Prüfung Anwendung Künstliches Neuronales Netz, CLC10, Bodenfeuchte	Prüfung Anwendung Künstliches Neuronales Netz, (Vergleich mit 2.4) Bezug: DGM10(25), GÜK250, CLC10, Bodenfeuchte	
	Modellierung MGE	Modellierung AHP	Modellierung IHM	Modellierung KNN	Modellierung KNN	
	3.1					
3 - Siegtal	Aufstellung von Verknüpfungsregeln: Ableitung regionaler bodenphysikalischer Kennwerte, Beispiel Translationsrutschungen; Bezug: DGM10, BÜK200					
	Modellierung IHM					
	4.1	4.2				
	Prüfung physikalisch-basiertes Verfahren unter Nutzung von Bodenkarten mit unterschiedlichen Maßstäben und Vergleich, Bezug: DGM10, UeBK25, BÜK200	Qualitativer Vergleich von Methoden in einem Testgebiet, Bezug: DGM10, UeBK25 & BÜK200				
	Modellierung IHM	Modellierung IHM, MGE, LR, KNN				
MGE: Methode der Gewichteten Evidenzen; IHM: infinites Hangmodell; AHP: Analytischer Hierarchieprozess; KNN: Künstliches Neuronales Netz; LR: Logistische Regression						

Abb. 2-10: Graphischer Überblick über die im MBiD-Projekt realisierten Fallbeispiele 1 bis 4 und die korrespondierenden Modellierungsbeispiele in den Testgebieten.

2.6.1 Fallstudie 1: Fränkische und Schwäbische Alb (Bayern und Baden-Württemberg)

In der Fallstudie 1 wurden Einflussfaktoren auf die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Testgebiete Fränkische Alb und Albvorland in Bayern sowie Schwäbische Alb und Albvorland in Baden-Württemberg analysiert.

Die Modellierungsbeispiele basieren ausschließlich auf der Anwendung der statistischen Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) (s. Kapitel 2.3.1).

Die Vorgehensweise während der Modellierung umfasste zwei konsekutive Schritte (s. Kapitel 2.6: Tab. 2-10):

1. In der Fränkischen Alb und Albvorland wurden unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Informationsebenen bzw. Parametern fünf verschiedene Modellierungsbeispiele (1.1 bis 1.5) mit jeweils unterschiedlichen Ziel- und Fragestellungen realisiert.
2. Im Modellierungsbeispiel 1.6 wurde die Übertragbarkeit der in der Fränkischen Alb generierten Modelle auf vergleichbare Naturräume wie die Schwäbische Alb im Sinne einer sogenannten räumlichen Kreuzvalidierung überprüft.

Geologisch-geomorphologischer Überblick

Die Schwäbische- und die Fränkische Alb sind süddeutsche Mittelgebirge mit Schichtstufencharakter und vergleichbarer Flächenausdehnung.

Die lithostratigraphische Sequenz wird durch tonige, kalkige und untergeordnet sandige Sedimentgesteine vom Keuper bis zum jüngsten Jura repräsentiert. Die jurassischen Ablagerungen werden an der Ostflanke der Fränkischen Alb von tonig-sandigen kreidezeitlichen Ablagerungen überdeckt. Die Jura-Ablagerungen der Schwäbischen Alb tauchen in Richtung Donau unter die tertiären Molasse-Ablagerungen ab. Löss und Lösslehm Würm- und teilweise Riß-zeitlichen Alters überlagern in vielen Gebieten die Sedimentgesteine mit einer Mächtigkeit zwischen wenigen Dezimetern und einigen Metern. Hangschuttablagerungen und Fließerden sind weit verbreitet.

Verwendete Inventarinformationen und Informationsebenen

Die Inventare über die Massenbewegungen in den beiden Testgebieten wurden vom LGRB Baden-Württemberg (Schwäbische Alb) (Abb. 2-11) bzw. LfU Bayern (Fränkische Alb) (Abb. 2-12) zur Verfügung gestellt.

Das Inventar für die Fränkische Alb und Albvorland enthält 2202 detektierte Massenbewegungen (Stand: 2018). Es werden drei unterschiedliche Bewegungstypen ausgehalten (s. Kapitel 2.1):

- Rotationsrutschung;
- Translationsrutschung (Abb. 2-13);
- Sturzprozess, in diesem Bericht pauschal als Felssturz bezeichnet (Abb. 2-14).

Die Abrisskanten sind als GIS-Objektarten Polylinien und Punkte repräsentiert. Für die Rotationsrutschungen sind die Rutschungsablagerungen als Polygone verfügbar.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

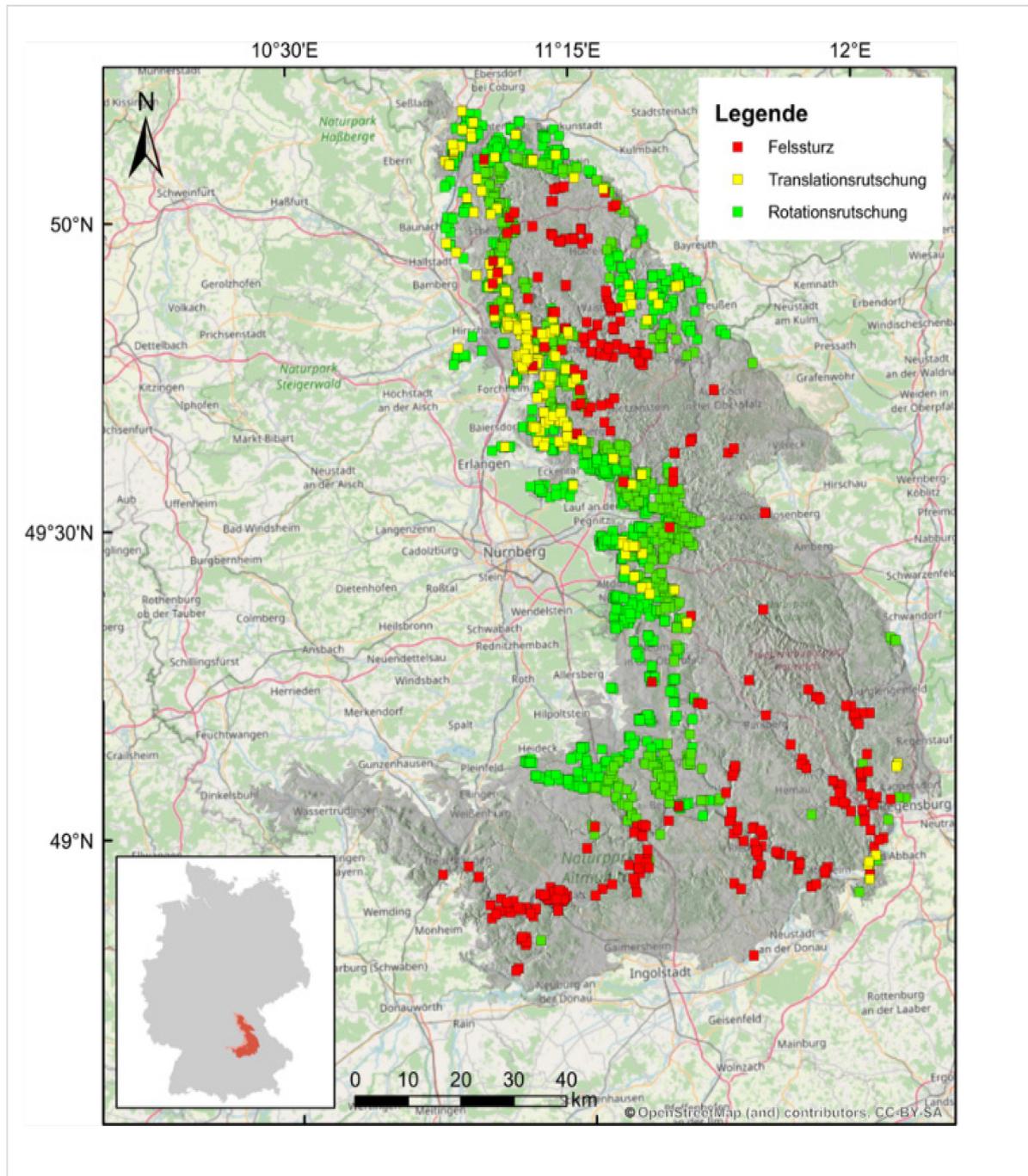


Abb. 2-11: Topographischer Kartenausschnitt der Fränkischen Alb und Albvorland, überlagert mit der Schummerungsdarstellung des DGM25 sowie der Punktdarstellung der kartierten Massenbewegungen unterschiedlichen kinematischen Bewegungstyps (Quellen: Inventar – LfU Bayern; Topographie – OpenStreetMap contributors; CC-BY-SA; Tab. 2-9).

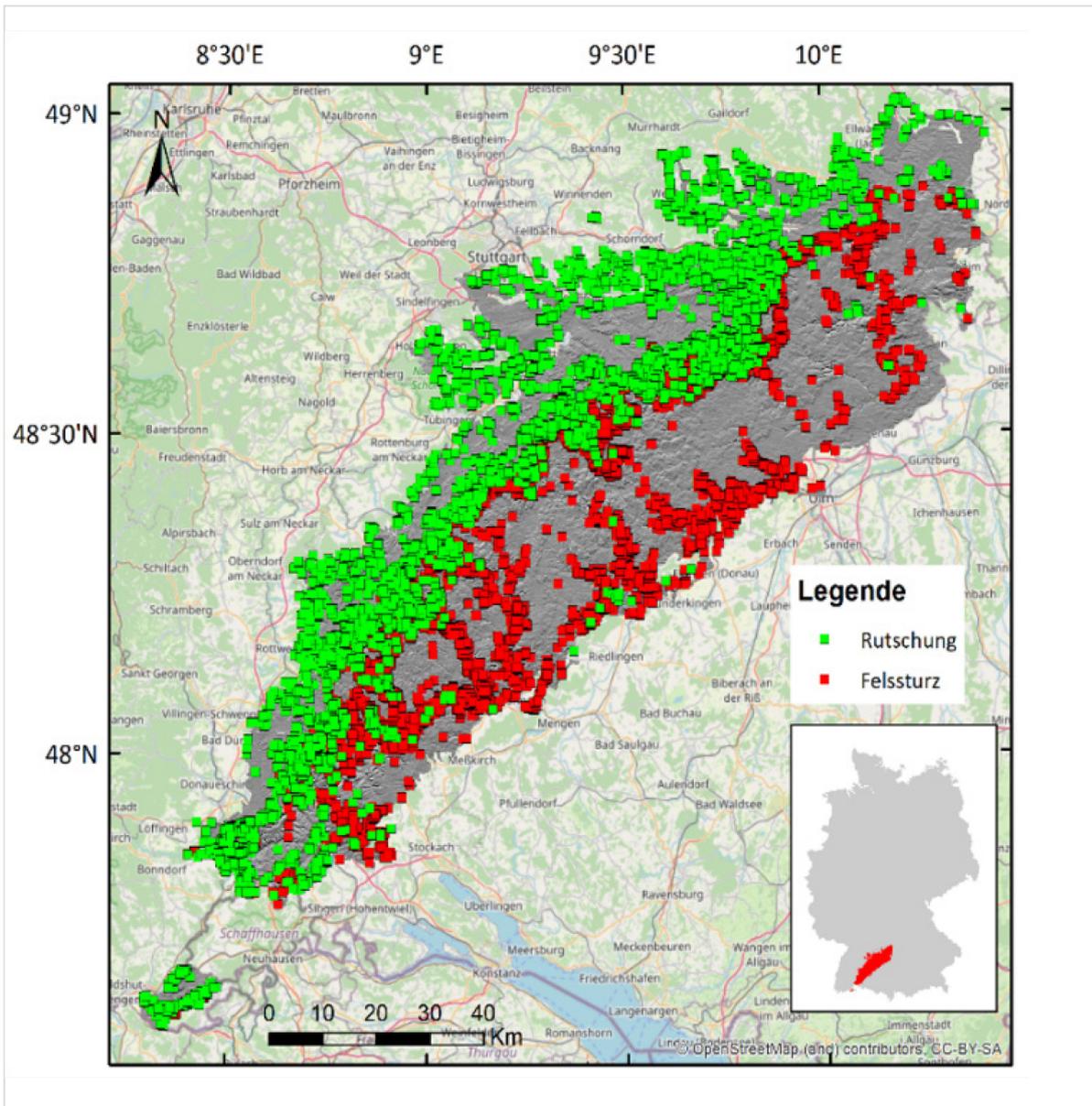


Abb. 2-12: Topographischer Kartenausschnitt der Schwäbischen Alb und Albvorland, überlagert mit der Schummerungsdarstellung des DGM25 sowie der Punktdarstellung der kartierten Massenbewegungen unterschiedlichen kinematischen Bewegungstyps (Quellen: Inventar – LGRB Baden Württemberg; Topographie – OpenStreetMap contributors; CC-BY-SA; Tab. 2-9).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit



Abb. 2-13: Risse und Schollen im Anbruchbereich der 75 m breiten Translationsrutschung bei Döringstadt (Landkreis Lichtenfels, Bayern) mit einem Tiefgang von ca. 2 bis 3 m über Amaltheenton-Formation im Jahr 2012 (Landkreis Lichtenfels, Bayern), Foto: Johannes Wiedenmann (im Auftrag des LfU Bayern).



Abb. 2-14: Felssturz in Pottenstein (Landkreis Bayreuth, Bayern) mit etwa 5 bis 10 m³ Volumen am 15.04.2008, Foto: Markus Kügler (LfU Bayern).

Das Inventar für die Schwäbische Alb und Albvorland weist aktuell 12 338 Ereignisse auf, die allgemein unterteilt werden in:

- Rutschung (Abb. 2-15);
- Felssturz (Abb. 2-16).

Alle Ereignisse sind im GIS als Objektart Polygon verfügbar. Tab. 2-11 gibt einen Überblick über die thematischen Informationsebenen (s. Kapitel 2.5) und Parameter bzw. Parameterklassen, die in die engere Auswahl zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit (Modellierungsbeispiele 1.1 bis 1.5) einbezogen wurden. Abb. 2-17 zeigt die räumliche Verteilung der Parameter bzw. Parameterklassen.

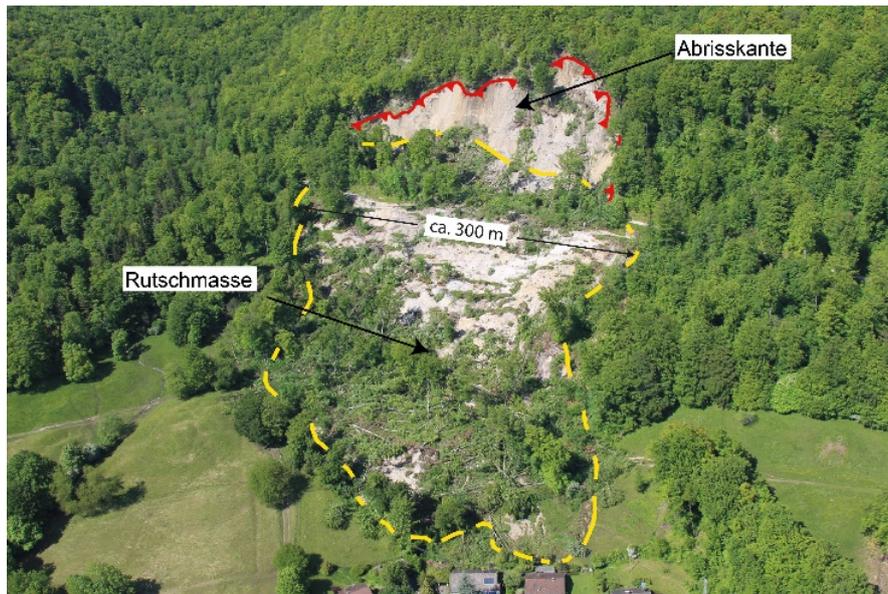


Abb. 2-15: Rotationsrutschung/Kombinierte Rutschung am Dachslochberg oberhalb der Landhaussiedlung bei Mössingen-Öschingen (Landkreis Tübingen, Baden-Württemberg) vom 02.06.2013; max. ca. 300 m breit, bis zu ca. 500 m lang; Kubatur ca. 500 000 m³ (Foto: Polizeihubschrauberstaffel Baden-Württemberg, 07.06.2013).



Abb. 2-16: Felssturz am Plettenberg bei Ratshausen (Zollernalbkreis, Baden-Württemberg) vom 09.03.2013; Breite des Abbruchbereichs ca. 50 m, maximale Reichweite des Felssturzprozesses ca. 150 m, Kubatur des Felssturzes ca. 300 m³; Geologie der abgestürzten Felsmassen: Wohlgeschichtete Kalke-Formation (joW); im Aufschlagsbereich der Sturzmassen wurde in der Lockergesteinsauflage (Hangschutt- und ältere Sturzmassen) eine Translationsrutschung ausgelöst (Foto: Polizeihubschrauberstaffel Baden-Württemberg, 10.03.2013).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-11: Verwendete Informationsebenen und gewählte Parameter/Parameterklassen für die Modellierungsbeispiele 1.1 bis 1.5 zur Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit in der Fränkischen Alb und Albvorland (Quellenangaben: Tab. 2-9).

Informationsebene (Abkürzung)	Thema, Maßstab bzw. Auflösung	Parameter/ Parameterklasse	Anzahl Klassen
DGM25	Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 25 m x 25 m	• Hang25 – Hangneigungsklassen in 5°-Einteilung	12
		• Aspekt25 – Hangexposition in 45°-Einteilung	8
		• Kurv25 – Hangkrümmung in 5 Quantil-Klassen	5
GÜK250	Geologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 250 000	• Klassen nach petrographischer Beschreibung	140
GK25*	Geologische Karte von Bayern, 1 : 25 000	• Klassen nach petrographischer Beschreibung	246
BÜK1000	Bodenübersichtskarte von Deutschland, 1 : 1 000 000	• Leitbodentypen und Ausgangs- gesteine	14
BÜK200	Bodenübersichtskarte von Deutschland (mit Sachdatenbank), 1 : 200 000	• Leit- und Begleitbodenformen (Legendeneinheiten)	79
CLC10	CORINE Landbedeckung von Deutschland (Stand: 2012), Mindestflächengröße 10 ha	• Klassen der Landnutzung in Ebene 3	27
REGNIE8110	30-jährige mittlere Niederschlagshöhe für Deutschland (1981 bis 2010), Gitterweite 1 km x 1 km	• Klassen des Jahresniederschlags in 50 mm-Einteilung	10

*Nicht flächendeckend verfügbar, nur im Modellierungsbeispiel 1.2 (s. Kapitel 2.6.1.2) verwendet.

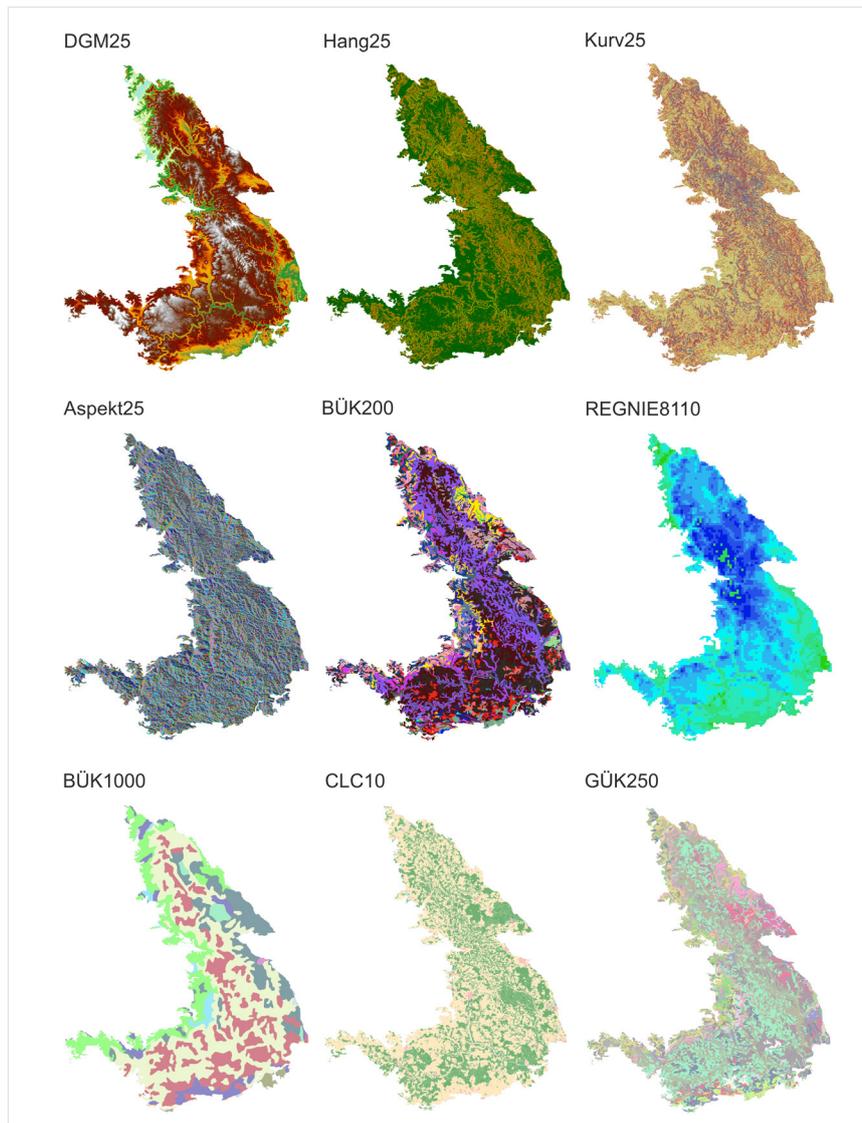


Abb. 2-17: Darstellung der räumlichen Verteilungsmuster der potenziellen Parameter/Parameterklassen für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit in der Fränkischen Alb und Albvorland (Abkürzungen: Tab. 2-11; Quellenangaben: Tab. 2-9).

2.6.1.1 Modellierungsbeispiel 1.1

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Vorauswahl von deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (s. Kapitel 2.5) und Ableitung relevanter Parameter/Parameterklassen sowie deren Prüfung im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 1.1 wurde die Hangrutschungsempfindlichkeit in der Fränkischen Alb und Albvorland unter Berücksichtigung der nach Bewegungstypen differenzierten Inventare (Rotationsrutschung, Translationsrutschung und Felssturz) anhand von deutschlandweit einheitlich verfügbaren Informationsebenen – DGM25, BÜK1000, GÜK250, BÜK200, CLC10 und REGINE8110 – analysiert.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Methodische Vorgehensweise

Die Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) wurde im [Kapitel 2.3.1](#) eingeführt.

Die Ableitung der Parameter aus den verfügbaren Informationsebenen (Tab. 2-11) bildete die notwendige Voraussetzung für die nachfolgenden Analyseschritte.

Aus dem DGM25 wurden die Parameter Hangneigung (Hang25), Hangkrümmung (Kurv25) und Hangexposition (Aspekt25) bestimmt.

Bei diesen Datensätzen handelt es sich um kontinuierliche Rasterdaten, die für die Analyse mit MGE in diskrete Parameter durch Unterteilung in Klassen überführt wurden. Die Hangneigung wurde in 5°-Hangneigungsklassen, die Hangkrümmung in fünf Quantile und die Hangexposition in acht 45°-Klassen (Azimut) unterteilt.

Eine ähnliche Klassifizierungsprozedur wurde mit den regionalen Niederschlagsdaten der Informationsebene REGNIE8110 durchgeführt. Die Klasseneinteilung erfolgte hier in Niederschlagsklassen mit 50 mm Schrittweite.

Bei den restlichen Informationsebenen handelt es sich um diskrete Daten, in denen die Parameterklassen durch die thematische Strukturierung bereits vorgegeben sind.

Die einzelnen Parameter wurden mittels der Methode der Gewichteten Evidenzen zunächst unabhängig voneinander auf einen statistischen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen untersucht. Im Ergebnis lassen sich statistische Gewichte bestimmen, die angeben, inwieweit die Dichte der Rutschungsereignisse in einer Parameterklasse (die Anzahl der Ereignisse pro Flächeneinheit innerhalb der Parameterklasse) größer ist als der durchschnittliche Erwartungswert (die Anzahl der Ereignisse pro Flächeneinheit im gesamten Testgebiet).

Negative statistische Gewichte deuten auf eine geringere Dichte als der durchschnittliche Erwartungswert hin. Positive statistische Gewichte deuten auf eine höhere Dichte und damit einen potenziellen Beitrag der Parameterklasse zur Rutschungsempfindlichkeit hin.

Werte größer 1 bzw. kleiner -1 können als statistisch signifikant angesehen werden. Statistische Gewichte nahe null indizieren keinen Einfluss der jeweiligen Parameterklasse.

Da die statistischen Gewichte logarithmisch sind, nimmt der Einfluss mit zunehmendem Gewichtswert exponentiell zu. So indiziert ein Gewichtswert von 2, dass etwa siebenmal ($e^2 \approx 7$) so viele Ereignisse in der Parameterklasse vorkommen als durchschnittlich erwartet werden. Ein Gewichtswert von 5 ist bereits ca. 148-mal größer als der durchschnittliche Erwartungswert. Damit ist das statistische Gewicht von 5 nicht etwa 2,5-mal größer als das Gewicht von 2, sondern übersteigt es um den Faktor 20.

Für die Bestimmung der statistischen Gewichte wurden 80 % des Rutschungsinventars, der sogenannte Trainingsdatensatz oder das Trainingsinventar, verwendet. Die restlichen 20 % der Ereignisse bilden den Testdatensatz oder das Testinventar, mit dem das Modell später validiert wurde. Die Aufgliederung in Training- und Testinventar erfolgte randomisiert.

Um die Unsicherheiten bei der Bestimmung der statistischen Gewichte besser abschätzen zu können, wurden aus dem Trainingsinventar 100 Stichproben jeweils mit einem Umfang von 80 % der im Trainingsinventar enthaltenen Rutschungsereignisse gezogen. Somit ist der bestimmte Gewichtswert ein

Mittelwert aus 100 Analysen, die auf Stichproben basieren. Die Unsicherheiten werden durch die Streuung (auch Varianz) der Gewichtswerte in den jeweiligen Stichproben angegeben.

Die gewichteten Parameter wurden anschließend in unterschiedlichen Kombinationen zu einem gewichteten Modell überlagert. Die Anzahl der Parameterklassenkombinationen, die mit jedem zusätzlichen Parameter im Modell ansteigt, spiegelt die Komplexität des Modells wider.

Die generelle statistische Relevanz der einzelnen Parameter und der überlagerten Modelle wurden mittels der Grenzwertoptimierungskurve (ROC-Kurve) evaluiert (s. Kapitel 2.3.6). Der AUC-Wert aus den ROC-Kurven ermöglicht einen Vergleich der einzelnen Parameter und der generierten Modelle.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die meisten involvierten thematischen Ebenen einen mäßigen bis starken statistischen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen aufweisen.

Anhand der AUC-Werte aus der statistischen Evaluierung mittels der ROC-Kurve kann bereits belegt werden, dass vor allem die Hangneigung (Hang25) sowie geologische und bodenkundliche Informationen der GÜK250 und BÜK200 den größten Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Massenbewegungen leisten können (Tab. 2-12). Dabei ist zu unterscheiden, ob die Evaluierung mit dem Trainingsinventar oder mit dem Testinventar erfolgt. Da das Trainingsinventar bei der Bestimmung der statistischen Gewichte verwendet wurde, kennzeichnet eine Evaluierung anhand dieser Daten die Fähigkeit des Modells, bekannte Ereignisse zu erklären und zeigt, wie stark das Modell an die Trainingsdaten angepasst werden konnte.

Das Testinventar stellt für das Modell *unbekannte* Rutschungsereignisse dar. Die Evaluierung mit dem Testinventar zeigt daher die sogenannte Generalisierung (Allgemeingültigkeit) oder auch die Vorhersagequalität des Modells für neue Rutschungsereignisse an. Die Kennwerte aus dieser Evaluierung haben somit eine größere Bedeutung bei der Beurteilung eines Modells. Sie sollten nur im Rahmen der bestimmten Modellunsicherheiten von der Modellgüte des am Trainingsinventar evaluierten Modells abweichen. Zu starke Abweichungen können auf eine Überanpassung (engl.: overfitting) des Modells hindeuten, d. h. das Modell passt sich zu genau dem Trainingsdatensatz an, so dass bereits kleine Abweichungen davon zu großen Fehlern führen. Eine weiterführende Interpretation der Ergebnisse über die statistischen Kennzahlen der ROC-Kurven hinaus erfordert eine detaillierte Betrachtung der statistischen Gewichte der jeweiligen Parameter/Parameterklassen. Diese gibt Aufschluss über die Modellplausibilität und damit über mögliche kausale Zusammenhänge (Abb. 2-18).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-12: Modellierungsbeispiel 1.1: Bewertung der einzelnen Parameter anhand der AUC-Werte für die unterschiedlichen Typen von Massenbewegungen in der Fränkischen Alb und Albvorland.

Parameter	Parameterklassen: Anzahl	AUC-Wert nach Massenbewegungstyp für Trainings- und (Testinventar)		
		Rotations- rutschung	Translations- rutschung	Felssturz
Hang25	12	0,93 ± 0,00 (0,93)	0,89 ± 0,04 (0,87)	0,96 ± 0,02 (0,96)
Aspekt25	8	0,57 ± 0,02 (0,54)	0,60 ± 0,03 (0,61)	0,62 ± 0,03 (0,59)
Kurv25	5	0,79 ± 0,01 (0,79)	0,74 ± 0,03 (0,77)	0,80 ± 0,02 (0,79)
GÜK250	140	0,87 ± 0,02 (0,87)	0,90 ± 0,04 (0,83)	0,80 ± 0,03 (0,80)
BÜK200	80	0,78 ± 0,01 (0,79)	0,85 ± 0,02 (0,79)	0,84 ± 0,02 (0,85)
BÜK1000	14	0,70 ± 0,01 (0,69)	0,73 ± 0,03 (0,67)	0,73 ± 0,02 (0,75)
CLC10	13	0,81 ± 0,01 (0,80)	0,80 ± 0,02 (0,82)	0,82 ± 0,02 (0,81)
REGNIE8110	9	0,70 ± 0,02 (0,71)	0,70 ± 0,03 (0,72)	0,60 ± 0,03 (0,53)

Für den Parameter Hangneigung (Hang25) zeigen die statistischen Gewichte der Hangneigungsklassen einen typischen Verlauf (Abb. 2-18). Sie werden mit steigender Hangneigung größer und werden je nach Typ der betrachteten Massenbewegung ab einer Hangneigung zwischen 15° und 20° mit Werten > 1 signifikant. Mit steiler werdenden Hängen (> 35°) ist auch eine Erhöhung der Streuung der Gewichte zu beobachten (erkennbar an den langgezogenen Formen der sogenannten Geigendiagramme²⁰ in der Abb. 2-18), die vor allem mit geringen Flächenanteilen der jeweiligen Hangneigungsklassen in der räumlichen Verteilung und auch geringerer Anzahl an Beobachtungen einhergeht.

Die Streuungen in den Gewichten entstehen in der Bestimmung der Gewichte anhand einer Reihe von zufälligen Stichprobe der Ereignisse. Liegen wenige Ereignisse innerhalb einer sehr kleinen Klasse vor, können diese bereits eine höhere Dichte (Anzahl der Ereignisse pro Flächeneinheit) und damit ein höheres Gewicht erzeugen. Werden zufällig aus dieser Klasse keine Ereignisse gezogen, liegt das Gewicht im Bereich des durchschnittlichen Erwartungswerts. Diese Streuung kann verstärkt werden, wenn die Rutschungsflächen im GIS als Polygone vorliegen, die in der rasterbasierten Analyse natürliche Cluster bilden. Die Gewichte nahe null in Klassen sehr steiler Hangneigung erklären sich dadurch, dass in diesen Hangneigungsklassen keine Beobachtungen vorliegen (Abb. 2-18).

Die Verteilung der statistischen Gewichte für Hangneigungsklassen unterscheidet sich mit dem betrachteten Massenbewegungstyp.

²⁰ Ein Geigendiagramm (engl.: violin plot) ist ein Diagramm zur Visualisierung von Verteilungen von Messwerten. Der Körper des Geigendiagramms zeigt die Dichteverteilung der Messwerte. Ein langgestrecktes Geigendiagramm deutet auf eine große Streuung der Werte hin. Ein gedrungenes Geigendiagramm indiziert nah beieinanderliegende Messwerte.

Felsstürze treten natürlicherweise an steileren Hängen als Translations- und Rotationsrutschungen auf. Der Anstieg der statistischen Gewichte für Felsstürze ist kontinuierlich und annähernd linear bis zu den höchsten Hangneigungsklassen, die durch Beobachtungen belegt sind.

Für Rotations- und Translationsrutschungen lässt sich dagegen eine deutliche Abflachung der Kurve zu den höheren Hangneigungsklassen beobachten.

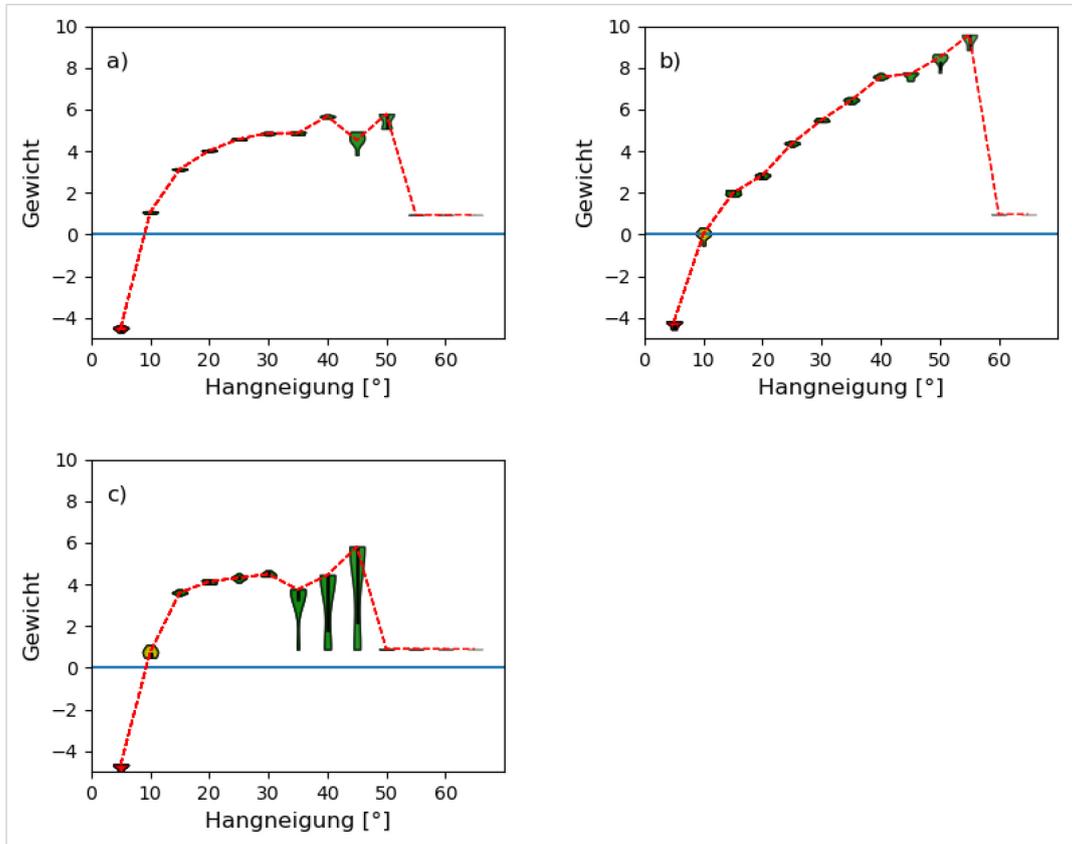


Abb. 2-18: Modellierungsbeispiel 1.1: Gewichte der Hangneigungsklassen; **a)** Gewichte der Hangneigungsklassen für Rotationsrutschungen; **b)** Gewichte der Hangneigungsklassen für Felsstürze; **c)** Gewichte der Hangneigungsklassen für Translationsrutschungen. Die farbliche Unterteilung der Geigenplots durch die Ampelfärbung steht für die Signifikanz der Gewichte, wobei die grün gefärbten Geigenplots Gewichte ≥ 1 kennzeichnen, gelb gefärbte keine Signifikanz besitzen und die rot gefärbten für signifikant negative Gewichte ≤ -1 stehen. Die blaue horizontale Linie entspricht dem Null-Gewicht, der den durchschnittlichen Erwartungswert im Testgebiet charakterisiert.

In den Tab. 2-13 (Rotationsrutschung), Tab. 2-14 (Translationsrutschung) und Tab. 2-15 (Felssturz) sind für die unterschiedlichen Bewegungstypen von Massenbewegungen die weiteren Parameter und dazu die Parameterklassen aufgelistet, die positive Gewichte $> 0,5$ besitzen.

Die Einheiten der GÜK250 werden durch die petrographische Beschreibung repräsentiert. Dieser Information ist eine ein- bis vierstellige Nummer vorangestellt. Dabei handelt es sich um einen eindeutigen Code für das Feld *Petrographie* (PET_ID) in der Attributtabelle der Sachdatenbank der GÜK250. Die Einheiten der BÜK200 und BÜK1000 sind nur durch den substratsystematischen Teil der Legendenbeschreibung bezeichnet.

Andere Parameter führen Klassenbezeichnungen, die selbsterklärend sind.

Die in den Tab. 2-13, Tab. 2-14 und Tab. 2-15 verwendeten Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der jeweiligen Legendenbeschreibung im Inhalt bzw. in der Schreibweise unverändert übernommen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-13: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Rotationsrutschungen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).

Informations- ebene bzw. Parameter	Parameterklasse: Beschreibung*	Statistisches Gewicht
GÜK250	448: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	3,1
	4347: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, vorwiegend Bankkalk, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	2,9
	4359: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	1,9
	4628: oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bankkalk, teilweise Mergel und Mergelkalk	1,9
	4346: Tonschiefer, schluffig bis sandig, teilweise flaserig, teilweise kalkhaltig, Schluffstein, teilweise sandig, Sandstein	1,8
	1882: Sandstein, feinkörnig, Eisenerz-Flöze	1,6
	709: Bankkalk, unten Mergelkalkstein	1,6
	395: Sandstein, feinkörnig, Eisenerz-Flöze, in der Mitte Kalksandstein, teilweise oolithisch, Mergelstein	1,5
	1881: Kalksandstein, teilweise oolithisch, Mergelstein, Kalkstein, oben Tonstein	1,4
	394: oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bankkalk	1,4
	9: klastisches Sediment, lehmig, steinig	1,3
	449: Sandstein, vorwiegend feinkörnig, oben Tonstein, Mergelstein und Kalkstein	1,3
	5032: Kalkstein, lokal dolomitisch	1,1
	399: Sandstein, Tonstein-Linsen	1,0
	350: Tonstein	0,8
	BÜK200	... aus sandigem Verwitterungsmaterial aus Sandstein des Dogger
... Kalkniedermoore, vorherrschend über Lehm und Kies		2,8
... aus z. T. grusführendem Sand über grusigem Verwitterungssand bis -sand-lehm aus Sandstein des Rhät oder Sandsteinkeuper, selten über Sandstein		2,7
... aus sandigem bis lehmig-sandigem Verwitterungsmaterial aus Sandstein des Dogger und des Lias		2,6
... aus (flachem) Sand über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Rhät oder Sandsteinkeuper		2,5
... aus Carbonatgesteinsschutt und -verwitterung des Malm		2,3
... aus überwiegend carbonatischem, lehmigem bis tonigem Hangschutt		2,3
... aus sandigem bis lehmig-tonigem Hangschuttmaterial des Lias und Dogger		2,3
... aus Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Lias oder Dogger, verbreitet aus flachem Schluff oder Lehm über Verwitterungslehm oder -ton		2,1

<i>Informations- ebene bzw. Parameter</i>	<i>Parameterklasse: Beschreibung*</i>	<i>Statistisches Gewicht</i>
	... aus Flugsand oder (grusigem) Decksand über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Dogger oder Keuper	2,1
	... aus carbonathaltigem, sandigem Verwitterungsmaterial aus Kalkmergelstein und Kieselkalk der Kreide	2,0
	... aus Flugsand	1,9
	... aus Lösslehm über Verwitterungslehm-Fließerde auf Altmoräne, Hochterrassen- und Deckenschotter	1,9
	... aus Lösslehm, selten Kolluvisole aus umgelagertem Lösslehm	1,8
	... aus Sand über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein, gering verbreitet über Verwitterungssand bis -sandlehm aus Sandstein des Rhät oder Sandsteinkeuper	1,8
	... aus Lehm oder Lösslehm über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Lias und des Dogger	1,6
	... aus Flugsand	1,5
	... aus carbonatfreien, sandigen bis kiesig-sandigen Substraten	1,3
	... aus Flugsand oder Tertiärsand über Carbonatgestein und Carbonatgesteinsverwitterung des Malm	1,3
	... aus Lösslehm, verbreitet mit Anteilen an Fremdmaterial unterschiedlicher Herkunft	0,9
	... aus carbonatfreien überwiegend (kiesig) lehmigen, verbreitet (kiesig) sandigen Fluss- oder Talablagerungen	0,7
	... aus carbonatfreien, sandig-lehmigen bis schluffig-lehmigen Talablagerungen**	0,6
<i>BÜK1000</i>	... aus Verwitterungsprodukten von Mergel- und Tongesteinen	1,2
	... aus sandigen bis tonigen Flusssedimenten im kleinräumigen Wechsel	0,5
<i>CLC10</i>	Broad-leaved forest	2,2
	Mixed forest	0,8
<i>REGNIE8110</i>	950 bis 1000 mm	1,1
	900 bis 950 mm	1,0
	1000 bis 1050 mm	0,8
<i>Kurv25</i>	Konvexe Hänge	1,8

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der jeweiligen Legende unverändert übernommen; **Überzeichnung der Talablagerungen in der Hochfläche.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-14: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Translationsrutschungen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).

Informations- ebene bzw. Parameter	Parameterklasse: Beschreibung*	Statistisches Gewicht
GÜK250	448: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	3,1
	449: Sandstein, vorwiegend feinkörnig, oben Tonstein, Mergelstein und Kalkstein	2,2
	9: klastisches Sediment, lehmig, steinig	2,1
	4346: Tonschiefer, schluffig bis sandig, teilweise flaserig, teilweise kalkhaltig, Schluffstein	2,1
	350: Tonstein	1,4
	450: Tonstein, Schiefer-ton, bituminös, Mergelstein, Kalkstein-Bänke	1,3
	4347: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, vorwiegend Bankkalk, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	1,3
BÜK200	... aus Sand über Verwitterungssand bis -sandlehm, selten über Sandstein des Dogger	3,4
	... aus überwiegend carbonatischem, lehmigem bis tonigem Hangschutt, selten Braunerden aus sandigem Hangschutt	2,5
	... aus Lehm oder Lösslehm über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Lias und des Dogger	2,5
	... aus Flugsand oder (grusigem) Decksand über Verwitterungslehm oder -ton aus Schluff- und Tonstein des Dogger oder Keuper	2,2
	... aus Carbonatgesteinsschutt und -verwitterung des Malm	1,6
	... aus lehmigem bis tonigem Verwitterungsmaterial aus Tonstein des Dogger und des Lias, örtlich mit sandiger oder schluffig-lehmiger Deckschicht	1,3
BÜK1000	... aus Verwitterungsprodukten von Mergel- und Tongesteinen	1,6
CLC10	Broad-leaved forest	2,1
	Fruit trees and berry plantations	1,4
	Mixed forest	0,9
	Transitional woodland-shrub	0,6
REGNIE8110	950 bis 1000 mm	1,3
	900 bis 950 mm	1,0
Kurv25	Konvexe Hänge	1,4

*Die Inhalte der Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der jeweiligen Legende unverändert übernommen.

Tab. 2-15: Modellierungsbeispiel 1.1: Parameterklassen mit positiven Gewichten, die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Felsstürzen liefern (GÜK250: Parameterklasse mit Angabe der PET_ID).

Informations- ebene bzw. Parameter	Parameterklasse: Beschreibung*	Statistisches Gewicht
GÜK250	1670: Algen-Schwamm-Kalkstein, massig	1,8
	9999: keine Angaben	1,8
	1880: Dolomitstein, massig	1,7
	4632: Dolomitstein, tafelbankig, teilweise Massenkalkstein, teilweise dolomitisch	1,4
	393: Dolomitstein, tafelbankig	1,4
	4359: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	1,3
	448: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	1,2
	385: Kalkstein	1,2
BÜK200	... aus Kalksteinhangschutt, Terrassensand und – schotter***	3,3
	... aus Carbonat führenden, vorherrschend lehmigen Talablagerungen***	3,1
	... aus flachem carbonathaltigem Schuttlehm über Verwitterungsschutt aus Carbonatgestein des Malm oder über Carbonatgestein	3,0
	... aus carbonatfreien, schluffig-lehmigen Auenablagerungen***	2,8
	... aus carbonathaltigen, schluffigen, z. T. sandig-lehmigen Auenablagerungen***	2,7
	... aus carbonathaltigen, schluffig-lehmigen Talablagerungen***	2,3
	... aus carbonatfreien, schluffig-lehmigen, z. T. sandigen Auenablagerungen***	2,2
	... aus carbonatfreien schluffigen bis lehmigen, selten tonigen Fluss- oder Talablagerungen***	2,0
	... aus überwiegend carbonatischem, lehmigem bis tonigem Hangschutt, selten Braunerden aus sandigem Hangschutt**	0,8
	... aus sandigem bis lehmig-tonigem Hangschuttmaterial des Lias und Dogger	0,6
BÜK1000	... aus Hangschutt über Kalk-, Mergel- und Dolomitgesteinen	1,3
	Gewässer****	0,9
CLC10	Moors and peatland****	3,6
	Transitional woodland-shrub	2,0
	Broad leaved forest	1,9
	Discontinuous urban fabric	1,5
	Complex cultivation pattern	0,6
REGNIE8110	-	-
Kurv25	Konvexe Hänge	1,9

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der jeweiligen Legende unverändert übernommen; **Terra fusca – ein Residualboden der Hochfläche und des Albtrauf; ***Überbetonung der Talablagerungen in der Hochfläche; ****Hochmoore sind auf der Albhochfläche verbreitet.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Durch den Vergleich der Tab. 2-13, Tab. 2-14 und Tab. 2-15 wird deutlich, dass für unterschiedliche Massenbewegungstypen unterschiedliche Parameterklassen identifiziert wurden, die als relevante Einflussfaktoren interpretiert werden können.

Diese Unterschiede sind verständlich, da die unterschiedlichen Massenbewegungstypen auf unterschiedlichen physikalischen Prozessen beruhen.

Zum Beispiel treten Felsstürze im zentralen Bereich der Fränkischen Alb dort auf, wo das Plateau aus massigen Kalkgesteinen durch tiefe Täler zerschnitten ist. Ein unabdingbarer Faktor für eine Sturzbe-
wegung (Felssturz als freier Fall) ist ein Gradient in der Hangneigung, der diese Bewegungsart überhaupt erst möglich macht. Dieser ist wiederum von der Festigkeit der Gesteine abhängig.

Für den Parameter Hangkrümmung (Kurv25) kann nachgewiesen werden, dass konvexe Hangformen einen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung aller Massenbewegungstypen aufweisen.

Durch die detailliertere Betrachtung der statistischen Gewichte lassen sich auch die nicht plausiblen Parameter herausfiltern.

So zeigt z. B. der Parameter CLC10 explizit für die Klassen mit Wald und anderen Vegetationsarten hohe statistische Gewichte. Eine zusätzliche Analyse der räumlichen Verteilung dieser Klassenflächen belegt, dass diese insbesondere in steileren Hanglagen vorkommen. Damit sind die höheren statistischen Gewichte weniger auf die Vegetation, sondern eher auf den überlagernden Parameter Hangneigung zurückzuführen. Somit kann hier von einer klaren Scheinkorrelation ausgegangen werden. Daher wurde der Parameter CLC10 nicht weiter berücksichtigt.

Für den Parameter Hangexposition (Aspekt25) kann auch bereits in diesem Stadium der Analyse gezeigt werden, dass er keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Massenbewegungen in der Region liefern kann.

Keine der Parameterklassen der Hangexposition zeigt einen signifikanten Zusammenhang. Die statistischen Gewichte liegen allesamt unter dem Wert von 0,5. Daher wird die Hangexposition bzw. ihre Parameterklassen in den Tab. 2-13, Tab. 2-14 und Tab. 2-15 nicht aufgeführt.

Auch die AUC-Werte für den Parameter Hangexposition liegen, je nach Massenbewegungstyp, zwischen 0,57 und 0,62 und damit sehr nah an der zufälligen Verteilung der Rutschungsereignisse in den Parameterklassen, die in der ROC-Kurve durch AUC-Werte um 0,5 charakterisiert wird (Tab. 2-12).

Die Tab. 2-16 gibt eine Übersicht über die im Modellierungsbeispiel 1.1 berechneten Modelle.

Um die Modelle gleicher statistischer Güte miteinander vergleichen zu können, kann die Anzahl der Parameterklassenkombinationen innerhalb eines Modells berücksichtigt werden.

Wie [oben](#) erwähnt, steigt mit der Anzahl der Parameterklassenkombinationen die Komplexität des Modells. Unter zwei gleichberechtigten Modellen ist unter Anwendung des sogenannten Prinzips der Parsimonie das einfachere vorzuziehen.

Wäre zwischen zwei alternativen Modellen Hang25 + GÜK250 (Modell A) und Hang25 + GÜK250 + REGNIE8110 (Modell B) zu wählen, könnte auf Basis der AUC-Werte keine eindeutige Entscheidung getroffen werden, da beide Modelle einen AUC-Wert von 0,96 aufweisen (Tab. 2-16).

Die Komplexität von Modell A mit 794 Kombinationen ist jedoch geringer als die von Modell B mit 3240 Kombinationen. Nach dem Prinzip der Parsimonie wäre somit das Modell A als einfacheres Modell vorzuziehen.

Der dritte Parameter REGNIE8110 erhöht hier die Komplexität des Modells, trägt jedoch nicht zu seiner Verbesserung bei.

Ähnlich verhält es sich mit dem Modell mit der Kombination der Parameter Hang25 + GÜK250 + Kurv25.

Tab. 2-16: Modellierungsbeispiel 1.1: Bewertung von überlagerten Modellen mit unterschiedlichen Parameterkombinationen anhand der AUC-Werte für unterschiedliche Bewegungstypen von Massenbewegungen.

Modell	Anzahl Klassenkombinationen	AUC-Wert je Massenbewegungstyp: Trainings- und (Testinventar)		
		Rotationsrutschung	Translationsrutschung	Felssturz
Hang25 + GÜK250 (im Text: Modell A)	794	0,96 (0,96)	0,94 (0,94)	0,97 (0,97)
Hang25 + BÜK200	473	0,93 (0,94)	0,93 (0,93)	0,97 (0,97)
Hang25 + BÜK1000	110	0,94 (0,95)	0,92 (0,92)	0,96 (0,96)
Hang25 + Kurv25	55	0,93 (0,94)	0,90 (0,90)	0,96 (0,96)
Hang25 + REGNIE8110	98	0,94 (0,94)	0,90 (0,91)	0,96 (0,96)
Hang25 + GÜK250 + REGNIE8110 (im Text: Modell B)	3240	0,96 (0,96)	0,94 (0,93)	0,97 (0,97)
Hang25 + BÜK200 + REGNIE8110	1880	0,94 (0,94)	0,92 (0,93)	0,97 (0,97)
Hang25 + BÜK1000 + REGNIE8110	561	0,95 (0,95)	0,93 (0,94)	0,96(0,96)
Hang25 + GÜK250 + Kurv25	3476	0,96 (0,96)	0,94 (0,93)	0,97(0,97)

Generell ist hervorzuheben, dass sowohl geologische als auch bodenkundliche Informationsebenen einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung von Massenbewegungen aufweisen.

Trotz sehr guter statistischer Güte der Modelle, in denen die Kombinationen der Parameter Hang25 + GÜK250 sowie Hang25 + BÜK200 berücksichtigt werden, zeigen die Modelle im Detail substantielle Unterschiede. Diese Unterschiede lassen sich auf zwei zentrale Ursachen zurückführen:

- Die GÜK250 setzt den Schwerpunkt auf stratigraphisch-lithologische Inhaltsangaben, wobei Schuttdecken geringer Mächtigkeit vernachlässigt werden;
- Die BÜK200 und BÜK1000 fokussieren, neben der natürlicherweise dezidierten bodensystematischen Beschreibung, auf das Substrat. Substrate charakterisieren die bodenbildenden Ausgangsgesteine sowie deren Verwitterungs- bzw. Umlagerungszustand.

Die unterschiedlichen Kartiermethoden führen zwangsläufig zu voneinander abweichenden Flächeneinheiten in den geologischen und bodenkundlichen Kartenwerken. Dies führt zu unterschiedlichen Mustern für die Hangrutschungsempfindlichkeit (Abb. 2-19).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

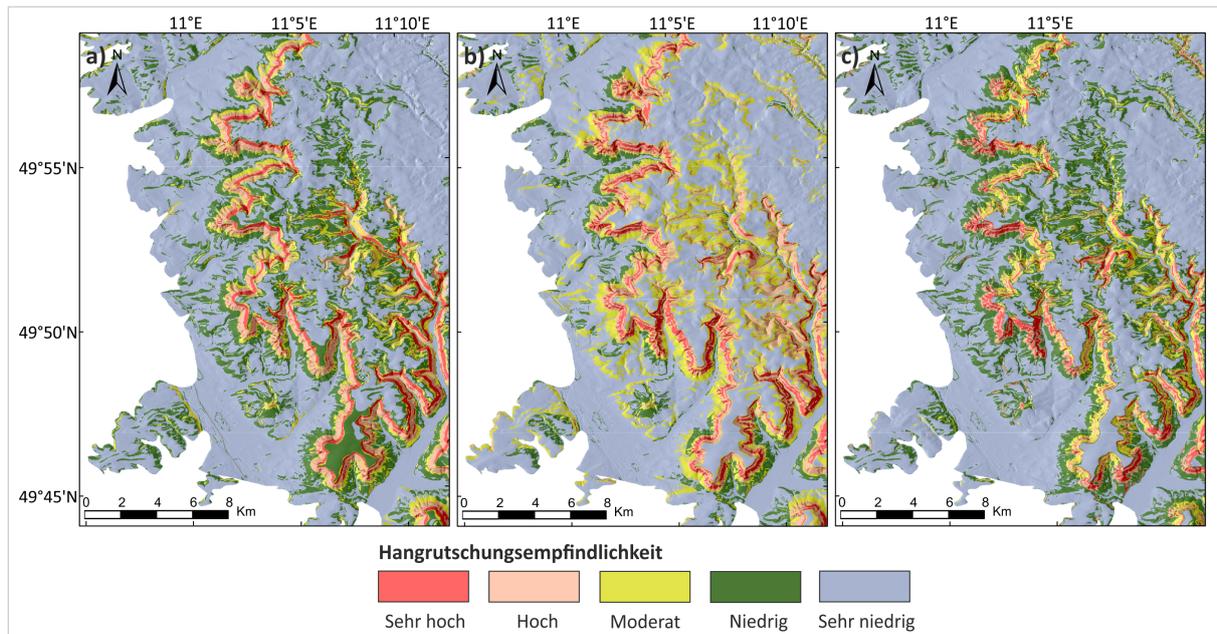


Abb. 2-19: Modellierungsbeispiel 1.1: Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit für die Fränkische Alb und Albvorland (Ausschnitt) für Rotationsrutschungen aus der Überlagerung des Parameters Hang25 mit den Parametern GÜK250 (a), BÜK200 (b) und BÜK1000 (c) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

Sowohl in der BÜK200 als auch in der BÜK1000 sind die fluviatilen Ablagerungen im Testgebiet der Fränkischen Alb und Albvorland als Ergebnis der Generalisierung kartographisch überzeichnet. Das heißt, dass diese Einheiten im Kartenbild über ihre tatsächliche Ausdehnung hinaus dargestellt sind (z. B. um die Lesbarkeit der Karte zu verbessern oder die Wichtigkeit dieser Einheit hervorzuheben).

Die BÜK1000 hat darüber hinaus auch weitere Generalisierungseffekte, die auf die räumliche Aggregation der Einheiten zu einer Legendeneinheit zurückgeführt werden können. Die starke Generalisierung der BÜK1000 lässt sich bereits in den AUC-Werten erkennen (Tab. 2-12). Diese liegen für alle Massenbewegungstypen nicht höher als 0,73. Damit hat die BÜK1000 als alleinstehender Parameter neben der REGNIE8110 und der Hangexposition (Aspekt25) den schwächsten Zusammenhang mit der Verteilung der Massenbewegungen im Testgebiet.

Gegenüber den 14 Parameterklassen der BÜK1000 besitzt die BÜK200 mit 80 Parameterklassen einen deutlich höheren Detailgrad. Damit sind die Generalisierungseffekte in der BÜK200 auch deutlich geringer. Die BÜK200 zeigt mit AUC-Werten um 0,8 für alle Massenbewegungstypen einen starken statistischen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Ereignisse (Tab. 2-12).

Bei genauerer Betrachtung der statistischen Gewichte einzelner Parameterklassen (Tab. 2-15) ist jedoch auch hier zu erkennen, dass unterschiedliche Talablagerungen in der räumlichen Analyse höhere Gewichtswerte zugewiesen bekommen haben. Damit wird ein Zusammenhang mit Felsstürzen suggeriert, den diese aufgrund ihrer realen Verbreitung nicht haben dürften. An diesen Beispielen wird der Einfluss der Generalisierung einer Informationsebene und die damit verbundenen Probleme besonders gut erkennbar.

Auch in der GÜK250 spielen solche Generalisierungseffekte eine Rolle. Allerdings geben die Parameterklassen der GÜK250 einen Interpretationsspielraum für die Erklärung der statistischen Zusammenhänge zwischen petrographischer Beschreibung und räumlicher Verteilung des Massenbewegungstyps im Sinne kausaler Beziehungen.

Eine besondere Rolle ist dem Parameter Hangneigung zuzuordnen. Die Hangneigung ist ein Faktor, der die sogenannte *notwendige Ursache*²¹ für die meisten gravitativen Massenbewegungen darstellt. Die statistische Evaluierung anhand der ROC-Kurve beurteilt die Fähigkeit eines Modells (Klassifikator), die kritischen Bereiche eines Systems in räumlich möglichst kleine Bereiche zu unterteilen und nach der Gewichtung zu sortieren. Damit gewinnen grundsätzlich Parameter, die räumlich einen hohen Grad an Unterteilung erlauben, an Bedeutung.

Die Hangneigung als ein wichtiger und vor allem auch als ein plausibler Parameter kann das Testgebiet aufgrund der vergleichbar hohen Auflösung sehr stark unterteilen.

Die als statistisch signifikant ausgewiesenen Hänge nehmen nur 10 % bis 20 % der Untersuchungsfläche ein und beinhalten mehr als 80 % aller beobachteten Ereignisse. Damit liefert die Hangneigung im Maßstab der Analyse (1 : 250 000) und je nach Massenbewegungstyp, rein statistisch betrachtet, bereits eine sehr gute Aufschlüsselung der Flächen nach ihrem Gefährdungspotenzial.

Die Flächen ohne Hangneigung, in denen bestimmte Massenbewegungen aufgrund fehlender *notwendiger Ursache* auszuschließen sind, werden auch als leicht klassifizierbare oder auch triviale Flächen bezeichnet (z. B. [Steger & Gade, 2017](#)).

Ohne eine zusätzliche Maskierung der trivialen Flächen, z. B. mit der Hangneigung $< 5^\circ$, würde dieser Parameter allein bereits statistisch mehr als 90 % der jeweiligen räumlichen Verteilungen der Massenbewegungen erklären.

Aus der Diskussion lassen sich folgende Entscheidungskriterien für die Auswahl eines belastbaren Modells zur Beschreibung der Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen ableiten:

- **Statistische Modellgüte:** Das Modell muss mit den ausgewählten Parametern die Zusammenhänge zu kartierten Rutschungsereignissen statistisch gut abbilden (AUC-Wert $\geq 0,8$). Darüber hinaus muss das Modell auch unbekannte Ereignisse (Testinventar) im Rahmen der Modellgüte erklären können;
- **Prinzip der Parsimonie (Ockhams Rasiermesser):** Das Prinzip ist für vergleichbare Alternativen anzuwenden und bedeutet, dass bei gleicher Modellgüte das einfachere Modell vorzuziehen ist;
- **Plausibilität:** Das ausgewählte Modell soll neben statistischer Qualität auch anschaulich plausibel sein. Das heißt, die Verknüpfung von Parameter und aufgetretener Massenbewegung muss anhand bekannter physikalischer Prozesse interpretierbar sein.

²¹ Als notwendige Ursache oder notwendige Bedingung (*Conditio sine qua non*) wird eine Ursache bezeichnet, deren Abwesenheit das Eintreten eines Ereignisses unmöglich macht. Die Anwesenheit der Ursache schafft das Potenzial für das Eintreten eines Ereignisses, führt aber nicht zwangsläufig dazu, dass ein Ereignis unweigerlich (in einem bestimmten Zeitraum) eintritt. Führt eine Ursache immer unweigerlich zu einem Ereignis, wird diese als hinreichend bezeichnet. Eine Ursache kann unter bestimmten Umständen sowohl notwendig als auch hinreichend sein.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Unter Zugrundelegung der drei genannten Punkte liefert die Kombination von Hang25 + GÜK250 für alle Massenbewegungstypen ein plausibleres statistisches Modell als die Kombination von Hang25 + BÜK200.

Die Abb. 2-20 zeigt für einen Ausschnitt des Testgebiets die aus dem Modell Hang25 + GÜK250 abgeleiteten Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber Rotationsrutschungen (a), Translationsrutschungen (b) sowie Felsstürzen (c).

Die Ergebnisse des Modellierungsbeispiels 1.1 weisen aber auch auf Probleme hin, die aus dem Grad der Generalisierung der genutzten Parameter resultieren. Hier sind zum einen die ungenaue Lageverortung der Massenbewegungen in den Parameterklassen der Übersichtskarten durch deren Überzeichnung zu nennen (z. B. die Legendeneinheiten der BÜK200 mit Leit- und Begleitbodenformen). Zum anderen ist es die inhaltliche Aggregation verschiedener petrographischer Einheiten unterschiedlicher Empfindlichkeit in einer Legendeneinheit der GÜK250. Es zeigt sich weiterhin, dass der Parameter Hangneigung (Hang25) im betrachteten Maßstab (1 : 250 000) bereits einen sehr hohen Beitrag zur Erklärung der Verteilung der Massenbewegungen liefert. Durch diesen hohen Erklärungsanteil ist der Einfluss anderer Parameter auf die Modellqualität mit der ROC-Kurve kaum nachweisbar.

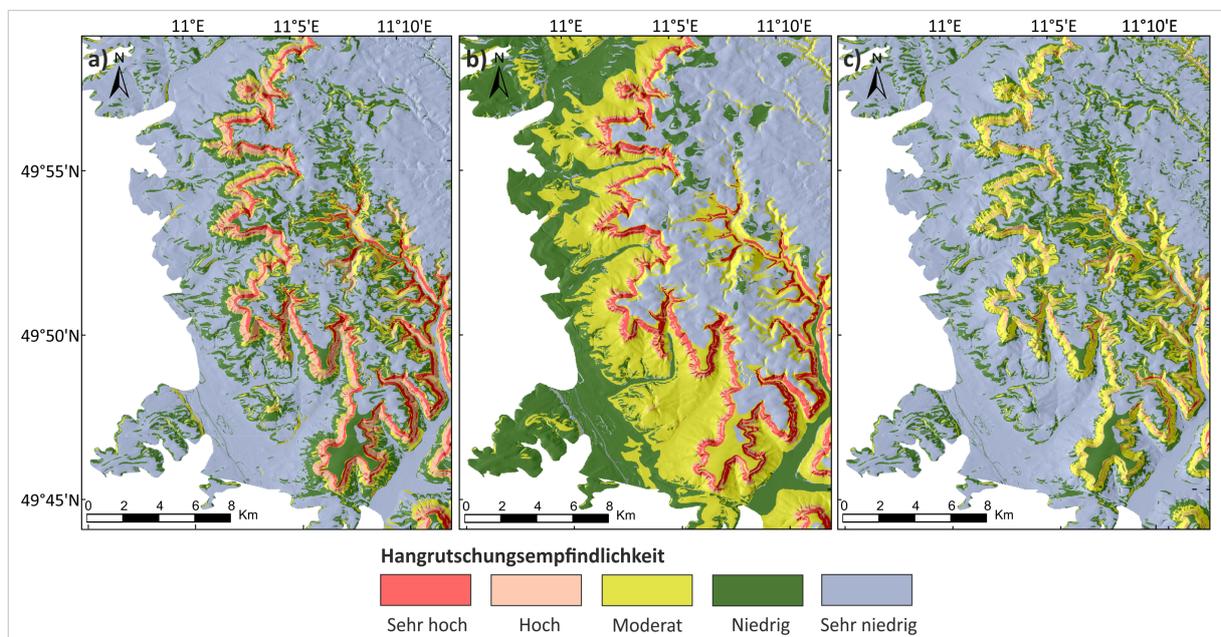


Abb. 2-20: Modellierungsbeispiel 1.1: Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit für die Fränkische Alb und Albvorland (Ausschnitt) auf der Grundlage der statistischen Modellierung (Methode der Gewichteten Evidenzen) mit der Parameterkombination Hang25 + GÜK250 für Rotationsrutschungen (a), Translationsrutschungen (b) und für Felsstürze (c) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

Aufgrund der aufgezeigten Probleme wurden weitere Modellierungsbeispiele zielgerichtet verfolgt, um Einflüsse auf die Modellergebnisse zu untersuchen:

- **Modellierungsbeispiel 1.2** (s. Kapitel 2.6.1.2): Berücksichtigung einer detaillierteren geologischen Informationsebene;
- **Modellierungsbeispiel 1.3** (s. Kapitel 2.6.1.3): Berücksichtigung der Veränderung der Lageverortung der Massenbewegungen;
- **Modellierungsbeispiel 1.4** (s. Kapitel 2.6.1.4): Berücksichtigung der Distanz zu stratigraphischen Grenzen;
- **Modellierungsbeispiel 1.5** (s. Kapitel 2.6.1.5): Berücksichtigung der Maskierung flacher Hangbereiche.

2.6.1.2 Modellierungsbeispiel 1.2

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) durch die Nutzung großmaßstäblicher thematischer Informationsebenen (hier: GK25) (soweit lokal oder regional verfügbar) in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 1.2 wurde überprüft, inwieweit das Problem der Generalisierung aus dem Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) durch den Einsatz detaillierterer Informationsebenen gelöst werden kann bzw. die Modellergebnisse verbessert werden können.

Als geeignete Informationsebene wurde die Geologische Karte von Bayern im Maßstab 1 : 25 000 (GK25) in die Analyse einbezogen (Tab. 2-11). Die Analyse erfolgte exemplarisch für den Bewegungstyp Rotationsrutschung.

Die GK25 deckt im Testgebiet Fränkische Alb und Albvorland etwa 80,5 % der Fläche ab (Abb. 2-21). Im Vergleich zur GÜK250 mit ihren 140 aus den Legendeneinheiten abgeleiteten petrographischen Parameterklassen bietet die GK25 mit 249 Parameterklassen einen erheblich höheren Differenzierungsgrad des Testgebiets. Es ist jedoch zu beachten, dass für die Kartenblätter der GK25 zwar ein stratigraphischer Randabgleich existiert, jedoch eine petrographische Harmonisierung aussteht.

Methodische Vorgehensweise

Die Analyse erfolgte analog dem Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1), wobei anstelle der GÜK250 die GK25 verwendet wurde.

Da die Ausdehnung der GK25 nicht mit der der GÜK250 identisch ist, wurden zu Vergleichszwecken alle Datensätze auf die Ausdehnung der GK25 angepasst. Das bedeutet, dass an der Stelle der fehlenden Kartenblätter die Parameter Hang25 und GÜK250 entsprechend ausgespart wurden.

Für das Modellierungsbeispiel 1.2 wurden die gleichen Trainings- und Testinventare wie im Modellierungsbeispiel 1.1 verwendet (s. Kapitel 2.6.1.1). Die Beschreibung der Parameterklassen der GK25 wurde unverändert aus der Legende übernommen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

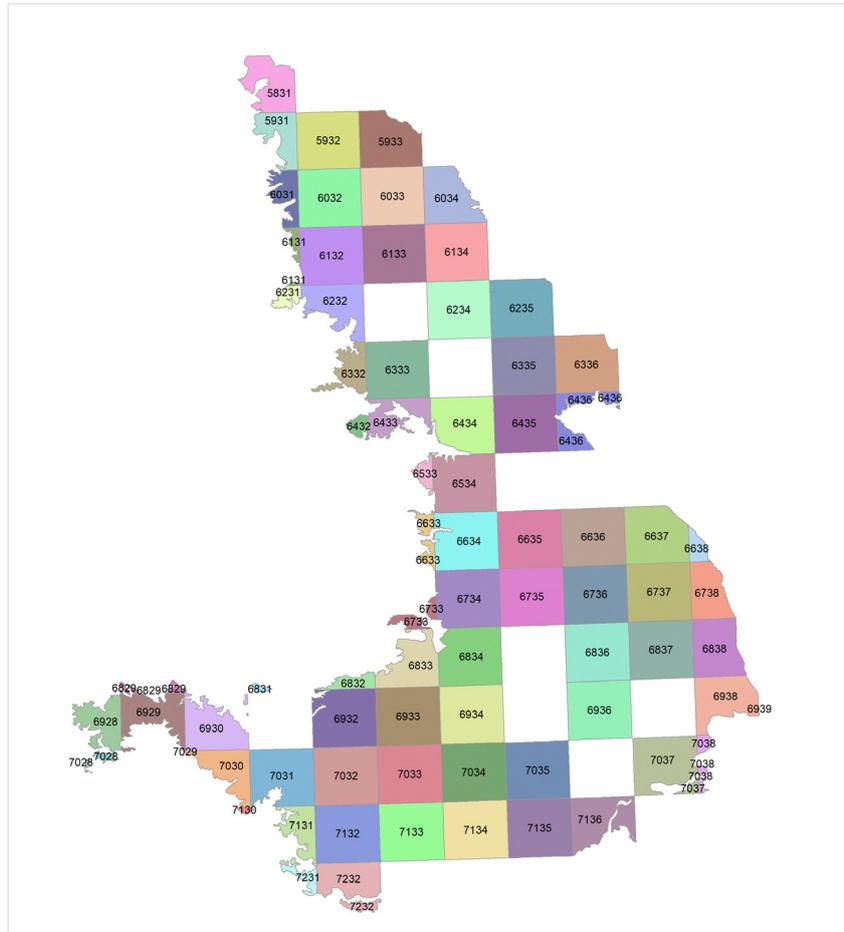


Abb. 2-21: Modellierungsbeispiel 1.2: Abdeckung des Testgebiets Fränkische Alb und Albvorland durch die GK25 (Zahl = Nummer Blattschnitt Topographische bzw. Geologische Karte 1 : 25 000; Quelle: Tab. 2-9).

Ergebnisse und Diskussion

Die statistische Analyse des Parameters GK25 ergab, dass 14 der 249 Parameterklassen mit signifikanten Gewichten > 1 zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Rotationsrutschungen beitragen (Tab. 2-17). Der für die GK25 ermittelte AUC-Wert liegt mit 0,88 im oberen Bereich eines [guten](#) Modells (Tab. 2-18).

Tab. 2-17: Modellierungsbeispiel 1.2: Darstellung der Parameterklassen der GK25 mit positiven statistischen Gewichten größer eins (absteigend sortiert), die einen Beitrag zur Erklärung der räumlichen Verteilung der Rotationsrutschungen in der Fränkischen Alb mit Vorland liefern.

Informations- ebene	Parameterklasse GK25: Petrographische Beschreibung*	Statistisches Gewicht
GK25	Kalkmergelstein, dunkel, weich, mit teilweise flaserigem Mergelkalkstein und Kalkstein, Fossilien führend	4,03
	Mergelstein, grau, wenige Kalksteinlagen	3,66
	Mergel und Mergelstein, grün, Glaukonit führend; im Bereich der Kagerhöh-Formation treten mit einem Abstand von 10-12 m zwei Glaukonitmergel-Bänke auf, die untere liegt an der Basis der Pulverturm-Subformation, die obere an der Basis der Karthaus-Subformation	3,48
	Ton- und Mergelstein, dunkel- bis schwarzgrau, Fossilien führend	3,38
	Kalkstein, hellgrau, gebankt, wenige Mergelsteinlagen; "Werkkalk"	2,54
	Kies bis Blöcke, sandig bis schluffig bis Schluff, tonig bis sandig, kiesig bis blockig, Holzreste, Einzelkomponenten auch über 1000 m ³	2,46
	Mergelstein mit Kalksteinlagen, nach oben Übergang in Kalkstein mit dünnen Mergelsteinlagen; "Unterer Mergelkalk" und "Werkkalk"	2,39
	Sandstein, fein- bis mittelkörnig, eisenschüssig, vereinzelt mit Kalksteinbänken, Muscheln führend und Tonsteinlagen, mit Eisenerzflözen	1,71
	Wechselfolge von Mergelstein und Kalkstein	1,68
	Steine und Blöcke, ohne Matrix	1,60
	Mergelstein, mittelgrau; Ton- und Tonmergelstein, dunkel- bis schwarzgrau, schluffig bis feinsandig	1,42
	Tonstein, dunkel- bis schwarzgrau, nach oben schluffig bis feinsandig; Mergelstein, mittelgrau, Fossilien führend	1,20
	Kalkmergelstein, dunkel, weich, mit teilweise flaserigem Mergelkalkstein und Kalkstein	1,18
	Steine und Blöcke, z. T. ohne Matrix	1,02

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der Legende der GK25 unverändert übernommen.

Tab. 2-18: Modellierungsbeispiel 1.2: Vergleich der AUC-Werte zwischen den Modellierungsbeispielen 1.1 (mit GÜK250) und 1.2 (mit GK25).

Informationsebene bzw. Parameter	Anzahl Parameterklassen	AUC-Wert
Hang25	12	0,93
GÜK250	140	0,86*
GK25	249	0,88

*Geringfügige Veränderung zum Wert im Modellierungsbeispiel 1.1 (AUC-Wert 0,87) durch Maskierung mit der GK25.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Aus der statistischen Analyse resultieren signifikant hohe Gewichte vor allem für die Einheiten mit Wechsellagerung von Mergel- und Tongesteinen und für die Lockergesteine (Tab. 2-17). In diesen Gesteinskomplexen entwickelten und entwickeln sich die Rotationsrutschungen entlang der markanten Schichtstufen der Fränkischen Alb und im Albvorland.

Die Nutzung der höher auflösenden GK25 ergibt im Vergleich zu den Ergebnissen aus der Anwendung der GÜK250 zunächst nur eine geringfügige Verbesserung der statistischen Kennwerte.

Der AUC-Wert für die detailliertere GK25 ist um 2 Prozentpunkte höher als für die GÜK250 (Tab. 2-18). Die Plausibilität des Modells kann aber insgesamt als höher eingestuft werden. So ist der Zusammenhang der durch signifikante statistische Gewichte gekennzeichneten Parameterklassen der GK25 mit der räumlichen Verteilung der Rotationsrutschungen besser (eindeutiger) erklärbar als für die Parameterklassen der GÜK250.

Der hohe Detailgrad der GK25 hat aber auch Nachteile, die explizit erwähnt werden müssen.

Es sollte bei datengetriebenen Analysen immer abgewogen werden, ob die Beobachtungsdaten (Rutschungen) quantitativ einer statistischen Analyse genügen. Eine nützliche Prüfgröße ist die mittlere Anzahl von Ereignissen pro Klasse des einbezogenen Parameters.

Im Falle der Anwendung der GK25 mit 249 Parameterklassen und 1391 Rotationsrutschungen liegt dieser Wert bei 6, während der Wert bei Nutzung der GÜK250 10 beträgt. Zwar spielt die räumliche Verteilung der Parameter und der Rutschungen auch eine Rolle, es wird dennoch ein Richtwert von 10 vorgeschlagen, um die statistische Auswertbarkeit aufrecht zu erhalten. Denn mit kleiner werdendem Verhältnis erhöht sich auch die Chance für zufällige Verzerrungen und *leere* Klassen. Dies sind Parameterklassen, die keine beobachteten Rutschungsereignisse beinhalten. Für diese ergeben sich grundsätzlich zwei Interpretationsmöglichkeiten:

- Es wurden keine Rutschungen beobachtet, weil die Parameterklasse nicht zur Prädisposition beiträgt oder durch eine weitere überlagernde Parameterklasse stabilisiert wird;
- Es wurden keine Rutschungen beobachtet, weil die Informationsgrundlagen nicht ausreichend sind und die Parameterklasse eventuell nur eine verhältnismäßig kleine Fläche einnimmt.

Diese Mehrdeutigkeit erhöht die Unsicherheiten des Modells. Wird die Mindestanzahl an Beobachtungsdaten eingehalten bzw. überschritten, verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass die zweite Interpretationsmöglichkeit zutrifft, auch wenn diese nie komplett ausgeschlossen werden kann.

Um die Balance zwischen dem Detailgrad der Parameter und der Verfügbarkeit der Beobachtungsdaten zu erhalten und damit eine vertrauenswürdige statistische Auswertbarkeit zu gewährleisten, wäre eine Aggregation der petrographischen Einheiten der GK25 von 249 auf 140 Parameterklassen (entspricht der Anzahl der Klassen in der GÜK250), ohne jedoch eine kartographische Generalisierung durchzuführen, empfehlenswert.

2.6.1.3 Modellierungsbeispiel 1.3

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) durch Anpassung der geometrischen Verortung von Massenbewegungen in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 1.3 wurde der Einfluss der geometrischen Verortung von Rutschungen unter Nutzung deutschlandweit verfügbarer Informationsebenen bzw. Parametern getestet.

Dabei wurden die Auswirkungen bei Annahme der Rutschung als Punkt an der Abrisskante versus Punkt im Schwerpunkt der Ablagerung (Polygon) einer Rotationsrutschung in der statistischen Analyse mittels MGE analysiert.

Damit wurde ein weiteres Problem aus dem Modellierungsbeispiel 1.1 aufgegriffen, bei dem durch die Art der geometrischen Verortung der Massenbewegungen im Kartenbild Abrisskanten vieler Rotationsrutschungen innerhalb der kompetenten Kalksteinbänke liegen.

Wird die Rutschung lediglich als ein Punkt (Bezugspunkt an der höchsten Stelle der Abrisskante) in die statistische Analyse einbezogen, resultiert dies in hohen statistischen Gewichten für die Kalksteine. Jedoch sind es zumeist die darunterliegenden inkompetenten Schichten, in denen das Hangversagen initiiert wird.

Im Modellierungsbeispiel wurde *hypothetisch* angenommen, dass durch die Verwendung der Polygonschwerpunkte der Rutschungsbilagierung in der statistischen Analyse eine Verlagerung des Rutschungspunktes im Kartenbild von den kompetenten Gesteinspaketen in die inkompetenten Schichten erfolgt und dadurch die realen Prozesse in den Analyseergebnissen besser abgebildet werden können. In der Abb. 2-22 ist der Sachverhalt schematisch skizziert.

Methodische Vorgehensweise

Die Rotationsrutschungen im Rutschungsinventar der Fränkischen Alb und Albvorland werden in unterschiedlichen geometrischen Objektarten erfasst.

Die Abrisskanten der Rotationsrutschungen liegen als Polylinien vor und sind zusätzlich mit einem Bezugspunkt an der höchsten Stelle der Abrisskante identifiziert. Die Rutschungsbilagierungen werden zusätzlich durch Polygone gekennzeichnet.

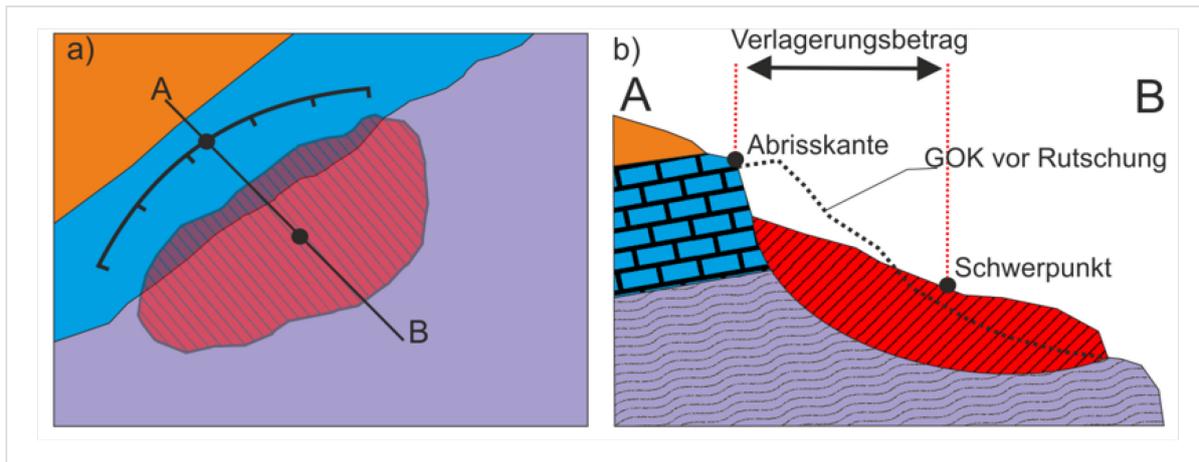


Abb. 2-22: Modellierungsbeispiel 1.3: Schematische Darstellung der Zuordnung von Punkten an der Abrisskante und im Polygonschwerpunkt der Rutschungsablagerung: a) Kartenbild mit Abrisskante als Polylinie mit dem dazugehörigen Punkt an der höchsten Stelle sowie der Rutschungsablagerung als Polygon mit dem markierten geometrischen Schwerpunkt; b) Schnitt über das Profil A – B mit Darstellung der geometrischen Beziehungen.

Für die Analyse wurden die identischen Trainings- und Testdatensätze verwendet wie in den Modellierungsbeispielen 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) und 1.2 (s. Kapitel 2.6.1.2).

Für die Polygone der Rutschungsablagerungen wurden Schwerpunkte bestimmt. Die somit erhaltenen Punkte wurden in Analogie zu Modellierungsbeispiel 1.1 in die Analyse mittels MGE einbezogen. Die Ergebnisse wurden mit denen aus dem Modellierungsbeispiel 1.1, in dem nur die Punkte der Abrisskanten berücksichtigt wurden, verglichen. Der Vergleich erfolgte mittels einer Trefferstatistik. Dazu wurden die Häufigkeitsverteilungen der Rutschungen in petrographischen Einheiten (Tab. 2-19) und Hangneigungsklassen (Tab. 2-20) für Punkte an der Abrisskante versus Punkte im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung tabellarisch gegenübergestellt. Weiterhin wurden die Modelle statistisch anhand der AUC-Werte aus den ROC-Kurven und visuell verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Für die Punkte, die im Schwerpunkt der Polygone der Rutschungsablagerungen verortet sind, zeigen die Ergebnisse aus der Trefferstatistik eine erkennbare Verschiebung in den Werten der Häufigkeit von Rotationsrutschungen von den massiven Bankkalken zu den inkompetenten tonigen und schluffigen Einheiten (Tab. 2-19).

Damit werden auch die statistischen Gewichte der massiven Gesteinspakete reduziert (PET_IDs: 448, 4347, 4359) und die der Mergel- und Tonsteineinheiten (z. B. PET_IDs: 4346, 350, 449) erhöht. Die Pfeile in den Tabellen markieren den Trend bei der Nutzung der Bezugspunkte im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung gegenüber der Nutzung der Bezugspunkte an der Abrisskante.

Für den Parameter Hangneigung (Hang25) bedingt die Nutzung des Schwerpunktes im Polygon der Rutschungsablagerung erwartungsgemäß eine Verlagerung der statistischen Gewichte in die unteren Hangneigungsklassen (Tab. 2-20).

Ein Vergleich der statistischen Kennwerte für die Parameter und Modelle (Tab. 2-21) zeigt, dass die Nutzung der Schwerpunkte im Polygon der Rutschungsablagerung zu geringfügig besseren AUC-Werten für den Parameter GÜK250 führt. Der Parameter Hangneigung (Hang25) zeigt dagegen einen Abfall um 3 %.

Tab. 2-19: Modellierungsbeispiel 1.3: Anzahl der Rotationsrutschungen in den Parameterklassen der GÜK250 (mit Angabe der PET_ID) in Abhängigkeit von der Festlegung des Bezugspunktes an der Abrisskante bzw. im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung mit korrespondierenden statistischen Gewichten (Auswahl). Verschiebungsbedingte Änderung der Ereignisanzahl und der statistischen Gewichte werden bei Abnahme durch ↘, bei Zunahme durch ↗ ausgedrückt.

Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung*	Bezugspunkt an der Abrisskante		Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung	
	Anzahl Ereignisse	Statistisches Gewicht	Anzahl Ereignisse	Statistisches Gewicht
448: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	160	3,1	107↘	2,6↘
4347: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, vorwie- gend Bankkalk, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	56	2,9	32↘	2,3↘
4359: Bankkalk, unten Mergelkalkstein, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	5	1,9	2↘	1,0↘
4628: oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bankkalk, teilweise Mergel und Mergelkalk	22	1,9	12↘	1,3↘
4346: Tonschiefer, schluffig bis sandig, teilweise flaserig, teilweise kalkhaltig, Schluffstein	90	1,8	140↗	2,2↗
1882: Sandstein, feinkörnig, Eisenerz-Flöze	29	1,6	17↘	1,0↘
709: Bankkalk, unten Mergelkalkstein	14	1,6	7↘	0,8↘
395: Sandstein, feinkörnig, Eisenerz-Flöze, in der Mitte Kalksandstein, teilweise oolithisch, Mergel- stein	36	1,5	32↘	1,3↘
1881: Kalksandstein, teilweise oolithisch, Mergel- stein, Kalkstein, oben Tonstein	12	1,4	8↘	1,0↘
394: oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bank- kalk	104	1,4	60↘	0,8↘
9: klastisches Sediment, lehmig, steinig	7	1,3	10↗	1,7↗
449: Sandstein, vorwiegend feinkörnig, oben Ton- stein, Mergelstein und Kalkstein	110	1,3	178↗	1,8↗
5032: Kalkstein, lokal dolomitisch	6	1,1	2↘	0,1↘
339: Sandstein, Tonstein-Linsen	9	1,0	5↘	0,4↘
350: Tonstein	192	0,8	302↗	1,3↗

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurde aus der Legendenbeschreibung der GÜK250 unverändert übernommen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-20: Modellierungsbeispiel 1.3: Anzahl der Rotationsrutschungen in den Hangneigungsklassen in Abhängigkeit von der Festlegung des Bezugspunktes an der Abrisskante bzw. im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung mit korrespondierenden statistischen Gewichten. Verschiebungsbedingte Änderung der Ereignisanzahl und der statistischen Gewichte werden bei Abnahme durch ↘, bei Zunahme durch ↗ ausgedrückt; →: keine oder geringfügige Änderung.

Hangneigungsklasse [°]	Bezugspunkt an der Abrisskante		Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung	
	Anzahl Ereignisse	Statistisches Gewicht	Anzahl Ereignisse	Statistisches Gewicht
0 bis 5	12	-4,6	13→	-4,6→
> 5 bis 10	83	-1,0	147↗	-0,4↗
> 10 bis 15	244	1,5	461↗	2,4↗
> 15 bis 20	301	2,6	285↘	2,5↘
> 20 bis 25	221	3,1	114↘	2,2↘
> 25 bis 30	118	3,3	15↘	1,1↘
> 30 bis 35	43	3,5	1↘	-0,4↘
> 35 bis 40	11	3,7	0↘	0↘
> 40 bis 45	2	3,6	0↘	0↘
> 45 bis 50	0	0	0→	0→
> 50 bis 55	0	0	0→	0→
> 55	0	0	0→	0→

Tab. 2-21: Modellierungsbeispiel 1.3: Vergleich der statistischen Gütemaße für die Modelle mit Bezugspunkt an der Abrisskante bzw. Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung; Erläuterung: bei Abnahme ↘, bei Zunahme ↗.

Informationsebene bzw. Parameter oder Modell	AUC-Wert	AUC-Wert
	Bezugspunkt an der Abrisskante*	Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung
GÜK250	0,87	0,88↗
Hang25	0,93	0,90↘
Hang25 + GÜK250	0,96	0,94↘

*Siehe auch Tab. 2-12 im Modellierungsbeispiel 1.1.

Auch der visuelle Vergleich zeigt Unterschiede in den Mustern der Modelle. Abb. 2-23 illustriert die zonierte Hangrutschungsempfindlichkeiten für einen Ausschnitt im Bereich der zweiten Schichtstufe nahe [Forchheim \(Geologische Karte 1 : 25 000 Blatt Forchheim: 6232\)](#) (Tag des Zugriffs: 23.09.2020).

Das Ergebnis der Modellierung mit Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung führt unter Betonung der Tongesteine und Bankkalke an steilen Hängen zu einem bandartigen Verlauf der Zone *Sehr hoch* (Abb. 2-23a).

Das Resultat der Modellierung mit Bezugspunkt an der Abrisskante betont ausschließlich die Bankkalke in der Zone *Sehr hoch*, dagegen werden die Tongesteine der Zone *Hoch* zugeordnet (Abb. 2-23b).

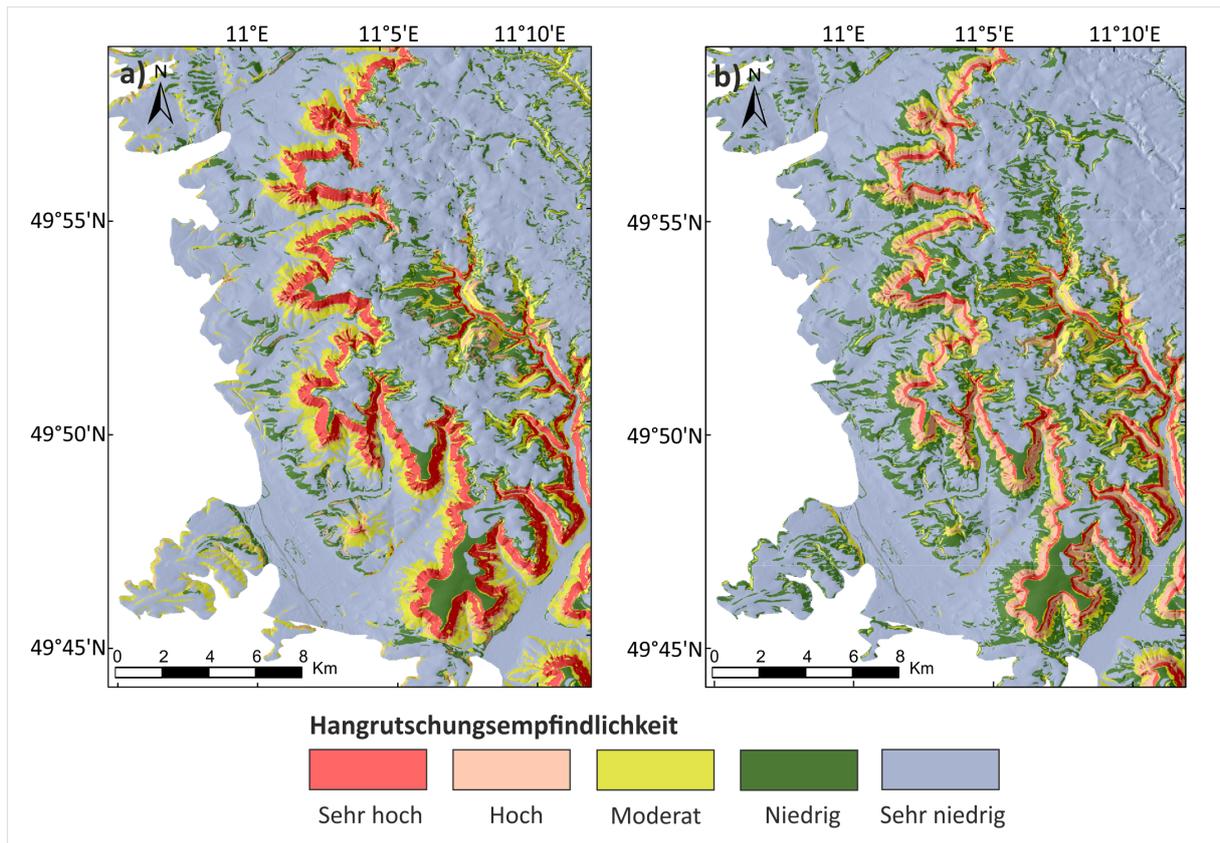


Abb. 2-23: Modellierungsbeispiel 1.3: Modell der Hangrutschungsempfindlichkeit mit der Parameterkombination Hang25 + GÜK250 (Ausschnitt im Bereich der zweiten Schichtstufe nahe Forchheim): a) für Bezugspunkte an der Abrisskante; b) für Bezugspunkte im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerung (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

Es kann konstatiert werden, dass die statistische Qualität beider Modellvarianten mit AUC-Werten über 0,90 außerordentlich hoch ist (Tab. 2-21). Das Modell mit Bezugspunkt im Schwerpunkt des Polygons der Rutschungsablagerungen hat eine geringere statistische Qualität, ist aber plausibler und entspricht mehr dem Prozessverständnis bezüglich Rotationsrutschungen im Testgebiet.

2.6.1.4 Modellierungsbeispiel 1.4

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung von Möglichkeiten zur Minderung von Generalisierungseffekten in deutschlandweit verfügbaren thematischen Informationsebenen (hier: GÜK250) unter Berücksichtigung des Parameters *Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen* in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 1.4 wurde eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Interpretation von Massenbewegungen im Maßstab 1 : 250 000 untersucht.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

In der Fränkischen Alb und im Albvorland wird in bestimmten lithostratigraphischen Sequenzen (z. B. Übergang von Ton zu massigem Kalk oder Bankkalke über den mergeligen Schichten) häufig Hangversagen beobachtet. Dies deckt sich mit der praktischen Erfahrung, dass bestimmte stratigraphische Abfolgen rutschempfindlicher sind als andere.

In diesem Zusammenhang wurde durch die bearbeitenden Geologen diagnostiziert, dass die Generalisierung in der geologischen Karte GÜK250 partiell zu einer Fehlzuordnung der Rutschungsereignisse in eine lithostratigraphische Einheit und ergo zu Fehlinterpretationen führen können (s. Kapitel 2.6.1.1).

Daher wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Distanz zu einer lithostratigraphischen Grenze als ein plausibler bzw. charakteristischer Parameter eine allgemeingültigere Lösung des Verortungsproblems von Rutschungsereignissen herbeiführen könnte.

Im Ergebnis würde nicht die Einordnung einer Rutschung in die jeweilige lithostratigraphische Einheit (nachfolgend Schichten genannt), sondern in ein Distanzintervall (Distanzklasse) zu einer lithostratigraphischen Grenze bewertet werden. Dadurch ergibt sich eine flexiblere Mustergenerierung als es durch die invariablen lithostratigraphischen Grenzen der GÜK250 möglich wäre.

In der Abb. 2-24 ist das Konzept am Beispiel einer fiktiven geologischen Situation schematisch erklärt. In Abb. 2-24a repräsentiert die gepunktete Linie den realen Verlauf der lithostratigraphischen Grenze zwischen den Schichten A und B. Die rote Linie markiert die generalisierte lithostratigraphische Grenze zwischen den Schichten A und B wie sie im geologischen Kartenwerk gezeichnet ist. Die Punkte markieren die Lage der Rutschungsereignisse.

Zu erkennen ist, dass zwei Rutschungsereignisse auf der Grundlage der generalisierten Karte der Schicht A zugeordnet werden, obwohl sie in der Realität in der Schicht B liegen. Dies würde in der statistischen Analyse zu einer Überbetonung der Schicht A in den statistischen Gewichten führen. Darüber hinaus sind die lithostratigraphischen Einheiten räumlich sehr weit gefasst. Die überschätzten statistischen Gewichte würden also auch den Bereichen innerhalb der Schicht B zugeordnet, die weiter entfernt von der lithostratigraphischen Grenze zwischen den Schichten A und B liegen.

Die Anwendung eines kontinuierlichen Parameters *Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen* erlaubt es, die Grenze des empfindlichen Bereiches ortsspezifisch zu bestimmen (Abb. 2-24b). Die Fehlzuordnung spielt keine Rolle mehr, da die Gewichte nicht in die gesamte räumliche Ausdehnung der lithostratigraphischen Einheiten extrapoliert, sondern durch eine Distanzklasse räumlich abgegrenzt werden.

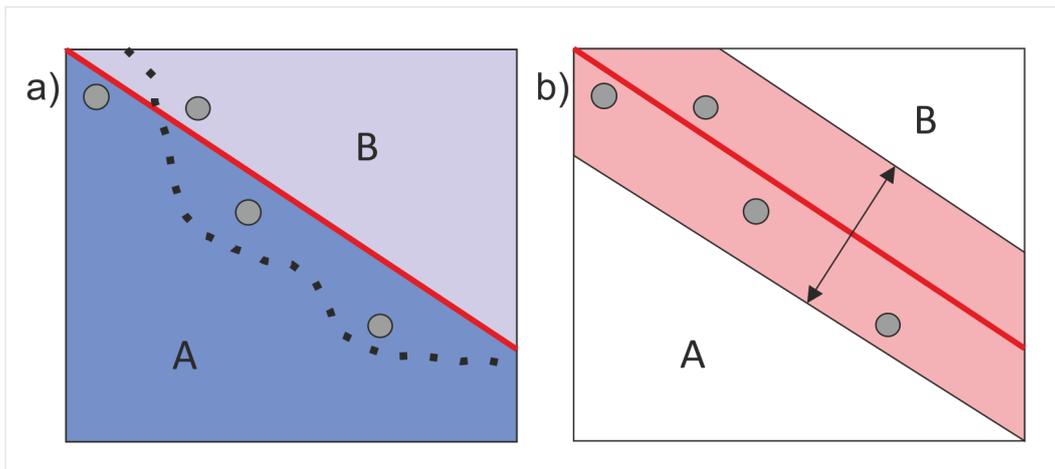


Abb. 2-24: Modellierungsbeispiel 1.4: Schematische Darstellung des Distanzkonzepts; a) Fehlzuzuweisung durch Generalisierungseffekte einer thematischen Ebene, z. B. GÜK250. Die rote Linie markiert die generalisierte lithostratigraphische Grenze zwischen den Schichten A und B, die gepunktete Linie die tatsächliche Grenze, gefüllte Punkte die kartierten Rutschungsereignisse; b) Abgrenzung der rutschungsempfindlichen Bereiche innerhalb der Schichten A und B durch eine Distanzklasse.

Methodische Vorgehensweise

Das oben eingeführte Distanzkonzept wurde in mehreren Schritten für einen Ausschnitt im Bereich der zweiten Schichtstufe nordöstlich [Forchheim \(Geologische Karte 1 : 25 000, Blatt Forchheim: 6232\)](#) (Tag des Zugriffs: 23.09.2020) praktisch umgesetzt.

Initial wurden die lithostratigraphischen Grenzen aus der GÜK250 als Polylinien extrahiert. Durch die Analyse der Nachbarschaftsbeziehungen wurde jeder Polylinie eine ID zugeordnet, die eine Nachbarschaftsbeziehung eindeutig charakterisiert.

Für alle extrahierten Polylinien wurde ein Distanzraster mit der Zellauflösung des zugrundeliegenden DGM berechnet. Im Distanzraster besitzt jede Rasterzelle einen Wert für die kürzeste Entfernung zu einer stratigraphischen Grenze in Metern. Das kontinuierliche Distanzraster wurde mittels Quantile in neun Klassen unterteilt.

Das klassifizierte Distanzraster wurde in einer vorläufigen Analyse mittels MGE unter Einbeziehung des Trainingsinventars für Rotationsrutschungen (gleicher Datensatz wie in Modellierungsbeispielen 1.1 bis 1.3) analysiert (s. [Kapitel 2.6.1.1](#), [2.6.1.2](#) und [2.6.1.3](#)). Diese Analyse liefert einen Grenzwert für die Entfernung, in der der Verlauf einer lithostratigraphischen Grenze Einfluss auf die räumliche Verteilung der Rotationsrutschungen haben kann (Abb. 2-24).

Alle lithostratigraphischen Grenzen, deren Mindestabstand zu einer der Rotationsrutschungen über dem Grenzwert liegt, wurden aus dem Polyliniendatensatz herausgefiltert.

Für jede verbliebene lithostratigraphische Grenze wurde ein individuelles Distanzraster erstellt. Dieses wurde in fünf Distanzklassen mit Grenzwerten in [m]: 0 bis 50, > 50 bis 100, > 100 bis 150, > 150 bis 500 und > 500 unterteilt und mit der Methode der Gewichteten Evidenzen analysiert.

Die einzelnen gewichteten Distanzraster wurden zu einem Raster zusammengeführt. In Einflussbereichen der Überlappung nah beieinanderliegender lithostratigraphischer Grenzen wurden, nach dem Prinzip *winner-takes-all*, die höheren statistischen Gewichte eingesetzt.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Das resultierende gewichtete Distanzraster wurde mit der Hangneigung (Hang25) überlagert und als alternatives Modell mit dem Modell mit der Parameterkombination Hangneigung (Hang25) und GÜK250 verglichen. Dies erfolgte auf Basis der AUC-Werte von ROC-Kurven sowie visuell (Tab. 2-22).

Ergebnisse und Diskussion

Im Testgebiet wurden 1024 Nachbarschaftsbeziehungen zwischen unterschiedlichen lithostratigraphischen Einheiten identifiziert.

Die vorläufige Analyse mit der undifferenzierten Einbeziehung aller lithostratigraphischen Grenzen lieferte die Bestätigung der Hypothese, dass der Einfluss einer lithostratigraphischen Grenze auf die Verortung von Rutschungsereignissen über die zunehmende Distanz abnimmt.

Darüber hinaus konnte die maximale Entfernung, in der ein Einfluss noch statistisch nachweisbar wäre, auf 125 m bestimmt werden (Abb. 2-25).

Unter Maßgabe der Entfernung des maximalen Einflussbereichs aus der Analyse aller Nachbarschaftsbeziehungen reduzierte sich die Anzahl der lithostratigraphischen Grenzen auf 99. Durch die individuelle Betrachtung jeder einzelnen dieser verbliebenen lithostratigraphischen Grenzen konnte die Anzahl auf 68 verkleinert werden.

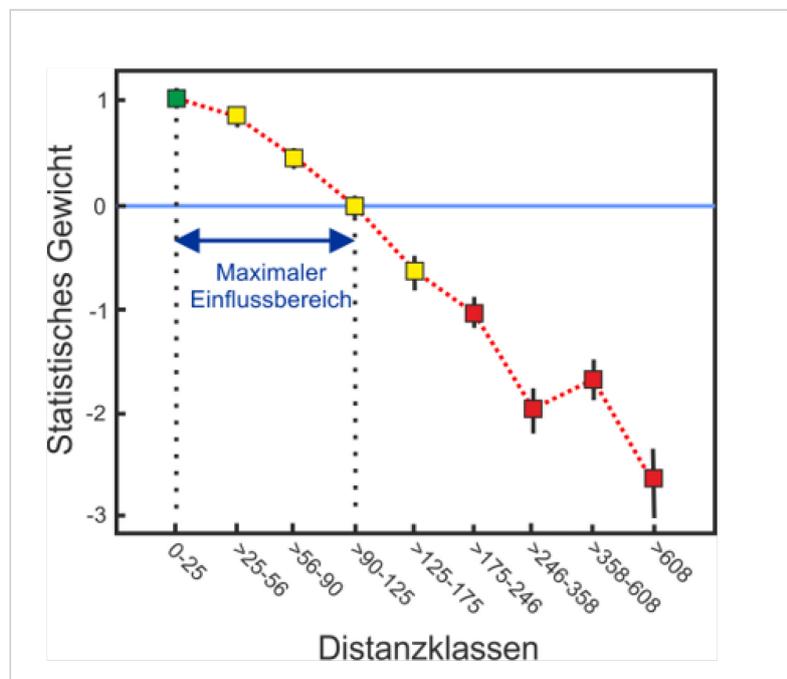


Abb. 2-25: Modellierungsbeispiel 1.4: Verlauf der statistischen Gewichte für Distanzklassen in [m] für den Abstand einer Rasterzelle zu einer beliebigen lithostratigraphischen Grenze. Grüne und rote Quadrate indizieren statistisch signifikante Gewichte mit Werten größer bzw. kleiner eins (-1). Gelbe Quadrate zwischen 1 und -1 sind statistisch nicht signifikant.

Der AUC-Wert für das undifferenzierte Distanzraster liegt bei 0,74 und trägt damit nur moderat zur Erklärung der Rutschungsverteilung bei. Gefiltert nach der bestimmten Mindestdistanz erhöht sich der AUC-Wert signifikant auf 0,87. Durch die differenzierte Betrachtung der Distanzen zu den einzelnen lithostratigraphischen Grenzen ließ sich eine zusätzliche Verbesserung bis zu einem AUC-Wert von 0,91 erzielen (Tab. 2-22).

Tab. 2-22: Modellierungsbeispiel 1.4: Übersicht über die AUC-Werte für den Parameter Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen nach unterschiedlichen Verarbeitungsschritten.

Parameter	AUC-Wert
Distanzraster für alle lithostratigraphischen Grenzen (undifferenziert)	0,74
Distanzraster für lithostratigraphische Grenzen, gefiltert nach Mindestabstand (undifferenziert)	0,87
Distanzraster für lithostratigraphische Grenzen, gefiltert nach Mindestabstand (differenziert)	0,91

Die Abb. 2-26 gibt einen Überblick über die lithostratigraphischen Grenzen, die signifikante Gewichte zugewiesen bekommen haben.

Signifikante statistische Gewichte erhielten erwartungsgemäß lithostratigraphische Grenzen zwischen inkompetenten und kompetenten Gesteinspaketen, aber auch solche zwischen kompetenten Einheiten, z. B. Bankkalcken und Dolomiten.

Dies begründet sich in der Symmetrie der angelegten Distanzklassen. Die Distanz wird als Buffer zu beiden Seiten der lithostratigraphischen Grenze generiert.

Bei sehr nah beieinanderliegenden lithostratigraphischen Grenzen (näher als 100 m), insbesondere in steileren Hanglagen, kommt es zu größeren Überlappungen der Distanzklassen. Das angewendete [winner-takes-all-Prinzip](#), in dem das größte statistische Gewicht in den Überlappungsbereichen angesetzt wird, liefert hier nur unzureichende Transparenz. Daher sollten diese Überlappungsbereiche zwischen einzelnen lithostratigraphischen Grenzen gesondert bewertet werden, was jedoch für größere Gebiete mit einem enormen Arbeitsaufwand verbunden wäre.

In der Gesamtbetrachtung des finalen Modells mit der Kombination Hang25 + Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen lässt sich ein qualitativ äquivalentes Modell zur Kombination Hang25 + GÜK250 aus dem Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) erstellen. Beide Modelle haben einen AUC-Wert von 0,96.

Im visuellen Vergleich der modellierten Zonen der Hangrutschungsempfindlichkeit (Abb. 2-27) zeigt sich, dass im Modell Hang25 + GÜK250 die inkompetenten tonigen und mergeligen Schichten unterhalb der massigen Kalke (Abb. 2-27a) als schmales Band der Zone *Hoch* zugeordnet sind. Im Modell Hang25 + Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen (Abb. 2-27b) liegen diese Schichten in der Zone *Sehr hoch*.

Es wird aber auch erkennbar, dass durch die symmetrische Zuordnung der höheren statistischen Gewichte auch die Randlagen der oberen flachen Bereiche (Plateau) der Schichtstufe von der Hangrutschungsempfindlichkeitszone *Sehr niedrig* in die Zone *Niedrig* verlagert werden.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

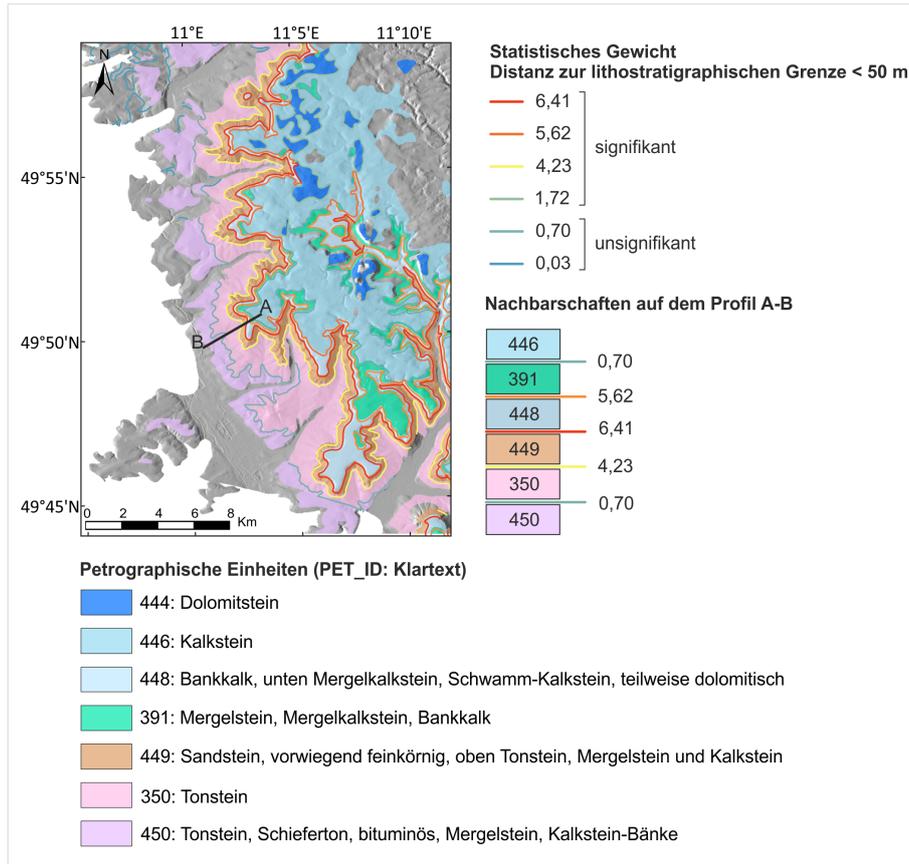


Abb. 2-26: Modellierungsbeispiel 1.4: Relevante lithostratigraphische Grenzen und ihre statistischen Gewichte für die Distanzklasse < 50 m im Ausschnitt nordöstlich Forchheim (Quellen: DGM25 – BKG; GÜK250 – BGR; Tab. 2-9).

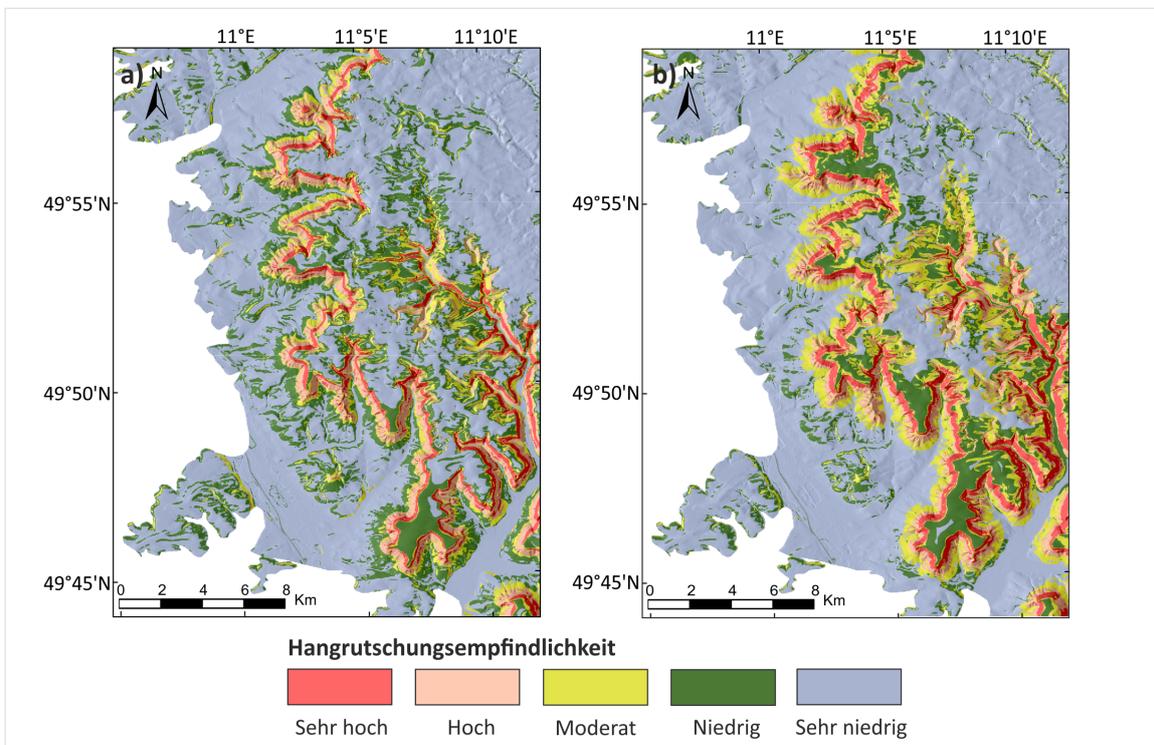


Abb. 2-27: Modellierungsbeispiel 1.4: Visueller Vergleich der Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit der Modelle im Ausschnitt nordöstlich Forchheim: a) Hang25 + GÜK250 (s. [Modellierungsbeispiel 1.1](#) bzw. [Modellierungsbeispiel 1.3](#)) und b) Hang25 + Distanz zu lithostratigraphischen Grenzen (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

2.6.1.5 Modellierungsbeispiel 1.5

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Abschätzung der Auswirkungen einer Maskierung (Ausparung) von Flächen mit geringer Hangneigung in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) wurde betont, dass die Hangneigung [eine notwendige Ursache](#) für die betrachteten Prozesstypen von gravitativen Massenbewegungen darstellt. Die räumliche Verteilung von Massenbewegungen innerhalb eines zu untersuchenden Testgebiets ist daher eine Funktion der Hangneigung.

Nachgeordnet werden weitere unabhängige Parameter zum Verständnis der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen berücksichtigt. In Gebieten mit geringer Hangneigung spielt die Präsenz weiterer Parameter in der Regel keine entscheidende Rolle für das Auftreten gravitativer Massenbewegungen.

Auch gilt, dass der Einfluss weiterer Parameter in der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit nur schwer zu fassen ist, wenn die Hangneigung eine ausgeprägte Differenzierung in der Region besitzt.

Die Analyse der Hangneigungsklassen aus dem Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) gibt für [alle drei Bewegungstypen von Massenbewegungen](#) AUC-Indizes von über 90 % zurück. Bei Betrachtung aller Unsicherheiten in anderen Prädispositionsfaktoren bedeutet dies, dass die Hangneigung der bestimmende Parameter ist, um die räumliche Verteilung der Massenbewegungen im Zielmaßstab 1 : 250 000 zu erklären.

Um den Einfluss weiterer Parameter in den statistischen Kennzahlen zu ergründen, müsste der Einfluss der Hangneigung vermindert werden.

Methodische Vorgehensweise

Um eine möglichst genaue Separierung der [trivialen](#) Flächen durchführen zu können, wurde das Hangneigungsraaster (Hang25) in 1°-Klassen klassifiziert und mittels der MGE analysiert.

Auf der Grundlage der berechneten statistischen Gewichte für die jeweiligen Massenbewegungstypen wurden Bereiche mit Gewichten ≤ 0 als triviale Flächen maskiert. Im Ergebnis konnten die trivialen Flächen aus der weiteren Analyse eliminiert werden.

Die räumlich deckungsgleiche Maske wurde jeweils auf die Parameter GÜK250 und Kurv25 angewendet, um räumliche Kongruenz zu garantieren.

Unter Ausparung der trivialen Flächen wurde die Modellierung mittels der MGE analog zum Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) mit 100 zufälligen Stichproben aus den Trainingsinventaren für den jeweiligen Massenbewegungstyp wiederholt. Die einzelnen gewichteten Parameter wurden anhand der ROC-Kurve evaluiert.

Durch die schrittweise Überlagerung der gewichteten Parameter wurde ein additives Modell generiert. Nach jedem Überlagerungsschritt wurde die ROC-Kurve für das Zwischenergebnis bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion

Für die Bestimmung der trivialen Flächen ergaben sich abhängig vom jeweiligen Massenbewegungstyp unterschiedliche Grenzwerte in der Hangneigung. Für Rotationsrutschungen konnte ein Grenzwert von 10°, für Translationsrutschungen von 5° und für Felsstürze von ca. 12° bestimmt werden.

Tab. 2-23 kompiliert die Effekte einer Maskierung mit den für unterschiedliche Massenbewegungstypen ermittelten Grenzwerten der Hangneigung auf die statistische Aussagekraft (AUC-Werte) für die Parameter GÜK250, Hang25 und Kurv25.

Es ist zu erkennen, dass sich die Veränderung der Flächen durch die Maskierung in allen Parametern mindernd auf die AUC-Werte auswirkt.

Tab. 2-23: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die Effekte einer Maskierung mit den für unterschiedliche Massenbewegungstypen ermittelten Grenzwerten der Hangneigung auf die statistische Aussagekraft (AUC-Wert) für die Parameter GÜK250, Hang25 und Kurv25.

Massenbewegungstyp	Grenzwert für Maskierung Hangneigung [°]	Parameter	AUC-Wert, unmaskiert*	AUC-Wert, maskiert
Rotationsrutschung	< 10	GÜK250	0,87 (0,87)	0,82 (0,81)
		Hang25	0,93 (0,93)	0,69 (0,68)
		Kurv25	0,79 (0,79)	0,70 (0,69)
Translationsrutschung	< 5	GÜK250	0,90 (0,83)	0,88 (0,80)
		Hang25	0,89 (0,87)	0,81 (0,80)
		Kurv25	0,74 (0,77)	0,63 (0,64)
Felssturz	< 12	GÜK250	0,80 (0,80)	0,74 (0,73)
		Hang25	0,96 (0,96)	0,86 (0,87)
		Kurv25	0,80 (0,79)	0,62 (0,60)

*Siehe auch Tab. 2-12 im Modellierungsbeispiel 1.1.

Für den Massenbewegungstyp *Rotationsrutschung* kann der dominierende Einfluss des Parameters Hangneigung (Hang25) deutlich reduziert werden. Mit der Maskierung fällt der AUC-Wert für diesen Parameter von 0,93 auf 0,69. Der Parameter GÜK250 verliert dagegen lediglich 5 Prozentpunkte im AUC-Wert und wird für diesen Massenbewegungstyp zum erklärungsstärksten Parameter.

Für den Parameter GÜK250 hat die Maskierung im Detail folgende Auswirkungen: Die Anzahl der Parameterklassen geht von 140 auf 120 zurück. Das bedeutet, dass alle petrographischen Einheiten, die auf Hanglagen mit der Neigung > 10° nicht vorkommen, aus der Analyse ausgeschlossen werden.

Bei den verbleibenden petrographischen Einheiten kommt es durch die Maskierung zu Änderungen der Flächenverhältnisse. Dadurch werden andere Einheiten als statistisch wichtiger bewertet.

In Tab. 2-24 sind die petrographischen Einheiten mit einem statistischen Gewicht > 1 aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den Ergebnissen im Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1: Tab. 2-13) der Anteil an tonigen und schluffigen Einheiten deutlich höher ist. Außerdem kommen neue Einheiten zum Tragen (Tab. 2-24, z. B. PET_IDs: 396, 451, 1884), die im Modellierungsbeispiel 1.1 nicht unter den signifikanten Einheiten aufgeführt wurden. Insgesamt liefert damit die maskierte GÜK250 eine plausiblere Interpretationsgrundlage des Empfindlichkeitsmodells gegenüber Rotationsrutschungen als die unmaskierte GÜK250 im Modellierungsbeispiel 1.1 (Abb. 2-28).

Tab. 2-24: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Einheiten (mit PET_ID) mit statistischem Gewicht > 0,5, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp Rotationsrutschung abgeleitet wurden.

PET_ID	Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung*	Statistisches Gewicht
396	Mergelstein, Ölschiefer und Kalkstein-Bänke, bituminös	3,4
451	Tonstein, Sandstein, Mergelstein	1,9
4347	Bankkalk, unten Mergelkalkstein, vorwiegend Bankkalk, teilweise Schwamm-Kalkstein, teilweise Dolomit	1,8
448	Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	1,7
399	Sandstein, Tonstein-Linsen	1,5
1884	Tonstein, Tonstein und Sandstein, Feinsandstein, basal Geröllkalk-Bank, Mergelstein, Kalkstein	1,3
350	Tonstein	1,2
709	Bankkalk, unten Mergelkalkstein	1,1
394	oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bankkalk	0,9
4628	oben Bankkalk, unten Mergelstein und Bankkalk, teilweise Mergel und Mergelkalk	0,9

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der Legende der GÜK250 unverändert übernommen.

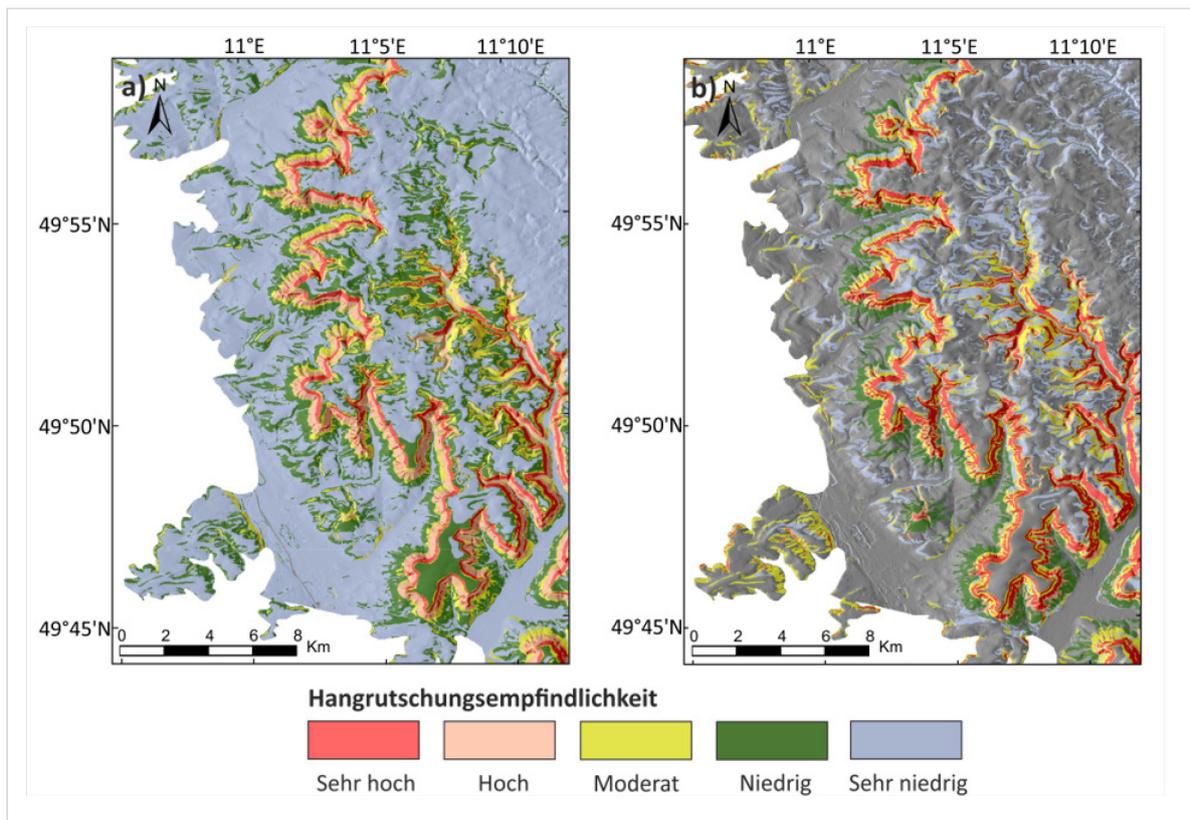


Abb. 2-28: Modellierungsbeispiel 1.5: Visueller Vergleich der Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit der Modelle für den Massenbewegungstyp Rotationsrutschung im Ausschnitt nordöstlich Forchheim: a) Hang25 + GÜK250 ohne Maskierung (s. [Modellierungsbeispiel 1.1](#)) und b) Hang25 + GÜK250 mit Maskierung der trivialen Flächen (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Für den Massenbewegungstyp *Translationsrutschung* resultieren aus der Maskierung von Flächen < 5° Hangneigung für alle Parameter ebenfalls niedrigere AUC-Werte (Tab. 2-23).

Ähnlich wie bei den Rotationsrutschungen wird durch die Maskierung die GÜK250 zum erklärungsstärksten Parameter (für das Trainingsinventar) bzw. nähert sich im AUC-Wert dem Parameter Hangneigung an (für das Testinventar).

Die Maskierung bewirkt in der GÜK250 eine Reduktion der Parameterklassen von 140 auf 135. Die Tab. 2-25 gibt einen Überblick über die Parameterklassen der GÜK250 mit statistischen Gewichten > 0,5.

Im Vergleich mit den Ergebnissen des Modellierungsbeispiels 1.1 (Tab. 2-14) erhält auch hier die Einheit mit der PET_ID 448 die höchsten statistischen Gewichte (Tab. 2-25). Die Reihenfolge der nachfolgenden Einheiten ist jedoch geringfügig zugunsten der Lockersedimente verschoben.

Tab. 2-25: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Beschreibungen (mit PET_ID) mit statistischen Gewichten > 0,5, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp *Translationsrutschung* abgeleitet wurden.

PET_ID	Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung*	Statistisches Gewicht
448	Bankkalk, unten Mergelkalkstein, Schwamm-Kalkstein, teilweise dolomitisch	2,4
9	klastisches Sediment, lehmig, steinig	1,8
450	Tonstein, Schiefer-ton, bituminös, Mergelstein, Kalkstein-Bänke	1,5
449	Sandstein, vorwiegend feinkörnig, oben Tonstein, Mergelstein und Kalkstein	1,4
350	Tonstein	1,3
4346	Tonschiefer, schluffig bis sandig, teilweise flaserig, teilweise kalkhaltig, Schluffstein, teilweise...	1,3
451	Tonstein, Sandstein, Mergelstein	0,5

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der Legende der GÜK250 unverändert übernommen.

Für den Massenbewegungstyp *Felssturz* ergibt sich durch Maskierung aller Flächen < 12° Hangneigung zunächst ein analoges Bild im Vergleich zu den anderen betrachteten Massenbewegungstypen.

Nach der Maskierung zeigen alle Parameter einen Abfall im AUC-Wert (Tab. 2-23). Allerdings bleibt hier die Hangneigung der einflussreichste Parameter. Die Maskierung bewirkt in der GÜK250 eine Reduktion der Parameterklassen von 140 auf 111.

Die Tab. 2-26 listet die petrographischen Einheiten der GÜK250 auf, die in der Analyse positive statistische Gewichte > 0,5 zugeordnet bekommen haben.

Tab. 2-26: Modellierungsbeispiel 1.5: Überblick über die petrographischen Einheiten (mit PET_ID) mit statistischem Gewicht > 0,5, die aus der Analyse des maskierten Parameters GÜK250 für den Massenbewegungstyp Felssturz abgeleitet wurden.

PET_ID	Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung*	Statistisches Gewicht
9999	keine Angaben	1,7
1880	Dolomitstein, massig	1,1
336	Ton, Schluff, Sand, teilweise Kies	1,1
393	Dolomitstein, Dolomitstein, tafelbankig	0,9
385	Kalkstein	0,8
4632	Dolomitstein, Dolomitstein, tafelbankig, teilweise Massenkalkstein, teilweise dolomitisch	0,6

*Die Beschreibungen der Parameterklassen wurden aus der Legende der GÜK250 unverändert übernommen.

Zwar zeigt sich ein deutlicher Trend zugunsten der kompetenten Bankkalke und Dolomitsteine, dennoch erhält die in der aktuellen GÜK250 undefinierte Einheit mit der PET_ID: 9999 den höchsten statistischen Wert (Tab. 2-26). Diese tritt im Testgebiet meist in der Nachbarschaft von massigen Dolomitsteinen und Kalksteinen auf.

Auch erhalten Ton, Schluff und Sand (PET_ID: 336) höhere Gewichte, was vor allem auf Generalisierungseffekte und Überzeichnung von Talablagerungen bis in die steileren Hanglagen zurückgeführt werden könnte (Tab. 2-26).

Diese Einheiten kommen im maskierten Testgebiet nur als kleine Flächen vor, die durch wenige in ihnen verortete Felssturzereignisse höhere Gewichte erhalten als die in den steileren Hanglagen dominierenden kompetenten Gesteinsformationen.

Der Parameter Hangkrümmung (Kurv25) zeigt im Testgebiet für alle Massenbewegungstypen übereinstimmend, dass die konkaven Hänge einen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen aufweisen. Die Hangkrümmung wird in allen Maskierungsvarianten abgeschwächt. Für Felsstürze und Translationsrutschungen verliert der Parameter an Bedeutung (Tab. 2-23).

In Tab. 2-27 werden für unterschiedliche Massenbewegungstypen die Modellvarianten Hang25 + GÜK250 bzw. Hang25 + GÜK250 + Kurv25 aus der schrittweisen Überlagerung der Parameter mit der entsprechenden Anzahl der Parameterklassenkombinationen und AUC-Werten aus der Evaluierung mittels ROC-Kurve präsentiert.

Die Kombination Hang25 + GÜK250 liefert auch hier für alle Massenbewegungstypen [gute bis ausgezeichnete Modellergebnisse](#). Der zusätzliche Parameter Hangkrümmung (Kurv25) verbessert das Modell für Rotationsrutschungen (Tab. 2-27).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-27: Modellierungsbeispiel 1.5: Übersicht über die Modellvarianten Hang25 + GÜK250 bzw. Hang25 + GÜK250 + Kurv25 mit korrespondierenden Angaben zur Anzahl der Klassenkombinationen und zu AUC-Werten der ROC-Kurve für verschiedene Massenbewegungstypen.

Bewegungstyp	Modell	Anzahl Klassenkombinationen	AUC-Wert (für Testinventar)
Rotationsrutschung	Hang25 + GÜK250	522	0,85 (0,84)
	Hang25 + GÜK250 + Kurv25	2166	0,87 (0,87)
Translationsrutschung	Hang25 + GÜK250	651	0,92 (0,89)
	Hang25 + GÜK250 + Kurv25	2794	0,91 (0,87)
Felssturz	Hang25 + GÜK250	505	0,90 (0,89)
	Hang25 + GÜK250 + Kurv25	2099	0,90 (0,89)

2.6.1.6 Modellierungsbeispiel 1.6

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung der Übertragbarkeit eines Hangrutschungsempfindlichkeitsmodells eines Naturraums (Fränkische Alb und Albvorland) in einen geologisch-geomorphologisch vergleichbaren Naturraum (Schwäbische Alb und Albvorland).

Fränkische und Schwäbische Alb sind sehr ähnliche Naturräume. Der vergleichbare geologische und geomorphologische Bau ermöglicht die Prüfung, ob die Modellgewichte von einem Naturraum auf einen anderen übertragen werden können.

Methodische Vorgehensweise

Die im Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) für das Testgebiet Fränkische Alb und Albvorland erstellten Modelle der Hangrutschungsempfindlichkeit für die Prozessstypen Rotationsrutschung und Felssturz in der Kombination der Parameter GÜK250 und Hangneigung (Hang25) wurden auf das Testgebiet Schwäbische Alb und Albvorland (= Zielgebiet) übertragen. Die Übertragung erfolgte für die beiden Parameter einzeln.

Für die Übertragung der prozessspezifischen statistischen Gewichte für die Hangneigung (Hang25) wurde initial die Hangneigung für das Zielgebiet aus dem DGM25 deduziert und in 5°-Klassen unterteilt. Die statistischen Gewichte wurden den Hangneigungsklassen direkt zugewiesen.

Die Übertragbarkeit der statistischen Gewichte für geologische Einheiten setzt voraus, dass im Zielgebiet die Einheiten gleicher inhaltlicher petrographischer Beschreibung existieren und mit eindeutigen Schlüsseln (IDs) innerhalb der Informationsebenen bzw. deren Attributtabelle in den Sachdatenbanken geführt werden.

Unter Nutzung der Parameterklassen der GÜK250 aus dem Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1), die auf der petrographischen Beschreibung basieren (geknüpft an die PET_ID), lassen sich auf der Schwäbischen Alb und im Albvorland lediglich 15 % der Fläche eindeutig charakterisieren.

Folgerichtig ist für regionale Vergleiche eine weitere Aggregation notwendig. Die detaillierten petrographischen Beschreibungen werden in der GÜK250 unter Nutzung des Symbolschlüssels Geologie ([LBEG, 2015](#)) zusammengeführt. Diese Aggregation führt zu einer Reduzierung der Parameterklassen der GÜK250 im Testgebiet Fränkische Alb und Albvorland von 140 auf 63. Mit aggregierten Parameterklassen lässt sich ca. 90 % der Fläche des Zielgebiets mit den Werten aus der Fränkischen Alb und Albvorland beschreiben (Abb. 2-29). Die verbleibenden Flächenanteile von 10 % entfallen vor allem auf die lithostratigraphischen Einheiten des Mittleren Keuper im Albvorland der Schwäbischen Alb. Diese kommen auf der Fränkischen Alb und im Albvorland nicht vor oder lassen sich über den Symbolschlüssel Geologie ([LBEG, 2015](#)) nicht vereinheitlichen.

Durch die Aggregation von 140 auf 63 Parameterklassen müssen auch die statistischen Gewichte zusammengefasst werden. Dies wurde mittels eines gewichteten Mittelwertes verwirklicht, wobei die Flächenanteile der zusammengefassten Parameterklassen berücksichtigt wurden.

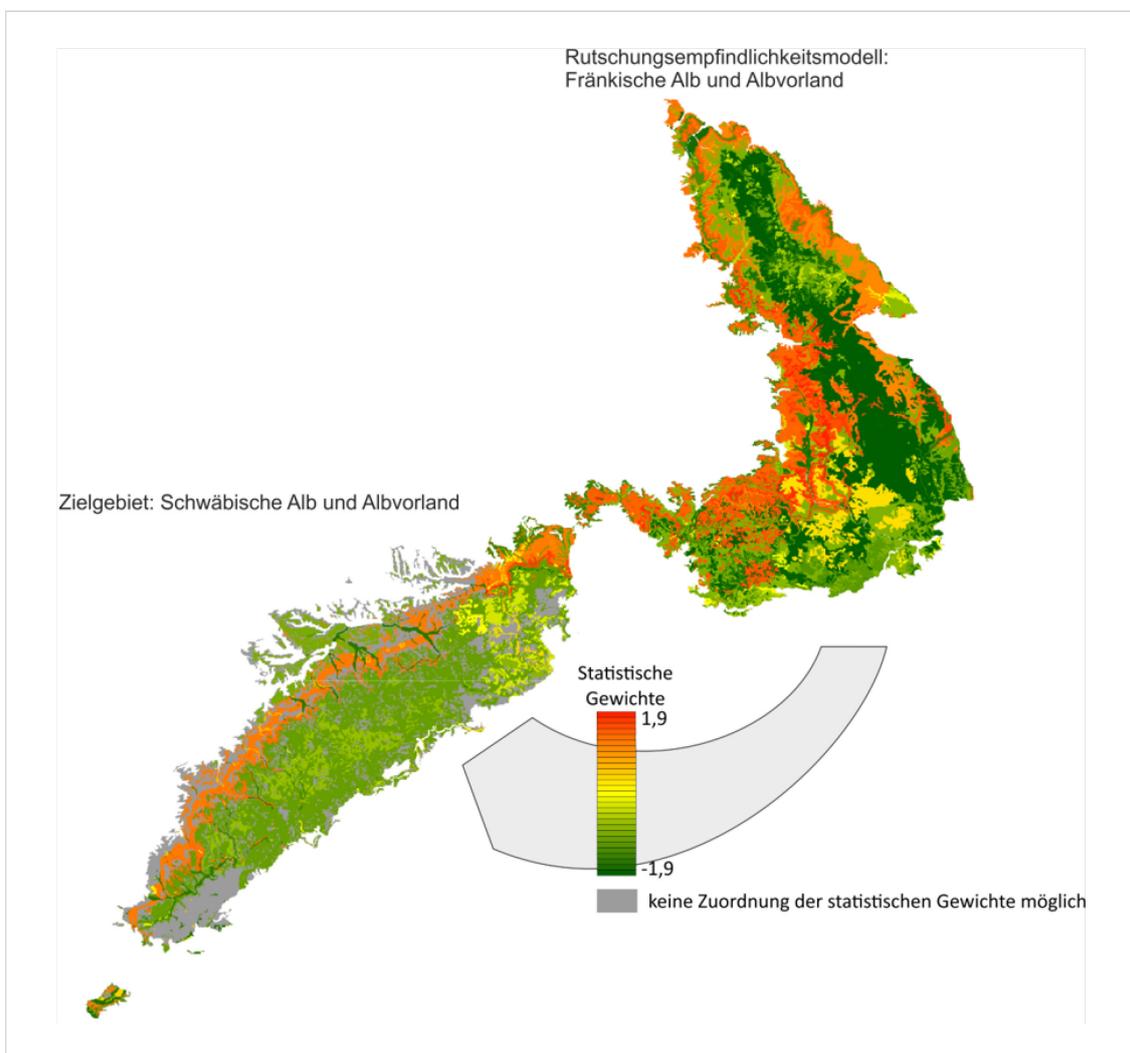


Abb. 2-29: Modellierungsbeispiel 1.6: Räumliche Verteilung der statistischen Gewichte für Rotationsrutschungen über die nach dem Symbolschlüssel Geologie ([LBEG, 2015](#)) aggregierten Parameterklassen der GÜK250 in der Fränkischen Alb und Albvorland und in der Schwäbischen Alb und Albvorland (Zielgebiet); Graue Flächen markieren Gebiete, in denen eine Übertragung der statistischen Gewichte nicht möglich ist (Grenzen der hydrogeologischen Teilräume gemäß [Hydrogeologischer Raumgliederung – HYRAUM, Version 32, @BGR & SGD, Hannover 2015](#)).

Die so resultierenden statistischen Gewichte wurden anhand des Symbolschlüssels Geologie ([LBEG, 2015](#)) den Einheiten der GÜK250 im Zielgebiet zugewiesen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die Übertragung des Empfindlichkeitsmodells für Felsstürze ist aufgrund gleicher Typisierung möglich, da dieser Prozesstyp in beiden Testgebieten einheitlich als Felssturz geführt wird. Anders als auf der Fränkischen Alb und im Albvorland werden im Zielgebiet Schwäbische Alb und Albvorland die Rutschprozesse nicht in Rotations- und Translationsrutschungen unterschieden, sondern lediglich als [Rutschprozess bzw. Rutschung](#) erfasst. Die Art der Inventargewinnung aus dem geschummerten Relief des DGM1 (s. Kapitel 1.3.3.1) lässt allerdings vermuten, dass es sich bei den erfassten Massenbewegungen vor allem um Rotationsrutschungen handelt. Diese Bewegungstypen sind im geschummerten Relief deutlich besser erkennbar. Deshalb wurde für die Erklärung der Rutschungen auf der Schwäbischen Alb und Albvorland das Modell der Hangrutschungsempfindlichkeit für Rotationsrutschungen aus der Fränkischen Alb und Albvorland herangezogen.

Die Evaluierung der übertragenen Modelle wurde unter Nutzung des Inventars für Rutschungen und Felsstürze aus der Schwäbischen Alb und Albvorland durchgeführt.

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Aggregation der Parameterklassen der GÜK250 nach dem Symbolschlüssel Geologie ist keine signifikante Änderung in der Modellqualität für Rotationsrutschungen und Felsstürze in der Fränkischen Alb und Albvorland selbst zu beobachten. Das Modell für Rotationsrutschungen zeigt auch mit den aggregierten Klassen einen AUC-Index von 0,96; das Modell für Felsstürze bleibt ebenfalls bei einem AUC-Index von 0,97 (s. Tab. 2-16).

Die Abb. 2-30 zeigt am Beispiel des Massenbewegungstyps *Rutschung* (ungegliedert) das Ergebnis der Modellübertragung aus der Fränkischen Alb und Albvorland auf die Schwäbische Alb und Albvorland und die zugehörige ROC-Kurve mit dem für die Zonierung der Hangrutschungsempfindlichkeit verwendeten Klassifikationsschema.

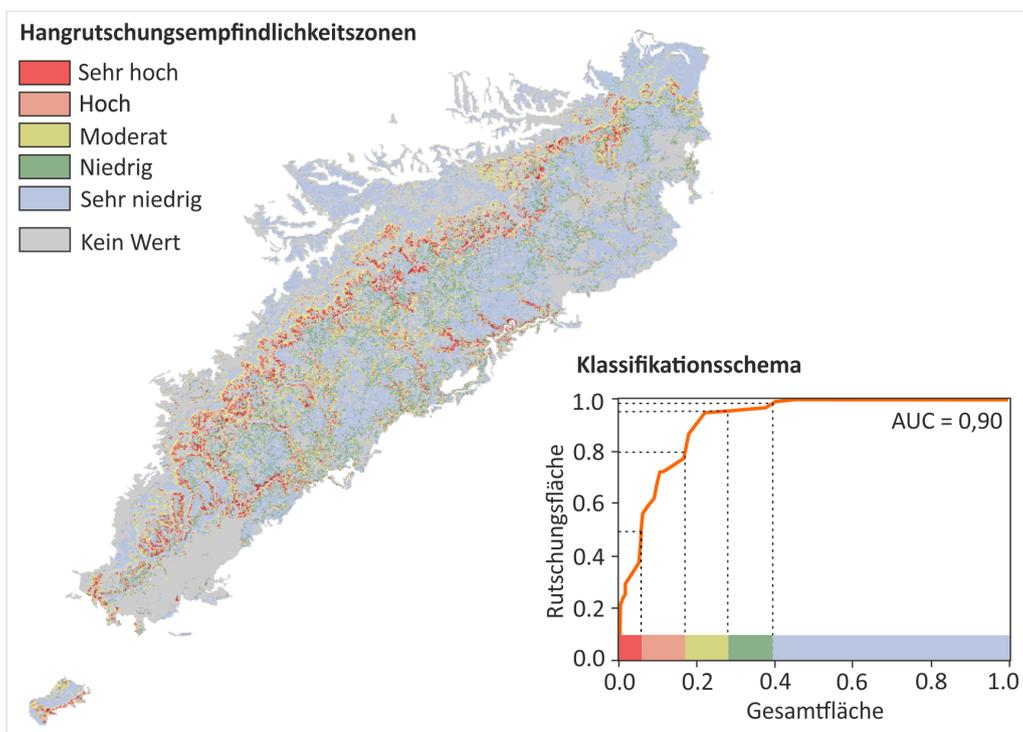


Abb. 2-30: Modellierungsbeispiel 1.6: Hangrutschungsempfindlichkeitsmodell (Rutschungen, ungegliedert) für die Schwäbische Alb und Albvorland, resultierend aus der Übertragung des Modells für Rotationsrutschungen aus der Fränkischen Alb und Albvorland; klassifiziert in fünf Zonen, basierend auf der ROC-Kurve aus der Modellevaluierung für den Massenbewegungstyp Rutschung (ungegliedert) (Grenzen der hydrogeologischen Teilräume gemäß [Hydrogeologischer Raumgliederung – HYRAUM, Version 32, ©BGR & SGD, Hannover 2015](#)).

Die Tab. 2-28 gibt einen Überblick über die Evaluierungsergebnisse der Parameter GÜK250 und Hang25 mit dem Inventar aus der Schwäbischen Alb und Albvorland. Die Evaluierung des übertragenen Modells mittels der ROC-Kurve liefert mit einem AUC-Wert von 0,90 auch für die Schwäbische Alb noch ein [ausgezeichnetes](#) Ergebnis. Die Abnahme der Modellqualität in der Schwäbischen Alb und Albvorland gegenüber der Fränkischen Alb und Albvorland (AUC-Wert 0,96: Tab. 2-16) könnte sich in dem undifferenzierten Inventar begründen. Weil dieses neben Rotationsrutschungen auch Translationsrutschungen führt, kann das Modell für Rotationsrutschungen aus der Fränkischen Alb und Albvorland möglicherweise diese nicht adäquat abbilden.

Tab. 2-28: Modellierungsbeispiel 1.6: Überblick über die Ergebnisse der Evaluierung unter Maßgabe des Inventars aus der Schwäbischen Alb und Albvorland für die Parameter GÜK250 und Hang25.

Massenbewegungs- typ	Informationsebene bzw. Parameter	AUC-Wert Informationsebene bzw. Parameter	AUC-Wert Modell
Rutschung	GÜK250	0,76	0,90
	Hang25	0,86	
Felssturz	GÜK250	0,63	0,99
	Hang25	0,98	

Vergleicht man die beiden Testgebiete anhand der Parameter Hang25 und GÜK250 aus der MGE-Analyse (s. [Kapitel 2.6.1.1](#)) mit den aus der ROC-Kurve abgeleiteten AUC-Werten (Tab. 2-28), wird ersichtlich, dass auch auf der Schwäbischen Alb und Albvorland der Parameter Hangneigung (Hang25) den entscheidenden Anteil zur Deutung der räumlichen Verteilung von Rutschungen und Felsstürzen im Maßstab 1 : 250 000 liefert.

Das Verteilungsmuster der Felsstürze wird auf der durch ein steileres und schrofferes Relief geprägten Schwäbischen Alb sogar mit einem AUC-Wert von 0,98 belegt. Die Tab. 2-28 präsentiert die Evaluierungsergebnisse der Parameter GÜK250 und Hang25 mit dem Inventar aus der Schwäbischen Alb und Albvorland. Das liegt höchstwahrscheinlich daran, dass das Inventar in der Schwäbischen Alb auf der Grundlage eines DGM1 aufgenommen wurde. Damit ist der Ereignisdatensatz auf die Lageverortung im DGM besser abgestimmt.

Die GÜK250 mit der Aggregation nach dem Symbolschlüssel Geologie ([LBEG, 2015](#)) liefert mit einem AUC-Wert von 0,76 eine moderate Erklärung für Rutschungen. Für Felsstürze dagegen ist der Parameter GÜK250 mit einem AUC-Wert von 0,63 in dieser Aggregationsebene unbedeutend.

2.6.2 Fallstudie 2: Elbtalgraben (Sachsen)

In der Fallstudie 2 wurden zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit fünf Modellierungsbeispiele (2.1 bis 2.5) unter Anwendung des in [Kapitel 2.3](#) erläuterten Methodenspektrums mit jeweils unterschiedlicher Ziel- bzw. Fragestellung realisiert (Tab. 2-10).

Im Modellierungsbeispiel 2.1 (s. [Kapitel 2.6.2.1](#)) fließen die Erkenntnisse aus der Fallstudie 1 (s. [Kapitel 2.6.1](#)) zur Abschätzung der regionalen Hangrutschungsempfindlichkeit unter Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen ein.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die Modellierungsbeispiele 2.2 (s. Kapitel 2.6.2.2) und 2.3 (s. Kapitel 2.6.2.3) thematisieren die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Anwendung des Analytischen Hierarchieprozesses bzw. des Infiniten Hangmodells.

Die Modellierungsbeispiele 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) und 2.5 (s. Kapitel 2.6.2.5) fokussieren im Sinne vergleichender Studien auf die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Anwendung eines Künstlichen Neuronalen Netzes. Ziel war es, unter der Maßgabe identischer Inventar- und Informationsebenen resultierende Effekte variierender Modellparametrisierungen zu erkennen und zu bewerten. Das Modellierungsbeispiel 2.5 wurde dankenswerterweise durch die Technische Universität Berlin bearbeitet²².

Tab. 2-29 gibt einen Überblick über die Modellierungsbeispiele 2.1 bis 2.5 und den korrespondierenden räumlichen Bezug.

Tab. 2-29: Fallstudie 2 – Übersicht über die Modellierungsbeispiele und den jeweiligen räumlichen Bezug (hydrogeologischer Raum bzw. Teilraum).

<i>Fallstudie 2: Elbtalgraben (Sachsen)</i>				
<i>Modellierungsbeispiel</i>	<i>Teilstudie</i>	<i>Modellierungsmethode</i>	<i>Räumlicher Bezug</i>	<i>Kapitel</i>
2.1	2.1A	MGE	Hydrogeologischer Raum Elbtalgraben	2.6.2.1
	2.1B	MGE	Hydrogeologischer Teilraum Elbtalkreide	
2.2	-	AHP	Hydrogeologischer Raum Elbtalgraben	2.6.2.2
2.3	-	IHM	Hydrogeologischer Raum Elbtalgraben	2.6.2.3
2.4	-	KNN	Hydrogeologischer Teilraum Elbtalkreide (Zentraler Teil)	2.6.2.4
2.5	-	KNN	Hydrogeologischer Raum Elbtalgraben	2.6.2.5

Geologisch-geomorphologischer Überblick

Der hydrogeologische Raum Elbtalgraben (s. Kapitel 2.4: Tab. 2-8) erstreckt sich vom südöstlichen Zittauer Gebirge über das Elbsandsteingebirge und das Hügelland der Grundgebirgseinheiten bis in das nördliche mitteldeutsche Tiefland (Abb. 2-31). Mit einer Fläche von ca. 2000 km² zeichnet der Elbtalgraben alte tektonische Elemente nach, die teilweise grabenbruchähnlich angelegt sind. Der Raum wird in seiner gesamten Länge von der Elbe durchflossen. Das Tal der Elbe ist im Süden sehr schmal und weitet sich im Norden zu einer breiten Aue mit mächtigen quartären Ablagerungen aus. Die Gliederung des hydrologischen Raums in acht Teilräume erfolgte natürlicherweise auf der Grundlage struktureologischer Einheiten.

Der hydrogeologische Teilraum Elbtalkreide (Abb. 2-31 und Abb. 2-32) ist vorrangig durch Gesteine der Oberkreide aufgebaut. An der Basis lagern fluviatil-limnische Konglomerate, Sandsteine und Letten

²² Aufgrund seiner Expertise im Bereich Maschinelles Lernen (ML) wurde das Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachbereich Ingenieurgeologie der Technischen Universität Berlin unter Leitung von Herrn Prof. Dr. Tomás Fernandez-Steeger seitens der MBiD-Arbeitsgruppe gebeten, einen methodischen Beitrag zu leisten. Die Analyse wurde im Rahmen einer Masterarbeit von Herrn Felix Schumann durchgeführt (Betreuung: Frau Dr. Anika Braun). Die Bereitstellung der Inventarinformationen erfolgte durch das LfULG Sachsen.

(schluffige bis sandige Ton- und Mergelsteine), überlagert von bis zu 400 m mächtigen marinen Sandsteinen. Magmatische Gesteine treten im Norden des Teilraums Elbtalkreide vereinzelt als Kuppen respektive Härtlinge auf.

Das Elbsandsteingebirge im südlichen Bereich des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide ist eine Erosionslandschaft mit sehr schroffen Landschaftsformen, charakterisiert durch tief eingeschnittene canyonartige Täler und steile Sandsteinformationen.

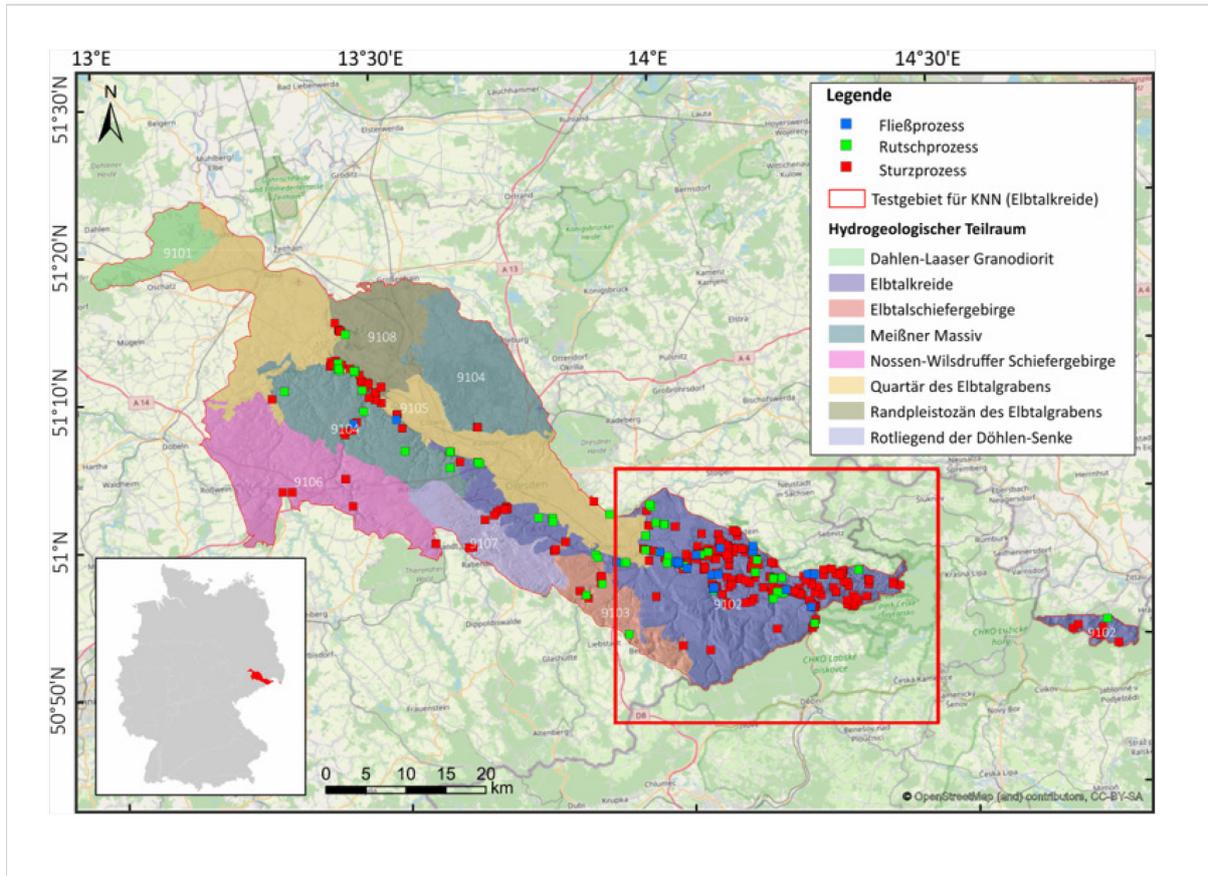


Abb. 2-31: Topographischer Kartenausschnitt des Elbtalgrabens als hydrogeologischer Raum und dessen hydrogeologische Teilräume (Nummern 9102 bis 9108), überlagert mit dem Schummerungsmodell des DGM25 sowie der Punktdarstellung der erfassten Massenbewegungen nach Bewegungstypen; das rote Rechteck kennzeichnet den Ausschnitt im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide, der für die Modellierung mit KNN im Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) gewählt wurde (s. Abb. 2-32) (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen: Tab. 2-30; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

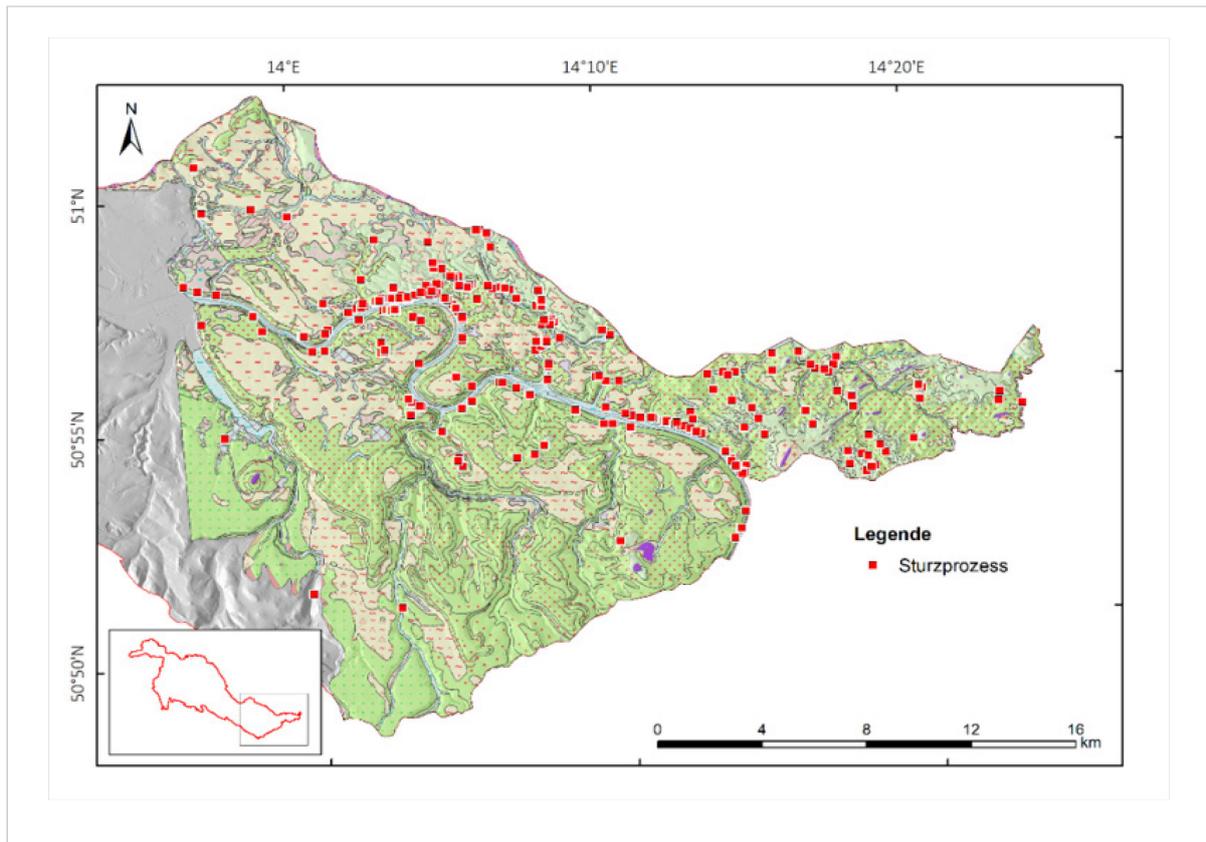


Abb. 2-32: Topographischer Kartenausschnitt des zentralen Teils des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide als Schummerungsmodell des DGM25, überlagert mit den petrographischen Einheiten der GK50 (Anmerkung: auf Grund der hohen Anzahl an petrographischen Einheiten wurde auf eine Legende verzichtet) sowie der Punktdarstellung der erfassten Massenbewegungen des kinematischen Bewegungstyps Sturzprozess; auf diesen Ausschnitt bezieht sich die Modellierung mittels KNN im Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen: Tab. 2-30; Topographie – OpenStreetMap contributors: CC-BY-SA; Tab. 2-9).

Verwendete Inventarinformationen und Informationsebenen

Vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) wurde für den Elbtalgraben ein Auszug aus dem Ereigniskataster (s. Kapitel 1.3.3.4) zur Nutzung im MBiD-Projekt zur Verfügung gestellt. Dieser umfasst mit Stand Dezember 2019 463 Ereignisse. Diese Massenbewegungen sind in Sturz-, Rutsch- und Fließprozesse differenziert. Tab. 2-30 zeigt, dass der Sturzprozess der mit Abstand häufigste Bewegungstyp im Elbtalgraben ist. Als besonders empfindlich gegenüber Sturzprozessen ist der hydrogeologische Teilraum der Elbtalkreide einzustufen, in dem 277 Ereignisse kartiert wurden.

Tab. 2-30: Massenbewegungsereignisse im Testgebiet Elbtalgraben, untergliedert nach Prozess- bzw. Bewegungstypen (Quelle: LfULG Sachsen: Stand Dezember 2019).

Prozesstyp	Anzahl Massenbewegungsereignisse
Sturzprozess (s. Deckblatt, rechtes Foto)	369 (davon 277 im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide)
Rutschprozess (Abb. 2-33; Abb. 2-34)	68
Fließprozess	26



Abb. 2-33: Translationsrutschung im Hangbereich unterhalb der Festung Königstein (Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Sachsen): Lockergesteinsbedeckung auf Sandstein abgerutscht, verlagertes Volumen ca. 3000 m³ (max. Breite ca. 50 m, max. Länge ca. 250 m), Foto: Peter Dommaschk, LfULG Sachsen, 07.08.2010.



Abb. 2-34: Rotationsrutschung im Hangbereich Obervogelgesang bei Pirna (Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge, Sachsen): Hanganschlüpfung eines auflässigen Sandsteinbruchs, verlagertes Volumen ca. 1000 m³ (max. Breite ca. 30 m, max. Länge ca. 110 m), Foto: Peter Dommaschk, LfULG Sachsen, 20.08.2001.

Für die genannten Modellierungsbeispiele 2.1 bis 2.5 (Tab. 2-9, Tab. 2-10; s. Kapitel 2.6.2.1, 2.6.2.2, 2.6.2.3, 2.6.2.4 und 2.6.2.5) wurden in Abhängigkeit von der Ziel- und Fragestellung sowie der Verfügbarkeit unterschiedliche thematische Informationsebenen integriert. Die daraus abgeleiteten modellierungsrelevanten Parameter bzw. Parameterklassen sind in der Tab. 2-31 zusammengefasst.

Die thematischen Informationsebenen Geologische Karte von Sachsen 1 : 50 000 (GK50) und die Geologische Karte Lausitz-Jizera-Karkonosze 1 : 100 000 (GK100 L-J-K) sind im Testgebiet Elbtalgraben nicht flächendeckend vorhanden.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

2.6.2.1 Modellierungsbeispiel 2.1

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Validierung der Anwendbarkeit der Erkenntnisse aus der statistischen Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit in den Modellierungsbeispielen 1.1 bis 1.3 sowie 1.5 der Fallstudie 1 (Fränkische Alb und Albvorland) in einem anderen Naturraum (Elbtalgraben) am Beispiel der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Im Modellierungsbeispiel 2.1 wurde aufbauend auf den Ergebnissen der Fallstudie 1 (s. Kapitel 2.6.1) die Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen für die Abschätzung der regionalen Hangrutschungsempfindlichkeit in zwei Teilstudien weiter verfolgt:

Teilstudie 2.1A: Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen am Beispiel der plausibelsten Parameterkombination (Modell Hang25 + GÜK250) unter Berücksichtigung des Einflusses linearer Elemente und der Verortung von Ereignissen auf die Modellgüte im Testgebiet Elbtalgraben (Tab. 2-8; Tab. 2-29; Abb. 2-31).

In der Fallstudie 1 konnte gezeigt werden, dass, in Abhängigkeit von der regionalen Morphologie, die Hangneigung einen starken statistischen Beitrag zur Erklärung der Hangrutschungsempfindlichkeit liefert. Dies bedeutet, dass die statistische Nachweisbarkeit des möglichen Beitrags anderer Parameter stark vermindert sein kann. Der wirksame Einfluss der Hangneigung in der Modellierung mit MGE kann durch eine geeignete Maskierung sogenannter *trivialer Flächen* abgemindert werden, um den Beitrag anderer Parameter zur Modellbildung erkennbar zu machen (s. Kapitel 2.6.1.5). Diese Erkenntnisse sollten in einem anderen Naturraum überprüft werden. Zusätzlich sollte der Einfluss der linearen Elemente (z. B. tektonische Elemente oder Infrastruktur) untersucht werden.

Aus der Attribuierung des Inventars ergibt sich eine zusätzliche Möglichkeit der Verortungskorrektur für Sturzprozesse. Das Inventar des LfULG Sachsen führt neben dem Massenbewegungstyp auch die petrographische Feldbeschreibung der Gesteinsschichten mit, in denen das Versagen eingetreten ist. Somit konnten Fehlzuzuweisungen aus der Überlagerung der Massenbewegungspunkte mit den generalisierten geologischen Informationsebenen erkannt und korrigiert werden. Die Korrektur erfolgte durch die Gegenüberstellung von Feldbeschreibung mit der aus der Überlagerung abgeleiteten Petrographie. Wenn eine Fehlzuzuweisung festgestellt wurde, wurde der korrekten petrographischen Einheit ein Sturzprozess manuell zugeordnet.

Tab. 2-31: Verwendete Informationsebenen und gewählte Parameter/Parameterklassen für die Modellierungsbeispiele 2.1 - 2.5 (s. Kapitel 2.6.2.1, 2.6.2.2, 2.6.2.3, 2.6.2.4, 2.6.2.5) (Quellen: Tab. 2-9).

Informationsebene (Abkürzung)	Thema	Parameter/ Parameterklasse	Anzahl Klassen
DGM25	Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 25 m x 25 m	• Hang25 - Hangneigungsklassen in 5°-Einteilung	13
		• Hang25 - Hangneigungsklassen in 1°-Einteilung	65
DGM10	Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 10 m x 10 m	• Hang10 - Hangneigungsklassen in 5°-Einteilung	16
		• Hang10 - Hangneigungsklassen in 1°-Einteilung	77
GÜK1000	Geologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 1 000 000	• Gesteinsgruppen (INSPIRE-konforme Petrographie)	9
GÜK250	Geologische Übersichtskarte von Deutschland, 1 : 250 000	• Petrographische Einheiten (Legendeneinheiten)	85
		• Lineare tektonische Elemente	6
BK50	Bodenkarte von Sachsen, 1 : 50 000 (mit Sachdatenbank)	• Leitbodenformen (Legendeneinheiten)	270
DLM250	Digitales Landschaftsmodell von Deutschland, 1 : 250 000	• Straßen und Bahnlinien	5
GK100 (L-J-K)	Geologische Karte Lausitz-Jizera-Karkonosze, 1 : 100 000 (Ausschnitt Elbtalkreide)	• Petrographische Einheiten (Legendeneinheiten)	45
GK50	Geologische Karte von Sachsen, 1 : 50 000 (Ausschnitt Elbtalkreide)	• Petrographische Einheiten (Legendeneinheiten)	86
CLC10	Corine Landbedeckung von Deutschland (Stand: 2012), Mindestflächengröße 10 ha	• Klassen der Landbedeckung in drei Ebenen	13
Bodenfeuchte	Vieljährige Raster der monatlichen Boden- feuchte für Deutschland, Gitterweite 1 km x 1 km	• Vieljährige Raster der Boden- feuchte unter Gras und sandigem Lehm (per Kalendermonat)	12

Teilstudie 2.1B: Ein weiteres Ergebnis der Fallstudie 1 ist, dass detailliertere Informationsebenen die Modellergebnisse verbessern können (s. Kapitel 2.6.1.2). Daher wurde die Abschätzung der Generalisierungseffekte auf die Modellgüte bzw. Plausibilität bei Anwendung unterschiedlich skalierte geologischer Informationsebenen im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide geprüft (Tab. 2-8; Tab. 2-29; Abb. 2-31; Abb. 2-32).

Methodische Vorgehensweise

Die Rutschungsinventare (Tab. 2-30) wurden initial auf ihre statistische Auswertbarkeit beurteilt. Im Ergebnis dieser Beurteilung wurde festgestellt, dass die geringe Anzahl der erfassten Rutsch- und Fließprozesse es nicht erlaubt, für diese Massenbewegungstypen [belastbare statistische Analysen durchzuführen](#).

Das einzige statistisch belastbare Inventar liegt für die Sturzprozesse vor. Dieses wurde in ein Trainings- (80 % der Sturzprozesse) und ein Testinventar (20 % der Sturzprozesse) randomisiert aufgeteilt. Die Analyse erfolgte analog zum Modellierungsbeispiel 1.1 (s. [Kapitel 2.6.1.1](#)) anhand von 100 Stichproben aus dem Trainingsinventar unter Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Teilstudie 2.1A: Um die geeignete Maske für die [trivialen](#) Flächen erstellen zu können, wurde für die Sturzprozesse die MGE-Modellierung unter Verwendung des Parameters Hangneigung (Hang 25) ausgeführt. Hierfür wurde die Hangneigung in 1°-Klassen unterteilt. Aus den Ergebnissen dieser Analyse wurden die Grenzwerte für die Hangneigung abgeleitet, unterhalb derer angenommen werden kann, dass dort keine Sturzprozesse auftreten können.

Um den Einfluss linearer Elemente ([s. oben](#)) analysieren zu können, müssen flächenhafte Daten erzeugt werden. Dies geschieht grundsätzlich durch Generierung von Distanzrastern (Euklidische Distanz), in denen jede Rasterzelle einen Distanzwert zugeordnet bekommt, der den kürzesten Abstand zum nächsten linearen Element besitzt. Die Analyse der erstellten Distanzraster umfasste folgende Schritte:

1. Aufstellen einer Hypothese über die Veränderung des Einflusses eines linearen Elements mit zunehmender Distanz;
2. Unterteilung des stetigen Distanzrasters in zehn diskrete Klassen (Distanzklassen) durch Quantile. Dies garantiert eine annähernd gleiche Rasterpixelzahl innerhalb der Distanzklassen;
3. Bestimmung der statistischen Gewichte und deren Standardabweichungen für die Distanzklassen mittels MGE;
4. Division der statistischen Gewichte durch ihre Standardabweichung (studentisierte Residuen²³). Dadurch wird die Werteskala gestreckt und es stellen sich bessere Kontraste zwischen signifikanten und nicht signifikanten statistischen Gewichten ein;
5. Aufsummierung der studentisierten Residuen über die Distanzklassen in einem Diagramm;
6. Prüfung, ob die hypothetischen Annahmen aus Schritt 1 bestätigt werden können.

Bei den meisten Parametern wird davon ausgegangen, dass ihr Einfluss mit zunehmendem Abstand abnimmt (z. B. bei tektonischen Elementen, die Schwächezonen in den Gesteinen darstellen). Somit wird ein positiver Zusammenhang für die proximalen Distanzklassen erwartet, der sich durch die positiven Werte der statistischen Gewichte und der studentisierten Residuen auszeichnet.

Werden die studentisierten Residuen über die Distanzklassen aufsummiert, ergibt sich durch die positiven Werte zunächst ein Anstieg der Kurve (Abb. 2-35). Die Kurve steigt solange an, bis eine Distanzklasse erreicht wird, deren Werte für die studentisierten Residuen etwa null oder sogar negativ sind.

²³ Studentisiertes Residuum (engl.: studentized residual) bezeichnet in der Statistik einen Quotienten aus einem Wert und seiner Standardabweichung. Es ist somit eine Art Standardisierung bzw. Normalisierung. Der Begriff Student geht auf den englischen Statistiker William Sealy Gosset zurück, der unter diesem Pseudonym bedeutende Arbeiten zur statistischen Signifikanz veröffentlichte.

Dieser Wendepunkt in der Kurve markiert die maximale Distanz, bis zu der ein Einfluss des Parameters angenommen werden könnte.

Zeigt ein Parameter unerwartet einen anderen Kurvenverlauf im Summendiagramm als hypothetisch angenommen ist davon auszugehen, dass für diesen Parameter kein plausibler Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen über die Distanz nachgewiesen werden kann. Ein solcher Kurvenverlauf weist z. B. negative Werte in den proximalen Klassen oder eine starke Alteration der Kurve mit vielen gleich ausgeprägten Wendepunkten ohne sichtbaren Trend auf.

Grundsätzlich ist aber auch zu prüfen, ob ein plausibler Kurvenverlauf nicht zufällig, z. B. durch räumliches Zusammenfallen mit anderen Parametern (Koinzidenz), zustande kommen kann.

Teilstudie 2.1B: Um die Unsicherheiten in der Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit durch die Generalisierung in den Informationsebenen abschätzen zu können, wurden drei Produkte geologischer Kartierung mit entsprechend abgeleiteten Parametern miteinander verglichen (Tab. 2-31). Es handelt sich dabei um:

- die Geologische Karte 1 : 50 000 (GK50);
- die Geologische Karte Lausitz-Jizera-Karkonosze 1 : 100 000 (GK100 L-J-K);
- die Geologische Übersichtskarte 1 : 250 000 (GÜK250).

Diese Karten sind durch einen unterschiedlichen Grad der Diskretisierung charakterisiert, der sich in der Anzahl unterscheidbarer petrographischer Einheiten widerspiegelt (Tab. 2-31).

Da die GK50 und die GK100 (L-J-K) nicht im gesamten Gebiet des Elbtalgrabens flächendeckend vorhanden sind, wurde der Vergleich auf den hydrogeologischen Teilraum der Elbtalkreide beschränkt. In diesem Teilraum sind ca. 80 % aller inventarisierten Sturzprozesse lokalisiert (Tab. 2-30; Abb. 2-31 und Abb. 2-32).

Für beide Teilstudien im Modellierungsbeispiel 2.1 erfolgte die Evaluierung sowohl für das Trainings- als auch für das Testinventar auf Basis der ROC-Kurve.

Ergebnisse und Diskussion

Teilstudie 2.1A: Die Bestimmung der Grenzwerte zur Maskierung der trivialen Flächen mit dem Parameter Hangneigung (Hang25) ergab, dass Hangneigungen $< 10^\circ$ ausgespart werden können.

Unter Berücksichtigung der Generalisierung, bedingt durch die Auflösung des DGM25 und des Ereignisinventars, ist davon auszugehen, dass in den ausgesparten Bereichen prinzipiell keine Sturzprozesse stattfinden können.

Der Einfluss der linearen Elemente lässt sich durch die studentisierten Residuen-Distanzdiagramme interpretieren (Abb. 2-35).

Das Residuen-Distanzdiagramm für tektonische Elemente (Abb. 2-35a) zeigt zunächst einen fallenden Kurvenverlauf bis zu einer Entfernung von ca. 1 km. Danach steigt die Kurve bis zur Entfernung von ca. 5 km an, um dann wieder leicht abzufallen. Ein Muster, das nicht plausibel interpretiert werden kann.

Anders verhält es sich mit den Distanzen zu Bahnlinien und Straßen. Hier erscheinen die Muster zunächst plausibel: der Kurvenverlauf ist erwartungsgemäß positiv ansteigend in den proximalen Klassen, mit einem Wendepunkt bei ca. 700 m für die Bahnlinien (Abb. 2-35b) und ca. 100 m für die Straßen (Abb. 2-35c).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Bei genauer Betrachtung der räumlichen Anordnung von Bahnlinien und Straßen lässt sich aber schlussfolgern, dass es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um eine Scheinkorrelation aus der Koinzidenz mit der Topographie handelt. Diese ergibt sich vor allem durch den Verlauf der Verkehrswege entlang der Talflanken unterhalb der steilen Hänge, die für Sturzprozesse empfänglich sind. Es ist zwar nicht komplett auszuschließen, dass durch den Straßenbau die natürlichen Hänge modifiziert wurden, insgesamt folgen aber die Infrastrukturelemente der natürlichen Topographie, womit das Potenzial für Sturzprozesse bereits erklärt werden kann.

Bei solchen Koinzidenzfällen können sogenannte konterfaktische Hypothesen unterstützend eingesetzt werden, um die wahrscheinlichere Option vorzuziehen (Beispiel: *Die Felsstürze wären nicht aufgetreten, wenn die Straße nicht gebaut worden wäre.* versus *Die Felsstürze wären nicht aufgetreten, wenn die Talflanken nicht so steil wären.*).

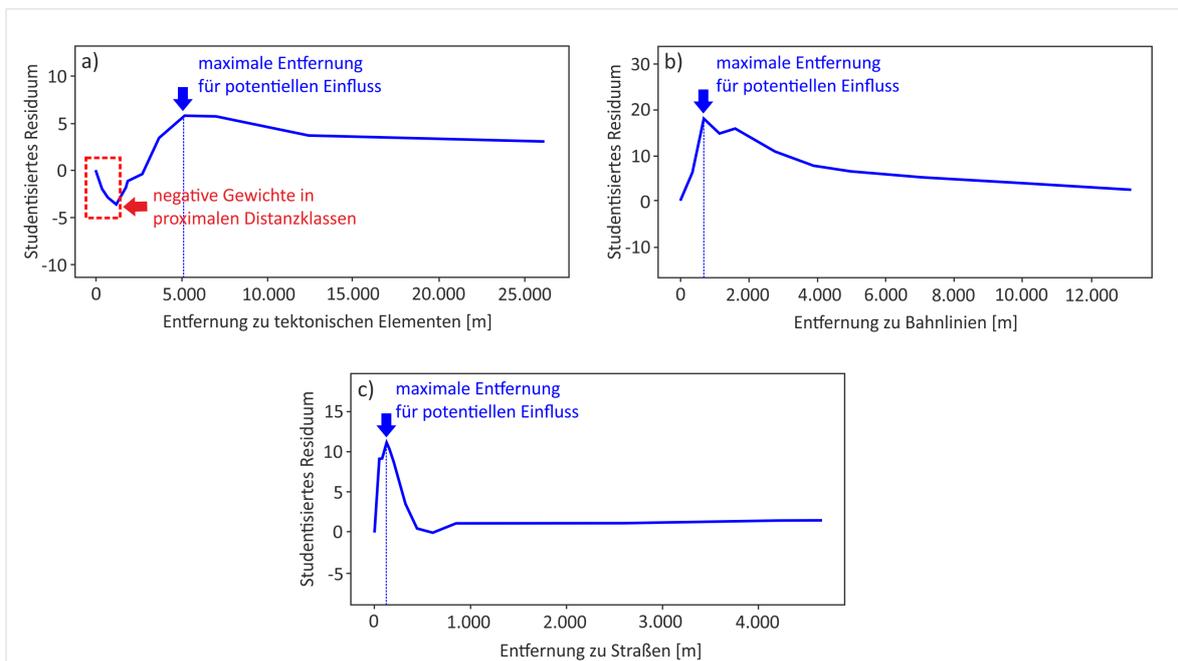


Abb. 2-35: Modellierungsbeispiel 2.1: Sensitivitätsanalyse linearer Elemente am Beispiel von Sturzprozessen; Klasseneinteilung auf der Basis des Verlaufs des kumulativen studentisierten Residuums für a) tektonische Elemente, b) Bahnlinien, c) Straßen.

Die Ergebnisse der Modellierung mit MGE indizieren, dass alle einbezogenen Parameter einen statistischen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Sturzprozesse aufweisen (Tab. 2-32).

Tab. 2-32: Modellierungsbeispiel 2.1: Parameter und Modelle mit unterschiedlichen Parameterkombinationen ohne Maskierung für das gesamte Testgebiet Elbtalgraben.

Parameter/Modelle	Anzahl Parameterklassen	AUC-Wert	
		Trainingsinventar	Testinventar
Hang25	13	0,97 ± 0,01	0,96
GÜK250 – Petrographie	85	0,88 ± 0,02	0,88
GÜK250 – Tektonik	6	0,92 ± 0,02	0,91
DLM250 – Bahnlinien	5	0,70 ± 0,03	0,68
DLM250 – Straßen	5	0,66 ± 0,05	0,62
Hang25 + GÜK250	698	0,98 ± 0,01	0,98

Die AUC-Werte der geologischen und geomorphologischen Parameter liegen alle in den Kategorien [gutes bis exzellentes](#) Modell.

Trotz der hohen AUC-Werte wurden die tektonischen Elemente infolge der fehlenden Plausibilität aus der Analyse ausgeschlossen.

Die Distanzen zu Bahnlinien und Straßen weisen in der Analyse der Distanzraster zwar plausible Muster auf, wurden jedoch angesichts der Koinzidenz mit der Topographie als nicht kausal eingestuft. Auch ihre AUC-Werte suggerieren eher einen schwachen Zusammenhang.

Das Modell mit der Parameterkombination aus der Hang25 + GÜK250 zeigt einen AUC-Wert von 0,98 und damit nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber dem Modell mit einem Parameter (Hang25).

Prinzipiell zeigt sich im Elbtalgraben, wie auch schon in der Fallstudie 1 für die Fränkische Alb und für die Schwäbische Alb, dass für Analysen mit dem Zielmaßstab 1 : 250 000 der Parameter Hangneigung genügt, um die räumliche Verteilung der Sturzprozesse zu erklären.

Das liegt unter anderem auch daran, dass der Parameter Hangneigung ebenfalls einen Zusammenhang mit dem Parameter Petrographie aufweist. Die steilen Hänge können sich nur in petrographischen Einheiten hoher Festigkeit ausbilden. Damit ist bei Übersichtsmaßstäben die Petrographie im Parameter Hangneigung bereits teilweise berücksichtigt.

Die Maskierung der trivialen Flächen verringert den AUC-Wert für die Hangneigung um mehr als 10 % (Tab. 2-35). Damit würde der Parameter Hangneigung, für sich betrachtet, nicht mehr für ein [exzellentes](#) Modell ausreichen und es können weitere Parameter berücksichtigt werden.

Die Parameterklassen der GÜK250 sollen die inhärenten Gesteinseigenschaften, die maßgeblich die Instabilität von Hängen beeinflussen, abbilden.

Im Maßstab der GÜK250 weisen die petrographischen Einheiten jedoch einen hohen Grad der Generalisierung auf. Dabei werden Gesteine mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften in einer Legendeneinheit zusammengefasst, wie z. B. Quarzsandstein, Mergelstein und Kalkstein.

Die statistischen Gewichte der Parameterklassen (petrographische Einheiten mit ergänzenden stratigraphischen Angaben) der GÜK250 sind absteigend unter Berücksichtigung der Maskierungsvarianten in der Tab. 2-33 aufgelistet. Es sind nur jene Einheiten aufgeführt, die positive statistische Gewichte aufweisen. Die Festgesteine, vor allem die kreidezeitlichen Sandsteine, tragen mit hohen Gewichten zur Erklärung des Verbreitungsmusters der Sturzprozesse bei.

Hervorzuheben ist, dass die Maskierung nicht nur die Hangneigung, sondern auch die statistischen Gewichte der petrographischen Einheiten der GÜK250 stark beeinflusst. Dies liegt darin begründet, dass die Ergebnisse aus der statistischen Analyse relativ zum betrachteten Modellausschnitt zu interpretieren sind.

Da die festen Gesteinseinheiten vor allem die steileren Hänge in der Elbtalkreide formen, sind sie, relativ betrachtet, im maskierten Modellausschnitt weit verbreitet. Dieses Merkmal einer Parameterklasse reduziert automatisch die Fähigkeit, das Untersuchungsgebiet in kleinere Teilflächen zu unterteilen und liefert damit einen vermeintlich schwächeren Klassifikator.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-33: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der Parameterklassen der GÜK250 für Sturzprozesse im Testgebiet Elbtalgraben, dargestellt für die Varianten mit Maskierung (Hangneigung $\leq 10^\circ$) und ohne Maskierung.

<i>Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung mit zusätzlicher Angabe zur Stratigraphie*</i>	<i>Mit Maskierung (Hangneigung $\leq 10^\circ$)</i>	<i>Ohne Maskierung</i>
<i>Sandstein (Herrenleite-Sandstein, Oberturon bis Mittelconiac)</i>	0,63	2,09
<i>Schluff, Sand, Kies, Lösslehm (?)</i>	1,48	-0,07
<i>Quarzsandstein (Labiatus-Quadersandstein, Unter- bis Mitteluron)</i>	0,97	1,81
<i>Sandstein, Mergelstein, Kalkstein (Pläner, Cenoman)</i>	0,69	1,73
<i>Quarzsandstein, Sandstein, Mergelstein (Oberes Turon bis Coniac)</i>	-0,45	1,33
<i>Quarzsandstein, Mergelstein, Kalkstein (Mittleres bis Oberes Turon)</i>	-0,06	1,09
<i>Granit von Markersbach (Westfal bis Stefan)</i>	0,81	1,00
<i>Meta-Grauwacke, geröllführend (Vendium bis Unteres Kambrium)</i>	0,14	0,95
<i>keine Angaben (Halden der ehemaligen Sowjetisch-Deutschen Aktiengesellschaft Wismut)</i>	-0,07	0,74
<i>Granodiorit (Tournai bis Namur)</i>	0,25	0,48

*Die Beschreibungen wurden aus den Legendeneinheiten der GÜK250 unverändert übernommen.

Daher ist zu beachten, dass die Kausalität der Zusammenhänge nicht betroffen ist. Die Abnahme des AUC-Wertes indiziert, dass der Parameter im betrachteten Modellausschnitt nicht ausreicht, um die räumliche Verteilung der Massenbewegungen zuverlässig einzugrenzen. Somit wären weitere Parameter notwendig, um diese Eingrenzung zu verfeinern.

Neben der Verschiebung der Gewichtswerte für die Festgesteine fällt auf, dass im maskierten Modellausschnitt die Parameterklasse mit Lockersedimenten (Schluff, Sand, Kies, Lösslehm) hohe Gewichte zugewiesen bekommt. Es handelt sich hierbei um Generalisierungseffekte durch Überzeichnung der Talablagerungen bis in die hohen Talflanken, die durch die Maskierung verstärkt werden.

Durch das Maskieren flacher Gebiete, in denen diese Sedimente vorwiegend lagern, bleiben auf den steileren Hängen kleine *Zwickel* aus der kartographischen Überzeichnung zurück. Liegt ein Sturzprozess aufgrund einer Fehlzuordnung in einem solchen Zwickel, erhält die (flächig meist sehr kleine) Parameterklasse relativ hohe statistische Gewichte, die sich jedoch durch sehr große Standardabweichungen auszeichnen. Ohne Maskierung durch die Hangneigungen $\leq 10^\circ$ fallen die falsch verorteten Sturzprozesse innerhalb der verhältnismäßig großen Klassenfläche nicht ins Gewicht.

In Bezug auf Fehlzuweisungen bei der Verortung von Ereignissen zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der Feldbeschreibung der petrographischen Einheiten im Inventar solche Fehlzuweisungen effektiv korrigiert werden können. Der Vergleich der Feldbeschreibungen mit der aus dem Kartenbild abgeleiteten petrographischen Beschreibung belegt, dass bei Letzterem für etwa 10 % der Sturzprozesse eine Fehlzuweisung vorliegt.

In der Tab. 2-34 werden die statistischen Gewichte nach der manuellen Verortungskorrektur auf der Grundlage der Feldbeschreibung aufgeführt. Die Korrektur mündet sowohl im unmaskierten als auch im maskierten Modell in Veränderungen der Gewichte. Im Vergleich zu den Gewichten in Tab. 2-33 erhalten die kreidezeitlichen Sandsteine auch hier die höchsten statistischen Gewichte.

Es wird aber auch eine petrographische Einheit berücksichtigt, die ohne die Verortungskorrektur nicht in Erscheinung getreten wäre. Durch die Korrektur wurden die Sturzprozesse, die ursprünglich mehrheitlich in die Einheit *Schluff, Sand, Kies, Lösslehm* fehlzugewiesen wurden, in die petrographische Einheit *Rhyolith* verlagert. Dadurch weist diese petrographische Einheit nach der Korrektur das zweit-höchste statistische Gewicht auf.

Tab. 2-34: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GÜK250 für Sturzprozesse im Testgebiet Elbtalgraben als Ergebnis der Verortungskorrektur auf der Basis der Feldbeschreibung im Ereignisinventar des LfULG Sachsen.

Parameterklasse GÜK250: Petrographische Beschreibung mit zusätzlicher Angabe zur Stratigraphie*	Statistische Gewichte	
	Mit Maskierung (Hangneigung ≤ 10°)	Ohne Maskierung
<i>Sandstein, Mergelstein, Kalkstein (Pläner, Cenoman)</i>	0,96	2,41
<i>Rhyolith</i>	1,33	2,20
<i>Sandstein (Herrenleite-Sandstein, Oberturon bis Mittelconiac)</i>	0,53	2,12
<i>Quarzsandstein (Labiatus-Quadersandstein, Unter- bis Mitteluron)</i>	0,93	1,82
<i>Quarzsandstein, Mergelstein, Kalkstein (Mittleres bis Oberes Turon)</i>	-0,42	1,32
<i>Quarzsandstein, Sandstein, Mergelstein (Oberes Turon bis Coniac)</i>	-0,11	1,26
<i>Meta-Grauwacke, geröllführend (Vendium bis Unteres Kambrium)</i>	0,58	1,17
<i>Granodiorit (Tournai bis Namur)</i>	0,78	1,03
<i>Granit von Markersbach (Westfal bis Stefan)</i>	0,39	1,02
<i>Monzonitoid</i>	0,17	0,30

*Die Schreibweise wurde aus den Legendeneinheiten der GÜK250 unverändert übernommen.

Die Abb. 2-36 stellt die zonierte Empfindlichkeitsmodelle für Sturzprozesse (= zonierte Sturzem-pfindlichkeit) für die Parameterkombination Hang25 + GÜK250 mit und ohne Maskierung der trivialen Flächen für einen Teilausschnitt im Süden des Testgebiets dar. Die räumlichen Muster der Zonen sehr hoher und hoher Sturzem-pfindlichkeit folgen in beiden Modellen dem gleichen Verlauf entlang der schroffen Talflanken. Die Darstellung des Modells mit Maskierung beider Parameter besitzt eine geringere Fläche für die Zonen hoher und sehr hoher Empfindlichkeit (Tab. 2-35).

Die Maskierung der Hangneigung am Beispiel der Sturzprozesse führt zwar zur Minderung des Einflusses der Hangneigung im Modell, jedoch kann der entstandene Spielraum nicht deutlich zugunsten der Interpretation des Parameters GÜK250 eingesetzt werden.

In beiden Modellen kann die Verwendung der GÜK250 den AUC-Wert im Durchschnitt nicht über 1 % verbessern. Durch das Abhängigkeitsverhältnis von Hangneigung und Lithologie wirken sich die Versuche, den Effekt der Hangneigung zu unterdrücken, in gleicherweise auf die Parameter aus der GÜK250 aus.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

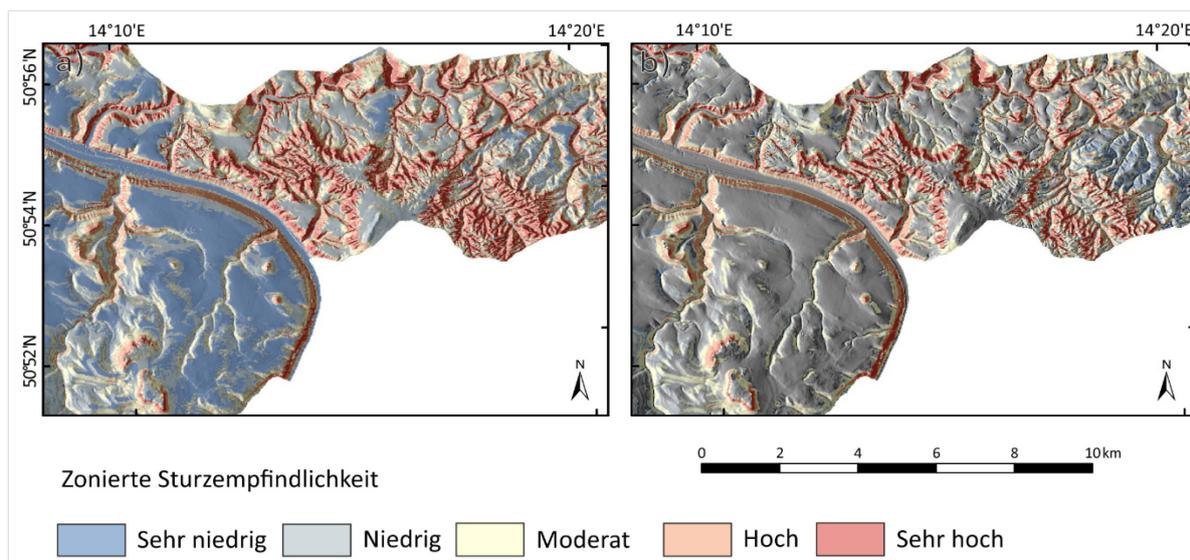


Abb. 2-36: Modellierungsbeispiel 2.1: Zonierte Empfindlichkeit für Sturzprozesse (= Sturzeempfindlichkeit) im südlichen Elbtalgraben a) Parameterkombination Hang25 + GÜK250, unmaskiert; b) Parameterkombination Hang25 + GÜK250, maskiert (Quellen: DGM25 – BKG; Tab. 2-9).

Tab. 2-35: Modellierungsbeispiel 2.1: AUC-Werte und Flächenanteile der Sturzeempfindlichkeitszonen Hoch und Sehr hoch, resultierend aus der Modellierung von Sturzprozessen im Elbtalgraben unter Anwendung der maskierten und unmaskierten Parameterkombination Hang25 + GÜK250.

Modell	AUC-Wert Hang25	AUC-Wert GÜK250	AUC-Wert Hang25 + GÜK250	Flächenanteil Sturzeempfindlichkeitszone [%]	
				Hoch	Sehr hoch
Hang25 + GÜK250, unmaskiert	0,97 ± 0,01	0,86 ± 0,02	0,98 ± 0,01	3,8	2,2
Hang25 + GÜK250, maskiert	0,85 ± 0,02	0,73 ± 0,02	0,86 ± 0,02	2,6	1,6

Teilstudie 2.1B: Die auf den hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide begrenzte Teilstudie (Abb. 2-31 und Abb. 2-32; Tab. 2-29) zu den Auswirkungen unterschiedlicher geologischer Informationsebenen zeichnet ein leicht abweichendes Bild zur räumlichen Erklärung der Sturzprozesse hinsichtlich der Parameterklassen.

Alle drei zusammengesetzten Modelle aus Hang25 und petrographischen Einheiten aus GK50, GK100 (L-J-K) und GÜK250 (im Ausschnitt der GK50) besitzen jeweils einen AUC-Wert in der Kategorie exzellentes Modell (Tab. 2-36). Die Gewichte der Parameterklassen verlagern sich jedoch von den kreidezeitlichen Sandsteinen zu den magmatischen Gesteinen, die im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide durch Härtlinge und Kuppen, wie z. B. im Norden des Teilraums durch Ausläufer des Meissner Komplexes, vertreten sind (Tab. 2-37, Tab. 2-38 und Tab. 2-39). Hier wird die relative Abhängigkeit der statistischen Gewichte vom betrachteten Ausschnitt deutlich. Der Parameter Hangneigung (Hang25) hat z. B. im Teilgebiet Elbtalkreide einen AUC-Wert von 0,93 (Tab. 2-36), im gesamten Testgebiet Elbtalgraben aber einen AUC-Wert von 0,97 (Tab. 2-32). Auch hier gilt: Der kausale Zusammenhang hat sich nicht verändert, wohl aber die relative Bedeutung des Parameters für die Erklärung der räumlichen Verteilung von Massenbewegungen in Bezug auf die zu betrachtende Fläche.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die petrographischen Einheiten. Zwar tragen die Sandsteine im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide mit statistischen Gewichten je um den Wert 1 zur Erklärung des räumlichen Musters von Sturzprozessen bei, sie werden jedoch durch die Gewichte der Einheiten Monzonitoide und Granodiorite übertroffen (Tab. 2-37, Tab. 2-38 und Tab. 2-39).

Tab. 2-36: Modellierungsbeispiel 2.1: Übersicht über die AUC-Werte für verschiedene Parameter und deren Kombination im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide für Sturzprozesse.

<i>Parameter/Parameterkombinationen</i>	<i>Anzahl der Parameterklassen/ Kombinationen</i>	<i>AUC-Wert</i>
<i>Hang25</i>	13	0,93
<i>GK50 – Petrographische Einheiten</i>	86	0,81
<i>GK100 (L-J-K) – Petrographische Einheiten GK100 (L-J-K)</i>	45	0,67
<i>GÜK250 – Petrographische Einheiten GÜK250</i>	40	0,77
<i>Hang25 + GK50 – Petrographische Einheiten GK50</i>	516	0,92
<i>Hang25 + GK100 (L-J-K) – Petrographische Einheiten</i>	311	0,92
<i>Hang25 + GÜK250 – Petrographische Einheiten</i>	259	0,93

Tab. 2-37: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GK50.

<i>Parameterklasse der GK50: Petrographische Beschreibung*</i>	<i>Statistisches Gewicht</i>
<i>Monzonitoide ("Meißener Syenodiorit")</i>	2,33
<i>Sandstein der "Stufe" d, Lohmener Sandstein</i>	1,57
<i>Schluff, sandig (Auelehme), über fluviatilem holozänem Kies und Sand</i>	0,91
<i>Sandstein der "Stufe" c, Herrenleite-Sandstein, Pirnaer Oberquader</i>	0,89
<i>Unterquader-Sandstein, lokal basales Konglomerat</i>	0,84
<i>Sandstein der "Stufe" b, Mittlerer Grünsandstein</i>	0,45

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der GK50 übernommen.

Tab. 2-38: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GK100 (L-J-K).

<i>Parameterklasse der GK100 (L-J-K): Petrographische Beschreibung*</i>	<i>Statistisches Gewicht</i>
<i>Basaltische Vulkanoklastite</i>	2,02
<i>Hornblende-Monzonite (Syenodiorite), mittelkörnig, lokal mit Pyroxen</i>	1,88
<i>Zweiglimmer-Granodiorite („Anatexite“), fein- bis mittelkörnig</i>	1,03
<i>Mergel, mergelige Schluffsteine, Sandsteine</i>	0,82
<i>Quarzsandsteine</i>	0,43
<i>Quarzsandsteine, lokal glaukonitisch, Schluffsteine, Tonsteine, Mergel</i>	0,24

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der GK100 (L-J-K) übernommen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-39: Modellierungsbeispiel 2.1: Statistische Gewichte der petrographischen Einheiten der GÜK250.

<i>Parameterklasse der GÜK250: Petrographische Beschreibung*</i>	<i>Statistisches Gewicht</i>
<i>Monzonitoid</i>	2,18
<i>Biotit-Granodiorit</i>	1,15
<i>Quarzsandstein, feinkörnig bis mittelkörnig</i>	1,11
<i>Sandstein, feinkörnig bis mittelkörnig, teilweise grobkörnig</i>	0,94
<i>Kalkstein, Mergelstein, Sandstein</i>	0,70

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der GÜK250 übernommen.

Zusammenfassend belegt die Teilstudie 2.1B, dass durch die Nutzung detaillierterer geologischer Information keine generelle Verbesserung der Modellergebnisse für Sturzprozesse erzielt werden konnte. Die Hinzunahme der petrographischen Beschreibung führt in keinem der Modelle zu einer Verbesserung des AUC-Wertes (Tab. 2-36).

In der Tab. 2-37 ist auch erkennbar, dass generalisierungsbedingte Zuordnungsfehler auch bei der Nutzung der GK50 auftreten. Hier wurden die Sturzprozesse in der schmalen Einheit Auelehme, vor allem entlang des Kirnitzschals im Nationalpark Sächsische Schweiz und entlang des Lachsbachtals, verortet. Die Fehlzusweisungen sind quantitativ mit denen aus der GÜK250 vergleichbar. Im hydrogeologischen Teilraum Elbtalkreide wurden ca. 8 % der Sturzereignisse, d. h. 23 von 295 Ereignissen, in der GK50 in der Legendeneinheit Auelehme falsch verortet.

Die GK100 (L-J-K) zeigt mit 45 Parameterklassen gegenüber der GÜK250 mit 40 Parameterklassen einen geringfügig höheren Diskretisierungsgrad des Gebiets. Die konzeptionell abweichende Zusammenfassung der Petrographie zu Legendeneinheiten in der GK100 (L-J-K) führt jedoch zu einem anderen räumlichen Muster und im Modellergebnis zu einem deutlich schwächeren Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Sturzprozesse gegenüber der GÜK250 (Tab. 2-36).

2.6.2.2 Modellierungsbeispiel 2.2

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung der Anwendung eines heuristischen Verfahrens zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel der Methode des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) und Vergleich der Modellergebnisse mit der statistischen Modellierung (Methode der Gewichteten Evidenzen).

Im Modellierungsbeispiel 2.1 wurde herausgearbeitet, dass bei geringer Datenverfügbarkeit (z. B. für das Inventar zu Fließ- und Rutschprozessen) der Anwendung statistischer Modellierungsmethoden Grenzen gesetzt sind.

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis ist im Modellierungsbeispiel 2.2 eine heuristische Methode getestet worden, die für die Erstellung eines Modells per se nicht auf Rutschungsinventare angewiesen ist. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit denen aus der statistischen Analyse zu gewährleisten, wurde die heuristische Analyse ebenfalls für die Sturzprozesse durchgeführt. Die Methode wurde auf das gesamte Testgebiet Elbtalgraben angewendet (Tab. 2-8; Tab. 2-29; Abb. 2-31).

Methodische Vorgehensweise

Der Analytische Hierarchieprozess (AHP) ermöglicht durch einen paarweisen Vergleich bestimmter Merkmale eine konsistente Entscheidungsfindung (s. Kapitel 2.3.4).

Die Methode beruht auf der Annahme, dass ein Mensch etwa sieben, plus/minus zwei Merkmale miteinander vergleichen kann. Die darauf ausgerichtete [neunstufige Skala](#) schränkt natürlicherweise die Anzahl der zu vergleichenden Merkmale auf maximal 10 ein. Zwar können auch mehr als 10 Merkmale verarbeitet werden, dies würde jedoch zu einer unzureichenden Unterscheidbarkeit im Ranking führen, da bei mehr als 10 Merkmalen mehrere Merkmale den gleichen Rang erhalten würden. Daher sollte die Anzahl der zu bewertenden Merkmale im methodisch vorgegebenen Rahmen bleiben.

In der GÜK250 sind für das Gebiet 85 Parameterklassen ausgehalten. Somit ist ein paarweiser Vergleich auf einer neunstufigen Skala praktisch nicht umsetzbar. Daraus resultieren im Rahmen des MBiD-Projekts zwei Optionen für die Anwendung:

- **Option 1:** Zweckmäßige Gruppierung der Parameterklassen der GÜK250 in acht bis neun Parameterklassen pro Gruppe mit anschließendem paarweisen Vergleich innerhalb der Gruppen. Danach können die Gruppen in einer weiteren hierarchischen Ebene untereinander verglichen werden;
- **Option 2:** Auswahl einer vorhandenen Informationsebene mit geringerer (überschaubarer) Anzahl von Parameterklassen.

Für die Anwendung der AHP-Methode wurde die Option 2 gewählt. Als Zielstellung für die Analyse galt die Priorisierung (Festlegung der Rangfolgen) der Parameterklassen nach ihrer Wichtigkeit für das Auftreten von Felsstürzen.

Die AHP-Analyse erfolgte unter Nutzung des Werkzeugs [New AHP Excel template with multiple inputs](#) (Goepel, 2013) (Tag des Zugriffs: 03.09.2020).

Die Implementierung der AHP-Prozedur umfasste folgende Schritte:

- **Auswahl Informationsebenen (Quellen: Tab. 2-9) und Selektion der Parameterklassen:**
 - GÜK1000 (Petrographie): führt für das Testgebiet neun petrographische Einheiten in einer [INSPIRE-konformen Beschreibung](#) (Tab. 2-40);
 - DGM25 (Hangneigung = Hang25): umfasst einen Wertebereich von 0° bis 80°, unterteilt in 10°-Klassen und somit acht Parameterklassen (Tab. 2-41).
- **AHP-Analyse (konsequente Vorgehensweise):**
 - Unabhängige Wichtung der Parameter durch sieben Geowissenschaftler ([BGR](#), [LfU](#), [LfULG](#), [LGRB](#)), die einen unterschiedlichen Kenntnisstand der regionalen Geologie vom Elbtalgraben besitzen;
 - Konsolidierung (Zusammenführung) der einzelnen Wichtungen;
 - Übertragung der konsolidierten, geschätzten Gewichte in die räumliche Darstellung durch Verknüpfung mit den Rasterattributtabelle der GÜK1000 bzw. des DGM25;
 - Überlagerung der gewichteten Parameter zu einem Modell;
 - Evaluierung der Modellgüte mittels ROC-Kurve unter Verwendung der bekannten Sturzprozess-Ereignisse;
 - Vergleich des generierten AHP-Modells mit einem statistischen Modell (MGE), generiert unter Verwendung des identischen Datensatzes.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-40: Modellierungsbeispiel 2.2: Parameterklassen der GÜK1000 in der INSPIRE-konformen Beschreibung der Petrographie.

<i>Informationsebene (Abkürzung)</i>	<i>Parameterklasse der GÜK1000: Petrographische Beschreibung (INSPIRE-konform)*</i>
<i>GÜK1000</i>	Calcareous Sandstone, Limestone, Marlstone
	Shale, Wacke
	Granite, Granodiorite, Monzonite
	Rhyolithe, Andesite, Spilite
	Sandstone, Diamicton
	Orthogneiss, Paragneiss
	Basalt, Phonolithe
	Schist, Phyllite
	Amphibolithe

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der GÜK1000 übernommen.

Ergebnisse und Diskussion

Die konsolidierten Schätzungen für die beiden Parameter GÜK1000 und Hang25 sind in den Tab. 2-41 und Tab. 2-42 zusammengestellt.

In diesen Tabellen ist jeder Parameterklasse ein Gewicht in % zugeordnet, das anteilig aus den sieben Schätzungen der einzelnen Experten resultiert. Die Wertespanne der durch die Experten abgegebenen Gewichte wird ebenfalls berücksichtigt. Zusätzlich werden die Parameter, basierend auf dem konsolidierten Gewicht, durch eine absteigende Sortierung in eine Rangfolge (Rang) überführt. Für die Konsolidierung wurde zusätzlich eine Kennzahl bestimmt, die die Übereinstimmung der Schätzungen bewertet. Die Kennzahl hat eine Wertespanne zwischen 0 und 1, wobei 0 (oder 0 %) absolute Uneinigkeit der Schätzungen und 1 (oder 100 %) vollständige Übereinstimmung charakterisiert.

Für die Bewertung der Hangneigungsklassen (Hang25) liegt die Übereinstimmung (Konsens) zwischen den sieben Experten bei 98 % (Tab. 2-41). Dieser Konsens reflektiert das physikalische Prozessverständnis aller involvierten Experten im Hinblick auf die kausale Wechselwirkung von Felssturz-Potenzial und dem Parameter Hangneigung.

Die Beurteilung der Parameterklassen der GÜK1000 zeigt dagegen deutliche Uneinigkeit, die sich in einem Konsens von lediglich 55 % widerspiegelt (Tab. 2-42). Hier wird erkennbar, dass die alleinige Benennung der Gesteinskategorie ohne Einordnung in den regionalgeologischen Kontext nicht genügt, um eine Wichtung im Hinblick auf die Zielsetzung zweifelsfrei vorzunehmen.

Offensichtlich wirken bei einzelnen Beurteilern zusätzliche subjektive Assoziationen, die in den Bewertungsprozess des zu beurteilenden Gebiets einfließen. Als subjektive Merkmale sind z. B. Überlegungen zum Trennflächengefüge in den Gesteinskategorien oder Bindemittel und mineralogische Zusammensetzung der Gesteine zu nennen.

Tab. 2-41: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der konsolidierten Gewichte, Wertespanssen und des Ranges für Hangneigungsklassen (Hang25) auf der Grundlage von sieben Expertenmeinungen.

Parameterklassen Hangneigung (Hang25) [°]	Gewicht [%]	Wertespanne [%]	Rang
< 10	2,4	2 bis 3	8
10 bis 20	3,0	2 bis 4	7
20 bis 30	3,7	3 bis 5	6
30 bis 40	5,8	3 bis 9	5
40 bis 50	10,3	9 bis 14	4
50 bis 60	15,7	13 bis 19	3
60 bis 70	23,8	19 bis 27	2
70 bis 80	35,3	32 bis 36	1

Auch fließen bei geringer Kenntnis des Testgebiets zwangsläufig subjektive Erfahrungswerte aus anderen Gebieten ein, in denen die Experten bereits tätig waren. Besonders offensichtlich wird dies bei Betrachtung der zwei Parameterklassen *Calcareous Sandstone, Limestone, Marlstone* und *Sandstone, Diamicton* in den Einzelergebnissen. Die Expertengewichte für die erstgenannte Parameterklasse schwanken zwischen 7 % und 36 %, die für die zweitgenannte Parameterklasse zwischen 2 % und 36 %. Diese Unterschiede in den Einzelbeurteilungen führen zum oben genannten geringen Konsens in der Beurteilung der Parameterklassen der GÜK1000.

Tab. 2-42: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der konsolidierten Gewichte, Wertespanssen und des Ranges für die Parameterklassen der GÜK1000 auf der Grundlage von sieben Expertenmeinungen.

Parameterklasse der GÜK1000: Petrographische Beschreibung (INSPIRE-konform)*	Gewicht [%]	Wertespanne [%]	Rang
<i>Calcareous Sandstone, Limestone, Marlstone</i>	21,0	7 bis 36	1
<i>Shale, Wacke</i>	8,5	4 bis 23	6
<i>Granite, Granodiorite, Monzonite</i>	11,7	4 bis 21	3
<i>Rhyolithe, Andesite, Spilite</i>	9,8	2 bis 22	4
<i>Sandstone, Diamicton</i>	20,1	2 bis 36	2
<i>Orthogneiss, Paragneiss</i>	8,0	3 bis 25	7
<i>Basalt, Phonolithe</i>	8,6	3 bis 12	5
<i>Schist, Phyllite</i>	6,5	3 bis 15	8
<i>Amphibolithe</i>	5,9	2 bis 24	9

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der GÜK1000 übernommen.

Das Ergebnis der Evaluierung mittels der ROC-Kurve liefert für den AUC-Wert des Modells aus GÜK1000 + Hang25 einen Wert von 0,93. Die Berechnung mit der gleichen Kombination mit der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) erreicht einen AUC-Wert von 0,97. Statistisch erreichen beide

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Modelle die Modellgüte eines **exzellenten** Modells. Dies resultiert aus der übereinstimmenden Gewichtung des Parameters Hang25, der bereits allein den hohen Erklärungsanteil für die räumliche Verteilung der Sturzprozesse liefert.

Während den Parameterklassen der GÜK1000 *Calcareous Sandstone, Limestone, Marlstone* und *Sandstone, Diamicton* ein ähnlich hoher Zusammenhang durch die Experten zugeordnet wird, bekommt in der statistischen Analyse ausschließlich die Parameterklasse *Sandstone, Diamicton* signifikante Gewichte.

Für die Überlagerung der gewichteten Parameter wurde in der AHP-Analyse unterstellt, dass die beiden Parameter gleichberechtigt sind. Das hat Konsequenzen auf die generierten Muster der Sturzempfindlichkeit. Während die Gewichte aus der Ermittlung mit AHP immer zwischen 0 und 1 liegen und damit für alle Parameter gleiche Wertespanssen aufweisen, erreichen die Gewichte in der Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen generell unterschiedliche Wertespanssen.

So haben in der MGE-Analyse die statistischen Gewichte der Parameterklassen für die Hangneigung etwa vierfach größere Gewichtswerte als die der Parameterklassen der GÜK1000. Das hat zur Konsequenz, dass in der MGE-Analyse der Beitrag des einzelnen Parameters direkt aus der Analyse abgeleitet werden kann.

In der AHP-Analyse muss dieser Beitrag vor der Überlagerung auf der hierarchischen Ebene der Parameter in Analogie zur Gewichtung der einzelnen Parameterklassen erfolgen. Bei Gleichstellung der Parameter Hangneigung und Petrographie der GÜK1000 gewinnen die Muster der GÜK1000 in der Parameterüberlagerung deutlich an Bedeutung.

Das AHP-Modell (Abb. 2-37a) zeigt größere Areale in den Sturzempfindlichkeitszonen *Hoch* und *Sehr hoch*, während durch das vierfach höhere Gewicht der Hangneigung im MGE-Modell (Abb. 2-37b) ausschließlich die steilen Hangbereiche in die Sturzempfindlichkeitszonen *Sehr hoch* und *Hoch* eingeordnet sind (Tab. 2-43). Wird die Wichtigkeit des Parameters Hangneigung im AHP-Modell auf der Parameterebene höher als die der GÜK1000 eingeschätzt, werden die Verteilungen der Sturzempfindlichkeitszonen im AHP- und MGE-Modell ähnlicher.

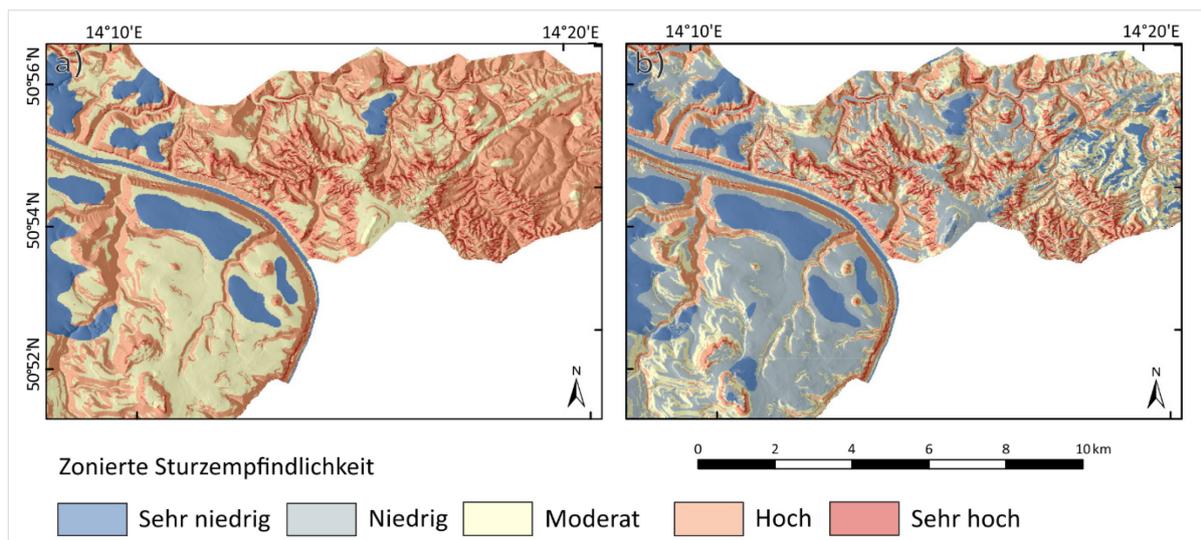


Abb. 2-37: Modellierungsbeispiel 2.2: Darstellung der Sturzempfindlichkeit in fünf Zonen auf Basis der Überlagerung der Parameterklassen Hangneigung (Hang25) und Parameterklassen der GÜK1000 (Petrographie): a) AHP-Modell; b) MGE-Modell. Der Ausschnitt bildet den zentralen Teil des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide ab (Quelle: DGM25 – BKG; Tab. 2-9).

Tab. 2-43: Modellierungsbeispiel 2.2: Zonierung der Sturzempfindlichkeit mit Angabe der prozentualen Anteile für Sturzflächen und für die korrespondierenden Zonenflächen aus den Modellierungen mit AHP und MGE.

Zonierung der Empfindlichkeit für Sturzprozesse	Sturzfläche [%]	Klassenfläche AHP [%]	Klassenfläche MGE [%]
Sehr niedrig	1	54	67
Niedrig	4	7	22
Moderat	15	25	6
Hoch	30	13	4
Sehr hoch	50	1	1

2.6.2.3 Modellierungsbeispiel 2.3

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines physikalisch-basierten Verfahrens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Nutzung einer detaillierten Bodenkarte (BK50) am Beispiel der Methode des Infiniten Hangmodells.

Im Modellierungsbeispiel 2.3 wurde mit der Methode des Infiniten Hangmodells (IHM) die regionale Empfindlichkeit gegenüber flachen Translationsrutschungen modelliert.

Die Parametrisierung des Modells stützt sich auf die detaillierte Bodenkarte des Freistaats Sachsen im Maßstab 1 : 50 000 (BK50) (Tab. 2-9; Tab. 2-31). Zwar liegt eine flächendeckende bodenkundliche Informationsebene als Bodenübersichtskarte 1 : 200 000 (BÜK200) deutschlandweit vor, jedoch war die begleitende Sachdatenbank dieses Kartenwerks zum Zeitpunkt der Modellierung noch nicht durchgehend mit den Referenzprofilen für Leit- und Begleitbodenformen belegt. Für das Testgebiet Elbtalgraben fehlten diese Referenzprofile in der Sachdatenbank der BÜK200 noch (Stand August 2020). In der Sachdatenbank der BK50 liegen hingegen für alle Bodenformen entsprechende Referenzprofile vor, so dass die Methodik zur Ableitung der notwendigen physikalischen Parameter praktisch umgesetzt werden konnte.

Die Methode wurde auf das gesamte Testgebiet Elbtalgraben angewendet (Tab. 2-8; Tab. 2-29; Abb. 2-31).

Methodische Vorgehensweise

Die BK50 erfasst die Verbreitung der Böden im Testgebiet auf dem Niveau der [Bodenform](#). Eine Legeneinheit wird durch eine Anzahl an Bodenformen beschrieben. Die zugehörige Sachdatenbank stellt die Referenzprofile der [Leitbodenformen](#) bereit. Die Horizontbeschreibungen der Referenzprofile führen in der Tabelle der Sachdatenbank als Feld die Information zur Bodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005](#)).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die bodenphysikalischen Parameter wurden über die Bodenarten des tiefsten Bodenhorizontes aus dem Referenzprofil für jede Bodenform abgeleitet. Die Grundlage für die Ableitung der bodenphysikalischen Parameter bilden die Regelwerke aus der [Methodendokumentation Bodenkunde](#) der AG Boden (digitale Version; Tag des Zugriffs: 21.09.2020) der SGD der Länder und der BGR. Diese Regelwerkta-bellen führen pro Bodenart und [Gefügeform](#) die Werte zur Kohäsion, zum Winkel der inneren Reibung und der Trockenrohdichte bei Sättigung des Bodens bis zur [Feldkapazität](#), die durch eine Saugspannung von pF 1,8 bis pF 2,5 gekennzeichnet sind.

Im Ergebnis liegen pro Legendeneinheit für die drei genannten bodenphysikalischen Parameter je ein Wert in Form des Mittelwerts und ein Wert für die Standardabweichung vor. Die Abschätzung der Standardabweichung für diese Kennwerte basiert auf der Vielfalt der Gefügeformen in den Bodenarten ([s. Kapitel 3.2.2](#)).

Das Infinite Hangmodell berücksichtigt den Porenwasserdruck durch den Feuchtigkeitsindex m ([s. Kapitel 2.3.3](#)). Ohne Kopplung an ein Infiltrationsmodell kann m als ein statischer Wert für unterschiedliche Szenarien angesetzt werden. In diesem Modellierungsbeispiel wurden bei gleicher bodenphysikalischer Parametrisierung zwei Szenarien betrachtet:

- **Szenario 1:** Die Böden sind trocken (trockenes Modell);
- **Szenario 2:** Die Böden sind vollständig wassergesättigt (wassergesättigtes Modell).

Die Berechnung des Modells ist normalerweise rasterbasiert. Für Szenarien mit n Werten in m Rasterzellen mit $n \ll m$ kann eine Vereinfachung durchgeführt werden, die die Rechenzeit signifikant reduziert. Da das Infinite Hangmodell ein eindimensionales Modell ist, entscheidet lediglich die Parametrisierung einer Rasterzelle über den Modellwert, d. h. es gibt zwischen den Rasterzellen keine lateralen Beziehungen. Für die Parametrisierung sind die Bodenform und die Hangneigung in der Rasterzelle entscheidend.

Verteilt über das Testgebiet ergibt sich somit eine begrenzte Anzahl von Kombinationen von Bodenform und Hangneigungswerten (sogenannte *unique conditions*), die um ein Vielfaches geringer ist als die Gesamtanzahl der Rasterzellen ([s. Kapitel 3.2.2](#)). Anstatt die IHM-Gleichung für alle Rasterzellen zu lösen, wird diese für die jeweilige Parameterkombination stellvertretend für alle Rasterzellen mit gleicher Parametrisierung berechnet. Da jedoch im Modellierungsbeispiel die Unsicherheiten der Parametrisierung in einer Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt wurden ([s. Kapitel 2.3.3](#)), bedeutet diese Vorgehensweise eine massive Einsparung an Rechenleistung.

Die Bestimmung aller Parameterkombinationen wurde durch Diskretisierung der Hangneigung aus dem DGM10 in 1°-Klassen und einer Verschneidung mit der BK50 erzielt.

Die Analyse basiert auf einer [Python-Anwendung](#).

In einer Monte-Carlo-Simulation wurden für beide oben genannten Szenarien auf der Grundlage von 1000 Iterationen für jede Kombination der Standsicherheitsfaktor (SF) und die Versagenswahrscheinlichkeit berechnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit steht für die Wahrscheinlichkeit, dass für den Standsicherheitsfaktor unter der angenommenen Normalverteilung der bodenphysikalischen Parameter Werte ≤ 1 bestimmt werden.

Die beiden szenarienbasierten Modelle wurden mittels ROC-Kurven unter Verwendung der Rutsch- und Fließprozesse der Inventardatenbank des LfULG Sachsen evaluiert (Tab. 2-30). Die Rutsch- und Fließprozesse werden im Inventar als Rutschungen in Lockergesteinen und Murgänge charakterisiert.

Ergebnisse und Diskussion

Die Evaluierung der Modellergebnisse anhand der ROC-Kurve unter Bezugnahme auf das vorhandene Rutschungsinventar liefert für das Modell aus dem Szenario 1 (trockene Böden) einen AUC-Wert von 0,67. Daraus folgt die Einstufung als [schlechtes](#) Modell. Das Modell aus dem Szenario 2 (wassergesättigte Böden) kann dagegen mit einem AUC-Wert von 0,87 als ein [gutes](#) Modell charakterisiert werden. Diese pauschale Bewertung ist jedoch kritisch zu hinterfragen, da die Kriterien, unter denen die Rutschungsereignisse auftraten, nicht genau bekannt sind. Das Inventar umfasst einen Zeitraum von mehreren Jahren, die Modelle können jedoch nur temporäre Zustände abbilden.

Auffällig ist, dass auch das trockene Modell einen Teil der Rutschungen (etwa 40 %) in den Bereichen mit den höchsten Versagenswahrscheinlichkeiten gut abbilden kann (Abb. 2-38). Das wird aus dem nahezu identischen Verlauf der ROC-Kurven beider Modelle sichtbar.

Der starke Einbruch des Modells im weiteren Verlauf der ROC-Kurve lässt sich dadurch erklären, dass unter trockenen Bedingungen das Modell größere Regionen als *sicher* bewertet, obwohl dort Rutschungen aufgezeichnet wurden. Allein aus den Randbedingungen könnte aber gefolgert werden, dass diese Rutschungen bei höheren Bodenwassergehalten aufgetreten sein müssen. Die Annahme kann durch das wassergesättigte Szenario bestätigt werden, welches einen deutlich größeren Anteil an Rutschungen erklären kann. Damit beschreiben die Modelle unterschiedliche Zustände der Hangstabilität, mittels derer die wahrscheinlicheren Annahmen für das Auftreten der aufgezeichneten Rutschungen abgeleitet werden können. Eine exakte Validierung mit einem Inventar wäre nur dann möglich, wenn dieses Inventar auf ein bestimmtes Trigger-Ereignis, z. B. ein [Starkregenereignis](#) in einem zeitlich sehr begrenzten Zeitraum, zurückgeführt werden könnte.

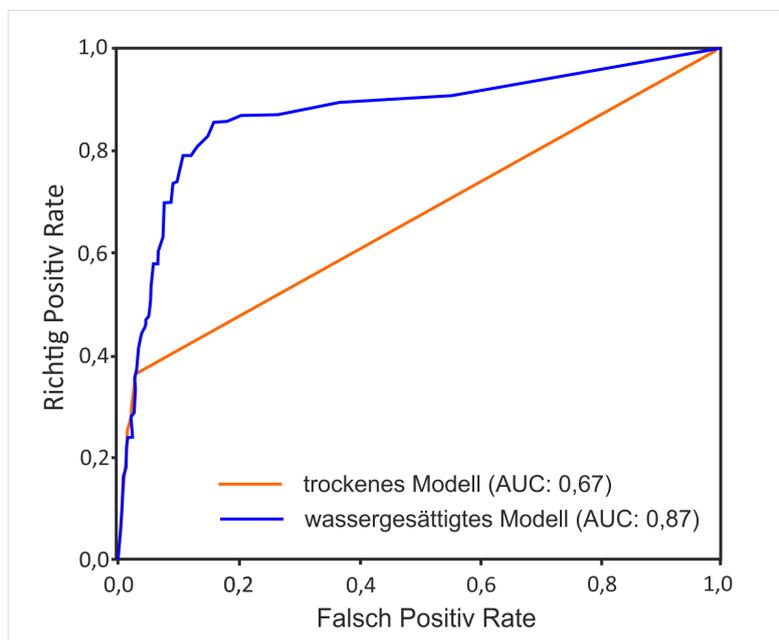


Abb. 2-38: Modellierungsbeispiel 2.3: ROC-Kurven für die beiden Modellszenarien (Szenario 1 – trockenes Modell; Szenario 2 – wassergesättigtes Modell).

Abb. 2-39 visualisiert die Versagenswahrscheinlichkeiten aus dem trockenen und dem wassergesättigten Modell für ein Teilgebiet nördlich der Stadt Meißen. Hier sind die lössbeeinflussten Verwitterungsböden und periglazialen Lagen über den Granodioriten des Meißner Massivs weit verbreitet.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

An den steileren Hängen entlang des Elbtals und dessen Seitentälern, auf denen die Substrate mit sandig bis schluffigen sowie als schwach lehmig-sandige Bodenarten beschrieben sind, wurden höhere Versagenswahrscheinlichkeiten bestimmt. Darüber hinaus sind im wassergesättigten Modell größere Gebiete mit höheren Versagenswahrscheinlichkeiten an steilen Hängen ausgeprägt. Das Muster der Versagenswahrscheinlichkeiten ist ein Indikator für die Empfindlichkeit von Gebieten bezüglich flacher Translationsrutschungen.

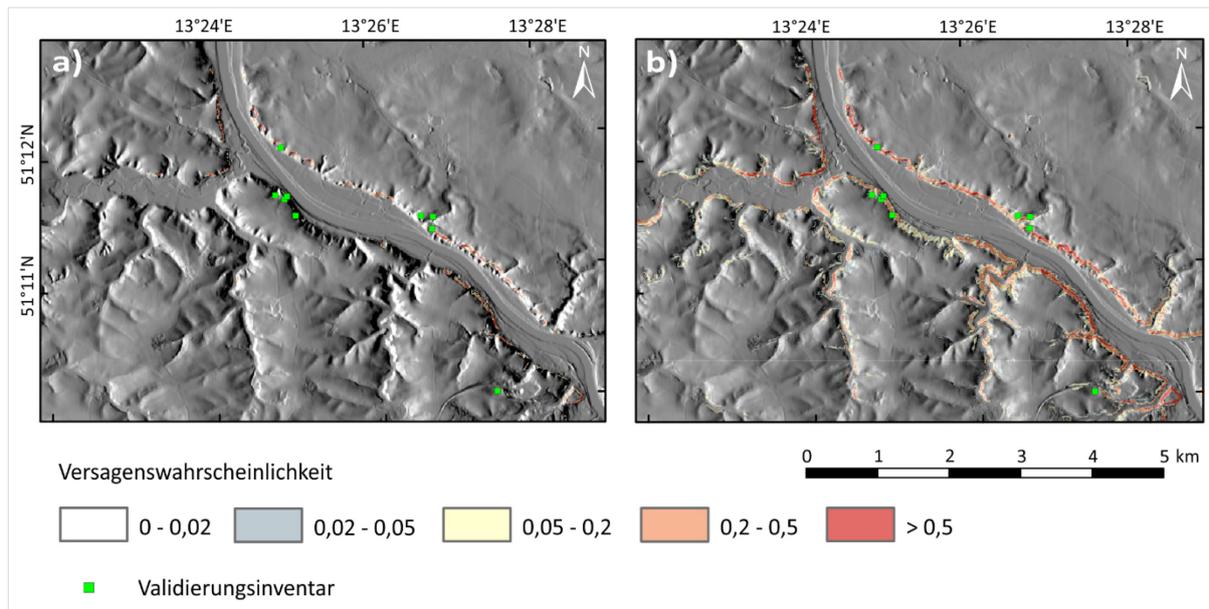


Abb. 2-39: Modellierungsbeispiel 2.3: Ausschnitt aus der Karte der Versagenswahrscheinlichkeit für die beiden Modellszenarien (a: Szenario 1 – trockenes Modell; b: Szenario 2 – wassergesättigtes Modell) nördlich der Stadt Meißen mit Validierungspunkten in grüner Farbe (flache Rutschungen und Fließprozesse auf dem Schummerungsmodell des DGM10 (Quellen: DGM10 – BKG; [Inventar](#) – LfULG Sachsen; Tab. 2-9).

2.6.2.4 Modellierungsbeispiel 2.4

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines Verfahrens des Maschinellen Lernens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit am Beispiel eines vorwärts-gerichteten (feed-forward) Künstlichen Neuronalen Netzes.

Die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit (hier Sturzprozess) mittels eines Künstlichen Neuronalen Netzes (KNN) (s. Kapitel 2.6.2.4, 2.6.2.5 und 3.2.4) wurde im zentralen Bereich des hydrogeologischen Teilraums Elbtalkreide durchgeführt (Tab. 2-29; Abb. 2-31 und Abb. 2-32). Speziell im Elbsandsteingebirge ist eine latente [Bedrohung durch Felsstürze](#) (Tag des Zugriffs: 04.09.2020) gegeben. Die 277 Ereignisse im Inventar des LfULG Sachsen bildeten den Ausgangspunkt für die Modellierung mit KNN im betrachteten Ausschnitt (Tab. 2-30).

Methodische Vorgehensweise

Im Testgebiet wurde ein vorwärts-gerichtetes KNN mit einer Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht und einer Ausgabeschicht generiert (Abb. 2-40). Die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht

entspricht der Anzahl der Parameterklassen n . Die Anzahl der Neuronen in der verborgenen Schicht wurde mit $n-1$ gewählt. Die Aktivierungsfunktion in der verborgenen Schicht ist die sigmoidale (logistische) Funktion.

Die Modellierung lässt sich in die Schritte Datenvorbereitung, Analyse und Nachbereitung einteilen.

Die Vorauswahl der Daten erfolgt subjektiv durch den Bearbeiter. Er entscheidet, welche Informationsebenen und Datensätze in die Analyse einfließen sollen. Basierend auf der Erfahrung aus dem Modellierungsbeispiel 2.1 (s. Kapitel 2.6.2.1) wurden die Parameter Hangneigung, petrographische Einheiten der GÜK250, aber auch Landnutzungsklassen aus dem CLC10 und der Parameter Bodenfeuchte exemplarisch ausgewählt (Tab. 2-9).

Ein Künstliches Neuronales Netz kann sowohl kontinuierliche Daten (stetig) als auch Nominaldaten²⁴ (kategorisch) gemeinsam verarbeiten. Die Daten müssen jedoch dafür aufbereitet werden. Die Nominaldaten, z. B. petrographische Einheiten der GÜK250 oder des CLC10, wurden in binäre Variablen zerlegt. Die Anzahl dieser Variablen entspricht der Anzahl der Parameterklassen des jeweiligen Parameters. Die stetigen Datensätze, wie z. B. die Hangneigung und die Bodenfeuchte, wurden auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 skaliert.

Um das KNN zu trainieren, wird, ähnlich wie für die Methode der Gewichteten Evidenzen, ein Trainingsinventar benötigt. Neben den Punkten (Ereignissen) von Sturzprozessen muss der Trainingsdatensatz allerdings auch Punkte beinhalten, die keine Sturzprozesse sind. Die Erstellung des Trainingsdatensatzes erfolgte durch randomisierte Stichproben. Dafür wurden aus dem Inventar für Sturzprozesse 80 % der Ereignisse zufällig gezogen. Für die Punkte ohne Sturzprozess wurden ebenfalls zufällig dreimal so viele Punkte aus dem gesamten Testgebiet ausgewählt. Damit stellt der Trainingsdatensatz eine binäre Variable dar, die die Werte 0 für Nichtsturzprozess und 1 für Sturzprozess enthält.

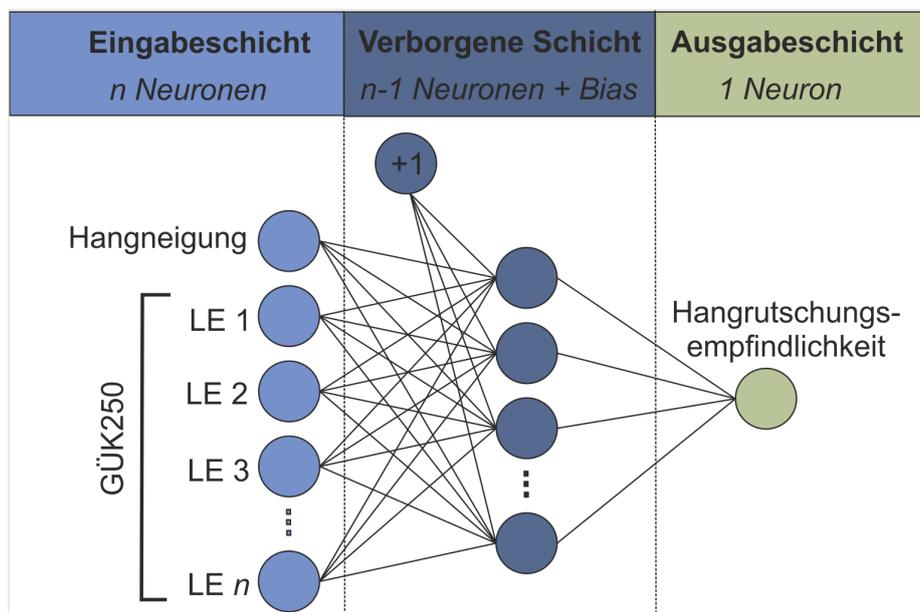


Abb. 2-40: Modellierungsbeispiel 2.4: Design des eingesetzten Netzes mit einem nominal skalierten Parameter GÜK250 und einem stetigen Parameter Hangneigung (Hang25).

²⁴ Ein Datensatz ist nominal skaliert, wenn seine Werte Kategorien darstellen, die sich nicht in eine natürliche Reihenfolge bringen lassen.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die Analyse erfolgte in der Programmiersprache bzw. -umgebung R unter Nutzung von R-Skripten der BGR. Im Verarbeitungskern wurde das R-Modul [neuralnet](#) (Tag des Zugriffs: 03.09.2020) eingesetzt ([Fritsch et al., 2019](#)). Die Modellierung schließt folgende Parameterkombinationen ein:

- *Hang25 + petrographische Einheiten der GÜK250;*
- *Hang25 + petrographische Einheiten der GK50;*
- *Hang25 + Landnutzungsklassen des CLC10;*
- *Hang25 + Bodenfeuchte im Frühjahr.*

Im Nachbearbeitungsschritt wurde unter Nutzung des R-Moduls [Interpretable Machine Learning \(IML\)](#) (Tag des Zugriffs: 03.09.2020) ([Molnar et al., 2018](#)) die Wichtigkeit der einzelnen Parameter (engl.: feature importance) analysiert.

Die Wichtigkeitsanalyse ist so organisiert, dass im generierten Vorhersagemodell aus dem KNN die einzelnen Parameterklassen nacheinander durch eine zufällige Variable ersetzt werden. Dadurch verändert sich die Vorhersagequalität des Modells. Diese Änderung wird durch den *Mittleren Absoluten Fehler* (engl.: mean absolute error) erfasst. Je größer dieser Wert, desto wichtiger ist der Parameter für das Modell.

Die Evaluierung des Modells erfolgt mittels der ROC-Kurve. Ebenfalls anhand der ROC-Kurve wurde das Modell in fünf Empfindlichkeitszonen für Sturzprozesse unterteilt (s. [Kapitel 2.3.6](#)) und anschließend mit einem statistischen MGE-basierten Modell verglichen. Das MGE-Modell wurde in Analogie zum Modellierungsbeispiel 2.1 (ohne Maskierung) (s. [Kapitel 2.6.2.1](#)) unter Nutzung des identischen Trainingsinventars wie für das KNN-Testgebiet erstellt.

Ergebnisse und Diskussion

Das Ergebnis der Analyse mittels KNN ist ein Vorhersagemodell, welches aufgrund der verborgenen Anpassung der Gewichte für einzelne Parameterklassen zunächst nicht interpretierbar ist. Nach dem Schritt der Wichtigkeitsanalyse kann jedoch anhand der Diagramme in [Abb. 2-41](#) gefolgert werden, welche der Parameterklassen den größten Beitrag zur Vorhersagequalität in den jeweiligen Modellen liefern. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass nicht in allen Modellen die Hangneigung der dominierende Parameter ist.

In den Modellen mit den Parameterkombinationen Hang25 + GK50 und Hang25 + GÜK250 ([Abb. 2-41a](#); [Abb. 2-41b](#)) werden die weit verbreiteten Sandsteine des Elbsandsteingebirges als wichtigster Parameter angezeigt.

Im Modell für Hang25 + CLC10 tritt unerwartet die Landbedeckungsklasse (= Lendeneinheit, LE) 18: Nadelwald als wichtigste Parameterklasse in Erscheinung ([Abb. 2-41c](#)).

In der Kombination Hang25 + Bodenfeuchte ist die Bodenfeuchte der Monate April und Mai in der Bildung des Vorhersagemodells wichtiger als die Hangneigung ([Abb. 2-41d](#)).

Die ROC-Kurven zeigen für alle gerechneten Parameterkombinationen eine exzellente Anpassung des Modells mit einem AUC-Wert > 0,9 ([Tab. 2-44](#)).

Die Feststellung, dass alle Modelle des KNN mit den oben aufgelisteten Parameterkombinationen in der Bewertung eine [ausgezeichnete](#) Modellgüte erreichen, ist dem Umstand geschuldet, dass die Hangneigung der wesentliche Parameter zur Beschreibung des Phänomens Sturzprozess ist. Die notwendigen steilen Hänge konnten sich in der Erosionslandschaft des Elbsandsteingebirges nur in den Sandsteinen herausbilden.

Die Ergebnisse aus der Analyse der Kombinationen Hang25 + CLC10 und Hang25 + Bodenfeuchte weisen auf ein Problem, das bereits in der Modellierung mit MGE diskutiert wurde (s. [Kapitel 2.6.1.1](#)).

Bei der Landbedeckungsklasse LE 18: Nadelwald handelt es sich um eine Koinzidenz mit dem Parameter Hangneigung (Hang25). Aufgrund der gemeinsamen Verarbeitung der Parameter hat das KNN diesen Zusammenhang nicht erkannt und die Parameterklasse Nadelwald als den wichtigsten Parameter eingestuft. Dies ist vor allem dann möglich, wenn eine solche Parameterklasse räumlich günstiger angeordnet ist und im Optimierungsprozess des KNN die Sturzprozesse besser eingrenzen kann. Ohne solch eine Wichtigkeitsanalyse (z. B. mittels des R-Moduls IML) kann dieser Sachverhalt durch die verborgene Arbeitsweise des KNN unentdeckt bleiben. Daran wird deutlich, dass unter Berücksichtigung unwesentlicher oder gar falscher Parameter aus statistischer Sicht ein gutes oder sogar ein ausgezeichnetes Modell erstellt werden könnte (Tab. 2-44). Daher gilt auch für die Analysen mittels KNN: Plausibilität vor statistischer Güte!

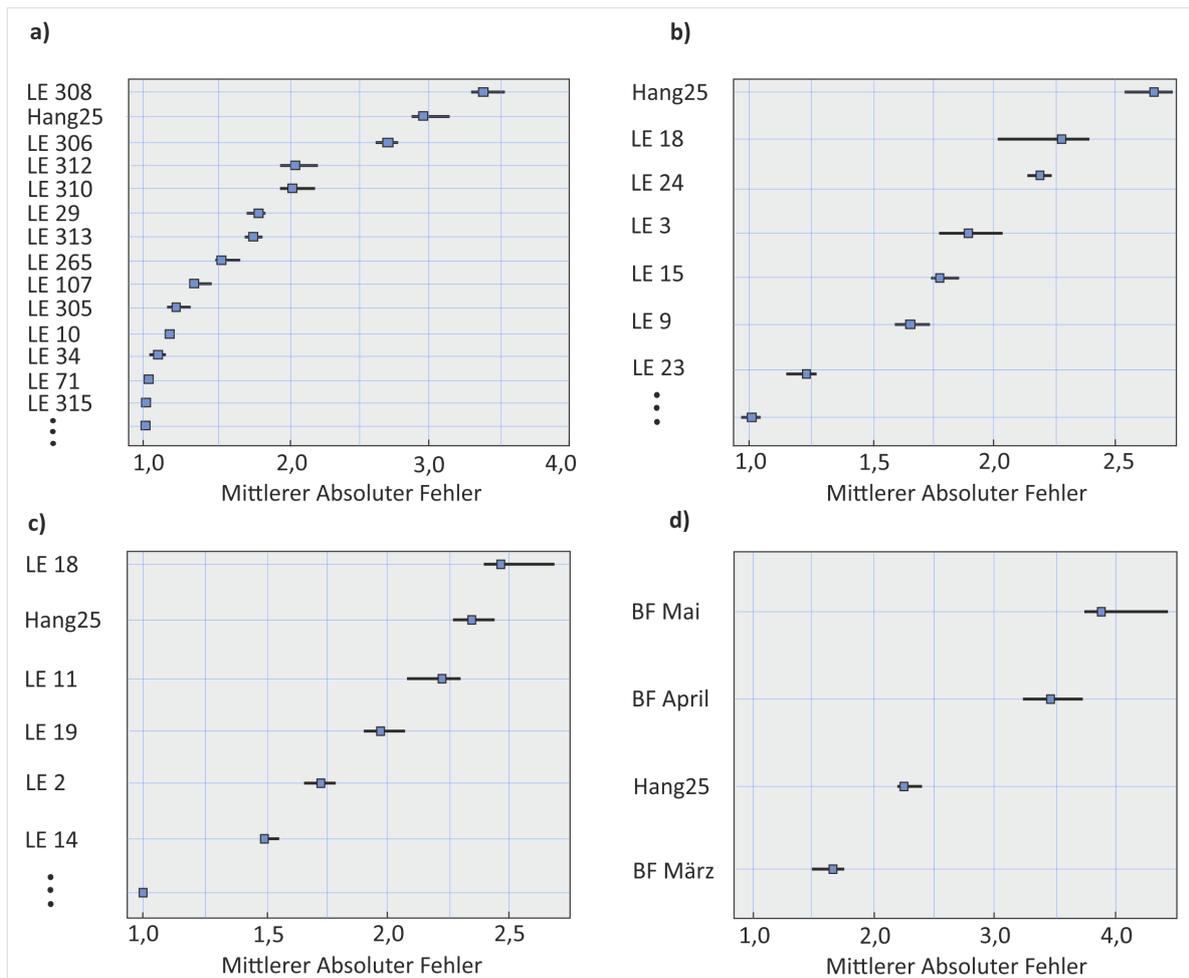


Abb. 2-41: Modellierungsbeispiel 2.4: Wichtigkeit der Parameterklassen in den Modellen: a) Hang25 + GK50 mit Legendeneinheit (LE) 308: Fluvialer Sandstein, Hang25: Hangneigung, LE 306: Rathewalder Sandstein, LE 312: Pirnaer Oberquader, LE 310: Mittlerer Grünsandstein, LE 29: Lösssand, Sandlöss, LE 313: Konglomerat, Quadersandstein, LE 265: Fein- bis Grobschutt, LE 107: Schluff, z.T. sandig ("Auenlehm"); b) Hang25 + GÜK250 mit Hang25: Hangneigung, LE 18: Quarzsandstein, LE 24: Quarzsandstein, LE 3: Sandstein, Mergelstein, LE 15: Schluff, LE 9: Sandstein, LE 23: Feinsand bis Mittelsand; c) Hang25 + CLC10 mit LE 18: Nadelwald, Hang25: Hangneigung, LE 11: Ackerland, LE 19: Mischwald, LE 2: Gewerbegebiete, LE 14: Grünland; d) Hang25 + Bodenfeuchte (BF) im Frühjahr mit BF Mai, BF April, BF März.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-44: Modellierungsbeispiel 2.4: AUC-Werte der KNN-Modelle für die Parameterkombinationen von Hang25 mit einem thematischen Parameter (GÜK250 oder GK50 oder CLC10 oder Bodenfeuchte).

Modell	AUC-Wert
Hang25 + GÜK250	0,93
Hang25 + GK50	0,91
Hang25 + CLC10	0,93
Hang25 + Bodenfeuchte	0,94

Zum Vergleich der Ergebnisse aus KNN- und MGE-Modellierung wurde die Parameterkombination Hang25 + GÜK250 herangezogen. In Tab. 2-45 sind die für das Trainings- und Testinventar bestimmten AUC-Werte für die beiden Modellierungsvarianten gegenübergestellt. Beide Modelle sind in ihrer statistischen Güte als äquivalent zu beurteilen.

Tab. 2-45: Modellierungsbeispiel 2.4: AUC-Werte im Vergleich von KNN- und MGE-Modellen bei Aufteilung des Trainings- und Testdatensatz im Verhältnis 80 : 20.

Modell	AUC-Wert: Trainingsinventar	AUC-Wert: Testinventar
KNN (Hang25 + GÜK250)	0,93	0,92
MGE (Hang25 + GÜK250)	0,93	0,92

Der Vergleich der räumlichen Muster zeigt jedoch Unterschiede in der Einordnung der Flächen in die Zonen der Empfindlichkeit für Sturzprozesse (Abb. 2-42). Die Tab. 2-46 bietet einen quantitativen Aufschluss über die Flächenverteilung dieser Zonen. Es ist zu erkennen, dass beide Modelle die Empfindlichkeitsklassen *Sehr hoch* und *Hoch* vergleichbar abbilden. Deutliche Unterschiede ergeben sich für die Empfindlichkeitsklassen *Niedrig* und *Sehr niedrig*.

Während im MGE-Modell die flachen Gebiete eindeutig in die Empfindlichkeitsklasse *Sehr niedrig* eingestuft werden, ordnet das KNN-Modell wesentlich größere Bereiche in die Klasse *Niedrig* ein.

Hier wird nochmal die unterschiedliche Verarbeitung der Daten in den Modellen offensichtlich. Im MGE ergibt sich ein sehr starker Unterschied (Kontrast) zwischen statistischen Gewichten des Parameters Hangneigung gegenüber der Petrographie aus der GÜK250. Das bedeutet, dass die Hangneigung als vielfach wichtiger bewertet wird und das Empfindlichkeitsmuster dominiert. In der Abb. 2-42b ist erkennbar, dass im KNN die Wichtigkeit der Parameter nahezu linear abnimmt. Damit ergeben sich für die Parameter Hangneigung und Petrographie geringere Kontraste und die petrographischen Einheiten pausen sich im Muster stärker durch.

Tab. 2-46: Modellierungsbeispiel 2.4: Flächenverteilung der Zonen der Empfindlichkeit für Sturzprozesse aus den KNN- und MGE-Modellen.

Zonen der Empfindlichkeit für Sturzprozesse	KNN-Fläche [%]	MGE-Fläche [%]
<i>Sehr niedrig</i>	17,5	65,3
<i>Niedrig</i>	57,7	20,5
<i>Moderat</i>	13,8	9,4
<i>Hoch</i>	7,7	2,3
<i>Sehr hoch</i>	3,2	2,5

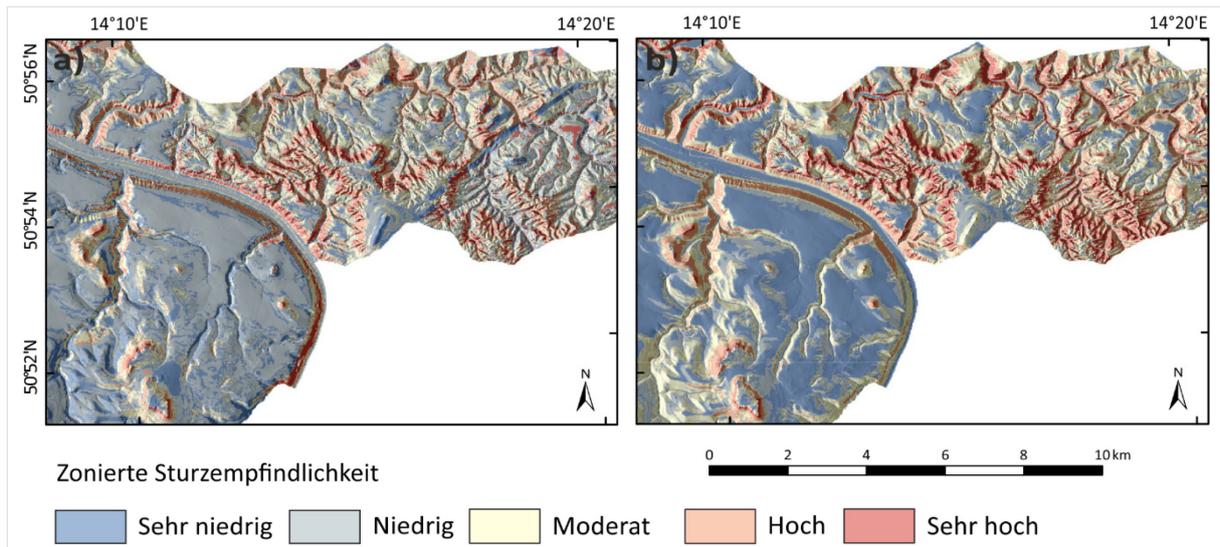


Abb. 2-42: Modellierungsbeispiel 2.4: Vergleich der zonierten Sturzempfindlichkeit im Gebiet der Elbtalkreide; die Modelle beruhen auf der Kombination Hang25 + GÜK250 (a: mit KNN und b: mit MGE modelliert) (Quellen: DGM 25 – BKG; Tab. 2-9).

2.6.2.5 Modellierungsbeispiel 2.5

Anmerkung: Das Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Ingenieurgeologie der Technischen Universität Berlin hat das [Kapitel 2.6.2.5](#) (Modellierungsbeispiel 2.5) erarbeitet ([s. oben](#)).

Die interne Gliederung dieses Kapitels unterscheidet sich von anderen Modellierungsbeispielen in diesem Bericht. Im nachstehenden Text wurden ausschließlich redaktionelle Anpassungen, d. h. fortlaufende Nummerierungen und Formatierungen, getätigt bzw. Querverweise hinzugefügt. Abbildungen sind unverändert integriert worden. Aus der Nutzung englischsprachiger Software-Pakete resultieren teilweise englischsprachige Termini in Tabellen und Abbildungen. Die Begriffe *Empfindlichkeitsanalyse* oder *-karte* sind synonym zum Begriff *Hangrutschungsempfindlichkeitsanalyse* oder *-karte* zu verstehen. Die [Nutzungshinweise](#) für dieses Kapitel entsprechen denen des MBiD-Berichts im vollen Umfang.

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10)

Untersuchung der Empfindlichkeit gegenüber Felsstürzen mit Künstlichen Neuronalen Netzen im Testgebiet Elbtalzone auf der Grundlage der bereitgestellten Daten (Tab. 2-9 und Tab. 2-31). Hierbei wurden drei Methoden zur räumlichen Diskretisierung der punktförmigen Felssturzereignisse, verschiedene Strukturen der KNN und verschiedene Kombinationen von Eingangsparametern untersucht und verglichen.

Datenaufbereitung

In der Empfindlichkeitsanalyse wurde das Gesamtgebiet des Elbtalgrabens betrachtet, welches eine Ausdehnung von 1948 km² umfasst. Neben dem Elbsandsteingebirge ist das Meißner Massiv eine weitere Region mit einer hohen Anzahl an Felssturzereignissen. Das Meißner Massiv ist durch Vulkanite und Plutonite geprägt, wohingegen das Elbsandsteingebirge durch Sedimentgesteine der Oberkreide aufgebaut ist.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Für die Empfindlichkeitsanalyse wurde der bereitgestellte Datensatz im GIS begutachtet und geeignete Parameter extrahiert. Zusätzlich wurden drei Ansätze zur räumlichen Diskretisierung des punktförmigen Felssturzinventars herausgearbeitet. Anschließend wurden die gewonnenen Daten in der Software SPSS® Modeler von IBM für die Analyse mit KNN auf- und vorbereitet. Die Analyse wurde ebenfalls im SPSS® Modeler durchgeführt. Im Anschluss wurden die Ergebnisse evaluiert und auf Plausibilität überprüft.

Räumliche Diskretisierung von Felssturzereignissen

Das Felssturzinventar besteht aus Punktdaten, welche in eine für die pixelbasierte Analyse geeignete räumliche Darstellung überführt wurden. Hierbei musste auch die räumliche Genauigkeit der aufgenommenen Punkte berücksichtigt werden. Insgesamt wurden im Testgebiet Elbtalgraben 369 Felssturzereignisse aufgenommen, die in 356 10 m x 10 m Rasterzellen liegen. Somit ist die räumliche Diskretisierung so zu wählen, dass alle Zellen, die Felssturzereignisse repräsentieren, ähnliche Eigenschaften wie die ursprünglichen Felssturzereignisse aufweisen.

Die erste Methode der räumlichen Darstellung stellt eine kreisrunde Fläche mit einem Radius von 25 m um jeden Felssturz dar. Bei einem 25 m Radius wurden bei einer Rasterauflösung von 10 m x 10 m den 32 nächstgelegenen Rasterzellen das Attribut Felssturz zugeordnet. Dieser Ansatz für die räumliche Diskretisierung wird im Folgenden als Buffer bezeichnet.

Die beiden weiteren Ansätze für die räumliche Diskretisierung der Felssturzereignisse beziehen sich auf Geländeeinheiten, die sich aus hydrogeologischen und geomorphologischen Merkmalen zusammensetzen. Damit wird die Idee verfolgt, kleine Einzugsgebiete zu definieren, die Hänge mit gleichem Gefälle und gleicher Orientierung darstellen. Hierfür wurden zum einen nach der Definition von [Carrara \(1988\)](#) in ArcGIS® auf Grundlage des DGM10 erzeugte Wassereinzugsgebiete weiter nach ihrer Hangausrichtung unterteilt, ein Ansatz, der im Folgenden als AspectWS bezeichnet wird.

Zum anderen wurden mit der Methode nach [Wang et al. \(2017\)](#) das DGM10 und die Inverse des DGM10 in ArcGIS® in Wassereinzugsgebiete gegliedert und diese miteinander verschnitten, nachfolgend als Slope Unit bezeichnet. Bei beiden Ansätzen wurden alle resultierenden Geländeeinheiten, die einen Felssturz-Punkt beinhalten, als repräsentativ für Felssturzereignisse klassifiziert (Abb. 2-43). Durch diese Methoden wurde die Anzahl der Zellen mit einem Felssturzereignis deutlich erhöht (Tab. 2-47).

Tab. 2-47: Modellierungsbeispiel 2.5: Anzahl der Rasterzellen für die verschiedenen Ansätze zur räumlichen Diskretisierung der Felssturzereignisse.

Räumliche Diskretisierung	Anzahl Rasterzellen	Anteil Gesamtrasterzellen [%]
Buffer	6659	0,035
AspectWS	10 933	0,057
Slope Unit	10 147	0,053

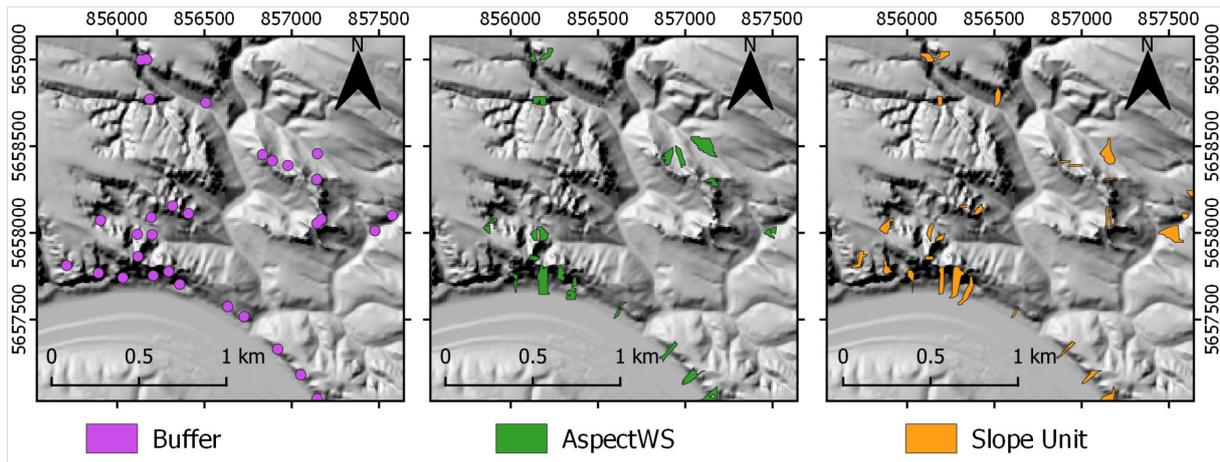


Abb. 2-43: Modellierungsbeispiel 2.5: Räumliche Diskretisierung der Felssturzereignisse im Testgebiet Elbtalgraben.

Eingangsparameter

Die vom MBiD-Projekt bereitgestellten thematischen Informationsebenen entsprechen in vollem Umfang denen, die für das Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4) verwendet wurden (Tab. 2-31). Aus diesen Informationsebenen wurden insgesamt 19 Parameter für die Analyse extrahiert und in die Auflösung des DGM10 überführt.

Im SPSS® Modeler wurde der Datensatz zunächst *gereinigt*, d. h. nicht benötigte Datenpunkte, wie Gewässer, wurden entfernt.

Anschließend wurde der Parameter Hangausrichtung in Nord- und Süd-Ausrichtung aufgeteilt. Der Parameter Locker-/Festgestein wurde in das Format Festgestein oder Lockergestein überführt. Somit wurden insgesamt 22 Parameter und drei verschiedene räumliche Darstellungen für die Empfindlichkeitsanalyse im Elbtalgraben verwendet (Tab. 2-48). Die meisten Modellierungsalgorithmen funktionieren am besten, wenn die kontinuierlichen Parameter einer Normalverteilung folgen. Andernfalls kann es sein, dass diese nicht in der Lage sind, vollständig auf die Informationen im Datensatz zuzugreifen (Pyle, 1999). Daher wurden Parameter, deren Verteilung stark von der Normalverteilung abweichen, durch die Verwendung von Transformationsfunktionen, wie dem dekadischen Logarithmus oder der Quadratwurzel, transformiert. Abschließend wurden die Parameter normiert.

Die Tab. 2-48 bietet einen Überblick über die untersuchten Parameter und deren Aufbereitung im Rahmen des Modellierungsbeispiels 2.5.

Methodische Vorgehensweise

Für eine robuste Analyse mit KNN wird ein ausbalancierter Datensatz benötigt. In der Praxis wird ein Mindestverhältnis von 30 % zu 70 % zwischen Zellen mit einem Ereignis und Zellen ohne Ereignis angegeben (Pyle, 2003).

Im Testgebiet besitzen weniger als 0,057 % der Rasterzellen das Attribut *Felssturzereignis (Ereignis)* (Tab. 2-47). Um dieses Problem zu beheben, wurde die Methode des *Undersampling* durchgeführt. Hierbei wurde eine repräsentative, zufällige Stichprobe der Daten gezogen, die als *kein Felssturzereignis (Nicht-Ereignis)* attribuiert ist, damit der neue Modellierungsdatensatz ein Verhältnis von 30 % zu 70 % aufweist.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Dieser veränderte Datensatz wurde danach in einen Trainings-, Test- und Validierungsdatensatz aufgeteilt, wobei der Validierungsdatensatz die ursprüngliche Verteilung zwischen *Ereignis* und *Nicht-Ereignis* aufwies. Im Anschluss an die Modellierung wurde der vollständige Datensatz verwendet, um eine Analyse des gesamten Gebiets durchzuführen.

Für jeden Ansatz der räumlichen Diskretisierung der Felsstürze wurden insgesamt drei KNN-Modellierungen im SPSS® Modeler durchgeführt. Um einen Eindruck über eine mögliche Netzwerkarchitektur zu erhalten, wurde in einem ersten Lauf jeweils die Netzwerkarchitektur (Anzahl der verdeckten Neuronen) für die drei räumlichen Diskretisierungen durch den SPSS® Modeler automatisch bestimmt. Anschließend wurde diese vereinfacht. In der dritten Modellierung wurde für die vereinfachten Netzwerkstrukturen eine Ensemblemodellierung (Bagging) durchgeführt. Hierbei wurden 10 Modelle erstellt und diese miteinander kombiniert. Insgesamt wurden also jeweils drei Modelle für die drei Diskretisierungsansätze analysiert (Tab. 2-49).

Tab. 2-48: Modellierungsbeispiel 2.5: Verwendete Informationsebenen, abgeleitete Parameter und deren Transformation.

Informationsebene	Parameter	Einheit	Originale Auflösung	Wertebereich	Transformation	Normierter Wertebereich	Datentyp
DGM10	Höhe	m	10 m x 10 m	89,35 bis 791,32	LogN	0 bis 1	stetig
	Hangneigung	°	10 m x 10 m	0 bis 79,2	-	0 bis 1	stetig
	Hangausrichtung N	°	10 m x 10 m	0 bis 180	Cos ⁻¹	0 bis 1	stetig
	Hangausrichtung S	°	10 m x 10 m	0 bis 180	Quadratwurzel	0 bis 1	stetig
	Standardkrümmung	m ⁻¹	10 m x 10 m	-2,15 bis 2,25	-	-1 bis 1	stetig
	Horizontalkrümmung	m ⁻¹	10 m x 10 m	-533,42 bis 729,60	-	-1 bis 1	stetig
	Profilkrümmung	m ⁻¹	10 m x 10 m	-0,344 bis 0,381	-	-1 bis 1	stetig
	Räumliche Darstellung Buffer	-	-	0 bis 1	-	0 bis 1	binär
	Räumliche Darstellung AspectWS	-	-	0 bis 1	-	0 bis 1	binär
	Räumliche Darstellung Slope Unit	-	-	0 bis 1	-	0 bis 1	binär
DLM250	Landform	-	10 m x 10 m	9 Klassen	-	9 Klassen	nominal
	Abstand Straße	m	10 m x 10 m	0 bis 4682,84	LogN	0 bis 1	stetig
	Abstand Gleise	m	10 m x 10 m	0 bis 13073,58	Quadratwurzel	0 bis 1	stetig
GÜK250	Abstand tektonische Einheit	m	10 m x 10 m	0 bis 26291,64	Quadratwurzel	0 bis 1	stetig
REGNIE8110	Niederschlag (1971 bis 2010)	mm/a	1 km x 1 km	530 bis 1087	-	0 bis 1	stetig
	Bodenfeuchte (Februar, August, Dezember)	%	1 km x 1 km	57 bis 105	-	0 bis 1	stetig
CLC10	Landnutzung	-	-	5 Klassen	-	5 Klassen	nominal
GÜK250	Lithologie	-	-	22 Klassen	-	22 Klassen	nominal
	Gesteinsgenese	-	-	3 Klassen	-	3 Klassen	nominal
HÜK200	1. Grundwasserleiter	-	-	4 Klassen	-	4 Klassen	nominal
	K _r -Wert	-	-	9 Klassen	-	9 Klassen	nominal
	Festgestein	-	-	0 bis 1	-	0 bis 1	binär
	Lockergestein	-	-	0 bis 1	-	0 bis 1	binär

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-49: Modellierungsbeispiel 2.5: Netzwerkarchitekturen für verschiedene räumliche Diskretisierungen. Die Zahlenreihen charakterisieren die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht, der verborgenen Schicht und der Ausgabeschicht des jeweiligen Modells.

Modelle	Buffer	AspectWS	Slope Unit
SPSS® Modeler	22-8-1	22-7-1	22-9-1
Vereinfachung	22-4-1	22-4-1	22-4-1
Bagging	22-4-1	22-4-1	22-4-1

Für die nachfolgende Parameteranalyse wurde zuerst der relative Einfluss der Parameter auf das Analyseergebnis begutachtet. Anschließend wurden Parameterkombinationen untersucht, die eine robuste und aussagekräftige Analyse ermöglichen (Tab. 2-50).

Tab. 2-50: Modellierungsbeispiel 2.5: Parameterkombinationen für die Parameteranalyse.

Kombination	Parameter
<i>Morphologisch</i>	
Kombination 1	Hangneigung
Kombination 2	Hangneigung, Horizontalkrümmung
Kombination 3	Hangneigung, Profilkrümmung
Kombination 4	Hangneigung, Landform
Kombination 5	Hangneigung, Landform, Profilkrümmung
Kombination 6	Landform, Profilkrümmung
Kombination 7	Hangneigung, Landform, Profilkrümmung, Hangausrichtung S
Kombination 8	Hangneigung, Landform, Profilkrümmung, Hangausrichtung S, DEM10
<i>Geologisch</i>	
Kombination 9	Lithologie, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter
Kombination 10	Lithologie, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter, Festgestein
<i>Gemischt</i>	
Kombination 11	Hangneigung, Profilkrümmung, Hangausrichtung S, Lithologie, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter, Bodenfeuchte 08
Kombination 12	Hangneigung, Profilkrümmung, Hangausrichtung S, Landform, Lithologie, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter, Bodenfeuchte 08, Niederschlag, Landnutzung
Kombination 13	Hangneigung, Profilkrümmung, Lithologie, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter, Niederschlag
Kombination 14	Landform, DEM10, Profilkrümmung, Hangausrichtung S, K _f -Wert, 1. Grundwasserleiter, Festgestein, Landnutzung

Ergebnisse und Diskussion

Die Abb. 2-44 illustriert, dass mit allen Modellen gute Genauigkeiten zwischen 92,9 % und 94,0 % erzielt werden konnten. Die hohen Trefferquoten (Hit rate = Rate der richtig vorhergesagten Felsstürze) und Spezifitäten (Rate der richtig negativ vorhergesagten Ereignisse) belegen zum einen eine sehr gute Klassifizierungsfähigkeit und zum anderen eine hohe Generalisierungsfähigkeit der KNN. Die Vereinfachung der Netzwerkstruktur hatte nur geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse. Die Bagging-Methode führte meist zu einer leichten Verbesserung der Ergebnisse. Die räumliche Diskretisierung der Felsstürze spielte nur eine geringe Rolle.

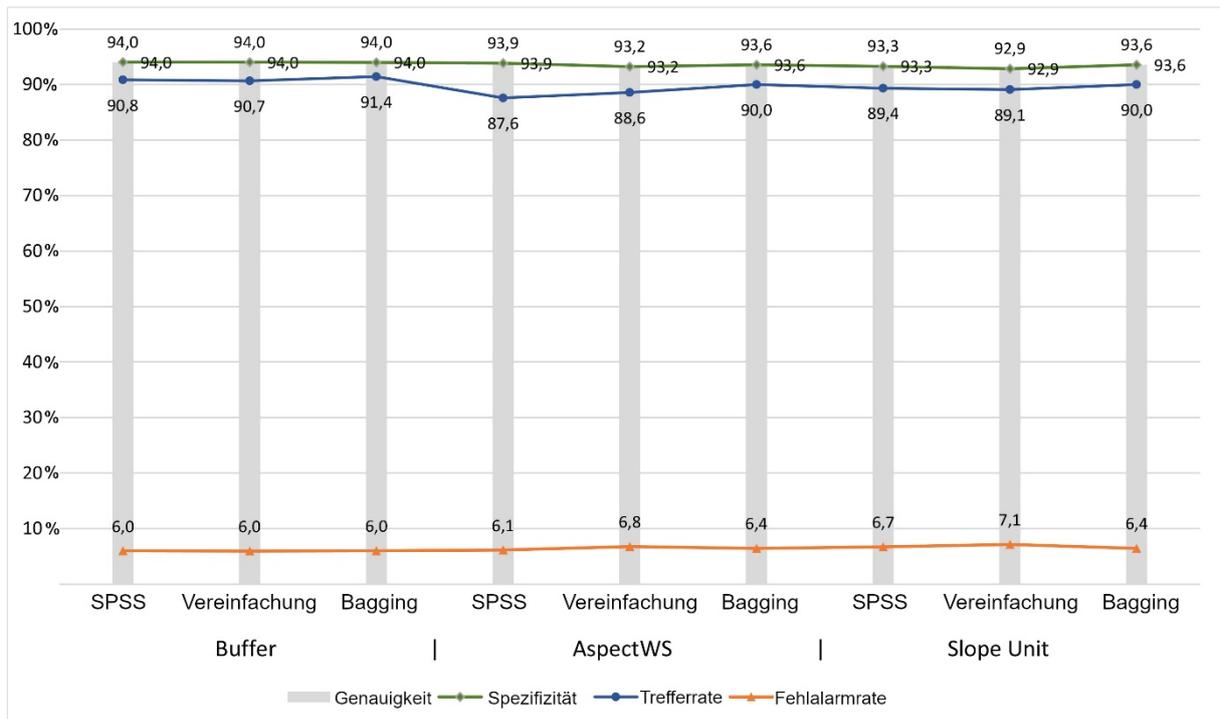


Abb. 2-44: Ergebnisse der KNN-Analysen mit den räumlichen Diskretisierungsansätzen der Felssturzereignisse. SPSS: Standardeinstellung des SPSS® Modelers, Vereinfachung: Vereinfachung zu KNN mit vier verborgenen Neuronen, Bagging: Ensemblemodellierung (Tab. 2-49).

Die Empfindlichkeitskarten zeigen untereinander nur geringe Unterschiede, weisen die bekannten Gefahrengebiete auf und stellen weitere potenzielle Gefahrengebiete dar (Abb. 2-45). Jedoch werden teilweise auch Talebenen als felssturzgefährdet eingestuft. In den Empfindlichkeitskarten sind unterschiedlich stark ausgeprägte Artefakte wiederzufinden, die auf die ursprüngliche Auflösung der Parameter Bodenfeuchte und Niederschlag zurückzuführen sind. Jedoch beeinflussen diese das Endergebnis nur sehr gering. Aufgrund der quantitativ guten Werte und der am einfachsten umzusetzenden Methode liefert der räumliche Diskretisierungsansatz Buffer die überzeugendsten Analyseergebnisse (Abb. 2-45). Aus diesem Grund wurde die Parameteranalyse mit der räumlichen Diskretisierung Buffer und der 22-4-1-Netzwerkarchitektur durchgeführt.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

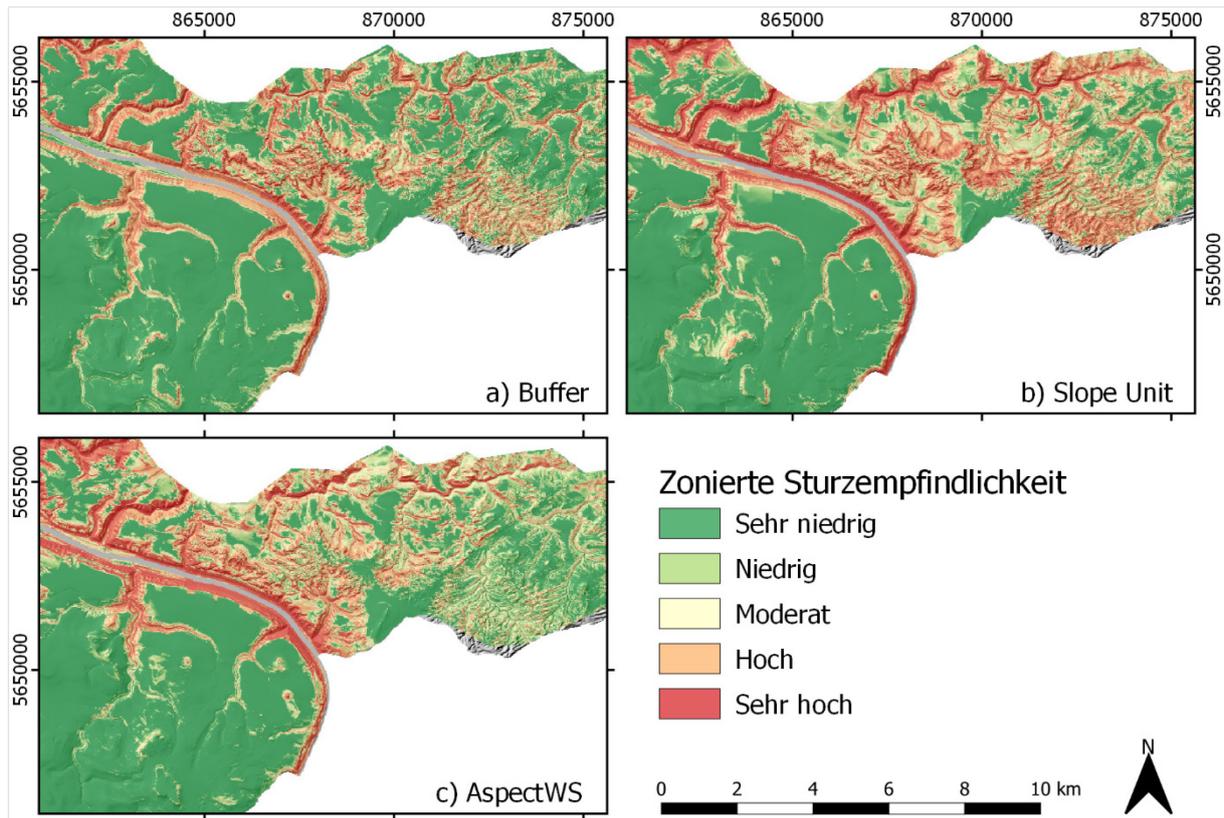


Abb. 2-45: Modellierungsbeispiel 2.5: Exemplarischer Kartenausschnitt der Modelle im Testgebiet Elbtalgraben für die verschiedenen räumlichen Diskretisierungsansätze.

Großen Einfluss auf die Empfindlichkeitsanalyse haben die geomorphologischen Parameter, insbesondere die Hangneigung (Abb. 2-46). Die geomorphologischen Parameter beschreiben am besten die Hanggeometrie, die für Felssturzereignisse relevant ist. Aber auch Parameter wie Bodenfeuchte, Niederschlag, K_f -Wert und Lithologie sind von großer Bedeutung.

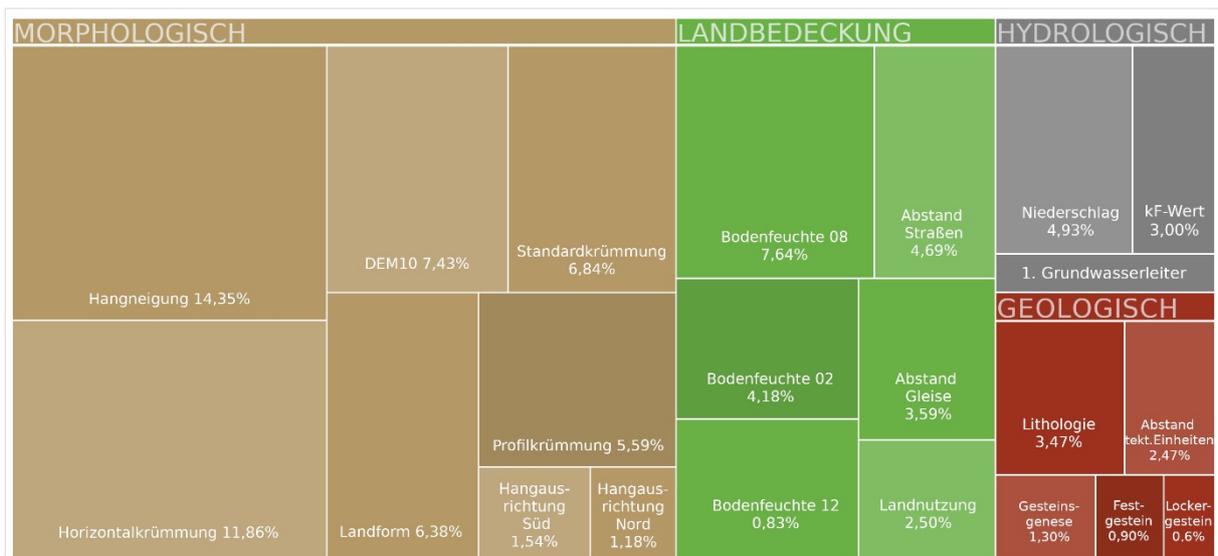


Abb. 2-46: Modellierungsbeispiel 2.5: Faktoren-Karte – Darstellung des Einflusses der Parameter auf die Empfindlichkeitsanalyse mit einem Künstlichen Neuronalen Netz.

Die Untersuchung von 14 verschiedenen Parameterkombinationen hebt die Wichtigkeit der geomorphologischen Parameter nochmals hervor, insbesondere der Hangneigung (Abb. 2-47). Wie in Abb. 2-47 zu sehen ist, können schon mit deutlich weniger verwendeten Parametern gute quantitative Ergebnisse erzielt werden. Werden diese qualitativ in Empfindlichkeitskarten dargestellt, wird ersichtlich, dass sie sich stark unterscheiden. Die Verwendung von rein geomorphologischen Parametern führt zu einer guten Herausarbeitung der Steilhänge im Testgebiet (Abb. 2-48). Dabei werden jedoch auch Bahn- und Straßendämme teilweise als felssturzgefährdet definiert. Nur geologische Parameter führen zu einer undifferenzierten Empfindlichkeitskarte. Die Verwendung von Parametern aus den Bereichen Geomorphologie, Geologie, Landnutzung und Hydrologie liefert die besten Ergebnisse und wirkt dem Parameter Hangneigung deutlich entgegen. Des Weiteren zeigt die Parameteranalyse auch, dass die Verwendung von vorrangig stetigen Parametern zu einer deutlich genaueren und differenzierteren Empfindlichkeitskarte führt.

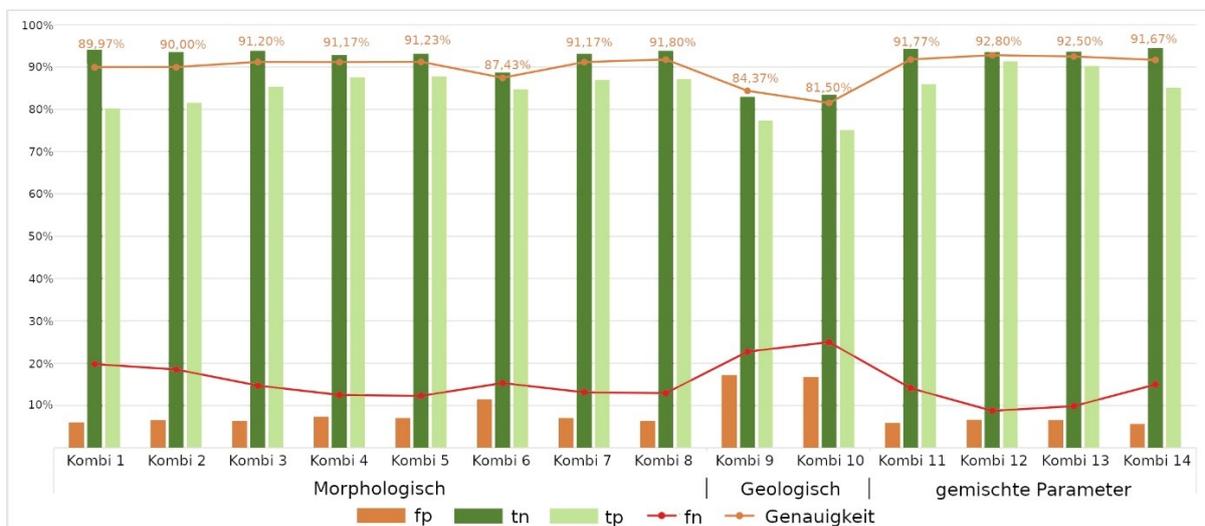


Abb. 2-47: Modellierungsbeispiel 2.5: Parameteranalyse. Vergleich der verschiedenen Parameterkombinationen mittels statistischer Kennwerte: fp – Falsch Positiv Rate, tn – Richtig Negativ Rate, tp – Richtig Positiv Rate, fn – Falsch Negativ Rate und Accuracy – Genauigkeit (s. Kapitel 2.3.6).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

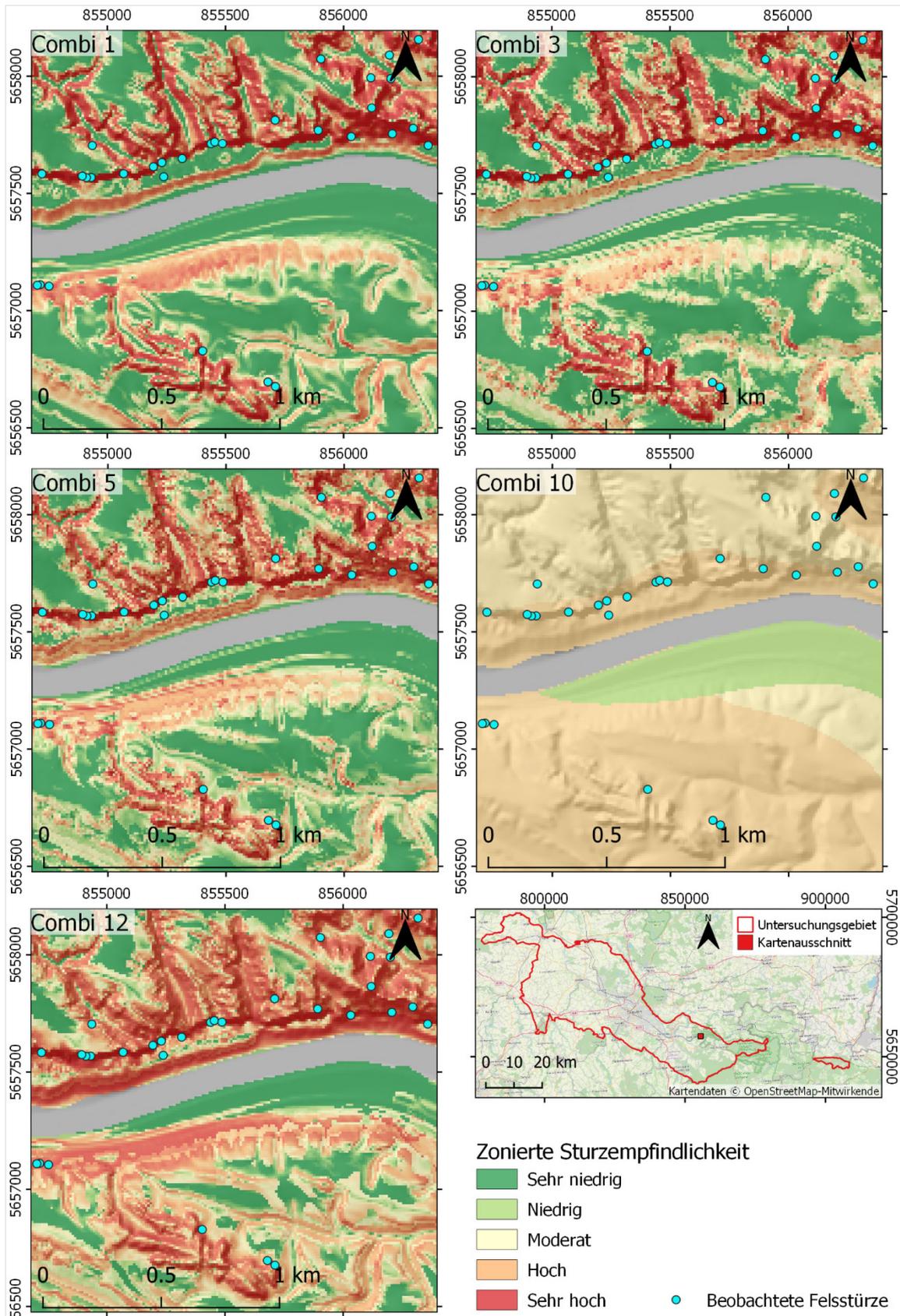


Abb. 2-48: Modellierungsbeispiel 2.5: Repräsentative Kartenausschnitte für die Parameteranalyse der Kombinationen 1, 3, 10, 12, 14 (s. Tab. 2-50) im Testgebiet Elbtalgraben.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Alle entwickelten Modelle identifizierten die bekannten felssturzgefährdeten Gebiete, wie das Elbsandsteingebirge, sehr gut. Darüber hinaus wurden weitere Gebiete als felssturzgefährdet eingestuft. Der Einfluss der drei verschiedenen Ansätze zur räumlichen Diskretisierung auf die Empfindlichkeitsanalyse erwies sich als gering.

Die räumliche Darstellung der Felssturzereignisse durch eine kreisförmige Fläche erzielte sowohl die besten quantitativen Ergebnisse als auch die besten Empfindlichkeitskarten. Zu den wichtigsten Parametern der Empfindlichkeitsanalyse gehörten morphologische Parameter wie Hangneigung, Profilkrümmung und Geländeform. Diese wiesen steile Felshänge als besonders felssturzgefährdet aus. Leider führte die Berücksichtigung dieser Parameter auch zur Klassifizierung leichter Erhebungen im Gelände oder Infrastruktureinheiten als felssturzgefährdet. Daher sind weitere Parameter aus den Bereichen Geologie, Hydrologie und Landbedeckung erforderlich, um Gefahrengebiete korrekt zu identifizieren.

Die Verwendung zusätzlicher Parameter zeigt jedoch Konflikte auf. Zusätzliche Parameter verbesserten einerseits die Ergebnisse im flachen Gelände und städtischen Gebieten, führten andererseits aber auch zu einer gröberen Differenzierung der Felssturzgefahr im Gebirge. Um diesen Widerspruch zu lösen, müssten genauere Daten, spezifische Parameter und detailliertere räumliche Darstellungen von Felsstürzen verwendet werden, nach dem einfachen Grundsatz, dass ein differenziertes Ergebnis nur mit ausreichend differenzierten Daten erreicht werden kann. Dies ist jedoch schwierig, da im MBiD-Projekt bevorzugt Daten bzw. Karten verwendet werden sollen, die für ganz Deutschland zur Verfügung stehen.

Andere mögliche Ansätze der Verbesserung der Qualität der Empfindlichkeitsanalyse sind die Verwendung von anderen Lernalgorithmen, wie zum Beispiel die Resilient Backpropagation²⁵ oder andere Aktivierungsfunktionen. Die Rectified Linear-Aktivierungsfunktion aus dem Deep Learning-Bereich wäre eine weitere Option. Deep Learning findet bisher nur in der Bilderkennung zur Erkennung von Massenbewegungen mit Satellitendaten eine Anwendung. Trotzdem bleibt es fraglich, ob mit noch weiter fortgeschrittenen Methoden wirklich bessere Ergebnisse erzielt werden können, sollten die eigentlichen Limitationen doch bei der Datenqualität liegen.

Weiteres Verbesserungspotenzial kann in einem geeigneten regelbasierten Pre- und Post-Processing liegen. Flache weite Niederungen oder Böschungen geringer Höhe haben z. B. ein vernachlässigbares Felssturzpotenzial. Dies könnte entweder durch einen Ausschluss dieser Bereiche in einem der Modellierung vorangestellten Pre-Processing oder einer Nachbearbeitung in einem Post-Processing anhand geprüfter und als allgemein gültig anerkannter Regeln erfolgen.

Die Fähigkeit der KNNs, komplexe nichtlineare Probleme zu lösen und große Datenmengen zu verarbeiten sollte verwendet und weiter untersucht werden. Trotz der hier guten Ergebnisse für den Prozess Felssturz in zwei unterschiedlichen geologischen Regionen (Meißner Massiv und Elbsandsteingebirge) wurde z. B. nicht untersucht, wie es sich auswirken würde, wenn unterschiedliche Massenbewegungsprozesse zusammen von einem Modell erkannt werden müssten, wie es bei einem wenig differenzierten Inventar der Fall wäre. Wenn zu viele unterschiedliche geologische Regionen mit unterschiedlichen

²⁵ Ein Algorithmus zur Anpassung der Gewichte in der verborgenen Schicht.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Massenbewegungsprozessen in einem *globalen* Modell untersucht werden, besteht die Gefahr einer unspezifischen Klassifikation durch das Modell.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass KNNs eine leistungsfähige Methode für Empfindlichkeitsanalysen für Felsstürze darstellen. Dies wird deutlich, wenn man berücksichtigt, dass in diesem Modellierungsbeispiel gute Ergebnisse unter der Verwendung von weniger als 1 % des verfügbaren Datensatzes erzielt wurden.

Nichtsdestotrotz wird die Erwartung, dass die Verwendung von KNN eine objektivere Analyse und Erstellung differenzierterer Hangrutschungsempfindlichkeitskarten ermöglicht, noch nicht erfüllt. Dies liegt vor allem an den vielseitigen Möglichkeiten in der Datenaufbereitung und Modellierung, die stark von der Erfahrung des jeweiligen Bearbeiters abhängen.

Der Zeit- und Arbeitsaufwand für die Datenaufbereitung, Datenverarbeitung und das notwendige Verständnis des Modellierungsprozesses für KNNs stehen in keinem Verhältnis zur Verbesserung der Qualität der Ergebnisse der Empfindlichkeitsanalyse. Die Qualität der Karten ist gleichwertig mit anderen weniger zeitaufwändigen Methoden. Es müssen weitere Verbesserungen der räumlichen Diskretisierung erreicht werden, da diese der Schlüssel zur Zielvariablen ist. Die Analyse stellt ein funktionelles Alternativwerkzeug dar, aber die Ergebnisse rechtfertigen nicht den zusätzlichen Aufwand in diesem Modellierungsbeispiel.

2.6.3 Fallstudie 3: Siegtal (Nordrhein-Westfalen)

In der Fallstudie 3 wird an einem Modellierungsbeispiel die Anwendung der Methode des Infiniten Hangmodells (IHM) für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit eines Testgebiets hinsichtlich flacher Rutschungen praktisch geprüft und bewertet (s. Kapitel 2.3.3 und 2.6: Tab. 2-10). Das Testgebiet befindet sich im Rheinischen Schiefergebirge auf den Messtischblättern (GK25) Siegburg (5209) und Eitorf (5210) innerhalb des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (Abb. 2-49; Abb. 2-50; Abb. 2-51).

In den letzten Jahren traten in der Region vermehrt [Starkregenereignisse](#) auf, die Massenbewegungen ausgelöst haben. Die Tab. 2-51 listet eine Auswahl von Meldungen über diese Rutschungsereignisse für den Zeitraum 2002 bis 2018 aus der lokalen Presse auf.

Die Modellierung bzw. die bodenphysikalische Parametrisierung erfolgte unter Nutzung der Bodenübersichtskarte von Deutschland im Maßstab 1 : 200 000 (BÜK200) und deren Sachdatenbank.

Tab. 2-51: Auswahl von Meldungen aus der lokalen Presse über Rutschungsereignisse im Siegtal im Zeitraum 2002 bis 2018 (kein Anspruch auf Vollständigkeit). (Tag des Zugriffs für alle Quellen: 19.05.2020).

Datum der Meldung	Schlagzeile	Quelle
10.06.2018	Auf der Landstraße 333 durch das Siegtal musste nach einem Erdbeben der Streckenabschnitt zwischen Hennef-Stein und Eitorf-Bach gesperrt werden.	Kölnische Rundschau
31.05.2018	Der Feiertag begann friedlich – dann tobte an Sieg und Heller ein heftiges Unwetter; Erdbeben an der Friedrichstraße.	DRK Ortsverein Betzdorf e.V.
22.02.2016	Erdbeben bei Dattenfeld Dreisel.	Windeck24
08.11.2013	Erdbeben zwischen Schladern und Rosbach – Bahnverkehr beeinträchtigt.	Windeck24
29.11.2012	1200 Jutesäcke verbaut; THW sichert nach Erdbeben Hang.	Rhein-Sieg Rundschau
14.02.2011	THW-Einsatz nach Erdbeben am Kellersberg; Hennefer Talstraße nach Erdbeben gesperrt.	General-Anzeiger
19.01.2011	Nach Erdbeben bleibt L 333 drei Wochen dicht.	General-Anzeiger
31.03.2010	L 333 zwischen Hennef und Eitorf Siegtalstraße nach Erdbeben gesperrt.	Kölnische Rundschau
21.02.2009	Räumen einer Straße nach einem Erdbeben in Siegburg durch THW.	Siegburgaktuell
17.10.2007	Erdbeben am Ufer des Mühlengrabens.	Siegburgaktuell
30.08.2002	Nach dem Erdbeben zwischen Hennef-Bülgenauel und Eitorf-Bach wird die Siegtalstraße (L 333) voraussichtlich bis Ende September für den Verkehr gesperrt bleiben.	Kölner Stadtanzeiger

Geologisch-geomorphologischer Überblick

Das Testgebiet umfasst den Mittellauf der Sieg im Rheinischen Schiefergebirge östlich von Bonn. Das Gebiet besitzt Hügel- bis Berglandcharakter mit Höhen zwischen etwa 70 m und 400 m über NN (Abb. 2-49). Entlang der Talflanken der Sieg und in ihren Seitentälern treten Hangneigungen mit bis zu 64° auf.

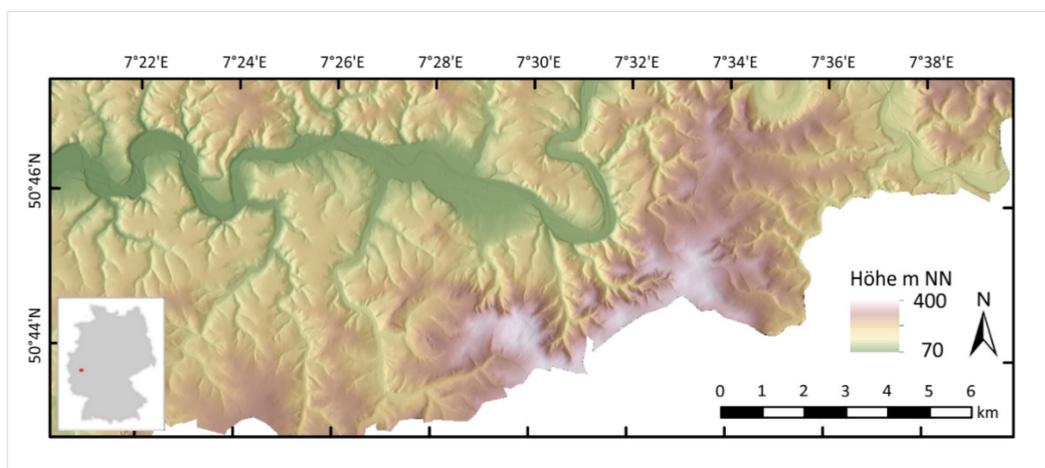


Abb. 2-49: Relief im Testgebiet Siegtal, abgeleitet aus dem DGM10 (Quelle: BKG – s. Tab. 2-9 und Tab. 2-52).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die Festgesteine im Testgebiet bestehen überwiegend aus Wechsellagerungen unterdevonischer Ton- und Schluffsteine mit zwischengeschalteten Sandsteinlagen (Abb. 2-50). Die Hänge werden von periglazialen Lagen, lössbeeinflussten Verwitterungsböden und rezenten Verwitterungsdecken variierender Mächtigkeit überlagert. Tonig-schluffige und sandig-lehmige Böden sind im Testgebiet weit verbreitet (Abb. 2-51).

Verwendete Inventarinformationen und Informationsebenen

Das Rutschungsinventar des GD NRW beinhaltet für das gesamte Bundesland 136 dokumentierte Ereignisse (Stand: 2007). Die unterschiedlichen Massenbewegungstypen sind in der Datenbank nicht durchgehend ausgehalten. Acht der Ereignisse liegen im mittleren Siegtal. Bei den beobachteten Massenbewegungen handelt es sich überwiegend um flache Translationsrutschungen.

Die Detailbodenkarte des Landes Nordrhein-Westfalen (BK50) führt keine Sachdatenbank mit Referenzprofilen. Aus diesem Grund wurde für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit im Testgebiet die Kombination aus DGM10 und BÜK200 das Infinite Hangmodell genutzt (Tab. 2-9, Tab. 2-52, Abb. 2-51).

Ein Modellvergleich, basierend auf einer Modellparametrisierung unter Nutzung von Bodenkarten (mit Sachdatenbanken) verschiedener Maßstäbe, war somit nicht möglich.

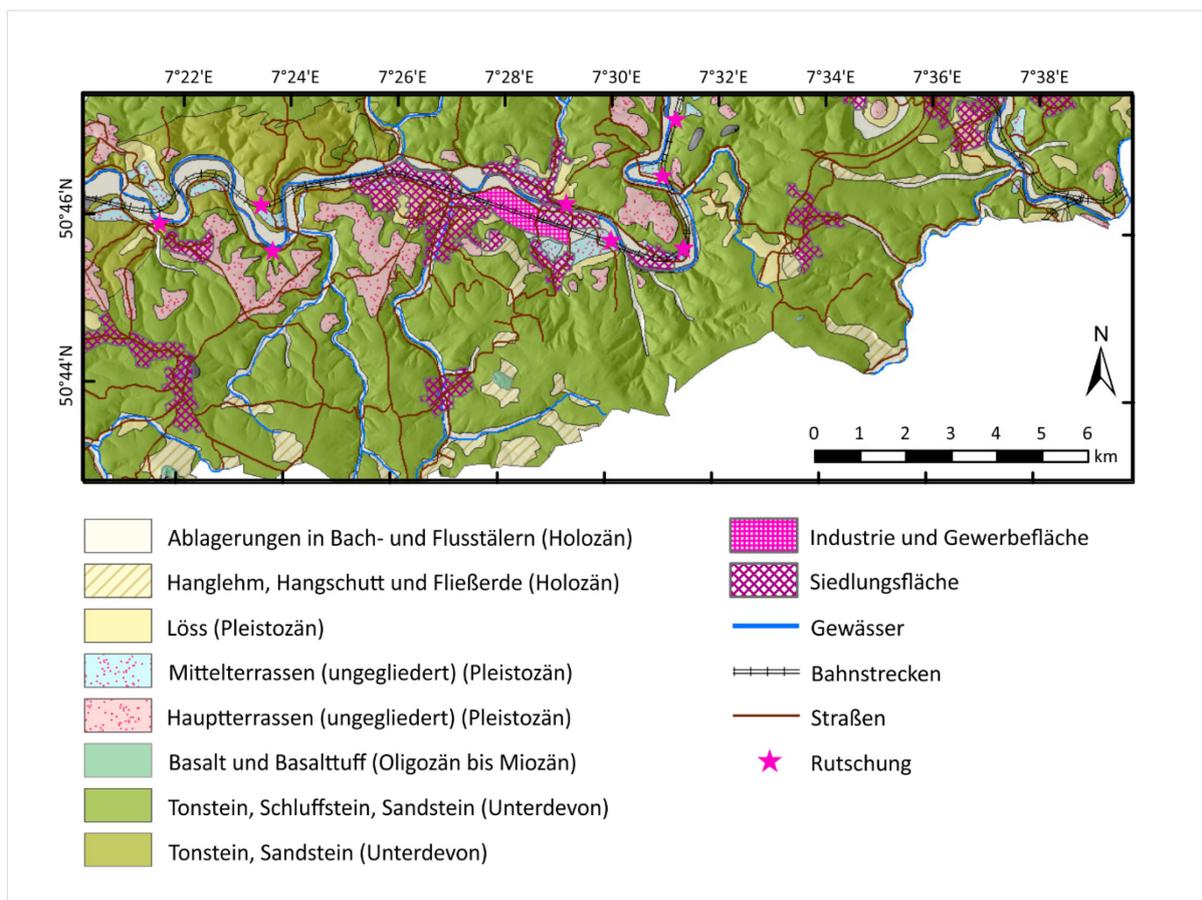


Abb. 2-50: Ausschnitt aus der Geologischen Karte 1 : 100 000 (GK100) Nordrhein-Westfalen im Bereich des Siegtals; Legendeneinheiten wurden unverändert übernommen (Quellen: DLM250 – BKG; GK100 Nordrhein-Westfalen – GD NRW: nur für Darstellungszwecke; Tab. 2-9).

Tab. 2-52: Übersicht über die genutzten Informationsebenen für das Testgebiet Siegtal (Quellen: Tab. 2-9).

Informations-ebene (Abkürzung)	Thema, Maßstab bzw. Auflösung	Parameter/Parameterklasse	Anzahl Klassen
DGM10	Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 10 m x 10 m	Hang10 – Hangneigungsklassen in 1°-Einteilung	64
BÜK200	Bodenübersichtskarte von Deutschland (mit Sachdatenbank), 1 : 200 000	Leit- und Begleitbodenformen (Legendeneinheiten)	17

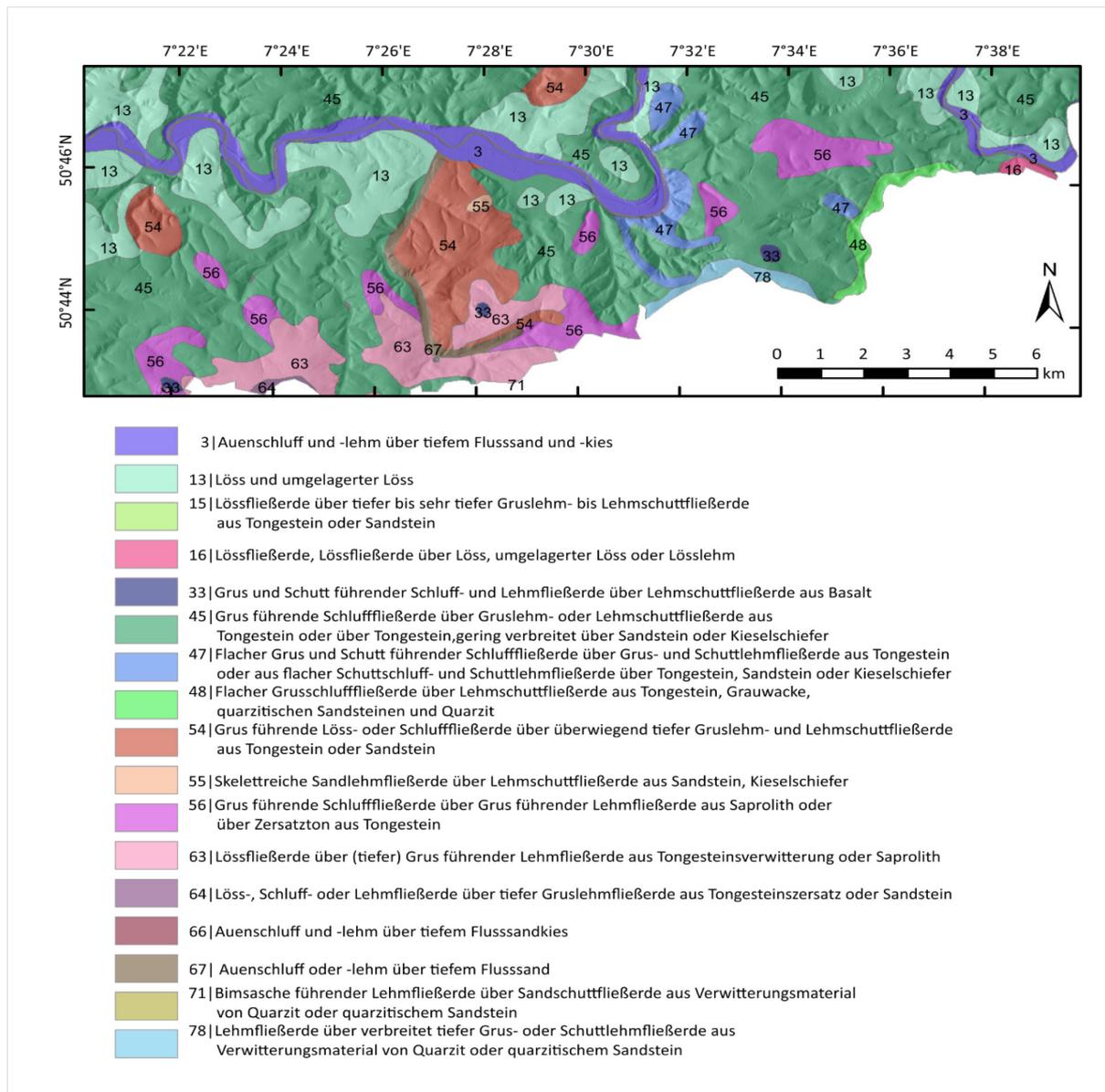


Abb. 2-51: Die dominierenden Substrate der Legendeneinheiten der BÜK200 im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; BÜK200 – BGR; Tab. 2-9 und Tab. 2-52).

2.6.3.1 Modellierungsbeispiel 3.1

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Aufstellung von Verknüpfungsregeln zur Ableitung von regionalen bodenphysikalischen Kennwerten aus der BÜK200 und beispielhafte Modellierung der Empfindlichkeit gegenüber Translationsrutschungen.

Methodische Vorgehensweise

Die grundsätzliche Vorgehensweise in der Modellierung mittels IHM wurde in der Fallstudie 2 – Modellierungsbeispiel 2.3 eingeführt (s. Kapitel 2.3.3 und 2.6.2.3). Analog zu dieser Vorgehensweise wurden im Modellierungsbeispiel 3.1 die bodenphysikalischen Kennwerte auf der Grundlage der BÜK200 abgeleitet.

Die BÜK200 beschreibt die [Bodenformen](#) auf dem Aggregationsniveau der [Leitbodenassoziation](#). Eine Legendeneinheit (LE) kann im Testgebiet bis zu fünf Leit- und Begleitbodenformen mit unterschiedlichen Flächenanteilen beinhalten. Jede dieser Bodenformen ist durch ein Referenzbodenprofil in der Sachdatenbank der BÜK200 hinterlegt. Die Horizontbeschreibungen der Referenzbodenprofile führen in der Sachdatenbank die Information zur Bodenart. Über die Bodenart lassen sich die bodenphysikalischen Kennwerte anhand der Regelwerke ableiten und mit der räumlichen Verteilung der Böden aus der Bodenkarte verknüpfen.

Diese Regelwerkstabellen führen pro Bodenart und [Gefügestufe](#) die Werte der Trockenrohdichte, der Kohäsion und des Winkels der inneren Reibung bei einer Wassersättigung des Bodens bis zur [Feldkapazität](#). Die Abschätzung der Standardabweichung für diese Kennwerte basiert auf der Vielfalt der Gefügestufen in den Bodenarten (s. Kapitel 3.2.2).

Die Bodenart des untersten Horizontes im Unterboden respektive Untergrund, der sich je nach Tiefenlage in 1 m bis 2 m Tiefe befindet, wurde für jede Bodenform mit den physikalischen Parametern und deren geschätzten Standardabweichungen aus den Regelwerkstabellen verknüpft. Die unterschiedliche Verbreitung der Bodenformen in einer Legendeneinheit ist über den Flächenanteil bei der weiteren Mittelwertbildung berücksichtigt. So können pro Legendeneinheit für die bodenphysikalischen Parameter Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung jeweils deren Mittelwerte und Standardabweichungen ermittelt werden (s. Kapitel 3.2.2).

Diese Vorgehensweise kann an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: Im Testgebiet nimmt die LE 45 eine verhältnismäßig große Fläche ein (Abb. 2-51) und wird in der Sachdatenbank durch vier Bodenformen mit einem prozentualen Flächenanteil von 40, 20, 20, 20 beschrieben. Dabei handelt es sich um flach bis tiefgründige Böden, dementsprechend befinden sich die Unterböden bzw. der Untergrund in einer Tiefenlage zwischen 1 m und 2 m. Die vier Bodenformen werden in den tiefsten Horizonten durch die Bodenarten schwach toniger Lehm (Lt2) und sandig-lehmiger Schluff (Uls) beschrieben. Das Flächenanteilverhältnis zwischen den beiden Bodenarten beträgt 60 % zu 40 % (Tab. 2-53).

Die bodenphysikalischen Kennwerte der beiden exemplarisch dargestellten Bodenarten weisen durch die Vielfalt der darin enthaltenen Gefügestufen hohe Standardabweichungen auf. Für die Verteilung der bodenphysikalischen Kennwerte wird angenommen, dass diese einer Normalverteilung folgen, deren Dichtefunktion durch den Mittelwert und die Standardabweichung eindeutig charakterisiert ist.

Die Berechnung des gewichteten Mittelwertes zweier unabhängiger Normalverteilungen wird im Rechnungsbeispiel nachfolgend dargestellt. Für die Trockenrohdichte berechnet sich der gewichtete Mittelwert μ zu:

$$\mu = 1460 \cdot 0,6 + 1530 \cdot 0,4 = 1490.$$

Die Standardabweichung σ berechnet sich zu:

$$\sigma = \sqrt{280^2 \cdot 0,4 + 280^2 \cdot 0,6 + 0,6 \cdot 0,4 \cdot (1530 - 1460)^2} = 282,1.$$

Die Details der Berechnungsgrundlage finden sich in [Kapitel 3.2.2](#).

Tab. 2-53: Modellierungsbeispiel 3.1: Beispiel für die flächengewichtete Übertragung der bodenphysikalischen Parameter in die Legendeneinheit der BÜK200 (σ = Standardabweichung für jeweiligen Parameter) im Testgebiet Siegtal.

Bodenart BÜK200	Flächen- anteil [%]	Trocken- rohdichte [kgm ⁻³]	σ [kgm ⁻³]	Kohäsion [kNm ⁻²]	σ [kNm ⁻²]	Winkel der inneren Reibung [°]	σ [°]
Lt2	60	1460	280,0	21,40	13,50	30,80	5,5
Uls	40	1530	280,0	34,00	16,66	39,33	4,0
LE 45	100	1490	282,1	26,44	16,05	34,21	6,5

Die so gebildeten Werte können je nach Komplexität der Bodenformen und den damit zusammengesetzten Leitbodenassoziationen eine unterschiedlich große Streuung (auch Varianz) aufweisen.

Eine große Streuung für die Werte der abgeleiteten physikalischen Parameter bedeutet auch größere Unsicherheiten für das Modell. Um die Unsicherheiten in den Modellergebnissen besser zu erfassen und zu bewerten, können die Legendeneinheiten (LE) mit besonders großer Streuung mittels des sogenannten F-Wertes kenntlich gemacht werden. Der F-Wert gibt ein Verhältnis zwischen der Streuung der Werte eines physikalischen Parameters (z. B. der Trockenrohdichte) in der betrachteten Legendeneinheit und der flächengewichteten Streuung des gleichen Parameters in allen Legendeneinheiten (Streuung in der Erhebungsgesamtheit) an. Damit charakterisieren F-Werte > 1 die LE, in denen die Streuung des jeweiligen physikalischen Parameters die Streuung dieses Parameters in der Erhebungsgesamtheit überschreitet. Tab. 2-54 gibt einen Überblick der F-Werte für die physikalischen Parameter Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung für jede LE.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-54: Modellierungsbeispiel 3.1: F-Werte für die bodenphysikalischen Parameter der Legeneinheiten der BÜK200 im Testgebiet Siegtal, berechnet auf Grundlage der Parametrisierung der Bodenarten im Unterboden bzw. Untergrund pro Bodenform. Eine Legeneinheit kann durch mehrere Bodenformen beschrieben sein.

Nummer Legeneinheit BÜK200	Substratbeschreibung Legeneinheit BÜK200*	F-Wert für bodenphysikalische Parameter		
		Trocken- rohdichte	Kohäsion	Winkel der inneren Reibung
3	Auenschluff und -lehm über tiefem Flusssand und -kies	1,43	0,60	0,06
13	Löss und umgelagerter Löss	0,00	0,00	0,00
15	Lössfließerde über tiefer bis sehr tiefer Gruslehm- bis Lehmschuttfließerde aus Tongestein oder Sandstein	1,27	0,01	0,57
16	Lössfließerde, Lössfließerde über Löss, umgelagerter Löss oder Lösslehm	1,28	0,04	0,07
33	Grus und Schutt führender Schluff- und Lehmfließerde über Lehmschuttfließerde aus Basalt	0,00	0,00	0,00
45	Grus führende Schlufffließerde über Gruslehm- oder Lehmschuttfließerde aus Tongestein oder über Tongestein, gering verbreitet über Sandstein oder Kieselschiefer	1,29	0,99	0,71
47	Flacher Grus und Schutt führender Schlufffließerde über Grus- und Schuttlehmfließerde aus Tongestein oder aus flacher Schuttschluff- und Schuttlehmfließerde über Tongestein, Sandstein oder Kieselschiefer	0,00	0,00	0,00
48	Flache Grusschlufffließerde über Lehmschuttfließerde aus Tongestein, Grauwacke, quarzitischen Sandsteinen und Quarzit	0,00	0,00	0,00
54	Grus führende Löss- oder Schlufffließerde über überwiegend tiefer Gruslehm- und Lehmschuttfließerde aus Tongestein oder Sandstein	1,28	0,42	0,48
55	Skelettreiche Sandlehmfließerde über Lehmschuttfließerde aus Sandstein, Kieselschiefer	0,00	0,00	0,51
56	Grus führende Schlufffließerde über Grus führender Lehmfließerde aus Saprolith oder über Zersatzton aus Tongestein	1,09	0,17	0,06
63	Lössfließerde über (tiefer) Grus führender Lehmfließerde aus Tongesteinsverwitterung oder Saprolith	0,00	0,00	0,00
64	Löss-, Schluff- oder Lehmfließerde über tiefer Gruslehmfließerde aus Tongesteinszersatz oder Sandstein	1,91	1,00	0,78
66	Auenschluff und -lehm über tiefem Flusssandkies	1,58	0,53	0,27
67	Auenschluff oder -lehm über tiefem Flusssand	1,43	1,10	0,54
71	Bimsasche führender Lehmfließerde über Sandschuttfließerde aus Verwitterungsmaterial von Quarzit oder quarzitischem Sandstein	0,64	0,00	0,02
78	Lehmfließerde über verbreitet tiefer Grus- oder Schuttlehmfließerde aus Verwitterungsmaterial von Quarzit oder quarzitischem Sandstein	1,54	0,00	0,02

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legeneinheiten der BÜK200 übernommen.

Die Unsicherheiten aufgrund der Streuung in den Werten der bodenphysikalischen Parameter wurden im IHM mittels einer Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt. Die Analyse erfolgte analog zum Modellierungsbeispiel 2.3.

Die Hangneigung aus dem DGM10 wurde in 1°-Klassen unterteilt und mit den Legendeneinheiten der BÜK200 verschnitten. Da die meisten flachen Rutschungen im Testgebiet laut Medienberichten nach starken Niederschlägen aufgetreten sind (Tab. 2-51), wurde eine hohe Wassersättigung des Bodens mit dem Feuchtigkeitsindex $m = 0,8 \pm 0,2$ angenommen. Für die Kombination Hang10 + BÜK200 wurde in 1000 Iterationen die IHM-Gleichung gelöst. Dabei wurde der mittlere Standsicherheitsfaktor (SF) sowie die Versagenswahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass der Sicherheitsfaktor $FS \leq 1$ ist, bestimmt.

Die Analyse basiert auf einer Python-Anwendung ([s. oben](#)) und die Validierung des Modells auf Basis der ROC-Kurve.

Ergebnisse und Diskussion

Das Ergebnis der Modellierung mit IHM wird als Versagenswahrscheinlichkeit dargestellt. Die Werte der Versagenswahrscheinlichkeit liegen zwischen 0,00 und 0,68 (Abb. 2-52). Die Validierung mittels der ROC-Kurve auf der Basis von acht kartierten flachen Rutschungen liefert einen AUC-Wert von 0,63. Dieser Wert steht zunächst für ein [schlechtes](#) Modell. Allerdings kann das Validierungsergebnis in Anbetracht der geringen Anzahl und ungenauen Verortung als kaum belastbar angesehen werden.

Eine weitere Möglichkeit der Validierung würde sich aus dem Vergleich mit lokalen geotechnischen Modellen oder anhand einer Karte der installierten geotechnischen Maßnahmen zur Hangsicherung ergeben. Das Modell geht von natürlichen Hangverhältnissen aus. Daher werden auch inzwischen gesicherte Hänge als latent gefährdet eingestuft. Da die erfolgten geotechnischen Maßnahmen meist auf der lokalen Einschätzung der Hangstabilität beruhen, können diese stellvertretend für unsichere Hangbereiche anstelle der Rutschungsereignisse in die Validierung mittels der ROC-Kurve einbezogen werden.

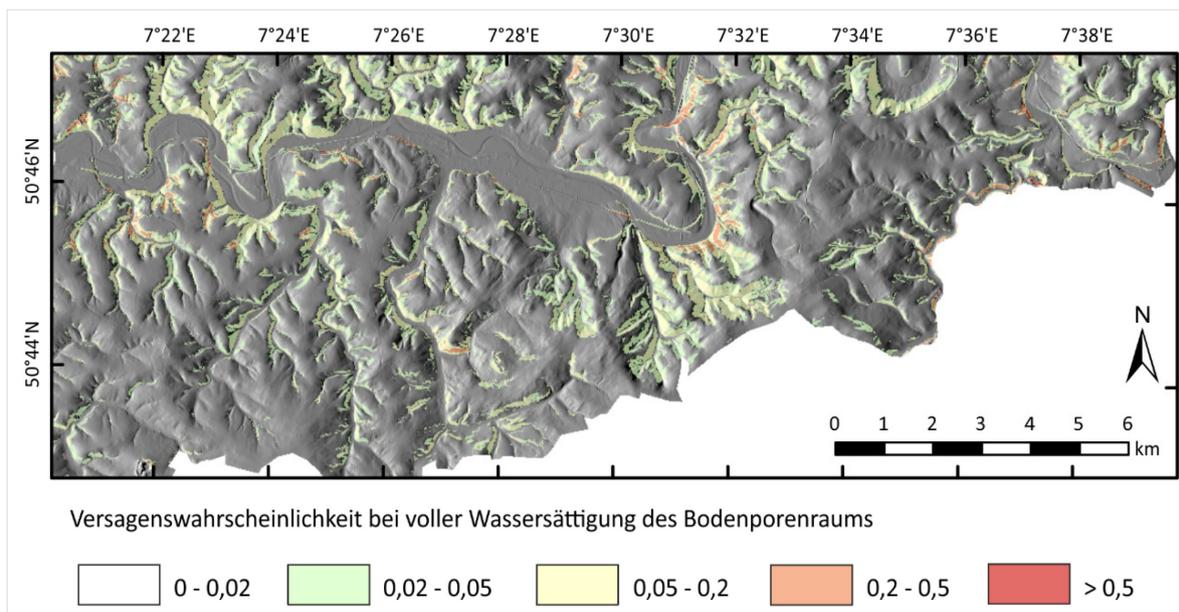


Abb. 2-52: Modellierungsbeispiel 3.1: IHM-Modell der Versagenswahrscheinlichkeiten bei voller Wassersättigung des Bodenporenraums im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Für weitere Betrachtungen der Unsicherheiten im Modellergebnis können die oben eingeführten F-Werte herangezogen werden. Die Unsicherheiten in der Modellparametrisierung im Testgebiet Siegtal entstehen im Wesentlichen durch den Parameter Trockenrohdichte, der in mehr als der Hälfte aller Legendeneinheiten F-Werte > 1 zeigt (Tab. 2-54). Der Parameter Kohäsion besitzt ausschließlich in der LE 67, mit Böden auf Auensedimenten, eine Streuung, die die Streuung in der Erhebungsgesamtheit übersteigt.

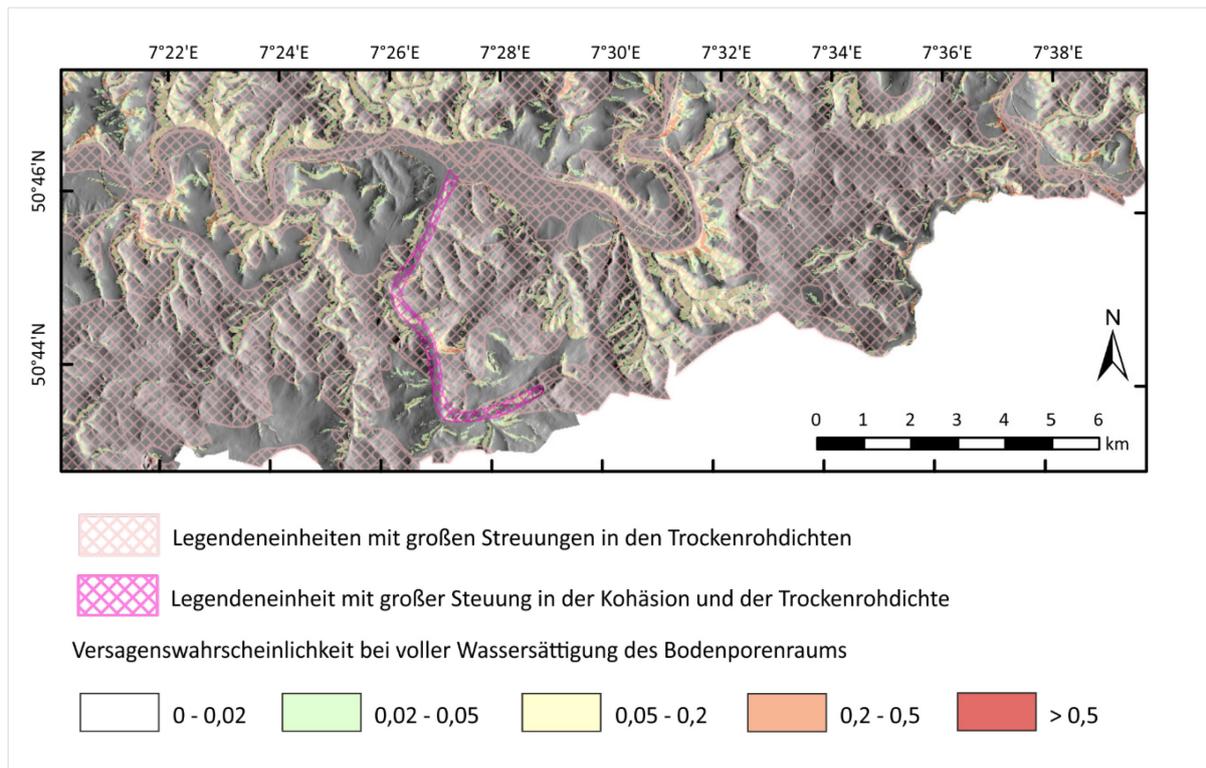


Abb. 2-53: Modellierungsbeispiel 3.1: Gruppen der Legendeneinheiten mit ausgeprägten Streuungen durch die Parametrisierung (F-Werte > 1) im Testgebiet Siegtal (Quelle: DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

Das Infinite Hangmodell ist besonders sensitiv für Modifizierungen in den Parametern Kohäsion und Hangneigung (Fuchs et al., 2014). Änderungen anderer Eingangsparameter wie Wassersättigung, Trockenrohdichte und Winkel der inneren Reibung haben einen geringeren Einfluss auf die Modellierungsergebnisse. Im Testgebiet Siegtal sind aus diesem Grund die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten vor allem innerhalb der LE 67 mit höheren Unsicherheiten behaftet (Abb. 2-53).

2.6.4 Fallstudie 4: Simbach (Bayern)

Der Ort Simbach am Inn liegt im Landkreis Rottal-Inn (Bayern) an der Grenze zu Österreich (Abb. 2-55). Simbach erlangte aufgrund eines [Starkregenereignisses](#) am 1. Juni 2016 eine besondere Aufmerksamkeit. Nach Regenmengen bis über 175 Liter/m² in wenigen Stunden trat der Simbach über die Ufer (Normalpegel bei 50 cm, am 01.06.2016 Maximalpegel bei 506 cm; Quelle [Wikipedia](#): Tag des Zugriffs: 06.09.2020).

Eine Chronologie des Hochwassers ist in [Hübl et al. \(2017\)](#) dokumentiert. Laut LfU Bayern hat das Starkregenereignis zahlreiche [Hanganbrüche](#) ausgelöst. Die Situation vor und nach dem Starkregenereignis kann beispielhaft für einzelne Hanganbrüche über frei verfügbare, hochaufgelöste Luftbilddaufnahmen von Google Earth nachvollzogen werden (Abb. 2-54a-c).



Abb. 2-54: Luftbildaufnahmen im Zusammenhang mit dem Starkregenereignis vom 01.06.2016 westlich der Ortschaft Simbach: a) Situation ein Jahr vor dem Starkregenereignis; b) ein Monat nach dem Starkregenereignis; c) 3D-Ansicht des Hanges mit einem Hanganbruch ein Monat nach dem Starkregenereignis (Quelle: Google Earth, Tag des Zugriffs: 04.05.2020). (s. [Deckblatt](#), [linkes Foto](#)).

Unter dem Eindruck des Starkregenereignisses vom 01.06.2016 und der dadurch ausgelösten Hanganbrüche fokussiert die Fallstudie 4 im Testgebiet Simbach auf zwei fachliche Sachverhalte:

- **Modellierungsbeispiel 4.1** (s. [Kapitel 2.6.4.1](#)): Der Schwerpunkt liegt auf der Parametrisierung des Infiniten Hangmodells (IHM) unter Nutzung von Bodenkarten bzw. bodenkundlichen Sachdatenbanken unterschiedlicher Maßstäbe und auf dem Vergleich der Modellergebnisse;
- **Modellierungsbeispiel 4.2** (s. [Kapitel 2.6.4.2](#)): Am Beispiel *eines* Massenbewegungstyps in *einem* Testgebiet werden das Infinite Hangmodell, die Methode der Gewichteten Evidenzen, die Logistische Regression und ein Künstliches Neuronales Netz zur Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit erprobt und die Modellergebnisse komparativ bewertet (s. [Kapitel 2.3](#)).

Das Fallbeispiel 4 könnte als Referenz für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit von flachen Hanganbrüchen in Deutschland, ausgelöst durch Starkregenereignisse als eine [postulierte Folge des Klimawandels](#), angesehen werden.

Geologisch-geomorphologischer Überblick

Das Testgebiet hat eine Ausdehnung von 12 km x 8 km und befindet sich im bayerischen Molassebecken (Abb. 2-55). Es zeichnet sich durch einen Hügelcharakter mit Höhen zwischen 300 m über NHN und 550 m über NHN sowie Hangneigungen zwischen 0° und 56° im DGM10 aus.

Der geologische Untergrund ist durch jungtertiäre und quartäre Ablagerungen bestimmt. Typische Ablagerungen des Miozäns sind marinen, brackisch-fluviatilen und limnischen Ursprungs. Jüngere holozäne Umlagerungsbildungen sind charakteristisch. Die Sedimente sind, mit Ausnahme der Nagelfluh, nicht bis gering verfestigt.

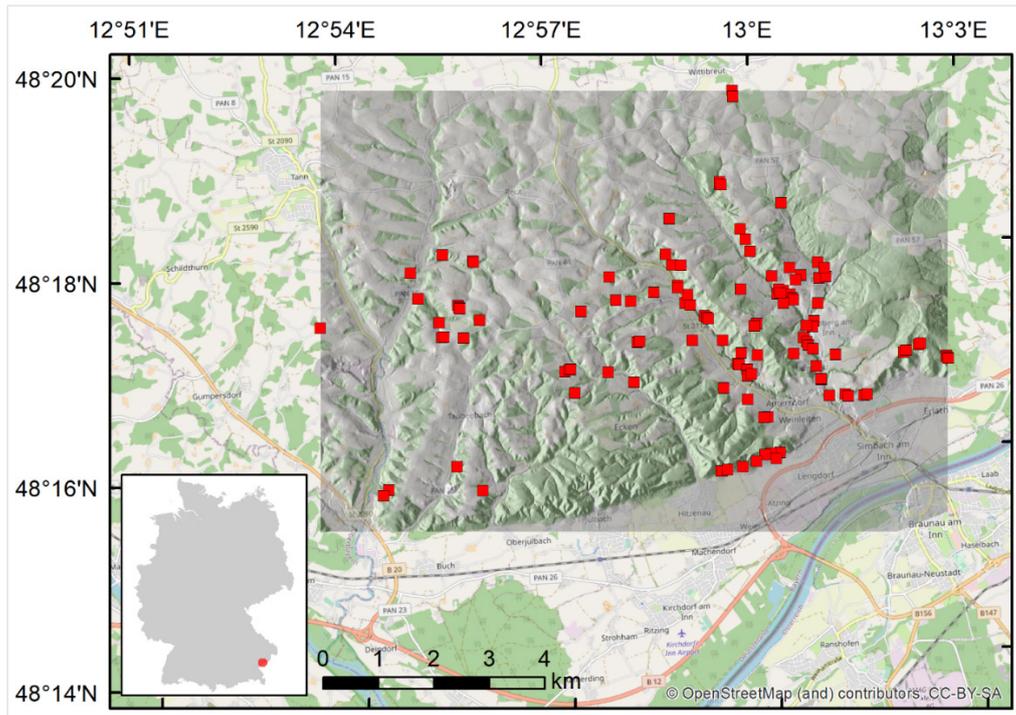


Abb. 2-55: Topographischer Kartenausschnitt des Testgebiets Simbach im Freistaat Bayern an der Grenze zu Österreich, überlagert mit dem Schummerungsmodell des DGM10 sowie Darstellung der kartierten Hanganbrüche (Quellen: Inventar Hanganbrüche = rote Quadrate – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Topographie – OpenStreetMap contributors CC-BY-SA; Tab. 2-9).

Verwendete Inventarinformationen und Informationsebenen

Durch die Auswertung von Luftbildern vom 6. Juli 2016 konnten durch das LfU Bayern 121 [Hanganbrüche](#) kartiert werden (Abb. 2-55 und Abb. 2-56). Die kartierten Ereignisse wurden in Form von Punktdaten in einem Ereignisinventar zusammengeführt.

Die Auswahl der Informationsebenen berücksichtigt die Erfahrungen aus den Modellierungsbeispielen 1.1 bis 1.6 der Fallstudie 1 (s. [Kapitel 2.6.1](#)), den Modellierungsbeispielen 2.1 bis 2.5 der Fallstudie 2 (s. [Kapitel 2.6.2](#)) und aus dem Modellierungsbeispiel 3.1 der Fallstudie 3 (s. [Kapitel 2.6.3](#)).

Um die Vergleichbarkeit der innerhalb des Modellierungsbeispiels 4.2 angewandten Methoden zu gewährleisten, wurden nur die Informationsebenen integriert, die in allen Modellierungsmethoden zur Ableitung der Parameter und Parameterklassen einen Beitrag leisten können.

Daraus resultiert ein Verzicht auf die GÜK250, da diese Informationsebene nicht in der IHM-Analyse berücksichtigt werden kann. Auch die Ergebnisse der Modellierungsbeispiele aus den Fallstudien 1 bis 3 belegen, dass für die hier zur Diskussion stehenden Hanganbrüche die GÜK250 nur bedingt genutzt werden kann. Dies resultiert aus dem Umstand, dass die geringmächtigen Schutt- und Lockersedimente

teilweise nicht dargestellt sind. Aus diesem Grund wurde die Verwertung kongruenter bodenkundlicher Informationsebenen in unterschiedlichen Maßstäben forciert. Diese können sowohl in der physikalischen Modellierung mit der IHM-Methodik als auch in den statistischen Verfahren genutzt werden. Die relevanten Informationsebenen und Parameter sind in Tab. 2-55 erfasst. Die räumliche Verteilung der Parameterklassen ist in den Abb. 2-56, Abb. 2-57 und Abb. 2-58 visualisiert.

Tab. 2-55: Übersicht über die genutzten Informationsebenen für das Testgebiet Simbach (Quellen: Tab. 2-9).

<i>Informationsebene (Abkürzung)</i>	<i>Thema</i>	<i>Parameter/ Parameterklasse</i>	<i>Anzahl Klassen</i>
<i>DGM10</i>	Digitales Geländemodell von Deutschland, Gitterweite 10 m x 10 m	Hang10 – Hangneigungsklassen in 5°-Einteilung	12
		Hang10 – Hangneigungsklassen in 1°-Einteilung	56
<i>UeBK25</i>	Übersichtsbodenkarte von Bayern (mit Sachdatenbank), 1 : 25 000	Bodenform (Legendeneinheiten)	24
<i>BÜK200</i>	Bodenübersichtskarte von Deutschland (mit Sachdatenbank), 1 : 200 000	Leitbodengesellschaft (Legendeneinheiten)	14

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

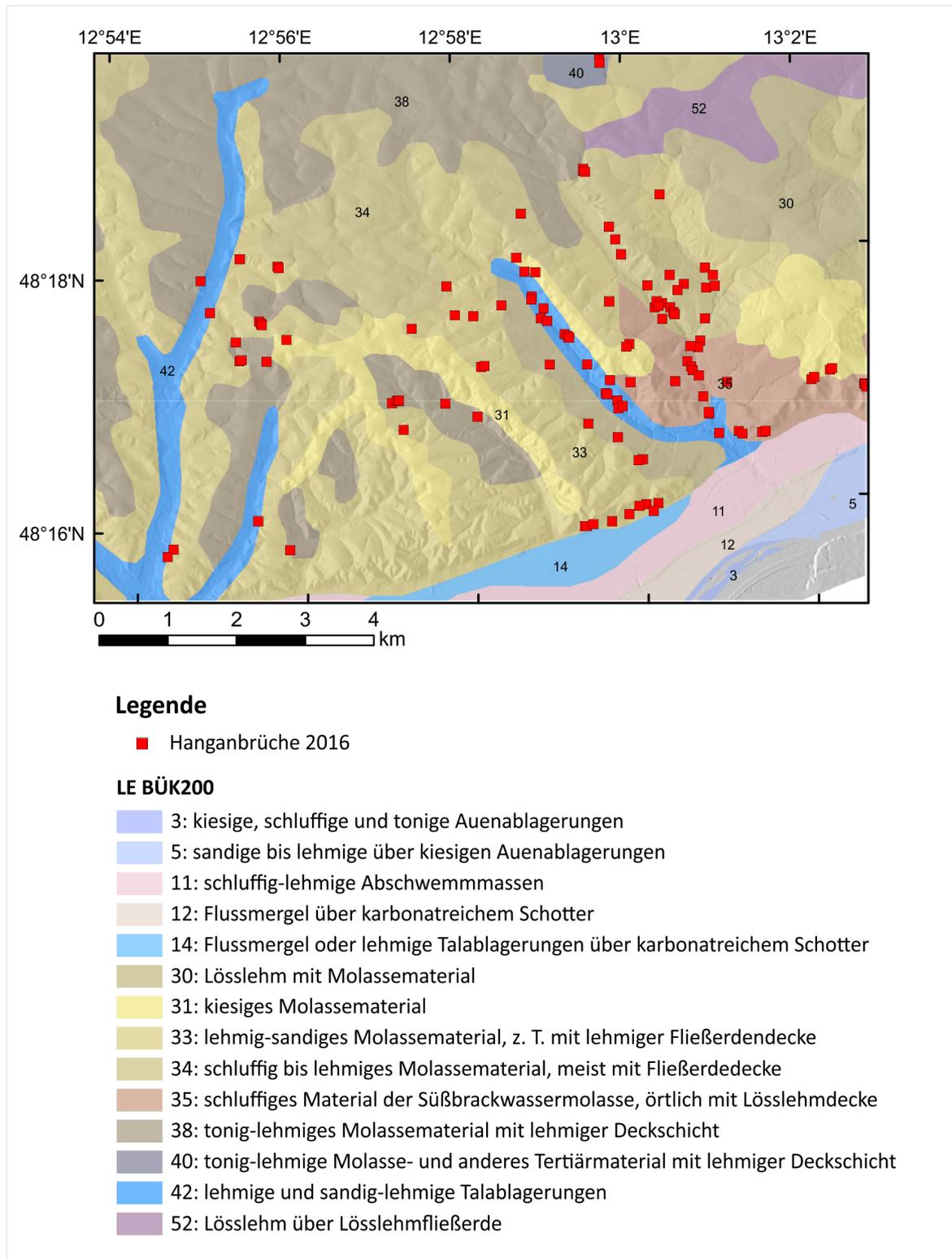


Abb. 2-56: Darstellung der dominierenden Substrate der Leitbodenformen gemäß Legendeneinheiten (LE) der BÜK200 (Parameter) im Testgebiet Simbach, überlagert durch die kartierten Hanganbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern; BÜK200 – BGR; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

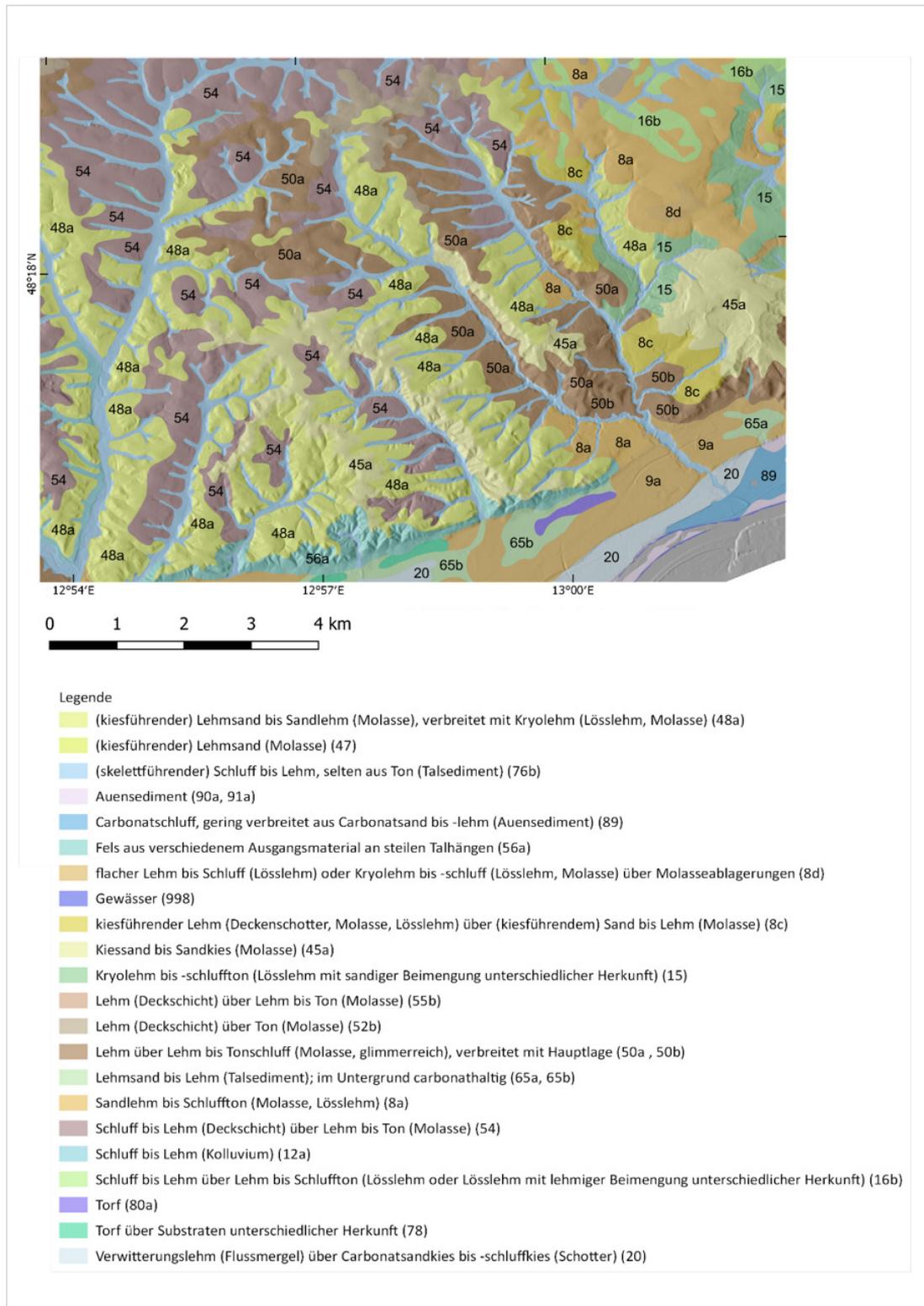


Abb. 2-57: Substrate der Bodenformen gemäß Legendeneinheiten der UeBK25 (Parameter) im Testgebiet Simbach (Quellen: UeBK25 – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

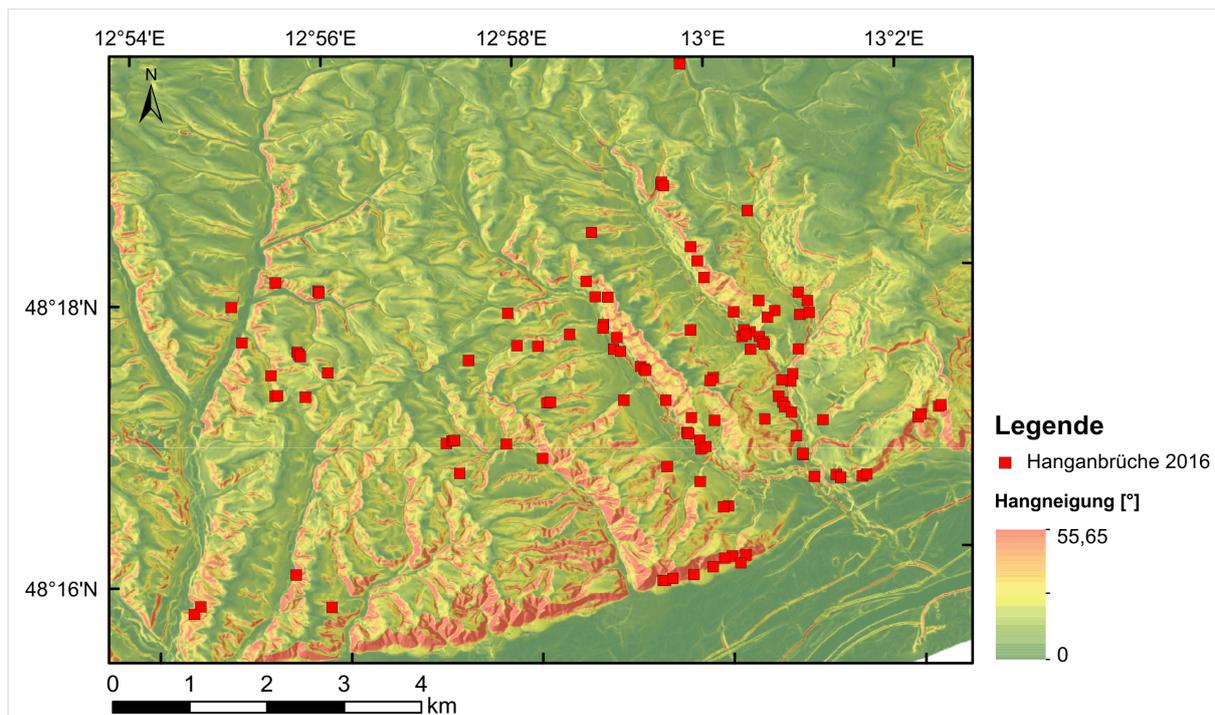


Abb. 2-58: Darstellung der Hangneigung im Testgebiet Simbach auf Basis des DGM10, überlagert durch die kartierten Hanganbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern; DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

2.6.4.1 Modellierungsbeispiel 4.1

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Prüfung der Möglichkeit zur Anwendung eines physikalisch-basierten Verfahrens für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Nutzung von Bodenkarten mit unterschiedlichen Maßstäben (UeBK25; BÜK200) am Beispiel der Methode des Infiniten Hangmodells, einschließlich des Vergleichs der Modellierungsergebnisse.

Die Methodik des Infiniten Hangmodells wurde in den Modellierungsbeispielen 2.3 im Testgebiet Elbtalgraben (s. Kapitel 2.6.2.3) und 3.1 im Testgebiet Siegtal (s. Kapitel 2.6.3.1) eingeführt. In diesen beiden Testgebieten stand jeweils nur eine Bodenkarte mit zugehöriger Sachdatenbank für die Analyse zur Verfügung.

Für das Testgebiet Simbach existieren diese Informationen sowohl im Maßstab 1 : 25 000 (UeBK von Bayern) als auch im Maßstab 1 : 200 000 (BÜK von Deutschland) (Tab. 2-9 und Tab. 2-55). Es galt zu prüfen, inwieweit sich durch die Parametrisierung über die Sachdatenbanken beider Bodenkarten die [Güte](#) der erstellten Modelle verändert ([Fuchs & Glaser, 2019](#)).

Methodische Vorgehensweise

Die Grundlage für die Ableitung der bodenphysikalischen Kennwerte bilden die Regelwerke aus der Methodendokumentation Bodenkunde ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2000](#)). Eine digitale Version dieser Regelwerke bietet das [MethodenWiki Bodenkunde](#) (Tag des Zugriffs: 09.09.2020).

In der Sachdatenbank der UeBK25 wird jede Legendeneinheit durch eine Anzahl an Referenzbodenprofilen charakterisiert. Das Maximum liegt bei vier Bodenformen in einer Legendeneinheit. Die bodenphysikalischen Parameter (Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung) werden für jede der 24 Legendeneinheiten der UeBK25 im Testgebiet mit dem Flächenanteil der Bodenform gewichtet.

In der generalisierten BÜK200 können einer Legendeneinheit bis zu sieben Referenzbodenprofile mit jeweiligem Flächenanteil für die Leit- und Begleitbodenformen zugeordnet werden. Abgeleitete bodenphysikalische Parameter aus mehreren Referenzbodenprofilen werden mit dem Flächenanteil der Bodenform gewichtet zu einem Mittelwert zusammengeführt. Damit ergibt sich für die BÜK200 nicht nur eine generalisierte Abgrenzung der Bodenformen im Kartenbild (14 gegenüber 24 der UeBK25), sondern auch eine größere Unsicherheit (Streuung) für die bodenphysikalischen Parameter.

Die Bodenhorizontbeschreibungen der Referenzprofile führen in der Sachdatenbank als Feld die Information zu den Bodenarten. Über die Bodenart lassen sich die bodenphysikalischen Kennwerte anhand der Regelwerke ableiten und mit der räumlichen Verteilung der Böden aus der Bodenkarte verknüpfen. Die Regelwerttabellen listen pro Bodenart und [Gefügestufe](#) die Werte der Trockenrohdichte, der Kohäsion und des Winkels der inneren Reibung unter der Annahme der Sättigung des Bodens bis zur [Feldkapazität](#), die durch Wasserspannungskurven von pF 1,8 bis pF 2,5 gekennzeichnet sind, auf ([MethodenWiki Bodenkunde](#), Tag des Zugriffs: 25.09.2020).

Die Abschätzung der Standardabweichung für diese Kennwerte basiert auf der Vielfalt der Gefügestufen in den Bodenarten (s. [Kapitel 3.2.2](#)). Die Abb. 2-59 zeigt anhand von sogenannten Box-Plots²⁶ die Verteilung der Kohäsionswerte für die Bodenarten im Testgebiet. Ein Box-Plot charakterisiert die Verteilung der Werte dergestalt, dass die Kastenform durch ihre obere und untere Begrenzung die Wertespanne angibt, in der 50 % aller Werte liegen. Die sogenannten *Whisker* oder Antennen (gestrichelte Linien) umspannen den Bereich, in dem 97 % aller Werte liegen. Die Punkte oberhalb oder unterhalb der Antennenbegrenzung zeigen die Ausreißer-Werte. Damit wird verdeutlicht, dass speziell die Bodenformen sandig-lehmiger Schluff (Uls), mittel toniger Lehm (Lt3) oder schluffiger Lehm (Lu), je nach Mischverhältnis der bodenbildenden Komponenten, eine besonders große Streuung der Kohäsionswerte aufweisen.

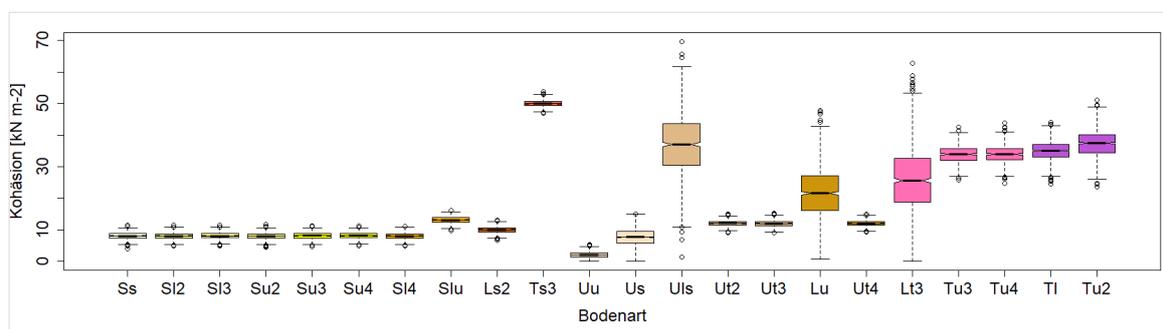


Abb. 2-59: Modellierungsbeispiel 4.1: Box-Plots für die abgeleitete Kohäsion sowie deren Standardabweichung für alle im Testgebiet auftretenden Bodenarten gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005](#)).

²⁶ Der Box-Plot (auch Box-Whisker-Plot oder deutsch Kastengrafik) ist ein Diagramm, das zur graphischen Darstellung der Verteilung eines mindestens ordinalskalierten Merkmals verwendet wird. Es fasst dabei verschiedene robuste Streuungs- und Lagemaße in einer Darstellung zusammen (Quelle: [Wikipedia](#), Tag des Zugriffs: 07.09.2020).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Die abgeleiteten bodenphysikalischen Parameter sind als Mittelwert (mit Standardabweichung) mit der räumlichen Verteilung der Bodenformen über die zugehörige Bodenkarte verknüpft.

Die Hangneigung ist in 1°-Klassen unterteilt und mit der jeweiligen Bodenkarte verschnitten. Durch die Verschneidung entstehen eindeutige Kombinationen zwischen einer bestimmten Bodenform und einer Hangneigungsklasse, die durch die bodenphysikalischen Parameter der Bodenform charakterisiert werden.

Ausgehend von der Wetterlage im Mai bis Anfang Juni 2016 mit Dauerregen und dem anschließenden Starkregenereignis wurde eine sehr starke Wassersättigung des Bodens über die Feldkapazität hinaus unterstellt. Da das Modell nicht an ein Infiltrationsmodell gekoppelt ist, konnte für den Wassergehalt ein regionaler Wert von $m = 0,8 \pm 0,2$ angesetzt werden.

Die anschließende Analyse erfolgte mit einer Python-Anwendung ([s. oben](#)). In einer [Monte-Carlo-Simulation](#) wurden anhand von 1000 Iterationen für jede Kombination der Standsicherheitsfaktor (SF) und die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt. Die Analyse wurde gleichermaßen für das Modell Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25 durchgeführt. Beide Modelle wurden anschließend unter der Berücksichtigung kartierter Ereignisse mittels der ROC-Kurve evaluiert und visuell verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Analysen belegen, dass die Wertespanne der Versagenswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit, dass der Standsicherheitsfaktor ≤ 1 ist) für die beiden Modelle Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25 vergleichbar sind (Tab. 2-56). Die AUC-Werte liegen für beide Modelle an der Bewertungsgrenze zwischen einem [mäßigen und einem guten Modell](#).

Das Modell mit der detaillierteren UeBK25 zeigt mit einem AUC-Wert von 0,81 eine geringfügig bessere Erklärung für die räumliche Verteilung der beobachteten Hanganbrüche. Im Detail zeichnen sich die ROC-Kurven zunächst durch einen sehr ähnlichen Verlauf aus (Abb. 2-60). Bei einem Wert von 0,7 bei der [Richtig Positiv Rate](#) flacht die Kurve für das Modell mit der BÜK200 deutlich ab. Die Kurve für das Modell mit der UeBK25 steigt bis zu einem Wert von 0,8 an, bevor sie einen ähnlich flachen Verlauf annimmt.

Tab. 2-56: Modellierungsbeispiel 4.1: Übersicht über die Wertespannen der Versagenswahrscheinlichkeit und AUC-Werte für die Modelle Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25.

Modell	Wertespanne Versagenswahrscheinlichkeit	AUC-Wert
Hang10 + BÜK200	0,0 bis 0,76	0,79
Hang10 + UeBK25	0,0 bis 0,72	0,81

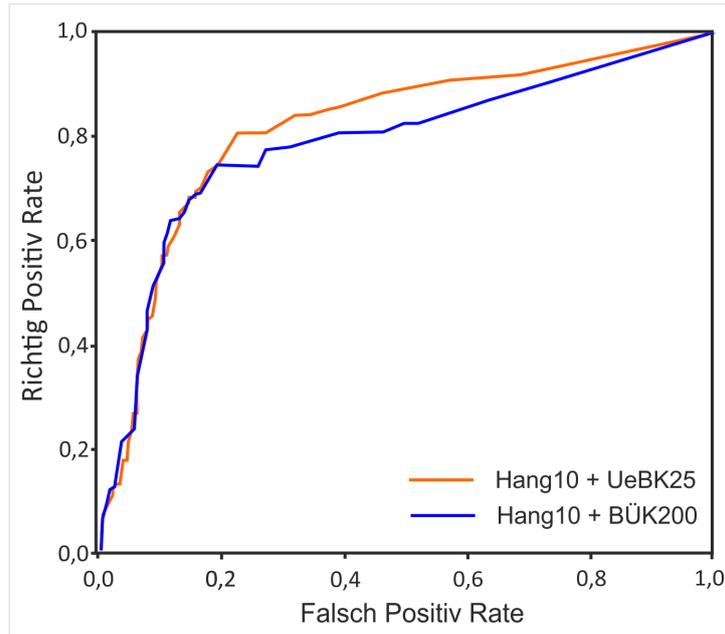


Abb. 2-60: Modellierungsbeispiel 4.1: ROC-Kurven im Ergebnis der Modellierung mit dem Infiniten Hangmodell in den Varianten Hang10 + BÜK200 (blaue Kurve) und Hang10 + UeBK25 (orange Kurve).

Die Versagenswahrscheinlichkeitsmuster beider Modelle sind in der Abb. 2-61 (a und b) gegenübergestellt.

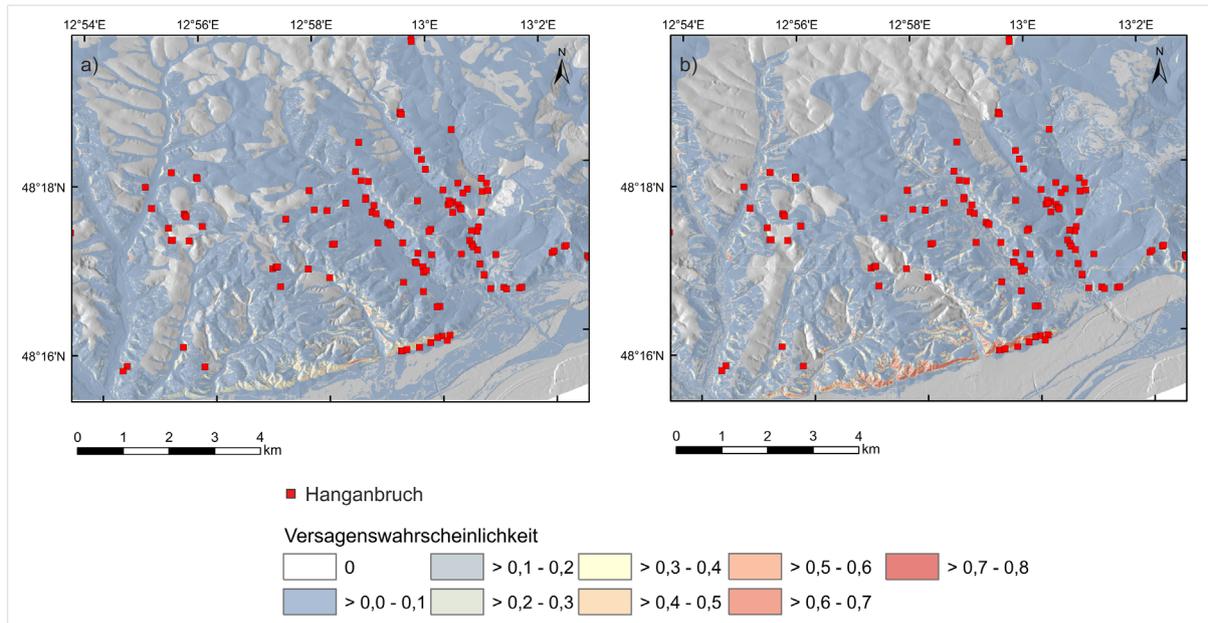


Abb. 2-61: Modellierungsbeispiel 4.1: Räumliche Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Modellvarianten: a) Modell Hang10 + UeBK25 und b) Modell Hang10 + BÜK200, jeweils überlagert durch die kartierten Hanganbrüche (= rote Quadrate) (Quellen: Inventar Hanganbrüche – LfU Bayern, DGM10 – BKG; Tab. 2-9).

Die Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeitswerte > 0 bietet einen Interpretationsspielraum. Ein Wert > 0 bedeutet, dass, im Rahmen der angesetzten Werteverteilungen für bodenphysikalische Parameter, ein Versagen grundsätzlich eintreten kann.

Eine Versagenswahrscheinlichkeit von null deutet hingegen darauf hin, dass in den 1000 Iterationen der Monte-Carlo-Simulation, unter den angenommenen Unsicherheiten, keine Instabilität modelliert

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

werden konnte. In diesen vermeintlich sicheren Bereichen können für das Modell mit der UeBK25 noch neun Hanganbrüche verortet werden. Für das Modell mit der BÜK200 sind es dagegen 21.

Problematisch erscheint bei dem verwendeten Modellierungsalgorithmus, dass die Kohäsion als wesentlicher stabilisierender Faktor in die Berechnung mit eingeht. Dies hat zur Folge, dass Bereiche mit Tonböden kaum anfällig erscheinen. Die Erfahrung (hier: LfU Bayern) und auch ein Vergleich mit dem Inventar zeigen hingegen, dass auch im Bereich von Tonböden viele Ereignisse vorkommen. Im Ereignisfall führt die Kohäsion dazu, dass sich der Zwischenabfluss unterhalb der Bodenzone im Hang aufstaut und den Porenwasserdruck dadurch stark erhöht. Immer wieder wird dann von regelrechten *Hangexplosionen* berichtet. Eine diesbezügliche Anpassung des Algorithmus könnte eine Verbesserung des Modellierungsergebnisses erbringen.

In der Abb. 2-61 ist auch zu erkennen, dass im Modell mit der BÜK200 deutlich größere Flächen mit hohen Versagenswahrscheinlichkeiten belegt werden. Diese Hotspots weisen jedoch nicht zwangsläufig eine größere Anzahl an beobachteten Ereignissen auf. Schwierig bei der Evaluierung der Modellergebnisse ist allerdings, dass das Versagen der Hänge im Fall von Hanganbrüchen nicht nur mit Hangneigung und örtlichen Untergrundparametern (z. B. Durchwurzelung) zusammenhängt, sondern auch mit der Verteilung der Niederschläge während des Schadereignisses. Es ist bekannt, dass die Niederschlagssummen bei dem Ereignis auf engem Raum sehr stark variiert haben, eine exakte Verteilung kann aber nicht angegeben werden.

Generell zeichnet sich ab, dass neben der höheren räumlichen Auflösung der Legendeneinheiten (LE) der UeBK25 (24 LE) gegenüber der BÜK200 (14 LE) auch die umfassendere Beschreibung der UeBK25 offensichtlich zur Modellverbesserung beiträgt.

Durch das [LfU Bayern](#) (Tag des Zugriffs: 09.09.2020) wurden für die Alpen-Landkreise [Gefahrenhinweiskarten](#) zum Thema Hanganbruch unter Verwendung der Methode des Infiniten Hangmodells erarbeitet. Im Gegensatz zum vorgestellten Ansatz wird die Geologische Karte 1 : 25 000 (GK25) genutzt, um bodenphysikalische Parameter abzuleiten. Für das Gebiet Simbach liegt jedoch noch keine regionale Gefahrenhinweiskarte des LfU Bayern vor. Ziel sollte es sein, die Streuung der physikalischen Größen bei der Parametrisierung zu minimieren. Niederschlagsszenarien könnten einbezogen und kritische Niederschlagshöhen bestimmt werden, um die lokalen Sättigungen der Böden differenzierter in der Modellierung zu berücksichtigen. Das Infinite Hangmodell, das ursprünglich für den großmaßstäblichen Bereich konzipiert war, könnte mit belastbarer Parametrisierung auf die regionale Analyse ausgeweitet werden.

2.6.4.2 Modellierungsbeispiel 4.2

Ziel- und Fragestellung (Tab. 2-10):

Qualitativer Vergleich von Methoden zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit mit dem Infiniten Hangmodell, der Methode der Gewichteten Evidenzen, der Logistischen Regression und einem Künstlichen Neuronales Netz in einem Testgebiet.

Im Testgebiet Simbach sind die Methoden Infinites Hangmodell (IHM), Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE), Künstliche Neuronale Netze (KNN) und zusätzlich die Logistische Regression (LR)

zur Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber Hanganbrüchen getestet und die Modellergebnisse im Hinblick auf praxisnahe Empfehlungen komparativ bewertet worden (s. Kapitel 3).

Für die Verfahren Logistische Regression und Künstliche Neuronale Netze wurden zusätzlich die Datenauswahl für das Vorhersagemodell und die Interpretierbarkeit des Einflusses der Parameter auf das Modell untersucht.

Methodische Vorgehensweise

In den Fallstudien 1 bis 3 bzw. in den korrespondierenden Modellierungsbeispielen sind einzelne Schritte der methodischen Vorgehensweisen bereits diskutiert worden (s. Kapitel 2.6.1, 2.6.2 und 2.6.3). Nachfolgend wird daher nur ein kurzer Abriss zur methodischen Vorgehensweise beim Einsatz einzelner Methoden gegeben.

Das Rutschungsinventar wurde in Trainings- und Testinventar im Verhältnis 80 % : 20 % randomisiert aufgeteilt. Für alle Methoden, die für die Erstellung des Modells Beobachtungsdaten benötigen, wurde das identische Trainingsinventar genutzt.

Eine IHM-basierte Modellierung wurde bereits im Modellierungsbeispiel 4.1 realisiert (s. Kapitel 2.6.4.1) und die Ergebnisse direkt in diesen Methodenvergleich einbezogen.

Die bivariate statistische Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) analysiert den Zusammenhang der einzelnen Parameter mit der räumlichen Verteilung der Hanganbrüche. Die gewichteten Parameter werden zu einem Modell überlagert (s. Kapitel 2.3.1). Die Methodik wurde analog zum Modellierungsbeispiel 1.1 (s. Kapitel 2.6.1.1) umgesetzt. Dies schließt folgende Schritte ein:

- Unterteilung der Hangneigung in 5°-Klassen;
- Direkte Einbindung der diskreten Informationsebenen UeBK25 und BÜK200 als Parameter in die Analyse.

Die Bestimmung der statistischen Gewichte resultiert aus einer wiederholten Stichprobe (100 Iterationen) im Umfang von 80 % des Trainingsdatensatzes. Die Analyse erfolgte unter Nutzung der BGR-Software *Landslide Susceptibility Assessment Tool (LSAT) Project Manager Suite* (Torizin, 2012).

Für die Methoden Logistische Regression (s. Kapitel 2.3.2) und Künstliches Neuronales Netz (s. Kapitel 2.3.5) geht der Parameter Hangneigung als kontinuierliche (stetige) Variable, ohne Untergliederung in diskrete Klassen, in die Analyse ein. Die Werte der Hangneigung wurden auf einen Wertebereich zwischen 0 und 1 skaliert.

Die Zerlegung der nominalen diskreten Parameter UeBK25 und BÜK200 in binäre Variablen ist eine weitere notwendige Voraussetzung. Die Anzahl dieser Variablen entspricht der Anzahl der Parameterklassen des jeweiligen Parameters. Zusätzlich muss für die beiden Methoden ein Trainingsdatensatz vorbereitet werden, der neben der Stichprobe von Rutschungsereignissen auch eine Stichprobe aus den Bereichen beinhaltet, die keine Rutschungsereignisse aufweisen.

Für den Einsatz von KNN wurde eine dreischichtige Netzstruktur bestehend aus einer Eingabe- und einer Ausgabeschicht sowie einer versteckten Schicht genutzt (s. Modellierungsbeispiel 2.4 in Kapitel 2.6.2.4). Die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht entspricht der Anzahl der Parameterklassen n . Für die versteckte Schicht wurden $n-1$ Neuronen eingesetzt (Abb. 2-62) und ein sogenanntes Bias-Neuron, das keine Verbindung zur Eingabeschicht aufweist (in der Abb. 2-62 mit +1 gekennzeichnet).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Als Aktivierungsfunktion für die Neuronen in der verborgenen Schicht wurde die logistische Funktion verwendet.

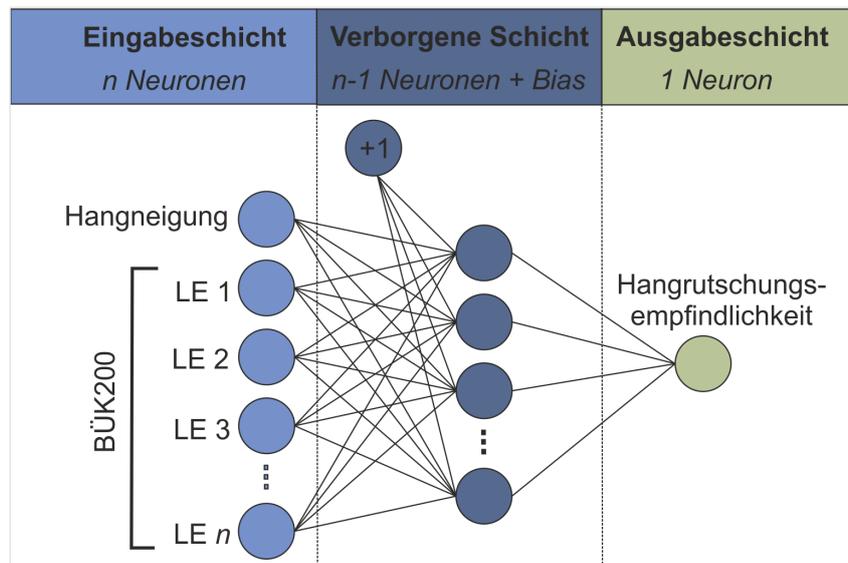


Abb. 2-62: Modellierungsbeispiel 4.2: Design des eingesetzten KNN, bestehend aus Eingabeschicht, verborgener Schicht und Ausgabeschicht.

Für die Realisation der LR- und KNN-Modelle wurden die in der statistischen Modellierungsumgebung der Programmiersprache R frei verfügbaren Module genutzt:

- Logistische Regression: Generalized Linear Models – glm ([R Core Team, 2019](#));
- Künstliches Neuronales Netz: Training of Neural Networks – [neuralnet](#) (Tag des Zugriffs: 03.09.2020 ([Fritsch et al., 2019](#))).

Die Datenaufbereitung und Modell-Parametrisierung wurden seitens der BGR über R-Skripte realisiert ([s. Kapitel 2.6.2.4](#)).

Der Vergleich der Modelle stützt sich auf die ROC-Kurven und die visuelle Interpretation der klassifizierten Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit. Hierfür wurden die AUC-Werte für alle berechneten Modelle, einschließlich den Modellen zur Versagenswahrscheinlichkeit, aus dem Modellierungsbeispiel 4.1 ([s. Kapitel 2.6.4.1](#)) mit dem Trainingsdatensatz bestimmt. Für das Infinite Hangmodell stellt diese Prozedur bereits die Validierung dar, da das Modell keine Beobachtungsdaten zur Erstellung benötigt. Die auf den statistischen Analysen erzeugten Modelle (Methode der Gewichteten Evidenzen und Logistische Regression) sowie das Modell auf Basis einer Analyse mit einem Künstlichen Neuronalem Netz wurden auf der Grundlage des Testinventars validiert.

Ergebnisse und Diskussion

Initial wurden die unterschiedlichen Modelle anhand ihrer AUC-Werte verglichen (Tab. 2-57). Sowohl beim physikalischen Modell (IHM) als auch bei den statistischen Modellen (MGE und LR) und dem KNN-Modell führt die Nutzung der detaillierteren UeBK25 zu einer geringfügigen Modellverbesserung. Gegenüber dem physikalischen Modell weisen die statistischen Modelle und die KNN-Modelle deutlich höhere AUC-Werte auf. Beim Vergleich der AUC-Werte zwischen den statistischen Modellen zeigt sich, dass die Analyse mit der Logistischen Regression eine bessere Anpassung an den Trainingsdatensatz

aufweist als die mit der Methode der Gewichteten Evidenzen. Das kann unter anderem an der Diskretisierung des Parameters Hangneigung (Hang10) in 5°-Klassen bei der Verarbeitung im MGE liegen. Eine Überführung von stetigen Daten in diskrete ist erfahrungsgemäß mit einem Informationsverlust verbunden.

Tab. 2-57: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die AUC-Werte für die mit dem Infiniten Hangmodell (IHM), mit der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE), mit der Methode der Logistischen Regression (LR) sowie einem Künstlichen Neuronalen Netz (KNN) generierten Modelle für die Kombinationen Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25.

Methode	Hang10 + BÜK200		Hang10 + UeBK25	
	AUC-Wert	AUC-Wert	AUC-Wert	AUC-Wert
	Trainingsinventar	Testinventar	Trainingsinventar	Testinventar
IHM*	0,79	-	0,81	-
MGE	0,87	0,90	0,89	0,92
LR	0,89	0,90	0,91	0,91
KNN	0,88	0,88	0,89	0,85

*Siehe auch Tab. 2-56 im Modellierungsbeispiel 4.1.

Die Interpretation der Ergebnisse unterscheidet sich von Methode zu Methode. Die Parameter und die statistischen Gewichte können im MGE-Modell für jeden Parameter unabhängig voneinander bemustert werden. Auch lassen sich die statistischen Metriken aus der ROC-Kurve zur Analyse einzelner Parameter und der Überlagerungsmodelle heranziehen.

Die Wertespanne der statistischen Gewichte liegt für die Hangneigungsklassen zwischen -3,8 und 4,4. Die Gewichte der Hangneigungsklassen weisen den typischen Verlauf mit ansteigenden Gewichtswerten bei steigender Hangneigung auf. In Hangneigungsklassen > 45° liegen keine Beobachtungen von Hanganbrüchen vor. Die Parameterklassen der UeBK25 haben statistische Gewichte zwischen -1,1 und 1,8 und die der BÜK200 zwischen -0,4 und 1,3. Signifikante statistische Gewichte mit Werten > 1 besitzen zwei Parameterklassen der BÜK200 und vier der UeBK25 (Tab. 2-58).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

Tab. 2-58: Modellierungsbeispiel 4.2: Statistische Gewichte > 1 aus der MGE-Analyse für die Parameter BÜK200 und UeBK25 (LE = Legendeneinheit).

Informationsebene oder Parameter	Parameterklasse: Nr. Legendeneinheit – Beschreibung der Substrate*	Statistisches Gewicht
BÜK200	LE 35: schluffiges Material der Süßbrackwassermolasse, örtlich mit Lösslehmdecke	1,3
	LE 42: lehmige und sandig-lehmige Talablagerungen	1,1
UeBK25	LE 50b: Lehm über Lehm bis Tonschluff (Molasse, glimmerreich), verbreitet mit Hauptlage	1,8
	LE 55b: Lehm (Deckschicht) über Lehm bis Ton (Molasse)	1,2
	LE 56a: Sand und sandiger Lehm über Lehm, teilweise verfestigt	1,2
	LE76b: (skelettführender) Schluff bis Lehm, selten aus Ton (Talsediment)	1,2

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der BÜK200 bzw. der UeBK25 übernommen.

Aus den Wertespanspannen der statistischen Gewichte sowie den AUC-Werten der einzelnen Parameter ist zu erkennen, dass die Hangneigung (Hang10) der dominierende Parameter ist und bereits allein mit einem mittleren AUC-Wert von 0,85 einen sehr hohen Erklärungsanteil aufweist (Tab. 2-59).

Tab. 2-59: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die AUC-Werte für einzelne Parameter, modelliert unter Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen.

Informationsebene oder Parameter	AUC-Wert
Hang10	0,85 ± 0,3
BÜK200	0,62 ± 0,5
UeBK25	0,72 ± 0,6

Die Interpretation der Koeffizienten (auch Regressionskoeffizienten) aus der LR-Analyse ist mit den statistischen Gewichten aus der MGE-Analyse vergleichbar. Positive Koeffizienten zeigen einen Zusammenhang zwischen der jeweiligen Parameterklasse und der räumlichen Verteilung der Hanganbrüche. Werden in der MGE-Analyse die Parameter unabhängig voneinander analysiert, verarbeitet die Logistische Regression als multivariate Methode die Parameter gemeinsam. Dies bedeutet, dass die Variablen zuerst überlagert (kombiniert) und erst danach die Koeffizienten bestimmt werden.

Als Hilfestellung für die Entscheidung, ob ein Parameterkoeffizient verlässlich bestimmt wurde, wird der sogenannte p-Wert (oder auch die Irrtumswahrscheinlichkeit) mitberechnet. Diese Kenngröße berücksichtigt die bei der Bestimmung des Koeffizienten ermittelte Standardabweichung und gibt einen Wert zwischen 0 und 1 zurück. Dieser Wert kann wie eine Wahrscheinlichkeit interpretiert werden und liefert die Aussage, ob eine Nullhypothese (Parameter statistisch insignifikant) angenommen oder abgelehnt werden kann. Die Entscheidungsgrenze wird üblicherweise bei einem p-Wert von 0,05 gelegt. Dies entspricht einem Konfidenzintervall von 5 %. Liegt der p-Wert über diesem Wert ist zu unterstellen, dass der bestimmte Koeffizient statistisch nicht signifikant ist. Das bedeutet, die Wahrscheinlichkeit, einen Zusammenhang irrtümlich zugewiesen zu haben, liegt dann über 5 %. Liegt ein positiver Koeffizient mit großem p-Wert vor, bedeutet dies, dass der Parameter einen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen aufweist. Allerdings kann dieser durch die Menge der vorliegenden Beobachtungsdaten statistisch nicht belegt werden und könnte deshalb auch ein Produkt

des Zufalls sein (irrtümlich). Ein p-Wert < 0,05 indiziert eine statistische Signifikanz und damit höhere Vertrauenswürdigkeit des ermittelten Zusammenhanges.

In den Tab. 2-60 und Tab. 2-61 sind die Koeffizienten und die korrespondierenden p-Werte für die Modelle mit BÜK200 und UeBK25 gelistet. Die p-Werte deuten darauf hin, dass ein Zusammenhang einzig für die Hangneigung zuverlässig ermittelt werden kann. Hier liegt der p-Wert nahe null. Auch andere Parameterklassen der BÜK200 und UeBK25 zeigen positive Koeffizienten, die als ein Zusammenhang interpretiert werden können. Die korrespondierenden p-Werte indizieren jedoch, dass es sich hierbei mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch um einen Zufall handeln könnte (p-Werte > 0,9). Im Vergleich zur MGE-Analyse, wo für zwei Parameterklassen der BÜK200 signifikante statistische Gewichte bestimmt sind (Tab. 2-58), wird im LR-Modell für acht Parameterklassen ein Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Hanganbrüche festgestellt (Tab. 2-60). Beim Vergleich der beiden Modelle im Hinblick auf die Vorhersagequalität neuer Ereignisse durch die Validierung mit dem Testinventar ist zu schlussfolgern, dass das LR-Modell mit der UeBK25 eine wesentlich höhere Unsicherheit aufweist. Die AUC-Werte für das Testinventar gehen von 0,91 auf 0,81 zurück (Tab. 2-57).

Im MGE-basierten Modell geht der AUC-Wert für das Testinventar sogar etwas nach oben. Dies bedeutet aber nicht grundsätzlich eine hervorragende Vorhersagequalität. Vielmehr sagt dies aus, dass auch dieses Modell Unsicherheiten aufweist, die jedoch geringer sind. Die Richtung der Veränderung im AUC-Wert ist dabei unwichtig. Es ist insbesondere der Differenzbetrag, der eine Aussage über ein robustes oder weniger robustes Modell stützt. Für ein robustes, d. h. für ein aussagekräftiges Modell mit einer geringen Sensitivität gegenüber Veränderungen sollten die AUC-Werte für Trainings- und Testinventare sehr nah beieinanderliegen.

Die ausschließliche Signifikanz der Hangneigung für die Erstellung des Vorhersagemodells deutet darauf hin, dass der Parameter Bodenkarte auch aus den beiden LR-basierten Vorhersagemodellen herausgenommen und die Logistische Regression ausschließlich mit dem Parameter Hangneigung durchgeführt werden kann.

Tab. 2-60: Modellierungsbeispiel 4.2: Regressionskoeffizienten und Signifikanzniveaus für die eingeflossenen Parameter des LR-Modells in Kombination von Hang10 + BÜK200.

<i>Parameter/Parameterklasse: bei BÜK200 – Nr. Legendeneinheit: Petrographische Beschreibung*</i>	<i>Regressions- koeffizient</i>	<i>p-Wert</i>
<i>Hang10</i>	9,92	2,8e-11
<i>LE 3: kiesige, schluffige und tonige Auenablagerungen</i>	0,00	1,00
<i>LE 11: schluffig-lehmige Abschwemmassen</i>	-0,30	1,00
<i>LE 12: Flussmergel über carbonatreichem Schotter</i>	0,02	1,00
<i>LE 14: Flussmergel oder lehmigen Talablagerungen über carbonatreichem Schotter</i>	0,56	1,00
<i>LE 30: Lösslehm mit Molassematerial</i>	16,40	0,99
<i>LE 31: kiesiges Molassematerial</i>	15,69	0,99
<i>LE 33: lehmig-sandiges Molassematerial, z. T. mit lehmiger Fließerdedecke</i>	15,06	0,99
<i>LE 34: schluffig bis lehmiges Molassematerial, meist mit Fließerdedecke</i>	16,48	0,99
<i>LE 35: schluffiges Material der Süßbrackwassermolasse, örtlich mit Lösslehmdecke</i>	16,97	0,99

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

<i>Parameter/Parameterklasse: bei BÜK200 – Nr. Legendeneinheit: Petrographische Beschreibung*</i>	<i>Regressions- koeffizient</i>	<i>p-Wert</i>
<i>LE 38: tonig-lehmiges Molassematerial mit lehmiger Deckschicht</i>	16,39	0,99
<i>LE 40: tonig-lehmige Molasse- und anderes Tertiärmaterial mit lehmiger Deckschicht</i>	34,09	0,99
<i>LE 42: lehmige und sandig-lehmige Talablagerungen</i>	16,88	0,99
<i>LE 5: sandige bis lehmige über kiesigen Auenablagerungen</i>	-0,66	1,00
<i>LE 52: Lösslehm über Lösslehmfließerde</i>	-0,05	1,00

*Die Schreibweise wurde unverändert aus den Legendeneinheiten der BÜK200 übernommen.

Tab. 2-61: Modellierungsbeispiel 4.2: Regressionskoeffizienten und Signifikanzniveaus für die eingeflossenen Parameter des LR-Modells in Kombination von Hang10 + UeBK25.

<i>Parameter/Parameterklasse: bei UeBK25 – Nr. Legendeneinheit: Beschreibung*</i>	<i>Regressions- koeffizient</i>	<i>p-Wert</i>
<i>Hang10</i>	11,21	2,4e-09
<i>LE 12a: Schluff bis Lehm (Kolluvium)</i>	0,41	1,00
<i>LE 15: Kryolehm bis -schluffton (Lösslehm mit sandiger Beimengung unterschiedlicher Herkunft)</i>	0,24	1,00
<i>LE 16b: Schluff bis Lehm über Lehm bis Schluffton (Lösslehm oder Lösslehm mit lehmiger Beimengung unterschiedlicher Herkunft)</i>	0,41	1,00
<i>LE 20: Verwitterungslehm (Flussmergel) über Carbonatsandkies bis -schluffkies (Schotter)</i>	0,67	1,00
<i>LE 45a: Kiessand bis Sandkies (Molasse)</i>	15,88	0,99
<i>LE 47: (kiesführender) Lehmsand (Molasse)</i>	0,00	1,00
<i>LE 48a: Lehmsand bis Sandlehm (Molasse), verbreitet mit Kryolehm (Lösslehm, Molasse)</i>	14,90	0,99
<i>LE 50a: Lehm über Lehm bis Tonschluff (Molasse, glimmerreich), verbreitet mit Hauptlage</i>	15,84	0,99
<i>LE 50b: Lehm über Lehm bis Tonschluff (Molasse, glimmerreich), verbreitet mit Hauptlage</i>	16,39	0,99
<i>LE 52b: Lehm (Deckschicht) über Ton (Molasse)</i>	-0,71	1,00
<i>LE 54: Schluff bis Lehm (Deckschicht) über Lehm bis Ton (Molasse)</i>	16,08	0,99
<i>LE 55b: Lehm über Lehm bis Tonschluff (Molasse, glimmerreich), verbreitet mit Hauptlage</i>	33,84	1,00
<i>LE 56a: Fels aus verschiedenem Ausgangsmaterial an steilen Talhängen</i>	14,20	0,99
<i>LE 65a: Lehmsand bis Lehm (Talsediment); im Untergrund carbonathaltig</i>	0,00	1,00
<i>LE 65b: Lehmsand bis Lehm (Talsediment); im Untergrund carbonathaltig</i>	0,66	1,00
<i>LE 76b: skelettführender Schluff bis Lehm, selten aus Ton (Talsediment)</i>	17,33	0,99
<i>LE 80c: kiesführender Lehm (Deckenschotter, Molasse, Lösslehm) über (kiesführendem) Sand bis Lehm (Molasse)</i>	-1,18	1,00
<i>LE 80a: Torf</i>	0,00	1,00

<i>Parameter/Parameterklasse: bei UeBK25 – Nr. Legendeneinheit: Beschreibung*</i>	<i>Regressions- koeffizient</i>	<i>p-Wert</i>
<i>LE 8a: Sandlehm bis Schluffton (Molasse, Lösslehm)</i>	0,00	1,00
<i>LE 8c: flacher Lehm bis Schluff (Lösslehm) oder Kryolehm bis -schluff (Lösslehm, Molasse) über Molasseablagerungen</i>	0,00	1,00
<i>LE 89: Carbonatschluff, gering verbreitet aus Carbonatsand bis -lehm (Auensediment)</i>	0,00	1,00
<i>LE 9a: flacher Lehm bis Schluff (Lösslehm) oder Kryolehm bis -schluff (Lösslehm, Molasse) über Molasseablagerungen</i>	0,00	1,00
<i>LE 90a: Auensediment</i>	0,00	1,00

*Die Schreibweise der Legendeneinheiten der UeBK25 wurde unverändert aus der Sachdatenbank übernommen.

Im Vergleich zu den statistischen Verfahren (Methode der Gewichteten Evidenzen und Logistische Regression) ist die Bewertung der statistischen Gewichte oder Koeffizienten in der Modellierung mit Künstlichen Neuronalen Netzen komplexer.

Die Modellanpassung läuft verdeckt ([Black-Box](#)). Die Interpretation, welche Parameter im Modell welchen Einfluss haben, kann durch neue Entwicklungen im Bereich des sogenannten *interpretierbaren* oder auch *erklärbaren Maschinellen Lernens* erleichtert werden.

Seit Ende des Jahres 2019 existieren für die Programmiersprachen Python und R zusätzliche Module, die zur Interpretation der Modellergebnisse herangezogen werden können ([Molnar et al., 2018](#)). So kann die Wichtigkeit der Parameter abgeschätzt und mit den Ergebnissen aus der Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen bzw. mit der Logistischen Regression verglichen werden.

Die Vorgehensweise zur [Ermittlung der Wichtigkeit](#) wurde im Modellierungsbeispiel 2.4 (s. [Kapitel 2.6.2.4](#)) erläutert.

Die Abb. 2-63 zeigt im Überblick die ermittelte Wichtigkeit der einzelnen Parameter im Modell Künstliches Neuronales Netz. Die x-Achse im Diagramm wird durch den Mittleren Absoluten Fehler dargestellt und kann als Wichtigkeit des Parameters interpretiert werden.

Zum Vergleich wurden die Parameterklassen der BÜK200 und der UeBK25 gestrichelt umrandet, die in den statistischen Modellen einen positiven Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Hangabrisse aufweisen (grün: Methode der Gewichteten Evidenzen; rot: Logistische Regression).

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

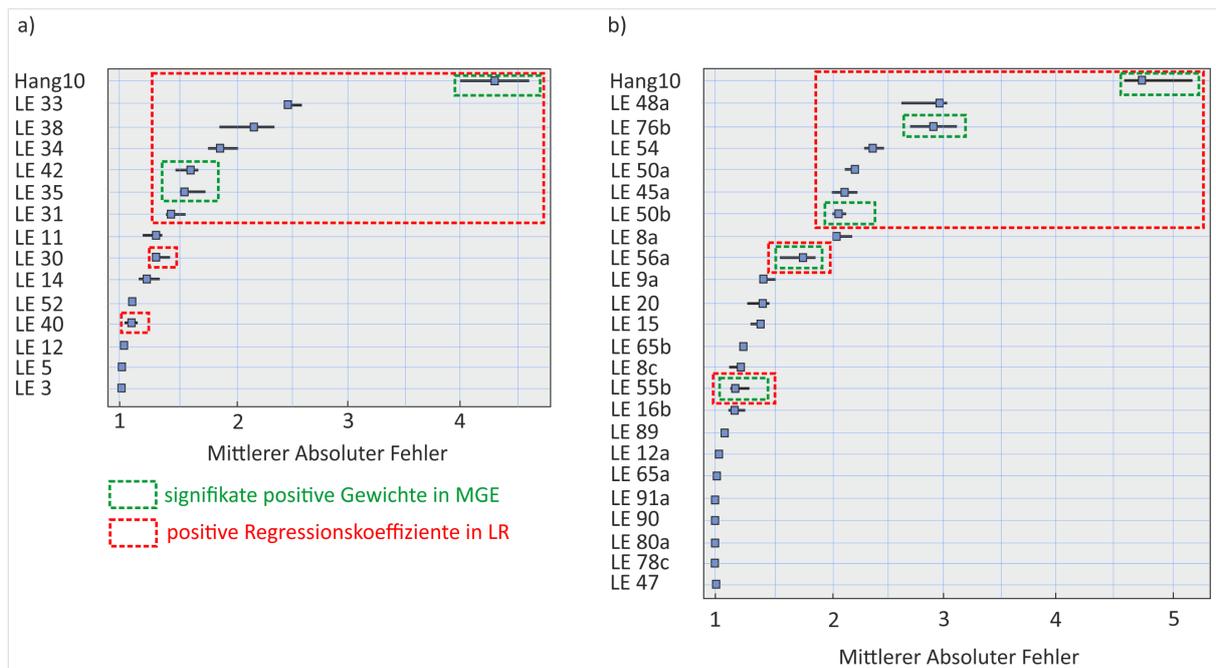


Abb. 2-63: Ranking der Parameter bzw. Parameterklassen in den generierten KNN-Modellen nach ihrer Wichtigkeit: a) Hang10 + BÜK200; b) Hang10 + UeBK25. Die Quadrate zeigen den Mittelwert, die schwarzen Balken die Standardabweichung für den Mittleren Absoluten Fehler. Farblich umrandete Punkte signalisieren, dass für diese Parameterklassen auch in den statistischen Modellen ein Zusammenhang mit den Hanganbrüchen diagnostiziert wurde (grün: Methode der Gewichteten Evidenzen, MGE; rot: Logistische Regression, LR).

Die mit einem Künstlichen Neuronales Netz erzeugten Modelle demonstrieren ebenfalls, dass dem Parameter Hangneigung die stärkste Bedeutung zukommt. Der Beitrag der einzelnen Parameterklassen der BÜK250 und der UeBK25 zur Erklärung der räumlichen Verteilung von Hanganbrüchen kann zwar ermittelt, eine statistische Signifikanz jedoch nicht angegeben werden.

In der Schnittmenge aller Ergebnisse werden gleiche Parameterklassen der BÜK200 und der UeBK25 als zusammenhängend mit der räumlichen Verteilung der Hanganbrüche erkannt, jedoch ist die prinzipiell unterschiedliche Reihung der Wichtigkeit in den statistischen Modellen und dem KNN-Modell hervorzuheben. Bemerkenswert ist, dass in beiden statistischen Modellen die Unsicherheiten für die Parameter aus BÜK200 und UeBK25 abschätzbar und als hoch einzustufen sind. Im KNN-Modell kann keine explizite Aussage über die Unsicherheiten gemacht werden.

Eine weitere Option zur Beurteilung der Methoden beinhaltet den Vergleich von Zonen der klassifizierten Hangrutschungsempfindlichkeit. Die Zonen wurden unter Maßgabe der ROC-Kurven aus der Validierung wie folgt eingeteilt:

- **Sehr hoch:** Flächen, in denen 50 % der bekannten Ereignisse liegen;
- **Hoch:** Flächen, in denen weitere 30 % der bekannten Ereignisse liegen;
- **Moderat:** Flächen, in denen weitere 15 % der bekannten Ereignisse liegen;
- **Niedrig:** Flächen, in denen weitere 4 % der bekannten Ereignisse liegen;
- **Sehr niedrig:** Flächen, in denen die restlichen 1 % der bekannten Ereignisse liegen.

Die Abb. 2-64 visualisiert die Modelle Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25 als Karte der zonierten Hangrutschungsempfindlichkeit für die getesteten Methoden. Die Tab. 2-62 gibt einen tabellarischen Überblick über die prozentuale Flächenaufteilung der Zonen der klassifizierten Hangrutschungsempfindlichkeit und die Standardabweichung der Zonenflächen zwischen den Modellen.

Tab. 2-62: Modellierungsbeispiel 4.2: Übersicht über die prozentuale Aufteilung der Zonen der klassifizierten Hangrutschungsempfindlichkeit in der Gesamtfläche des Testgebiets je Modell.

Zone	Infinites Hangmodell (IHM)		Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE)		Logistische Regression (LR)		Künstliches Neuronales Netz (KNN)		Standardabweichung σ in %*
	Hang10 + BÜK200	Hang10 + UeBK25	Hang10 + BÜK200	Hang10 + UeBK25	Hang10 + BÜK200	Hang10 + UeBK25	Hang10 + BÜK200	Hang10 + UeBK25	
	Sehr niedrig	0	32	20	36	23	57	9	
Niedrig	41	11	49	31	37	17	68	16	18,0
Moderat	36	31	12	17	25	13	8	14	9,4
Hoch	15	17	12	10	9	7	7	8	3,5
Sehr hoch	8	9	7	6	6	5	9	8	1,4

*Standardabweichung σ – prozentualer Flächenanteil pro Zone über alle Modellvariationen hinweg.

Sowohl anhand der geringen Werte der Standardabweichung als auch aus dem visuellen Vergleich der Kartenbilder ist zu erkennen, dass die Zonen *Sehr hoch* und *Hoch*, in denen insgesamt 80 % aller bekannten Ereignisse liegen, in allen Modellen räumlich vergleichbar gefasst werden. Unterschiede in den Modellen nehmen für die Zonen *Moderat* bis *Sehr niedrig* sukzessive zu.

Die Flächenanteile für diese Zonen weisen enorme Wertespanssen mit großen Differenzen zwischen den mit unterschiedlichen Methoden erzeugten Modellen auf. Auch zeigen sich große Unterschiede in den Flächenanteilen der Zonen zwischen Modellen, die mit gleicher Methode generiert wurden, jedoch auf Parametern unterschiedlicher Maßstäbe aufbauen.

Abschließend ist es wichtig hervorzuheben, dass die vier vorgestellten Modellierungsmethoden in zwei Gruppen zu trennen sind:

- Das Infinite Hangmodell bestimmt die Versagenswahrscheinlichkeit für Hänge mithilfe eines physikalischen Modells, ohne dass ein Rutschungsinventar vorhanden sein muss;
- Die Methode der Gewichteten Evidenzen, die Logistische Regression und ein Künstliches Neuronales Netz benötigen zwingend ein Rutschungsinventar zur Modellerstellung.

Mit allen vier angewandten Methoden können, statistisch bewertet, gute Modelle generiert werden. Dies bedeutet, dass ein Testgebiet so eingeteilt werden kann, dass 80 % der Ereignisse in die Empfindlichkeitszonen *Sehr hoch* und *Hoch* eingeordnet werden und diese dabei nicht mehr als ca. 20 % bis 25 % der Gesamtfläche bedecken.

Die in den Modellen genutzten bodenkundlichen Parameter gehören groß- und kleinmaßstäblichen Maßstabsebenen an. Die Effekte der Generalisierung lassen sich in Modellen aller Modellierungsmethoden feststellen.

Der Parameter Hangneigung trägt wesentlich zur Erklärung der Muster in allen vier getesteten Modellen der Hangrutschungsempfindlichkeit bei.

Die bivariate statistische Modellierung mittels der Methode der Gewichteten Evidenzen kann die Interpretation des Einflusses der Parameter umfassend deuten. Mit dem Einsatz der multivariaten Logistischen Regression und des Künstlichen Neuronalen Netzes nimmt naturgemäß auch die Komplexität der Modelle zu, ihre Interpretierbarkeit jedoch ab.

2 Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit

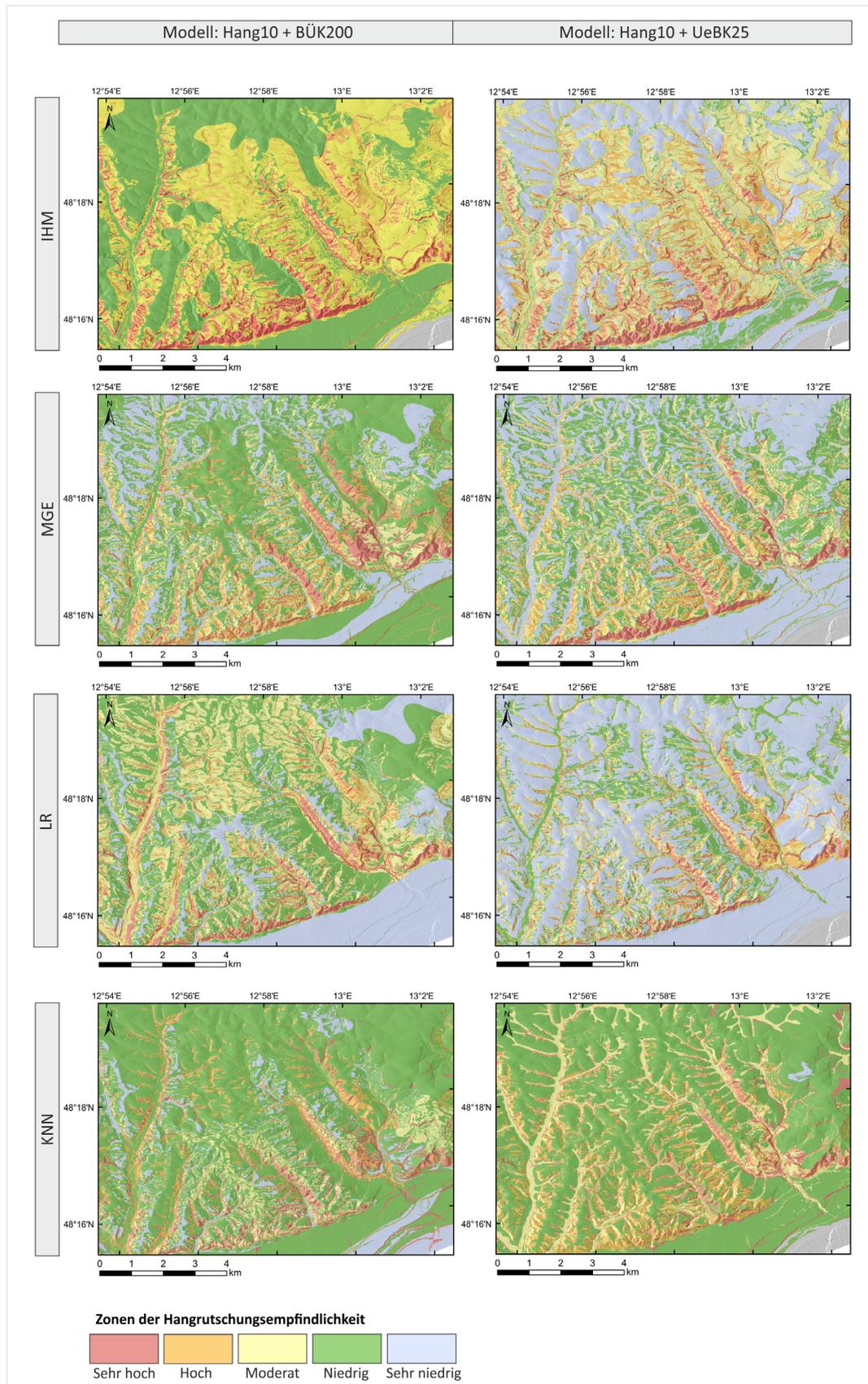


Abb. 2-64: Modellierungsbeispiel 4.2: Kartendarstellung der zonierten Hangrutschungsempfindlichkeit, basierend auf der Modellierung mit unterschiedlichen Methoden (IHM, MGE, LR, KNN) für die Modelle mit den Parameterkombinationen Hang10 + BÜK200 und Hang10 + UeBK25 (Quellen: DGM 10 – BKG; Tab. 2-9).

2.7 Schlussfolgerungen aus den Fallstudien 1 bis 4

Im Kapitel 2.6 sind am Beispiel von vier Fallstudien mit 14 Modellierungsbeispielen (Szenarien) die grundlegenden Anforderungen für eine regionale Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit in Deutschland dokumentiert und die Ergebnisse je Szenario separat diskutiert worden.

Nachfolgend werden die Schlussfolgerungen aus allen Modellierungsbeispielen im Hinblick auf die Möglichkeit der Erstellung einer *Übersichtskarte der Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland (HEÜK)* integrierend besprochen (s. Kapitel 4). Der erreichbare Zielmaßstab einer solchen Karte wäre dabei eine Funktion der verfügbaren Maßstäbe der zur Modellierung notwendigen Informationsebenen (s. unten).

Das in den Fallbeispielen verwendete Methodenspektrum zur Abschätzung umfasst vier Hauptkategorien (s. Kapitel 2.3): die statistische, die physikalisch-basierte und die heuristische Modellierung sowie die Modellierung mit Methoden des Maschinellen Lernens.

Verfügbarkeit von Informationsebenen

Konzeptuelle Voraussetzung für alle regionalen Analysen und unabhängig von der Art der eingesetzten Methodik ist die flächendeckende Verfügbarkeit von digitalen, harmonisierten und qualitätsgesicherten geowissenschaftlichen Informationsebenen.

In Deutschland erfüllen die im Rahmen der geologischen Landesaufnahme durch die SGD der Länder in Kooperation mit der BGR bzw. die in gemeinsamer institutioneller Arbeit der Bund-Länder-Arbeitsgruppen publizierten Kartenwerke wie die GÜK250, die BÜK200 und die HÜK200 diese Bedarfe. Die versatile Nutzbarkeit dieser Kartenwerke auch für die Analyse der räumlichen Zonierung der Hangrutschungsempfindlichkeit stellt einen nachhaltigen und praktischen Mehrwert dar.

Neben den geowissenschaftlichen Informationsebenen kommt den Digitalen Geländemodellen (DGM) eine besondere Bedeutung zu. Sie sind für geomorphologische Analysen unabdingbar und in Auflösungen bis zu einer Gitterweite von 10 m x 10 m ebenfalls deutschlandweit zugänglich. Darüber hinaus können einzelne SGD flächendeckend oder für Teilgebiete des entsprechenden Bundeslandes auf höher aufgelöste DGM, z. B. das DGM1 (1 m x 1 m Gitterweite), zurückgreifen.

Für spezielle Modellierungsanforderungen sind weitere Informationsebenen abrufbar, z. B. die Corine Landbedeckung, die Bodenfeuchte oder die Niederschlagshöhen (Tab. 2-9).

Damit sind die Anforderungen für eine Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit in Deutschland aus Sicht der Verfügbarkeit thematischer Informationsebenen formal erfüllt.

Verfügbarkeit von Massenbewegungsinventaren

Für die Abschätzung der Hangrutschungsempfindlichkeit werden für einige Methoden zusätzlich Inventare über Massenbewegungsereignisse benötigt, z. B. bei der Nutzung statistischer Methoden und von Methoden des Maschinellen Lernens.

Bei der Bearbeitung der Fallstudien wurde deutlich, dass es bei der Erfassung von Inventardaten von Bundesland zu Bundesland substantielle Unterschiede gibt, z. B. bezüglich der Lokalisierung, der Beschreibung oder der generellen Anzahl der kartierten Ereignisse. Daraus folgt, dass bei einer länderübergreifenden Bearbeitung der Hangrutschungsempfindlichkeit mit methodischen Einschränkungen aufgrund heterogener bzw. nicht repräsentativer Inventar-Datensätze zu rechnen wäre. Ziel sollte es daher sein, dass die SGD die Inventare über Massenbewegungen möglichst umfassend und gemäß den Empfehlungen der [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie \(2016\)](#) vorhalten.

Generalisierung und Abstraktionsgrad von Informationsebenen

Die in den Fallstudien involvierten geowissenschaftlichen Informationsebenen sind primär nicht für die Analyse der räumlichen Verteilung von Massenbewegungspotenzialen generiert worden. Sie weisen je nach thematischer Zielstellung unterschiedliche Grade der Abstraktion bei der Darstellung von Objekten oder Sachverhalten (z. B. Stratigraphie) auf. Die geometrische und begriffliche Generalisierung der Informationsebenen im Übergang zwischen Detailmaßstab (großmaßstäblich) und Übersichtsmaßstab (kleinmaßstäblich) kann zusätzlich zu einer fehlerhaften räumlichen Verortung von Rutschungsereignissen auf den Informationsebenen bzw. den daraus abgeleiteten Parametern führen. Die Einschränkungen nehmen mit dem Grad der Generalisierung zu. Dies impliziert, dass z. B. aus statistischen Analysen unter Einbindung von kleinmaßstäblichen Informationsebenen wie der GÜK1000, keine belastbaren Modelle resultieren müssen.

Durch Integration von Informationsebenen mit größeren Maßstäben lassen sich die Generalisierungseffekte in der Regel reduzieren. Im Ergebnis der hier betrachteten Modellierungsbeispiele ist zu konstatieren, dass die Fehler bei der Verortung von Ereignissen und damit potenzielle Fehlinterpretationen jedoch auch in Maßstäben von 1 : 25 000 nicht gänzlich eliminiert werden können. Darüber hinaus stehen Informationsebenen in größeren Maßstäben nicht immer bundesweit zur Verfügung und bei bestimmten Kartenwerken steht ein geologischer bzw. kartographischer Randabgleich zwischen einzelnen Kartenblättern aus bzw. ist noch nicht vollständig abgeschlossen (z. B. digitale IGK25 von Bayern: Tab. 2-9).

Die Nutzung großmaßstäblicher Informationsebenen stellt sowohl an die Qualität als auch an die Quantität von Inventaren besondere Erfordernisse. Für eine belastbare statistische Auswertbarkeit wird eine Mindestanzahl an detektierten Ereignissen benötigt. Als Richtwert gilt, dass durchschnittlich 10 Beobachtungen pro Parameterklasse (z. B. Legendeneinheit der GÜK250) existieren sollten. Unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Status Quo ist zu unterstellen, dass der hohe Detailgrad großmaßstäblicher Informationsebenen wie der GK25 in Relation zu den aktuell vorliegenden Inventaren ([in den beteiligten SGD](#)) nicht immer statistisch ausgewertet werden kann. Darüber hinaus bleibt festzuhalten, dass aufgrund unterschiedlicher Prozeduren bei der Verarbeitung von Informationen in multivariaten Verfahren und Verfahren des Maschinellen Lernens grundsätzlich größere Inventarumfänge im Vergleich zu den bivariaten statistischen Methoden notwendig sind.

Schlussfolgerungen aus der statistischen Modellierung

Die Ergebnisse aus den Fallstudien unter Verwendung der statistischen Methode der Gewichteten Evidenzen zeigen, dass für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit die Massenbewegungen nach [Prozesstypen](#) differenziert werden sollten.

Je nach Prozesstyp tragen unterschiedliche Parameter zur Empfindlichkeit bei. Die untersuchten (möglichen) Parameterkombinationen zeigen eine eindeutige Maßstabsabhängigkeit.

Im Maßstab 1 : 250 000 ist der Parameter Hangneigung dominierend und stellt für die meisten Prozesstypen zunächst einen statistisch ausreichenden Parameter dar, um [gute bis ausgezeichnete Modelle](#) der Hangrutschungsempfindlichkeit zu generieren. Es kann festgehalten werden, dass dieser Parameter nachweislich sogar maßstabsübergreifend als alleiniger, bestimmender Parameter zur Erklärung von Sturzprozessen infrage käme.

Für die Identifizierung der regionalen Empfindlichkeit gegenüber Rotations- und Translationsrutschungen stellt die Hangneigung ebenfalls einen elementaren Parameter dar. Im Anwendungsmaßstab

1 : 250 000 ist die Hangneigung sogar so dominant, dass anhand der verwendeten Evaluierungsinstrumente der Einfluss anderer Parameter statistisch kaum nachweisbar ist.

Für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber Rotationsrutschungen ist aus praktischer Sicht allerdings die Hangneigung allein nicht mehr ausreichend. Eine Vielzahl anderer, teilweise sehr lokaler Faktoren können eine Rolle spielen, so dass häufig Spezialfälle („Individuen“) zu betrachten sind.

Durch Maskierung der Flächen mit geringer Hangneigung ($\leq 10^\circ$), sogenannte triviale Flächen, kann die Dominanz des Parameters Hangneigung soweit reduziert werden, dass im Maßstab 1 : 250 000 auch noch der Parameter Petrographie berücksichtigt werden kann. Entscheidend hierfür ist das Verhältnis von steilen zu flachen Hängen im Testgebiet. Ist der Anteil an Hängen mit geringer Hangneigung hoch, wird der relative Einfluss des Parameters Hangneigung dominant. Ist der Anteil an flachen Hängen niedrig, reduziert sich der Einfluss der Hangneigung. Dieser Effekt ergibt sich zum Teil auch ganz natürlich beim Übergang von kleineren zu größeren Maßstäben, da beim „Hineinzoomen“ oft kleinere Teilausschnitte des Untersuchungsgebiets detailliert aufgelöst werden. Durch die Verkleinerung des Ausschnitts verändert sich auch das Verhältnis von steilen zu flachen Hängen. Dies bedingt, dass auch andere Parameter zunehmend an Einfluss gewinnen und unter Umständen sogar eine Integration zusätzlicher Parameter notwendig wird, um eine akzeptable statistische Modellgüte zu erlangen. Allerdings gilt auch, dass mit zunehmender Berücksichtigung lokaler Parameter die Übertragbarkeit des Modells auf andere Regionen vermindert wird.

Für eine belastbare, deutschlandweite Darstellung der Empfindlichkeit gegenüber Rotationsrutschungen auf der Grundlage statistischer Methoden müsste neben der Hangneigung zumindest auch noch die Petrographie berücksichtigt werden. Eine Extrapolation der statistischen Gewichte für den Parameter Petrographie aus den Testgebieten der Fallstudien 1 bis 4 auf ganz Deutschland würde voraussetzen, dass alle petrographischen Einheiten in Deutschland auch in den Testgebieten repräsentativ vertreten sein müssten. Das ist nicht der Fall. Eine praktikable Möglichkeit, ein statistisch basiertes Modell für die Gesamtfläche Deutschland zu erzeugen, wäre, die Anzahl der Testgebiete soweit zu erhöhen, dass alle petrographischen Einheiten in Deutschland repräsentativ abgebildet wären (maßstabsabhängig). Kondition hierfür wäre, dass in den Testgebieten hinreichende Inventare zur Verfügung stehen. In Kenntnis der vorhandenen Rutschungsinventare ist es aus Sicht der MBiD-Arbeitsgruppe aktuell nicht möglich, eine statistische Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit für Rotationsrutschungen bundesweit einheitlich durchzuführen.

Für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber Translationsrutschungen können vergleichbare Schlussfolgerungen gezogen werden. Neben der Hangneigung spielen auch hier besonders die Eigenschaften der obersten Boden- und Gesteinsschichten für das Auftreten der Ereignisse eine zentrale Rolle. Schon anhand der Hangneigung lassen sich Flächen aushalten, in denen dieser Prozesstyp nicht auftreten kann. Jedoch bleiben große Flächenanteile übrig, in denen das modellierte Gefährdungspotenzial nur anhand der Hangneigung pauschal bestimmt werden kann. Diese Pauschalierung wird bereits im Übersichtsmaßstab 1 : 250 000 erkennbar und nimmt in größeren Maßstäben zu. Daher muss die Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber Translationsrutschungen für eine deutschlandweite Modellierung, ähnlich wie die gegenüber Rotationsrutschungen, durch Hinzunahme weiterer Parameter abgestufter betrachtet werden.

Schlussfolgerungen aus der Modellierung mit dem Infiniten Hangmodell

Der Einsatz des Infiniten Hangmodells (IHM) kann vor allem für die regionale Modellierung der Potenziale von Translationsrutschungen herangezogen werden. Gleich den heuristischen Verfahren benötigen die physikalisch-basierten Methoden keine Inventare für die Generierung des Modells (erst bei der Validierung). Daher stellt dieser Ansatz eine pragmatische Möglichkeit dar, mit den oben genannten Informationsebenen die regionale Empfindlichkeit gegenüber flachgründigen Translationsrutschungen, die oft durch Niederschlagsereignisse getriggert werden, abzuschätzen. Der Einsatz physikalisch-basierter Methoden in regionalen Maßstäben ist aber nur dann möglich, wenn die Unsicherheiten aus der Modellparametrisierung (z. B. Variation der bodenphysikalischen Parameter) großer Gebiete berücksichtigt werden können. Dies wurde in den Fallstudien durch die Kopplung des einfachen IHM-Modells mit dem stochastischen Ansatz einer Monte-Carlo-Simulation gelöst. Durch die Parametrisierung anhand von Sachdatenbanken aus unterschiedlichen Bodenkarten (z. B. BK50 von Sachsen: Tab. 2-9: Überblick über die im MBiD-Projekt genutzten thematischen Informationsebenen mit Angaben zur räumlichen Abdeckung, zum Maßstab, zum räumlichen Objekttyp, zum abgeleiteten Parameter und zur Quelle.) und Bodenübersichtskarten (z. B. BÜK200) und einer daraus resultierenden sehr starken Streuung der bodenphysikalischen Parameter, kann der erzielte Mittelwert für den Standsicherheitsfaktor nicht im geotechnischen Sinne interpretiert werden. Stattdessen wird die in der Monte-Carlo-Simulation ermittelte Versagenswahrscheinlichkeit als ein relativer Index herangezogen, um die Exposition eines Rasterpixels (repräsentativ für einen Hang) gegenüber einem potenziellen (zukünftigen) Ereignis zu charakterisieren.

Generell wird ein einfaches IHM-Modell die Komplexität der Prozesse in den oberen Gesteins- und Bodenschichten nicht komplett erfassen können. So wurden in der Fallstudie Simbach viele Hangbereiche als rutschungsempfindlich eingestuft, in denen aber nach den starken Niederschlagsereignissen vom Mai und Juni 2016 keine Rutschungen beobachtet wurden. Diese geringe Spezifität kann teilweise durch die begrenzte Auflösung der verwendeten Informationsebenen erklärt werden. So gibt es laut LfU Bayern Beispiele aus dem Alpenraum, bei denen IHM-basierte Modellierungen mit existierenden Ereignissen gute Übereinstimmungen zeigten. Bei diesen Projekten wurde der Modellierungsprozess durch eine umfangreiche Interpretation der vorhandenen Kartenwerke und Daten gründlich vorbereitet. Aufgrund des Aufwands wurden solche Aktivitäten für die außeralpinen Bereiche aber nicht vorgenommen.

Schlussfolgerungen aus der Modellierung mit dem Analytischen Hierarchieprozess

Für die Bewertung der Empfindlichkeit in den Gebieten ohne vorliegende Inventare kann auf Expertenwissen zurückgegriffen werden (Heuristik).

Mit dem Analytischen Hierarchieprozess (AHP) lassen sich heuristische Expertenschätzungen mathematisch auswerten. Expertenwissen bezieht sich nicht nur auf frühere beobachtete Ereignisse, sondern vor allem auf das Prozessverständnis, die Kenntnis typischer Eigenschaften verschiedener Gesteine oder Böden sowie den Einfluss weiterer lokaler Faktoren. Dieses empirische Wissen basiert auf den gesammelten Erfahrungen durch Messungen, Laboranalysen, physikalischen Modellen oder aber auch auf statistischen Auswertungen von Beobachtungen in anderen Gebieten. Ein Nachteil der heuristischen Bewertung liegt im hohen Arbeitsaufwand und der mangelnden Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Je nach Gebiet und Maßstab der Analyse müssen unter Umständen viele Parameter zunächst gruppiert und durch einen oder mehrere Experten zueinander in Beziehung gesetzt werden.

Zudem sind Expertenentscheidungen nicht im Detail nachvollziehbar, können ggf. von der Bewertung anderer Experten abweichen oder von einem konkurrierenden Experten angezweifelt werden.

Am Beispiel des Elbtalgrabens wurde anhand der AHP-Methodik die Empfindlichkeit für Sturzprozesse bewertet. Der Beitrag der Parameter Hangneigung und Petrographie zur Empfindlichkeit gegenüber Sturzprozessen sollte durch eine Reihe von Experten bewertet werden (s. Kapitel 2.6.2.2). Es hat sich gezeigt, dass beim Parameter Hangneigung die Expertenmeinungen in der relativen Bewertung der Hangneigungsklassen eine hohe Übereinstimmung zeigten. Im Gegensatz dazu ergaben sich in der Bewertung der Petrographie beachtliche Unterschiede. Somit stellt die subjektive Sichtweise eine große Unsicherheit für die Parameter dar, die einen Interpretationsspielraum zulassen. Bei der Erstellung heuristischer Modelle sollten solche Unsicherheiten durch mehrere unabhängige Expertenbewertungen erfasst werden, wobei die Expertenschätzungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Regionalkennntnis zusätzlich gewichtet werden könnten.

Es lässt sich weiterhin festhalten, dass selbst bei Involvierung zusätzlicher expertenbasierter Informationen in der Regel die geometrische Auflösung der Empfindlichkeitszonen im Modell nicht verfeinert werden kann. Denn im Modell können nur die Grenzen bzw. Muster berücksichtigt werden, die durch die kartierte räumliche Verteilung der einzelnen Parameter bzw. deren Überlagerung abgebildet sind. Die Bewertung der kleinmaßstäblichen Parameter durch einen ortskundigen Experten ist in der Regel zwar plausibler als das Ergebnis einer statistischen Analyse mit generalisierungsbedingten Fehlzuordnungen, liefert jedoch nicht zwingend eine bessere Modellgüte.

Eine deutschlandweite Karte für Sturzprozesse könnte anhand der experten-basierten Bewertung der Hangneigung generiert werden. Hierfür würde die Einbeziehung des Parameters Hangneigung genügen, um die Potenziale für Sturzprozesse pauschal, aber dennoch hinreichend genau zu bestimmen.

Für die Translations- und Rotationsrutschungen müssten auch andere Parameter (z. B. alle petrographischen Einheiten für Deutschland) bewertet werden (maßstabsabhängig). Dies wäre seitens der SGD nur mit einem extremen Arbeitsaufwand unter Beteiligung vieler Experten mit entsprechenden regionalen Kenntnissen zu realisieren.

Schlussfolgerungen aus der Modellierung mit einem Künstlichen Neuronalen Netz

Die Ergebnisse einer von der MBiD-Arbeitsgruppe und von der Technischen Universität Berlin unter identischen Randbedingungen realisierten Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit mit einem Künstlichen Neuronalen Netz sind grundsätzlich vergleichbar. Jedoch bestehen substantielle Unterschiede in der Aufbereitung der Daten und beim Ableiten der Parameter aus den Informationsebenen, die den unterschiedlichen Erfahrungen im Umgang mit KNN geschuldet sind.

Aufbauend auf den Ergebnissen lässt sich feststellen, dass die aktuelle Datenlage und der Entwicklungsstand der eingesetzten KNN-Verfahren der Erwartung, ein universelles Werkzeug zur Lösung komplexer geowissenschaftlicher Problemstellungen zu sein, noch nicht gerecht wird. Für die in der Fallstudie zu lösende Fragestellung stand der Aufwand, ein KNN zu designen und zu trainieren, in keinem Verhältnis zum Erkenntnisgewinn. So können geowissenschaftlich gleichwertige Ergebnisse mit deutlich geringerem Aufwand unter Nutzung praktikablerer Methoden erzielt werden. Dies schließt die komplexe Interpretierbarkeit der Ergebnisse ein. Unter Berücksichtigung der qualitativen und quantitativen Merkmale der vorhandenen Inventare ist der Einsatz von KNN für eine bundesweite Modellierung daher gegenwärtig noch keine Option.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Fazit hinsichtlich der Erstellung einer HEÜK für Deutschland

Im Hinblick auf die Erarbeitung einer *Übersichtskarte der Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland* kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Unter Maßgabe des Parameters Hangneigung, der in seiner Gewichtung alle weiteren unabhängigen Parameter dominierend überlagert, ist für den kinematischen Prozesstyp *Stürzen/Fallen* eine statistische Modellierung, z. B. mit der Methode der Gewichteten Evidenzen, möglich. Eine Übertragung der statistischen Gewichte für den Parameter Hangneigung (abgeleitet aus DGM25 bzw. DGM10) aus repräsentativen Fallstudien auf das gesamte Bundesgebiet wäre akzeptabel.
- Für flache *Translationsrutschungen* (auch Hanganbrüche) sind neben der Hangneigung auch weitere Faktoren von Bedeutung, deren regionale Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Angesichts der inhomogenen Datenlage von Rutschungsinventaren in Deutschland ist derzeit eine ganzheitliche statistische Modellierung sowie ein Einsatz von Methoden des Maschinellen Lernens (ML) zur Abschätzung der Empfindlichkeit gegenüber diesem Massenbewegungstyp unrealistisch. Allerdings liefert die physikalisch-basierte Modellierung einen vielversprechenden Ansatz, der mit den verfügbaren Informationsebenen zu einer deutschlandweiten HEÜK für Translationsrutschungen beitragen könnte. Da dieser Massenbewegungstyp in Deutschland vor allem an starke Niederschlagsereignisse gekoppelt ist, kann die physikalisch-basierte Vorgehensweise im Kontext der Diskussion zu den Auswirkungen des Klimawandels dynamische und szenario-basierte Modelle für ausgewählte Regionen liefern.
- Für *Rotationsrutschungen* gilt wie für Translationsrutschungen, dass der Einsatz statistischer bzw. ML-basierter Modellierungen aufgrund der begrenzten Übertragbarkeit einzelner regionaler Faktoren (z. B. Petrographie) und nur regional verfügbarer bzw. inhomogener Inventare derzeit nicht möglich ist. Auch eine physikalisch-basierte Modellierung in regionalen Maßstäben stellt sich aktuell ebenfalls als nicht erreichbar dar. Das einfache Infinite Hangmodell ist nicht geeignet, um die Empfindlichkeit gegenüber diesem Massenbewegungstyp belastbar abzuschätzen. Komplexere physikalische Modelle, die den Massenbewegungstyp besser abbilden könnten, benötigen wesentlich genauere Eingangsdaten (z. B. 3D-Untergrundmodelle) und wurden im MBiD-Projekt nicht berücksichtigt. Die Anwendung heuristischer Methoden würde eine intensive Zusammenarbeit aller SGD unter Beteiligung von Experten mit detaillierten Kenntnissen der regionalen Geologie voraussetzen.
- Die Abschätzung und Darstellung der Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland unter Einbeziehung aller Prozesstypen ist gegenwärtig (Stand November 2020) nicht möglich.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Das [Kapitel 3](#) unterbreitet Empfehlungen im Sinne von praktischen Arbeitsabläufen (Workflows) für die Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit gemäß der in den Fallstudien 1 bis 4 getesteten Methoden (s. [Kapitel 2.3](#) und [2.6](#); Tab. 3-1).

Ziel dieser Dokumentation ist es, Fachkräften ohne Modellierungserfahrung einen Überblick über die verschiedenen Workflows und die damit verbundene Komplexität der Modellierungsschritte zu vermitteln. Für Fachkräfte mit Modellierungserfahrung sollen diese Workflows Anreize liefern, entsprechende Analysen eigenständig zu realisieren.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass zum Verständnis der nachfolgenden Abhandlungen ein Grundwissen in GIS- und Datenbankroutinen geboten ist.

Bei komplexeren Methoden lassen sich die numerischen Berechnungen nicht mehr manuell nachvollziehen. Daher werden sogenannte Pseudocodes eingeführt, die die Struktur von skriptbasierten Routinen aufschlüsseln, ohne dabei die Syntax einer spezifischen Programmiersprache zu verwenden.

Tab. 3-1: Überblick über die methodischen Workflows und deren Bezug zu den Fallstudien 1 bis 4.

<i>Kapitel/Methodischer Workflow</i>	<i>Fallstudie (Nr.)</i>	<i>Modellierungsbeispiel</i>
<i>3.2.1/Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE)</i>	Fränkische und Schwäbische Alb (1)	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5
	Elbtalgraben (2)	2.1
	Simbach (4)	4.2
<i>3.2.2/Infinites Hangmodell (IHM)</i>	Elbtalgraben (2)	2.3
	Siegtal (3)	3.1
	Simbach (4)	4.1, 4.2
<i>3.2.3/Analytischer Hierarchieprozess (AHP)</i>	Elbtalgraben (2)	2.2
<i>3.2.4/Künstliches Neuronales Netz (KNN)</i>	Elbtalgraben (2)	2.4, 2.5
	Simbach (4)	4.2

3.1 Kriterien zur Auswahl geeigneter Modellierungsmethoden

Jede Modellierungsmethode benötigt spezifische Eingangsdaten (Informationsebenen), deren Verfügbarkeit und Qualität maßgeblich den möglichen Maßstab der Analyse bestimmt (Abb. 3-1). Auch der Aufwand bei der Datenvorbereitung ist maßstabsabhängig. Gebiete, die in großen Maßstäben bearbeitet werden sollen, erfordern eine hohe Datendichte, sowohl für die physikalisch-basierten als auch für die statistischen Modellierungen. Während geotechnische Kennwerte durch Feldarbeiten und Laboruntersuchungen oder teilweise aus der Literatur gewonnen werden können, sind die statistischen Methoden an eine hohe Dichte beobachteter Massenbewegungen geknüpft, deren Inventarisierung (wenn nicht bereits vorhanden) kurzfristig oft nicht möglich ist. Somit kommen für große Maßstäbe zunächst nur heuristische und physikalisch-basierte Analysen infrage, da diese nicht direkt von der Beobachtung der Ereignisse abhängen. Der Aufwand, sehr detaillierte Informationsebenen expertenbasiert zu bewerten, steht jedoch oft in keinem Verhältnis zum Nutzen und den resultierenden Unsicherheiten. Daher bildet das Infinite Hangmodell (IHM) als Repräsentant der Kategorie der physikalisch-basierten (geotechnischen) Methoden in der Abb. 3-1 den Endpunkt großmaßstäblicher Analysen.

Mit kleiner werdenden Maßstäben und größer werdenden Modellierungsgebieten nimmt auch der Aufwand bei der Erhebung geotechnischer Daten massiv zu. Die große Variabilität in den physikalischen Bodenkennwerten bietet in kleinen Maßstäben kaum Möglichkeiten, die Unsicherheiten angemessen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund gewinnen die statistischen Methoden, die die physikalischen Prozesse nicht mehr im Detail betrachten, zunächst an Bedeutung. Werden die Maßstäbe noch kleiner, wird die Generalisierung in den Informationsebenen so groß, dass selbst bei sehr vielen Be-

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

obachtungsdaten die statistischen Modelle, bedingt durch generalisierungsbedingten Fehlzuordnungen zwischen beobachteten Ereignissen und den Informationsebenen (z. B. Petrographie), immer ungenauer werden. Irgendwann ist der Punkt erreicht, wo der Aufwand, ein statistisches Modell aufzusetzen (Erhebung repräsentativer Inventare), den Nutzen deutlich übersteigt.

Die heuristischen Methoden werden mit kleiner werdenden Maßstäben zwar nicht genauer, benötigen jedoch keine Beobachtungsdaten und sind einfacher zu handhaben. Hinzu kommt, dass die Fehlzuordnungen aus den Eingangsdaten nicht mehr berücksichtigt werden, sondern allein die Bewertung durch einen Experten oder ein Expertengremium über die Wichtigkeit eines Parameters entscheidet (plausible Modelle).

Die Abb. 3-1 schematisiert die Anwendbarkeit der betrachteten Modellierungsmethoden unter Berücksichtigung von Informationen unterschiedlicher Maßstabsebenen.

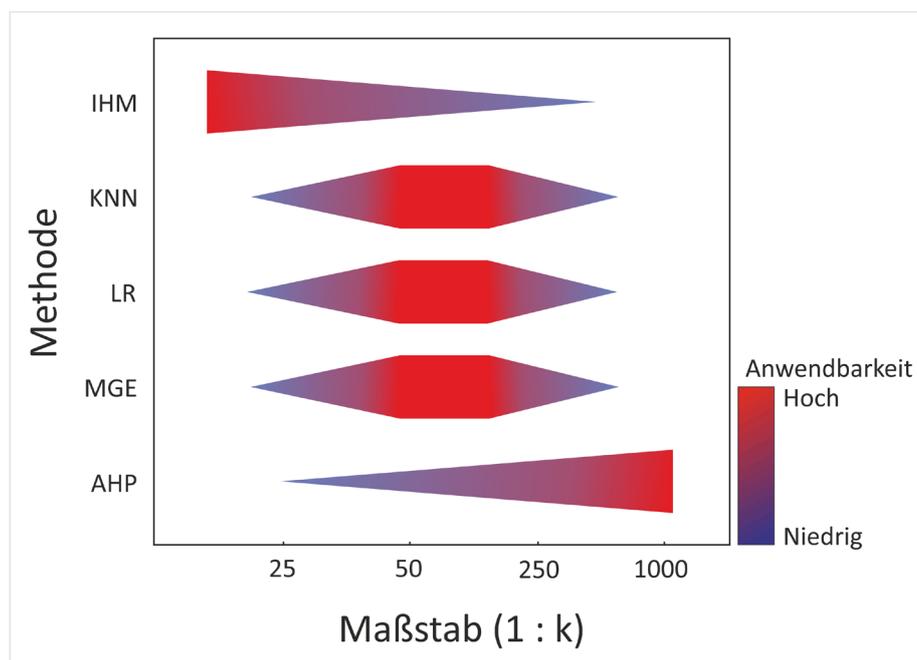


Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Anwendbarkeit der betrachteten Modellierungsmethoden unter Berücksichtigung von Informationen unterschiedlicher Maßstabsebenen ($k = \text{Tausend}$).

Somit stellt die Frage nach dem Zielmaßstab des Modells bereits ein selektives Kriterium für die Methodenvorauswahl dar. Dabei handelt es sich nicht um Darstellungsmaßstäbe, sondern um Maßstabsgültigkeit in Relation zu den Maßstäben der involvierten Informationsebenen.

Das Fließdiagramm in Abb. 3-2 liefert eine strukturierte Anleitung zur Vorauswahl einer geeigneten Methode auf der Grundlage des Zielmaßstabs und der Datenverfügbarkeit. Der Entscheidungsprozess beginnt mit der Festlegung auf den Zielmaßstab, der durch den Zweck des zu erstellenden Produkts und dessen Anwendungsbereich definiert ist. Bei der nachfolgenden Prüfung der Datenverfügbarkeit wird zwischen den Digitalen Geländemodellen (DGM) und anderen Informationsebenen unterschieden. Ein DGM liefert die geomorphologischen Parameter eines Untersuchungsgebiets und ist damit eine fundamentale Informationsebene, an der die Machbarkeit einer Analyse gekoppelt werden sollte. Um die Auflösung des gewählten Zielmaßstabs zu gewährleisten, muss ein DGM in korrespondierender Auflösung abrufbar sein. Das Fließdiagramm (Abb. 3-2) gibt die Mindestanforderung an das DGM für

den Zielmaßstab an (Feld oberhalb DGM). Ist ein DGM in der geforderten Mindestauflösung nicht vorrätig, muss der Zielmaßstab der Analyse angepasst werden. Entspricht das DGM dieser Anforderung, ist zu prüfen, ob weitere Informationsebenen oder Parameter, die nicht aus dem DGM abgeleitet werden können (z. B. Petrographie, Landbedeckung oder Abstand zu tektonischen Elementen) im Zielmaßstab disponibel bzw. für die Abschätzung der Empfindlichkeit von Relevanz wären.

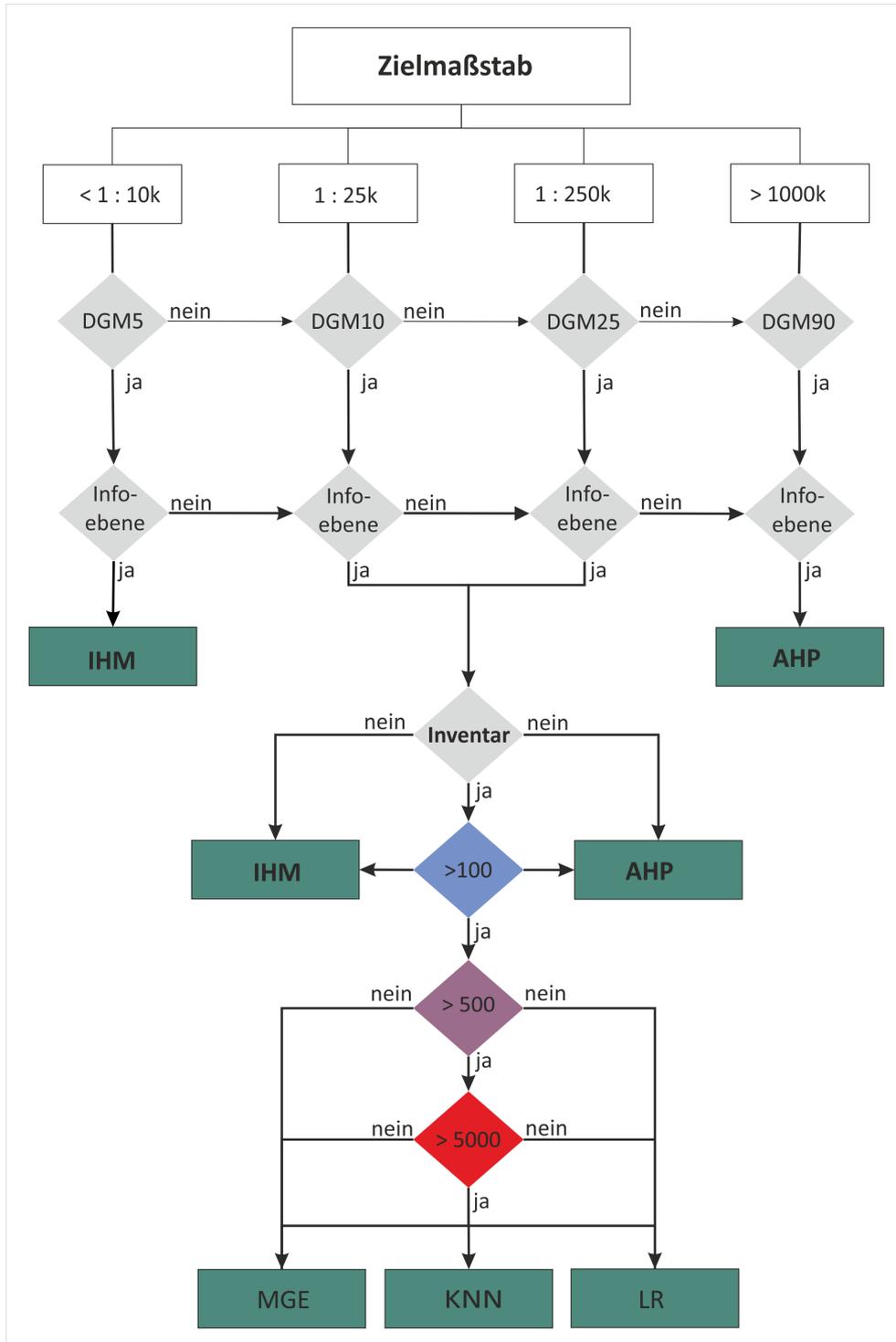


Abb. 3-2: Schematische Darstellung der Auswahl einer geeigneten Modellierungsmethode in Abhängigkeit vom Maßstab der verfügbaren Informationsebenen; die Zahlen in den farbigen Rauten geben die Mindestanzahl an Rutschungsereignissen wider.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Eine Übersicht über die notwendigen Eingangsparameter für eine regionale Empfindlichkeitsanalyse gegenüber einem bestimmten Prozesstyp in einem definierten Zielmaßstab ist in Abb. 3-3 zusammengefasst.

Daraus ergibt sich zum Beispiel für eine Sturzprozess-Modellierung im Zielmaßstab 1 : 250 000, dass der aus dem DGM abgeleitete Parameter Hangneigung hinreichend ist, um das räumliche Gefährdungspotenzial abzuschätzen. Die Kategorie *Weitere* subsumiert relevante Parameter, die prozess- und lokalspezifisch in die Analyse eingebunden werden können (z. B. Abstand zu Fließkanälen, Abstand zu tektonischen Elementen, Klüftigkeit).

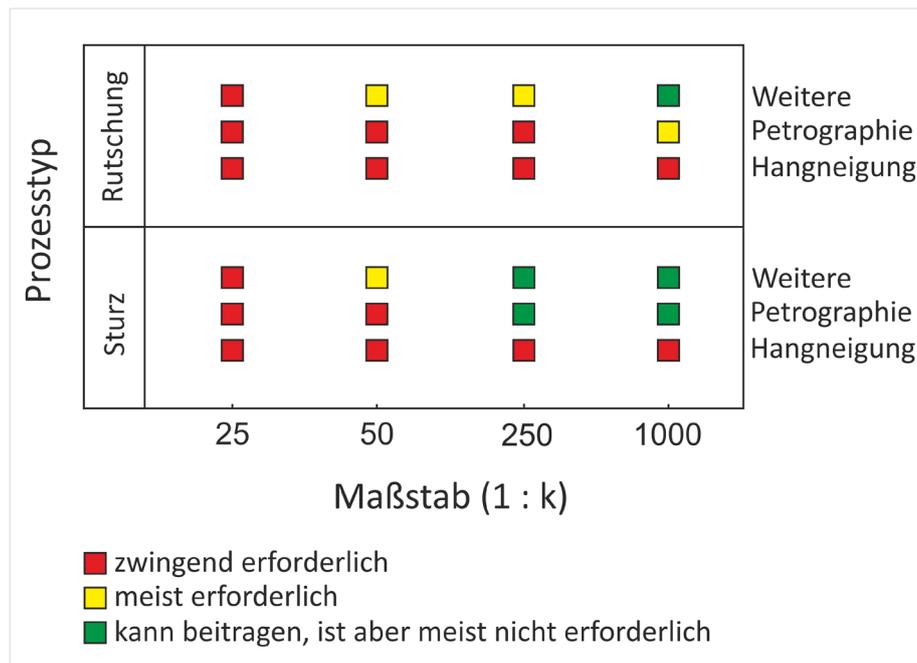


Abb. 3-3: Übersicht über die notwendigen Eingangsparameter für eine regionale Empfindlichkeitsanalyse gegenüber einem bestimmten Prozesstyp in einem definierten Zielmaßstab, unterschieden nach Sturz- und Rutschprozess (Rotations- und Translationsrutschungen undifferenziert).

Sind für den gewählten Zielmaßstab im Flussdiagramm (Abb. 3-2) außer einem DGM keine weiteren Informationsebenen zwingend erforderlich (Abb. 3-3), kann an dieser Stelle die Entscheidung über weitere Informationsebenen übersprungen werden.

Stehen weitere Informationsebenen in erforderlicher Auflösung und Maßstab zur Verfügung, wird im nächsten Schritt geprüft, ob auf ein Hangrutschungsinventar (Ereignisinventar) zurückgegriffen werden kann. Ist dies nicht der Fall, muss auf beobachtungsunabhängige Methoden wie das Infinite Hangmodell oder auf den Analytischen Hierarchieprozess ausgewichen werden. Welche der beiden Methoden dann anzuwenden ist, ist wiederum vom Zielmaßstab und dem Massenbewegungstyp abhängig. In großen Maßstäben würden sich die physikalisch-basierten Methoden grundsätzlich besser eignen. Wenn es sich beim Massenbewegungstyp aber nicht um flachgründige Translationsrutschungen handelt, wäre statt der Methode des Infinite Hangmodells eine geeignete geotechnische Methode vorzuziehen (z. B. [Lamellenverfahren](#)).

Die alleinige Existenz eines Hangrutschungsinventars bedeutet aber nicht, dass alle statistischen Methoden und Methoden des Maschinellen Lernens gleichermaßen angewendet werden können. Hier spielt die Anzahl der erfassten Ereignisse eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich sollte nicht auf statistische Methoden zurückgegriffen werden, wenn die Anzahl der Ereignisse den Wert 100 unterschreitet. Bei Werten zwischen 100 und 500 können bereits bivariate statistische Methoden angewendet

werden. Diese beanspruchen aufgrund der unabhängigen Verarbeitung der einzelnen Parameter weniger Beobachtungen, um ein statistisches Modell zu trainieren. Für multivariate Verfahren werden Ereignisumfänge von mindestens 500 empfohlen. Hierbei handelt es sich jedoch nur um einen groben Richtwert. Fallbezogen wird z. B. für die Logistische Regression folgende Faustformel angegeben:

$$n = 100 + xz.$$

Hierin stellt n die notwendige Anzahl der Ereignisse, x die Mindestanzahl der Beobachtungen pro unabhängige Variable (Parameterklasse) und z die Anzahl der unabhängigen Variablen im Modell dar. Die Mindestanzahl x schwankt dabei zwischen 10 und etwa 50 (z. B. [Peduzzi et al., 1996](#); [Austin & Steyerberg, 2017](#); [Bujang et al., 2018](#)).

Der Einsatz von KNN sollte erst bei Existenz von sehr großen Inventaren geprüft werden. Erst unter dieser Randbedingung kann von der Flexibilität und der Fähigkeit dieser Methodik, komplexere Zusammenhänge zu begreifen, profitiert werden.

Liegen Inventardaten in hoher Quantität vor, die den Einsatz der drei Methoden MGE, LR und KNN rechtfertigen würden, muss die Komplexität, die Transparenz und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis abgeschätzt werden. Letzteres wird auch durch die Qualifikation und Erfahrung der ausführenden Fachkraft bestimmt. In Abb. 3-4 sind die unterschiedlichen Modellierungsmethoden im Hinblick auf ihre relative Komplexität und Transparenz bewertet.



Abb. 3-4: Bewertung der Modellierungsmethoden nach ihrer Komplexität und Transparenz.

3.2 Anwendung praktischer Arbeitsabläufe (Workflows)

Alle nachstehend thematisierten Workflows folgen einer identischen Struktur:

- Datenvorbereitung (I);
- Analyse (II);
- Nachbereitung (III).

3.2.1 Methode der Gewichteten Evidenzen und Logistische Regression

Die Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) und die Logistische Regression (LR) werden als statistische Verfahren gemeinsam betrachtet. In Bezug auf die praktische Implementierung gelten für beide Methoden ähnliche Sachverhalte, so dass auf gemeinsame Textabschnitte verwiesen werden kann. Jedoch sind Unterschiede speziell in der Datenverarbeitung zu berücksichtigen, die in den Erläuterungen daher explizit hervorgehoben sind. Unterkapitel, die nur für eine der beiden Methoden gültig sind, tragen die entsprechende Erweiterung LR oder MGE. Die Abb. 3-5 und die Abb. 3-6 illustrieren die generellen Schritte der Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit mit diesen beiden Methoden schematisch.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

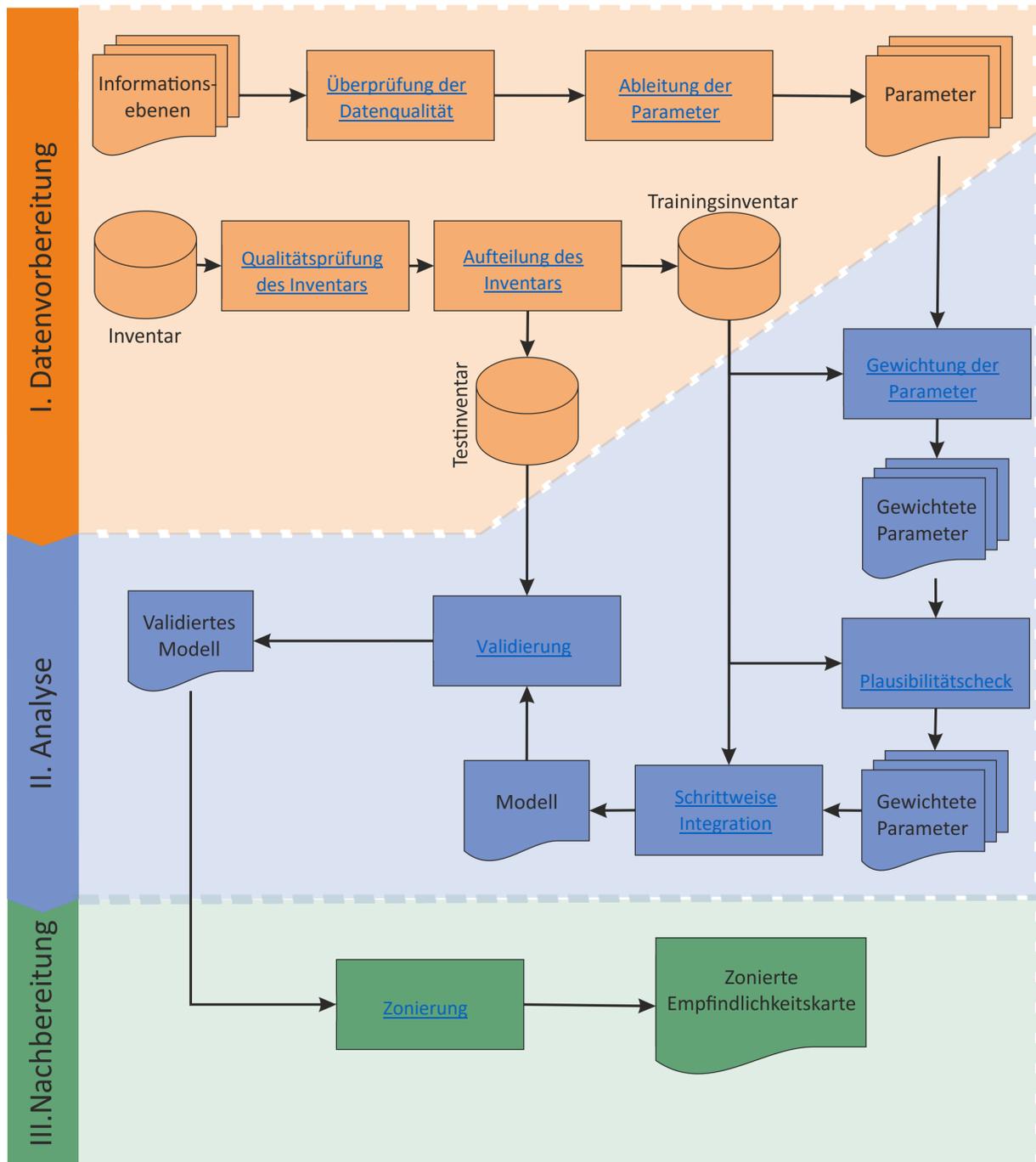


Abb. 3-5: Schematischer Workflow zur Anwendung der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.

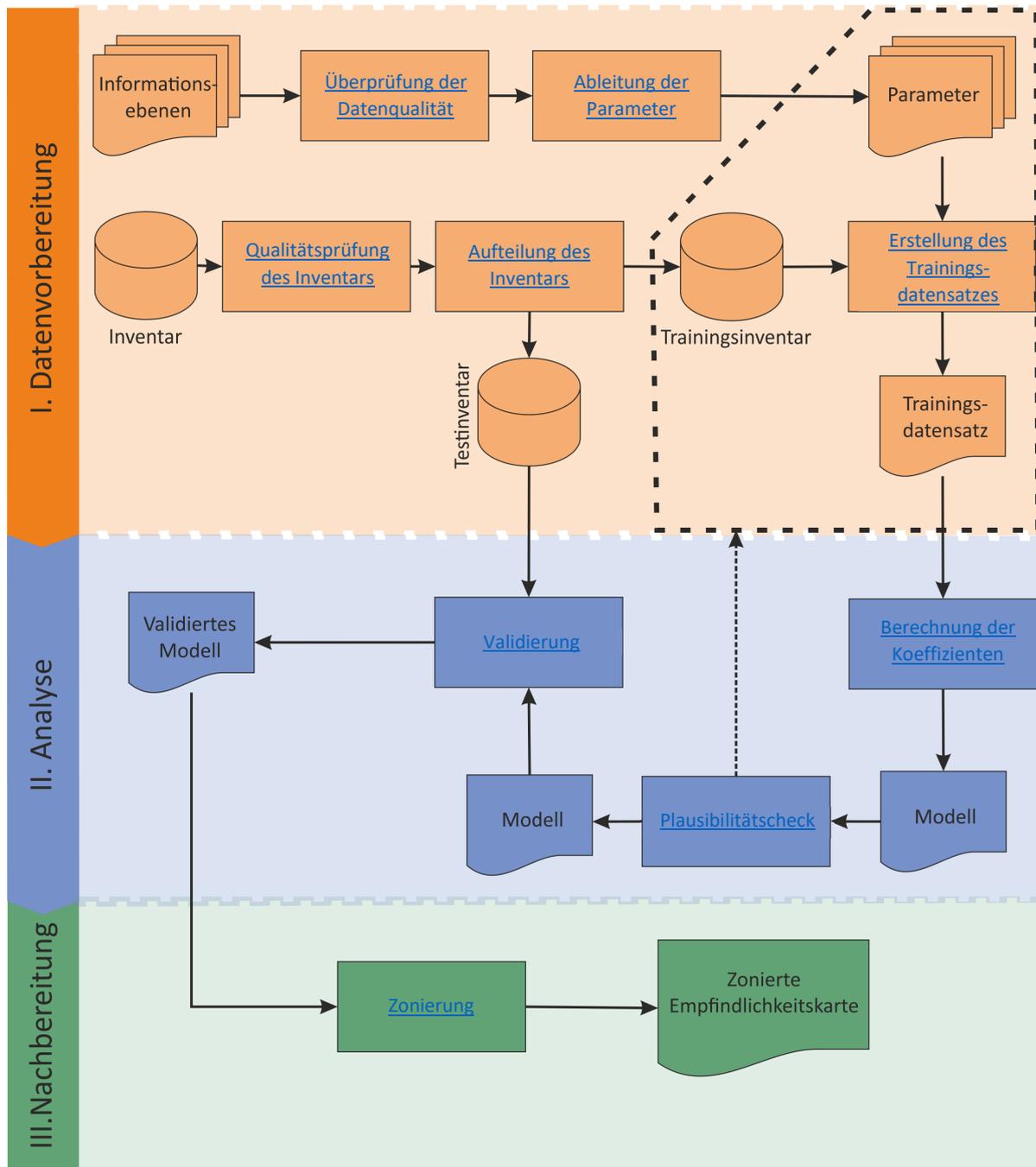


Abb. 3-6: Schematischer Workflow zur Anwendung der Logistischen Regression (LR) für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit; der schwarz-gestrichelt umrandete Bereich zeigt die Schritte, die in der Rekursion wiederholt werden müssen, wenn das Modell modifiziert werden soll.

3.2.1.1 Datenvorbereitung

Da die Abschätzung der Hangrutschungsempfindlichkeit in den Bereich der überwachten Klassifikation einzuordnen ist, bedarf es Beobachtungsdaten als sogenannte abhängige Variable (Labels) und Grunddaten (Features) als unabhängige Variablen. Sowohl die Methode der Gewichteten Evidenzen als auch die der Logistischen Regression setzen voraus, dass die abhängige Variable binär ist und die unabhängigen Variablen untereinander keine hohe Korrelation aufweisen.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

3.2.1.1.1 Überprüfung der Datenqualität (ohne Inventar von Massenbewegungen)

Im Entscheidungsdiagramm (Abb. 3-2) zur Auswahl einer geeigneten Analysemethode wurde neben der Maßstabsfokussierung das Augenmerk vor allem auf die Datenquantität und damit auf die technische Machbarkeit gelegt. Jedoch wird dringend angezeigt, auch die Qualität der Daten vor der Analyse zu prüfen.

Datenherkunft und Metadaten

Es ist hilfreich, folgende Fragen zu beantworten:

- Ist die Herkunft der Daten bekannt (vertrauenswürdige Quelle, Metadaten)?
- Ist die Art der Datenerhebung bekannt (z. B. Feldkartierung für Massenbewegungen, Auswertung von Luftbildern)?
- Lassen sich aus den beiden oberen Punkten bereits Limitierungen, z. B. besonders große Unsicherheiten in der Verortung von Ereignissen, für den Einsatz der gewählten Methode ableiten?

Visuelle Kontrolle

Generell sind die Rohdaten visuell auf Homogenität zu inspizieren. Es sollten keine Auffälligkeiten, die aus der Datenverarbeitung resultieren können, erkennbar sein. Beispiele hierfür sind auffällige Kanten im digitalen Höhenmodell oder Artefakte jeglicher Art, die bei der Ableitung von Hangneigung und Wölbung aus dem Höhenmodell nicht selten beobachtet werden.

Bei hochaufgelösten Höhenmodellen (Oberflächenmodellen) können z. B. auch Baumkronen, Straßenzüge oder Gebäudeumrisse erkennbar sein, die im Rahmen der Empfindlichkeitsanalyse gegenüber Massenbewegungen eine Fehlerquelle darstellen und vermieden werden sollten.

Bei Informationsebenen aus Kartenwerken ist darauf zu achten, dass die Ränder der Kartenblätter abgeglichen sind.

Darstellung der räumlichen Verteilungen von Parameterklassen

Nach der visuellen Kontrolle ist es hilfreich, die Häufigkeitsverteilung der Parameterklassen graphisch darzustellen. Dazu eignen sich z. B. Säulendiagramme oder Histogramme. Aus der Verteilung der Klassen lassen sich bereits erste Hinweise zur möglichen Klassifikationsstärke eines Parameters ableiten. Auch mögliche Unsicherheiten können bereits erkannt werden. So können Parameterklassen mit sehr kleinen Flächenanteilen eine Unsicherheitsquelle darstellen, da sie sehr einfach durch eine andere Parameterklasse überlagert werden.

Als vorbereitender Schritt kann auch die statistische Kontingenz der unabhängigen Variablen zueinander analysiert werden. Zeigen die unabhängigen Variablen bereits einen starken Zusammenhang, so ist es wahrscheinlich, dass sie auch einen ähnlichen Zusammenhang mit den Massenbewegungen aufweisen werden. Statistisch wird es dann schwierig, die Effekte den einzelnen Parameterklassen belastbar zuzuordnen. Hierfür sollten Plausibilitätschecks durchgeführt werden. Beispielsweise zeigen bestimmte Landnutzungsklassen häufig einen Zusammenhang mit dem Relief. So ist es nicht ungewöhnlich, dass die Parameterklasse *Wald* oder *dichte Vegetation* in einer hügeligen oder bergigen Landschaft vor allem in steileren Hanglagen zu beobachtet ist. Solche Flächen sind für den Ackerbau nicht geeignet und werden naturbelassen oder gezielt forstwirtschaftlich genutzt. Durch die Koinzidenz mit

der Hangneigung erhalten die bewaldeten Flächen in der Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen nicht selten hohe statistische Gewichte, obwohl diese im ursächlichen Verständnis der Erosion entgegenwirken und eher als stabilisierender Faktor (Schutzwald-Funktion) betrachtet werden könnten.

3.2.1.1.2 Überprüfung der Qualität des Inventars von Massenbewegungen

Bei den Inventaren (auch Ereigniskataster) handelt es sich um Sammlungen (z. B. Datenbanken) von attributierenden und/oder räumlichen Informationen über einzelne Massenbewegungsereignisse. Für die datenbasierten Modellierungsmethoden bilden Inventare einen Schlüsselparameter. Die Beobachtungsdaten werden genutzt, um jenseits der punktuellen Informationen räumliche Empfindlichkeitsmodelle zu erzeugen bzw. überwacht zu trainieren und final zu evaluieren.

Die [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie \(2016\)](#) hat die Mindestanforderungen für derartige [Inventare](#) mit empfehlendem Charakter für die SGD in Deutschland definiert.

Aus Sicht einer ganzheitlichen Modellierung erfüllt ein Inventar im Kontext der Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit idealerweise folgende Kriterien:

- **Lokation und Geometrie:**
 - Die Massenbewegung ist genau verortet;
 - Die Abrisskante ist als Polylinie, mindestens aber als Punkt erfasst;
 - Der Ablösungsbereich ist zusätzlich als Polygon ausgehalten;
 - Der Ablagerungsraum ist getrennt als Polygon ausgehalten.

Insgesamt gilt, dass eine Geometrieangepassung von einem Polygon oder einer Polylinie zu einem Punkt immer einfacher ist als von einem Punkt auf die genaue Ausdehnung eines Polygons oder einer Polylinie zu schließen.

Warum sind die genaue Lokation und die Geometrie wichtig?

Die lagetreue Verortung von Massenbewegungen ist sowohl für die Modellierung als auch für die Evaluierung wichtig. Ist die Lokation einer Massenbewegung nicht hinreichend genau bekannt, wird diese z. B. in einer statistischen Modellierungsmethode mit falschen Merkmalen assoziiert.

Ein sehr genaues physikalisch-basiertes Modell kann infolge einer statistischen Evaluierung mit einem ungenauen Inventar als moderat oder sogar schlecht bewertet werden.

Auch ist das getrennte Aushalten von Ablöse- (auch Anriss- oder Ausbruchsbereich) und Ablagerungsbereichen wichtig. Nur so können die Merkmale in den Arealen, wo das Versagen auch tatsächlich stattgefunden hat, statistisch erfasst werden. Großvolumige Rutschungsereignisse betreffen, neben dem Ablöse- und Transitbereich, zwar auch abgelegene flachere Regionen, die Transportweite einer Massenbewegung (engl.: runout) und damit der Prozessraum wird aber im Rahmen der Empfindlichkeitsanalyse nicht betrachtet.

- **Zeitpunkt:** Der Zeitraum der Rutschung lässt sich durch einen Zeitmarker genau feststellen oder zumindest auf einen begrenzten Zeitraum, z. B. auf einen Monat oder ein Jahr, eingrenzen.

Warum sollte der Zeitpunkt bekannt sein?

Der Beobachtungszeitraum des Inventars ist aus zweierlei Sicht von Bedeutung. Zum einen können auf der Grundlage von Fernerkundungstechniken in sehr kurzer Zeit umfangreiche Inventare erzeugt werden, die ggf. aber nur auf ein [Trigger-Ereignis](#) zurückgeführt werden können. Solche Inventare werden auch ereignisbezogene Inventare (engl.: event inventory) genannt. Obwohl diese Inventare meist einen hohen Vollständigkeitsgrad aufweisen, muss bei der Analyse ihre räumliche Repräsentanz besonders genau betrachtet werden. Oft geht die räumliche Verteilung der Massenbewegungen in einem solchen Inventar mit der Intensität des Triggers einher. Ein sehr starkes Niederschlagsereignis kann z. B. sehr lokal eine Vielzahl von Massenbewegungen auslösen. Wird dann ein viel größeres Gebiet auf Grundlage eines solchen Inventars bewertet, kann das Ergebnis durch dieses lokale Cluster signifikant verzerrt werden. Zum anderen wird der Zeitmarker für die indirekte Zuweisung der Merkmale benötigt. Um einen kausalen Zusammenhang zwischen einem Merkmal und dem Ereignis feststellen zu können, muss die temporäre Konsistenz gewahrt bleiben. Es wäre beispielsweise unzulässig, ein historisches Ereignis aus dem Mittelalter mit der heutigen Landbedeckung zu attribuieren. Von der Zeitlichkeit sind insbesondere Parameter betroffen, die einer starken Dynamik, sowohl durch natürliche als auch durch anthropogene Einflüsse, unterliegen. Auch der Einsatz sehr hoch aufgelöster Höhenmodelle, die nach der Massenbewegung erstellt wurden, können zu falschen Zusammenhängen zwischen Massenbewegung und Reliefformen führen. Denn durch die Massenbewegung wurde die ursprüngliche Oberfläche bereits verändert und stellt somit die Folge und nicht die Ursache der Massenbewegung dar.

- **Massenbewegungstyp:** Es liegt eine konkrete Typisierung oder eine Beschreibung der Rutschmasse samt einer Charakterisierung des Versagensmechanismus vor, so dass eine Klassifikation des Massenbewegungstyps möglich ist.

Warum ist die Unterscheidung von Massenbewegungstypen wichtig?

Massenbewegungen können in unterschiedliche Typen klassifiziert werden. Jedem Typ liegt ein anderer Prozess zugrunde, der in den Modellierungen zu berücksichtigen ist. So hat beispielsweise das Infinite Hangmodell nur für flache Translationsrutschungen mit einem Verhältnis Tiefe zu Länge von $< 0,1$ Gültigkeit. Für Rutschungen mit größeren Verhältnissen von Tiefe zu Länge wird der Standsicherheitsfaktor generell zu niedrig bewertet. Auch die statistische Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit zeigt, dass für unterschiedliche Massenbewegungstypen unterschiedliche Merkmale (Schlüsselparameter) anzusetzen sind.

- **Trigger:** Der Auslöser ([Trigger](#)) der Rutschung ist entweder genau bekannt oder vermutet.

Ebenso wie die Parameter aus den Informationsebenen ist die räumliche Verteilung der Massenbewegungen visuell zu inspizieren. Um die Verteilungsmuster besser einschätzen zu können, sind topographische Informationen hilfreich. Bei der Inspektion sollte insbesondere darauf geachtet werden, ob in der Verteilung auffällige Cluster oder Ausrichtungen der detektierten Massenbewegungsereignisse an linearen Infrastrukturelementen zu beobachten sind. Das Letztere ist häufig bei Inventaren, z. B. von Straßenbetreibern, zu beobachten, wo die Ereignisse infrastrukturelle Schäden verursacht haben. Damit repräsentieren solche Inventare nicht die statistische Erhebungsgesamtheit und sollten daher nicht oder nur in begrenztem Maße in großflächigen Analysen einbezogen werden.

3.2.1.1.3 Ableitung der Parameter

Grundsätzlich können sehr unterschiedliche Parameter aus den vorhandenen Informationsebenen in die statistischen Analysen einfließen. Liegen Punktdaten oder Polylinien vor, müssen diese in flächenhafte Datensätze durch die Umwandlung in Distanz- oder Dichteraster überführt werden.

Für bivariate statistische Analysen (z. B. MGE) sind die kontinuierlichen Parameter zu diskretisieren. Das hat Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Die Diskretisierung ermöglicht das Erkennen von nichtlinearen Beziehungen innerhalb eines Parameters;
- Die Berechnung der statistischen Gewichte wird zu einer einfachen Häufigkeitsanalyse, die auch manuell erfolgen kann.

Nachteile:

- Der Diskretisierungsprozess ist subjektiv: die Bildung der Grenzwerte zur Abtrennung der Klassen aus kontinuierlichen Daten liegt im Ermessen der bearbeitenden Fachkraft;
- Diskretisierung bedingt Informationsverlust: durch Kompilation von Werten in eine Wertespanne (Klasse) gehen Details verloren;
- Diskretisierung erzeugt scharfe Klassengrenzen: das erzeugte Muster der Hangrutschungsempfindlichkeit kann unnatürlich wirken.

Aus der praktischen Arbeit der im MBiD-Projekt involvierten Institutionen können folgende sachdienliche Empfehlungen gegeben werden.

Einer der wesentlichen Parameter für die Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit ist die Hangneigung. Diese lässt sich heute auf Basis Digitaler Geländemodelle unter Nutzung unterschiedlicher Algorithmen ableiten. Ein Standardalgorithmus, der in den meisten GIS-Applikationen implementiert ist, ist z. B. die Ermittlung der Hangneigung nach [Horn \(1981\)](#). In einem Gleitfenster mit einer definierten Anzahl von 3 x 3 Rasterzellen wird der Gradient für die mittlere Rasterzelle ermittelt. Das Ergebnis ist ein Hangneigungsraster mit steilsten Gradienten in Grad oder in Prozent. Das kontinuierliche Raster kann nachfolgend in Gradklassen eingeteilt werden. Es eignen sich 5°-Klassen, um einen ersten Überblick zu gewinnen. Je nach Datenqualität können Anpassungen vorgenommen werden.

Für alle anderen kontinuierlichen Datensätze (im Zweifelsfall auch für die Hangneigung) ist der Einsatz von Sensitivitätsanalysen ratsam, die auf einer vorläufigen statistischen Analyse basieren. Die Sensitivitätsanalyse besteht aus zwei Teilen:

- **Teil 1:** Der erste Schritt zielt auf die Entwicklung einer Arbeitshypothese. Dadurch können noch vor der statistischen Auswertung der Daten mögliche Effekte der Parameter bedacht werden. Bei der Hangneigung wird in der Regel erwartet, dass die statistischen Gewichte mit steigendem Gradienten zunehmen sollten. Die Analyse der Distanzraster wird häufig mit der Annahme verknüpft, dass der Einfluss einer punktuellen oder linearen Struktur und damit auch die statistischen Gewichte in der näheren Umgebung größer sind und mit zunehmender Entfernung abnehmen sollten. Grundsätzlich können solche Hypothesen beliebig im Ermessen des Modellierers und seinem Verständnis der Prozesse generiert werden. Die Hypothesenbildung

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

im Vorfeld soll vor allem eine Überinterpretation der statistischen Ergebnisse vermeiden. Dadurch ist eine Interpretation der statistischen Ergebnisse nachvollziehbarer.

- **Teil 2:** Im zweiten Schritt wird der Datensatz in gleich große Klassen mittels Quantile unterteilt (z. B. in ArcGIS® mit Klassifikationsverfahren in der Spatial Analyst® Toolbox). Mit dem vorläufig klassifizierten Distanzraster wird die Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen durchgeführt, d. h. die statistischen Gewichte werden bestimmt (s. Kapitel 3.2.1.2.1).

Die Visualisierung der Ergebnisse kann z. B. in einem Wasserfalldiagramm erfolgen (s. unten). Dieses illustriert, wie sich die Gewichte über die Distanzklassen verändern (s. Kapitel 3.2.1.2.3). Wird die Hypothese durch die Daten bestätigt, kann gemäß den Gewichtsverteilungen eine feinere Einteilung der proximalen Klassen vorgenommen werden und die distalen Klassen, die keinen Beitrag leisten, zusammengefasst werden.

Für multivariate Methoden wie die Logistische Regression können die kontinuierlichen Daten direkt in die Analyse eingebunden werden. Aber auch hier bedarf es einer Datenvorbereitung²⁷. Da die kontinuierlichen Daten sehr inhomogene Wertebereiche aufweisen können und zusammen mit binären nominalen Daten verrechnet werden, ist es sinnvoll, diese auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 zu normieren. Dies erfolgt anhand der Formel:

$$x = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

worin x der normalisierte Wert, x_{\min} das Minimum, x_{\max} das Maximum und x_i – der Wert der Rasterzelle ist.

Im Gegensatz zur Methode der Gewichteten Evidenzen, wo die nominalen Daten direkt in der Analyse einfließen, muss für die Logistische Regression der nominelle Datensatz in binäre Variablen (auch Dummy-Variablen) zerlegt werden (Abb. 3-7). Probate Werkzeuge hierfür sind boolesche Operationen im GIS (manuell) oder automatisierte Routinen in Python und R (Box 3-1).

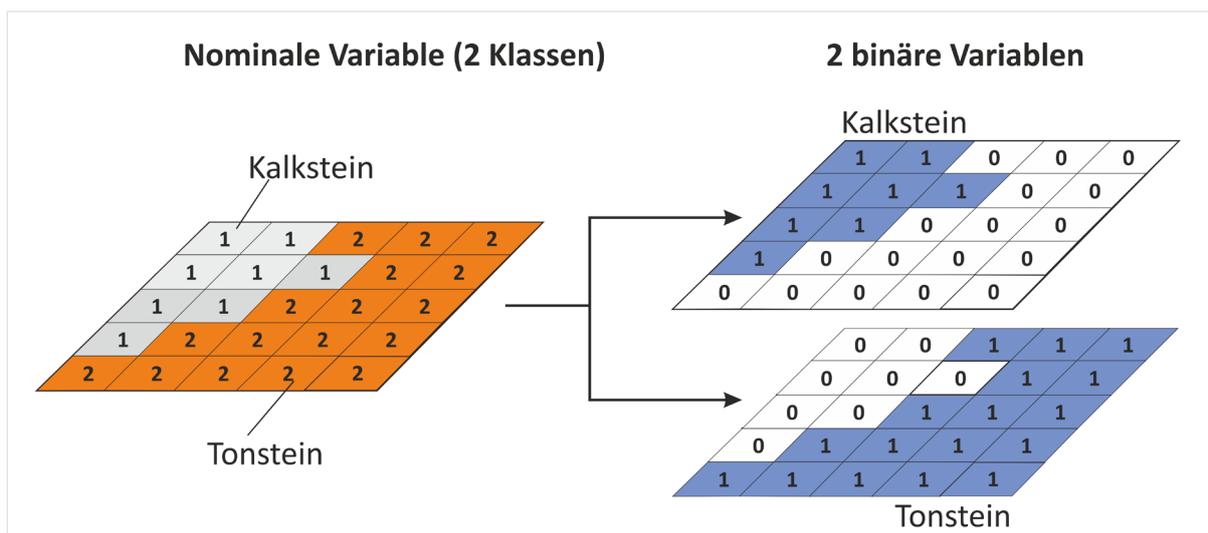


Abb. 3-7: Schematische Darstellung der Zerlegung einer nominalen Variable bestehend aus zwei Klassen in zwei binäre Variablen.

²⁷ Grundsätzlich wird eine Normierung der kontinuierlichen Daten in der Logistischen Regression nicht zwingend vorausgesetzt. Eine Normierung bewirkt jedoch bessere Konvergenzraten (schnellere Lösung) bei Einsatz von Algorithmen des Maschinellen Lernens und vereinfacht die Vergleichbarkeit der Regressionskoeffizienten.

Box 3-1: Pseudocode Binär-Zerlegung eines nominalen Datensatzes

```

Programm Erstelle binäre Raster (Rasterdatei) /*Datei mit nominalen Daten*/
  Lade Rasterdatei
  Bestimme Projektion, Ausdehnung, Auflösung
  Erstelle Kategorie-Feld /*enthält die nominalen Werte der Rasterdatei*/
  Für i=1 bis Anzahl von Kategorien in Kategorie-Feld
    Wenn Kategorie[i], setze 1
    Wenn nicht Kategorie[i], setze 0
  Schreibe Kategorie[i]-Rasterdatei
Ende Programm Erstelle binäre Raster

```

3.2.1.1.4 Aufteilung des Inventars

Das Aufteilen des Inventars ist eine gängige Praxis, um einen Teil der Daten als Validierungsdatsatz zu verwenden. In den statistischen Analysen und den Methoden des Maschinellen Lernens werden grundsätzlich die Beobachtungsdaten (auch Labels) in zwei bis drei Datensätze aufgeteilt.

Der erste Datensatz wird zur Erzeugung des Modells verwendet und wird als Trainingsdatensatz oder Trainingsinventar bezeichnet. Ein Testdatensatz und ein Validierungsdatsatz können folgen.

Die Aufgabe des Testdatensatzes dient einer weiteren indirekten Justierung des Modells. Der Testdatensatz wird nicht in die Modellierungsprozedur eingebunden, sondern lediglich als Überprüfungsmaß genutzt. Da das Modell trotzdem indirekt so angepasst werden kann, dass es auch den Testdatensatz abbildet, wird vermehrt ein dritter Datensatz abgetrennt, der einmalig zu Validierungszwecken herangezogen wird.

Für die Aufteilung des Inventars können unterschiedliche Strategien angewendet werden (s. [Kapitel 2.3.1](#)):

- **Räumliche Aufteilung (auch räumliche Kreuzvalidierung):** Ein Teil des Inventars wird z. B. in einem räumlich abgegrenzten Teilbereich verwendet. Voraussetzung dafür ist, dass innerhalb des räumlichen Ausschnittes auch die Parameterklassen repräsentativ vertreten sind (ausbalanciertes Verhältnis zum Gesamtuntersuchungsgebiet). Der Raum muss dabei nicht zwingend zusammenhängend sein. Es kann sich bei dieser Art von Aufteilung auch um eine stratifizierte Stichprobe handeln.
- **Randomisierte Aufteilung (wenn iterativ, auch Monte-Carlo-Kreuzvalidierung):** Es wird eine zufällige Stichprobe in einem prozentualen Umfang aus den Beobachtungsdaten gezogen, z. B. 80 % der Beobachtungsdaten.
- **Aufteilung nach zeitlichem Attribut (auch zeitliche Kreuzvalidierung):** Es wird das Datum der Ereignisse verwendet, um das Inventar aufzutrennen. Liegt z. B. eine multitemporäre Aufzeichnung von Massenbewegungsereignissen von 1990 bis 2020 vor, könnte eine zeitliche Grenze bei 2010 als Trennungsmerkmal gewählt werden. Alle Ereignisse vor 2010 würden dem Trainingsinventar und alle Ereignisse nach 2010 dem Testinventar zugeordnet.

3.2.1.1.5 Erstellung eines Trainingsdatensatzes (LR)

Anders als bei der Methode der Gewichteten Evidenzen, bei der die Parameter nach der Vorbereitung direkt in die Analyse eingebracht werden können, muss bei der Logistischen Regression ein Trainingsdatensatz erzeugt werden. Dies ist durch die Art und Weise begründet, wie die Daten in der

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Analyse verarbeitet werden. Während in der MGE-Analyse die Parameter unabhängig gewichtet werden, setzt die LR-Analyse als ein multivariates Verfahren auf eine gemeinsame Verarbeitung der Eingangsdaten.

Die Erstellung des Trainingsdatensatzes zielt darauf, die 2D-Rasterdaten in Spaltenvektoren zu überführen und in einer Datenmatrix zu strukturieren. Zusätzlich werden die Beobachtungsdaten (Labels) ebenfalls in Vektorform hinzugezogen (Abb. 3-8).

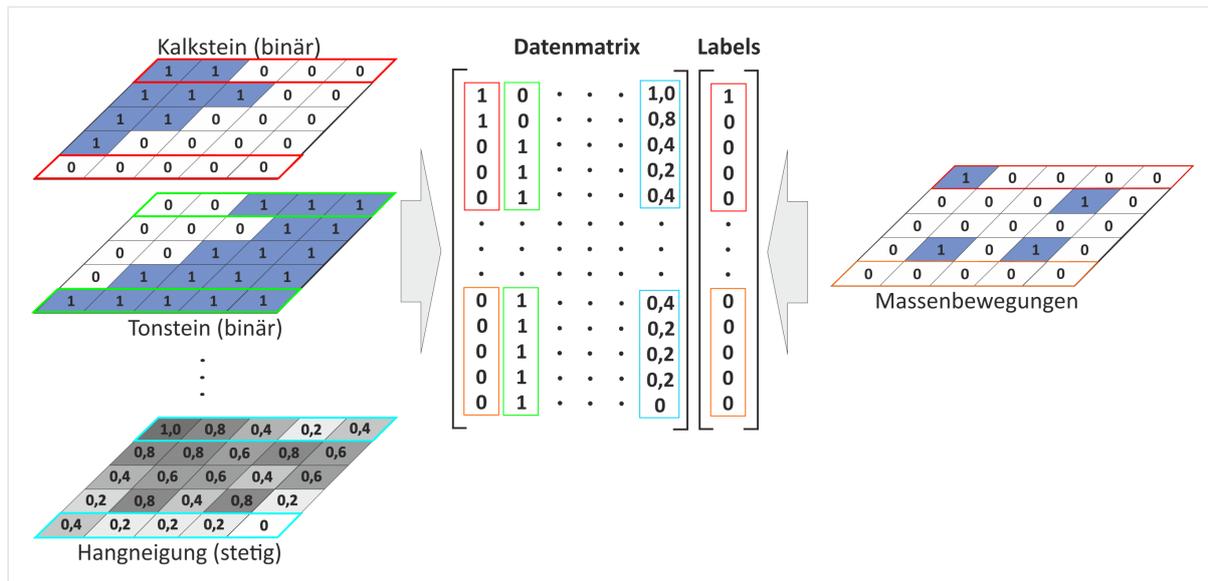


Abb. 3-8: Prinzipskizze zur Erzeugung eines Trainingsdatensatzes aus Rasterdaten.

Theoretisch können alle Daten in die Analyse einfließen. Bei sehr großen Rasterdatensätzen ist der rechnerische Aufwand jedoch sehr hoch. Daher wird meist mit Stichproben gearbeitet. Für die Stichprobe ist es wichtig, dass neben den Ereignispixeln auch Pixel berücksichtigt werden, die keine Ereignisse führen.

Die Herausforderung liegt in der Generierung einer repräsentativen Stichprobe. Moderne GIS-Pakete bieten in unterschiedlichen Modulen Algorithmen an (z. B. ArcGIS® Spatial Analyst®). Auch Programmiersprachen wie Python und R verfügen über Werkzeuge, die die Erzeugung von Trainingsdatensätzen vereinfachen. Trotzdem bleibt es oft im Ermessen der Fachkraft und damit subjektiv, wie der Trainingsdatensatz generiert werden soll.

3.2.1.2 Analyse

3.2.1.2.1 Gewichtung der Parameter (MGE)

Die hier vorgestellte Analyse ist rasterbasiert. Für die Berechnung der Gewichte werden die Häufigkeitsverteilungen der Rasterzellen ausgewertet. Die Gewichtung der Parameter ist ein Prozess, der in mehreren Schritten (a bis e) erfolgt:

a) Ermittlung der Rasterzellen-Häufigkeiten in den Klassen

Ein klassifizierter/diskretisierter Rasterdatensatz (Parameter) besteht aus Parameterklassen/Kategorien, die eine bestimmte Anzahl von Rasterzellen aufweisen. Die Größe jeder Klasse kann z. B. in ArcGIS® (für Integer-Raster) in der Rasterattributtabelle abgegriffen werden. Die

Gesamtanzahl der Rasterzellen ergibt den Wahrscheinlichkeitsraum und sollte für alle in die Analyse eingebundenen Parameter-Raster gleich sein.

b) *Ermittlung der Ereignishäufigkeit in den Parameterklassen*

Die Hangrutschungsereignisse, deren Geometrien als Punkt, Polygon oder Polylinie im Trainingsinventar geführt werden, werden zunächst in Raster umgewandelt. Die Rasterzellweite wird der Rasterzellweite der Analyse angepasst (gemäß der DGM-Gitterweite). Nachfolgend wird geprüft, wie viele der Rutschungsrasterzellen jeweils in den Parameterklassen enthalten sind. Dies kann z. B. über einfache Raster-Algebra gelöst werden:

- **Schritt 1:** Die Werte für alle Hangrutschungsrasterzellen werden über einen booleischen Operator in den Wert 1 umgewandelt. Das Hangrutschungsraster besteht nach dieser Operation aus Werten gleich 1 für alle Rasterzellen, die eine Hangrutschung führen und *NoData* für alle Rasterzellen ohne Hangrutschung.
- **Schritt 2:** Das Hangrutschungsraster wird mit dem Parameterraster multipliziert. Durch die Multiplikation mit *NoData* werden alle Rasterzellen im Ergebnisraster ebenfalls zu *NoData*. Die Multiplikation mit 1 liefert den Wert der Parameterklasse zurück. Damit bleiben im Ergebnisraster nur die Rasterzellen übrig, die eine Rutschung beinhalten. Der Wert jeder dieser Rasterzelle entspricht dem Wert der überlagernden Klasse. Aus der Rasterattributtabelle kann die Häufigkeit von Massenbewegungen in jeder Parameterklasse abgelesen werden (Abb. 3-9).

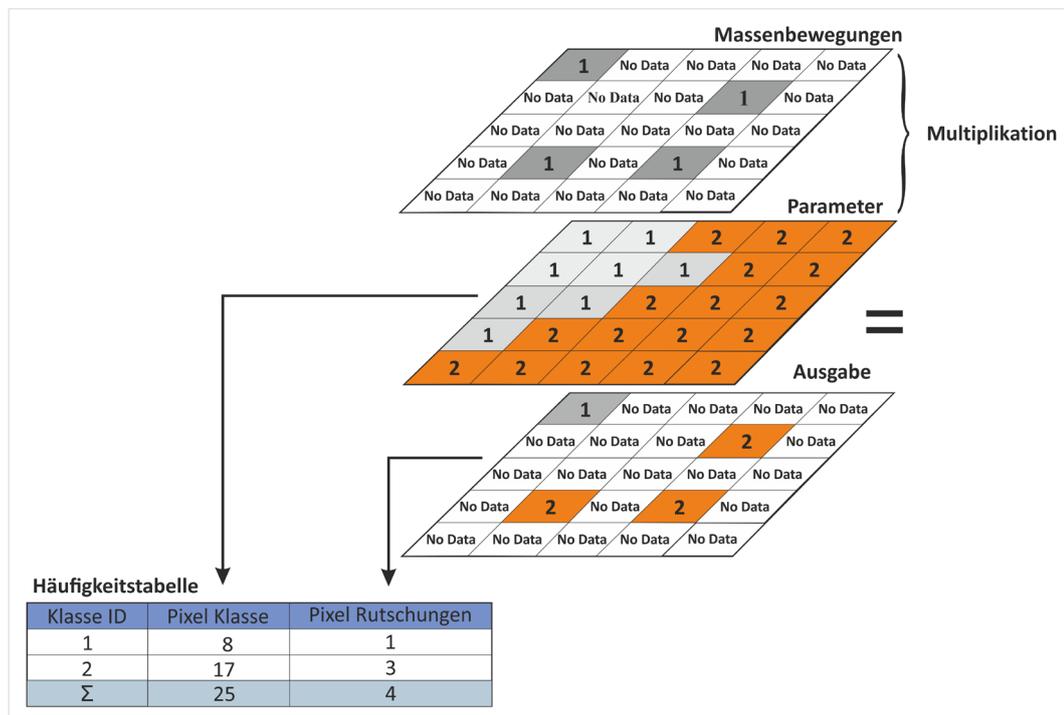


Abb. 3-9: Prinzipskizze zur Ermittlung der Häufigkeiten von Massenbewegungen in jeder Parameterklasse unter Nutzung der Rasteralgebra.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

c) Zusammenführung der Häufigkeiten in einer Tabelle

Die Anzahl der Rasterzellen für jede Parameterklasse und die Anzahl der Hangrutschungen in der jeweiligen Parameterklasse werden in einer Tabellenstruktur (z. B. MS Excel®) erfasst (Abb. 3-9).

d) Berechnung der Gewichte

Aus den Häufigkeiten lassen sich alle notwendigen statistischen Kenngrößen in der Tabelle berechnen (s. Kapitel 2.3.1). Eine Beispielrechnung zeigt die Tab. 3-2.

e) Berechnung der ROC-Kurve

Zusätzlich kann für jeden Parameter die ROC-Kurve bestimmt werden. Dies erfolgt nach der Bestimmung der Gewichte und kann ebenfalls für diskrete Daten in einer Tabellenkalkulation vorgenommen werden. Die Berechnung erfolgt schrittweise:

- Sortierung der Parameterklassen nach dem höchsten Gewicht in absteigender Reihenfolge;
- Normierung der Klassengrößen und der Anzahl der Hangrutschungspixel in den Klassen; hier ist zu beachten, dass die Anzahl der Klassenpixel um die darin enthaltenen Hangrutschungspixel zu korrigieren ist;
- Bildung von kumulativen Datenreihen für normierte Klassen und Hangrutschungen innerhalb der Klassen;
- Plotten der ROC-Kurve;
- Berechnung der Fläche unterhalb der ROC-Kurve mit der Gleichung:

$$AUC = \sum_{i=0}^n (x_i - x_{i-1})y_i - \left[\frac{(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{2} \right].$$

Die Berechnung der ROC-Kurve kann unter Nutzung des Berechnungsbeispiels in der Tab. 3-3 nachvollzogen werden.

Die Schritte *a* bis *e* sind manuell handhabbar. Um Unsicherheiten in der Modellierung besser zu erfassen, ist es jedoch ratsam, mehrmalige Wiederholungen der Schritte *a* bis *e* mit jeweils unterschiedlichen, zufällig gezogenen Stichproben aus dem Trainingsinventar durchzuführen. Dies führt zu einer verbesserten Abschätzung der Sensitivität der bestimmten statistischen Gewichte für fehlende Beobachtungsdaten. Die wiederholte Berechnung der Gewichte nimmt mehr Zeit in Anspruch und sollte daher zur Steigerung der Effizienz automatisiert werden. Dies kann in unterschiedlichen Skripten oder Anwendungen erfolgen. Eine Automatisierung hat auch den Vorteil, dass Flüchtigkeitsfehler bei vielen Analysezwischenschritten vermieden werden.

3.2.1.2.2 Berechnung der Koeffizienten (LR)

Die Lösung der Gleichungssysteme aus dem erstellten Trainingsdatensatz erfolgt numerisch in einem iterativen Prozess. Unterschiedliche Softwarepakete bieten Lösungen (Solver) für die Logistische Regression an, die auf dem [Newton-Raphson-Algorithmus](#) oder anderen Algorithmen des Maschinellen Lernens basieren.

In Programmiersprachen wie R oder Python beschränkt sich die Lösung meist auf eine Codezeile in der die Parameter an den Solver übergeben werden. Hier können sich je nach Anwendung Unterschiede ergeben, wie die Eingangsdaten einzugeben sind. Je nachdem wie der Solver strukturiert ist, beinhaltet die Datenmatrix in der ersten Spalte die Labels und in den nachfolgenden Spalten die Parametervektoren oder die Labels sind als ein separater Vektordatensatz einzufügen.

Je nach Datenumfang und Hardware-Kapazitäten benötigt die Berechnung der Koeffizienten einige Sekunden bis mehreren Stunden.

Box 3-2: Pseudocode für Logistische Regression in R.

```

Programm Logistische Regression (Rasterdateien eines Typs in einem Verzeichnis [*.tif],
    Name des Ausgabe-Wahrscheinlichkeitsrasters,
    Name der Ausgabedatei für Statistik,
    Multiplikator für Anzahl von Zellen mit Nicht-Ereignissen [2],
    Prozentsatz der zu berücksichtigenden Ereignisse [0.8],
    Ausgabe in Statistikdatei [F])

Lade alle Rasterdateien in einen Rasterstapel /*Alle Raster besitzen die gleiche Projektion,
    Ausdehnung und Auflösung. Das Inventar-Raster ist binär kodiert mit dem Wert 1 für Ereignis
    und 0 für kein Ereignis. Das Inventar-Raster hat eine Benennung, so dass es alphabetisch
    auf erstem Platz aller Rasterdateinamen steht*/

Erstelle einen Datenframe aus dem Rasterstapel
Normiere alle Daten
Teile den Datenframe in Frame mit Ereignissen und Frame mit Nicht-Ereignissen
Ziehe prozentual die Anzahl Datensätze aus Ereignis-Frame
Ziehe die Anzahl (Multiplikator * Anzahl Ereignisse) Datensätze aus Nicht-Ereignis-Frame
Verbinde die beiden neu erstellten Frames (Ereignis-Frame, Nicht-Ereignis-Frame)
Erstelle generische Modellfunktion
Führe die Logistische Regression mit den Trainingsdaten aus
Gebe Statistik für Logistisches Regressionsmodell aus
Übertrage das Logistische Regressionsmodell auf den gesamten Datensatz
Gebe die Statistik für die Vorhersage Ereignis Nicht-Ereignis aus
Visualisiere für die Vorhersagegruppen Ereignis und Nicht-Ereignis in Form von violin plots
Schreibe das Wahrscheinlichkeitsraster

Ende Programm Logistische Regression

```

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Tab. 3-2: Beispiel zur Berechnung der statistischen Gewichte in Tabellenform für die Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE) in MS Excel®.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ID	Beschreibung	Pixel Klasse	Pixel Rutschung	W_POS	W_NEG	Kontrast	Gewicht
2	1	0 – 5	8479313	4	-3,373580295	0,948478425	-4,32205872	-4,02274549
3	2	> 5 – 10	3226261	6	-2,001808248	0,237076544	-2,23888479	-1,93957157
4	3	> 10 – 15	1111227	14	-0,088640578	0,00748559	-0,09612617	0,20318706
5	4	> 15 – 20	509623	19	0,996314609	-0,068512585	1,06482719	1,36414042
6	5	> 20 – 25	218755	39	2,561297145	-0,216350184	2,77764733	3,07696056
7	6	> 25 – 30	82336	39	3,538736574	-0,226451094	3,76518767	4,0645009
8	7	> 30 – 35	22651	34	4,693168272	-0,197831821	4,89100009	5,19031332
9	8	> 35 – 40	4879	24	5,883554312	-0,136219957	6,01977427	6,3190875
10	9	> 40 – 45	1097	5	5,806936618	-0,026875843	5,83381246	6,13312569
11	10	> 45 – 50	234	4	7,141479914	-0,021489363	7,16296928	7,4622825
12	11	> 50 – 55	41	0	0	3,0023E-06	-3,0023E-06	0,29931022
13	12	> 55 – 60	7	0	0	5,12586E-07	-5,1259E-07	0,29931271
14			13656424	188				

- **C14** = SUMME (C2:C13)
- **D14** = SUMME (D2:D13)
- **W_POS**²⁸ = WENN (D2 = 0; 0; LN ((D2 / D\$14) / ((C2 – D2) / (C\$14 – D\$14)))) (s. Kapitel 2.3.1)
- **W_NEG** = LN (((D\$14 - D2) / D\$14) / ((C\$14 - C2 - D\$14+D2) / (C\$14 – D\$14))) (s. Kapitel 2.3.1)
- **Kontrast** = E2 – F2
- **Gewicht** = E2 + SUMME (F\$2:F\$13) – F2

²⁸ Das Gewicht W_POS ist an die Bedingung geknüpft, dass eine Beobachtung stattgefunden hat. Liegt keine Beobachtung vor, ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Berechnung. Die erste ist, dass W_POS auf 0 gesetzt wird. Das entspricht der Vorstellung, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit in der Klasse der durchschnittlichen Auftretenswahrscheinlichkeit im Gesamtgebiet entspricht. Die zweite Möglichkeit setzt voraus, dass eine begründete Annahme existiert, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht dem durchschnittlichen Erwartungswert im Gesamtgebiet entspricht und nur aufgrund der kleinen Klassengröße (also zufällig) kein Ereignis beobachtet wurde. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass die Klassengröße im betrachteten Ausschnitt nicht repräsentativ ist. Die Korrektur würde eine künstliche Zugabe von Klassenpixeln erfordern, bis angenommen werden kann, dass mindestens ein Pixel durch Massenbewegungen betroffen wäre. Die Summen der Klassenpixel und der Rutschungspixel sind in diesem Fall anzupassen. Die zweite Möglichkeit ist ein subjektiver Eingriff in die datengetriebene Analyse und sollte nur dann gemacht werden, wenn es als zwingend notwendig begründet werden kann.

Tab. 3-3: Beispiel zur Berechnung der ROC-Kurve mit AUC-Index in Tabellenform in MS Excel®.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ID	Beschreibung	N Pixel Klasse	N Pixel Rutschung	Gewicht	Klasse in %	Rutschung in %	Kumulative Summe Klasse	Kumulative Summe Rutschung	AUC
2								0	0	
3	10	> 45 – 50	234	4	7,462	0,000017	0,0213	0,000017	0,021	0,0000002
4	8	> 35 – 40	4879	24	6,319	0,000356	0,1277	0,000372	0,149	0,0000303
5	9	> 40 – 45	1097	5	6,133	0,000080	0,0266	0,000452	0,176	0,0000130
6	7	> 30 – 35	22651	34	5,190	0,001656	0,1809	0,002108	0,356	0,0004405
7	6	> 25 – 30	82336	39	4,065	0,006026	0,2074	0,008135	0,564	0,0027728
8	5	> 20 – 25	218755	39	3,077	0,016016	0,2074	0,024151	0,771	0,0106914
9	4	> 15 – 20	509623	19	1,364	0,037317	0,1011	0,061467	0,872	0,0306671
10	12	> 55 – 60	7	0	0,299	0,000001	0,0000	0,061468	0,872	0,0000004
11	11	> 50 – 55	41	0	0,299	0,000003	0,0000	0,061471	0,872	0,0000026
12	3	> 10 – 15	1111227	14	0,203	0,081370	0,0745	0,142841	0,947	0,0740124
13	2	> 5 – 10	3226261	6	-1,940	0,236248	0,0319	0,379089	0,979	0,2274513
14	1	0 – 5	8479313	4	-4,023	0,620911	0,0213	1,000000	1,000	0,6143057
15			13656424	188						0,96

- **C15** = SUMME (C3:C14)
- **D15** = SUMME (D3:D14)
- **Rutschung in %** = D3 / D\$15
- **Klasse in %²⁹** = (C3-D3) / (C\$15-D\$15)
- **Kumulative Summe Klasse** = F3 + H2
- **Kumulative Summe Rutschung** = G3 + I2
- **AUC** = (H3 - H2) * I3 - ((H3 - H2) * (I3 - I2) / 2)
- **AUC-Index (J15)** = SUMME (J3:J14)

²⁹ Nur stabile Pixel in der Klasse. Wie in der Gleichung zu sehen, werden die Rutschungspixel herausgenommen.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

3.2.1.2.3 Plausibilitätscheck

Statistik ist grundsätzlich nicht geeignet, um die Plausibilität im Sinne der Kausalität abzuleiten. Statistik misst den Grad des Zusammenhangs zwischen den Daten, ohne eine Ursache für diesen Zusammenhang anzugeben. Einem starken Zusammenhang muss nicht zwingend eine kausale Beziehung zugrunde liegen. Daher ist es immer notwendig, die berechneten Gewichte zu analysieren und zu prüfen, ob das Ergebnis mit den Erwartungen (Arbeitshypothese) grundsätzlich übereinstimmt oder nicht. Diese *Erklärbarkeit* der statistischen Ergebnisse ist ein wesentlicher Punkt in der Analyse und bedarf großer Vorsicht und Aufmerksamkeit. Dabei ist zu bedenken, dass die Ergebnisse entweder durch physikalische Prozesse oder aber auch durch die Datenstruktur und mögliche Artefakte plausibel erklärt werden können. Nur wenn der Überblick darüber vorhanden ist, wie die statistischen Gewichte entstanden sind bzw. was sie konkret beeinflusst hat, kann eine belastbare Interpretation und ggf. eine Modelloptimierung vorgenommen werden. Sensitivitätsanalysen bieten sehr viele Möglichkeiten, um datengenerierte Effekte zu analysieren.

Um einen besseren Überblick über die Analyseergebnisse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen zu erzielen, ist es ratsam, die Ergebnisse zu visualisieren. Aus den graphischen Darstellungen können Verteilungen, Trends und Ausreißer besser erfasst und interpretiert werden. Abb. 3-10 zeigt beispielhaft die Möglichkeiten der Visualisierung der Analyseergebnisse einzelner Parameter in MS Excel®.

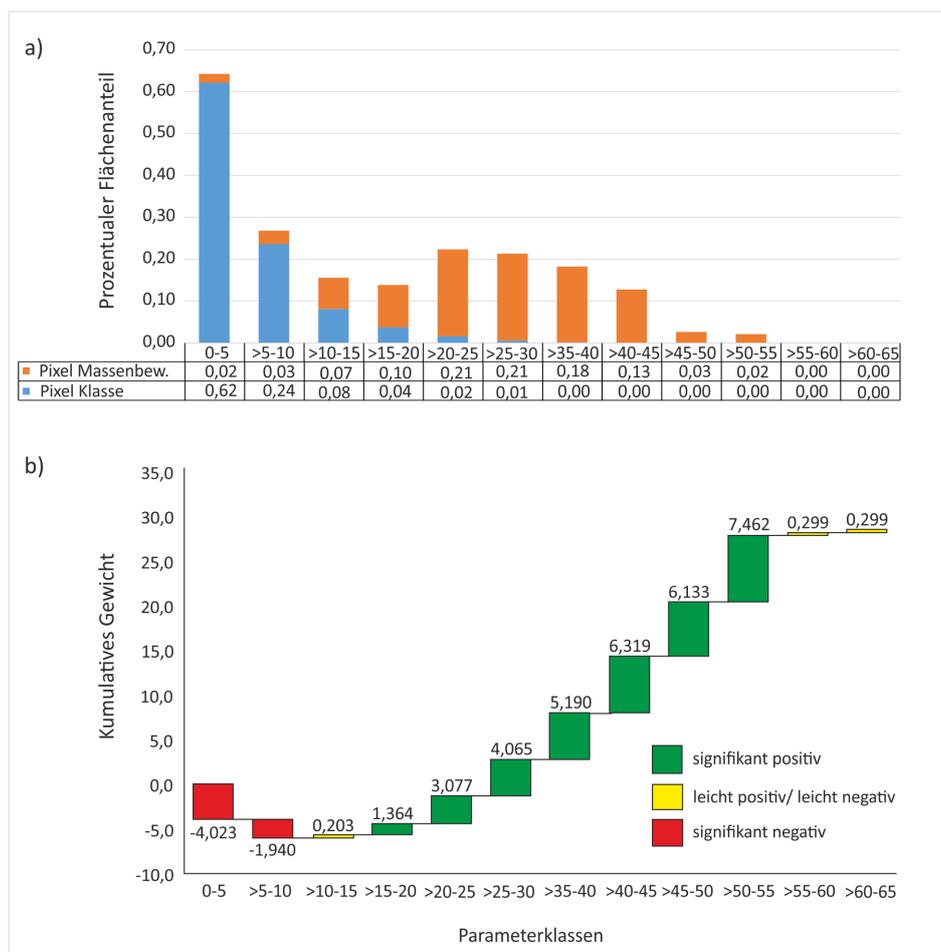


Abb. 3-10: Möglichkeiten der Visualisierung von Analyseergebnissen: a) Prozentuale Flächenanteile von Klassenflächen und Massenbewegungen; b) Wasserfalldiagramm (ab MS Excel® 2016).

Bei Anwendung der Logistischen Regression entfällt der Schritt der vorläufigen Plausibilitätsprüfung einzelner Parameter vor der Modellerstellung. Hier wird nach der Bestimmung der Koeffizienten das Modell auf seine Plausibilität hin überprüft. Dabei können die Koeffizienten einzelner Parameter ähnlich den Gewichten aus der Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen gemustert werden. Es gilt ebenfalls die Vorzeicheninterpretation. Negative Koeffizienten reduzieren die Wahrscheinlichkeit, positive erhöhen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Massenbewegung. Die Unsicherheiten der Koeffizientenbestimmung werden durch zusätzliche statistische Kennzahlen wie dem p-Wert charakterisiert. Der p-Wert (auch [Irrtumswahrscheinlichkeit](#)) liefert Werte zwischen 0 und 1 und kann wie die Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, dass die Nullhypothese angenommen werden kann. Die Nullhypothese ist immer die Annahme, dass der Parameter nicht signifikant, d. h. für das Modell unwichtig, ist. Die Entscheidungsgrenze, ob die Nullhypothese angenommen oder verworfen werden kann, wird vielfach bei einem p-Wert von 0,05 gelegt (dies entspricht einem Konfidenzintervall von 5 %). Liegt der p-Wert über diesem Wert, so ist anzunehmen, dass der bestimmte Koeffizient statistisch nicht signifikant ist. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, einen Zusammenhang irrtümlich zugewiesen zu haben, > 5 % ist. Ein positiver Koeffizient mit großem p-Wert belegt, dass der Parameter einen Zusammenhang mit der räumlichen Verteilung der Massenbewegungen aufzuweisen scheint. Allerdings kann dieser durch die Menge der vorliegenden Beobachtungsdaten nicht belastbar belegt werden und könnte deshalb auch ein Produkt des Zufalls sein (irrtümlich). Ein p-Wert < 0,05 indiziert eine statistische Signifikanz und damit höhere Vertrauenswürdigkeit des ermittelten Zusammenhanges. Ob der Zusammenhang allerdings dabei tatsächlich plausibel (kausal) ist, muss aus dem allgemeinen Prozessverständnis abgeleitet werden.

Wird im LR-Modell eine nicht plausible Beziehung festgestellt oder wird ermittelt, dass einer der Parameter nicht signifikant ist und grundsätzlich aus der Analyse entfernt werden kann, müssen für die Modellanpassung die Schritte *Erstellung des Trainingsdatensatzes* (s. [Kapitel 3.2.1.1.5](#)) und die *Berechnung der Koeffizienten* (s. [Kapitel 3.2.1.2.2](#)) wiederholt werden. Im Gegensatz dazu spielt sich in der Analyse mit der Methode der Gewichteten Evidenzen die Modellanpassung in der schrittweisen Integration ab. Eine Neuberechnung der statistischen Gewichte für einen Parameter ist nur bei einer Anpassung der Klassengrenzen (z. B. für einen kontinuierlichen Parameter) geboten.

Die Zunahme von Parametern in das Modell kann auch in der Logistischen Regression schrittweise bzw. nacheinander erfolgen. Alternativ können die Parameter sukzessive aus dem Modell eliminiert werden. In beiden Fällen wird anhand einer Score-Statistik (z. B. [Wald-Test](#), Tag des Zugriffs: 27.10.2020) ermittelt, ob die Zunahme oder das Entfernen eines Parameters die Genauigkeit des Modells beeinflusst. Bleibt die Genauigkeit nach einer Zunahme des Parameters unverändert, kann der zuletzt hinzugefügte Parameter wieder entfernt werden.

3.2.1.2.4 Schrittweise Integration

Sind die gewichteten Parameter aus der Sicht der modellierenden Fachkraft plausibel, kann der Prozess der Modellbildung erfolgen. Dabei handelt es sich um eine schrittweise Integration der gewichteten Parameter in das Modell, wobei die Rechenregel eine Addition ist³⁰. Es ist sinnvoll, mit dem

³⁰ Normalerweise handelt es sich um Verrechnung von (unabhängigen) Wahrscheinlichkeiten und damit um eine Multiplikation. Aufgrund des Logit-Modells der Gewichte sind jedoch die Logarithmengesetze anzuwenden, die aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten eine Summe von Logits machen.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

plausibelsten Parameter (üblicherweise die Hangneigung) oder bei gleichberechtigter Plausibilität³¹ mehrerer Parameter, mit dem Parameter mit dem größtem Erklärungsanteil (AUC-Wert) zu starten. Die weiteren Parameter werden in der Reihenfolge des Erklärungsanteils schrittweise hinzuaddiert. Nach jedem zusätzlichen Parameter wird anhand der ROC-Kurve geprüft, inwieweit sich das Klassifikationsergebnis verändert hat. Führt ein Parameter nicht zu einer Verbesserung des Modells, besteht aus statistischer Sicht keine Notwendigkeit, diesen in das Modell einzubinden. Es sei jedoch erwähnt, dass ein geringer bzw. kein Beitrag zur Modellqualität grundsätzlich nichts über die Kausalität des Parameters aussagt. Es indiziert lediglich, dass unter den gegebenen Umständen die bereits im Modell integrierten Parameter ausreichend sind, um ein Klassifikationsmodell gleicher Qualität zu erzeugen. Dem [Prinzip der Parsimonie](#) folgend besteht keine Notwendigkeit, die Komplexität des Modells über das notwendige Maß hinaus zu erhöhen.

3.2.1.2.5 Validierung

Bei der Validierung wird die ROC-Kurve für das finale Modell ermittelt. Dabei wird der Testdatensatz verwendet. Da dieser nicht in die Bestimmung der Gewichte eingebunden wurde, handelt es sich für das Modell um neue Informationen.

Unabhängig davon, wie die Modellierungsergebnisse aussehen (statistische Gewichte aus der MGE-Analyse oder Wahrscheinlichkeitswerte aus der LR-Analyse) ist die Vorgehensweise bei der Validierung immer gleich.

Das Modell wird durch eine bestimmte Anzahl von Parameterkombinationen gebildet, die auf Basis der Modellwerte (Gewichte oder Wahrscheinlichkeiten) sortiert werden können. Danach gilt es nur herauszufinden, wie die Verteilung der Testereignisse innerhalb dieser Parameterklassen ist. Die Bestimmung der Häufigkeit von Massenbewegungen innerhalb der Parameterklassen geschieht analog zur [Ermittlung der Ereignishäufigkeit in den Parameterklassen](#). Die weitere Vorgehensweise ist vergleichbar mit der üblichen [Berechnung der ROC-Kurve](#).

Die Berechnung der ROC-Kurve für ein Modell wird ebenfalls in den Programmiersprachen R und Python in unterschiedlichen Modulen angeboten.

3.2.1.3 Nachbereitung

3.2.1.3.1 Zonierung

Das finale Modell stellt ein differenziertes Bild (Karte) dar, welches die räumliche Verteilung der Massenbewegungen charakterisiert. Es besteht aus einer Vielzahl von Parameterkombinationen, die durch jeweils einen relativen Modellwert charakterisiert sind. Dieser ergibt sich aus der Überlagerung der statistischen Gewichte der Parameter bzw. der Wahrscheinlichkeit (in der Logistischen Regression) und ist ein relatives Maß dafür, dass unter Annahme einer entsprechenden Parameterkombination eine Massenbewegung auftreten kann. Je größer der Modellwert oder der Wahrscheinlichkeitswert, desto größer die Empfindlichkeit. Durch Aggregation der Modellwerte in Zonen kann das Modellergebnis noch verständlicher (lesbarer) gestaltet werden.

³¹ Da es keine statistische Maßzahl für die Plausibilität gibt, ist es meist ein subjektives Befinden, welcher der Parameter besonders vertrauenswürdig ist und im Sinne der kausalen Zusammenhänge am besten interpretiert werden kann.

Anhand der ROC-Kurve lassen sich die vielen unterschiedlichen Modellwerte in wenige Zonen aggregieren. Am Beispiel der Tab. 3-3 kann dies durch Betrachtung der Tabellenspalten *Kumulative Summe Klasse* und *Kumulative Summe Rutschung* nachvollzogen werden. Beide Spalten führen kumulativ aufsummierte Werte für die prozentualen Anteile der Klassenfläche (entspricht in etwa der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets) und der Massenbewegungen (Rutschungen). Soll eine Zone definiert werden, die 50 % aller bekannten Massenbewegungen beinhalten soll, kann dies anhand der Spalte *Kumulative Summe Rutschung* erfolgen. Durch die Diskretisierung der Hangneigung in 5°-Klassen kann das angestrebte Kriterium von 50 % nicht genau erfüllt werden. Der 50 %-Wert fällt genau zwischen zwei Klassengrenzen, die mit 36 % und 56 % der Massenbewegungen charakterisiert sind. Die nächstgelegene definierbare Grenze wäre somit bei etwa 56 % zu legen. In der Spalte *Gewicht* ist das dazugehörige Gewicht gelistet (entspricht im Ein-Parameter-Modell dem finalen Modellwert). Dieser Wert kann auf dem Modellraster zur Abtrennung der gewünschten Zone genutzt werden. Da es sich um ein Ein-Parameter-Modell handelt, in dem lediglich die Hangneigung vorhanden ist, entspricht die Hangneigungsklasse dem Klassifikationsmerkmal. Zusätzlich liefert die Spalte *Kumulative Summe Klasse* Informationen, welcher Anteil an der Gesamtfläche in diese Zone entfällt. Aus der zunehmenden Anzahl von Parameterkombinationen (höherer Diskretisierungsgrad der Gesamtfläche) resultiert die Option einer detaillierten Zonierung.

Alternativ können die Hangneigungsklassen engmaschiger gewählt werden, z. B. 1°-Klassen, um den Diskretisierungsgrad des Modells zu erhöhen. Dies setzt jedoch voraus, dass auch genügend Beobachtungsdaten existieren, um eine größere Anzahl an Parameterklassen im Modell berücksichtigen zu können.

3.2.2 Infinites Hangmodell

Das Infinite Hangmodell (IHM) ist ein einfaches Modell zur Beschreibung der Hangrutschungsempfindlichkeit bzw. Standsicherheit von Hängen. Der daraus abgeleitete Sicherheitsfaktor (engl.: factor of safety) basiert auf der Analyse des Grenzgleichgewichtes, das auf einen Bodenkörper wirkt (s. Kapitel 2.3.3, Abb. 2-4).

Dabei wird das Verhältnis zwischen der antreibenden Scherspannung, die den Bruch entlang einer potenziellen Gleitfläche induziert, und der rückhaltenden Scherfestigkeit bestimmt, die dem Scherbruch entgegenwirkt. Die Scherfestigkeit wird durch die bodenphysikalischen Parameter Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung bestimmt. Diese Parameter fließen z. B. aus Sachdatenbanken direkt oder aus Regelwerttabellen indirekt in die Analyse ein. Der generelle Workflow von der Datenaufbereitung über die Berechnung bis zur abschließenden Validierung ist in Abb. 3-11 skizziert.

3.2.2.1 Datenvorbereitung

Für die Analyse mit der Methode des Infiniten Hangmodells gelten hinsichtlich der Datenvorbereitung identische Prozeduren wie bei der Kontrolle der Eingangsparameter für die statistische Modellierung (s. Kapitel 3.2.1.1). Das DGM sollte die Geländeoberfläche ohne Vegetation und Bauwerke abbilden. Die gewählten Informationsebenen zur Ableitung von bodenphysikalischen Kennwerten (Geologische Karte oder eine Bodenkarte) müssen eine entsprechende Maßstabsgültigkeit aufweisen. Bei größeren Gebieten ist auf den Abgleich bei den Kartenrändern zu achten.

Die physikalisch-basierten Methoden benötigen zwar keine Beobachtungsdaten zur Erstellung des Modells, wohl aber für die Validierung. Das bedeutet, dass das vorhandene Ereignisinventar auf seine

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Herkunft, potenzielle Genauigkeit, enthaltene Massenbewegungstypen und Vollständigkeit geprüft werden sollte (s. Kapitel 3.2.1.1.2).

Anders als bei statistischen Methoden spielt die räumliche Verteilung der Parameter im Untersuchungsgebiet keine Rolle.

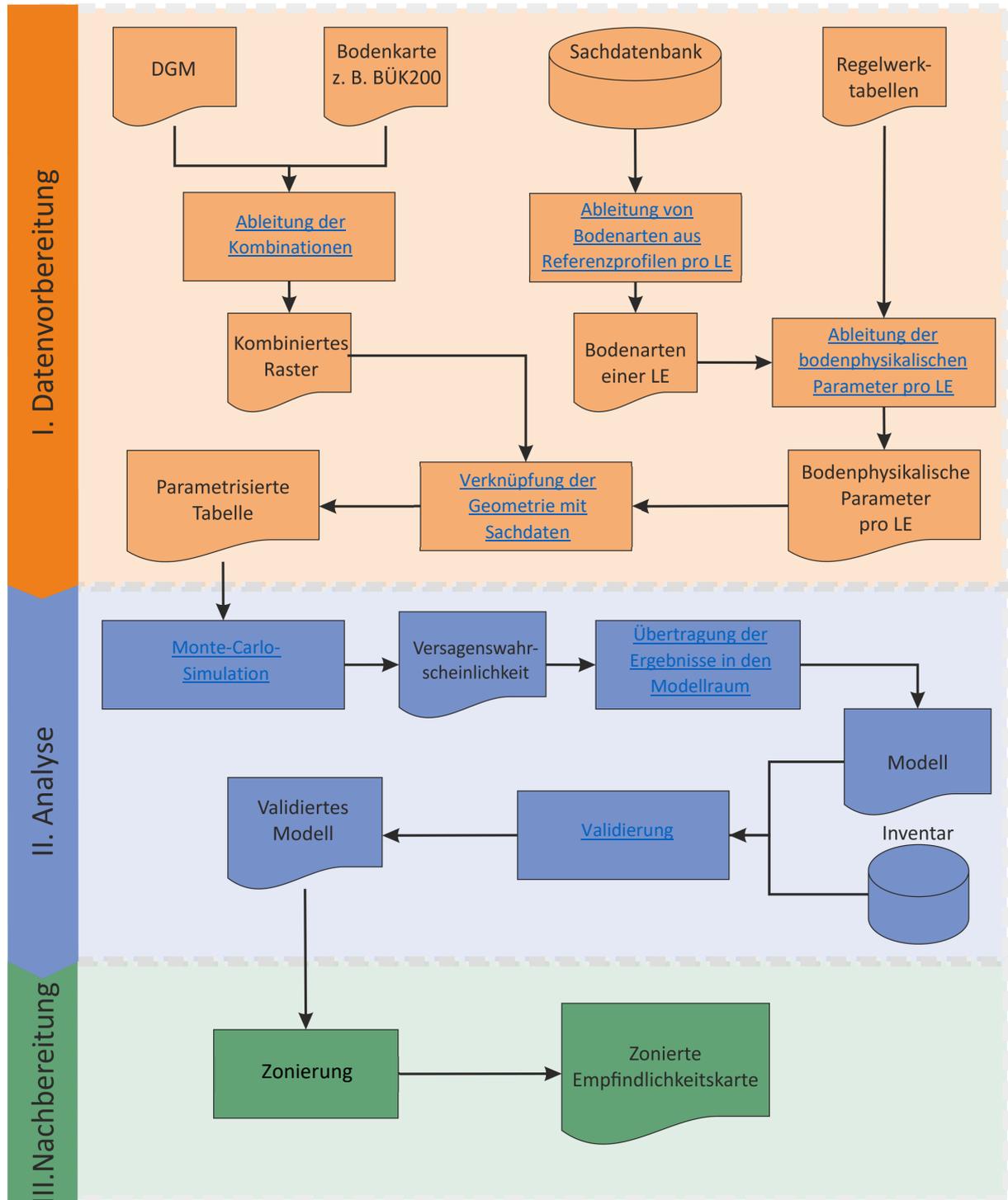


Abb. 3-11: Schematischer Workflow zur Anwendung der Methode des Infiniten Hangmodells für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.

Die Parametrisierung des Infinite Hangmodells wird über Digitale Höhenmodelle und bodenkundliche Informationsebenen gesteuert. Die Tab. 3-4 fasst die erforderlichen Parameter mit ihren Wertespannen und dem zugrundeliegenden Verknüpfungsdatensatz zusammen.

Nach der Datenprüfung sind GIS-Operationen zur Vorbereitung geometrischer Daten und Datenbank-Operationen zur Ableitung der bodenphysikalischen Parameter (Parametrisierung) aus der begleitenden Sachdatenbank der gewählten Informationsebene notwendig.

Tab. 3-4: Übersicht über die notwendigen Parameter für das Infinite Hangmodell mit Maßeinheiten, Wertespannen und Angabe der Quellen.

Parameter	Maßeinheit	Wertespanne	Quelle	Tag des Zugriffs
Hangneigung	[°]	[0 – 90]	DGM10	25.09.2020
Trockenrohdichte	gcm ⁻³	[1,03 – 1,98]	AG DBG (2008)³²	25.09.2020
Kohäsion	kNm ⁻²	[0 – 50]	Ad-hoc-AG Boden (2000) Verknüpfungsregel 1.8	25.09.2020
Winkel der inneren Reibung	[°]	[16 – 48]	Ad-hoc-AG Boden (2000) Verknüpfungsregel 1.10	25.09.2020
Feuchtigkeitsindex	dimensionslos	[0 – 1]	szenariobasiert	-

³² AG DBG: Arbeitsgruppe Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Box 3-3: Erläuterungen zur stochastischen Erweiterung des Infiniten Hangmodells.

Die hier vorgestellte Prozedur zielt auf die Optimierung der Monte-Carlo-Simulation unter Ausnutzung der sogenannten Ergodizität stationärer stochastischer Prozesse ab.

Die Grundannahme beruht darauf, dass für die gleiche Kombination von Parametern, z. B. Hangneigung mit 30° und eine bestimmte Legendeneinheit aus der Bodenkarte, der Versagenswahrscheinlichkeitswert in Folge vieler iterativer Schritte gegen einen gleichen Wert konvergieren wird (unabhängig von ihrer geographischen Lage). Damit muss die Monte-Carlo-Simulation lediglich für eine Kombination stellvertretend durchgeführt werden. Die damit gewonnene Rechenzeit kann in die Anzahl der Iterationen investiert werden.

Zur Verdeutlichung folgendes vereinfachtes Beispiel:

Es soll ein Gebiet analysiert werden, das eine Ausdehnung von 1200 x 1000 Rasterzellen besitzt. In diesem Gebiet kommen 10 unterschiedliche Legendeneinheiten (LE) einer Bodenkarte vor. Die Hangneigung hat eine Wertespanne von 1° bis 50°. Die klassische IHM-Analyse würde erfordern, dass für alle Rasterzellen die IHM-Gleichung gelöst werden soll. Für einen iterativen Schritt würde dies bedeuten, 1,2 Millionen Rasterzellen zu berechnen. Wird aus der kontinuierlichen Hangneigung ein diskreter Datensatz gebildet, können alle Kombinationen zwischen Hangneigung und Legendeneinheiten bestimmt werden.

Für den Fall, dass alle möglichen Kombinationen durch die räumlichen Verteilungen der Hangneigung und der Legendeneinheiten ausgeschöpft werden (jede LE bildet eine Kombination mit jeder Hangneigungsklasse), resultieren bei einer 1°-Einteilung der Hangneigung maximal 500 Kombinationen, die wiederholt in dem Gebiet vorkommen. Da die Verteilungen der unabhängigen Variablen in einer Kombination, unabhängig von der Lage im Rasterdatensatz, identisch sind, müssen nur die Standsicherheitsfaktoren für die 500 Zellen bestimmt werden. Das reduziert die Rechen- und Speicherleistung um den Faktor ~2400. Für die Analyse bedeutet es aber auch, dass bei gleichem Rechenaufwand das *ergodische* Modell mindestens 2400mal mehr Iterationen enthalten kann.

3.2.2.1.1 Ableitung der Kombinationen

Aus den Eingangsdaten DGM und z. B. Bodenübersichtskarte wird der Datensatz abgeleitet, der für jede Rasterzelle eine eindeutige Kombination aus Hangneigung und einer Legendeneinheit darstellt. Folgende konsekutive Prozedur wird vorgeschlagen:

- Aus dem DGM wird die Hangneigung abgeleitet. Diese liegt in der Regel als kontinuierlicher Datensatz mit Fließkommazahlen vor;
- Das kontinuierliche Hangneigungsraaster wird in einen ganzzahligen Datensatz (Integer) umgewandelt;
- Die geologischen Karten oder Bodenübersichtskarten liegen in der Regel als Vektordaten vor (z. B. shape files oder feature classes). Diese werden in ein Raster mit der gleichen Zellauflösung wie das Hangneigungsraaster konvertiert;
- Das Hangneigungsraaster und die Bodenkarte werden im GIS (z. B. ArcGIS® mit Spatial Analyst®) verschnitten (Abb. 3-12).

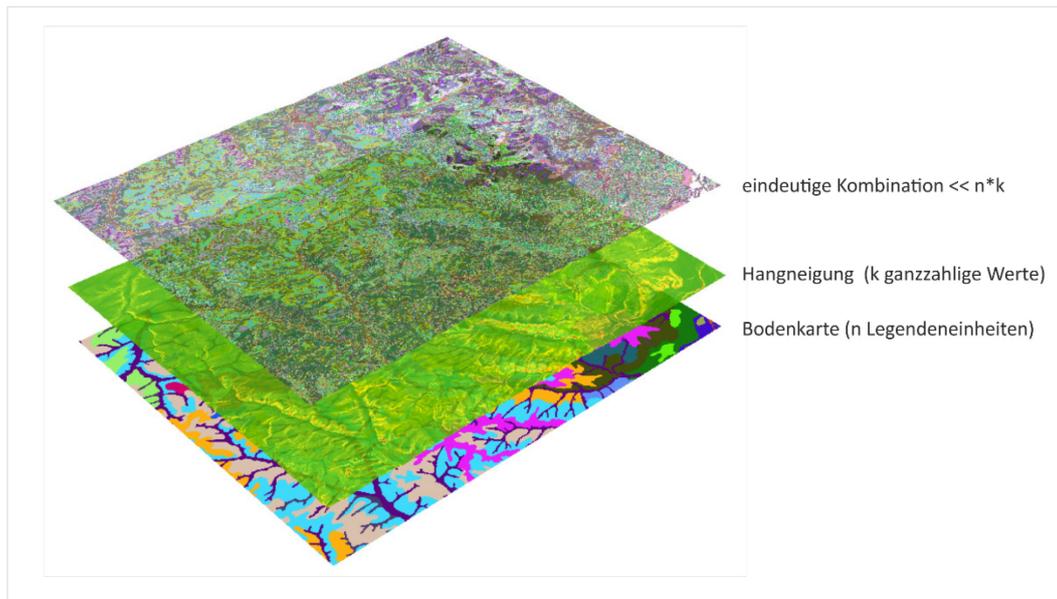


Abb. 3-12: Schematische Darstellung der Generierung von eindeutigen Parameter-Kombinationen durch die Überlagerung von Hangneigung und Bodenkarte.

3.2.2.1.2 Ableitung von Bodenarten aus Referenzprofilen pro Legendeneinheit

Bodenundliche Kartenwerke stellen die Verbreitung der Böden in Abhängigkeit vom Maßstabsbereich in verschiedenen Aggregierungsstufen dar ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005](#)). Die Legendeneinheiten werden folglich durch einen Formenschatz an Bodenformen in einem abgestuften Heterogenitäts- und Komplexitätsniveau beschrieben. Bodenkundliche Kartenwerke sind in der Regel durch Sachdatenbanken (Flächendatenbanken) hinterlegt (Abb. 3-13). Diese Datenbanken führen flächenbezogene Informationen, um thematische Ableitungen für die Böden vornehmen zu können ([Methoden-Wiki Bodenkunde](#), Tag des Zugriffs: 09.09.2020).

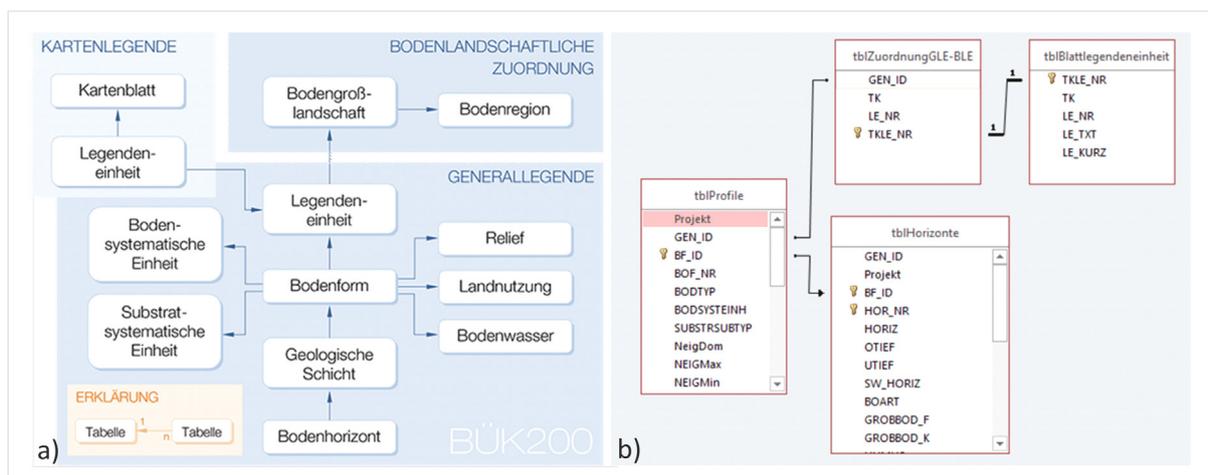


Abb. 3-13: a) Vereinfachtes Datenmodell der begleitenden Sachdatenbank der BÜK200 ([BGR](#): Tag des Zugriffs: 29.09.2020); b) Die Beziehungen in der Sachdatenbank der BÜK200 (MS Access®-Applikation) (Quellen: [Krug & Hartwich, 2001](#)).

Die Bodenformen, die entweder je eine Legendeneinheit kennzeichnen oder mit einem definierten Flächenanteil darin vorkommen, sind durch Referenzbodenprofile in der Sachdatenbank hinterlegt.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Ein Referenzbodenprofil beschreibt den gesamten Bodenkörper, der je nach lokaler Ausbildung 1 m bis 2 m mächtig sein kann. Das Referenzbodenprofil ist dabei durch Horizonte mit ihren Tiefenlagen unterteilt. Die Horizonte führen die standardisierte Beschreibung der Bodenart nach Bodenartendiagramm (Abb. 3-14) gemäß [Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden \(2005\)](#).

Die Bodenart ist das Attribut in der Datenbank, um die bodenphysikalischen Parameter für den Unterboden respektive Untergrund mit Bodenform und Legendeneinheit zu verknüpfen. Die Sachdatenbanken der bodenkundlichen Kartenwerke sind relationale Datenbanken, in denen die Beziehungen zwischen den Tabellen als 1 : n-Beziehung abgebildet sind. Über Abfragen werden die jeweils untersten Horizonte der Referenzprofile pro Legendeneinheiten (LE) in einem Projektgebiet zusammengestellt (Abb. 3-13).

Die LE bodenkundlicher Kartenwerke werden in der Regel polytypisch durch Leit- und Begleitbodenformen mit definiertem Flächenanteil beschrieben. Monotypische Beschreibungen der LE sind die Ausnahme. Die Tab. 3-5 gibt ein Beispiel für die Auswahl der Referenzprofile einer Legendeneinheit aus dem Testgebiet Simbach (s. [Kapitel 2.6.4](#)). Die Legendeneinheit 35 des Blattes CC7942 (Passau) wird in der Sachdatenbank der BÜK200 als Braunerde aus sedimentärem Schluff und Braunerde aus solifluidaler Fließerde (Präquartär) über sedimentärem Schluff (Kürzel: BBn: s-u; pfl-öl/s-u) (Präquartär) beschrieben. Die drei Bodenformen mit Referenzprofilen besitzen in der Legendeneinheit einen Flächenanteil (in %) von 40, 40, 20. Die Bodenarten der jeweils tiefsten Horizonte sind als sandiger Schluff (Us) und schwach toniger Schluff (Ut2) gekennzeichnet und besitzen ein Flächenanteilsverhältnis von 60 : 40.

Tab. 3-5: Beispiel für Referenzprofile: Die Legendeneinheit (LE) 35 des Blattes CC7942 (Passau) der BÜK200 besitzt zwei Leitbodenformen und eine Begleitbodenform; fett markiert sind die Horizonte, deren Bodenarten zur Verknüpfung und Berechnung der bodenphysikalischen Parameter hinzugezogen wurden.

TK	LE	ID der Bodenform	Flächenanteil [%]	Horizont	Obere Tiefe [dm]	Untere Tiefe [dm]	Bodenart
CC7942	35	3260	40	O	-0,3	0	O
				Ah	0	0,5	Uls
				Bv	0,5	6	Uls
				Bv-ilCv	6	9	Uls
				ilCn	9	20	Us
CC7942	35	3261	20	Ap	0	2,5	Lu
				Bv	2,5	5	Lu
				ilCn	5	20	Us
CC7942	35	6235	40	Ap	0	2,5	Uls
				Bv	2,5	6	Uls
				Bv-ilCv	6	9	Ut2
				ilCv	9	20	Ut2

3.2.2.1.3 Ableitung der bodenphysikalischen Parameter aus der Bodenart

Die physikalischen Parameter für die Bodenarten sind den Zusammenstellungen aus dem [MethodenWiki Bodenkunde](#) (Tag des Zugriffs: 09.09.2020) entnommen (Tab. 3-6 und Tab. 3-7). Die Quellen sind in Tab. 3-4 aufgeführt.

Die Trockenrohdichte (TRD) ist eine Größe, die von der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte (L_d) bestimmt wird. Die Lagerungsdichte wird in 5 Klassen von *Sehr niedrig* (L_{d1}) bis *Sehr hoch* (L_{d5}) unterteilt, wobei die Trockenrohdichte je L_d -Klasse auf Basis eines maximalen L_d -Werts und des prozentualen Ton- sowie Schluffgehalts abgeschätzt werden kann ([Renger et al., 2008](#)):

$$L_{d\text{Klasse.}}: \text{ mittlere TRD} = L_{d\text{max}} - 0,005t - 0,001u,$$

worin $L_{d\text{max}}$ die maximale Lagerungsdichte (Tab. 3-6) in der jeweiligen Lagerungsdichteklasse, t der prozentuale Tongehalt und u der prozentuale Schluffgehalt der Bodenart nach dem Feinbodenartendiagramm ist (Abb. 3-14).

Die in der Gleichung anzusetzenden maximalen Lagerungsdichten nach [Renger et al. \(2008\)](#) sind in der Tab. 3-6 aufgeführt.

Tab. 3-6: Maximale effektive Lagerungsdichten $L_{d\text{max}}$ für die Lagerungsklassen $L_{d1} - L_{d5}$.

Lagerungsklasse	L_{d1}	L_{d2}	L_{d3}	L_{d4}	L_{d5}
$L_{d\text{max}}$	1,20	1,42	1,65	1,85	2,00

In der Tab. 3-7 sind die Werte für die Trockenrohdichte (gerundet auf zwei Nachkommastellen) für die Bodenarten des Feinbodendiagramms in Abhängigkeit von der effektiven Lagerungsdichte im Bereich zwischen L_{d1} und L_{d5} kompiliert.

Die physikalischen Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sind Kennwerte, die von der Bodenart und Gefügeform bestimmt werden. Diese Zwischenabhängigkeiten erzeugen Streuungen für die bodenphysikalischen Parameter, die für die Bestimmung der Standardabweichungen genutzt werden können.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

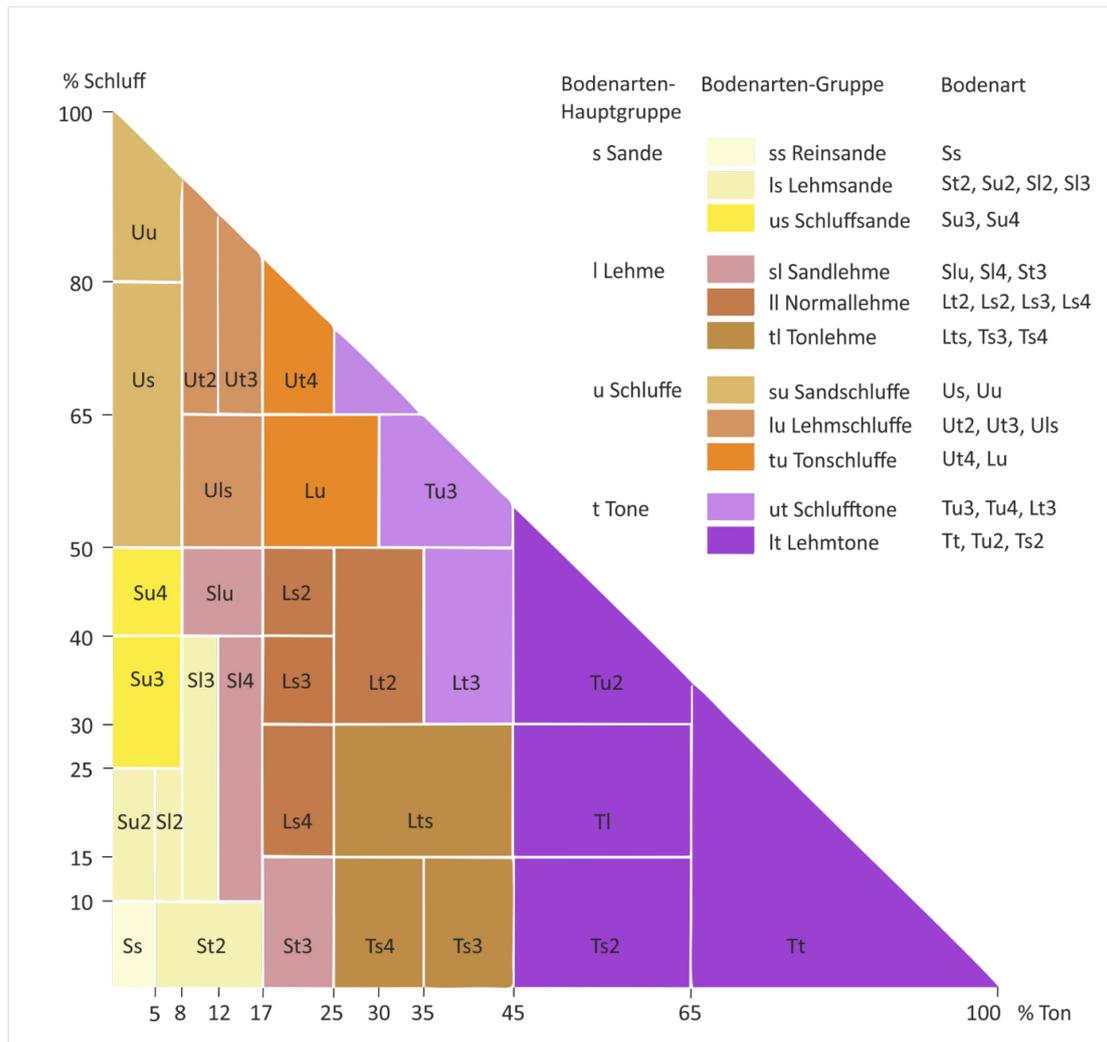


Abb. 3-14: Feinbodenartendiagramm (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005).

Da nur wenige Werte pro Bodenart vorliegen, muss zur Schätzung der Standardabweichung σ die einfache Annahme getätigt werden, dass diese als robuster Wert durch:

$$\sigma = \frac{x_{max} - x_{mean}}{3},$$

abgebildet werden kann, wobei: x_{max} den maximalen Wert und x_{mean} den Mittelwert darstellt.

Die Abschätzung der Standardabweichung der Trockenrohdichte basiert auf der Wertespanne in den Lagerungsdichteklassen, in der Annahme, dass die Trockenrohdichte in der Lagerungsklasse Ld_3 einen mittleren Wert und in Ld_5 den maximalen Wert repräsentiert. Die Standardabweichung für den Parameter Trockenrohdichte aller Bodenarten ergibt sich damit als $\sigma = 0,117$.

Für die Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ermöglicht die Vielfalt an Gefügeformen die Berechnung des Mittelwerts und die Schätzung der Standardabweichung. Für die Fälle, in denen für die Parameter Kohäsion und Winkel der Inneren Reibung keine Wertespannen innerhalb der Bodenart durch die Gefügeformen gegeben sind, wird eine geringe Standardabweichung mit σ von $c = 1 \text{ kNm}^{-2}$ und σ von $\phi = 1^\circ$ postuliert (Tab. 3-8).

Tab. 3-7: Werte für die Mittlere Trockenrohdichte (g/cm^3) der effektiven Lagerungsdichteklassen (Ld_1 bis Ld_5).

Bodenart	Ld_1	Ld_2	Ld_3	Ld_4	Ld_5
Ss	1,18	1,40	1,63	1,83	1,98
Sl2	1,15	1,37	1,60	1,80	1,95
Sl3	1,13	1,35	1,58	1,78	1,93
Sl4	1,1	1,32	1,55	1,75	1,90
Slu	1,09	1,31	1,54	1,74	1,89
St2	1,14	1,36	1,59	1,79	1,94
St3	1,09	1,31	1,54	1,74	1,89
Su2	1,17	1,39	1,62	1,82	1,97
Su3	1,15	1,37	1,60	1,80	1,95
Su4	1,14	1,36	1,59	1,79	1,94
Ls2	1,05	1,27	1,50	1,70	1,85
Ls3	1,06	1,28	1,51	1,71	1,86
Ls4	1,07	1,29	1,52	1,72	1,87
Lt2	1,01	1,23	1,46	1,66	1,81
Lt3	0,96	1,18	1,41	1,61	1,76
Lts	1,00	1,22	1,45	1,65	1,8
Lu	1,03	1,25	1,48	1,68	1,83
Uu	1,09	1,31	1,54	1,74	1,89
Uls	1,08	1,30	1,53	1,73	1,88
Us	1,12	1,34	1,57	1,77	1,92
Ut2	1,07	1,29	1,52	1,72	1,87
Ut3	1,05	1,27	1,50	1,70	1,85
Ut4	1,02	1,24	1,47	1,67	1,82
Tt	0,81	1,03	1,26	1,46	1,61
Tl	0,90	1,12	1,35	1,55	1,70
Tu2	0,90	1,12	1,35	1,55	1,70
Tu3	0,96	1,18	1,41	1,61	1,76
Tu4	0,99	1,21	1,44	1,64	1,79
Ts2	0,92	1,14	1,37	1,57	1,72
Ts3	0,99	1,21	1,44	1,64	1,79
Ts4	1,04	1,26	1,49	1,69	1,84

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Tab. 3-8: Spezifische Werte der Kohäsion c [kNm^{-2}] und des Winkels der inneren Reibung φ [$^\circ$] für unterschiedliche Bodenarten mit geschätzten Standardabweichungen σ für einen Wassergehalt bei Feldkapazität auf Basis der Vielfalt an Gefügeformen.

Bodenart	Kohäsion c [kNm^{-2}]	Standardabweichung σ_c [kNm^{-2}]	Winkel der inneren Reibung φ [$^\circ$]	Standardabweichung σ_φ [$^\circ$]
Ss	8,0	1,0	31,6	1,0
Sl2	8,0	1,0	39,0	1,0
Sl3	8,0	1,0	39,0	1,0
Sl4	8,0	1,0	37,0	1,0
Slu	13,0	1,4	39,0	1,0
St2	15,3	3,3	39,0	1,5
St3	15,3	3,3	39,0	1,5
Su2	8,0	1,0	31,6	1,0
Su3	8,0	1,0	31,6	1,0
Su4	8,0	1,0	31,6	1,0
Ls2	10,0	1,0	23,5	1,5
Ls3	10,0	1,0	25,0	1,0
Ls4	10,0	1,0	25,0	1,0
Lt2	26,5	13,5	33,8	5,5
Lt3	26,5	13,5	33,8	5,5
Lts	22,3	3,5	34,7	4,1
Lu	21,2	11,6	35,4	4,6
Uu	2,0	1,0	29,0	0,0
Uls	34,0	16,7	39,3	4,0
Us	7,5	5,0	34,0	4,1
Ut2	12,0	1,0	35,0	1,0
Ut3	12,0	1,0	35,0	1,0
Ut4	12,0	1,0	35,0	1,0
Tt	35,0	5,0	28,0	4,0
Tl	35,0	5,0	28,0	4,0
Tu2	37,3	6,3	29,0	7,0
Tu3	34,0	3,8	27,0	4,2
Tu4	34,0	3,8	27,0	4,2
Ts2	50,0	1,0	46,0	2,0
Ts3	50,0	1,0	46,0	2,0
Ts4	50,0	1,0	46,0	2,0

Die physikalischen Parameter werden über die Bodenart des Untergrundhorizonts mit der Legendeneinheit verknüpft. Der gewichtete Mittelwert und die Standardabweichung können bei angenommener Normalverteilung der Parameter wie folgt bestimmt werden:

$$\mu_g = \frac{\sum_{i=1}^N x_i g_i}{\sum_{i=1}^N g_i},$$

$$sd_g = \sqrt{(sd_i)^2 g_i + (sd_j)^2 g_j + g_i g_j (x_i - x_j)^2}$$

mit: μ_g – gewichteter Mittelwert, sd_g – paarweise gewichtete Standardabweichung, sd_i und sd_j – Standardabweichung der jeweiligen Parameter x_i und x_j , g_i und g_j – Flächenanteil.

Jede Legendeneinheit bekommt durch diese Berechnung einen Mittelwert mit Standardabweichung für die Trockenrohdichte ρ , die Kohäsion c und den Winkel der inneren Reibung φ zugewiesen.

3.2.2.1.4 Verknüpfung der Geometrie- mit den Sachdaten

Über den Datenbank-Identifikator (ID) der Legendeneinheit können die bestimmten Mittelwerte für die jeweilige bodenphysikalische Eigenschaft und zugehörige Standardabweichungen direkt mit der Rasterattributtabelle des Kombinationsrasters oder in einer separaten Tabellenstruktur verknüpft werden. Aus der zusammengesetzten Tabelle werden im Analyseschritt die Eingangsparameter für die Lösung der Standsicherheit abgeleitet. Werden die Daten in einer MS Excel®-Tabelle zusammengeführt, kann die Analyse direkt in der Tabelle erfolgen.

3.2.2.2 Analyse

3.2.2.2.1 Monte-Carlo-Simulation

Im Ergebnis der Datenvorbereitung liegen für die Analyse die Daten in einer Tabellenstruktur vor. Die Tabelle identifiziert über einen eindeutigen ID-Wert die Kombination aus Hangneigung und Legendeneinheit der Bodenkarte. Innerhalb der Kombination ist die Hangneigung als ein ganzzahliger Wert und die Legendeneinheit mit einem ID-Wert oder eindeutigen Kürzel charakterisiert.

Weiterhin führt die Tabelle zu jeder Legendeneinheit die bodenphysikalischen Parameter Trockenrohdichte, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sowie ihre Standardabweichungen. Die Versagens-tiefe mit Standardabweichung und die Wassersättigung mit entsprechenden Standardabweichungen werden für alle Kombinationen gleich angesetzt.

Alle aufgezählten Parameter werden als normalverteilt angenommen. In der Monte-Carlo-Simulation wird iterativ aus den definierten Verteilungen ein Wert zufällig gezogen. Dieser Schritt benötigt einen Zufallszahlengenerator. Mit den zufällig gezogenen Werten wird der Standsicherheitsfaktor berechnet. In jedem Iterationsschritt wird geprüft, ob der berechnete Standsicherheitsfaktor ≤ 1 ist. Jede Kombination bekommt einen Zähler, dessen Wert bei Beginn der Analyse bei 0 liegt und bei Erfüllung der Bedingung um 1 erhöht wird. Nach einer definierten Anzahl von Iterationen wird ausgezählt, wie oft der Standsicherheitsfaktor den Wert ≤ 1 angenommen hat. Dazu wird der Zählerwert jeder Kombination durch die Anzahl der Iterationen geteilt. Das Ergebnis ist eine Fraktion, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann und als Versagenswahrscheinlichkeit interpretiert wird.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

In der Tab. 3-9 bzw. der Tab. 3-10 ist ein Beispiel für eine Monte-Carlo-Simulation anhand der Kombination aus der Bodenart Ut2 (schwachtoniger Schluff) und der Hangneigung von 45° in MS Excel® realisiert. Die Werte Trockenrohdichte (TRD), Kohäsion und Winkel der inneren Reibung gehen auf die oben beschriebenen Regelwerke zurück. Die normalverteilten Pseudozufallszahlen lassen sich durch die Verknüpfung der Funktionen ZUFALLSZAHN(), die eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 liefert und der Funktion NORMINV(p, Mittelwert, Standardabweichung) generieren. Letztere gibt auf Basis eines Wahrscheinlichkeitswertes p (Zahl zwischen 0 und 1) den Wert innerhalb einer, durch den Mittelwert und die Standardabweichung parametrisierten, Normalverteilung zurück.

Um numerische Probleme zu vermeiden, wird in der Zelle *Formelwert* die zufällig generierte Zufallszahl geprüft. Wenn aus der Verteilung zufällig eine negative Zahl gezogen wurde, wird sie durch den Mittelwert der Normalverteilung ersetzt. Der geprüfte Wert wird zur Berechnung des Standsicherheitsfaktors verwendet. Der Standsicherheitsfaktor kann durch zufällig gezogene Werte repetierend berechnet werden (F9-Taste). Das Feld *Iterationen gesamt* zählt dabei, wie oft die Berechnung durchgeführt wurde. Das Feld *Versagensfälle gesamt* zählt, wie oft der Standsicherheitsfaktor ≤ 1 war. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird im gleichnamigen Feld aus der Anzahl der Versagensfälle und der Anzahl von Iterationen berechnet.

Box 3-4: Erläuterung der Generierung von Zufallszahlen.

Stochastische Modellierung und der Einsatz von Monte-Carlo-Simulationen erfordert die Generierung einer großen Anzahl von Zufallszahlen. Diese Aufgabe wird von Zufallszahlengeneratoren übernommen. Meist handelt es sich bei diesen um sogenannte Pseudozufallszahlengeneratoren, d. h. der Erzeugung einer Zufallszahl liegt ein deterministischer mathematischer Algorithmus zugrunde. Die erzeugten Pseudozufallszahlen erfüllen jedoch weitgehend die Eigenschaften echter Zufallszahlen. Ein Vorteil ergibt sich auch aus der Reproduzierbarkeit solcher Analysen, wenn z. B. sogenannte *Seeds* (Startwert) verwendet werden. Wurde bei der Verwendung eines Pseudozahlengenerators ein *Seed* verwendet, kann die Folge von Zufallszahlen identisch reproduziert werden.

Die meisten Programmierumgebungen und Tabellenkalkulationen (z. B. MS Excel®) bieten Pseudozufallszahlengeneratoren an. Somit ist theoretisch eine Monte-Carlo-Simulation für das Infinite Hangmodell auch in MS Excel® möglich. Für eine große Anzahl von Kombinationen kann es aber schnell unübersichtlich werden, was wiederum Kenntnisse in MS Visual Basic® for Applications (VBA) erfordert, um die iterativen Prozesse effizient über Makros zu steuern. Im MBiD-Projekt wurde eine durch die BGR programmierte Python-Anwendung eingesetzt.

3.2.2.2.2 Übertragung der Ergebnisse in den Modellraum

Die Monte-Carlo-Simulation wurde in einer Tabelle für die parametrisierten Kombinationen, bestehend aus der Hangneigung und einer Legendeneinheit der Bodenkarte mit entsprechenden bodenphysikalischen Kennwerten, implementiert. Die in der Tabelle bestimmten Versagenswahrscheinlichkeiten müssen nun in den Modellraum transferiert werden. Dazu wird die Ergebnistabelle (z. B. MS Excel®-Tabelle) über die Kombinations-ID mit dem Kombinationsraster verknüpft. Im nächsten Schritt werden über die Lookup-Funktion (z. B. Lookup in ArcGIS® mit Spatial Analyst®) die Rasterwerte mit den Werten des Tabellenfeld-Versagenswahrscheinlichkeit ersetzt.

Tab. 3-9: Beispiel für die Monte-Carlo-Simulation in MS Excel® ohne Makro (Teil A: entspricht **Tabelle1** in den Formeln)³³ (Einheiten s. Tab. 3-4).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Bodenart: Us - sandiger Schluff						
2		Trockenrohdichte [kg/m ³]	Kohäsion [kNm ⁻²]	Winkel der inneren Reibung [°]	Wassersättigung	Versagenstiefe [m]	Hangneigung [°]
3	Mittelwert	1570	7500	34	0,8	2	35
4	Standardabweichung	116	5000	4,1	0,05	0,17	1
5	Zufällig gezogener Wert	1624,01	5124,83	39,91	0,80	1,74	34,71
6	Formelwert	1624,01	5124,83	39,91	0,80	1,74	34,71
7		Versagensfälle gesamt		Versagen	Iterationen gesamt		
8		0		0	1		
9	Standsicherheitsfaktor (Iteration)	1,008					
10	Standsicherheitsfaktor (Mittelwert)	0,0					
11	Versagenswahrscheinlichkeit	0,0					
12							
13	Reset der Analyseergebnisse	1					

- **Zufällig gezogener Wert (B5):** =NORMINV(ZUFALLSZAHL();B3;B4)
- **Formelwert (B6):** =WENN(B5<0;B3;B5)
- **Versagen (B8):** =WENN(B9<=1;1;0)
- **Versagensfälle gesamt (B8):** =WENN(B13=0;0;+D8+C8)
- **Iterationen gesamt (E8):** =WENN(B13=0;0;+E8+1)
- **Standsicherheitsfaktor (Iterationsschritt) (B9):** =C6/(9,81*B6*F6*SIN(G6*PI()/180)*COS(G6*PI()/180))+TAN(D6*PI()/180)/TAN(G5*PI()/180)-E6*(1000/D6)*(TAN(D6*PI()/180)/TAN(G6*PI()/180))
- **Standsicherheitsfaktor (Mittelwert) (B10):** =SUMME(Tabelle2!C2:Tabelle2!C1001)/E8
- **Versagenswahrscheinlichkeit (B11):** =D8/E8
- **Reset der Analyseergebnisse (B13):** steuert das Zurücksetzen der Zähler für Versagensfälle und Iterationen. Dazu eine 0 in die Zelle B13 eingeben. Zum Starten einer neuen Simulationssequenz, wieder eine 1 oder einen beliebigen Wert ungleich 0 eingeben.

³³ Unter MS Excel® Optionen muss die iterative Berechnung aktiviert werden. Datei -> Optionen -> Formeln -> Kontrollkästchen „Iterative Berechnung aktivieren“ anhaken -> maximale Iterationszahl = 1.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Tab. 3-10: Beispiel für die Monte-Carlo-Simulation in MS Excel® ohne Makro (Teil B: entspricht *Tabelle2* in den Formeln).

	A	B	C	D	E
1	Iteration	Versagenswahrscheinlichkeit	Sicherheitsfaktor	Mittelwert Sicherheitsfaktor	Residualwert
2	1	0	1,014677042	0	
3	2	0	1,376534931	0,507338521	0
4	3	0	1,468950964	0,797070658	0
...
1000	1000	0,327	0,996069752	1,156964989	0,00067367

- **Iteration:** z. B. Werte zwischen 1 und 1000
- **Versagenswahrscheinlichkeit:** =WENN(Tabelle1!\$B\$13 =0; 0; WENN(Tabelle1!\$E\$8=Tabelle2!A2;Tabelle1!\$B\$11;+Tabelle2!B2+0))
- **SF:** =WENN(Tabelle1!\$B\$13 =0; 0; WENN(Tabelle1!\$E\$8 =Tabelle2!A2;Tabelle1!\$B\$9;+Tabelle2!C2+0))
- **SF-Mittelwert:** =WENN(Tabelle1!\$B\$13 =0; 0; WENN(Tabelle1!\$E\$8 =Tabelle2!A2;Tabelle1!\$B\$10;+Tabelle2!D2+0))
- **Residualwert (ab E3):** =B2-B3.

Über die Erstellung von Diagrammen aus den Datenreihen der Tab. 3-10 (Teil B) lässt sich die Konvergenz der Werte im Verlauf der Iterationen überwachen. In der Abb. 3-15 wird die Konvergenz von der Versagenswahrscheinlichkeit (Abb. 3-15 a), Entwicklung der Residuen (relative Abweichung des Wahrscheinlichkeitswertes) (Abb. 3-15 b) sowie die Konvergenz gegen einen Mittelwert beim Standsicherheitsfaktor (Abb. 3-15 c) im Verlauf von 1000 Iterationen angezeigt. Das Beispiel lässt die Diagramme in Echtzeit aktualisieren, so dass mit fortschreitenden Iterationszahlen eine dynamische Anpassung der Kurven erfolgt. Im Beispiel wurde der Diagrammtyp *Punkte mit interpolierten Linien* verwendet.

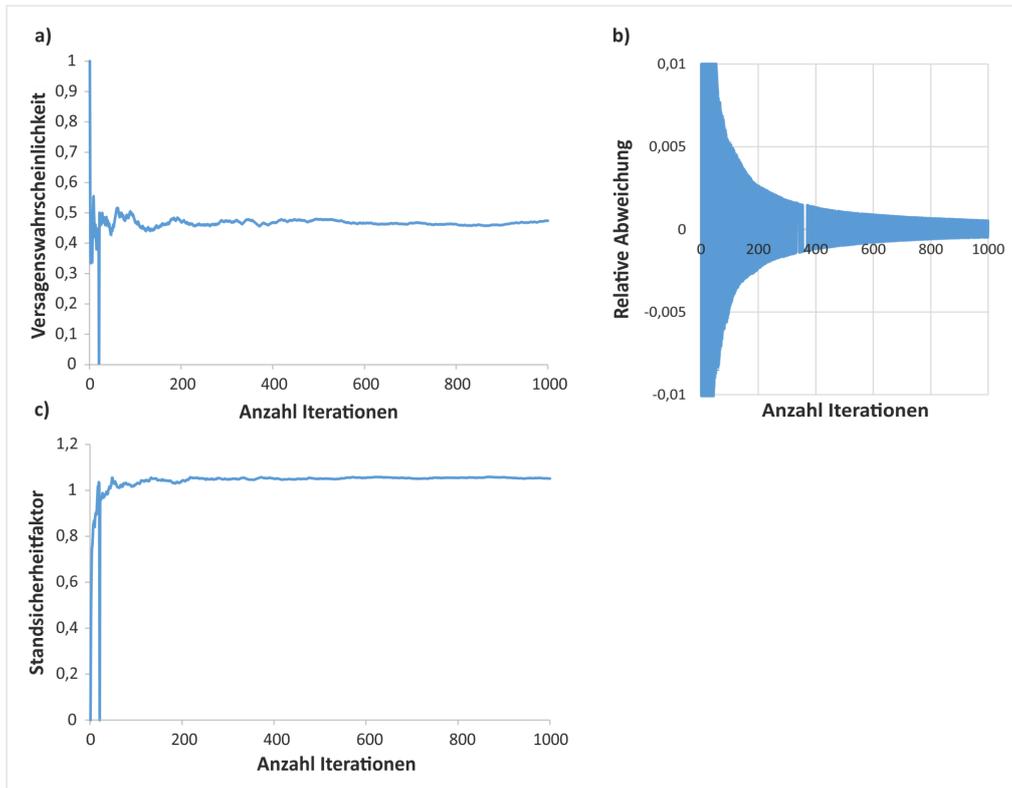


Abb. 3-15: Diagramme zur Überwachung der Konvergenz der Monte-Carlo-Simulation: a) Konvergenz der Versagenswahrscheinlichkeit; b) Relative Residuen; c) Standsicherheitsfaktor.

Die Validierung anhand der ROC-Kurve folgt dem gleichen Prinzip wie bei den statistischen Modellen (s. Kapitel 3.2.1.2.5). Das finale Modell enthält Werte für die Versagenswahrscheinlichkeit, die auf der x-Achse des ROC-Diagramms absteigend sortiert werden können. In den durch die Werte gebildeten Klassen wird die Häufigkeit der aufgetretenen Ereignisse kumulativ auf der y-Achse aufgetragen. Die Fläche unterhalb der entstandenen Kurve wird analog zur [Berechnung der ROC-Kurve](#) wie in der Methode der Gewichteten Evidenzen bestimmt.

3.2.2.3 Nachbereitung

3.2.2.3.1 Zonierung

Eine Einteilung in Empfindlichkeitszonen kann theoretisch direkt über die Versagenswahrscheinlichkeit erfolgen. Dieser Wert ist nicht abhängig von der räumlichen Verteilung der Parameter im Modellgebiet wie es etwa bei statistischen Methoden der Fall ist. Daher können zwei unabhängig modellierte Gebiete anhand der Versagenswahrscheinlichkeitswerte verglichen werden, vorausgesetzt, es werden Daten gleicher Auflösung verwendet und die Parametrisierung erfolgt nach gleicher Systematik. Da die Qualität der Modelle anhand von Beobachtungsdaten im Validierungsschritt überprüft wird,

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

können sich dennoch Unterschiede in den ROC-Kurven ergeben, wenn Menge und Qualität der Beobachtungsdaten regional unterschiedlich sind.

Um die allgemeine Vergleichbarkeit auch mit Modellen aus anderen Modellierungsmethoden zu gewährleisten, kann auch das IHM-Modell anhand der ROC-Kurve nach [dem gleichen Prinzip wie bei den statistischen Modellen](#) zoniert werden.

3.2.3 Analytischer Hierarchieprozess

Der Analytische Hierarchieprozess (AHP) ist eine heuristische Methode, die es ermöglicht, komplexe Entscheidungsprobleme zu strukturieren, zu vereinfachen, und so zu einer tragfähigen Entscheidungsfindung beizutragen. Dabei ist die Analyse mittels AHP nachvollziehbar und mathematisch auswertbar. Grundlage des Entscheidungsprozesses zwischen alternativen Expertenannahmen sind klar definierte Kriterien, deren Gewichtung und Bewertung auf der Grundlage von Paarvergleichen erfolgt. Zur Bewertung wird dabei eine Skala von 1 bis 9 Punkten herangezogen (s. [Kapitel 2.3.4](#) und [Kapitel 2.6.2](#)). Neben der Gewichtung ermittelt das dem Analytischen Hierarchieprozess zugrundeliegende mathematische Modell auch die Konsistenz der Schätzung. Dadurch kann eine Aussage über die Qualität des Ergebnisses und der daraus erfolgten Entscheidung getroffen werden.

Ein schematischer Workflow zur Anwendung des Analytischen Hierarchieprozesses zur Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit ist in Abb. 3-16 skizziert.

3.2.3.1 Datenvorbereitung

3.2.3.1.1 Definition des Problems/Ziels

Prioritäres Ziel der AHP-Analyse ist die Erstellung eines Index, mit dem die Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen in einer Region beurteilt werden kann. Hierzu können weitere Unterziele definiert werden, wie z. B. die Bewertung der Empfindlichkeit gegenüber [Sturz- oder Rutschprozessen](#). Da die AHP-Analyse auf einer Gruppenbewertung durch mehrere Experten basiert, muss sichergestellt sein, dass die Formulierung des Problems möglichst eindeutig ist und von allen Beteiligten verstanden wird.

3.2.3.1.2 Überprüfung der Datenqualität

Mit der Definition des Ziels wird in der Regel auch abgewogen, welche Einflussfaktoren bei der Lösung des Problems zu berücksichtigen sind. Die zur Entscheidungsfindung herangezogenen Informationsebenen sind in der Qualität zu überprüfen und müssen eine Mindestqualität in der räumlichen Darstellung der Informationen aufweisen. Obwohl der Einfluss einzelner Parameter und Parameterklassen durch Experten bewertet wird, ist die räumliche Verteilung der Parameterklassen ausschließlich durch die Qualität und Auflösung der verfügbaren Informationsebenen bestimmt. Daher ist auch bei Anwendung der AHP-Methodik eine visuelle Qualitätssicherung der einzelnen Informationsebenen geboten.

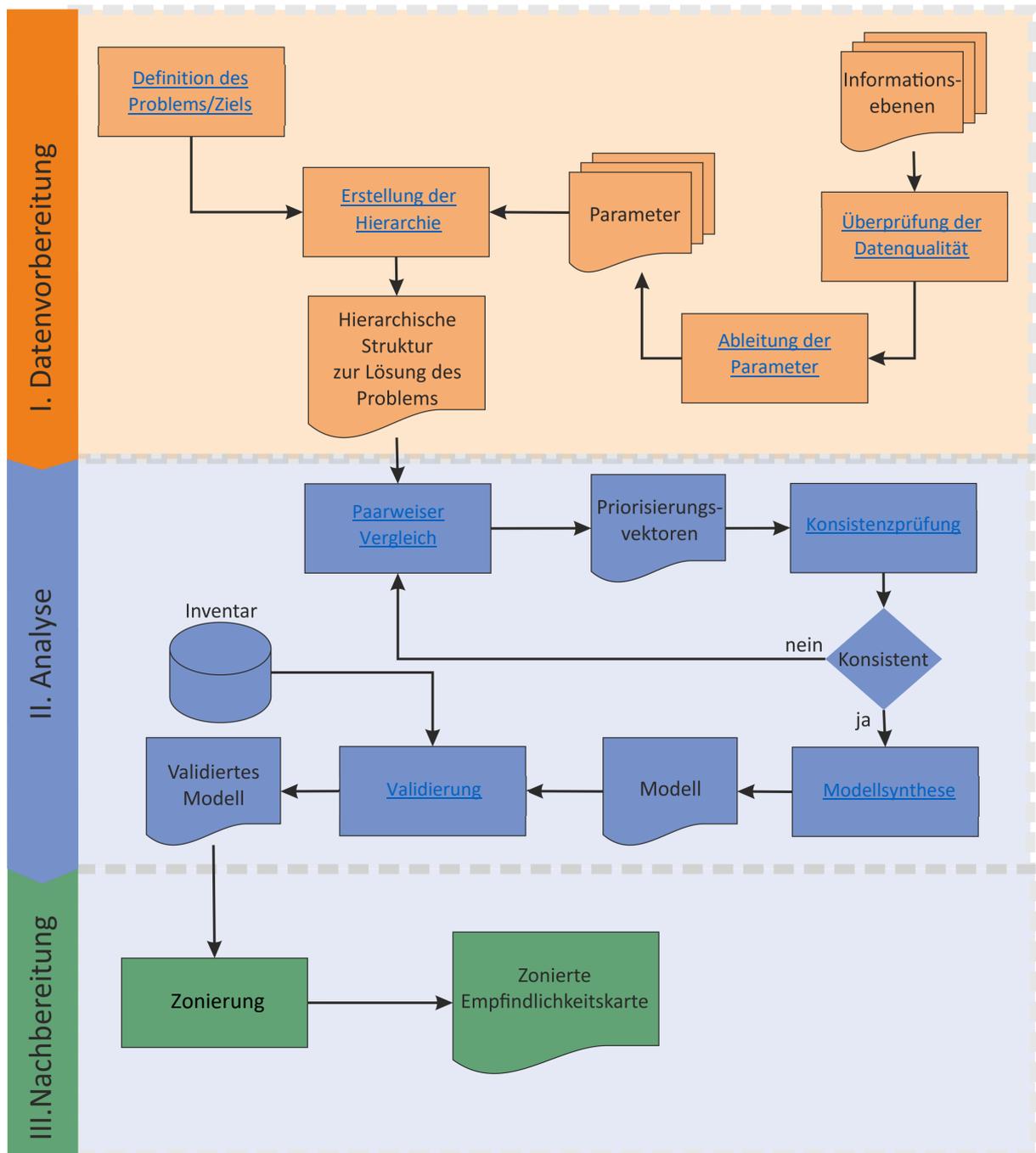


Abb. 3-16: Schematischer Workflow zur Anwendung des Analytischen Hierarchieprozesses zur Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit.

3.2.3.1.3 Ableitung der Parameter

Bei der heuristischen Vorgehensweise kann bei der Auswahl und Definition von Faktoren und Kriterien auf die Erfahrungen anderer Analysen, z. B. aus statistischen Analysen, zurückgegriffen werden (s. Kapitel 3.2.1.1.3). Die methodische Vorgehensweise zielt auf den paarweisen Vergleich von Kategorien. Aus diesem Grund werden für die Analyse kategorische oder diskretisierte kontinuierliche Datensätze verwendet. Bei der Klassifikation der kontinuierlichen Daten ist zu beachten, dass die datengetriebenen Sensitivitätsanalysen, die in der bivariaten statistischen Vorgehensweise genutzt werden können, mangels Beobachtungsdaten beim Einsatz von heuristischen Methoden meist nicht verwendbar sind. Die Klassifikation der kontinuierlichen Daten ist demnach als eine subjektive Prozedur

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

anzusehen, bei der die Klassengrenzen nach dem Ermessen der durchführenden Fachkraft gewählt werden.

3.2.3.1.4 Erstellung der Hierarchie

In der Abb. 3-17 wird das Prinzip der hierarchischen Strukturierung verdeutlicht. Folgende Faktoren sollten bei der Erstellung einer hierarchischen Struktur berücksichtigen werden:

- Die Hierarchie ist vollständig, d. h. alle relevanten Kriterien, die zur Problemlösung beitragen können, sind in die Hierarchie eingebunden;
- Die Elemente in einer Hierarchieebene beeinflussen nur die höheren Ebenen und werden nur von Elementen aus der darunterliegenden Ebene beeinflusst. Elemente in einer Ebene sind voneinander unabhängig und beeinflussen sich nicht³⁴.

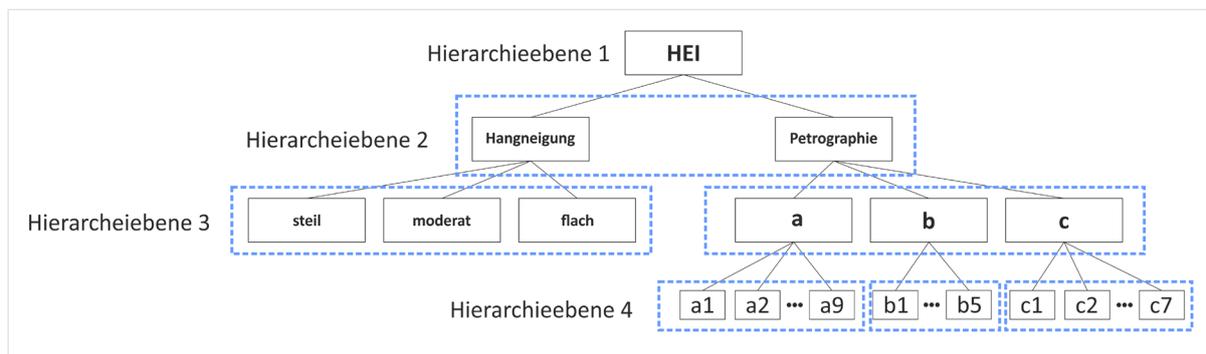


Abb. 3-17: Schematische Skizze einer möglichen Hierarchiestruktur, bestehend aus vier Hierarchieebenen (HEI: Hangrutschungsempfindlichkeitsindex); a, b, c stehen für unterschiedliche Gruppen von Gesteinstypen; a1 – c7 repräsentieren detaillierte Beschreibungen der Petrographie.

Das Problem in der Hierarchieebene 1 *Hangrutschungsempfindlichkeitsindex (HEI)* wird über die Betrachtung der Hangneigung und Petrographie gelöst. Die gestrichelt umrandeten Bereiche umfassen die Teilbereiche, in denen die Erhebung der expertenbasierten Urteile durch paarweise Vergleiche erfolgt. So sollen in der zweiten Hierarchieebene die Wichtigkeit der Hangneigung gegenüber der Petrographie abgeschätzt werden.

Die Hangneigung wird ihrerseits in drei Subkategorien unterteilt, die untereinander paarweise verglichen werden sollen. Da die Petrographie im oben aufgeführten Beispiel (Abb. 3-17) insgesamt 21 Kategorien hat (z. B. Legendeneinheiten), ist ein paarweiser Vergleich aller 21 Kategorien in einer hierarchischen Ebene umständlich und auf Grundlage [einer 9-wertigen Skala](#) nahezu unmöglich. Daher werden die 21 Kategorien in drei Subgruppen (a, b, c) eingeteilt. In der Praxis könnte diese Einteilung, z. B. unter Berücksichtigung genetischer oder ingenieurgeologischer Eigenschaften oder anderer geeigneter Gruppierungsmöglichkeiten, erfolgen. In der dritten Hierarchieebene sollen die drei Subgruppen und in der vierten Hierarchieebene die Elemente der Subgruppen paarweise miteinander verglichen werden.

Die Erstellung der Hierarchie geht Hand in Hand mit GIS-Operationen auf den zugrundeliegenden Rasterdatensätzen oder Vektordaten der Parameter. Jede hierarchische Ebene muss durch eine geeignete Gruppierung der räumlichen Daten abgebildet werden. Bei Vektordaten lässt sich die Strukturierung

³⁴ Innerhalb eines Parameters ist dieses Kriterium immer erfüllt, da die Parameterklassen disjunkt sind, d. h. sie schließen sich räumlich aus. Bei zwei unterschiedlichen Parametern innerhalb einer Hierarchieebene muss die Unabhängigkeit wie bei bivariaten statistischen Methoden angenommen werden.

durch Aggregation der Eigenschaften in Attributtabelle oder in einer Datenbank durchführen. Für Rasterdaten können binäre Masken erstellt werden. Möglich sind auch Rasterattributtabelle bzw. externe Tabellenstrukturen, die später über einen eindeutigen Schlüsselwert an die Raster angehängt werden.

3.2.3.2 Analyse

3.2.3.2.1 Paarweiser Vergleich

In der Analyse gilt es zunächst, die gruppierten Kriterien paarweise miteinander zu vergleichen. Hierfür wird eine Matrix aufgestellt, in der die Kriterien gegenübergestellt werden. Die Gewichte werden mit Hilfe einer 9-stufigen Skala zugewiesen (s. Kapitel 2.3.4). Die Bestimmung der Parameterklassengewichte erfolgt aus der paarweisen Matrix durch Berechnung des rechtsseitigen Eigenvektors (klassischer Ansatz nach [Saaty \(1980\)](#) (s. Kapitel 2.3.4) oder durch Bestimmung eines Priorisierungsvektors anhand der geometrischen Mittelwertbestimmung (z. B. [Dong et al., 2010](#)). Die letzte Variante findet in neueren Anwendungen größere Aufmerksamkeit, da auf die iterative Berechnung des Eigenvektors verzichtet und die Aufgabe sehr übersichtlich in einer Tabellenkalkulation gelöst werden kann. Die Tab. 3-11 zeigt ein einfaches Beispiel einer AHP-Analyse für einen Sturzprozess unter Verwendung des geometrischen Mittelwerts. Der geometrische Mittelwert wird auch bei Gruppenentscheidungen verwendet, wenn mehrere Expertenmeinungen aggregiert werden müssen (z. B. [Mühlbacher & Rädke, 2014](#)).

3.2.3.2.2 Konsistenzprüfung

Die Berechnung des Eigenvektors oder des Priorisierungsvektors ist an eine Konsistenzprüfung gekoppelt. Über die Maßzahlen Konsistenzindex (CI) und Konsistenzverhältnis (CR) wird geprüft, ob die paarweisen Vergleiche logisch und konsistent sind und die Schätzwerte nicht zufällig abgegeben wurden. Dabei sollte der CR-Wert den Wert 0,1 nicht überschreiten. Ist dies für eine Vergleichsgruppe nicht der Fall, muss der paarweise Vergleich innerhalb der betroffenen Teilvergleichsgruppe erneut durchgeführt werden.

3.2.3.2.3 Modellsynthese

In der Modellsynthese werden die gewichteten Elemente in der Hierarchie entlang ihrer Pfade zu einem Modellwert aggregiert. In der klassischen AHP-Vorgehensweise wird von der untersten Hierarchieebene bis zur obersten Hierarchieebene multipliziert. Die Verrechnung der unterschiedlichen Hierarchiepfade in der obersten Ebene erfolgt dann durch Addition (Tab. 3-11). Es ist jedoch denkbar, auch hier eine Produktregel anzuwenden, wenn die normierten Gewichtswerte als Wahrscheinlichkeiten interpretiert werden. Durch die Multiplikation wird eine größere Streckung der Modell-Wertespanne erreicht. Die relative Anordnung der Klassengewichte wird dabei nicht verändert. Eine Prüfung ist am Beispiel in der Tab. 3-11 möglich, indem die Felder der HEI-Matrix als Produkt der Parameterpfade berechnet werden.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

3.2.3.2.4 Validierung

Die Validierung von heuristischen Modellen ist oft mit Schwierigkeiten verbunden, da diese Arbeitsweise vorzugsweise dann gewählt wird, wenn auf datengetriebene Methoden mangels Beobachtungsdaten nicht zurückgegriffen werden kann. Es ist aber auch möglich, dass die Quantität von Beobachtungsdaten den Einsatz von statistischen Methoden nicht erlaubt, jedoch für Validierungszwecke ausreichend ist. Liegen Beobachtungsdaten vor, kann die ROC-Kurve wie bei statistischen Verfahren eingesetzt werden, um die Güte des Modells zu bewerten (s. Kapitel 3.2.1.2.5). Liegen keine Inventarinformationen vor, kann nur noch indirekt validiert werden, indem z. B. lokale geotechnische Modelle zum Vergleich herangezogen werden. Auch könnten bereits frühere Sicherungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Hierbei gilt es zu überprüfen, ob das generierte Modell an den betrachteten Hängen ein höheres Gefährdungspotenzial aufweist als an Hängen, die nicht gesichert wurden. Grundsätzlich eignen sich für eine indirekte Validierung alle Indizien, die auf unterschiedliche Gefährdungspotenziale hinweisen. Handelt es sich dabei um gleichberechtigte Indikatoren, können diese anstatt der Rutschungsereignisse in die Validierung mit der ROC-Kurve einbezogen werden, um eine quantitative Aussage über die Modellgüte zu bekommen.

Tab. 3-11: Beispielrechnung für eine Hierarchiestruktur mit drei Ebenen (Erläuterungen: Box 3-5).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2					Kalkstein	Mergel	Lehm			
3				steil	0,701	0,534	0,483			
4				moderat	0,393	0,226	0,176			
5				flach	0,290	0,124	0,073			
6										
7				Hangneigung			Petrographie			
8				0,67			0,33			
9				Hangneigung	Petrographie	RGMM				
10				1,00	2,00	0,67				
11				0,50	1,00	0,33				
12				Σ	1,50	3,00				
13				0	0,69	1,41	Eigenwert λ	2,00		
14				-0,69	0	0,71	CI	0,00		
15						Σ	2,12	CR	0,00	
16										
17		steil	moderat	flach			Kalkstein	Mergel	Lehm	
18		0,69	0,23	0,08			0,72	0,22	0,07	
19										
20		steil	moderat	flach	RGMM		Kalkstein	Mergel	Lehm	RGMM
21	steil	1	3	9	0,69	Kalkstein	1	4	9	0,72
22	moderat	0,33	1	3	0,23	Mergel	0,25	1	4	0,22
23	flach	0,11	0,33	1	0,08	Lehm	0,11	0,25	1	0,07
24	Σ	1,44	4,33	13,00		Σ	1,36	5,25	14,00	
25		0,00	1,10	2,20	3,00		0,00	1,39	2,20	3,30
26		-1,10	0,00	1,10	1,00		-1,39	0,00	1,39	1,00
27		-2,20	-1,10	0,00	0,33		-2,20	-1,39	0,00	0,30
28				Σ	4,33				Σ	4,60
29		Eigenwert λ		3,00			Eigenwert λ		3,04	
30		CI		0,00			CI		0,02	
31		CR		0,00			CR		0,04	

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

Box 3-5: Beispielrechnung AHP.

Die Berechnung der Hierarchieebenen erfolgt von unten nach oben. Jedes Element ist mit einem farbigen Block gekennzeichnet.

Beginnend mit dem roten Block *Hangneigung* in Kategorien *steil*, *moderat*, *flach*:

1. Ausfüllen der grün markierten Felder C21, D21, D22 in der Bewertungsmatrix durch den Experten. Die Werte liegen, wie im [Kapitel 2.3.4](#) eingeführt, zwischen 1 und 9. Die Diagonale der Matrix führt immer die Zahl 1.
2. Berechnen der Reziproken-Werte in der Matrix: $B_{22}=1/C_{21}$; $B_{23} = 1/D_{21}$; $C_{23} = 1/D_{22}$.
3. Bilden der Matrix-Spaltensummen in B24, C24, und D24.
4. Ausführen der Nebenrechnung (grau markierter Bereich B25:D27) für die Bestimmung des Prioritätenvektors mit der geometrischen Methode. Notwendige Schritte hierfür sind:
 - a. Logarithmieren der Werte der Bewertungsmatrix: $B_{25} = \text{LN}(B_{21})$, $B_{26} = \text{LN}(B_{22})$ usw. für jede Zelle der Bewertungsmatrix.
 - b. Bilden des Mittelwertes für jede Zeile der Nebenrechnungsmatrix $E_{25} = \text{EXP}(\text{MITTELWERT}(B_{25}:D_{25}))$; $E_{26} = \text{EXP}(\text{MITTELWERT}(B_{26}:D_{26}))$ usw.
 - c. Bilden der Spaltensumme über die berechneten Mittelwerte $E_{28}=\text{SUMME}(E_{25}:E_{27})$.
5. Berechnen des normierten Prioritätenvektors in E21 bis E23 mit $E_{21} = E_{25}/E_{28}$; $E_{22} = E_{26}/E_{28}$, usw.
6. Berechnung des Eigenwertes λ in D29: $\text{MMULT}(B_{24}:D_{24};E_{21}:E_{23})$
7. Berechnung CI in D30: $D_{29}-3/2$. Hier steht die 3 für den Rang der Matrix (Anzahl der Spalten in einer quadratischen Matrix) und 2 für Rang der Matrix minus Eins (s. [Kapitel 2.3.4](#)).
8. Berechnung CR in D31: $(D_{29}-3)/((2,7699*3-4,3513)-3)$. Mit 3 als Rang der Matrix und in Grün die Regressionskoeffizienten nach [Alonso & Lamata \(2006\)](#) (s. [Kapitel 2.3.4](#)). Der CR-Wert sollte bei einer konsistenten Schätzung unter 0,1 liegen.
9. Einsetzen der ermittelten Gewichte für Hangneigungskategorien in die Zellen B18:D18 mit $B_{18} = E_{21}$, $C_{18} = E_{22}$ usw.
10. Berechnung des grünen Blocks in Analogie zu Schritten 1-9.
11. Berechnung des blauen Blocks in Analogie zu Schritten 1-9.
12. Berechnung des Rutschungsempfindlichkeitsindex in dem Bereich E3:G5 für jeweilige Kombinationen der Hangneigung und Petrographie mit $E_3 = B_{18}*C_8 + G_{18}*F_8$ usw.

3.2.3.3 Nachbereitung

3.2.3.3.1 Zonierung

Das finale Modell der Hangrutschungsempfindlichkeit beinhaltet je nach der Anzahl der Parameter und ihrer Klassen eine bestimmte Anzahl an Parameterklassenkombinationen, die von ihrer Umgebung anhand des Modellwertes unterscheidbar sind. Wurde das Modell anhand einer ROC-Kurve validiert, kann diese für die Zonierung herangezogen werden (s. [Kapitel 3.2.1.3.1](#)).

Liegt keine ROC-Kurve vor, können die Zonen heuristisch eingeteilt werden. Dabei werden mit Hilfe der Modellwerte die Parameterkombinationen sortiert und eine relative Rangordnung von hoch empfindlich bis weniger empfindlich gegenüber Massenbewegungen abgeleitet.

3.2.4 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze (KNN) finden eine breite Anwendung zur Lösung einer Vielzahl von Problemen in der Qualitätssicherung, Bild-, Muster- und Spracherkennung. In der Gefährdungsanalyse durch Massenbewegung werden KNN seit mehr als 20 Jahren eingesetzt. KNN sind komplexe

Methoden, in denen Netzarchitekturen mit Algorithmen, Aktivierungsfunktionen und weiteren Einstellungen kombiniert werden können (s. Kapitel 2.3.5). Der vorliegende Workflow (Abb. 3-18) beschreibt das prinzipielle Vorgehen zur Abschätzung der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Anwendung eines Künstlichen Neuronales Netzes in Anlehnung an das Modellierungsbeispiel 2.4 (s. Kapitel 2.6.2.4). Die Herangehensweise der MBiD-Arbeitsgruppe ist in Box 3-6 (Pseudocode) dokumentiert. Die Analyse wurde in der Programmiersprache R unter Anwendung der Pakete *Training of Neural Networks* (Fritsch et al., 2019) und *Interpretable Machine Learning* (Molnar et al., 2018) umgesetzt.

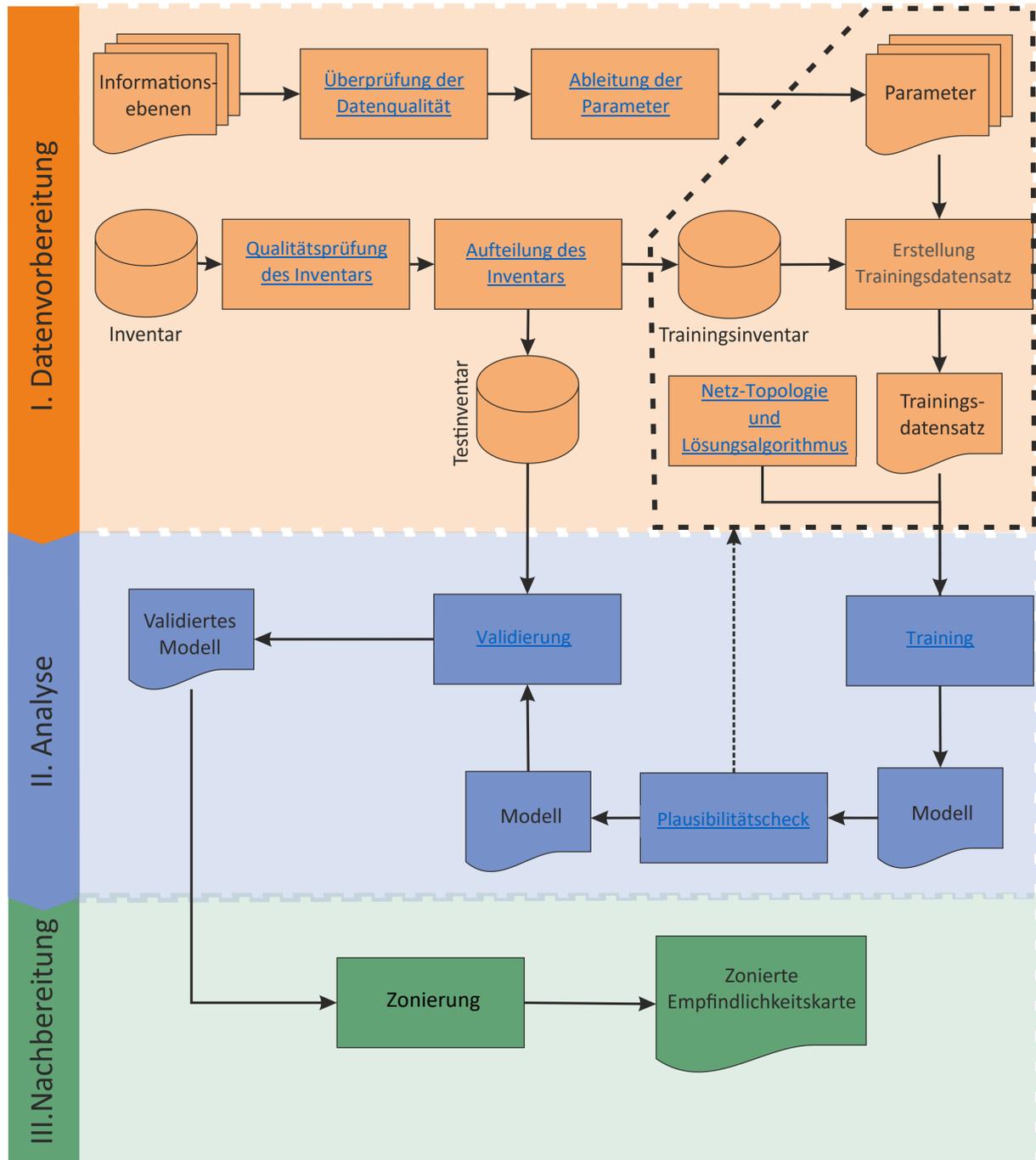


Abb. 3-18: Schematischer Workflow zur Anwendung eines Künstlichen Neuronales Netzes für die Bewertung der Hangrutschungsempfindlichkeit; der schwarz-gestrichelt umrandete Bereich zeigt die Schritte, die in der Rekursion wiederholt werden müssen, wenn das Modell modifiziert werden soll.

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

3.2.4.1 Datenvorbereitung

3.2.4.1.1 Überprüfung der Datenqualität (ohne Inventar von Massenbewegungen)

Die Überprüfung der Datenqualität richtet sich nach den gleichen Kriterien wie bei den statistischen Methoden (s. Kapitel 3.2.1.1.1):

- [Datenherkunft und Metadaten](#);
- [Visuelle Kontrolle](#);
- [Darstellung der räumlichen Verteilungen von Parametern](#).

3.2.4.1.2 Überprüfung der Qualität des Inventars von Massenbewegungen

Beobachtungsdaten oder Labels stellen für KNN wie für die statistischen Methoden eine sehr wichtige Grundlage dar, wenn es um die überwachte Klassifikationen³⁵ geht. Es gelten hier die gleichen Qualitätsanforderungen wie bei den statistischen Methoden (s. Kapitel 3.2.1.1.2).

3.2.4.1.3 Ableitung der Parameter

Wie bereits im Kapitel 3.2.1 thematisiert, können auch für das KNN unterschiedliche Parameter aus den vorhandenen Informationsebenen einfließen. Auch hier gilt, dass es sich um flächenhafte Daten handeln muss. Liegen Informationen als Punkdaten oder Polylinien vor, müssen diese in flächenhafte Datensätze durch die Umwandlung in Distanz- oder Dichteraster überführt werden (s. Kapitel 3.2.1.1.3).

Im Künstlichen Neuronalen Netz können sowohl kategorische als auch kontinuierliche Datensätze verarbeitet werden. Die kategorischen Datensätze müssen in binäre Variablen zerlegt werden. Die kontinuierlichen Daten werden in der Regel auf den Wertebereich zwischen 0 und 1 normiert (z. B. [Bishop, 1995](#)). Zusätzlich können die kontinuierlichen Daten durch Transformationen (z. B. Log-Transformation, Box-Cox-Transformation) in die Normalverteilung überführt werden. Dieser Schritt ist nicht zwingend notwendig, kann aber die Varianz innerhalb des Datensatzes reduzieren und zu besseren Konvergenzraten und Stabilität der numerischen Lösungen beitragen. Nach [Shanker et al. \(1995\)](#) verliert die Transformation der Daten zu normalverteilten Variablen mit größer werdenden Datensätzen an Bedeutung.

3.2.4.1.4 Aufteilung des Inventars

Die Aufteilung des Inventars folgt den gleichen Bestimmungen wie in den statistischen Methoden (s. Kapitel 3.2.1.1.4).

3.2.4.1.5 Erstellung eines Trainingsdatensatzes

Voraussetzung für die Modellierung mit einem Künstlichen Neuronalen Netz ist die Erzeugung eines repräsentativen Trainingsdatensatzes. Dabei ist auf die Balance zwischen den Ereignissen (mit 1 kodiert) und Nichtereignissen (mit 0 kodiert) im Trainingsdatensatz zu achten. Das Verhältnis zwischen

³⁵ Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, wird in der Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit ein binäres Klassifikationsproblem mittels einer überwachten Klassifikation gelöst. Künstliche Neuronale Netze können jedoch grundsätzlich auch für andere Probleme eingesetzt werden, bei denen die Beobachtungsdaten keine große Rolle spielen.

den als 1 und 0 kodierten Labels bietet bei einem Verhältnis zwischen 1 : 2 und 1 : 3 die besten Modellanpassungen. Da Hangrutschungen seltene Ereignisse darstellen, die in der Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets meist eine sehr kleine Fläche einnehmen, muss eine ausbalancierte Stichprobe generiert werden.

Grundsätzlich gibt es zwei Strategien, wie das Verhältnis in der Stichprobe ausbalanciert werden kann: das *Oversampling* und das *Undersampling*.

Beim *Oversampling* werden die Kombinationen der unterrepräsentierten Klasse (meist die 1) randomisiert vervielfacht und dem Trainingsdatensatz hinzugefügt, bis das ausbalancierte Verhältnis erreicht wird. Beim *Undersampling* werden die Kombinationen der überrepräsentierten Klasse aus dem Datensatz randomisiert eliminiert bis sich die gewünschte Balance eingestellt hat. In den Fallstudien 2 (s. Kapitel 2.6.2) und 4 (s. Kapitel 2.6.4) wurde in allen Modellierungsbeispielen mit KNN das [Undersampling](#) eingesetzt.

3.2.4.1.6 Netz-Topologie und Lösungsalgorithmus

Die Auswahl einer passenden Netz-Topologie oder auch der Netzarchitektur birgt viele Freiheitsgrade und ist mit den mathematisch-theoretischen Konzepten verhältnismäßig schwach abgedeckt. So gibt es keine Faustformel oder Richtlinie wie die Netzarchitektur zu gestalten ist. Fortgeschrittene KNN-Module (z. B. IBM SPSS® Modeler) bieten Algorithmen zur iterativen Netzarchitektur-optimierung.

Bei der Erstellung der Netzarchitektur sind nachstehende Faktoren von Relevanz:

- Die Konfiguration der Eingabeschicht des Netzes (durch den Trainingsdatensatz bestimmt);
- Die Anzahl der verborgenen Schichten (zu wählen);
- Die Anzahl der Neuronen der verborgenen Schicht(en) (zu wählen);
- Die Aktivierungsfunktion (zu wählen);
- Der Lösungsalgorithmus (zu wählen).

Für die Empfindlichkeitsanalyse gegenüber Massenbewegungen wird überwiegend ein dreischichtiges Netz mit einer Eingabeschicht, einer verborgenen Schicht und einer Ausgabeschicht eingesetzt (s. Kapitel 2.3.5).

Die Anzahl der Neuronen in der verborgenen Schicht ist in der Regel geringer als die Anzahl der Eingangsparameter. Mit Einbindung weiterer verborgener Schichten wird die Anzahl der Neuronen in jeder nachfolgenden Schicht reduziert.

Vielfach verwendete Aktivierungsfunktionen sind *logistische Funktion*, *Tangens hyperbolicus* und *ReLU (Rectified Linear Unit)*. In den Fallstudien wurde die logistische Aktivierungsfunktion eingesetzt (Box 3-6).

Die Bestimmung der Gewichte in einem Künstlichen Neuronalen Netz wird durch eine klassische Fehlerrückführung (engl.: error backpropagation) oder abgewandelte Algorithmen gehandhabt. In den Fallstudien 2 (s. Kapitel 2.6.2) und 4 (s. Kapitel 2.6.4) hat die MBiD-Arbeitsgruppe die sogenannte *resilient backpropagation* verwendet (Box 3-6). Die Fehlerfunktion, für die es ebenfalls mehrere Optionen

3 Praktische Empfehlungen und Anleitungen für die Modellierung

gibt, wurde durch die Residuenquadratsumme vorgegeben. Darüber hinaus gibt es weitere Anpassungsmöglichkeiten in Kombination mit anderen Algorithmen, wie z. B. die Festlegung der Lernrate oder deren Grenzwerte.

Box 3-6: Pseudocode für das Künstliche Neuronale Netz in R.

Programm Künstliches Neuronales Netz (Rasterdateien eines Typs in einem Verzeichnis [*.tif],
Name des Ausgabe-Wahrscheinlichkeitsrasters,
Name der Ausgabedatei für Statistik,
Multiplikator für Anzahl von Zellen mit Nicht-Ereignissen [2],
Prozentsatz der zu berücksichtigenden Ereignisse [0.8],
Trainingswiederholungen im Neuronalen Netz [1],
Fehlerfunktion [sse],
Aktivierungsfunktion [logistic],
Neuronales Netz Algorithmus [rprop+],
Maximale Anzahl der Schritte im Training [1e+05],
Anzahl der Neuronen pro versteckter Schicht [10],
Plotte Netz mit Gewichten [F],
Ausgabe in Statistikdatei [F])

*Lade alle Rasterdateien in einen Rasterstapel /*Alle Raster besitzen die gleiche Projektion, Ausdehnung und Auflösung. Das Inventarraster ist binär kodiert mit dem Wert 1 für Ereignis und 0 für kein Ereignis. Das Inventarraster hat eine Benennung, sodass es auf alphabetisch erstem Platz aller Rasterdateinamen steht.*/**

Erstelle einen Datenframe aus dem Rasterstapel

Normiere alle Daten

Teile den Datenframe in Frame mit Ereignissen und Frame mit Nicht-Ereignissen

Ziehe prozentual die Anzahl Datensätze aus Ereignis-Frame

Ziehe die Anzahl (Multiplikator * Anzahl Ereignisse) Datensätze aus Nicht-Ereignis-Frame

Verbinde die beiden neu erstellten Frames (Ereignis-Frame, Nicht-Ereignis-Frame)

Erstelle generische Modellfunktion

Trainiere das Neuronale Netz

Wenn Plotte Netz mit Gewichten wahr

Visualisiere das Neuronale Trainingsnetz mit Gewichten

Übertrage die Ergebnisse des Trainings auf den gesamten Datensatz

Gebe die Statistik für die Vorhersage Ereignis Nicht-Ereignis **aus**

Visualisiere für die Vorhersagegruppen Ereignis und Nicht-Ereignis in Form von violin plots

Schreibe das Wahrscheinlichkeitsraster

Analysiere die Wichtigkeit der eingeflossenen Parameter für das Vorhersagemodell

Visualisiere die Wichtigkeit der eingeflossenen Parameter

Ende Programm Künstliches Neuronales Netz

3.2.4.2 Analyse

3.2.4.2.1 Training

- **Schritt 1:** Die Gewichte der einzelnen Netzneuronen in der verborgenen Schicht werden durch den gewählten Algorithmus und unter Verwendung des Trainingsdatensatzes solange iterativ angepasst, bis das Netz in einem Optimum konvergiert. Das bedeutet, dass sich der Fehler in der Ausgabeschicht mit weiteren Anpassungen nicht mehr verändert. Um zu lange Trainingszeiten zu vermeiden und dem *Auswendiglernen* der Trainingsdaten vorzubeugen, lassen sich die Lerniterationen (auch Epochen) manuell auf eine Maximalzahl begrenzen.
- **Schritt 2:** Das trainierte Netz wird auf den gesamten Datensatz angewendet, um ein Wahrscheinlichkeitsraster (Vorhersagemodell) zu erzeugen.

3.2.4.2.2 Plausibilitätscheck

Wie für jede datengetriebene Analyse müssen auch die Ergebnisse einer KNN-Modellierung auf ihre Plausibilität geprüft werden. Ebenso wie die statistischen Methoden können Künstliche Neuronale Netze Zusammenhänge zwischen Daten erkennen, jedoch nicht deren Kausalität.

In Abhängigkeit von der genutzten Software lassen sich die einzelnen modellierten Gewichte in der verborgenen Schicht ausgeben. Aufgrund möglicher nichtlinearer Beziehungen ist eine direkte Interpretation der Gewichte im Gegensatz zu den bivariaten oder multivariaten statistischen Verfahren nicht möglich. Somit sind weitere Analysen erforderlich, um die Bedeutung einzelner Parameter für das Modellergebnis erkennbar zu machen.

In den letzten Jahren wurden zunehmend Verfahren entwickelt, um die Ergebnisse von Künstlicher Intelligenz erklärbar zu machen. Eines dieser Verfahren ist die sogenannte [Wichtigkeitsanalyse](#). Hier wird für das generierte Modell eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Jeder Parameter wird nacheinander über mehrere Wiederholungen durch eine zufällige Variable ersetzt. Die Auswirkungen der Manipulation werden am Netzausgang als Fehler gemessen. Je größer der bestimmte Fehler, desto wichtiger ist der Parameter für das Modell.

Über diese Größe lassen sich empirische Erwartungen mit den Modellergebnissen vergleichen. Zeigt das Modell keine plausiblen Zusammenhänge für einzelne Parameter an, sollten die Schritte der Datenvorbereitung und die Wahl der Netz-Topologie kritisch geprüft und das Modell ggf. neu berechnet werden.

3.2.4.2.3 Validierung

Hat das erzeugte Modell die Plausibilitätsprüfung bestanden, kann es mit dem Testinventar validiert werden. Die Validierung erfolgt mit der ROC-Kurve analog zur Validierung von statistischen Modellen (s. [Kapitel 3.2.1.2.5](#)).

4 Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland

3.2.4.3 Nachbereitung

3.2.4.3.1 Zonierung

Das validierte Modell aus dem KNN stellt ein Wahrscheinlichkeitsraster mit einer Wertespanne zwischen 0 und 1 dar. Um die relative Vergleichbarkeit zu anderen Methoden zu gewährleisten, kann auch das KNN-Modell über die ROC-Kurve zoniert werden (s. Kapitel 3.2.1.3.1).

4 Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland

4.1 Allgemeine Grundlagen

Sachstand und Verfügbarkeit (November 2020)

Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland stehen eine Vielzahl von kleinmaßstäblichen geowissenschaftlichen Übersichtskarten (Maßstab 1 : 250 000 oder kleiner) als digitale Datensätze unterschiedlicher Themenfelder zur Verfügung (z. B. Boden, Geologie, Geophysik, Rohstoffe, Grundwasser). Sie wurden in den letzten Jahrzehnten durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Länder im Rahmen der geologischen Landesaufnahme in Zusammenarbeit mit der BGR erarbeitet (s. Kapitel 2.7). Diese Produkte sind in Form analoger Karten, als korrespondierende digitale Datensätze in unterschiedlichen Datenformaten oder als Web-Dienste, z. B. im [Produktcenter der BGR](#) (Tag des Zugriffs: 16.09.2020), verfügbar.

Im Gegensatz zu den o. g. thematischen Übersichtskarten sind mit Bezug zum Themenfeld *Geogene Gefährdung* kleinmaßstäbliche Übersichtskarten unter Abdeckung des Bundesgebiets nur in geringem Umfang vorhanden.

Mit dem [Erdbebenkatalog der Bundesrepublik Deutschland](#) (Tag des Zugriffs: 16.09.2020) und benachbarter Gebiete, vorgehalten durch die BGR, existiert eine frei zugängliche Ressource, um die seismische Gefährdung lokal, regional oder überregional zu analysieren. Als Beispiel sei die probabilistische Erdbebenzonenkarte in der [DIN 4149: 2005-04](#) genannt.

Für die aufgrund der geologischen Gegebenheiten in Deutschland weit verbreitete Bedrohung durch subrosive Prozesse unter Bildung von Erdfällen und Senkungen liegt bislang keine Übersichtsdarstellung dieser geogenen Gefahr im Ergebnis einer geowissenschaftlichen Bearbeitung durch die SGD und BGR vor.

Mit Stand November 2020 existiert keine offizielle, bundesweit einheitliche Hangrutschungsempfindlichkeitskarte im Übersichtsmaßstab 1 : 250 000 oder kleiner, die im Ergebnis einer Kooperation der SGD der Länder und der BGR nach einem einheitlichen methodischen Standard konzipiert und veröffentlicht wurde. Dies schließt sowohl eine analoge Karte als auch digitale Datensätze oder Web-Dienste ein. Als Informationsquellen zu Massenbewegungen stehen für Interessenten bzw. Nutzer folgende Alternativen zur Verfügung:

- Die [Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen](#) (Tag des Zugriffs: 06.10.2020) ([Dikau & Glade, 2003](#)) im Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser des Instituts für Länderkunde. Diese Karte wurde auf der Grundlage von Hangneigungsklassen mit 10°-Einteilung auf Basis eines Digitalen Geländemodells (keine Angaben) generiert.

- Die zweite Version der *European Landslide Susceptibility Map (ELSUSv2)* (Gitterweite: 200 m x 200 m), einschließlich des Bundesgebiets, publiziert vom Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission ([Wilde et al., 2018](#)). Der Darstellung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit liegt ein kombinierter statistisch-heuristischer Ansatz zugrunde.
- Die im Rahmen der EOEG-Aktivitäten resultierenden Darstellungen zur Gefährdung durch Massenbewegungen auf unter Berücksichtigung des Bundesgebiets sind bereits im [Kapitel 1.1](#) und [Kapitel 1.3.2](#) thematisiert worden.

Aussagekraft und Nutzungspotenziale

Die Erarbeitung einer *Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland (HEÜK)* im Maßstab 1 : 250 000 oder kleiner kann unter Bezug zur *Aussagekraft* und den *Nutzungspotenzialen* wie folgt diskutiert werden:

- Das Portfolio kleinmaßstäblicher geowissenschaftlicher Informationsquellen würde um den Teilaspekt der geogenen Gefährdung durch Massenbewegungen ergänzt.
- Da keine detaillierteren blattschnittweisen Bearbeitungen im Maßstab 1 : 25 000 oder 1 : 50 000 zur Hangrutschungsempfindlichkeit existieren, könnte eine HEÜK aktuell nur als Ein-Blatt-Karte (vergleichbar mit der o. g. Erdbebenzonenkarte) als Übersicht mit Zonen unterschiedlicher Hangrutschungsempfindlichkeit gegenüber verschiedenen kinematischen Prozessstypen von Massenbewegungen generiert werden.
- Vergleichbar mit anderen geowissenschaftlichen Karten im Übersichtsmaßstab wäre auch eine HEÜK für lokale Planungszwecke nicht geeignet.
- Analog zu den in den Fallstudien 1 bis 4 aufgezeigten Modellierungsansätzen würde eine HEÜK einen Mehrwert generieren, der aus der Nutzung von im Maßstab korrespondierenden geologischen bzw. bodenkundlichen Informationsebenen (in Verbindung mit verfügbaren Inventarinformationen) in Deutschland resultiert.
- Eine HEÜK würde generelle Aussagen zur geogenen Gefährdung durch Massenbewegungen liefern, die z. B. auch im Rahmen des Standortauswahlverfahrens nach dem [Standortauswahlgesetz aus dem Jahr 2017](#) (Tag des Zugriffs: 16.09.2020) von Relevanz sein könnten.
- Durch Generierung einer HEÜK könnte den zunehmenden EU-Anforderungen zur weiteren Integration von Informationen über geogene Gefahren in Deutschland, die u. a. aus Aktivitäten der Expertengruppen des EuroGeoSurveys resultieren (s. [Kapitel 1.1](#) und [Kapitel 1.3.2](#)), sowohl methodisch als auch territorial, partiell Rechnung getragen werden.
- Eine HEÜK könnte als INSPIRE-konforme Informationsebene für Deutschland vorgehalten werden.
- Eine HEÜK könnte für weitergehende bundesweite Analysen wie der Risiko-Exposition von [elements at risk](#) (z. B. Bevölkerung, Infrastruktur etc.) in Zonen unterschiedlicher Hangrutschungsempfindlichkeit genutzt werden.
- Eine HEÜK könnte als Informationsquelle im Rahmen der schulischen und universitären Ausbildung Verwendung finden.

Hinsichtlich der Analyse und deutschlandweiten Darstellung der Hangrutschungsempfindlichkeit im Maßstab 1 : 250 000 oder kleiner sind unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Fallstudien folgende Schlussfolgerungen gezogen worden (s. [Kapitel 2.7](#)):

4 Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland

- Die Abschätzung und Darstellung der Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland für die drei betrachteten Prozesstypen im Sinne eines übergreifenden, validierbaren Modellansatzes ist gegenwärtig nicht möglich.
- Ein konzeptueller Entwurf einer *Übersichtskarte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland* im Maßstab 1 : 250 000 kann beispielhaft realisiert werden (Abb. 4-2).

4.2 Konzeptueller Entwurf einer Karte der Felssturz-Empfindlichkeit in Deutschland

Sturzprozesse sind in statistischen Modellen, wie z. B. der Methode der Gewichteten Evidenzen (MGE), durch den Parameter Hangneigung in hoher Modellgüte charakterisierbar. In der Fallstudie 1 (s. Kapitel 2.6.1: Fränkische Alb und Albvorland) bzw. in der Fallstudie 2 (s. Kapitel 2.6.2: Elbtalgraben) konnte demonstriert werden, dass der Parameter Hangneigung mit mehr als 90 % zur Erklärung der Verbreitungsmuster von Sturzprozessen beiträgt. Im Folgenden werden Grundlagen und Vorgehen zur Erstellung einer HEÜK 1 : 250 000 mit der Methode der Gewichteten Evidenzen erläutert .

Grundlagen

Die aus der Berechnung mit der Methode der Gewichteten Evidenzen resultierenden statistischen Gewichte sind relative Werte. Das bedeutet, dass die Wertespanne der Gewichte von der Größe des Testgebiets, den darin vorkommenden Hangneigungen und von der Auflösung des genutzten Höhenmodells abhängt. Werden die Gewichte zweier unabhängig voneinander analysierter Gebiete direkt miteinander verglichen, werden in der Regel unterschiedliche Gewichtswerte für die gleichen Parameterklassen festgestellt. Diese können zum einen auf den relativen Charakter der Gewichtswerte und zum anderen auf die Unsicherheiten der statistischen Modellierung zurückgeführt werden. Der relative Trend innerhalb der Bewertung wird jedoch für kausale Parameter unabhängig von der Wertespanne der statistischen Gewichte erhalten bleiben. Dies hat zunächst zur Folge, dass, wie in der Fallstudie 1 gezeigt, eine Übertragung der statistischen Gewichte für Hangneigungsklassen auf ein anderes Gebiet prinzipiell möglich ist (s. Kapitel 2.6.1.6). Auf der anderen Seite lässt sich aber ein bestimmter Grenzwert für eine weitere Zonierung mittels der statistischen Gewichte aus einer einzelnen Analyse nicht ableiten.

Methodische Vorgehensweise

Um eine statistische Sicherheit bei der Übertragung der Gewichte auf andere Gebiete zu erzielen, konnte für die konzeptuelle Erstellung einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland auf mehrere unabhängige Modellierungen zurückgegriffen werden. Es wurden die Analysen für die Sturzprozesse aus der Fränkischen Alb und Albvorland, dem Elbtalgraben und ein zusätzlicher Datensatz, der die Sturzprozesse im Alpenraum darstellt, herangezogen (nicht originärer Teil der Fallbeispiele: Informationen durch LfU Bayern).

Für die drei Testgebiete wurden die statistischen Gewichte für die Hangneigungsklassen aus dem DGM10 und dem DGM25 in einer 1°-Einteilung mittels der Methode der Gewichteten Evidenzen bestimmt (Tab. 4-1). Erwartungsgemäß weisen die Gewichte variierende Wertebereiche auf. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Gewichte zu erreichen, wurden diese standardisiert und in einem Plot übereinandergelegt. Die erzeugten Punktwolken (Abb. 4-1) zeigen zwar eine moderate Streuung, unverkennbar aber auch eine funktionale Abhängigkeit, sowohl für Hangneigungsklassen aus dem DGM10 als auch für Hangneigungsklassen aus dem DGM25.

Um eine allgemeingültige empirische Funktion für den Zusammenhang zwischen Hangneigung und statistischen Gewichten abzuleiten, wurde auf dem generierten Datensatz eine Regressionsanalyse durchgeführt. Dabei konnten die Gewichtswerte für Hangneigungen aus dem DGM10 am besten durch eine lineare Funktion (Abb. 4-1a), die Gewichtswerte für Hangneigungen aus dem DGM25 durch eine logarithmische Funktion (Abb. 4-1b) abgebildet werden. Beide Regressionsgleichungen (Abb. 4-1) zeigen ein hohes Bestimmtheitsmaß $R^2 \geq 0,9$.

Tab. 4-1: Parameter zur Bestimmung der Hangneigungsgrenzen für einen konzeptuellen Entwurf einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland (Quellen: Inventar – LfULG Sachsen, LfU Bayern; DGM25 und DGM10 – BKG: s. Tab. 2-9).

Testgebiet*	Anzahl an Sturzereignissen	Maximale Hangneigung [°]		Wertespanne der statistischen Gewichte	
		DGM10	DGM25	DGM10	DGM25
Elbtalgraben	369	78	65	-1,2 bis 9,6	-2,7 bis 7,1
Fränkische Alb und Alvorland	350	77	63	-3,2 bis 7,7	-3,0 bis 7,9
Alpenraum	749	86	80	-3,7 bis 5,4	-3,0 bis 4,2

*Alpenraum: kein Testgebiet im engeren Sinne des MBiD-Projekts.

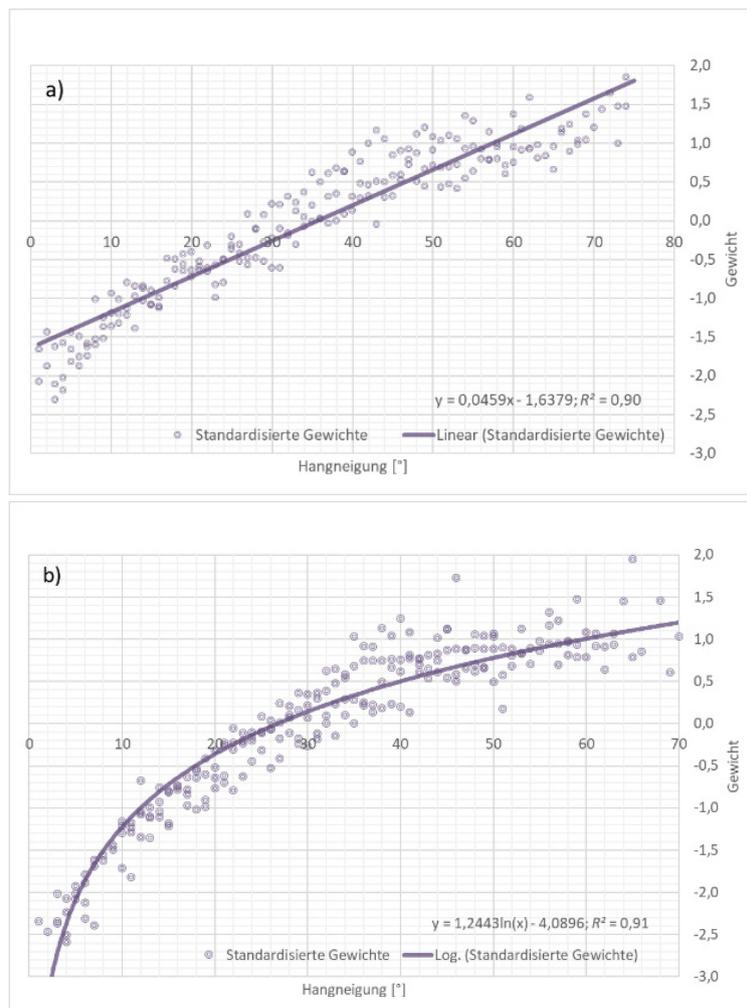


Abb. 4-1: Regressionsgleichungen bzw. – kurven für die standardisierten Gewichte aus allen in Tab. 4-1 genannten Testgebieten für Sturzprozesse mit a) Hangneigungsklassen aus dem DGM10 und b) Hangneigungsklassen aus dem DGM25.

4 Übersichtskarte Hangrutschungsempfindlichkeit für Deutschland

Die ermittelten Funktionen wurden genutzt, um die statistischen Gewichte im Elbtalgraben und der Fränkischen Alb und Albvorland zu bestimmen. Die so erzeugten Modelle wurden unter Rückgriff auf die ROC-Kurve zoniert, wobei die gleiche Abstufung wie in den Fallbeispielen 1 (s. Kapitel 2.6.1) und 2 (s. Kapitel 2.6.2) zur Anwendung kam. Die Gewichtswerte an den Zonierungsgrenzen sind entsprechend der Regressionsgleichungen (Abb. 4-1) in Hangneigungswerte umgerechnet worden (Tab. 4-2).

Ergebnisse und Diskussion

Die Grenzwerte für die einzelnen Zonen sind von der Auflösung des eingesetzten DGM abhängig. Es ist ersichtlich, dass die weitere Verfeinerung der DGM-Auflösung die Grenzwerte für die Klassengrenzen *Sehr hoch* und *Hoch* weiter zu den steileren Hangneigungen verlagert. Somit sind die Grenzwerte weniger als echte Kennwerte für den tatsächlichen physikalischen Prozess, sondern immer im Kontext der Auflösung des DGM und damit einer bestimmten Maßstabsgültigkeit zu diskutieren. Eine erweiterte Vergleichsstudie unter Rückgriff auf das DGM5 und das DGM1 könnte Richtwerte für die Zonierung der Sturzempfindlichkeit in Abhängigkeit von der DGM-Auflösung liefern.

Der konzeptuelle Entwurf einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozessstyps Felssturz in Deutschland wurde mit dem DGM25 in einer vierklassigen Abstufung umgesetzt (Abb. 4-2). Hierfür wurden die Klassengrenzen aus Tab. 4-2 verwendet. Gebiete mit Hangneigungen $\geq 35^\circ$ beinhalten dabei ca. 50 % der Sturzereignisse, Gebiete mit Hangneigungen von 25° bis 35° umfassen weitere 30 % des Inventars an Sturzereignissen und in der Klasse 10° bis 25° finden sich die restlichen 20 %.

Der Kartenentwurf ist so zu interpretieren, dass die Zonen der Sturzempfindlichkeit ausschließlich die potenziellen Ablösungsbereiche des Materials ausweisen. Der Prozessraum, d. h. wie weit eine Sturzmasse transportiert wird, muss in einem separaten Modell identifiziert werden.

Auf eine weitergehende inhaltliche Diskussion bzw. Interpretation der räumlichen Zonierung der Empfindlichkeit für Sturzprozesse in Deutschland wurde seitens der MBiD-Arbeitsgruppe bewusst verzichtet.

Tab. 4-2: Hangneigungsgrenzwerte [°] für Empfindlichkeitszonen in den Testgebieten der Fallstudie 1 (Fränkische Alb und Albvorland) und 2 (Elbtalgraben), bestimmt auf der Grundlage von Regressionsgleichungen (Abb. 4-1).

Testgebiet	Grenzwert Hangneigung, bestimmt aus	Klasse Sehr hoch	Klasse Hoch	Klasse Moderat
Elbtalgraben	DGM10	39	25	12
	DGM25	35	23	13
Fränkische Alb und Albvorland	DGM10	37	25	12
	DGM25	29	19	12

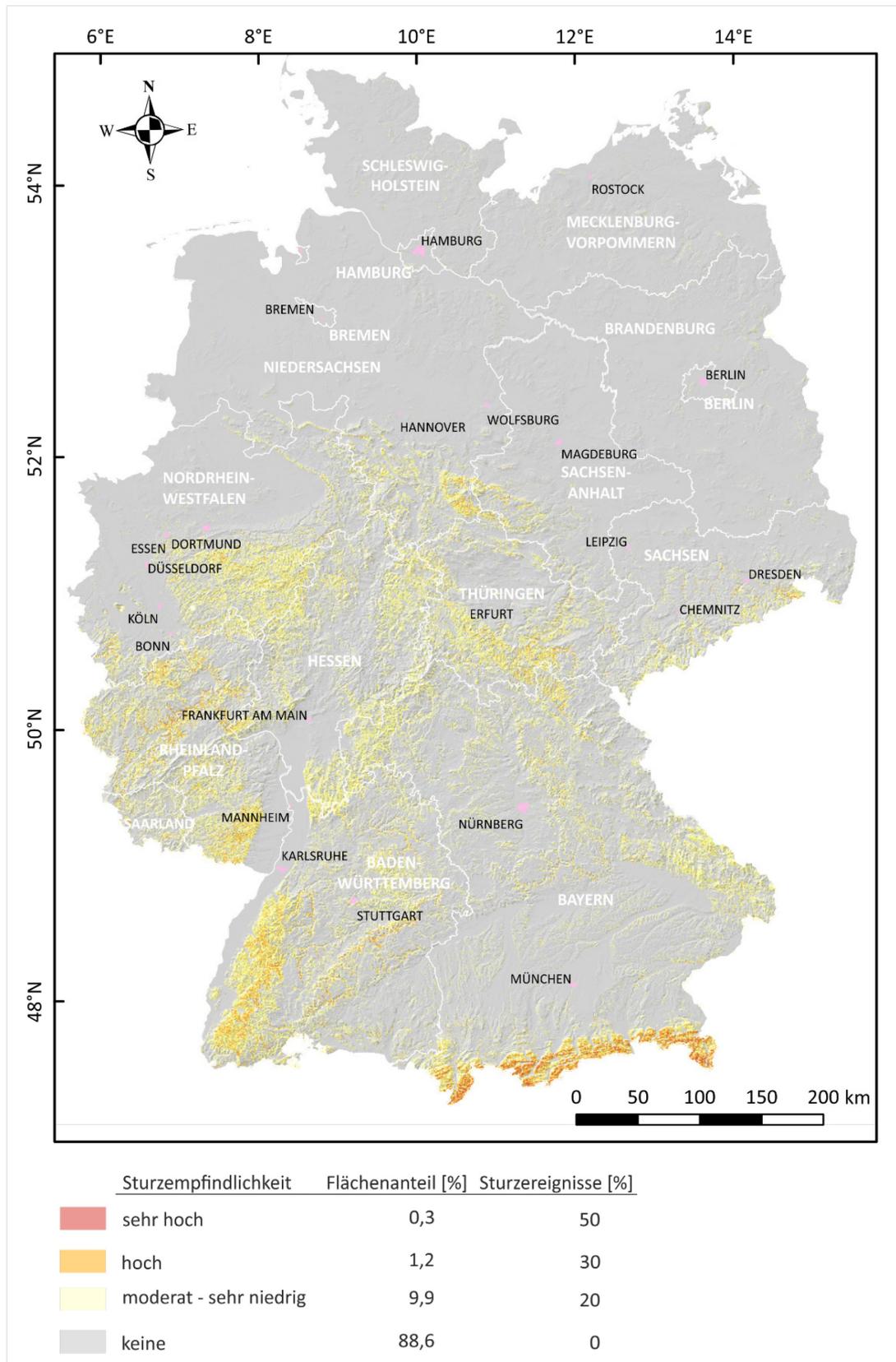


Abb. 4-2: Konzeptueller Entwurf einer Karte der Empfindlichkeit für Massenbewegungen des kinematischen Prozesstyps Felssturz in Deutschland im Gültigkeitsmaßstab 1 : 250 000 (verkleinert). In einer vierklassigen Abstufung, die auf den Hangneigungsgrenzwerten aus dem DGM25 basiert, werden die Zonen der Sturzempfindlichkeit durch die Häufigkeit der Sturzereignisse charakterisiert (Quellen: DGM25, DLM250 – BKG, angepasst: s. Tab. 2-9).

5 Ausblick

Schlussfolgerungen und resultierende Anforderungen

Hinsichtlich der zukünftigen Erstellung einer HEÜK im Maßstab 1 : 250 000 für Deutschland schlägt die MBiD-Arbeitsgruppe folgende Punkte vor:

- Die Inventarisierung von Hangrutschungsereignissen sollte gemäß den vom PK Geogefahren formulierten Mindestanforderungen ([Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie, 2016](#)) als wichtige Grundlage zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten fortlaufend in den SGD verfolgt werden;
- Inventare sind maßstabsunabhängig für die Modellierung und Evaluierung von Hangrutschungsanalysen von hoher Relevanz. Jedoch sollte primär nicht die Finalisierung von Inventaren das Ziel sein, da Bestände über natürliche Ereignisse immer quantitativen und qualitativen Fortschreibungen unterliegen und somit niemals einen endgültigen Status haben können. Essenziell ist, dass Inventare auch jenseits von einfachen Dokumentationen und Darstellungen von Massenbewegungsereignissen für objektive und reproduzierbare Analysen der räumlichen Empfindlichkeit unter Anwendung validierbarer Methoden weiter verwertet werden. Dies schließt auch bedarfsgerechte Aktualisierungen ein;
- Die fortlaufende Inventarisierung von Hangrutschungsereignissen kann durch die Integration von fernerkundlichen Daten des Copernicus-Programms ergänzt werden. Es sollte überprüft werden, inwieweit weitere Ressourcen (z. B. der [BodenBewegungsdienst Deutschland, BBD](#): Tag des Zugriffs: 26.10.2020) genutzt werden können;
- Es sollte ein strategisches Bestreben sein, Ereignisinventare zu Massenbewegungen in Deutschland, z. B. auf der Ebene eines Bundeslandes und auch interinstitutionell vorzuhalten (z. B. SGD, Technisches Hilfswerk, Straßenbau-Behörden, aber auch universitäre Einrichtungen);
- Fortlaufender interinstitutioneller Austausch und die Entwicklung von Methoden auf einer von den SGD und assoziierten Partnern gemeinsam zugänglichen Plattform (z. B. MethodenWiki).

5 Ausblick

Durch das Bund-Länder-Projekt *Massenbewegungen in Deutschland* wurden in einem Zeitraum von drei Jahren methodische Beiträge und Empfehlungen zur Untersuchung der räumlichen Empfindlichkeit gegenüber Massenbewegungen in Deutschland erarbeitet.

Ein wesentliches Bestreben des Projekts war es, Vorleistungen für *alle* SGD der Länder im Hinblick auf eine zielgerichtete Nutzung validierbarer Modellierungspraktiken zu erbringen. In Anbetracht der Komplexität des Themas hält es die MBiD-Arbeitsgruppe für geboten, diese Vorleistungen über die im MBiD-Projekt beteiligten SGD hinaus zu vergemeinschaften. Dies ist in zweierlei Hinsicht von hoher praktischer Relevanz:

- A) Vor dem Hintergrund der prognostizierten Auswirkungen durch den Klimawandel auf die Gesellschaft wird das geologische Phänomen „Massenbewegung“ auch in einer Vielzahl der Bundesländer Deutschlands substantiell an Bedeutung gewinnen und zwar aus Sicht:
- zunehmender Schadens- und Verlustpotenziale;
 - eines steigenden Beratungsbedarfs gegenüber Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit mit Schwerpunkt zu prognostischen Aussagen insbesondere im größermaßstäblichen Bereich, was einen qualitativen Sprung von der Analyse der *Hangrutschungsempfindlichkeit* (räumliche

Wahrscheinlichkeit: Wo können Massenbewegungen auftreten?) zur Analyse der *Hangrutschungsgefährdung* (räumliche und temporale Wahrscheinlichkeit: Wo und wann können Massenbewegungen auftreten?) erfordern wird;

- eines erhöhten Beratungsaufwands im Rahmen einer langfristig ausgerichteten, präventiven gefahren- und risiko-sensitiven Raumplanung als intrinsischer Teil zukünftiger Anpassungsstrategien an den Klimawandel;
- der Gefahrenabwehr.

B) Mit dem [Geologiedatengesetz \(GeolDG\)](#) (Tag des Zugriffs: 14.08.2020) wird der Forderung nach öffentlicher Bereitstellung von geowissenschaftlichen Daten in Deutschland gesetzlich Ausdruck verliehen. Dies schließt die Notwendigkeit der digitalen Verfügbarkeit ausdrücklich ein. Mit Bezug zur Thematik „Geogene Gefahren und Risiken“ wird in Kapitel 1, § 1 (Zweck des Gesetzes) unter Punkt 2 explizit ausgeführt: „Geologische Daten werden insbesondere benötigt...zur Erkennung, Untersuchung und Bewertung geogener und anthropogener Risiken.“³⁶ Die Aussage impliziert nicht nur die Erfassung thematischer Informationen, sondern insbesondere auch deren Analyse im Hinblick auf die räumliche und temporale Auftretenswahrscheinlichkeit. In Bezug auf Massenbewegungen kann dies nur im Rahmen lokaler, regionaler und überregionaler Modellierungen der Hangrutschungsempfindlichkeit unter Maßgabe einer objektiven Evaluierung der Modellierungsergebnisse erfolgen.

Nach der Auflösung des Personenkreises (PK) Geogefahren im Jahr 2016 steht aktuell kein SGD-Austauschgremium im Bereich Ingenieurgeologie zur Verfügung. Daher bietet die MBiD-Arbeitsgruppe unter dem Vorbehalt der Zustimmung durch die jeweiligen Amtsleitungen die Durchführung eines gemeinsamen Workshops mit Teilnehmern interessierter SGD nach Abschluss des Projekts an. Ziel dieses Workshops im Jahr 2021 könnten folgende Punkte sein:

- Erörterung der theoretischen Grundlagen der im MBiD-Projekt implementierten Modellierungsbeispiele in kompakter Form;
- Anwendung der relevantesten MBiD-Workflows an praktischen Beispielen;
- Gemeinsame Diskussion und Bewertung der Ergebnisse;
- Strategische Diskussion über mögliche gemeinsame Aktivitäten in der Zukunft.

Die fachliche Agenda dieser Veranstaltung könnte von den im MBiD-Projekt beteiligten Institutionen entwickelt werden.

Unter Berücksichtigung o. g. Randbedingungen und Anforderungen wäre eine nachhaltige Adressierung des Themas *Massenbewegungen in Deutschland* in zukünftigen BGR/SGD-Interventionen von außerordentlicher praktischer Relevanz.

³⁶ Inwieweit an dieser Stelle „Risiken“ und nicht „Gefahren“ gemeint sind, bleibt unklar. In der Konsequenz wäre die Erkennung, Untersuchung und Bewertung von geogenen Risiken eine ungleich umfassendere Herausforderung. Da zur Risikobewertung neben den Informationen zur räumlichen Gefährdung auch physische, soziale, ökonomische und ökologische Vulnerabilitätsinformationen unterschiedlichster Art benötigt werden würden, wäre diese Leistung fachlich nicht allein Aufgabe der SGD in Deutschland.

6 Literaturverzeichnis

Unter Maßgabe standardisierter und kompatibler räumlicher Analysen der Hangrutschungsempfindlichkeit im lokalen oder regionalen Maßstab sollten aufbauend folgende Optionen im Sinne pilothafter Bund/Länder-Kooperationsprojekte hinsichtlich der Machbarkeit geprüft werden:

- Aufbau eines digitalen MethodenWiki zum Thema Massenbewegungen in Anlehnung an das [MethodenWiki Bodenkunde](#) (Tag des Zugriffs: 09.09.2020);
- Fokussierung auf die Analyse des Prozessraums (runout modeling) zur Verbesserung der Abschätzung von Risikopotenzialen, verbunden mit der Entwicklung eines spezifischen numerischen Codes;
- Erstellung einer mobilen Applikation zur digitalen Inventarisierung von Massenbewegungen im Gelände, einschließlich IT-Architektur.

Darüber hinaus wäre aus Sicht der MBiD-Arbeitsgruppe eine nachhaltige Adressierung ingenieurgeologischer Fragestellungen in einem periodisch tagenden Expertengremium der SGD ein Gebot der Zeit.

Zwischen den [im MBiD-Projekt involvierten Personen](#) besteht Einvernehmen, dass die erzielten Ergebnisse nach Abschluss des Projekts im Dezember 2020 in einem Buch in englischer Sprache publiziert werden sollen.

6 Literaturverzeichnis

Anmerkung:

Die im Bericht zitierte Literatur bzw. das Literaturverzeichnis wurden im APA-Format erstellt. APA steht für American Psychological Association. [Der APA-Standard](#) (Tag des Zugriffs: 03.08.2020) ist ein Standard für die Formatierung wissenschaftlicher Abhandlungen und besitzt insbesondere in den Sozialwissenschaften eine weite Verbreitung. MS Word® 2016 bietet standardmäßig eine entsprechende datenbankgestützte Erfassung von Literaturzitatensätzen und eine automatisierte Listen-Formatierung an.

Bei Aufzählungen mehrerer Autoren in einer Publikation wird im Literaturverzeichnis vor dem Et-(&/Und) Zeichen automatisch ein Komma gesetzt (in Analogie zur englischen Schreibweise).

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. (2000). Methodendokumentation Bodenkunde – Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. *Geologisches Jahrbuch, Sonderheft Reihe G, Heft 1, 232 S., Bundesanstalt f. Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.*

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5.* Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland: 5. Auflage, 438 S.

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie. (2002). Geologische Kartieranleitung - Allgemeine Grundlagen. *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 9, 135 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.*

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie. (2016). Gefahrenhinweiskarten geogener Naturgefahren in Deutschland - ein Leitfaden der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD). *Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 164, 83 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.*
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie. (2016). Regionale Hydrogeologie von Deutschland. *Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 163, 456 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.*
- Alimohammadlou, Y., Najafi, A., & Gokceoglu, C. (2014). Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods: A case study in Saeen Slope, Azerbaijan province, Iran. *Catena, 120*, S. 149-162.
- Alonso, J., & Lamata, T. (2006). Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach. *International Journal of Uncertainty, 14(4)*, S. 445-459.
- Arbeitskreis 4.2 Böschungen. (1997). Empfehlungen zum Erkennen und Erfassen von Rutschungen (Arbeitskreis 4.2). *Geotechnik*, S. 248-257.
- Austin, P., & Steyerberg, E. (2017). Events per variable (EPV) and the relative performance of different strategies for estimating the out-of-sample validity of logistic regression models. *Statistical Methods in Medical Research, 26(2)*, S. 796-808.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, central Japan. *Geomorphology, 65*, S. 15-31.
- Balzer, D., & Kuhn, D. (2011). *Getting Started with the Landslide Inventory Database for Indonesia (LIDIA): BGR-Standard Module 'Landslides'*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Technical Report [Unveröff.]; S. 1-9.
- Balzer, D., & Torizin, J. (2011). *Utilization of the Landslide Inventory Database Indonesia (LIDIA) in a GIS Environment - a Workflow: BGR-Standard Module 'Landslides'*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Technical Report [Unveröff.]; S. 1-15.
- Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). *TRIGRS - A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope stability analysis, version 2.0*. U.S. Geological Survey Open-File Report.
- BEAK. (2018). *Erstellung einer ingenieurgeologischen Gefahrenhinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen entlang des deutschen Schienennetzes*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 2018-3: BEAK Consultants GmbH im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes [Unveröff.].
- BEAK. (2019a). *Digitale Erfassung und Inventarisierung gravitativer Massenbewegungen entlang von Bundesstraßen*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 89 0337/2017: BEAK Consultants GmbH im Auftrag des Bundesanstalt für Straßenwesen [Unveröff.].

6 Literaturverzeichnis

- BEAK. (2019b). *Validierung und Weiterentwicklung des Dispositionsmodells und der Hinweiskarte zu Hang- und Böschungsrutschungen für das Bundesfernstraßennetz*. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt FE 89 0338/2017: BEAK Consultants GmbH im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen [Unveröff.].
- Bell, R., Mayer, J., Pohl, J., Greiving, S., & Glade, T. (2010). *Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung*. Essen: Klartext Verlag.
- Birkmann, J., Böhm, H., Buchholz, F., Büscher, D., Daschkeit, A., Ebert, S., . . . Walkenhorst, O. (2011). *Glossar Klimawandel und Raumplanung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Band 10 (E-Paper der ARL)*.
- Bishop, C. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. S.1-482. Oxford University Press.
- Blume, H., & Remmele, G. (1989). Schollengleitungen an Stufenhängen des Strombergs (Württembergisches Keuperbergland). *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, N. F. 71*, S. 225-246.
- Bobrowsky, P. T., & Dominguez, M. J. (2012). *Landslide Susceptibility Map of Canada*. Geological Survey of Canada Open File Report 7728. doi: 10.4095/291902.
- Bock, B., Wehinger, A., & Krauter, E. (2013). Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wißberg, Lauterecken und Mittelmosel. *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen, 41*, S. 103-122.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Ontario: Pergamon Press.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F., & Wright, D. (1989). Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In F. P. Agterberg, & G. F. Bonham-Carter, *Statistical Applications in the Earth Sciences* (S. 171-183). Geological Survey Canada Paper 89(9).
- Brabb, E. E., Colgan, J. B., & Best, T. C. (1999). *Map showing inventory and regional susceptibility for Holocene debris flows and related fast-moving landslides in the conterminous United States*. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map-2392.
- Bragagnolo, L., Da Silva, R., & Grzybowski, V. (2020). Landslide susceptibility mapping with r. landslide: A freeopen-source GIS-integrated tool based on Artificial Neural Networks. *Environmental Modelling and Software (online)*. doi: 10.1016/j.envsoft.2019.104565.
- Bujang, M., Sa'at, N., Sidik, T., & Joo, L. (2018). Sample Size Guidelines for Logistic Regression from Observational Studies with Large Population: Emphasis on the Accuracy Between Statistics and Parameters Based on Real Life Clinical Data. *Malaysian Journal in Medical Sciences, 25(4)*, S. 122-130. doi: 10.21315/mjms2018.25.4.12.
- Carrara, A. (1988). Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In C. Chung, A. Fabbri, & R. Sinding-Larsen, *Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 223: p. 581-598*. Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-009-4029-1_34.

- Christensen, S. (1998). Die Staatlichen Geologischen Dienste am Übergang ins 21. Jahrhundert. *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 3, S. 217-226, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.*
- Claessens, L., Heuvelink, G., Schoorl, J., & Veldkamp, A. (2005). DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms, 30, S. 461-488.*
- Corominas, J. (2010). *SafeLand Deliverable D2.1: Overview of landslide hazard and risk assessment practices.*
- Corominas, J., & Mavrouli, O. (2011). *SafeLand Deliverable D2.4: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning.*
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., . . . Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, S. 209-263.*
- Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P., & Sosio, R. (2012). *Landslide triggering mechanisms in Europe – Overview and State of the Art. Safeland Deliverable 1.1.*
- Crozier, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review. *Geomorphology, 124, S. 260-267. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.04.009.*
- Crozier, M., & Glade, T. (2005). Landslides Hazard and Risk: Issues, Concepts and Approach. In T. Glade, A. Anderson, & M. Crozier, *Landslide Hazard and Risk* (S. 40). John Wiley and Sons.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides. Types and Processes. In A. K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides. Investigation and Mitigation*. Transport Research Board, National Research Council: Special Report 247, Washington D. C.
- Damm, B., & Felderer, A. (2013). Impact of atmospheric warming on permafrost degradation and debris flow initiation – a case study from the eastern European Alps. *E & G Quaternary Science Journal, 62, S. 136-149.*
- Damm, B., & Klose, M. (2015). The landslide database for Germany: Closing the gap at national level. *Geomorphology, 294, S. 82-93. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.03.021.*
- Damm, B., Varga, K., Heckmann, T., & Becht, M. (2009). The Impact of Bedrock Stratification on Landslide Susceptibility – An Example of GIS-based Landslide Modelling in the Bunter Sandstone Areas of Northern Hesse and Southern Lower Saxony (Germany). *Die Erde, S. 175-193.*
- Dikau, R., & Glade, T. (2003). Nationale Gefahrenkarte gravitativer Massenbewegungen. In H. Liedtke, R. Mäusbacher, & K.-H. Schmidt, *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland - Relief, Boden und Wasser* (S. 98-99). Leipzig (Institut für Länderkunde).
- Dikau, R., & Schmidt, K.-H. (2001). Mass movements in South, West and Central Germany. Objectives and Main Results of the MABIS project. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues Volume 125, S. 12.*
- Dikau, R., Brundsen, D., Schrott, L., & Ibsen, M. (1996). *Landslide Recognition*. Wiley.

6 Literaturverzeichnis

- DIN 4084:2009-1. (2009). *Baugrund- und Geländebruchberechnungen*. Arbeitsausschuss NA 005-05-04 AA "Baugrund, Berechnungsverfahren" im NABau.
- DIN 4149:2005-04. (2005). *Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten*. Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN.
- DIN 5008. (2020). *Schreib- und Gestaltungsregeln für die Text- und Informationsverarbeitung*. (Beuth-Verlag, Hrsg.) Berlin.
- DIN EN 1997-1:2014-03. (2014). Eurocode 7. Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013. doi:10.31030/2074544.
- Dong, Y., Zhang, G., Hong, W., & Xu, Y. (2010). Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. *Decision Support Systems*, 43(9), S. 281-289.
- DUDEN. (2006). *Duden – Die deutsche Rechtschreibung; 24. Auflage; 1216 S.* Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag.
- EEA. (2010). *Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe – An overview of the last decade*. European Environment Agency. doi: 10.2800/62638.
- Eissele, K., & Kobler, H.-U. (1973). Fossile Massenverlagerung an Muschelkalkhängen des oberen Neckars (Baden-Württemberg) und ihre Bedeutung für die Bebauung. *Proceedings Symposium IAEG Erdfälle und Bodensenkungen, T4: J 1–7*. Hannover.
- Ermini, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, S. 327-343.
- Evans, S., & Hungr, O. (1993). The assessment of rock fall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal (National Research Council of Canada)*, 30(4), S. 620-636.
- Fawcett, T. (2006). Introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), S. 861-874. doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.
- Fell, R., Corominas, J., & Bonnard, C. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning commentary. *Engineering Geology*, 102(3-4). doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.014.
- Forschungsstelle Rutschungen. (2015). Weiterentwicklung eines Modells zur Abschätzung rutschungsgefährdeter Gebiete entlang des Bundesfernstraßennetzes und Erstellung einer bundesweiten Gefahrenhinweiskarte (Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen). Bergisch Gladbach.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics of unsaturated soils*. New York: Wiley.
- Fredlung, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristics curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, S. 533-546.
- Fritsch, S., Guenther, F., & Wright, M. (2019). Neuralnet: Training of Neural Networks. R package 1.44.2. Von <https://CRAN.r-project.org/package=neuralnet>. abgerufen.
- Fuchs, M., & Glaser, S. (2019). Project "Mass Movements in Germany (MBiD)": A methodical approach for surveying areas prone to shallow translational landslides at regional scale. Von http://www.geomuenster2019.de/assets/geomuenster_book_of_abstracts.pdf abgerufen.

- Fuchs, M., & Khalid, N. (2015). Land Cover Map of Mansehra and Torghar Districts, Province Khyber Pakhtunkhwa, Islamic Republic of Pakistan, Scale 1: 200.000 - Reduced to Print Scale of 1: 300.000: Map & Final Report (Project Geohazard Assessment in Northern Pakistan). 45 S. Islamabad & Hannover.
- Fuchs, M., Torizin, J., & Kühn, F. (2014). The effect of DEM resolution on the computation of the factor of safety using an infinite slope model. *Geomorphology*, 224, S. 16-26.
- Fuchs, M., Torizin, J., Wang, L., Tong, B., Balzer, D., Chen, L., . . . Wan, L. (2019). Identification and temporally-spatial quantification of geomorphic relevant changes by construction projects in loess landscapes: case study Lanzhou City, NW China. *Big Earth Data*, 3. Von <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20964471.2019.1640412> abgerufen.
- Gariano, S. L., & Guzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth Science Reviews*, 162, S. 227-252. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
- Genske, D. D. (2008). Massenbewegungen. In K. J. Witt, *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen (7. Auflage)*. Ernst & Sohn.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2014 – 2018). *Stability Modeling with Geostudio*. Calgary, Canada.
- Glade, T., Anderson, M., & Crozier, M. (2005). Landslide hazard and risk. 803 S. Wiley.
- Glade, T., Hoffmann, P., & Thonicke, K. (2017). Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In G. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöllner, *Klimawandel in Deutschland* (S. 111-121). doi: 10.1007/978-3-662-50397-3.
- Goepel, K. (2013). Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises – A New AHP Template with Multiple Inputs. *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*. Kuala Lumpur/Malaysia. doi: 10.13033/isahp.y2013.047.
- GSP. (2012). Landslide Susceptibility Map of Kaghan and Siran Valleys (Bala Kot 43F/06), Mansehra District, Province Khyber Pakhtunkhwa, Islamic Republic of Pakistan, Scale 1: 50.000: Map & Annotation Report (Project Geohazard Assessment in Northern Pakistan). S. 1-31. Islamabad & Hannover (DRR Map Series No. 2, First Issue).
- Günther, A., & Thiel, C. (2009). Combined rock slope stability and landslide susceptibility assessment of the Jasmund cliff area (Rügen Island, Germany). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, S. 687-698.
- Günther, A., Van den Eeckhaut, M., Malet, J. ..., Reichenbach, P., & Hervás, J. (2014). Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology*, 224, S. 69-85.
- Guzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, S. 272-299. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.06.002.
- Hammond, C., Hall, D., Miller, S., & Swetik, P. (1992). *Level I stability analysis (LISA) documentation for version 2.0*. General Technical Report INT-285. Forest Service, Intermountain Research Station, U.S. Department of Agriculture, Ogden.

6 Literaturverzeichnis

- Haneberg, W. C. (2007). *PISA-m: map-based probabilistic infinite slope analysis, version 1.0. User manual*. Haneberg Geoscience, Seattle.
- Hänel, R., Kürsten, M., & Schmid, H. (1998). Die Aufgaben der Staatlichen Geologischen Dienste in der Bundesrepublik Deutschland. *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 3, S. 25-66, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart*.
- Hencher, W. C. (1987). The implications of joints and structures for slope stability. In M. G. Anderson, & K. Richards, *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology, S. 145-186*. John Wiley and Sons.
- Herrera, G. (2019). *Earth Observation and Geohazard Expert Group*. EuroGeoSurveys National Delegates Forum, Brüssel.
- Herrera, G., Mateos, R., & Garcia-Devalillo, J. (2018). Landslide databases in the Geological Surveys of Europe. *Landslides, 15*, S. 359-379. doi: 10.1007/s10346-017-0902-z.
- Hervás, J., & Bobrowski, P. T. (2009). Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. In K. Sassa, & P. Canuti, *Landslides - Disaster Risk Reduction (S. 321-349)*. doi: 10.1007/978-3-540-69970-5_19.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. US Geological Survey Circular 1325.
- HLNUG. (2020). *Klimawandel in Hessen – Schwerpunktthema Schäden durch Starkregen vermeiden*. Bericht des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Von <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/starkregen/Schaeden-durch-Starkregen-vermeiden2020.pdf> abgerufen.
- Homilius, J. (1998). Der Direktorenkreis. *Geologisches Jahrbuch, Reihe G, Heft 3, S. 155-193, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland; E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart*.
- Horn, B. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 69(1)*, S. 14-47.
- Hübl, J., Heiser, M., Braitto, S., Tschärner, S., Kuntner, K., Prenner, D., . . . Rabanser, E. (2017). *Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse 2016 Rottal-Inn, IAN Report 180, Band 2: Ereignisanalyse Simbach [Unveröff.]*. Institut für Alpine Natugefahren, Universität für Bodenkultur Wien.
- Huggel, C., Clague, J., & Korup, O. (2012a). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms, 37*, S. 77-91. doi:10.1002/esp.2223.
- Huggel, C., Khabarov, N., Korup, O., & Obersteiner, M. (2012b). Physical impacts of climate change on landslide occurrence and related adaptation. In J. Clague, & D. Stead, *Landslides: Types, Mechanism and Modeling (S. 121-133)*. Cambridge University Press.
- Hung, M.S., Shanker, M., & Hu, M.Y. (1995). Effect of data standardization on neural network training. *Omega, 24(4)*, S. 385-397.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification on landslide types, an update. *Landslides*, 11, S. 167-194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- IAEG. (1990). *Suggested nomenclature for landslides. International Association of Engineering Geology Commission on Landslides*. Bulletin IAEG, No. 41, S. 13-16.
- IPCC. (2012). Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In B. C. Field, V. Barros, T. Stocker, D. Qin, D. Dokken, K. Ebi, . . . P. Midgley, *A Special of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1-19). Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), S. 14336-14345.
- Jäger, D. (2016). Steuerungsfaktoren der Hangstabilität an Massenbewegungen im Fränkischen Schichtstufenland. *Inaugural Dissertation Julius-Maximilians-Universität Würzburg*, 331 S.
- Jibson, W. R., & Keefer, D. (1993). Analysis of the seismic origin of landslides: Examples from the New Madrid seismic zone. *Geological Society of America Bulletin*, 105, S. 521-536.
- Jibson, W. R., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslides hazard maps. *Engineering Geology*, 58, S. 271-289.
- Kamp, U., Growley, B., Khattak, G., & Owen, L. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology*, 101, S. 631-642.
- KLIWA. (2019). *Starkniederschläge in Vergangenheit und Zukunft (Kurzbericht Kooperationsvorhaben "Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft")*. Von https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf abgerufen.
- Klose, M., Damm, B., & Terhorst, B. (2015). Landslide cost modeling for transportation and infrastructures: a methodological approach. *Landslides*, 12, S. 321-334.
- Klose, M., Gruber, D., Damm, B., & Gerold, G. (2014). Landslide Susceptibility Modeling on Regional Scales: The Case of Lower Saxony, NE Germany. In K. Sassa, P. Canuti, & Y. Yin, *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* (S. 437-442).
- Krautblatter, M., Funk, D., & Günzel, F. (2013). Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanism model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), S. 876-887. doi: 10.1002/esp.3374.
- Krautblatter, M., Moser, M., Kemna, A., Verleysdonk, S., Funk, D., & Däbring, D. (2010). Climate change and enhanced rock fall activity in the European Alps. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* (68), S. 331-332.
- Krauter, E. (2002). Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In U. Smoltczyk, *Grundbau Taschenbuch*. Berlin.

6 Literaturverzeichnis

- Krauter, E., Kumerics, C., Feuerbach, J., & Lauterbach, M. (2012). Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen (Abschlussbericht Forschungsstelle Rutschungen e.V. zum Forschungsprojekt FE 89.238/2009/AP im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, BAST). In *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen* (Bd. S 75, S. 62).
- Krug, D., & Hartwich, R. (2001). Die Flächendatenbank der Bodenübersichtskarte 1: 200 000 (BÜK 200): Basisdaten für den länderübergreifenden Bodenschutz. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*, 47(2), S. 144-120.
- Krummenmacher, B., Pfeiffer, R., Tobler, D., Keusen, H.R., Liniger, M., & Zinggeler, A. (2005). *Modellierung von Stein- und Blockschlag; Berechnung der Trajektorien auf Profilen und im 3-D Raum unter Berücksichtigung von Waldbestand und Hindernissen*. Fan-Forum ETH Zürich (Zollikofen).
- Kuhn, D. (2011). *Guideline for Applying the Landslide Survey Data Sheet (LSDS): BGR-Standard Module 'Landslides'*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Technical Report [Unveröff.]; S. 1-94.
- Kuhn, D., & Prüfer, S. (2014). Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. *Geomorphology*, 213, S. 153-165. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.01.005.
- Kuhn, D., Hermanns, R., Torizin, J., Fuchs, M., Redfield, T., Eilertsen, R., & Balzer, D. (2020). Forkastningsfjellet rock slide, Spitsbergen: State of activity in a changing climate. In Guzzetti, M., S. Mihalić Arbanas, Reichenbach, P., Sassa, K., Bobrowsky, P.T., & Takara, K. (Eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. (im Druck).
- Kuhn, D., Redfield, T. F., Hermanns, R., Fuchs, M., Torizin, J., & Balzer, D. (2019). Anatomy of a mega-rock slide at Forkastningsfjellet, Spitsbergen and its implications for landslide hazard and risk considerations. *Norwegian Journal of Geology*, 99(1), S. 41-61.
- LBEG. (2015). *Symbolschlüssel Geologie*. Niedersächsisches Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. 4. Auflage; Hannover.
- Lee, S., & Evangelista, D. (2006). Earthquake-induced landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, S. 687-695.
- Lee, S., Choi, J., & Min, K. (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43, S. 120-131. doi: 10.1007/s00254-002-0616-x.
- Lehmann, J., Coumou, D., & Frieler, D. (2015). Increased record-breaking precipitation events under global warming. *Climatic Change*, 132(4), S. 517-518. doi: 10.1007/s10584-015-1466-3.
- LfU. (2008). *Bayerns Klima im Wandel – erkennen und handeln*. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg; 94 S.
- Liener, S. (2000). Zur Feststofflieferung in Wildbächen. *Geographica Bernensia*, G64 (Geographisches Institut Bern).
- Lohrengel, A.-F., Brendel, C., Herrmann, C., Kirsten, J., Forbriger, M., & Stube, K. (2020). *Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks*. doi: 10.5675/ExpNLAf2020.2020.06.

- Lu, N., & Godt, J. (2008). Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions. *Water Resources Research*, 44 W1104 (online). doi: 10.1029/2008WR006976.
- LUNG. (2011; 2013). Gefahrenhinweiskarte von Mecklenburg-Vorpommern: Massenbewegungen auf Jasmund/Rügen. 1 : 10 000 (GHK10); Güstrow (1. Auflage: 2011; 2. Auflage: 2013). Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern.
- Malet, J. P., & Maquire, O. (2008). Risk Assessment Methods of Landslides. Project Report 2.2. Deliverable 2.3.2.4. S. 1-29.
- Malet, J. P., Thiery, Y., Puissant, A., Hervás, J., Günther, A., & Grandjean, G. (2009). Landslide susceptibility modelling at 1:1 M scale over France: exploratory results with a heuristic model. In J. P. Malet, A. Remiaitre, & T. Boogard, *Proceedings of the international conference on landslide processes: from geomorphologic mapping to dynamic modelling*; S. 315-320.
- Mankelov, J., & Murphy, W. (1998). Using GIS in the probabilistic assessment of earthquake triggering landslide hazards. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(4), S. 593-623.
- Mateos, R. M., López-Vinielles, J., Poyadji, E., Tsagkas, D., Hadjicharalambous, K., Liscák, P., . . . Herrera, G. (2020). Integration of landslide hazard into urban planning across Europe. *Landscape and Urban Planning*, 196. doi: 10.1016/j.landurbplan.2019.103740.
- Mayer, K., & v.Poschinger, A. (2005). Creation of danger and hazard maps for rock falls in a regional scale. A comparison between an empirical and a numerical model. *Geophysical Research Abstracts (European Geosciences Union General Assesmbly 2005)*, 7.
- Meißl, M. (1998). *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen: Fallbeispiel zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum*. Innsbruck. 294 S.
- Meyenfeld, H. (2009). *Massenbewegungen und Erdbeben: Modellierungen seismisch ausgelöster gravitativer Massenbewegungen für die Schwäbische Alb und den Raum Bonn und Erstellen von Gefahrenhinweiskarten*. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.
- Meynen, E., & Schmithüsen, J. (1962). *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. Bad Godesberg: Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, 602 S.
- Milledge, D. G., Griffiths, D., Lane, S., & Wartburton, J. (2012). Limits on the validity of infinite length assumption for modelling shallow landslide. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(11), S. 1158-1168.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review*, 63, S. 81-97.
- Molnar, C., Bischl, B., & Casalicchio, G. (2018). iml: An R package for Interpretable Machine Learning. *Journal of Open Source Software*, 3(26), S. 786. doi: 10.21105/joss.00786.
- Mühlbacher, A., & Rädke, A. (2014). Der Analytic Hierarchy Process (AHP): Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung im Gesundheitswesen. *PharmaEconomics*, 11(2), S. 1-14. doi: 10.1007/s40275-014-0011-8.
- MunichRe. (2017). *Topic Geo*. Von [https://www.munichre.com/content/dam/munichre/global/content-pieces/documents/TOPICS_GEO_2016-de%20\(19\).pdf](https://www.munichre.com/content/dam/munichre/global/content-pieces/documents/TOPICS_GEO_2016-de%20(19).pdf) abgerufen.
- Muntohar, A. S., & Liao, H.-J. (2009). Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model. *Environmental Geology*, 56, S. 378-381.

6 Literaturverzeichnis

- Nagakawa, M., & Yamada, M. (2008). Application of Large Displacement Landslide Simulation by Using Finite Difference Method. *Journal of Japan Landslide Society*, 44, S. 377-384.
- Nelder, J. A., & Wedderburn, R. W. (1972). Generalized Linear Models. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*: 135(3), S. 370-384.
- Ozioko, O. H., & Igwe, O. (2020). GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Heuristic and Bivariate Statistical Methods for Iva Valley and Environs Southeast Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2). doi: 10.1007/s10661-019-7951-9.
- Pack, R. T., Tarboton, D., Goodwin, C., & Prased, A. (2005). *SINMAP 2 - A stability index approach to terrain stability hazard mapping. Version for ArcGIS 9.x and Higher*. Utah State University.
- Pastor, M., Haddad, B., Sorbino, G., Cuomo, S., & Drempevic, V. (2009). A depth-integrated, coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(2), S. 143-172.
- Peduzzi, P., Concato, J., Kemper, E., Holford, T., & Feinstein, A. (1996). A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. *Journal Clinical Epidemiology*, 49(12), S. 1397-1379.
- Pradhan, B., & Lee, S. (2009). Landslide risk analysis using artificial neural network model focusing on different training sites. *International Journal of Physical Science*, 4(1), S. 1-15.
- Prinz, H., & Strauß, R. (2018). *Ingenieurgeologie (6. Auflage)*. Springer.
- Pyle, D. (1999). *Data Preparation for Data Mining*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 560 S.
- Pyle, D. (2003). *Business Modeling and data mining*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Quecedo, M., Pastor, M., Herreros, M. I., & Fernandes-Medoro, J. A. (2004). Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 59(6), S. 755-794.
- R-Core-Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Von <https://www.r-project.org> abgerufen.
- Radbruch-Hall, D. H., Colton, R. B., Davies, W. E., Lucchita, I., Skipp, B. A., & Varnes, D. J. (1982). *Landslide overview map of the conterminous United States*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1183.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, S. 60-91. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001.
- Reid, M. E., Christian, S., Brien, D., & Henderson, S. (2015). *Scoops3D: Software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods (Book14, Chapter A1).
- Renger, M., Bohne, F., Facklam, M., Harrach, T., Riek, W., Schäfer, W., . . . Zacharias, S. (2008). *Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe "Kennwerte des Bodengefüges" zur Schätzung Bodenphysikalischer Kennwerte*. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Göttingen, Deutschland, p.51.

- Rossi, M., & Reichenbach, P. (2016). LAND-SE: A software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, *9*, S. 3533-3543. doi: 10.5194/gmd-9-3533-2016.
- Rossiter, D. G. (2000). Methodology for Soil Resource Inventories: Lecture Notes & Reference. S. 1-132. Enschede: International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences (ITC).
- Ruff, M., & Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology*, *94*(3), S. 314-324. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.032.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*, S. 234-281.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw.
- Schmidhuber, J. (2015). Deep Learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, *61*, S. 85-117.
- Selby, M. (1993). *Hillslope Materials and Processes*. 468 S.; Oxford University Press.
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodes, C., Kanae, S., Kossin, J., . . . Zhang, X. (2012). In B. C. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, . . . P. M. Midgley, *A Special of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 109-230). Cambridge University Press.
- Shanker, M., Hu, M., & Hung, M. (1995). Effect of data standardization on neural networks training. *Omega*, *24*(4), S. 385-397.
- Skempton, A. W., & De Lory, F. (1957). Stability of natural slopes. *London clay: Proceedings 4th International Conference Soil Mechanics and Foundation*, (S. 378-381). London.
- Stanley, T., & Kirschbaum, D. B. (2007). A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*, *61*, S. 145-164.
- Steger, S., & Gade, T. (2017). The challenge of "trivial areas" in statistical landslide susceptibility modelling. In M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, & K. Sassa, *Advancing Culture of Living with Landslides: WLF 2017*. doi: 10.1007/978-3-319-53498-5_92.
- Tape, T. G. (2001). Interpreting Diagnostic Tests. University of Nebraska Medical Center. Von <http://gim.unmc.edu/dxtests/roc3.htm> (23.09.2020) abgerufen.
- TC32. (2004). *Technical Committee 32 (Engineering Practice of Risk Assessment and Management) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE): Risk assessment – Glossary of terms*. Von http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary_Draft1 abgerufen.
- Teerarungsikul, S., Torizin, J., & Fuchs, M. (2015). An integrative approach for regional landslide susceptibility assessment using weight of evidence method: a case study of Yom River Basin, Phrae Province, Northern Thailand. *Landslides*, *13*, S. 1151-1165. doi: 10.1007/s10346-015-0659-1.
- Terlien, M. J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, *35*(2-3), S. 124-130.

6 Literaturverzeichnis

- Thomaß, S. (1977). Sicherungsmaßnahmen für den Drachenfels bei Bonn. *Beton- und Stahlbetonbau*, 8, S. 189-192.
- Tian, T., Balzer, D., Wang, L., Li, X., Chen, L., Kuhn, D., . . . Tong, B. (2017). Landslide Hazard and Risk Assessment Lanzhou, Province Gansu, China – Project Introduction and Outlook. In M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, & K. Sassa, *Advancing Culture of Living with Landslides* (S. 1027-1033). Ljubljana.
- Tobler, D., Riner, R., & Pfeifer, R. (2013a). Modeling Potential Landslides over Large Areas with SliDisp+. In *Landslide Science and Practice*. (Bd. 3, S. 37-45). Berlin und Heidelberg: Springer.
- Tobler, D., Riner, R., & Pfeifer, R. (2013b). Runout Modelling of Shallow Landslides over Large Areas with SliDepot. In *Landslide Science and Practice*. (Bd. 3, S. 239-245). Berlin und Heidelberg: Springer.
- Tomonin, V., Bai, S. B., & Wang, J. (2008). Landslide Data Analysis with Gaussian Mixture Model. *Proceedings of the 4th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, (S. 1469-1475). Barcelona.
- Torizin, J. (2012). Landslide Susceptibility Assessment Tools for ArcGIS 10.0 and their Application. *Proceedings 34. International Geological Congress*. Brisbane.
- Torizin, J., Fuchs, M., Awan, A., Adnan, A., Ahmad, I., Akhtar, S., . . . Khan, A. (2017). Statistical landslide susceptibility assessment of the Mansehra and Torghar districts, Khyber Pakhtunkhwa Province, Pakistan. *Natural Hazards*, 89, S. 757-784.
- Torizin, J., Fuchs, M., Balzer, D., Kuhn, D., Arifianti, Y., & Kusnadi, H. (2013). Methoden zur Erstellung und Evaluierung von Gefahrenhinweiskarten für Hangbewegungen: Fallstudie Insel Lombok, Indonesien. *Tagungsband der 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen: S. 253-258*. München.
- Torizin, J., Fuchs, M., Kuhn, D., Balzer, D., & Wang, L. (2020). Practical accounting for uncertainties in data-driven landslide susceptibility models. Examples from the Lanzhou case study. In P. Reichenbach, *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. Springer (im Druck).
- Torizin, J., Wang, L., Balzer, D., & Kuhn, D. (2016). Landslide susceptibility mapping at regional scales using weight of evidence method – a revision of the methodical concept from a practical point of view. *International Geological Congress 2016, Cape Town: Proceedings Vol. 14*, (S. 5639).
- Torizin, J., Wang, L., Fuchs, M., Tong, B., Balzer, D., Wan, L., . . . Chen, L. (2018). Statistical landslide susceptibility assessment in a dynamic environment: A case study for Lanzhou City, Gansu Province, NW China. *Journal of Mountain Science*, 15(6), S. 1299-1318. doi: 10.1007/s11629-017-4717-0.
- Tyagunov, S., Grünthal, G., Wahlström, R., Stempniewski, L., & Zschau, J. (2006). Seismic risks mapping for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4), S. 573-586.
- UBA. (2019). *Umweltbundesamt: Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf abgerufen.
- UNISDR. (2009). *Terminology of disaster risk reduction. United Nations, International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland*. Von https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf abgerufen.

- United_Nations. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction*. Büro der Vereinten Nationen für die Verringerung des Katastrophenrisikos (UNDRR ehemals UNISDR). Von <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> abgerufen.
- Van den Eeckhaut, M., & Hervás, J. (2012). State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*, *139*, S. 545-558.
- Van den Eeckhaut, M., Hervás, J., & Jaedicke, C. (2012). Statistical Modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. *Landslides*, *9*, S. 357-369. doi: 10.1007/s10346-011-0299-z.
- Van den Eeckhaut, M., Reichenbach, P., & Guzzetti, F. (2009). Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *9*, S. 507-521. doi: 10.5194/nhess-9-507-2009.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslide Analysis and Control*, Special Report 176, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, S. 12-33.
- Wang, F., Wang, C., Wang, N., & Jiang, N. (2017). Application of a GIS-based slope unit method for landslide susceptibility mapping along the Longzi River, southeastern Tibetan plateau, China. *ISPR International Journal of Geo-Information*, *6(6)*, S. 172.
- Wang, L. J., Sawada, K., & Moriguchi, S. (2013). Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy. *Computer & Geosciences*, S. 81-92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.04.006>.
- Wieczorek, G. F. (1996). Landslide triggering mechanism. In A. .. Tuner, & R. Schuster, *Transportation Research Board Special Report 247*.
- Wilde, M., Günther, A., Reichenbach, P., Malet, J.-P., & Hervás, J. (2018). Pan-European landslide susceptibility mapping: ELSUS Version 2. *Journal of Maps*, *14(2)*, S. 97-104 and supplement map.
- Wohlert, A., Kreuzer, T., & Damm, B. (2017). Case histories for the investigation of landslide repair and mitigation measures in NW Germany. In K. Sassa, M. Mikos, & Y. Yin, *Advancing Culture of Living with Landslides* (S. 521-527). doi: 10.1007/978-3-319-59469-9_46.
- Zhao, L., Liu, X., Mao, J., & Li, T. (2020). Three-dimensional distance potential discrete element method for the numerical simulation of landslides. *Landslides*, *17*, S. 361-377.
- Zinggeler, A., & Pfeiffer, R. (2009). *Steinschlagmodellierung GEOTEST & Zinggeler: Modellbeschreibung; 21. Zollikofen*.

Notizzettel
