

GEO
WISSEN
SCHAFTEN



Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“
im Promotionsfach Geologie/Paläontologie

am Fachbereich
Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

GIS-gestützte Kartierung von Rutschungen und Modellierung der Rutschungssuszeptibilität im Saar-Nahe- Gebiet und dem Mainzer Becken

vorgelegt von

Andrea Werner

geboren am 01.04.1993

in Friedrichshafen



Mainz, April, 2023

Institut für Geowissenschaften

Johannes Gutenberg – Universität Mainz

Dekanin: Univ.-Prof. Dr. Tanja Schirmeister

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2023

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer zuverlässigen computergestützten Methode zur Erstellung von Rutschungsanfälligkeitskarten im Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken in Rheinland-Pfalz. Dafür wurde die *Frequency-Ratio* (FR)- und die *Weight-of-Evidence* (WoE)-Methode für die Kartierung der Anfälligkeit für Rutschungen angewendet. Zu diesem Zweck wurden in der ersten Phase die Daten der rutschungsbedingten Faktoren sowie die Rutschungsinventare vorbereitet. Auf der Grundlage der Auswertung von Digitalen Geländemodellen und Feldbegehungen wurden Rutschungsinventare für die Untersuchungsgebiete erstellt. Diese Inventare wurden nach dem Zufallsprinzip als Trainingsdaten (70 %) für die Berechnungen mit den FR- und WoE-Modellen ausgewählt, die restlichen 30 % wurden für die Validierung der Rutschungsanfälligkeitsmodelle verwendet. Die für die Untersuchungsgebiete berücksichtigten Faktoren für Rutschungen sind die Hangneigung, Exposition, Höhe, Ingenieurgeologische Klassifizierung, die Lagerungsverhältnisse (TOBIA), der *Topographic Wetness Index* (TWI) und der *Stream Power Index* (SPI). Die betrachteten Faktoren haben einen Einfluss auf die Entstehung von Massenbewegungen, spielen jedoch in den zwei Gebieten eine unterschiedliche Rolle. Die Beziehungen zwischen der Verteilung von Rutschungen und diesen Parametern wurden mit den zwei Methoden analysiert, und die Ergebnisse wurden dann zur Berechnung der Rutschungsanfälligkeit für das Saar-Nahe-Gebiet und das Mainzer Becken verwendet.

Die Ergebnisse wurden anhand von ROC-Kurven und der Fläche unter der Kurve (AUC) validiert. Aus der Analyse geht hervor, dass für das Saar-Nahe-Gebiet das Modelle des WoE besser abschneiden als die Modelle des FR. Im Mainzer Becken hingegen liefern die Modelle des FR die besseren Ergebnisse. Die Interpretation der Anfälligkeitsanalysen zeigt, dass die Hangneigung, Geologie sowie die Lagerungsverhältnisse (nur im Saar-Nahe-Gebiet) eine wichtige Rolle für das Auftreten von Rutschungen in den Untersuchungsgebieten spielen. Mittels Sensitivitätsanalyse wurde außerdem geprüft, wie anfällig die Modelle auf Änderungen in der Berechnung reagieren.

Die in dieser Studie erstellten Karten zur Anfälligkeit für Rutschungen können für die allgemeine Flächennutzungsplanung genutzt werden. Außerdem können sie verwendet werden, um im nächsten Schritt Gefahren- und Risikokarten für die Gebiete zu erstellen.

Abstract

The aim of this study was to develop a computer-based method for landslide susceptibility mapping in the Saar-Nahe area and Mainz Basin in Rhineland-Palatinate. For this purpose, the Frequency-Ratio (FR) and the Weight-of-Evidence (WoE) methods were applied for landslide susceptibility mapping. In the first phase, the data on landslide conditioning factors and landslide inventories were prepared. Based on the analysis of digital terrain models and field surveys, landslide inventories were prepared for the study areas. These inventories were randomly selected as training data (70%) for modeling with FR and WoE and 30 % for validation of the models. The conditioning factors considered for the study areas are slope, aspect, elevation, engineering geologic classification, bedding conditions (TOBIA), topographic wetness index, and stream power index. The factors considered influence the generation of mass movements but play different roles in the two areas. The relationships between the distribution of landslides and these parameters were analyzed using the two methods, and the results of these methods were then used to calculate landslide susceptibility for the Saar-Nahe area and the Mainz Basin.

The results were validated using ROC curves and area under the curve (AUC). From the analysis, for the Saar-Nahe area, the WoE model performs better than the FR models. In the Mainz Basin, on the other hand, the FR models provide better results. The interpretation of the susceptibility analysis shows that slope, geology as well as bedding conditions (only in the Saar-Nahe area) play an important role in the occurrence of landslides in the study areas. Sensitivity analysis was also used to test how susceptible the models are to changes in the calculation.

The landslide susceptibility maps produced in this study can be used for general land use planning as well as to create hazard and risk maps for these areas.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	II
DANKSAGUNG	III
INHALTSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIX
1 EINLEITUNG	1
1.1 STAND DER FORSCHUNG	3
1.2 ZIELE DER ARBEIT	6
2 RUTSCHUNGSPROZESSE	7
2.1 DEFINITION	7
2.2 KLASSIFIKATION VON HANGBEWEGUNGEN	7
2.2.1 <i>Fallen</i>	9
2.2.2 <i>Kippen</i>	10
2.2.3 <i>Gleiten</i>	10
2.2.4 <i>Driften</i>	13
2.2.5 <i>Fließen</i>	13
2.2.6 <i>Hangverformung</i>	14
2.3 RUTSCHUNGSMERKMALE	16
2.4 RUTSCHUNGSAKTIVITÄT UND ALTER	19
2.5 RUTSCHUNGSURSACHEN	20
2.5.1 <i>Hangstabilität</i>	21
2.5.2 <i>Morphologische Faktoren</i>	23
2.5.3 <i>Geologische Faktoren</i>	24
2.5.4 <i>Hydrogeologische Faktoren</i>	25
2.5.5 <i>Klima, Vegetation und menschliche Einflüsse</i>	26
2.6 EXKURS: ANFÄLLIGKEIT ODER GEFAHR	27
3 UNTERSUCHUNGSGEBIETE	28
3.1 UNTERSUCHUNGSGEBIET 1: SAAR-NAHE-GEBIET	28

3.1.1	<i>Geographischer Überblick U1</i>	28
3.1.2	<i>Geologischer Überblick U1</i>	29
3.1.3	<i>Beschreibung einer beispielhaften Rutschung in U1</i>	34
3.2	UNTERSUCHUNGSGEBIET 2: MAINZER BECKEN	36
3.2.1	<i>Geographischer Überblick U2</i>	36
3.2.2	<i>Geologischer Überblick U2</i>	38
3.2.3	<i>Beschreibung einer beispielhaften Rutschung in U2</i>	41
4	METHODIK	43
4.1	SOFTWARE	44
4.2	DATENGRUNDLAGE	45
4.2.1	<i>Digitale Geländemodelle</i>	45
4.2.1	<i>Weitere Geobasis-Daten</i>	47
4.2.2	<i>Geologische Daten</i>	48
4.2.3	<i>Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz</i>	49
4.3	DATENAUFBEREITUNG	51
4.4	RUTSCHUNGSINVENTAR	52
4.4.1	<i>Computergestützte Kartierung</i>	53
4.4.2	<i>Überprüfung im Gelände</i>	56
4.4.3	<i>Erstellung des Rutschungsinventars</i>	60
4.4.4	<i>Rutschungsinventar in den Untersuchungsgebieten</i>	62
4.4.5	<i>Trainings- und Testdatensätze</i>	65
4.5	TOBIA (LAGERUNGSVERHÄLTNISSE)	67
4.5.1	<i>Morpho-Lines</i>	67
4.5.2	<i>Berechnung der Einfallswerte</i>	70
4.5.3	<i>Interpolation</i>	71
4.5.4	<i>Erweitertes TOBIA Modell</i>	73
4.6	BERECHNUNG UND KLASSIFIZIERUNG MODELLRELEVANTER PARAMETER	77
4.6.1	<i>Hangneigung</i>	77
4.6.2	<i>Exposition</i>	80
4.6.3	<i>Höhenlage</i>	82
4.6.4	<i>Ingenieurgeologische Klassifizierung (Geologie)</i>	83
4.6.5	<i>Topographic Wetness Index (TWI)</i>	86
4.6.6	<i>Stream Power Index (SPI)</i>	87
4.7	MODELLE ZUR ERSTELLUNG VON SUSZEPTIBILITÄTSKARTEN.....	89
4.7.1	<i>Frequency-Ratio</i>	90
4.7.2	<i>Weight-of-Evidence</i>	91
4.8	VALIDIERUNGSMODELL	93

4.8.1	<i>Konfusionsmatrix</i>	93
4.8.2	<i>Grenzwertoptimierungskurven</i>	93
4.9	KLASSIFIZIERUNG DER RUTSCHUNGSANFÄLLIGKEITSKARTEN	97
4.10	SENSITIVITÄTSANALYSE	98
5	ERGEBNISSE FÜR DAS SAAR-NAHE-GEBIET	99
5.1	PARAMETERANALYSE.....	99
5.1.1	<i>Hangneigung</i>	99
5.1.2	<i>Exposition</i>	102
5.1.3	<i>Höhe</i>	104
5.1.4	<i>TOBIA</i>	107
5.1.5	<i>Ingenieurgeologische Klassen</i>	110
5.1.6	<i>TWI</i>	113
5.1.7	<i>SPI</i>	115
5.2	SUSZEPTIBILITÄTSANALYSE	117
5.2.1	<i>Felsrutschungen</i>	117
5.2.2	<i>Deckschichtenrutschungen</i>	123
5.2.1	<i>Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Suszeptibilitätsanalysen</i>	128
5.3	BERECHNUNG & VALIDIERUNG DER RUTSCHUNGSANFÄLLIGKEITSMODELLE	130
5.3.1	<i>Felsrutschungen</i>	130
5.3.2	<i>Deckschichtenrutschungen</i>	133
5.4	RUTSCHUNGSSUSZEPTIBILITÄTSKARTEN SAAR-NAHE-GEBIET	136
5.4.1	<i>Suszeptibilitätskarte Felsrutschungen</i>	136
5.4.2	<i>Suszeptibilitätskarte Deckschichtenrutschungen</i>	139
5.5	SENSITIVITÄTSANALYSE	142
5.5.1	<i>Änderung der Trainings- und Testdatensätze</i>	142
5.5.2	<i>Änderung von Parameterklassifikationen</i>	146
5.5.3	<i>Änderung der Klassifikationsmethode für die Anfälligkeitskarten</i>	147
6	ERGEBNISSE FÜR DAS MAINZER BECKEN.....	149
6.1	PARAMETERANALYSE.....	149
6.1.1	<i>Hangneigung</i>	149
6.1.2	<i>Exposition</i>	152
6.1.3	<i>Höhe</i>	154
6.1.4	<i>TOBIA</i>	156
6.1.5	<i>Ingenieurgeologische Klassen</i>	159
6.1.6	<i>TWI</i>	162
6.1.7	<i>SPI</i>	164

Inhaltsverzeichnis

6.2	SUSZEPTIBILITÄTSANALYSE	166
6.3	BERECHNUNG & VALIDIERUNG DER RUTSCHUNGSANFÄLLIGKEITSMODELLE	172
6.4	RUTSCHUNGSSUSZEPTIBILITÄTSKARTE GEBIET MAINZER BECKEN	175
6.5	SENSITIVITÄTSANALYSE	178
6.5.1	<i>Änderung der Trainings- und Testdatensätze</i>	<i>178</i>
6.5.2	<i>Änderung von Parameterklassifikationen</i>	<i>181</i>
6.5.3	<i>Änderung der Klassifikationsmethode für die Anfälligkeitskarten</i>	<i>182</i>
7	DISKUSSION	184
7.1	VERGLEICH DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE.....	184
7.2	DATENQUALITÄT UND -VERFÜGBARKEIT	186
7.3	PARAMETER- UND MODELLAUSWAHL.....	188
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	191
9	LITERATURVERZEICHNIS	194
ANHANG	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Foto der Rutschung nach ersten Sanierungsmaßnahmen. Zu erkennen ist wieviel der Straße dabei zerstört wurde (Foto: LBM RLP).	2
Abbildung 2: Typen von Anfälligkeitsmodellen. Das horizontale Balkendiagramm zeigt die Anzahl der 19 Modelltypklassen an, die in der Literatur verwendet wurden. Dunklere Farben zeigen eine größere Anzahl von Einzelmodellen in der Gruppe an (modifiziert nach REICHENBACH et al. 2018).	4
Abbildung 3: Die schematische Darstellung der Bewegungsart Fallen am Beispiel eines Steinschlags. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).	9
Abbildung 4: Die schematische Darstellung einer Kippbewegung modifiziert nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).	10
Abbildung 5: Links: Die schematische Darstellung einer Rotationsrutschung. Rechts: Die Darstellung einer Translationsrutschung. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).	11
Abbildung 6: Die Vereinfachte Darstellung einer Driftbewegung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).	13
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Fließbewegung. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).	14
Abbildung 8: Die Schematische Darstellung der Rutschungsmerkmale nach UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993).	18
Abbildung 9: Abbildung der wirkenden Kräfte bei Rutschungen auf einer Gleitfläche sowie der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Hangstabilität (modifiziert nach RICKLI 2001).	21
Abbildung 10: Stabilitätszustände eines Hanges mit Beispielen von beeinflussenden und auslösenden Faktoren (modifiziert nach GLADE & CROZIER 2005).	22
Abbildung 11: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiet 1: Zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets in Deutschland sowie die Lage des Untersuchungsgebiets in Rheinland-Pfalz.	29
Abbildung 12: Geologische Übersichtskarte des Saar-Nahe-Beckens (Eigene Darstellung nach SCHÄFER 1989; HENK 1993).	30
Abbildung 13: Lithostratigraphie des Permokarbons in Rheinland-Pfalz nach BOY (2005).	32
Abbildung 14: Lage der Odenbach-Rutschung im Untersuchungsgebiet 1. Außerdem Überblick über die kartierten Rutschungsmerkmale im DGM und kartierte Merkmale im Gelände. Die Luftbildaufnahme zeigt den aktuellen Zustand des Rutschungsgebiets.	35
Abbildung 15: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiet 2: Zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets Mainzer Becken in Deutschland sowie die Lage des Untersuchungsgebiets in Rheinland-Pfalz.	37

Abbildung 16: Die Lage des Mainzer Beckens auf der nordwestlichen Schulter des Oberrheingraben (nach SCHÄFER 2012).....	38
Abbildung 17: Die Stratigraphie und Salinitätsschwankungen im Mainzer Becken (nach BOY 2005). l =limnisch, b=brackisch, m=marin, h=hypersalinär	39
Abbildung 18: Lage der Mandel-Rutschung im Untersuchungsgebiet 2. Außerdem Überblick über die kartierten Rutschungsmerkmale im DGM und kartierte Merkmale im Gelände. Die Luftbildaufnahme zeigt den aktuellen Zustand des Rutschungsgebiets.	42
Abbildung 19: Darstellung des Ablaufs des Forschungsprozesses. Der Forschungsprozess kann in drei Phasen unterteilt werden: der Datenaufbereitung, der Analyse und dem Assessment.....	43
Abbildung 20: Airborne Laserscanning Methode mit verschiedenen Oberflächen und Echos (modifiziert nach DE LANGE 2020).	47
Abbildung 21: Die Verteilung der verschiedenen Massenbewegungstypen in Rheinland-Pfalz die in der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz aufgenommen wurden.....	49
Abbildung 22: Übersicht der vorhandenen Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz vom LGB, mit Detailansichten der Rutschungsdatenbank in den Bereichen des A) Saar-Nahe-Gebiets und dem B) Mainzer Becken.	50
Abbildung 23: Links: Satellitenbild einer Rutschung. Es sind leichte Veränderungen der Vegetationsdichte zu erkennen, jedoch können keine Rutschungsmerkmale kartiert werden. Rechts: Die gleiche Rutschung im DGM1. Rutschungsmerkmale sind gut zu erkennen und können so im GIS kartiert werden.	54
Abbildung 24: Der Vergleich von Flächen A) mit dem Status 2 und B) mit dem Status 5. A) Abrisskante ist erkennbar (orangener Punkt) außerdem ist die Rutschmasse zu erkennen die in Richtung Bach rutscht, was zu einer Bachlauf Änderung geführt hat. B) Hang weist unruhiges Gelände auf, möglicher überprägter Abriss (blauer Punkt).....	55
Abbildung 25: A) Zeigt die Veränderung eines Bachlaufs (rote Linie) durch hangabwärts gleitende Rutschmassen. B) Rutschmasse die hangabwärts auf einen Weg rutscht und somit zu einer Verengung führt (rote Linie).....	56
Abbildung 26: Foto einer Rutschung in einem bewaldeten Gebiet. Gut zu erkennen sind die Abrisskante sowie die Rutschmasse. Die Wulst konnte im Gelände auch erkannt werden ist jedoch im Bild nicht zu erkennen.	57
Abbildung 27: Rutschung die zum Zeitpunkt der Aufnahme nur wenige Wochen alt war. Hier kam es durch Starkregen zum Abgang der Deckschichten auf einem Feld. Wobei der unterhalb liegende Weg beschädigt wurde.	58

Abbildung 28: Beispiel von Säbelwuchs im Gelände. Aus der Krümmung des Stammes und der Richtung der Jungtriebe können Rückschlüsse auf Bodenbewegungen gezogen werden.	59
Abbildung 29: Kartierte Rutschung im Saar-Nahe-Gebiet. Hier wurde der gesamte Einflussbereich der Rutschung dargestellt. Die gelbe Fläche stellt den Abrissbereich mit der Abrisskante (rote Linie) dar. Die Wulst wird durch die blaue Fläche dargestellt und das mittlere Bewegungsgebiet durch die orangene Fläche.	60
Abbildung 30: Die Rutschungsinventarkarte für das Saar-Nahe-Gebiet (U1). Sie zeigt, wie die zwei Rutschungstypen im Gebiet verteilt sind. Im roten Rechteck sind im Untersuchungsgebiet besonders viele Rutschungen im LIDAR erkennbar.....	63
Abbildung 31: Die Rutschungsinventarkarte für das Mainzer Becken (U2). Die Rutschungen sind gleichmäßig an den Hängen im gesamten Untersuchungsgebiet verteilt.	64
Abbildung 32: Darstellung von Morpho-Lines (grün), die Geländekanten erfassen. Die Grafik zeigt zwei typische Beispiele für die stufenhafte (periodische) Geometrie von geologischen Schichten.	68
Abbildung 33: Farbcodierte Darstellung eines Aufschlusses im Saar-Nahe-Gebiet im GIS. Die Aufschlüsse sind rot, das steile Gelände blau dargestellt (aus WERNER et al. 2021).	69
Abbildung 34: Die schematische Darstellung der Erstellung von Thiessen Polygonen (modifiziert nach DE LANGE 2020).	72
Abbildung 35: Links: Ausschnitt des DGMs innerhalb des U1 mit Morpho-Lines (grüne Linien) und Vulkaniten (rote Linien), Störungen (schwarze Linien) und Flussläufen (blaue Linien) als Break-Lines. Rechts: Die errechneten Polygone die nur bis an den Rand der Break-Lines konstruiert werden.....	72
Abbildung 36: Die drei Haupthangtypen des TOBIA Modells. Eigene Darstellung nach MEENTEMEYER & MOODY (2000).	73
Abbildung 37: Vergleich der durch die Sehnenlängen (gelb) auf dem Einheitskreis definierten Bereiche der Hangklassen des Modells von MEENTEMEYER & MOODY (2000) (links) und dem erweiterten TOBIA-Modell (rechts) (aus WERNER et al. 2021).	74
Abbildung 38: 3x3 Matrix und die Beziehung zwischen den neun Parametern von Gleichung 1 und den neun Submatrix Punkten. Z1 bis Z9 sind die neun Untermatrixpunkte. L ist der Abstand zwischen den Matrixpunkten in der Zeilen- und Spaltenrichtung und muss derselbe sein wie Z (ZEVENBERGEN & THORNE 1987).	78
Abbildung 39: Die grafische Darstellung der acht Hangexpositionsklassen. Eine Einteilung der Klassen erfolgt in 45° Schritten und umfasst die Richtungen Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West und Nordwest.....	80

Abbildung 40: Beispiele für Grenzwertoptimierungskurven. Ein Wert von 0,5 beschreibt eine zufällige Klassifizierung. Ein Wert von 1 zeigt eine perfekte Klassifizierung also eine 100% Vorhersagegenauigkeit.	95
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Hangneigungsklassen innerhalb des gesamten Untersuchungsgebiets 1 und aller in dem Gebiet vorkommenden Rutschungen.	100
Abbildung 42: Hangverteilungskarte Saar-Nahe-Gebiet. Außerdem eine Detailansicht mit Rutschungen in der Nähe vom Potzberg	101
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Hangexpositions-klassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.	102
Abbildung 44: Expositionsverteilung innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets. Detailansicht mit den zwei Rutschungstypen in der Nähe des Potzberg.....	103
Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der klassifizierten Höhenlagen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.	104
Abbildung 46: Höhenklassen innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets sowie eine Detailansicht von mehreren Rutschungen in der Nähe vom Potzberg	106
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der TOBIA-Klassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.	107
Abbildung 48: TOBIA Klassen innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets sowie eine Detailansicht von mehreren Rutschungen im Untersuchungsgebiet.....	109
Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der Ingenieurgeologischen Klassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.	110
Abbildung 50: Karte der Verteilung der Ingenieurgeologischen Klassen innerhalb des U1 mit Detailansicht auf Rutschungen im Gebiet um den Potzberg.....	112
Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung des TWI innerhalb des Untersuchungsgebiet 1 und den dort auftretenden Rutschungen.....	113
Abbildung 52: Karte des Saar-Nahe-Gebiets und den darin vorkommenden TWI-Klassen. Detailansicht auf Rutschungen am Potzberg.....	114
Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung des SPI innerhalb des Untersuchungsgebiet 1 und den dort auftretenden Rutschungen.....	115
Abbildung 54: Karte des Saar-Nahe-Gebiets und den darin vorkommenden SPI-Klassen. Detailansicht auf Rutschungen um den Potzberg	116
Abbildung 55: ROC-Kurven und die dazugehörigen AUCs für die Rutschungsanfälligkeitsmodelle der Felsrutschungen. Links: Modelle die mit der Frequency-Ratio Methode berechnet wurden. Rechts: Modelle die mit der Weight-of-Evidence Methode berechnet wurden.....	131

Abbildung 56: ROC-Kurven und die dazugehörigen AUCs für die Rutschungsanfälligkeitsmodelle der Deckschichtenrutschungen Links: Modelle die mit der Frequency-Ratio Methode berechnet wurden. Rechts: Modelle die mit der Weight-of-Evidence Methode berechnet wurden.	134
Abbildung 57: Finale Suszeptibilitätskarte für Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Abschnitt A zeigt mehrere Felsrutschungen an steilen Hängen an den Rändern der Talaue. Abschnitt B zeigt unter anderem eine sehr große Rutschungen an einem im Vergleich zu anderen Hängen eher flachen Hang. Aus Übersichtlichkeit wurden die Rutschungsflächen in der Gesamtansicht ausgeblendet.	137
Abbildung 58: Parameterkarten des Abschnitts A der Suszeptibilitätskarte für die Felsrutschungen. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells.	138
Abbildung 59: Finale Suszeptibilitätskarte für Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Abschnitt A zeigt Deckschichtenrutschungen an steilen Hängen am Donnersberg. Abschnitt B zeigt sehr viele kleine Rutschungen im Norden des Untersuchungsgebiets. Aus Übersichtlichkeit wurden die Rutschungsflächen in der Gesamtansicht ausgeblendet.	140
Abbildung 60: Parameterkarten des Abschnitts B der Suszeptibilitätskarte für die Deckschichtenrutschungen. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells.	141
Abbildung 61: Hangneigungsverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.	150
Abbildung 62: Hangneigungsverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.	151
Abbildung 63: Hangexpositionsverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.	152
Abbildung 64: Expositionsverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.	153
Abbildung 65: Höhenverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.	154
Abbildung 66: Höhenverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.	155
Abbildung 67: TOBIA-Verteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.	156
Abbildung 68: TOBIA-Verteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.	158
Abbildung 69: Verteilung der Ingenieurgeologischen Klassen im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.	159
Abbildung 70: Ingenieurgeologische Klassifizierung innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.	161

Abbildung 71: Verteilung des TWI im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete... 162	162
Abbildung 72: TWI innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist. 163	163
Abbildung 73: Verteilung des SPI im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete. ... 164	164
Abbildung 74: SPI-Verteilung innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist. 165	165
Abbildung 75: ROC-Kurven für die Anfälligkeitsmodelle im Mainzer Becken. Links: ROC-Kurven und AUC für die Weight-of-Evidence Methode Rechts: ROC-Kurven und AUC für die Frequency-Ratio Methode. 173	173
Abbildung 76: Finale Rutschungssuszeptibilitätskarte für das Mainzer Becken. Der Ausschnitt aus der Karte (schwarzes Rechteck) zeigt mehrere Rutschungen an einem Hang der als sehr hoch anfällig eingestuft wurde..... 176	176
Abbildung 77: Parameterkarten des Ausschnitts der Suszeptibilitätskarte für die Rutschungen im Mainzer Becken. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells (Hangneigung, Exposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung und TWI). 177	177
Abbildung 78: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden..... 206	206
Abbildung 79: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden 207	207
Abbildung 80: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden 208	208
Abbildung 81: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden..... 209	209
Abbildung 82: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitkarte für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet 210	210
Abbildung 83: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitkarte für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet 210	210
Abbildung 84: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für Rutschungen im Mainzer Becken die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden..... 215	215
Abbildung 85: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindex für Rutschungen im Mainzer Becken die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden 216	216
Abbildung 86: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitkarte für die Rutschungen im Mainzer Becken..... 217	217

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rutschungsklassifikation nach Hungr et al (2014). Für eine genaue Beschreibung aller aufgeführten Rutschungstypen siehe Hungr et al. (2014). Die meisten der englischsprachigen Begriffe konnten sinnvoll übersetzt werden, bei einigen Rutschungstypen war das jedoch nicht der Fall, hier wurde nur der englische Begriff in die Tabelle übernommen.....	15
Tabelle 2: Beschreibung der Rutschungsmerkmale nach UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993) und PRINZ & STRAUß (2011).	16
Tabelle 3: Überblick über die Datengrundlagen die in dieser Arbeit verwendet wurden.	45
Tabelle 4: Definitionen der Statusklassen. Der Status einer Rutschung gibt die Sicherheit an, ob es sich bei der kartierten Fläche um eine Rutschung handelt.	55
Tabelle 5: Die Begriffserklärung der Felder in der Attributtabelle des erstellten Rutschungsinventars.	61
Tabelle 6: Klassifikation der Hänge nach dem erweiterten TOBIA Modell in Abhängigkeit von Neigung, Neigungsrichtung, Gefälle und Aspekt. $*1 \pm 45^\circ / *2 \pm 22,5^\circ$ modifiziert nach MEENTEMEYER & MOODY (2000) aus WERNER et al. (2021).....	75
Tabelle 7: Klasseneinteilung für den Parameter Hangneigung in Untersuchungsgebiet 1 & 2.	79
Tabelle 8: Klasseneinteilung für die Hangexposition im Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.....	81
Tabelle 9: Klasseneinteilung der Höhenlagen für die zwei Untersuchungsgebiete.	82
Tabelle 10: Die Ingenieurgeologische Klassifizierung der Geologischen Einheiten in Rheinland-Pfalz anhand der Generallegende des LGB RLP (modifiziert nach WEHINGER et al. 2022).	85
Tabelle 11: Klassifizierung des TWI für das Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.	87
Tabelle 12:Klassifizierung des SPI für das Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.	88
Tabelle 13: Kontingenztafel für die Rutschungsanalyse.....	94
Tabelle 14: Anfälligkeitsklassen für die LSMs.....	97
Tabelle 15: Räumliche Beziehung zwischen der Hangneigung und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet. .	117
Tabelle 16: Räumliche Beziehung zwischen der Hangexposition und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.	118
Tabelle 17: Räumliche Beziehung zwischen den Höhenlagen und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet. .	119

Tabelle 18: Räumliche Beziehung zwischen den TOBIA-Klassen und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.	119
Tabelle 19: Räumliche Beziehung zwischen den Ingenieurgeologischen Klassen und den Felsrutschungen unter Verwendung des FR und dem WoE für das Saar-Nahe-Gebiet. NaN = Not a Number, hier konnten keine Ergebnisse berechnet werden da die Klassen nicht im Untersuchungsgebiet vorkommen.	120
Tabelle 20: Räumliche Beziehung zwischen dem TWI und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	121
Tabelle 21: Räumliche Beziehung zwischen dem SPI und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	122
Tabelle 22: Räumliche Beziehung zwischen der Hangneigung und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	123
Tabelle 23: Räumliche Beziehung zwischen der Hangexposition und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	124
Tabelle 24: Räumliche Beziehung zwischen den Höhenlagen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	124
Tabelle 25: Räumliche Beziehung zwischen den TOBIA-Klassen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.....	125
Tabelle 26: Räumliche Beziehung zwischen den Ingenieurgeologischen Klassen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.	126
Tabelle 27: Räumliche Beziehung zwischen dem TWI und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet. .	127
Tabelle 28: Räumliche Beziehung zwischen dem SPI und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet ..	127
Tabelle 29: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Frequency-Ratio Methode für die Felsrutschungen.	130
Tabelle 30: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Weight-of-Evidence- Methode für die Felsrutschungen.....	132

Tabelle 31: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Frequency-Ratio Methode für die Deckschichtenrutschungen.	133
Tabelle 32: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Weight-of-Evidence- Methode für die Deckschichtenrutschungen.....	134
Tabelle 33: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für unterschiedliche Trainingsdaten.	143
Tabelle 34: Anfälligkeitswerte der Exposition für unterschiedliche Trainingsdaten.....	143
Tabelle 35: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassifizierung für unterschiedliche Trainingsdaten.	144
Tabelle 36: Anfälligkeitswerte der TOBIA-Klassen für unterschiedliche Trainingsdaten.	145
Tabelle 37: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50).....	146
Tabelle 38: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30).....	146
Tabelle 39: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Anfälligkeitsklasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl, veränderte Klassengröße).	147
Tabelle 40: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl & Klassengröße).	147
Tabelle 41: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierungsmethode).....	148
Tabelle 42: Hangneigungsstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.....	166
Tabelle 43: Hangexpositionsstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.	167
Tabelle 44: Höhenstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.....	167
Tabelle 45: TOBIA Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.....	168
Tabelle 46: Ingenieurgeologische Klassifizierung. Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.	169
Tabelle 47: TWI-Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.	170
Tabelle 48: SPI-Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.	170

Tabelle 49: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Weight-of-Evidence Methode für Rutschungen im Mainzer Becken.	172
Tabelle 50: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Frequency-Ratio Methode für Rutschungen im Mainzer Becken.	174
Tabelle 51: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.	178
Tabelle 52: Anfälligkeitswerte der Exposition für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.	179
Tabelle 53: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassifizierung für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.	180
Tabelle 54: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50).	181
Tabelle 55: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30).	181
Tabelle 56: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl (10), veränderte Klassengröße).	182
Tabelle 57: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl (6) & Klassengröße).	182
Tabelle 58: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierungsmethode).	183
Tabelle 59: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten	211
Tabelle 60: Anfälligkeitswerte der Exposition für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten	211
Tabelle 61: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassen für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten	212
Tabelle 62: Anfälligkeitswerte der TOBIA Klassen für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten	212
Tabelle 63: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50) für die Deckschichtenrutschungen.	213
Tabelle 64: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30) für die Deckschichtenrutschungen.	213

Tabelle 65: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Anfälligkeitsklasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl, veränderte Klassengröße) für die Deckschichtenrutschungen 213

Tabelle 66: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl & Klassengröße) für die Deckschichtenrutschungen 213

Tabelle 67: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierung). Klassen die unverändert bleiben sind grün dargestellt. für die Deckschichtenrutschungen..... 214

Abkürzungsverzeichnis

AK	<i>Anfälligkeitsklasse</i>
ANA	<i>anaklinal</i>
AUC	<i>Area Under Curve</i>
BBD	<i>Bodenbewegungsdienst Deutschland</i>
BGR	<i>Bundesanstalt für Geowissenschaften & Rohstoffe</i>
CAT	<i>kataklinal</i>
DGM	<i>Digitales Geländemodell</i>
DGM02	<i>Digitales Geländemodell Auflösung 20cm</i>
DGM1	<i>Digitales Geländemodell Auflösung 1m</i>
DOM	<i>Digitales Oberflächenmodell</i>
FISe/IGL	<i>Fachinformationssysteme und Integrierte Geologische Landesaufnahme</i>
FR	<i>Frequency Ratio</i>
FSR	<i>Forschungsstelle Rutschungen</i>
GIS	<i>Geoinformationssystem, Geographische Informationssysteme</i>
GLA	<i>Geologisches Landesamt</i>
ID	<i>Identifikation</i>
LBM	<i>Landesbetrieb Mobilität</i>
LGB	<i>Landesamt für Geologie und Bergbau</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LSI	<i>Landslide Susceptibility Index</i>
LSM	<i>Landslide Susceptibility Map</i>
LVerGeo	<i>Landesamt für Vermessung und Geodäsie</i>
MABEIS	<i>Massenbewegungs-Informationssystem</i>
MBID	<i>Massenbewegungen in Deutschland</i>
ML	<i>Morpho-Line</i>
modDGM	<i>Modifiziertes DGM</i>
OCL	<i>orthoklinal</i>
QGIS	<i>Quantum-GIS</i>
RDB	<i>Rutschungsdatenbank</i>
RLP	<i>Rheinland-Pfalz</i>
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
SAGA GIS	<i>System für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen GIS</i>
SL	<i>Synth-Line</i>
SPI	<i>Stream Power Index</i>
TOBIA	<i>Topographic-Bedding-Intersection-Angle</i>
TWI	<i>Topographic Wetness Index</i>
U	<i>Untersuchungsgebiet</i>
VDA	<i>Verdachtsfläche</i>
WoE	<i>Weight-of-Evidence</i>

1 Einleitung

Rutschungen verursachen weltweit, hohe volkswirtschaftlichen Schäden und zählen neben Erdbeben, Überschwemmungen und Vulkanausbrüchen zu den weltweit größten Naturgefahren (KRAUTER et al. 2012). Das Auftreten von Rutschungen ist dabei nicht nur an die hochalpinen Regionen der Welt gebunden, sondern ist auch ein Problem in vielen Mittelgebirgen, wenn steiles Gelände, ungünstige geologische Bedingungen und auslösende Faktoren aufweist (DIKAU & SCHMIDT 2004). Dass das Thema der Massenbewegungen auch innerhalb der EU in den letzten 20 Jahren an Bedeutung zugenommen hat, wird auch anhand der zahlreichen Projekte in diesem Bereich ersichtlich. Gerade in den letzten Jahren kam es durch Starkregenereignisse vermehrt zu Rutschungen. So führten die Überschwemmungen in Mitteleuropa im Juli 2021 und die darauffolgenden Rutschungen allein in Deutschland zu über 35 Milliarden Euro an wirtschaftlichen Kosten (CRED 2022).

Anthropogene Faktoren wie die Ausdehnung von Städten auf instabile Hänge und Änderungen innerhalb von Siedlungen erhöhen die Gefährdung der Menschen durch Rutschungen und die Wahrscheinlichkeit, dass es zu solchen Ereignissen kommt (KIRSCHBAUM et al. 2015). Neben geomorphologischen Faktoren und anthropogenen Einflüssen wird das Risiko von Rutschungen auch durch eine Reihe von Klimafaktoren beeinflusst. Vor dem Hintergrund, der zukünftig zu erwartenden Klimaentwicklungen mit der Veränderung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse wird, das Gefährdungspotenzial für Mensch und Infrastruktur durch Rutschungen ansteigen (IPCC 2022). Auch in Rheinland-Pfalz gewinnt dieses Thema im Hinblick auf das häufige Auftreten von Rutschungen durch extreme Stark- und Dauerniederschläge immer mehr an Bedeutung. In der Rutschungsdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RLP) sind zwischen 1655 und 2022 über 3000 Ereignisse im gesamten Bundesland festgehalten. So kam es unter anderem im Februar 2021 zu einer Rutschung an der Zufahrtsstraße zur Gemeinde Kordel, bei dem Teil einer Straße abgerutscht ist (siehe Abbildung 1). Hierbei wurden mehrere Menschen verletzt und es kam zu erheblichen Sachschäden. Auslöser der Rutschung waren mit aller Wahrscheinlichkeit die vorher andauernden Niederschläge im Zusammenhang der vorherrschenden geologischen und morphologischen Bedingungen.



Abbildung 1: Foto der Rutschung nach ersten Sanierungsmaßnahmen. Zu erkennen ist wieviel der Straße dabei zerstört wurde (Foto: LBM RLP).

Um im Kontext des globalen Klimawandels und der ansteigenden Besiedlung auch in Zukunft auf derartige Ereignisse vorbereitet zu sein, sind die Kenntnisse der funktionalen Zusammenhänge und rutschungsfördernden Faktoren von entscheidender Bedeutung. Eine flächenhafte Ausweisung der anfälligen Bereiche ist essenziell und könnte wesentlich zur Verminderung von Schäden beisteuern.

In Kooperation mit dem Landesamt für Geologie und Bergbau und dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LBM) arbeitet das Institut für Geowissenschaften an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz deshalb seit 2017 an dem Projekt „Massenbewegungs-Informationssystem“ (MABEIS). Ziel des Projektes ist die Entwicklung GIS-basierter hochauflösender, dynamischer Anfälligkeits- und Gefahrenhinweiskarte für die unterschiedlichen Arten von Massenbewegungen in Rheinland-Pfalz. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Rutschungen, Muren und Steinschläge. Die angewandten Daten, Methoden und Karten sollen transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden sowie den aktuellen Stand von Forschung und Technologie entsprechen. In die Berechnungen sollen alle relevanten Einflussfaktoren für die unterschiedlichen Massenbewegungstypen einfließen. Dazu zählen morphologische (z.B.: Hangneigung und Exposition), geologische (Petrographie und Lagerungsverhältnisse) sowie hydro(geologische) Faktoren.

1.1 Stand der Forschung

Auf internationaler Ebene wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze und Methoden zur Erstellung solcher Karten entwickelt und publiziert. Nach einer umfangreichen Literaturrecherche, soll hier ein kurzer Überblick gegeben werden.

REICHENBACH et al. (2018) geben in ihrem Artikel einen kritischen Überblick über die statistischen Methoden zur Modellierung der Rutschungsanfälligkeit. Sie erstellten dafür eine Datenbank mit 565 Fachartikeln aus den Jahren 1983 bis 2016. Für jeden Artikel in der Literaturdatenbank wurden unter anderem Informationen zu den Untersuchungsgebieten, Rutschungsdaten sowie den Modellen zur Erstellung von Anfälligkeitskarten und der Validierung, gesammelt. Dabei wurde festgestellt, dass es eine erhebliche Heterogenität der verwendeten Datentypen und -skalen, der Modellierungsansätze und der Kriterien für die Modellbewertung gibt. Die mit Abstand gängigste Methode zur Modellierung der Anfälligkeit für Rutschungen war innerhalb der Datenbank die logistische Regressionsanalysen mit 18,5 % (Abbildung 2). Diese Methode wurde über die Jahre in verschiedenen Studien verwendet, darunter z.B.: Bai et al. (2010), DEVKOTA et al. (2013) und ZHOU et al. (2018). Am zweit häufigsten wurden Datenüberlagerungen (10,7 %) benutzt, um Anfälligkeiten zu berechnen. Auf dem dritten Platz stehen mit 8,3 % neuronale Netze, die z.B. in Arbeiten von LEE et al. (2004) und ZHOU et al. (2018) verwendet wurden (Abbildung 2). Auch *Weight-of-Evidence* Analysen und probabilistische Ansätze wurden häufig genutzt. In vielen Studien wurden außerdem mehrere Ansätze getestet und ihre Ergebnisse miteinander verglichen, um die für die Modellierung beste Methode zu finden (z.B.: ZHOU et al. 2018; NOHANI et al. 2019).

Im Hinblick auf die Validierung der Anfälligkeitsmodelle fiel auf, dass bei 32% der Artikel keine Bewertungen zum *Model-Fit* durchgeführt wurden. In den verbleibenden Artikeln wurden verschiedene Methoden zur Bewertung verwendet. Die am häufigsten verwendeten Ansätze waren die *success rate curve* (22,5%), die *landslide density or frequency* (19,0%) und die *Receiver-Operating-Characteristic (ROC)-Curve* (16,0%). Ähnliche Ergebnisse kamen auch bei der Analyse der verwendeten Modelle für die Vorhersagefähigkeit eines Modells heraus. Von den 565 Artikeln in der Literaturdatenbank nahmen 220 Artikel (38,9%) keine Evaluierung der Modelle vor. In den verbleibenden 345 Artikeln (61,1%) waren die am häufigsten verwendeten Methoden, die *Kurve der prediction rate curve* (27,2%), die *landslide density or frequency* (22,9%) und die *ROC-Curve* (22,7%) (REICHENBACH et al. 2018).

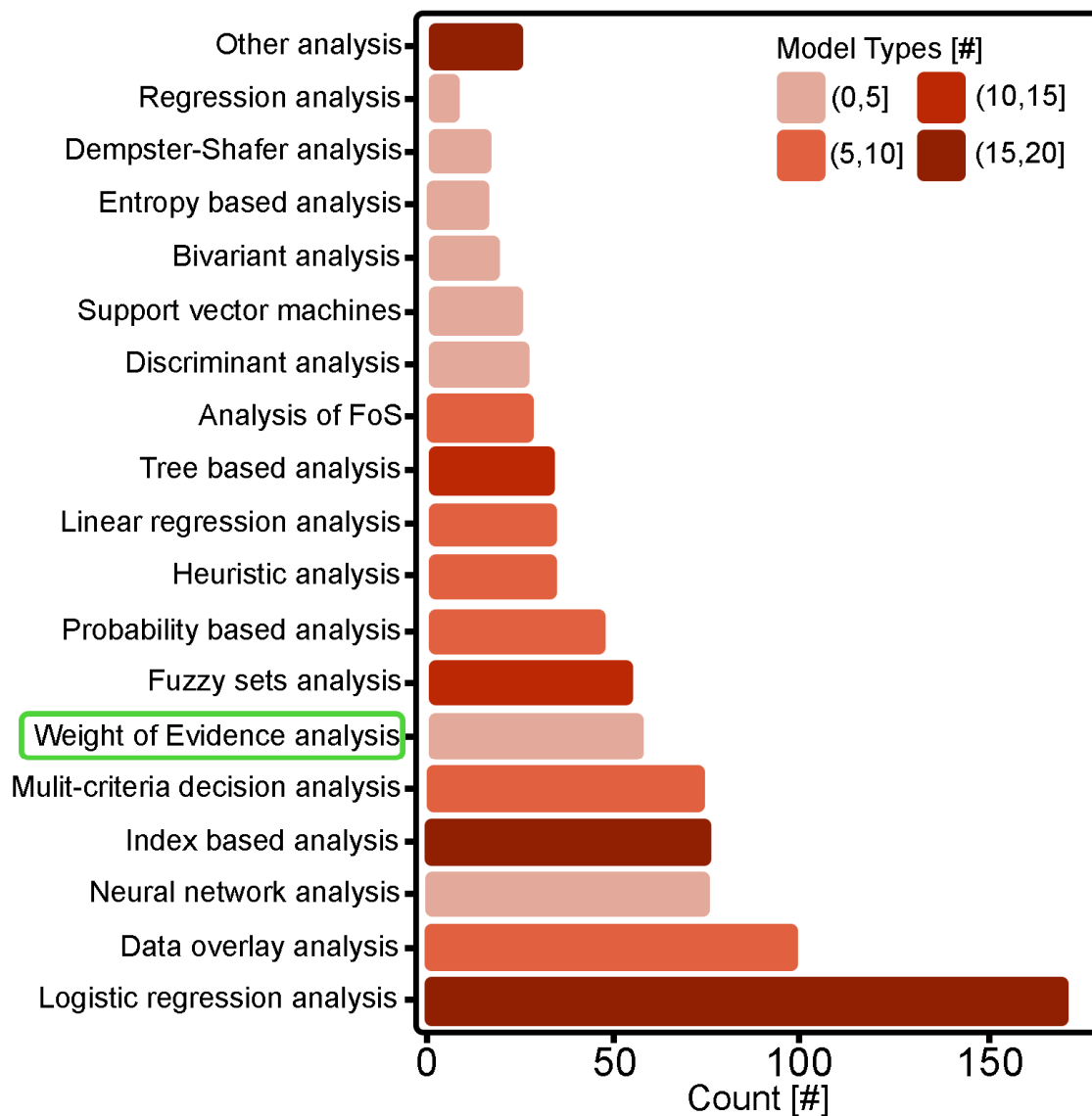


Abbildung 2: Typen von Anfälligkeitsmodellen. Das horizontale Balkendiagramm zeigt die Anzahl der 19 Modelltypklassen an, die in der Literatur verwendet wurden. Dunklere Farben zeigen eine größere Anzahl von Einzelmodellen in der Gruppe an (modifiziert nach REICHENBACH et al. 2018).

In den letzten 6 Jahren wurden weitere unzählige Publikationen zu dem Thema veröffentlicht. Statistisch basierte Modelle wie der *Frequency-Ratio* (FR) (z.B.: LI et al. 2017; OH et al. 2017; FAYEZ et al. 2018; KOSE & TURK 2018; KHAN et al. 2019; PAL & CHOWDHURI 2019; ZHANG et al. 2020), der *Statistical Index* (z.B.: BERHANE & TADESSE 2021), der *Weight-of-Evidence* (WoE) (z.B.: XIE et al. 2017; KOSE & TURK 2018; GADTAULA & DHAKAL 2019; GETACHEW & METEN 2021; MALKA 2021), der *Certainty factor* (z.B.: CHEN, Z. et al. 2019), der *Index of Entropy* (z.B.: TIEN BUI et al. 2018) und die logistische Regression (z.B.: LIN et al. 2017; CHEN, W. et al. 2019; SUJATHA & SRIDHAR 2021) wurden bei der Bewertung der Anfälligkeit für Rutschungen in größerem Umfang eingesetzt. In der Studie von FAYEZ et al. (2018) wurde mittels *Frequency Ratio* eine Analyse der Rutschungsanfälligkeit für einen Teil des Uttarakhand-Himalaya durchgeführt. NOHANI et al. (2019) verglichen in einer Studie vier bivariate Modelle, den *Frequency-*

Ratio, die *Shannon-Entropy*, den *Weight-of-Evidence* und die *Evidential Believe Function*. Das WoE-Modell war dabei die genaueste Methode unter den vier implementierten Ansätzen, um die Risiko-Regionen zu identifizieren. Weitere Studien die sowohl den FR als auch den WoE verwendet haben sind KOSE & TURK (2018) und frühere Arbeiten von OZDEMIR & ALTURAL (2013) und REGMI et al. (2014).

Auch in der EU wurden zahlreiche Projekte zum Thema Massenbewegungen durchgeführt, wobei die Koordinatoren in der Regel aus Italien stammten und EU-weit tätig waren. Der Fokus der meisten Projekte lag auf der Entwicklung von Frühwarnsystemen, Risikoeinschätzungen und Kartierungen von Massenbewegungen. Auch in Deutschland wurden in diesem Zusammenhang bereits zwei Projekte von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) initiiert. Das erste Projekt, der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD), konzentrierte sich auf Deformationen der Erdoberfläche, die durch geologische Prozesse oder anthropogene Maßnahmen wie beispielsweise tektonische Bewegungen, Hangrutschungen, Subrosions-, Auslaugungs- und Quellprozesse entstehen können (Kalia et al. 2021). Das zweite Projekt, Massenbewegungen in Deutschland (MBID), lief von 2018 bis 2020 und hatte zum Ziel, geogene Naturgefahren wie Massenbewegungen zu erfassen und zu bewerten. Das Projekt wurde als Bund-Länder-Projekt durchgeführt und hatte deutschlandweit nur vier Bundesländer als Teilnehmer darunter Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Sachsen. Dabei wurden komplexe Fallstudien unter Verwendung von unter anderem statistischen, physikalisch-basierten und heuristischen Verfahren durchgeführt, wie der *Weight-of-Evidence*, die Logistische Regression, Neuronale Netze und andere Methoden. Die Ergebnisse wurden mittels Konfusionsmatrizen und ROC-Kurven evaluiert und führten so zur Entwicklung von praktischen Lösungsansätzen und Empfehlungen (Balzer et al. 2020).

Auf Grundlage der Literaturrecherche wurden verschiedene Methoden zur Anfälligkeitsberechnung und Validierung getestet. Hinsichtlich der Datengrundlage und der Rutschungsdichte wurden für die Anfälligkeitsberechnungen die Methoden *Frequency-Ratio* und *Weight-of-Evidence* und für die Validierung der Methoden *ROC-Kurven* verwendet. Außerdem wurden diese Methoden innerhalb des MABEIS Projektes in verschiedenen Abschlussarbeiten verwendet und lieferten gute Ergebnisse.

1.2 Ziele der Arbeit

Das Hauptziel der Arbeit war, die Entwicklung quantifizierter Karten der Rutschungsanfälligkeit für zwei von Rutschungen betroffene Gebiete in Rheinland-Pfalz unter Verwendung verschiedener statistischer Ansätze und unter Berücksichtigung von verschiedenen beeinflussenden Faktoren.

Daraus resultierend, wurden die folgenden spezifischen Ziele definiert:

- Kartierung von Rutschungsverdachtsflächen auf digitalen Geländemodellen (DGMs) in zwei Schwerpunktgebieten und stichprobenartige Geländebegehung der Verdachtsflächen für die ausgesuchten Untersuchungsgebiete
- Erstellung eines Rutschungsinventars, als Ergänzung der vorhandenen Rutschungsdatenbank, sowie zur Verwendung als Trainings- und Testflächen
- Weiterentwicklung einer Methode zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Rutschungsflächen und Lagerungsverhältnissen (erweitertes TOBIA-Modell)
- Parameterselektion für die Rutschungstypen in den Untersuchungsgebieten
- Analyse der Rutschungssuszeptibilität und Erstellung von Rutschungsanfälligkeitskarten in den Untersuchungsgebieten
- Validierung der Ergebnisse und Bewertung der Genauigkeit der resultierenden Anfälligkeitskarten

Diese Arbeit basiert auf internationalen Methoden und Konzepten, die nicht immer eine ausreichende Übersetzung ins Deutsche ermöglichen. Daher werden in dieser Arbeit öfter englische Begriffe verwendet, die bei ihrer erstmaligen Verwendung, wenn für die Arbeit relevant, erklärt werden.

2 Rutschungsprozesse

Das Identifizieren, Charakterisieren und Bewerten von Hangbewegungen ist wichtig für die Anfälligkeitsanalyse in betroffenen Gebieten. In diesem Kapitel werden grundlegende Definitionen, Klassifikationen und Fachkenntnisse zum Thema gravitative Massenbewegungen behandelt, wobei der Schwerpunkt durch die Konzeption dieser Arbeit auf Rutschungen (Prozesstyp „Gleiten“) gesetzt wird.

2.1 Definition

Eine sehr grundlegende, aber weitverbreitete Definition für Rutschungen wurde von VARNES (1958) aufgestellt und definiert eine Rutschung als „*downward and outward movement of slope-forming materials composed of natural rock, soils, artificial fills, or combinations of these materials*“ (VARNES 1958, S.20). Also als eine abwärts, nach außen gerichtete Bewegung von hangbildendem Material welches aus Gestein, Boden oder anderem Material bestehen kann. Die UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993) übernahm diese Definition im *Multilingual Landslide Glossary* von 1993. Sie definieren Rutschungen als gravitativ bedingte Verlagerungen von Fest- oder Lockergesteinsmassen. Die International verwendeten Begriffe „*mass movements*“, „*landslides*“ oder „*slope failure*“ beziehen sich aber nicht nur auf Hangrutschungen im eigentlichen Sinne, sondern umfassen alle Bewegungen, welche durch die Gravitation hangabwärts erfolgen (CRUDEN et al. 1996). Im Folgenden Kapitel werden die Begriffe Massenbewegung und Hangbewegung synonym für die Gesamtheit aller Rutschungstypen verwendet.

2.2 Klassifikation von Hangbewegungen

Die Beschreibung und Klassifizierung von Massenbewegungen, ist aufgrund der vielfältigen und komplexen Formen herausfordernd. Erschwerend kommt hinzu, dass sich Hangbewegungen meist aus mehreren unterschiedlichen Bewegungstypen zusammensetzen können. Die Art der Bewegung bestimmt dabei die potenzielle Bewegungsgeschwindigkeit, die Ausbreitungsstrecke sowie die möglichen Auswirkungen der Massenverlagerung VARNES (1978).

Nach VARNES (1978) können Rutschungen je nach Art der Bewegung und des Materials in verschiedene Typen eingeteilt werden. Die Arten der Bewegungen werden dort in fünf Hauptgruppen unterteilt: Fallen (engl.: *fall*), Kippen (engl.: *topple*), Gleiten (engl.: *slide*), Driften (engl.: *spread*) und Fließen (engl.: *flow*). Eine sechste Gruppe umfasst komplexe Hangbewegungen, die sich aus einer Kombination von mehreren Bewegungsarten zusammensetzen. Außerdem wird das bewegte Material in Fels- und

Bodenmassen unterteilt. Bei den Bodenmassen wird weiter zwischen Schutt und Erde differenziert. Das von VARNES (1978) und CRUDEN et al. (1996) entwickelte System zur Klassifizierung der Rutschungstypen ist das am weitesten verbreitete Modell zur Rutschungsklassifizierung.

Ein modifiziertes Klassifikationssystem wurde von HUNGR et al. (2014) entwickelt. Dort wird empfohlen, die Unterteilung der Materialien zu ändern, um die Kompatibilität mit anerkannten geotechnischen und geologischen Terminologien für Fels und Böden zu gewährleisten. Der Grund dafür ist, dass die Art des Materials einer der wichtigsten beeinflussenden Faktoren für das Verhalten von Rutschungen ist. Die von VARNES (1978) vorgeschlagene Dreiteilung in Fels, Schutt und Erde ist nicht mit der geologischen Terminologie von Materialien, die nach ihrer Herkunft unterschieden werden, vereinbar. Noch mit geotechnischen Klassifizierungen auf Grundlage von mechanischen Eigenschaften. HUNGR et al. (2014) schlagen deshalb nicht vor ein völlig neues Klassifizierungssystem für Rutschungen zu entwickeln, sondern Änderungen an der schon bestehenden Klassifizierung vorzunehmen, um die jüngsten Fortschritte im Verständnis von Rutschungsphänomenen und den betroffenen Materialien und Prozessen einzubinden. Daher war ein Aspekt der aktualisierten Varnes'schen Klassifizierung nach HUNGR et al. (2014), die Neueinteilung der verwendeten Materialien. Sie entwickelten deshalb eine Erweiterung der ursprünglich postulierten Materialtypen in Verbindung mit einer geotechnischen Materialterminologie. Die 10 neuen Materialtypen: Fels, Ton, Schlamm, Schlick, Sand, Kies, Geröll, Schutt, Torf und Eis ersetzen die früheren drei Materialklassen. Viele Böden liegen jedoch übergangslos in mehreren Klassen weshalb von HUNGR et al. (2014) vorgeschlagen wird, die Begriffe auf die Komponente zu vereinfachen, die im Hinblick auf das physikalische Verhalten die größte Bedeutung hat. Sind im Initialgebiet der Rutschung abwechselnd Zonen mit verschiedenen Materialien (z.B. Sand und Ton) anzutreffen, sollte das Material verwendet werden, das bei den Versagens- oder Ausbreitungsmechanismen die dominierende Rolle spielt. Ist die dominante Komponente nicht identifizierbar, ist es möglich, eine Kombination aus mehreren Begriffen zu verwenden.

Auch bei der Klassifizierung der Bewegungstypen wurde eine Änderungen vorgenommen. Dabei blieben die ersten fünf Klassen identisch lediglich die sechste Klasse wurde verändert. Grund dafür war, dass fast jede Rutschung bis zu einem gewissen Grad komplex ist. Eine als "komplex" definierte Klasse ist daher nicht sinnvoll. Je nach Untersuchungsschwerpunkt sollte daher ein passender Begriff für die Bewegung gewählt werden (HUNGR et al. 2014). Beispiel dafür wäre eine Hangbewegung die Initial durch ein Gleitversagen in Bewegung gerät, wobei sich die Rutschmasse beschleunigt und ablöst. Die Masse könnte dann in eine Rinne mit einem Bach eindringen, reißt Wasser und Boden mit und verwandelt sich in einen Schuttstrom. Dieses Ereignis würde somit aus mehreren Rutschungstypen bestehen. Liegt der Untersuchungsschwerpunkt bei der Ursache des Ereignisses wäre es sinnvoll die

Bewegung als Gleitrutschung zu benennen. Geht es primär um die Schäden, die durch das Ereignis entstehen, wäre die Benennung als Schuttstrom möglicherweise sinnvoller.

Für die Berechnung der Rutschungsanfälligkeit sind die bedingenden Faktoren, die zur Initiierung der Hangbewegungen geführt haben von entscheidender Bedeutung, deshalb wurden die Rutschungen in dieser Arbeit, wenn möglich nach ihrer Initialbewegung benannt. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Bewegungstypen nach dem von HUNGR et al (2014) modifizierten Ansatz von VARNES (1978) genauer beschrieben.

2.2.1 Fallen

Unter der Bewegungsart **Fallen** versteht man Vorgänge, bei denen sich eine Masse beliebiger Größe von einem steilen Hang oder einer Klippe entlang einer Fläche ablöst, auf der keine oder nur eine geringe Scherverschiebung stattfindet. Die Masse bewegt sich dabei meist durch die Luft im freien Fall, springend oder rollend auf dem Hang bergab (siehe Abbildung 3). Prozesse dieser Bewegungsart haben meist schnelle Bewegungsgeschwindigkeiten (VARNES 1978).

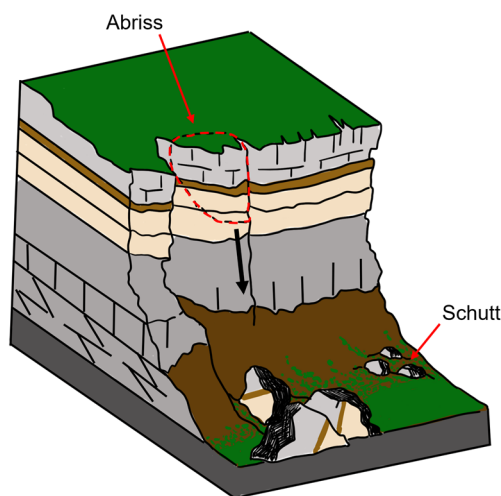


Abbildung 3: Die schematische Darstellung der Bewegungsart Fallen am Beispiel eines Steinschlags. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

Ein Beispiel für solche Bewegungen sind Steinschläge oder Felsstürze. Laut Krauter (2001) kennzeichnet "Fallen" mehr den freien Fall eines Gesteinskörpers, während "Stürzen" die Gleit-, Fall-, Sprung- und Rollbewegung eines Ereignisses zusammenfasst. Besonders an den Hangflanken der rheinland-pfälzischen Flusstäler (Mosel- sowie Mittelrheintal) sind Geogefahren in Form solcher Bewegungstypen häufige Phänomene (Hagge-Kubat et al. 2021). Ein weiteres Beispiel dieser Bewegungsart ist ein Siltfall hierbei kommt es durch den gleichen Mechanismus dazu dass Bodenfragmente hang abwärts fallen, jedoch sind hier die Auswirkungen durch die Schwäche, des sich bewegenden Materials stark reduziert (HUNGR et al. 2014).

2.2.2 Kippen

Ereignisse der Bewegungsart **Kippen** bestehen aus dem Vorwärtsrotieren von Boden- oder Felsmasse aus dem Hang heraus. Die Rotationsbewegung findet dabei um einen Punkt oder eine Achse unterhalb des Schwerpunktes der bewegten Masse statt (siehe Abbildung 4). Je nach Geometrie der versagenden Masse und der Ausrichtung ist es möglich das, dass Kippen in andere Bewegungsarten übergeht (VARNES 1978). Diese Ereignisse kommen häufig in säulenförmig gegliedertem vulkanischem Gelände sowie an Bach- und Flussläufen mit steilen Ufern vor (HIGHLAND & BOBROWSKY 2008). Als Beispiele für diese Bewegungsart nennt HUNGR et al. (2014) unter anderem Felsblockstürze und Sandblockstürze.

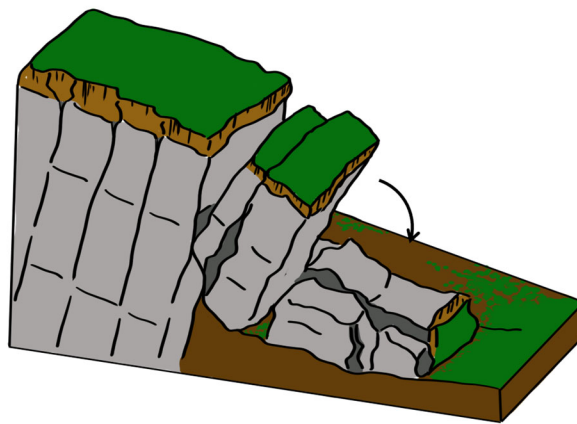


Abbildung 4: Die schematische Darstellung einer Kippbewegung modifiziert nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

2.2.3 Gleiten

Obwohl viele Arten von Massenbewegungen unter den allgemeinen Begriff "Rutschung" fallen, bezieht sich die restriktivere Verwendung des Begriffs nur auf Gleitbewegungen, bei denen es eine ausgeprägte Schwächezone (= Gleitfläche) gibt, die das Material vom stabileren darunter liegenden Material trennt. Beim **Gleiten** besteht die Bewegung von Fels- und Lockergesteinen aus Scherdehnung und Verschiebung entlang einer oder mehrerer Gleitflächen nach Überschreitung der Scherfestigkeit. Es ist möglich, dass sich eine Bewegung progressiv entwickelt, was bedeutet, dass ein Scherbruch nicht sofort auftritt und eine klare Bruchfläche bildet, sondern sich stattdessen von einem Bereich mit lokalem Versagen ausgehend ausbreitet. Die verdrängte Masse kann über die ursprüngliche Bruchfläche auf die ursprüngliche Bodenoberfläche gleiten, die dann zu einer Trennfläche wird (VARNES 1978). Die beiden Grundtypen von Gleitrutschungen sind Block- oder Schollenbewegungen. Dabei kann zwischen Translations- und Rotationsrutschungen unterschieden werden (PRINZ & STRAUB 2011).

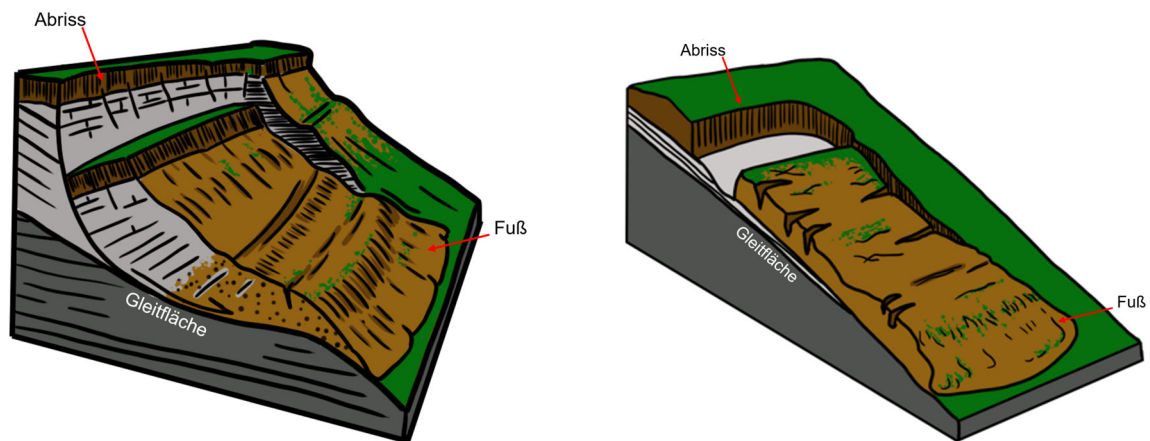


Abbildung 5: Links: Die schematische Darstellung einer Rotationsrutschung. Rechts: Die Darstellung einer Translationsrutschung. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

Rotationsrutschungen

Rotationsrutschungen sind Bewegungen, bei dem die Bruchfläche konkav (löffelförmig) ist und die Rutschbewegung mehr oder weniger um eine Achse erfolgt, die parallel zum Hang verläuft (siehe Abbildung 5, links). Die verdrängte Masse kann sich unter Umständen als kohärente Masse mit geringer innerer Verformung entlang der Bruchfläche bewegen. Der Kopf des verdrängten Materials kann sich fast senkrecht nach unten bewegen, und die Oberseite des verdrängten Materials ist meist nach hinten zur Böschung neigen. Bei Rotationsrutschungen in der oberen Verwitterungszone mit nach der Tiefe hin fester werdendem Untergrund verläuft die Gleitfläche meist flachschaliger (VARNES 1978). Nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008) treten Rotationsrutschungen am häufigsten in homogenen Materialien auf und sind die häufigsten Rutschungen, die in "Füllmaterial" auftreten. Sie sind außerdem mit Neigungen von etwa 20° bis 40° verbunden.

Felsrotationsrutschung: Eine Felsrotationsrutschung beschreibt, das Abrutschen einer Masse aus „schwachem“ Gestein auf einer zylindrischen oder anderen Rotationsbruchfläche, die nicht strukturell kontrolliert ist. Die Morphologie ist durch eine markante Steilkante, eine charakteristische nach hinten geneigten Bank am Kopf und eine begrenzte innere Verformung gekennzeichnet. Die meisten Rotationsrutschungen von Gesteinsmassen bewegen sich mit langsamen oder mäßigen Geschwindigkeiten. Dies ist der Fall, weil sich der Rotationsmechanismus selbst stabilisiert, da die Gravitationskräfte mit zunehmender lateraler Verschiebung abnehmen (HUNGR et al. 2014).

Ton/Schluff-Rotationsrutschung: Ist das Abrutschen einer Masse aus (homogenem und meist bindigem) Boden auf einer Rotationsbruchfläche. Es treten geringe innere Verformungen auf. Wie bei den Felsrotationsrutschungen entsteht eine auffällige Hauptsteilkante und ein nach hinten geneigter Rutschungskopf. Normalerweise bewegen sich solche Rutschungen langsam, können sich aber in empfindlichen oder kollabierenden Böden auch noch schneller bewegen (HUNGR et al. 2014).

Translationsrutschungen

Bei Translationsrutschungen bewegt sich die Masse entlang einer (relativ) ebenen Fläche nach außen oder nach unten (siehe Abbildung 5, rechts). Diese Art von Rutschung kann über beträchtliche Entfernungen fortschreiten, wenn die Bruchfläche ausreichend geneigt ist. Translationsrutschungen versagen in der Regel entlang geologischer Diskontinuitäten wie Störungen, Klüften, Schichtflächen oder dem Kontakt zwischen Gestein und Boden (VARNES 1978). Am häufigsten treten diese in veränderlichfesten Schichtgesteinen und in metamorphen Schiefern auf (PRINZ & STRAUß 2011). Translationsrutschungen sind im Allgemeinen flacher als Rotationsrutschungen und kommen weltweit am häufigsten vor (HIGLAND & BOBROWSKY 2008).

Fels-Translationsrutschung: Beschreibt das Gleiten einer Gesteinsmasse auf einer ebenen Bruchfläche. Die Oberfläche kann nach vorne abgestuft sein. Dabei kommt es nur zu geringer oder keiner inneren Verformung. Der Rutschkopf kann sich entlang eines tiefen, vertikalen Spannungsrisses (Trennfläche) vom Felsen lösen. Planare Felsrutschungen können in Gesteinsschichten mit Falten oder Schichtung sowie in metamorphen Gesteinen entlang von Schieferungs- oder Verwerfungsebenen und in Intrusivgesteinen mit Exfoliation in jeder Größenordnung auftreten. In der Regel verlaufen diese Rutschungen schnell. Die Ausnahme davon bilden sehr "schwache" Gesteine und Brüche auf sehr flach einfallenden Diskontinuitätsebenen (Hungr et al. 2014).

Lehm/Schluff-Translationsrutschung: Beschreibt das Gleiten einer Masse aus bindigem Boden auf einer geneigten ebenen Fläche, die durch eine schwache Schicht (oft vorgeschert) gebildet wird. Der Kopf der Gleitmasse trennt sich vom Boden entlang eines tiefen Spannungsrisses ab. Dieser Rutschungstyp kann sowohl langsam als auch schnell voranschreiten (HUNGR et al. 2014).

2.2.4 Driften

Bei der Bewegungsart **Driften** werden Fels- oder kohäsive Bodenmassen bei gleichzeitigem Einsinken in die liegenden, weniger kompetenten Schichten bewegt (siehe Abbildung 6). Diese Bewegungen entstehen unter anderem durch Liquefaktion (= Verflüssigung) oder Ausquetschen der weniger kompetenten Schichten (VARNES 1978). Beim Driften von Felshängen ist diese Bewegung langsam und es kommt nur zu einer sehr begrenzten Verdrängung. Dabei verschieben und drehen sich starre Blöcke aus festem Gestein aufgrund stark plastischer Verformung der darunter liegenden Schichten aus schwachem Gestein. Diese sind in horizontal gelagerten, schwachen Sedimentabfolgen sehr häufig (HUNGR et al. 2014).

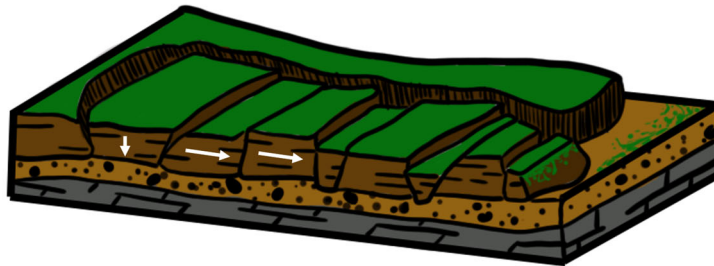


Abbildung 6: Die Vereinfachte Darstellung einer Driftbewegung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

2.2.5 Fließen

Abbildung 7 zeigt eine Fließbewegung hangabwärts. Das **Fließen** ist eine räumlich mehr oder weniger kontinuierliche Bewegung, bei der Scherflächen, wenn nur kurzzeitig oder für gewöhnlich gar nicht vorhanden sind. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht einer viskosen Flüssigkeit (UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY 1993). Oft gibt es eine Veränderung vom Prozesstyp Gleiten zu Fließen, abhängig vom Wassergehalt, der Mobilität und der Entwicklung der Bewegung (VARNES 1978). Ein typisches Beispiel dieses Bewegungstyps sind Hangmuren, die in Rheinland-Pfalz häufig im Mittelrheintal auftreten. 2021 ereignete sich in der Westeifel in Rheinland-Pfalz (in der Nähe von Biersdorf) eine solche, durch Starkregen ausgelöste, Hangmure (HAGGE-KUBAT et al. 2022).

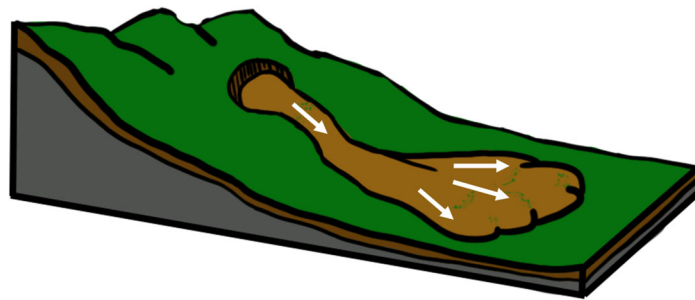


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Fließbewegung. Eigene Darstellung nach HIGHLAND & BOBROWSKY (2008).

2.2.6 Hangverformung

HUNGR et al. (2014) hat als sechste Klasse den Typ Hangverformung eingeführt. In diese Klasse werden unter anderem Deformation von Berghängen, Deformation von Felshängen, Verformung des Bodens an Hängen, Bodenkriechen und Solifluktion eingeordnet. Bei Deformation von Berghängen kommt es dabei zu großräumigen gravitativen Verformung von Hängen, die sich z.B. in Rissen, Gräben und Ausbuchtungen äußert. Diese Verformungen weisen jedoch keine vollständig definierte Bruchfläche auf. Die Bewegungsgeschwindigkeiten sind dabei extrem langsam oder auch gar nicht messbar.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Rutschungstypen und ihre Bewegungsart nach HUNGR et al (2014) aufgelistet.

Rutschungsprozesse

Tabelle 1: Rutschungsklassifikation nach Hungr et al (2014). Für eine genaue Beschreibung aller aufgeführten Rutschungstypen siehe Hungr et al. (2014). Die meisten der englischsprachigen Begriffe konnten sinnvoll übersetzt werden, bei einigen Rutschungstypen war das jedoch nicht der Fall, hier wurde nur der englische Begriff in die Tabelle übernommen.

Bewegungsart	Material	
	Gestein	Boden
Fallen	Steinschlag/Eisschlag (<i>Rock/ice fall</i>)	Geröll/Schutt/Siltfall (<i>boulder/debris/silt fall</i>)
Kippen	Felsblocksturz (<i>rock block topple</i>)	Kies/Sand/Schluffsturz (<i>gravel/sand/silt topple</i>)
	Felsflexursturz (<i>rock flexural topple</i>)	
Gleiten	Felsrotationsrutschung (<i>rock rotational slide</i>)	Ton/Schluff-Rotationsrutschung (<i>clay/silt rotational slide</i>)
	Felstranslationsrutschung (<i>rock planar slide</i>)	Lehm/Schluff-Translationsrutschung (<i>clay/silt planar slide</i>)
	Felskeilrutschung (<i>rock wedge slide</i>)	Kies/Sand/Schuttrutschung (<i>gravel/sand/debris slide</i>)
	Felsverbundrutschung (<i>rock compound slide</i>)	Ton/Schluffverbundrutschung (<i>clay/silt compound slide</i>)
Driften	(rock slope spread)	(sand/silt liquefaction spread)
		(Sensitive clay spread)
Fließen	Stein/Eislawine (<i>rock/ice avalanche</i>)	Trockener Sand/ Schluff/Schuttstrom (<i>sand/silt/debris dry flow</i>)
		(Sand/silt/debris flowslide)
		(sensitive clay flowslide)
		Schlamm/Erd/Schuttstrom (<i>mud/earth/debris flow</i>)
		(debris flood)
	Schuttlawine (<i>debris avalanche</i>)	
	Torfstrom (<i>peat flow</i>)	
Hangverformung	Berghangverformung (<i>mountain slope deformation</i>)	Hangbodenverformung (<i>soil slope deformation</i>)
	(rock slope deformation)	(soil creep)
		Solifluktion (<i>solifluction</i>)

2.3 Rutschungsmerkmale

Der Aufbau einer Rutschung ist meist sehr komplex jedoch beim Erkennen und Kartieren von Rutschungen ein essenzieller Bestandteil. Eine grobe Unterteilung erfolgt in ein Abrissgebiet im oberen Teil der Rutschung, eine Bewegungszone im mittleren Bereich und dem sich im unteren Teil befindenden Rutschungsfuß (UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY 1993; PRINZ & STRAUß 2011). Alle diese Bereiche weisen typische Rutschungsmerkmale auf, die allerdings nicht immer bei allen Rutschungen sichtbar sind. Im Folgenden werden die Rutschungsmerkmale aufgelistet, kurz erläutert (Tabelle 2) und durch Abbildung 8 schematisch dargestellt.

Tabelle 2: Beschreibung der Rutschungsmerkmale nach UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993) und PRINZ & STRAUß (2011).

Rutschungsmerkmale	Beschreibung
Im Abrissgebiet:	
Krone (1)	Nur gering oder gar nicht verlagertes Bereich unmittelbar oberhalb des Hauptabrisses (2).
Hauptabriss (2)	Hangabwärts gerichtete, steil einfallende Fläche auf dem nicht bewegten Material am oberen Rand der Rutschung. Ist der deutlich sichtbare obere Bereich der Gleitfläche (10).
Top (3)	Höchster Punkt zwischen verlagertem Material (13) und Hauptabriss (2).
Kopf (4)	Oberer Rand der Rutschung entlang des Kontaktes zwischen Rutschmasse (13) und Hauptabriss (2).
Im der mittleren Bewegungszone:	
Sekundärabriss (5)	Steil einfallende Flächen die durch Bewegungen innerhalb der Rutschmasse entstanden.
Hauptrutschkörper (6)	Teil des Materials über der Gleitfläche (10) zwischen Gleitflächenfront (11) und Hauptabriss (2).
Gleitfläche (10)	Fläche, die die untere Begrenzung des verlagerten Materials (13) unterhalb der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) bildet.

Gleitflächenfront (11)	Grenzlinie zwischen dem unteren Teil der Gleitfläche (10) und der ursprünglichen Geländeoberfläche (20).
Flanke (19)	In situ-liegendes Material das unmittelbar an die seitlichen Abrisse anschließt.
Verlagertes Material (13)	Von der Rutschung verlagerte Masse.
Sackungszone (14)	Bereich in der das verlagerte Material tiefer liegt als die ursprüngliche Geländeoberfläche (20).
Sackungsmasse (17)	Verlagertes Material das in der Sackungszone (14) liegt.
Sackungsraum (16)	Volumen, das vom Hauptabriss (2), der Sackungsmasse (17) und der Geländeoberfläche begrenzt wird.
Akkumulationszone (15)	Bereich der Rutschung, in dem das bewegte Material über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
Akkumulation (18):	Das Volumen des verlagerten Materials (13), das über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
Im Fußbereich:	
Fuß (7)	Unterer Teil der Rutschmasse, der über die Gleitfläche hinausreicht (11), auch als Rutschungszunge bezeichnet.
Überschiebungsfläche (12)	Teil der ursprünglichen Geländeoberfläche, die vom Fuß der Rutschung überlagert wird.
Fußspitze (8)	Teil der Front (9), der am weitesten vom Top (3) der Rutschung entfernt ist.
Front (9)	Vordere, meist gekrümmte Begrenzung des verlagerten Materials der Rutschung.

Diese allgemeinen Begriffe finden bei den verschiedenen Arten von Rutschungen teilweise in abgewandelter Form Anwendung, reichen aber grundlegend zur Beschreibung von Rutschungserscheinungen aus.

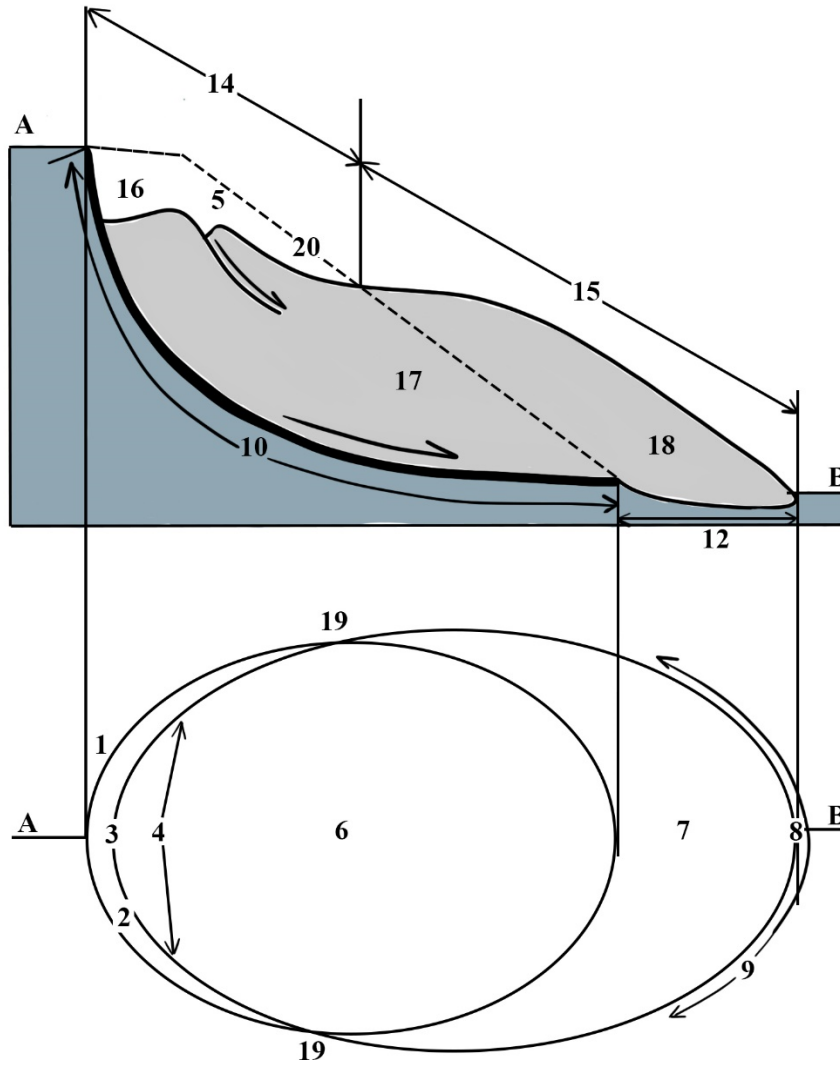


Abbildung 8: Die Schematische Darstellung der Rutschungsmerkmale nach UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993).

2.4 Rutschungsaktivität und Alter

PRINZ & STRAUß (2011) unterteilen Massenbewegungen anhand ihres Alters in vier Kategorien: fossile Rutschungen, alte Rutschungen, rezente und aktive Rutschungen. Aktive Rutschungen sind solche, die sich entweder in Bewegung befinden oder in der Schwebe sind. Der letztere Begriff bedeutet, dass sie nicht aktiv in Bewegung sind, sich aber innerhalb des letzten Zyklus der Jahreszeiten bewegt haben. Bei diesen Rutschungen sind morphologische Merkmale, wie z.B. Abrisskanten und Wulst noch gut zu erkennen. Sie wurden nicht wesentlich durch oberflächliche Verwitterungs- und Erosionsprozesse verändert. Massenbewegungen die unter anderen klimatischen und morphologischen Bedingungen, z.B. im Pleistozän und früher, aufgetretene sind, werden als fossile Rutschungen bezeichnet. Sie sind heute im Gelände kaum noch zu erkennen. Alte Rutschungen sind in der frühen Nacheiszeit aufgetreten und heute noch mehr oder weniger deutlich im Gelände zu erkennen. Rutschungen, die unter den gegenwärtigen klimatischen und morphologischen Verhältnissen aufgetreten sind, werden als rezente Rutschungen bezeichnet (PRINZ & STRAUß 2011).

Nach UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (1993) können Rutschungen acht Aktivitätszuständen aufweisen:

- (1) Sich gegenwärtig in Bewegung befindende Rutschungen werden als **aktiv** bezeichnet.
- (2) Rutschungen die zurzeit nicht aktiv (1) sind, sich aber innerhalb der letzten 12 Monate bewegt haben, sind **blockierte** Rutschungen.
- (3) **Inaktive** Rutschungen haben sich in den letzten 12 Monaten nicht bewegt. Sie können durch verschiedene Zustände (5-8) genauer charakterisiert werden.
- (4) Aktive (1) Rutschungen, die vorher inaktiv (3) waren werden als **reaktiviert** bezeichnet.
- (5) **Latente** Rutschungen sind inaktive (3) Rutschungen, die durch ursprüngliche auslösende Faktoren beeinflusst werden.
- (6) Inaktive (3) Rutschungen, die nicht mehr von den ursprünglichen auslösenden Faktoren beeinflusst werden, werden als **abgeschlossene** Rutschungen bezeichnet.
- (7) **Stabilisierte** Rutschungen sind inaktive (3) Rutschungen, deren auslösende Faktoren durch Sanierungen nicht mehr wirksam sind.
- (8) Inaktive (3) Rutschungen, die sich unter unterschiedlichen klimatischen und geomorphologischen Bedingungen als heute entwickelt haben, werden als **fossil** bezeichnet.

2.5 Rutschungsursachen

Rutschungen sind eng mit den landschaftlichen, materiellen, strukturellen, hydrologischen, klimatischen und vegetativen Bedingungen verbunden, unter denen sie auftreten, und stellen einen geomorphologischen Prozess dar. Durch eine sorgfältige Untersuchung dieser Beziehungen können Muster und Kriterien identifiziert werden, die stabile von instabilen Bedingungen unterscheiden können. (GLADE & COZIER 2005). Die Stabilität eines Hangs kann durch mehrere direkte oder indirekte Faktoren beeinflusst werden. In jedem Hang gibt es Kräfte, die eine Abwärtsbewegung begünstigen, und entgegengesetzte Kräfte, die sich der Bewegung widersetzen. Eine Veränderung eines oder einer Kombination dieser Faktoren kann den Gleichgewichtszustand eines Hangs verändern, seine Stabilität beeinträchtigen und so zum Versagen des Hangs führen. Diese Veränderung kann durch natürliche Prozesse aber auch anthropogene Einflüsse zum Versagen an Hängen führen (Davies & Rosser 2015). VARNES (1978) wies darauf hin, dass es eine Reihe äußerer und innerer Faktoren gibt, die entweder zu einer Verringerung der Scherfestigkeit oder zu einer Erhöhung der Scherspannungen führen können. Die Art der Massenbewegungen wird von den Faktoren:

- Morphologie (z.B.: Höhe, Neigung, Form)
- Geologie (z.B.: Gestein, Lagerung, Trennflächen, Tektonik, Erdbeben)
- Hydrogeologie (z.B.: Einzugsgebiet, Wasserwegsamkeit, Grundwasserstand)
- Klima (z.B.: Niederschlag, Temperatur, Exposition)
- Vegetation
- Zeit

gesteuert (Krauter 2001). Diese Faktoren können beeinflussend (= Einflussfaktoren) oder auslösend (= Auslöser) sein. Einflussfaktoren (engl.: *conditioning factors*) können als Faktoren betrachtet werden, die den Hang anfällig für ein Versagen machen, die den Hang dazu prädisponieren, instabil zu werden. Auslösende Faktoren (engl.: *trigger factors*) sind das einzelne Ereignis, das schließlich die Rutschung auslöst. Rutschungen werden immer durch das Zusammenwirken mehrerer dieser beeinflussenden Faktoren hervorgerufen. Initiiert werden können sie jedoch von einem einzelnen Auslöser, z.B. durch starke Niederschläge. Die Hauptfaktoren für das Auftreten von Rutschungen sind im Grunde stets die Geologie und die Morphologie, wobei das Wasser häufig die Rolle des auslösenden Faktors übernimmt (KRAUTER 2001; PRINZ & STRAUß 2011).

Unter der Annahme, dass die Kombination von Faktoren, die in der Vergangenheit zu Rutschungen geführt hat, auch in Zukunft zu diesen führt, bietet die Analyse bereits geschehener Rutschungen

Informationen, um nicht nur den Grad der künftigen Stabilität, sondern auch das Verhalten von Rutschungen zu beurteilen (GLADE & COZIER 2005).

2.5.1 Hangstabilität

Die Hangstabilität und die sich daraus ergebende Hanginstabilität sind definiert als die Neigung eines Hangs, morphologisch und strukturell störende Rutschungsprozesse zu durchlaufen. In jedem Hang gibt es Spannungen, die eine Abwärtsbewegung des Materials begünstigen (Scherspannung τ) und Gegenspannungen, die der Bewegung entgegenwirken (Scherfestigkeit τ_f). Bei einem stabilen Hang übersteigt die Scherfestigkeit die Scherspannung, während bei Hängen, die sich in Bewegung befinden, die Scherfestigkeit gerade durch die Scherspannung ausgeglichen wird (GLADE & COZIER 2005). Rutschungen sind also stets auf Störungen des Hanggleichgewichts zurückzuführen. Dabei kommt es zu Veränderungen des Gleichgewichts zwischen den rückhaltenden und den angreifenden Kräften (siehe Abbildung 9). Infolge des zerstörerischen Potenzials von Rutschungen versuchen Wissenschaftler seit langem, die Bedingungen eines Hangs zu ermitteln, die zu Rutschungen führen.

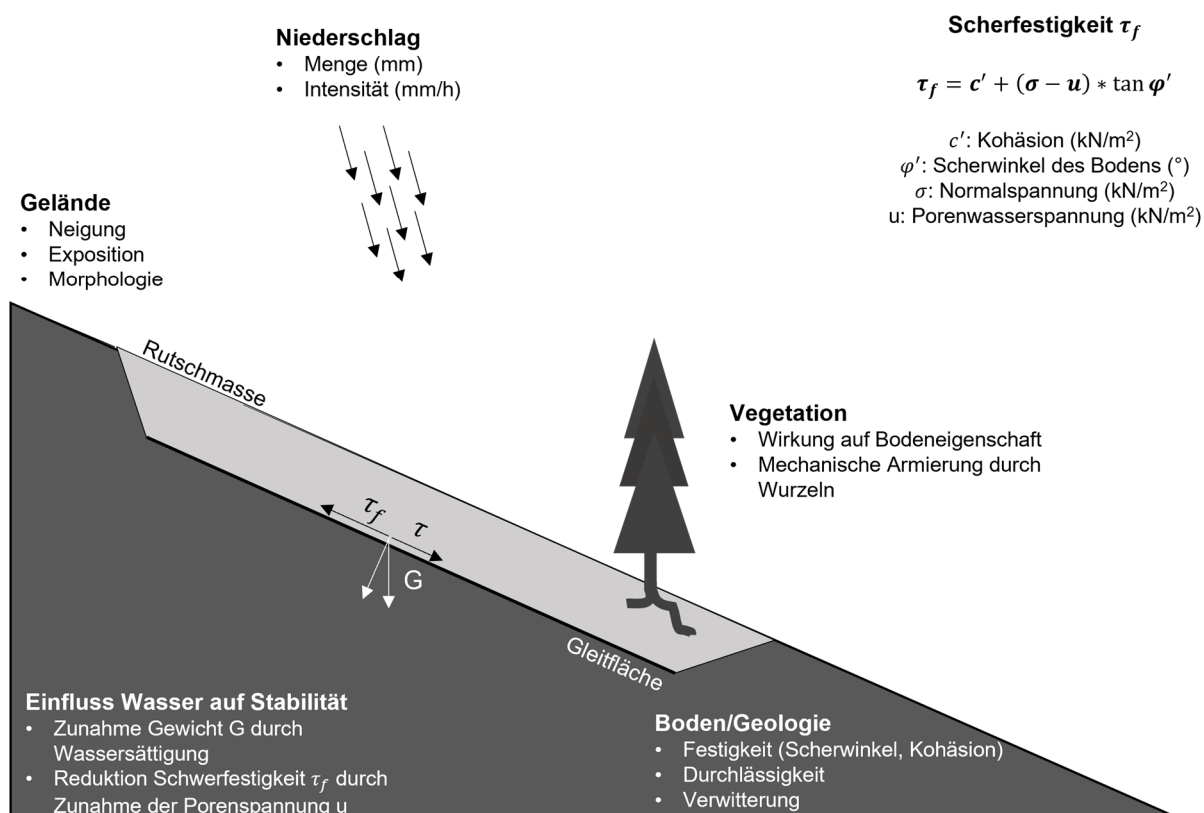


Abbildung 9: Abbildung der wirkenden Kräfte bei Rutschungen auf einer Gleitfläche sowie der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Hangstabilität (modifiziert nach RICKLI 2001).

Die Stabilität eines Hanges kann in drei Zustände unterteilt werden: stabil, geringfügig stabil und aktiv instabil. Diese drei Zustände (siehe Abbildung 10) basieren auf der Fähigkeit dynamischer äußerer Kräfte, ein Versagen hervorzurufen. Der erste ist der "stabile Zustand", definiert als Hänge mit einer Stabilitätsspanne, die ausreichend hoch ist, um allen natürlichen dynamischen destabilisierenden Kräften standzuhalten, die unter den derzeitigen Umwelt- und geomorphologischen Bedingungen auftreten können. Der Zweite ist der "geringfügig stabile Zustand", der durch statische Hänge repräsentiert wird, die derzeit nicht versagen, aber jederzeit versagen können, wenn die dynamischen externen Kräfte eine bestimmte Schwelle überschreiten. Ist ein Hang in einem aktiv instabilen Zustand, ist die Stabilitätsspanne (nahe) Null und der Hang befindet sich in Bewegung (GLADE & COZIER 2005).

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

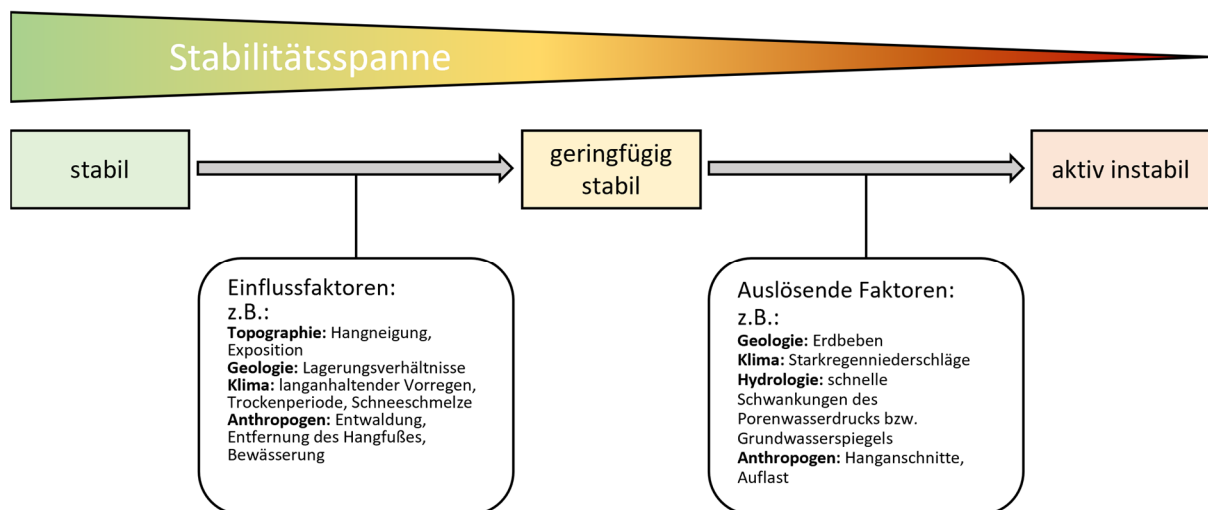


Abbildung 10: Stabilitätszustände eines Hanges mit Beispielen von beeinflussenden und auslösenden Faktoren (modifiziert nach GLADE & COZIER 2005).

Einige der wichtigsten Faktoren, die die Hangstabilität beeinflussen, werden im Folgenden kurz beschrieben. Für eine ausführlichere Auflistung werden jedoch die Werke von VARNES (1978) und PRINZ & STRAUB (2011) empfohlen.

2.5.2 Morphologische Faktoren

Die Morphologie wird durch eine Vielzahl von endogenen und exogenen Prozessen, wie z.B. Erosion, Denudation und Akkumulation geprägt und verändert (BECKER 2005). Zu den morphologischen Faktoren, die die Hangstabilität beeinflussen, gehören unter anderem die Hangneigung, Exposition und Höhe.

Die Hangneigung ist eine der Hauptfaktoren bei der Entstehung von Rutschungen und darüber hinaus der einzige, über den einige Massenbewegungstypen auch ausgeschlossen werden können. Bewegungen vom Prozesstypen "Gleiten" können ausgeschlossen werden, wenn der Neigungswinkel bei 0° liegt. Die Hangneigung ist eine Komponente der Hangabtriebskraft, sowie der Scherspannung, die das Hanggleichgewicht beeinflussen. Bei einem stabilen Hang herrscht, wie im Unterkapitel vorher schon beschrieben, ein Gleichgewicht zwischen "rückhaltenden" und "treibenden" Kräften, was im einfachsten Fall bedeutet, dass der Reibungswinkel (rückhaltende Kraft) des betreffenden Materials größer oder gleich der Hangneigung (treibende Kraft) ist (BECKER 2005). Je größer also die Hangneigung, umso instabiler der Hang und umso wahrscheinlicher ist die Entstehung einer Rutschung. Deshalb wurde die Hangneigung neben der Geologie als wichtigster Parameter in die Berechnung der Rutschungsanfälligkeit integriert.

Der Einfluss der Exposition auf Rutschungen ist nur indirekt über andere Faktoren festzustellen. Die expositionsabhängigen Parameter wie Windrichtung, Niederschlagsmuster, Sonneneinstrahlung, Ausrichtung von Diskontinuitäten, hydrologische Prozesse, Evapotranspiration, Vegetation und Wurzelwachstum sind alle Faktoren, die direkte und indirekte Auswirkungen auf die Hangstabilität und somit auf mögliche Rutschungen haben (NHU et al. 2020). Die Expositionsabhängigkeit von Rutschungen scheint weitgehend auf pleistozäne Rutschungen beschränkt zu sein. Historische Rutschungen zeigen kaum noch eine Tendenz für Süd- und Südwesthänge. Einzige Ausnahmen sind sehr tonige und unbewaldete Böden, bei denen starke Sonneneinstrahlung zu mehreren Zentimeter breiten Trockenrissen führen kann. Bei nachfolgenden Starkniederschlägen kann Wasser tiefer in den Boden eindringen, was die Scherfestigkeit verringert (PRINZ & STRAUß 2011). Dies ist häufig im Mainzer Becken der Fall.

Wie die Hangexposition ist auch der Einfluss der Höhenlage auf den Mechanismus der Rutschung indirekt. Es ist offensichtlich, dass die Höhenlage nicht direkt die Rutschaktivität beeinflussen kann. Mit der Höhenlage verändern sich jedoch gewisse Eigenschaften, die einen Einfluss auf die Rutschaktivität ausüben können. Im Allgemeinen werden Niederschlag, Verwitterungsprozess und Erosion durch die Höhenlage beeinflusst (DAI & LEE 2002). Die starke statistische Beziehung zwischen

der Höhe und dem Auftreten von Rutschungen wurde außerdem in mehreren Studien erwähnt (z.B.: DOU et al. 2015; MALKA 2021). Es ist daher sinnvoll, die Höhe als einen der beeinflussenden Faktoren zu untersuchen.

2.5.3 Geologische Faktoren

Die geologischen Bedingungen haben einen großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, die Art und die Mechanismen von Rutschungen. Frühere Studien haben gezeigt, dass die geologischen und strukturellen Gegebenheiten der Hänge eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Rutschungen spielen (GRELLE et al. 2011; SANTANGELO et al. 2015). Entscheidend dabei sind die Gesteinsarten, wie Locker-, Halbfest- oder Festgesteine und die Raumlage und Ausbildung von Diskontinuitäten im Gebirge (KRAUTER 2001). In dieser Arbeit sind vor allem die Petrographie und die Lagerungsverhältnisse als geologische Faktoren von entscheidender Bedeutung.

Materialien wie sedimentäre Tone, Schiefer und Gesteine aus vulkanischem Tuff, die zu tonigem Material verwittern können und organische Materialien und Gesteine, die überwiegend aus weichen Mineralien wie Glimmer, Schiefer, Talk oder Serpentin bestehen sind besonders anfällig für Änderungen des Wassergehalts oder andere Veränderungen (VARNES 1978). Bei Tonen und Tonsteinen mit quellfähigen Tonmineralen führt die Zugabe von Wasser zur Quellung, was zu einer Lockerung des Gefüges und zur Plastifizierung führt. Mit zunehmender Wassersättigung werden bindige Lockergesteine und veränderlich feste Ton-Schluff-Gesteine weicher in ihrer Konsistenz und ihre Scherparameter nehmen ab (Krauter 2001). Sehr rutschungsanfällige Schichten sind aufgrund der niedrigen Scherparameter daher mächtige tonig-schluffige Serien, wobei die Scherfestigkeit stark von der Tonmineralogie abhängt. Quellfähige Tonminerale führen insbesondere bei Wasserzutritt zu einer verminderten Scherfestigkeit. Sie kann außerdem durch fossile oder rezente Verwitterungs- bzw. Entlastungsvorgänge noch weiter abgemindert werden. Weitere Beispiele für rutschungsanfällige Schichten sind z.B. auch Bändertone, die z.T. hohe Smektitgehalte aufweisen und somit niedrige Scherfestigkeiten haben (PRINZ & STRAUß 2011).

Besonders Wechsellagerungen von Tonen und Feinsanden, aber auch Mergeltone mit Kalkmergelbänken des Tertiärs sind rutschungsanfällig. Auch hier wirken wasserführender Lagen auf toniger Unterlage, wobei die Lockergesteine des Tertiärs besonders bei dünnbankiger und bändertonartiger Wechsellagerung entsprechend reagieren. Außerdem enthalten zahlreiche dieser Tone recht hohe Anteile quellfähiger Tonminerale. Besonders rutschungsanfällig sind außerdem mächtige wasserwegsame Kalksteine auf toniger Unterlage, wie z.B. die miozänen Kalksteine über oligozänen Tonen (PRINZ & STRAUß 2011).

Die Ausbildung von Trennflächen ist abhängig von den spezifischen Gesteinseigenschaften, also der Petrographie. Schicht-, Schieferungs- und Klufflächen bilden bevorzugt Gleitflächen aus, auf denen Bewegungen stattfinden können (KRAUTER 1995). Besonders die Schicht- und Schieferungsflächen, aber auch Großklüfte und Verwerfungen bzw. Störungszonen und sonstige geologische Grenzflächen bilden potenzielle Gleitflächen bzw. Abrissflächen aus (PRINZ & STRAUß 2011). Auch die Lagerungsverhältnisse geologischer Einheiten spielen eine Rolle bei der Entstehung von Rutschungen. Besonders bei Hangbewegungen, die eine Gleitfläche ausbilden spielt das Einfallen der Schichten eine übergeordnete Rolle. Aufgrund des hangparallelen Einfallens der Gesteinsschichten können sich aus diesen leichter Gleitflächen bilden oder sich ganze Gesteinspakete leichter lösen und hangabwärts gleiten. Der Zusammenhang zwischen hangparallelen Lagerungsverhältnissen und dem Auftreten von Rutschungen wurde in zahlreichen Studien festgestellt (GÜNTHER 2003; SANTANGELO et al. 2015; WERNER et al. 2021)

2.5.4 Hydrogeologische Faktoren

Das auslösende Moment von Massenbewegungen ist meist das Wasser in Form von Niederschlägen, Schmelzwasser, Bergwasser und steuert die Geschwindigkeit der Bewegungen (Krauter 2001). Zu den hydrologischen Einflussfaktoren zählen Veränderungen des Grundwasserspiegels, Niederschläge, spezielle Starkregenereignisse, Nassstellen, Quellen und Wasserverluste aus Leitungen, Kanälen, Drainagen und Behältern. Gerade zwischen Niederschlägen und Rutschungshäufigkeit lässt sich ein direkter Zusammenhang erkennen, da extreme Starkregen als Auslöser von Rutschungen gelten. Auch die Wirkung des Wassers im Boden kann sehr vielfältig sein und zu Massenbewegungen führen. Durch die Überschreitung der Infiltrationskapazität nach Starkregen oder längeren Regenperioden ist ein Oberflächenabfluss möglich. Dieser Abfluss kann dann zum Beispiel in einer Abflussrinne lockeres Material mobilisieren und so zu Schuttströmen führen. Ein gemischtkörniger bindiger Hangschutt an übersteilten Hängen kann allein durch den Lastzuwachs infolge von Wassersättigung und durch den verstärkten Strömungsdruck zu Murgängen führen. Wasserwegsame Schichtpakete über stauenden Gesteinen gelten auch hier wieder als besonders anfällig. Besonders anfällig für Starkniederschläge sind flache Rutschungen (PRINZ & STRAUß 2011).

Niederschläge, Hagel oder Schnee können außerdem als Auflast wirken, was zu einem Anstieg der Scherspannung und somit zu einer Störung im Hanggleichgewicht führen kann (VARNES 1978). Ein Grundwasseranstieg hingegen kann das Hanggleichgewicht durch zum Beispiel das Ausbilden von Gleitflächen beeinflussen und ebenfalls zu einem Hangabbriss führen. Wenn die Wassersättigung in

bindigen Böden zunimmt, dann verändert sich auch deren Konsistenz und sie werden weicher. Diese Veränderung führt dazu, dass die Scherfestigkeit der Böden abnimmt, insbesondere die Kohäsion. (PRINZ & STRAUß 2011). In feinkörnigen Böden kann ein erhöhter Porenwasserdruck oder Strömungsdruck zu einer Verstärkung der Scherspannung führen. Ein dünner Wasserfilm (Schmiermittel) auf Gleitflächen reicht oft, um die Scherfestigkeit zu reduzieren (KRAUTER 2001).

2.5.5 Klima, Vegetation und menschliche Einflüsse

Der Einfluss des Klimas macht sich vor allem bei der Verwitterung von Gesteinen bemerkbar. Schwankungen in Temperatur und Feuchtigkeit führen zu Spannungumlagerungen, die im Lockergestein eine Auflockerung des Korngefüges und Rissbildung bewirken können. Im Festgestein erhöhen diese Schwankungen vor allem den Durchlüftungsgrad, wodurch die Scherfestigkeit des Gesteins herabgesetzt wird. Schrumpfrisse, die sich durch langanhaltende Trockenheit in bindigen Schichten bilden führen bei Niederschlägen in den Sommermonaten zu einer Bewässerung potentieller Gleitflächen, wodurch Rutschungen ausgelöst werden können. Das führte in der Vergangenheit dazu, dass die Häufigkeit von Rutschungen in Rheinhessen im Monat Juli in Verbindung mit auftretenden Gewitterregen anstieg (KRAUTER 2001).

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Vegetation, die sich durch die Beeinflussung des Wasserhaushaltes auf Hangbewegungen auswirkt. Während der Vegetationsperiode erfolgt eine verzögerte Durchdringung des Bodens durch Niederschläge und es kommt zu einem erheblichen Entzug von Wasser aus dem Boden durch Pflanzen. Der Wurzeldruck der Pflanzen kann zur Lockerung des Gesteins führen, was oft als Ursache für Steinschläge und Felsstürze in Felshängen angesehen wird. Allerdings können die Pflanzenwurzeln eine stabilisierende Wirkung auf Hänge haben (KRAUTER 2001). Das Abholzen oder Waldsterben eines Hanges kann sowohl den Wasserhaushalt verändern als auch Bodenerosion auslösen, wodurch die Stabilität eines Hanges abgemindert werden kann. Auch Überweidung (Viehtritterosion) führt häufig zu einer Zerstörung der Vegetation und setzt so den Hang den Klimaeinflüssen aus (PRINZ & STRAUß 2011).

Anthropogene Eingriffe wie das Aufstauen von Oberflächen- und Grundwasser durch Rückhalte- oder Stauanlagen und Wasserverluste aus defekten oder gebrochenen Kanälen/Leitungen haben einen Einfluss auf die Hangstabilität (PRINZ & STRAUß 2011). Auch kann der Wasserhaushalt eines Hanges durch menschliche Eingriffe wie Entwässerung oder das Umleiten von Wasser in einen Hang verändert werden. Zu einer Erhöhung der Auflast und somit der Scherspannung kommt es außerdem aufgrund

von Aufschüttungen, Lagerhalden von Gestein und Erz, Müllhalden und Bau von Infrastrukturen (VARNES 1978).

2.6 Exkurs: Anfälligkeit oder Gefahr

In der Literatur herrscht oft Verwirrung zwischen den Begriffen "Rutschungsanfälligkeit" und "Rutschungsgefahr" und werden deshalb häufig als Synonyme verwendet, obwohl sie zwei unterschiedliche Bedingungen ausdrücken (REICHENBACH et al. 2018). Deshalb werden in diesem Kapitel die Begriffe Gefahr und Anfälligkeit kurz erläutert und definiert.

Rutschungsanfälligkeit

In der Mathematik ist die Rutschungsanfälligkeit (auch: Rutschungssuszeptibilität) die Wahrscheinlichkeit des räumlichen Auftretens von Rutschungen bei bestimmten geoökologischen Bedingungen. Unter der Annahme, dass Rutschungen in der Zukunft aufgrund ähnlicher Bedingungen auftreten werden, wie in der Vergangenheit, können Anfälligkeitsbewertungen zur Vorhersage der Lage zukünftiger Rutschungen verwendet werden. Die Rutschungssuszeptibilität sagt weder voraus, wann oder wie häufig eine Rutschung auftreten wird. Außerdem kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie groß und zerstörerisch das Ereignis sein wird (GUZZETTI 2006; FELL et al. 2008). Sie gibt lediglich an wie prädestiniert ein Gebiet für das Auftreten von Rutschungen ist. Es handelt sich um das Ausmaß, in dem ein Gelände von Hangbewegungen betroffen sein kann. Das heißt die Rutschungssuszeptibilität kann einschätzen, wo Rutschungen wahrscheinlich auftreten werden (DEVKOTA et al. 2013).

Rutschungsgefahr

Die Rutschungsgefahr gibt an, dass eine Hangbewegung einer bestimmten Größenordnung, in eine bestimmten Zeitraum und in einem bestimmten Bereich auftritt. Zusätzlich zur Vorhersage, wo ein Hangbewegung auftritt, kann die Rutschungsgefahr voraussagen, wann (wie häufig) es zu einem Ereignis kommen kann und wie groß es sein wird (REICHENBACH et al. 2018). Die Gefahr von Rutschungen ist somit komplizierter einzuschätzen als die Rutschungsanfälligkeit, da die Anfälligkeit nur eine (räumliche) Komponente der Gefahr darstellt (GUZZETTI 2006).

3 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete für die Arbeit wurden aufgrund ihrer Bedeutung für den Umfang des MABEIS-Projekts und der Qualität, Vollständigkeit oder Dichte der verfügbaren Daten ausgewählt. Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsgebiete, in denen die Berechnungen durchgeführt wurden, beschrieben. Für jedes Gebiet werden zunächst allgemeine Informationen über Geographie und Geologie bereitgestellt. Außerdem wurde am Ende jedes Untersuchungsgebiets eine beispielhafte Rutschung aus dem jeweiligen Untersuchungsgebiet genauer dargestellt und beschrieben.

3.1 Untersuchungsgebiet 1: Saar-Nahe-Gebiet

Als eines der Untersuchungsgebiete wurde das Saar-Nahe-Gebiet ausgewählt. Grundlage hierfür waren die geologischen Bedingungen und die Anzahl an Rutschungen. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das Gebiet entweder als Saar-Nahe-Gebiet oder als Untersuchungsgebiet 1 (U1) bezeichnet.

3.1.1 Geographischer Überblick U1

Das Untersuchungsgebiet 1 hat eine Länge von etwa 60 km und eine Breite von etwa 40 km. Es entspricht damit einer Gesamtfläche von etwa 2044 km². Das Gebiet erstreckt sich von der Grenze des Saarlands im Südwesten, Kaiserslautern und dem Pfälzerwald im Süden bis zum Hunsrück im Nordosten. U1 umfasst neben kleinen Teilen der mittleren Saar im Westen vor allem das Einzugsgebiet der Nahe bis Bad Kreuznach (siehe Abbildung 11). Geologisch deckt das Gebiet das gesamte, in Rheinland-Pfalz aufgeschlossene Saar-Nahe-Becken ab.

Das Untersuchungsgebiet wird naturräumlich als Saar-Nahe-Bergland bezeichnet und lässt sich in das Nordpfälzer Bergland und das Obere Nahe-Bergland gliedern. Das Berg- und Hügelland des Nordpfälzer Berglandes wird von markanten Bergkuppen und Höhenrücken aus vulkanischem Gestein geprägt, darunter der Donnersberg als höchster Berg der Pfalz sowie die Potzberg-Königsberg-Gruppe. Das Obere Nahe-Bergland setzt sich vom Nordpfälzer Bergland durch eine deutliche Reliefstufe ab. Die örtlichen Vielfalt von Relief und Boden spiegelt sich im Wechsel von Ackerbau-landschaft, Waldgebieten und Grünland wider (Boy 2005). Das Obere Nahe-Bergland bildet den Nordrand der Landschaft und wird vom Nahetal als Leitstruktur durchzogen. Das Nordpfälzer-Bergland wird von der Glan und der Alsenz durchzogen (siehe Abbildung 11)

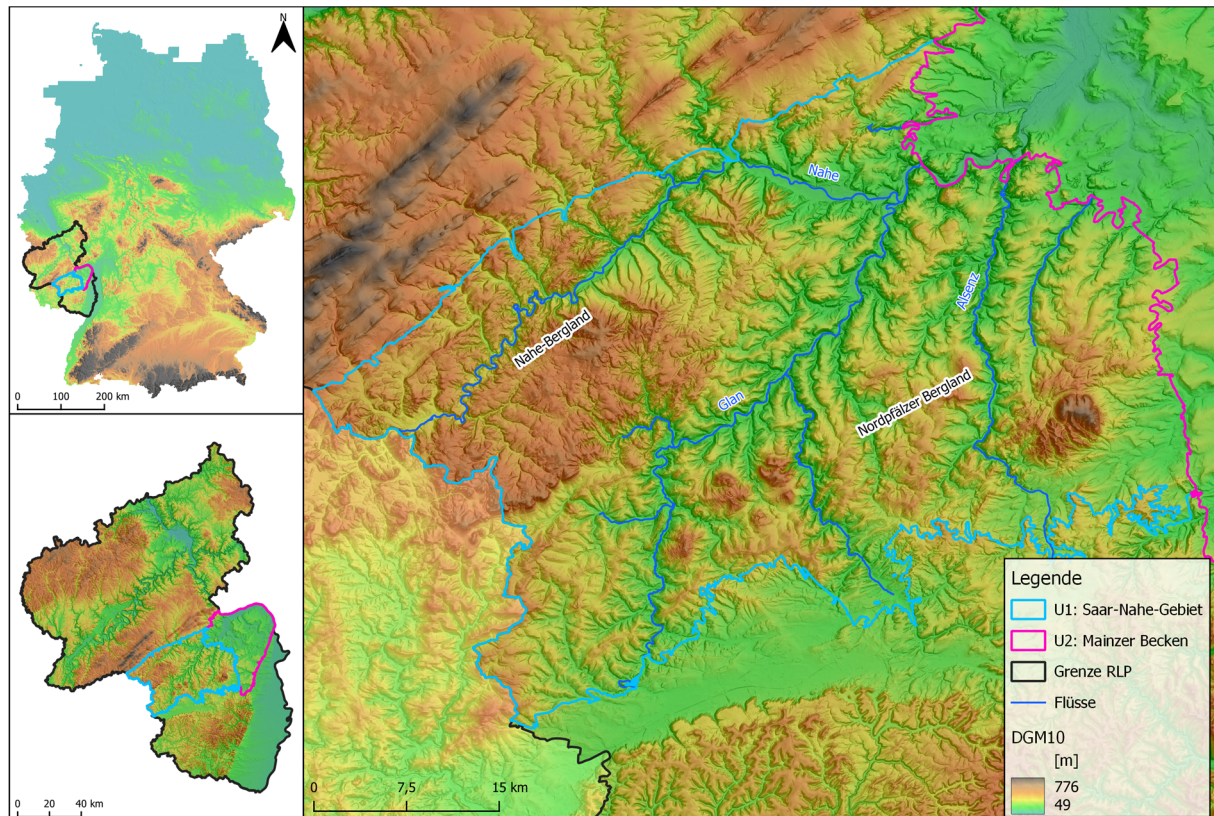


Abbildung 11: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiet 1: Zeigt die Lage des Untersuchungsgebietes in Deutschland sowie die Lage des Untersuchungsgebietes in Rheinland-Pfalz.

3.1.2 Geologischer Überblick U1

Das Saar-Nahe-Becken entstand als intramontane Senkungszone der Varisziden und ist eines der größten Permokarbon-Becken in der inneren Zone der Varisziden. Das Becken entstand beim Zusammentreffen einer Dehnungsstörung und der dextralen Seitenverschiebung der Hunsrück-Südrand-Störung. Das Becken wird im Norden durch die Hunsrück-Südrand-Störung und im Süden durch die Pfälzer Mulde und Zweibrücker Mulde begrenzt (Abbildung 12) (HENK 1993). Der heute an der Oberfläche aufgeschlossene Teil des Beckens umfasst in etwa ein Gebiet von 40 x 100 Kilometer (SCHÄFER 1989; BOY 2005). Unter einer mesozoischen Überdeckung hat das Becken eine Ausdehnung von insgesamt 300 x 100 km (SCHÄFER 1989). Die Beckenfüllung besteht ausschließlich aus Klastika und Vulkaniten (BECKER & SCHÄFER 2021). Im Zentralbereich enthält das Becken bis etwa 8 km mächtige permokarbone Ablagerungen und Vulkanite. Diese bestehen aus ungefähr 4,5 km mächtigem Oberkarbon und über 3 km mächtigem Rotliegend (BOY 2005). Nach SCHÄFER (1989) kann das Rotliegend in 1,6 km mächtiges Unterrotliegend und 1,8 km Oberrotliegend unterteilt werden.



Abbildung 12: Geologische Übersichtskarte des Saar-Nahe-Beckens (Eigene Darstellung nach SCHÄFER 1989; HENK 1993).

Im Saar-Nahe-Becken ist die permokarbonische Gesteinssäule hauptsächlich lithologisch gegliedert. Die insgesamt 7,5 km mächtige Abfolge umfasst das gesamte Korngrößenspektrum der klastischen Sedimentgesteine. Während lakustrine Kohleflöze ausschließlich im Westfal auftreten, sind Kalke und Dolomitgesteine vorrangig in dünnen Seesedimenten des Unteren Rotliegend vorhanden. Im unteren Teil des Oberen Rotliegend dominieren Melaphyrlaven und rhyolithische Tuffgesteine. Sie sind an verschiedenen Stellen und auf verschiedenen Niveaus in Schichten des Unteren Rotliegend intrudiert (SCHÄFER 1989).

Die permokarbonischen Gesteine sind äußerst variabel und lassen sich aufgrund ihrer Eigenschaften in Formationen von mehreren Dutzenden bis hin zu mehreren hundert Metern Mächtigkeit einteilen. Die oberen Schichten des Rotliegend weisen eine charakteristische rote Sedimentfarbe, einen hohen Anteil an vulkanischen Gesteinen und einen vorwiegend alluvialen Sedimentcharakter auf. Ihre Mächtigkeit beträgt etwa 1,8 km. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich das untere Rotliegend und das Oberkarbon stark von den darüber liegenden Schichten, da sie meist grau sind und sowohl Karbonate als auch Kohle enthalten. Sie sind 1,6 bzw. 4,1 km mächtig und weisen eine große lithologische Variation auf. Um lithostratigraphische Abschnitte einer bestimmten Ebene zuzuordnen,

werden größere Konglomeratschichten als Markerhorizonte verwendet. Im unteren Rotliegend sind diese Schichten zusammen mit einer großen Anzahl von pelitischen Schichten und Karbonathorizonten am häufigsten anzutreffen (SCHÄFER 1989).

Während des Westfals lieferte das Rhenoherynikum im Nordwesten (Rheinische Schiefergebirge) klastische Sedimente in das Becken ab (BOY 2005; BECKER & SCHÄFER 2021). Es handelte sich dabei größtenteils um Grauwacken, die in einem mäandrierend-fluviatilen und deltaischen Milieu abgelagert wurden. In den Gesteinen des Westfals haben sich Pelite und Kohleflöze zwischengeschaltet. Zwischen Beginn des Westfalium und dem frühen Perm wurde die Beckensubsidenz wesentlich durch tektonische Lateralverschiebungen entlang der Hunsrück-Taunus-Südrand-Störung kontrolliert (BECKER & SCHÄFER 2021). In den frühen Entwicklung, vom Oberkarbon bis in das untere Rotliegend, herrschten im Saar-Nahe-Becken fluvio-lakustrine Sedimentationsbedingungen (SCHÄFER 1989; BOY 2005). Während dieser Zeit lag das Saar-Nahe-Becken unmittelbar nördlich des Äquators, was zu warm-feuchten Bedingungen führte. Vor allem die lakustrinen Ablagerungen enthielten einen hohen Anteil an organischen Resten, was dazu führte, dass im Oberkarbon zahlreiche Kohleflöze entstehen konnten (BOY 2005). Mit dem Westfal A (Untere Neunkirchener Schichten) begann die Bildung von Kohle und endete mit dem Mittelwestfal D (Luisenthaler Schichten). Im Namur begann vermutlich die Auffüllung des Saar-Nahe-Beckens, auf dem Unterkarbon mit einem grobkörnigen Basaltkonglomerat (SCHÄFER 1989). Infolge der gegen Ende des Rotliegend einsetzenden großräumigen Hebung des Gebiets wurden diese, sofern jemals vorhanden, vor und während des Oberperms bereits wieder erodiert (BOY 2005). Im Saar-Nahe-Gebiet gibt es eine stratigraphische Lücke (Hiatus) über dem Westfal von etwa 1000 m, welche zum nordöstlichen Rand des Beckens hin größer wird (SCHÄFER 1989).

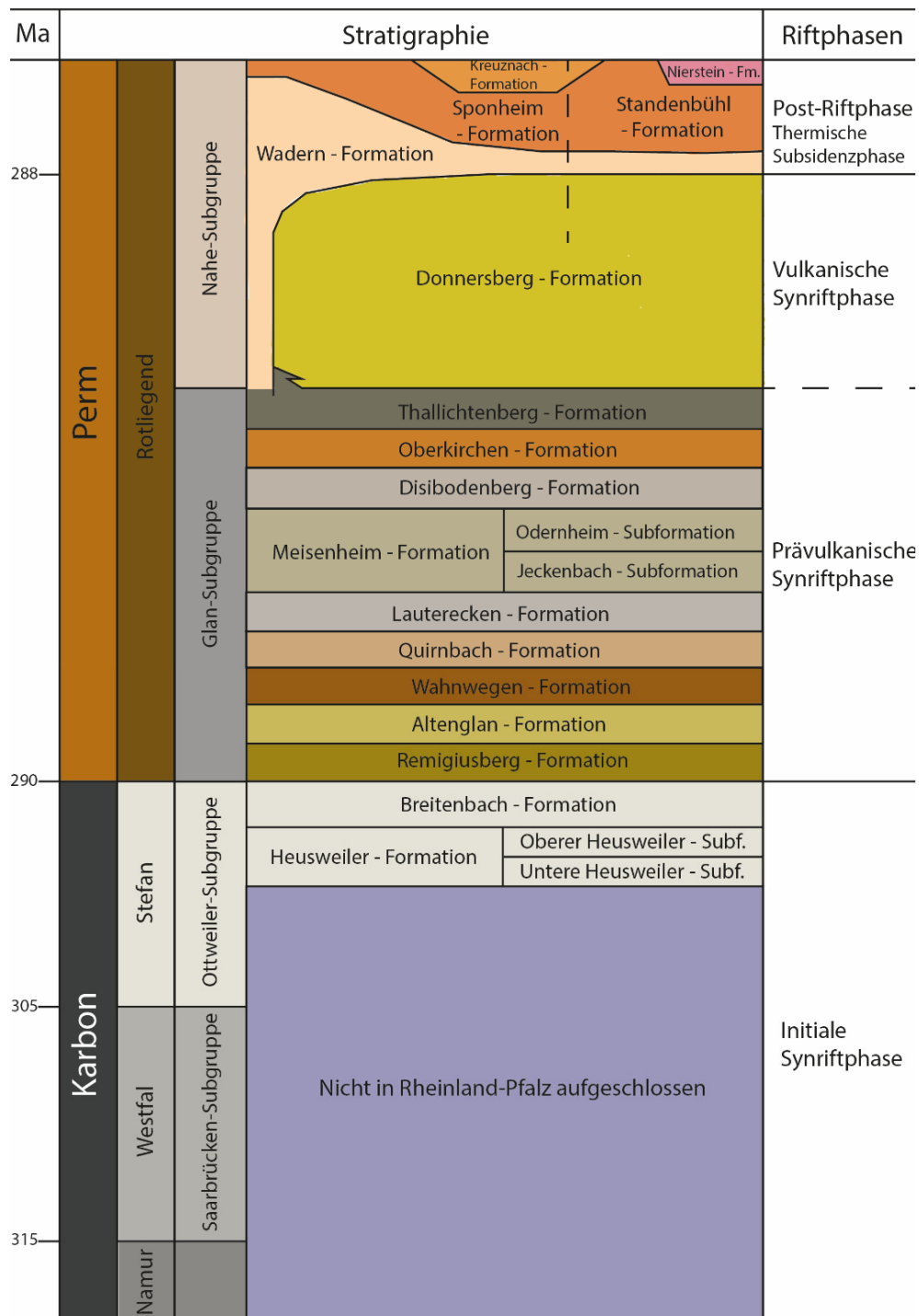


Abbildung 13: Lithostratigraphie des Permokarbons in Rheinland-Pfalz nach BOY (2005).

Über dem erodierten Westfal breitete sich das Holzkonglomerat des Stefaniums aus. Ab dem Stefanium dominieren dann klastische Sedimente aus granitischen Liefergebieten (Boy 2005). Damit begannen auch die Farben der Sedimente und die Korngrößen zu variieren. Die Menge an Kohle hat erheblich reduziert und in Richtung Stefan/Perm-Grenze wurden Konglomerate zahlreich abgelagert. Die Sedimente zwischen den Konglomeratschichten wurden feinkörniger und ihre Farben kräftiger. Zudem wurden die feinkörnigen Sedimente teilweise karbonatisch und es bildeten sich dezimeter- bis

meterdicke Kalkschichten (SCHÄFER 1989). Im frühen und mittleren Stefanium war das Ablagerungsmilieu überwiegend fluviatil und im späten Stefanium bis zum Unterrotliegend dann fluviatil-lakustrin (BECKER & SCHÄFER 2021). Gegen Ende des Unteren Rotliegend entwickelte sich ein völlig anderes Ablagerungsmilieu mit alluvialem Charakter mit grobkörnigen Schwemmfächern, Playas, verflochtenen Flüssen und äolischen Dünen (SCHÄFER 1989). Die zeitweise beckenweiten ausgedehnten Seen wurden durch progradierende Deltas verfüllt. Zum Ende der Glan-Subgruppe herrschten trocken-warme Klimabedingungen mit vorwiegend fluviatilen Ablagerungsbedingungen. Der Beginn des Oberrotliegend wurde durch einen intensiven Vulkanismus mit zum Teil heftigem intrusivem und effusivem Magmatismus gekennzeichnet (SCHÄFER 1989; BECKER & SCHÄFER 2021). Der Vulkanismus im Becken und die zusätzlichen tektonischen Bewegungen führten zu einer Verstärkung des Reliefs. Diese Verhältnisse können in dem starken faziellen Wechsel der Zwischensedimente wieder gefunden werden, welche sich in den Becken und Vertiefungen ablagerten. Sie bestehen aus oft schlecht sortierten, unterschiedlich gerundeten Konglomeraten bis Fanglomeraten wie es beispielsweise in den Wadener Schichten im Bereich der Nahemulde der Fall ist (Falke 1974). Danach folgte die Beckensubsidenz aufgrund von Extension, thermischer Abkühlung und Kompaktion (BECKER & SCHÄFER 2021). Aus der Endphase der permokarbonen Sedimentation im Saar-Nahe-Becken sind heute bis zu 1,5 km mächtige Schwemmfächer und Playa-Sedimente der Stahlbühlen-Formation erhalten, die am NW-Rand des Beckens gebietsweise durch Sandsteine der Kreuznach-Formation vertreten werden (BOY 2005).

Die größten Absenkungsraten und die daraus resultierenden größten Reliefunterschiede im Saar-Nahe-Becken bestanden im nordwestlichen Teil entlang der Hunsrück-Südrand-Störung. Dementsprechend bildete sich dort zeitgleich mit den restlichen Beckensedimenten eine besondere Randfazies mit gebietsweise 14 km Schuttfächersedimenten, die zum überwiegenden Teil aus Komponenten des Rheinischen Schiefergebirges bestehen (BOY 2005).

Die Entwicklung des Beckens kann in drei tektonische Hauptentwicklungsphasen (siehe Abbildung 13) gegliedert werden (HENK 1993; BOY 2005):

1. Initiale (prä-) Riftphase – vor 315 Ma
2. Synriftphase (prävulkanische und vulkanische Synriftphase) – von 315-288 Ma
3. Postriftphase (Thermische Subsidenzphase) – nach 288 Ma

Die Sedimente des Stefan und der Glan-Subgruppe gehören nach dem Gliederungsschema von Boy (2005) in die prävulkanische Synriftphase, während die Sedimente, Pyroklastika sowie Vulkanite und Subvulkanite der Donnersberg-Formation der vulkanischen Synriftphase angehören. Außerdem kann ein Teil der Wadern-Formation in die thermische Subsidenzphase eingestuft werden. Zum Ausdruck kommt die synsedimentäre Zerrung des Saar-Nahe-Beckens durch die vielen vorhandenen Verwerfungen (Boy 2005).

3.1.3 Beschreibung einer beispielhaften Rutschung in U1

Im Saar-Nahe-Gebiet findet eine Vielzahl von Rutschungen in den Ton-, Schluff- und Sandsteinen des Rotliegend statt (Krauter 2001). Eine solche Rutschung befindet sich zentral innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets, nördlich der Stadt Odenbach, in der Nähe des Ortes Lauterecken (Abbildung 14). Sie liegt zum Großteil in einem bewaldeten Gebiet und wird im Folgenden als Odenbach-Rutschung bezeichnet. Zusammen mit einer weiteren Rutschung, die in Kapitel 3.2.3 beschrieben wird, war sie Umfang einer Abschlussarbeit innerhalb des MABEIS-Projektes. Bei dieser wurden im Jahr 2018 GNSS-Vermessungen durchgeführt, um Rutschungsmerkmale im Gelände zu kartieren und zu untersuchen. Es sollte außerdem untersucht werden, ob sich die Rutschung seit der Airborne LIDAR-Befliegung von 2009 in Bewegung befand. Die Rutschung wurde einerseits ausgewählt, weil sie im DGM eindeutig als Rutschung identifiziert werden konnte. Andererseits wies sie eine außerordentliche Größe und somit ein erhöhtes mögliches Schadenspotenzial auf. Bei der Rutschung handelt es sich um eine nordexponierte, tiefliegende Rutschung der Jeckenbach Schichten. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich dabei um eine Felsrotationsrutschung des Prozesstyp "Gleiten", die hangabwärts in eine Fließbewegung übergeht.

Untersuchungsgebiete

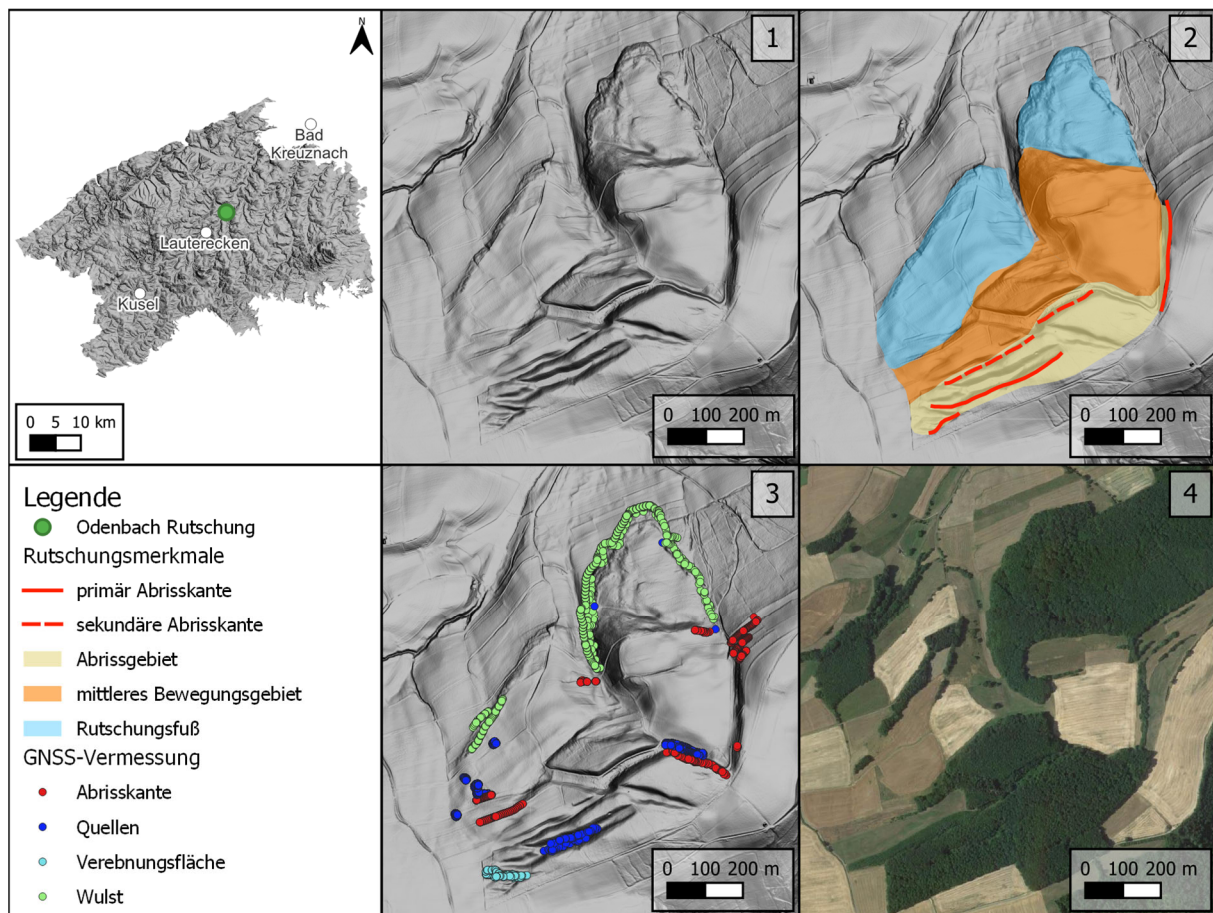


Abbildung 14: Lage der Odenbach-Rutschung im Untersuchungsgebiet 1. Außerdem Überblick über die kartierten Rutschungsmerkmale im DGM und kartierte Merkmale im Gelände. Die Luftbildaufnahme zeigt den aktuellen Zustand des Rutschungsgebiets.

Abbildung 14.2 stellt die im DGM kartierten Rutschungsmerkmale wie Abrisskanten und Rutschungsfuß dar. Deutlich zu erkennen sind mehrere Schollen, die sich am Hauptabriss und an sekundären Abrissen abgelöst haben (rote Linien). Auch die Wulst ist deutlich zu erkennen und weist gerade im unteren Teil eher einen Fließcharakter auf. Abbildung 14.3 zeigt die bei der Vermessung aufgenommenen Punkte. Aufgrund der Vegetation und dem damit einhergehenden schlechten Empfang des GNSS-Gerätes, konnte gerade im Abrissgebiet keine Messungen vorgenommen werden. Auch die Wulst der Rutschung liegt in einem Bereich mit dichter Vegetation, weshalb auch hier die Messungenauigkeiten erheblich waren. Durchschnittlich lag die horizontale Ungenauigkeit der Messpunkte der Wulst bei ungefähr 1 m und auch die vertikale Ungenauigkeit lag bei durchschnittlich über einem Meter (BARTH 2018). Daher konnte keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, ob die Rutschung noch aktiv ist. Da im Gelände keine frischen Rutschungsmerkmale gefunden wurden und auch auf einem aktuellen Satellitenbild der Rutschung (Abbildung 14.4) keine Veränderungen der Vegetationsdichte oder das vorschreiten der Wulst zu erkennen sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Odenbach-Rutschung um eine inaktive Rutschung handelt.

3.2 Untersuchungsgebiet 2: Mainzer Becken

Als zweites Untersuchungsgebiet wurde das linksrheinische Mainzer Becken ausgewählt, da es andere morphologische und geologische Bedingungen als das Saar-Nahe-Gebiet, dabei aber eine ähnlich hohe Rutschungsdichte aufweist. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das Gebiet entweder als Mainzer Becken oder als Untersuchungsgebiet 2 (U2) bezeichnet.

3.2.1 Geographischer Überblick U2

Das Mainzer Becken liegt zum Großteil linksrheinisch im Osten des Bundeslandes Rheinland-Pfalz. Nur der nördlichste/nordöstlichste Teil liegt rechtsrheinisch im Bundesland Hessen und wird somit nicht in dieser Arbeit berücksichtigt. Das Mainzer Becken ist ein sedimentäres Becken in Rheinhessen und gehört zu den geologischen Großeinheiten von Rheinland-Pfalz.

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich im Süden von Eisenberg, angrenzend an den Oberrheingraben, bis in den Norden nach Mainz und in westlicher Richtung bis zum Rheinknie bei Bingen. Die östliche und nördliche Grenze des Mainzer Becken ist somit der Rhein. Im Westen grenzt das Mainzer Becken an das Saar-Nahe-Becken. Die gesamte Ausdehnung des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 15 dargestellt und umfasst eine Fläche von ca. 1400 km². Naturräumlich entspricht der linksrheinische Teil des Mainzer Beckens zum Großteil dem Rhein Hessischen Tafel- und Hügelland. Der Nordteil ist geprägt durch den Wechsel von Plateauhochflächen und eingeschnittenen Bach und Flusstälern. Der Südteil ist durch eine, weitflächig von Löss überdeckte, Hügellandschaft geprägt. Die Plateaus weisen Höhen von 250 m und 300 m auf (BOY 2005). Das durch sanfte Hügel und weite Plateaus gekennzeichnete Gelände ist in drei Richtungen von waldreichen Mittelgebirgen umgeben (SCHÄFER 2012).

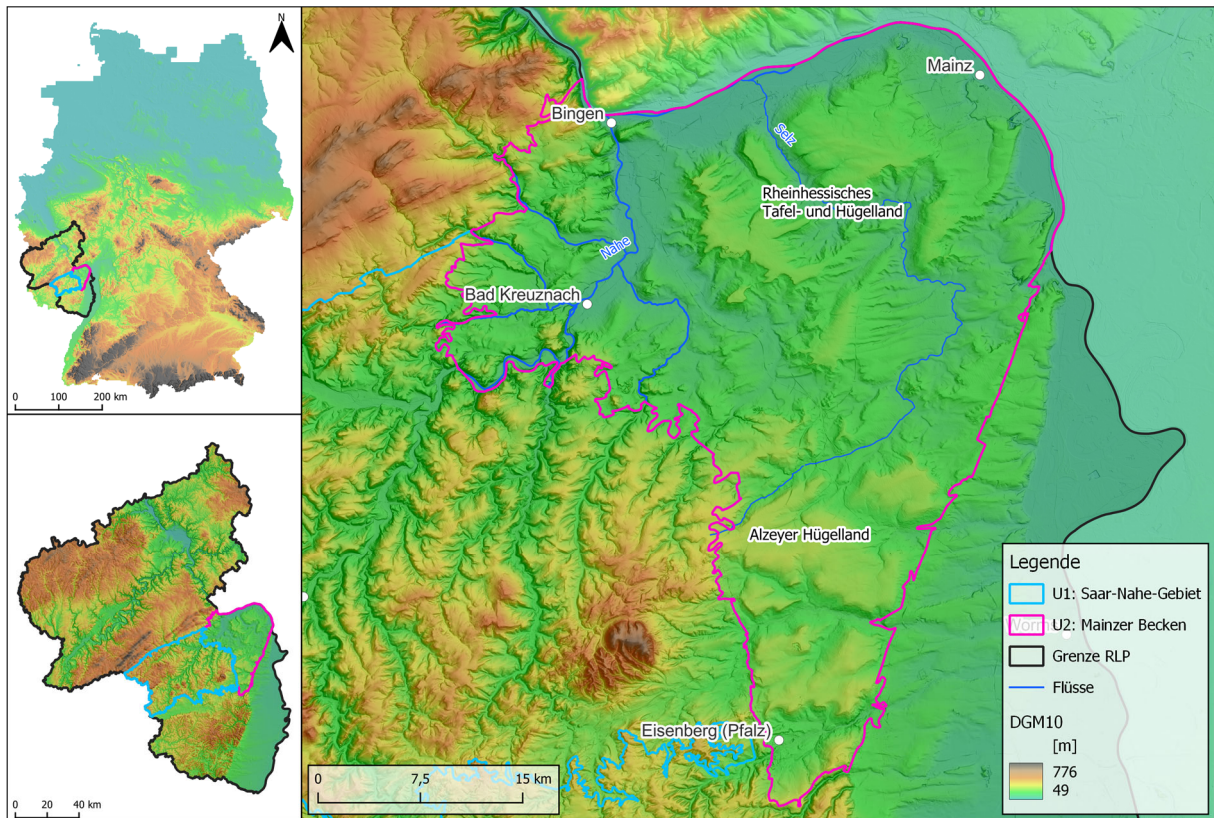


Abbildung 15: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiet 2: Zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets Mainzer Becken in Deutschland sowie die Lage des Untersuchungsgebiets in Rheinland-Pfalz.

Vergleicht man das angrenzende Mittelgebirge oder den Taleinschnitt des Mittelrheins, so tritt besonders der weitläufige Charakter der Landschaft hervor. Die waldarme von intensiver Landnutzung und relativ dichter Besiedlung geprägte Landschaft ist ein Kennzeichen des Mainzer Beckens (BECK 1994). Das vorherrschende Klima in dieser Region ist durch trockene und warme Bedingungen mit Niederschlagsmengen von teilweise unter 500 mm/Jahr gekennzeichnet. Zusammen mit den angrenzenden Gebieten im nördlichen Teil des Oberrheintieflandes gehört diese Landschaft zu den niederschlagsärmsten Gegenden Deutschlands. Die Fruchtbarkeit der Böden führt dazu, dass die Landschaft hauptsächlich durch Ackerbau und Weinbau geprägt ist und somit eine geringe Waldabdeckung aufweist (KWIS-RLP.DE 2023)

3.2.2 Geologischer Überblick U2

Die Entwicklung des Mainzer Beckens ist an die Entstehung des Oberrheingrabens gebunden. Das Becken stellt eine etwa dreieckige Hochscholle auf der westlichen Schulter des nördlichen Oberrheingrabens dar (Abbildung 16) und hat aufgrund der geringen Absenkungsbeträge nur einige 100 m mächtige Sedimente aufgenommen (SCHÄFER 2012).

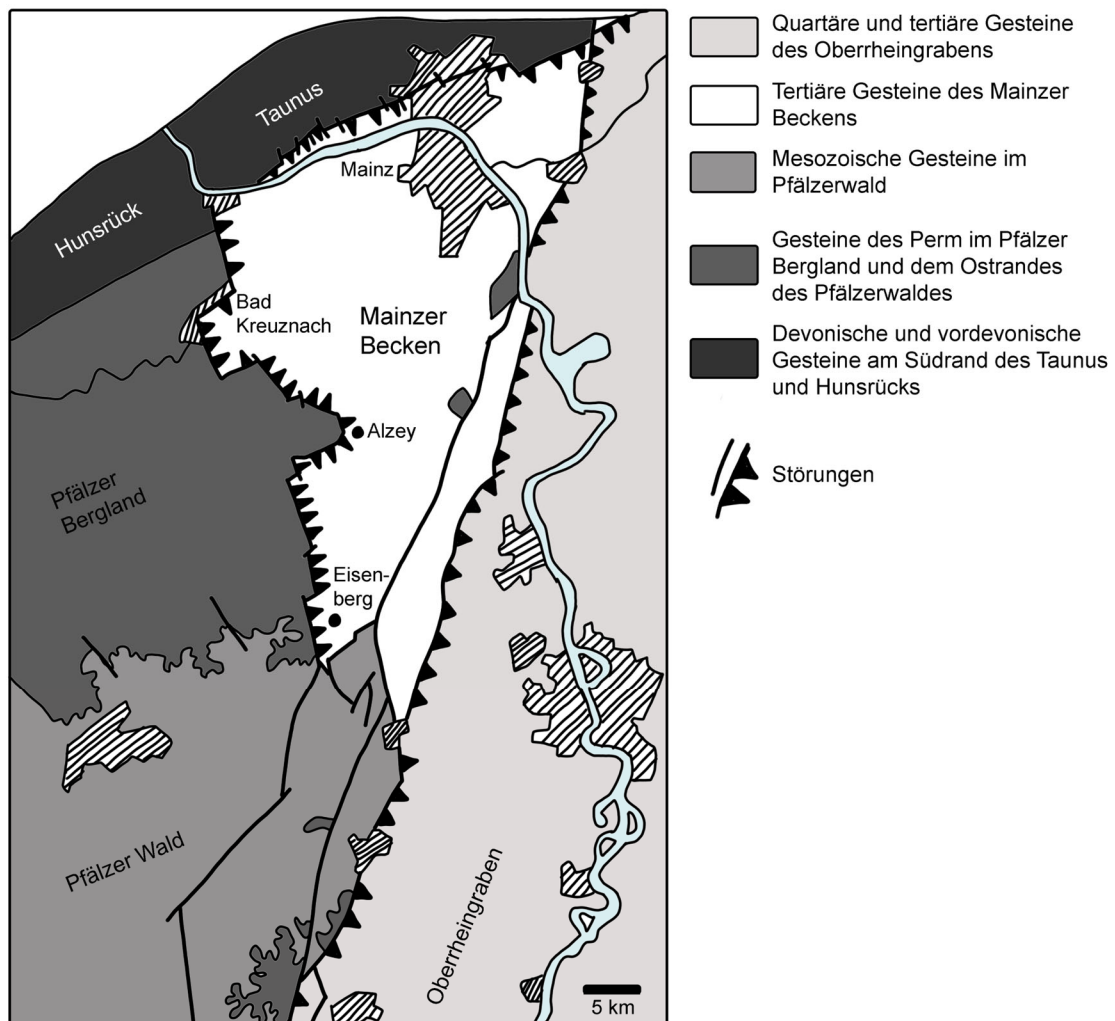


Abbildung 16: Die Lage des Mainzer Beckens auf der nordwestlichen Schulter des Oberrheingrabens (nach SCHÄFER 2012).

Im Muschelkalk bestimmten nach einer triassischen marinen Phase eine lange Zeit festländische Verhältnisse die Region (ROTHAUSEN & SONNE 1988). Die ältesten Sedimente aus dem Mainzer Becken gehören vermutlich dem Paläozän bis Eozän an und wurden in Prätertiär angelegten Tälern, kleinen Gräben oder lokalen Senken abgelagert. Bereits im oberen Eozän lässt sich im südlichen Mainzer Becken ein erster schwacher Einfluss des Meeres erkennen. In diesem Gebiet, das zwischen Eisenberg und Lautersheim liegt, sind Sedimente bekannt, die brackische bis brackisch-lakustrine Eigenschaften aufweisen. Diese Sedimente werden als Lymnänenmergel, Grüne Mergel oder Eisenberg Grünthon

bezeichnet (SCHÄFER 2012). Das Mainzer Becken wurde durch zwei große marine Zyklen geprägt (siehe Abbildung 17), die durch sehr unterschiedliche Ablagerungen charakterisiert sind (BOY 2005).

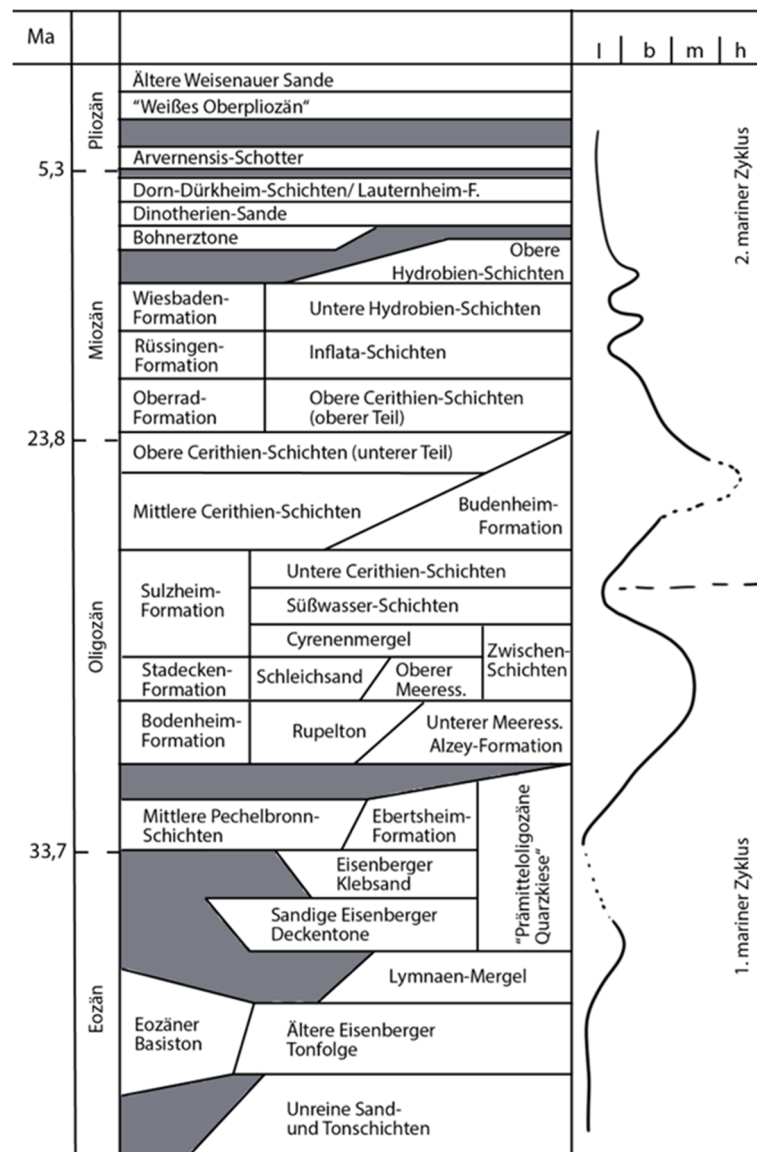


Abbildung 17: Die Stratigraphie und Salinitätsschwankungen im Mainzer Becken (nach BOY 2005). l=limnisch, b=brackisch, m=marin, h=hypersalinär

Im Inneren des Beckens bildeten sich in einer älteren Phase, die sich vom Eozän bis in das tiefe Oberoligozän erstreckte, hauptsächlich Tonmergel. Aufgrund dieser Gegebenheit wird dieser Zeitraum auch als "Mergeltertiär" bezeichnet (BOY 2005). Im frühen Unteroligozän erfolgte erstmals ein Meeresvorstoß (Ingression) aus dem tertiären Nordseebecken auf. Dieser erreichte das nördliche Mainzer Becken und führte zur Bildung der Mittleren Pechelbronn-Schichten, welche die ältesten Sedimente darstellen, die unter Einfluss des Meeres abgelagert wurden (ROTHAUSEN & SONNE 1988). Im späteren Unteroligozän führte ein weiterer weltweiter Meeresspiegelanstieg zu einer erneuten und

weitaus ausgedehnteren Transgression, die das gesamte Mainzer Becken erfasste. Auch dieser Meeresvorstoß erreichte den Oberrheingraben aus nördlicher Richtung und überflutete daraufhin auch die Schwellregion des Niersteiner Horstes. Über mehrere Millionen Jahre bestand so eine durchgehende Meeresverbindung von der tertiären Nordsee über die Hessische Senke, das Mainzer Becken und dem Oberrheingraben bis in das Gebiet der Paratethys (ROTHAUSEN & SONNE 1988; SCHÄFER 2012). Während im Beckeninnern vorwiegend Sedimente der Bodenheim-Formation („Rupelton“), mit einer tonig-mergeligen Beschaffenheit, abgelagert wurden, bildeten sich entlang der Küsten die gröber klastischen Meeressande des älteren Teils der Alzey-Formation (BOY 2005). Nach der erneuten Ausdehnung des marinen Sedimentationsraums drang das Meer weit über die Grenzen des Mainzer Beckens hinaus auf das angrenzende Festland vor und bedeckte schließlich Teile des Rheinischen Schiefergebirges und des Pfälzer Berglandes. Im Beckeninneren kam es aufgrund dessen zur Ablagerung tonig-mergeliger bis feinsandiger Sedimente, während an den Küsten immer noch Meeressande gebildet wurden. Diese Phase ging mit einer allmählichen Verbrackung und schließlich Aussüßung des Lebens- und Ablagerungsraumes im Mainzer Becken einher. Danach wurden weitgehend limnische Milieus abgelagert und damit endete der erste große marine Sedimentationszyklus (SCHÄFER 2012).

Im höheren Oberoligozänen beginnt erneut ein mariner Sedimentationszyklus und es setzen wieder brackische-marine Sedimentationen ein. Während dieser Zeit wurden hauptsächlich Kalksteine mit eingeschalteten tonig-mergeligen Zwischenlagen abgelagert (BOY 2005). Aufgrund der gegenüber dem älteren Mainzer Becken Tertiär so anderen lithologischen Ausbildung wurde hierfür der Name „Kalktertiär“ eingeführt (BOY 2005; SCHÄFER 2012). Dabei wird der stratigraphische Bereich von der Hochheim-Formation bis zur Frankfurt-Formation umfasst. Im Oberrheingraben wurden zu dieser Zeit mehr als 1000 m mächtige Tonmergel mit Einschaltungen von Evaporiten wie Anhydrit und Steinsalz abgelagert. Im Gegensatz dazu bildeten sich im Mainzer Becken, im überwiegend flachen Wasser einer subtropischen bis tropischen Lagune, wesentlich gering mächtigere Kalksteine und Mergel. Es außerdem kam zum wiederholten Trockenfallen des Ablagerungsraumes, was durch Dolomitbänke, Wurzelhorizonte und Trockenrisse belegt ist (SCHÄFER 2012). Im Mittelmiozän endete die Lagunensedimentation. Ab dem Obermiozän entwickelte sich ähnlich wie im Oberrheingraben Landoberfläche, welche durch fluviatile Sedimente (Rheinvorläufer) geformt wurde (STAPF 1987). Die zuvor abgelagerten Schichten sind seitdem der Verwitterung ausgesetzt und wurden zu einem Teil wieder erodiert. Aus dem Obermiozän, Pliozän und Pleistozän finden sich weitverbreitete Ablagerungen von Flüssen und Seen. Diese Sedimente prägten zu dieser Zeit das Landschaftsbild, sind aber teilweise bereits wieder abgetragen worden (SCHÄFER 2012).

Im Zusammenhang mit dem Absenken des Oberrheingrabens und dem Mainzer-Binger-Graben sowie der Heraushebung des Alzey-Niersteiner Horstes bildete sich ein Bruchschollenmosaik wobei die mehr oder weniger horizontale Lagerung der Schichten meist erhalten blieb (BECK 1994).

3.2.3 Beschreibung einer beispielhaften Rutschung in U2

Rheinessen, das sich zum Großteil aus tertiären Tonen und Schluffen aufbaut, weist eine große Anzahl von Rutschhängen auf. Dabei handelt es sich überwiegend um reaktivierte Rutschungen aus dem Pleistozän (KRAUTER 2001). Eine aktive Rutschung befindet sich im Westen des Untersuchungsgebiet 2 (Mainzer Becken), nahe der Grenze zum Saar-Nahe-Gebiet, in einem weinbaulich genutzten Gebiet südlich von Mandel (siehe Abbildung 18). Demnach wird die Rutschung im Folgenden als Mandel-Rutschung bezeichnet. Sie wurde früh im DGM entdeckt und genau wie die Odenbach-Rutschung als Teil einer Abschlussarbeit (BARTH 2018) vermessen. Genau wie die Odenbach-Rutschung sind die Rutschungsmerkmale im DGM sehr gut zu erkennen, sodass die wichtigsten Merkmale kartiert werden konnten (siehe Abbildung 18.2). Bei der Vermessung im Gelände wurden sowohl mehrere Abrisskanten als auch die Wulst kartiert. Es zeigt sich, dass sich sowohl die Abrisskanten als auch die Wulst über die Zeit merklich verändert haben (Abbildung 18.3). Die Abrisskanten sind weiter nach oben gewandert und die Rutschmasse ist weiter den Hang abgerutscht. Die Abrisskanten haben sich im Durchschnitt um ca. 4 m verschoben, wobei der Hauptabriss in nordwestliche Richtung gewandert ist. Die Wulst ist um ca. 11 Meter ins Tal abgerutscht und hat ca. 1 m an Höhe gewonnen (BARTH 2018). Diese Veränderung wird auch in einem aktuellen Luftbild sichtbar (vgl. Abbildung 18.4), hier sieht man einen ovaleren nördlicheren Hauptabriss und eine weiter fortgeschrittene Wulst.

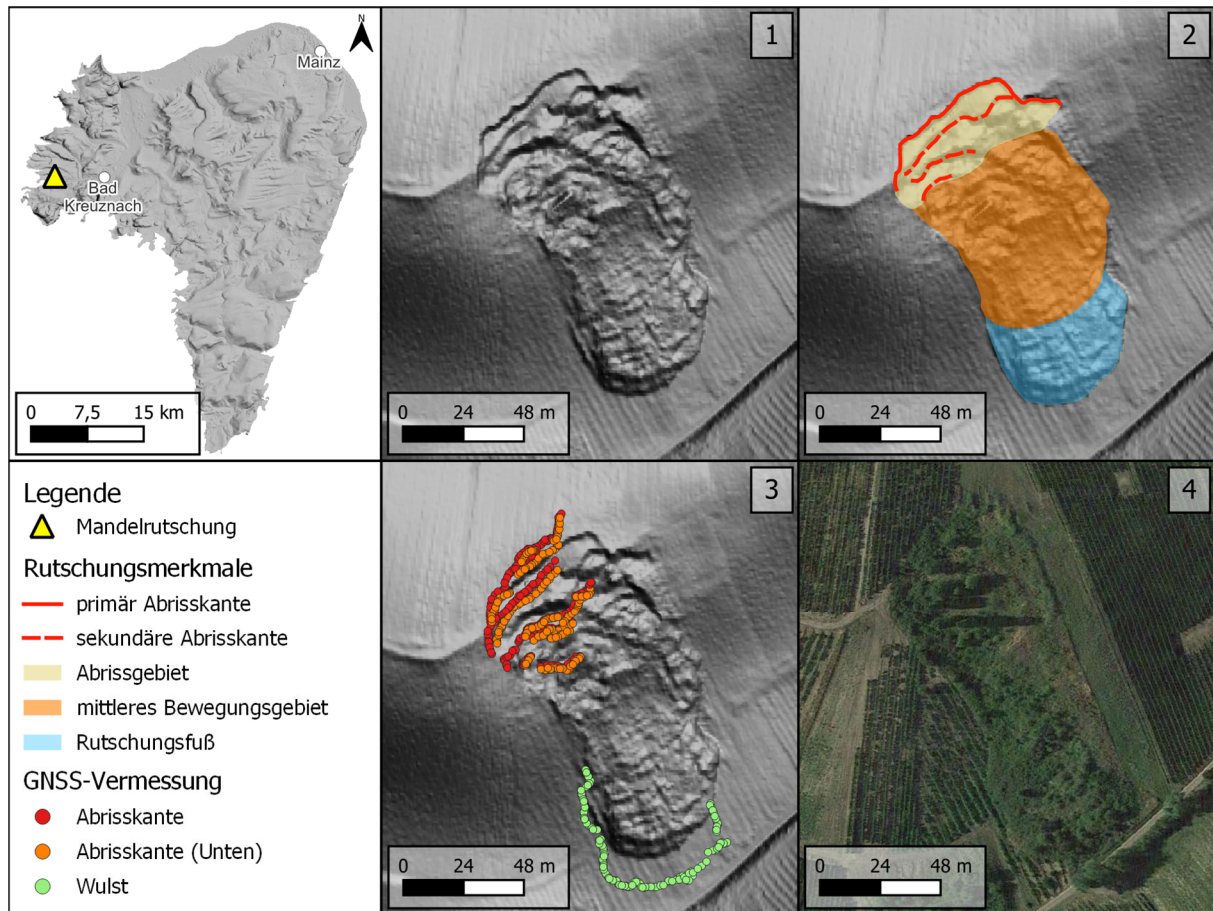


Abbildung 18: Lage der Mandel-Rutschung im Untersuchungsgebiet 2. Außerdem Überblick über die kartierten Rutschungsmerkmale im DGM und kartierte Merkmale im Gelände. Die Luftbildaufnahme zeigt den aktuellen Zustand des Rutschungsgebiets.

Die markante Weiterentwicklung hängt unter anderem mit der Neigung des Hangs zusammen, in der sich die Rutschung befindet. Er hat eine durchschnittliche Neigung von ca. 11° (BARTH 2018). Durch Auflast an der Hangkante durch z.B. landwirtschaftliche Nutzung (Weinbau) kam es womöglich zu einer Hanginstabilität, welche durch spätere Niederschläge zu einem Hangversagen führte. Zudem liegt die Rutschung im Tertiär, welches hauptsächlich aus tonigen und kalkigen Gesteinen gebildet wurde. Der Untergrund der Rutschung ist somit ebenfalls für die schnelle Entwicklung der Rutschung verantwortlich. Insbesondere Mergel und Tone können bei Wasserzufuhr als Gleitmittel fungieren und so die Hangstabilität gefährden. An diesem Beispiel erkennt man, das nicht nur Gebäude und Verkehrswege durch Hangbewegungen gefährdet oder zerstört werden können, sondern auch Kulturland, wie die Weinbergsflächen in Rheinhessen (Krauter 2001).

4 Methodik

Dieses Kapitel ist in mehrere Unterabschnitte gegliedert, welche die Umsetzung verschiedener Methoden und Grundlagen in den verschiedenen Phasen der Arbeit darstellen. Die Anfälligkeitsanalyse für Rutschungen besteht grundsätzlich aus vier Hauptschritten: Datensammlung und Aufbau eines Geoinformationssystems (GIS) mit den relevanten Faktoren, Aufbau eines Rutschungsinventars, Berechnung der Rutschungsanfälligkeit anhand der Beziehungen zwischen den Rutschungen und den Einflussfaktoren, Validierung der Ergebnisse und Interpretation und Vergleich der Ergebnisse (siehe Abbildung 19).

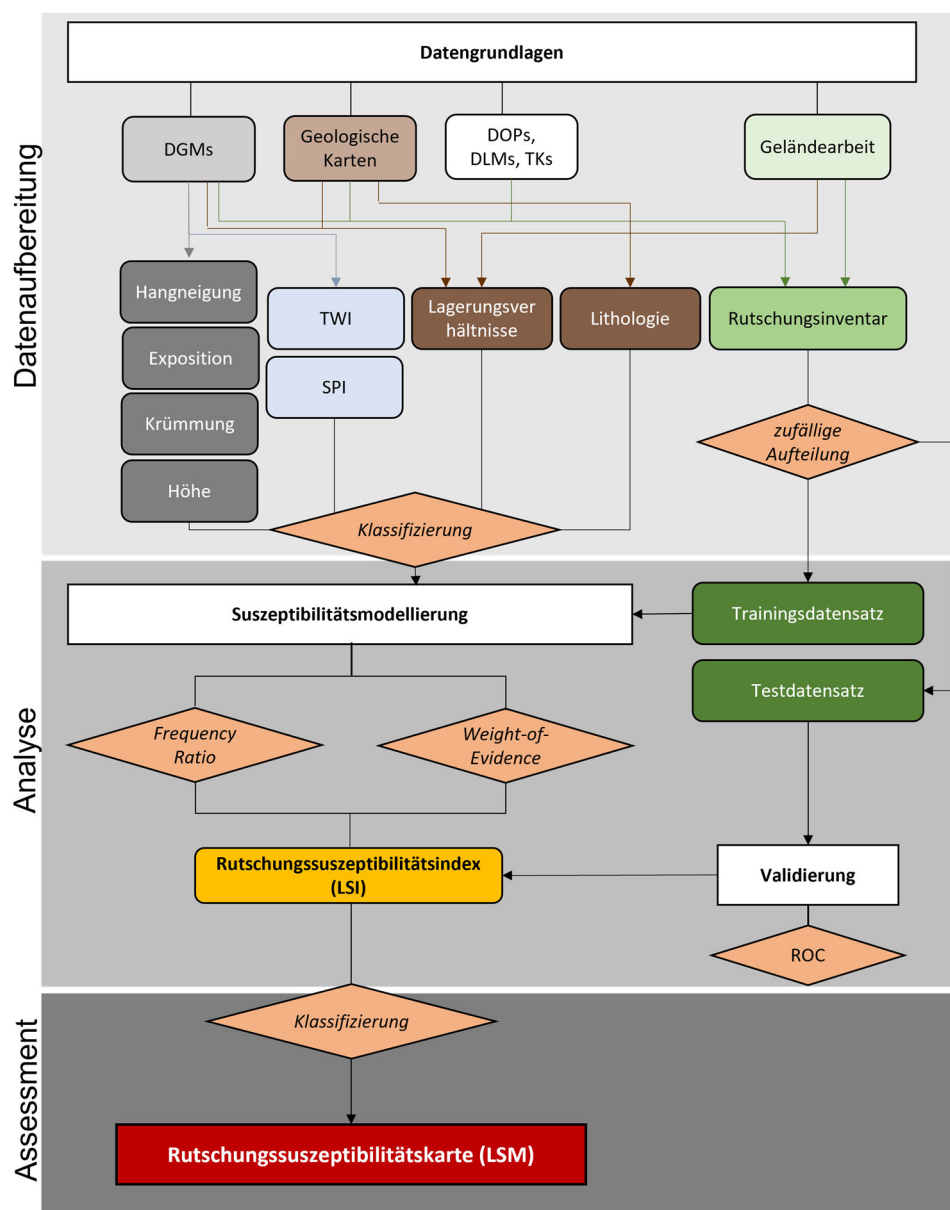


Abbildung 19: Darstellung des Ablaufs des Forschungsprozesses. Der Forschungsprozess kann in drei Phasen unterteilt werden: der Datenaufbereitung, der Analyse und dem Assessment.

4.1 Software

Alle Daten wurden im Wesentlichen mit Open Source Software gerechnet, modelliert und dargestellt. Zum Einsatz kamen die Programme QGIS, SAGA-GIS und R Studio. Daneben wurde auch die kommerzielle Software MATLAB verwendet. Im Folgenden wird kurz darauf eingegangen, was die einzelnen Programme sind und wie sie in der Arbeit verwendet wurden.

QGIS (**Q**uantum-**G**IS) ist ein freies Geoinformationssystem zum Erfassen, Bearbeiten und Betrachten von geographischen und räumlichen Daten (QGIS.ORG 2022). Das Programm wurde in dieser Arbeit hauptsächlich zum Erstellen des Rutschungsinventars, dem Visualisieren von Ergebnissen und Darstellen von Karten genutzt. Außerdem wurde am Ende der Arbeit ein Geoinformationssystem für die Rutschungsanfälligkeit der zwei Untersuchungsgebiete, in dem alle relevanten Daten enthalten sind, erstellt.

SAGA GIS (**S**ystem für **A**utomatisierte **G**ewissenschaftliche **A**nalysen) ist ein Open-Source Geographisches Informationssystem zur Bearbeitung und Analyse von Geodaten. Das Programm enthält eine Reihe von Modulen zur Analyse von Vektor-, Tabellen-, Raster- und Bilddaten. Darüber hinaus enthält es Module für Geostatistik, Bildklassifikation, Projektionen, Simulationen von dynamischen Prozessen und Geländeanalysen (CONRAD 2007). Das Programm wurde für den Großteil der Arbeit verwendet. Über die Datenaufbereitung und Berechnung von relevanten Parametern bis hin zu den statistischen Analysen und der Verschneidung der Endergebnisse.

R Studio vereint die verschiedenen Komponenten von R (Konsole, Quelltextbearbeitung, Grafiken, Historie, Hilfe usw.) in einer *Workbench*, um sowohl neuen R-Benutzern den Einstieg zu erleichtern als auch fortgeschrittenen Benutzern hochproduktive Werkzeuge an die Hand zu geben (ALLAIRE 2012). R Studio wurde verwendet um ein Skript für die Berechnung von ROC-Kurven zu Erstellen. Welche zur Validierung der Ergebnisse genutzt wurden.

MATLAB® ist eine Plattform für Programmierung und numerische Berechnungen, die zur Analyse von Daten, Entwicklung von Algorithmen und Erstellung von Modellen verwendet wird. MATLAB® ist eine Desktop-Umgebung für iterative Analysen und Entwicklungsprozesse mit einer Programmiersprache, in der Matrizen-basierte Mathematik direkt formuliert werden kann (THE MATHWORKS INC. 2021). MATLAB wurde vor allem für die Berechnung des TOBIA-Modells verwendet, welches in Kapitel 4.5 genau erläutert wird. Außerdem wurde die Berechnung des *Frequency-Ratio* und des *Weight-of-Evidence* über das Programm durchgeführt.

4.2 Datengrundlage

In dieser Arbeit wurden räumliche Analysen durchgeführt, die auf einer Vielzahl von Geobasisdaten und Daten zu gravitativen Massenbewegungen basieren. Eine Zusammenstellung aller Daten und ihrer Merkmale und Quellen ist in Tabelle 3 dargestellt. Zusätzliche Informationen sind in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

Tabelle 3: Überblick über die Datengrundlagen die in dieser Arbeit verwendet wurden.

Daten	Typ	Ausdehnung	Quelle, Stand
Topographie			
LIDAR (Airborne)	Vektor	RLP flächendeckend	LVerGeo, 2003-2018
DGM10	Raster (10 m)	BRD	BA Geobasis 2013
Geologie			
GK25/GK50/GK100	Raster (2 m)	100 GK25 Blätter 4 GK50 Blätter 1 GK100 Blatt	LGB 2018/ Bearbeitungsstand der GK sehr unterschiedlich
GK25	Vektor (teilattributiert)	Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken	LGB 2018
Rutschungen			
Rutschungsdatenbank RLP	Vektor	RLP flächendeckend	LGB 2021
GeoBasis			
ATKIS, ALKIS, TK25, TK5	WMS/WFS	RLP flächendeckend	LVerGeo, 2018
ATKIS	Vektor	BRD	BA Geobasis 2013
TK-Hausumrisse	Vektor	RLP flächendeckend	LVerGeo, 02/2018
DOP	WMS (0,2m)	RLP flächendeckend	LVerGeo, 2018

4.2.1 Digitale Geländemodelle

Als Grundlage der Geländeanalysen und Kartierungen dienen aus LIDAR-Rohdaten abgeleitete DGMS sowie modifizierte DGMS (modDGM) mit einer räumlichen Auflösung von 1 m (DGM1) und 20 cm (DGM02). Die im Projekt speziell errechneten modifizierten DGM sind eine Kombination aus DGM und digitalem Oberflächenmodell (DOM), dabei werden die Gebäudeumrisse eingebaut aber keine Vegetation berücksichtigt. Alle Geländemodelle im Projekt wurden aus den LIDAR-Rohdaten errechnet, die durch das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo) zur Verfügung gestellt wurden. Die Daten wurden als ASCII- x,y,z Dateien kachelweise mit einer Ausdehnung von 1x1 km für die gesamte Fläche Rheinland-Pfalz geliefert.

LiDAR (engl.: *Light Detection and Ranging*) ist eine aktive Fernerkundungstechnologie mit dem Grundprinzip, den Abstand zwischen einem Sensorgerät und einer Oberfläche zu messen (Höfle & Rutzinger 2011). LiDAR nutzt eine Technik, bei der Laserimpulse auf die Erdoberfläche sowie die auf

ihr befindlichen Objekte gerichtet werden. Die Pulse erreichen das Gelände und die Objekte und reflektiert einen Teil der Laserenergie zu einem Sensor in der Nähe der Quelle zurück. Durch die Messung der Laufzeit der ausgesendeten Laserimpulse kann das LiDAR-System die Entfernung zwischen dem Sensor und dem kartierten Gelände bestimmen (DE LANGE 2020).

Für die Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen wird unter anderem die ALS-Technik (engl.: *Airborne Laserscanning*) verwendet. Dabei wird die Scaneinheit auf oder an einem Flugobjekt (z.B. einem Flugzeug oder Helikopter) angebracht. Bei dieser Methode werden die Messinstrumente unter dem Trägerflugzeug montiert und diese strahlen den Laserimpuls ab. Dabei wird die zurückgelegte Zeit zwischen dem Aussenden und dem Empfang der Signale genutzt, um den Abstand zwischen Sensor und Oberfläche zu errechnen. Hierbei wird allerdings nur die Entfernung zwischen dem Messgerät und der Erdoberfläche gemessen. Es muss außerdem die Position des Flugzeugs und damit die Lage in einem dreidimensionalen Bezugssystem ermittelt werden. Das *Differential Global Positioning System* (DGPS) ermöglicht diese Bestimmung. Da sich das Flugzeug beim Überfliegen der Oberfläche immer weiterbewegt und sich nicht auf der exakt gleichen Höhe befindet, müssen Abweichungen mittels einer dritten Komponente, dem *Inertial Navigation System* (INS, Trägheitsnavigationssystem) berücksichtigt werden. Dieses System ist auf Lasertechnologie gestützt (LINS) und ermittelt die Drehung um die x -, y - und die x - y -Achse. Das ALS-Verfahren ermöglicht somit die Erstellung eines 3D-Oberflächenmodells, bei dem jeder Messpunkt Informationen zur Lage und Höhe besitzt (BARTELME 2005). Bei durchlässigen Oberflächen (z.B. Vegetation) können mehrere Echos entstehen, eine Baumkrone erzeugt ein erstes Echo (engl.: *First Pulse*), die darunter liegende Erdoberfläche wiederum erzeugt das letzte Echo (engl.: *Last Pulse*) (siehe Abbildung 20). Durch den Vergleich des *First Pulse* und des *Last Pulse* kann die Vegetation erkannt werden. Aufgrund dessen handelt es sich bei den Rohdaten um Punktwolken mit Werten auf mehreren Ebenen. Diese Punktwolken-Datasets können anschließend durch Interpolation zu DGMs verarbeitet werden (HÖFLE & RUTZINGER 2011). Die Lagegenauigkeit ist abhängig von den einzelnen Komponenten und befindet sich in der Horizontalen bei weniger als 40 cm und in der Vertikalen bei weniger als 10 cm. Die Messpunktdichte kann mehrere Punkte pro m^2 betragen (BARTELME 2005).

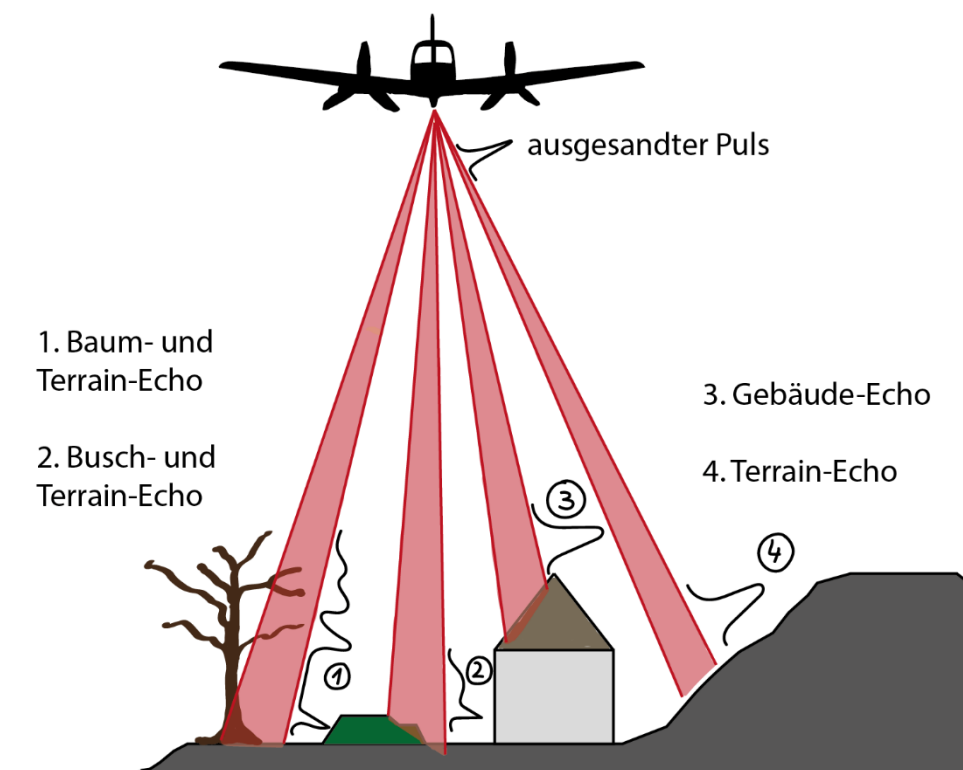


Abbildung 20: Airborne Laserscanning Methode mit verschiedenen Oberflächen und Echos (modifiziert nach DE LANGE 2020).

Die Daten von Rheinland-Pfalz die für diese Arbeit verwendet wurden, sind vom Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation erfasst worden. Es sind LiDAR- Daten flächendeckend für gesamt Rheinland-Pfalz verfügbar. Das LVerGeo befliegt jährlich ca. 1/9 der Landesfläche. Die Daten besitzen dabei eine Punktdichte von mindestens vier Punkten pro Quadratmeter, was wiederum einer Höhengenaugigkeit von 0,15 m bei flachem Gelände ergibt. (LVERMGEO.RLP.DE 2023). Aus den Laserrohdaten können die verschiedenen DGMs berechnet werden.

4.2.1 Weitere Geobasis-Daten

Zur Erstellung der Übersichtskarten und Modellberechnungen wurden zusätzlich zum DGM weitere Daten des LVerGeo verwendet. Dazu zählt unter anderem das amtliche topographisch-kartographische Informationssystem (ATKIS), das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS), die topographische Karte 1:25 000 (TK25) sowie die topographische Karte 1:5 000 (TK5). Diese Daten wurden vom Landesamt als WMS- (*Web Map Service*) bzw. WFS- (*Web Feature Service*) Layer bereitgestellt.

4.2.2 Geologische Daten

Die geologischen Daten, die in dieser Arbeit verwendet wurden, lagen Anfangs als Geologische Karten im Maßstab 1:25 000 vor und wurden vom LGB RLP zur Verfügung gestellt. Für das Saar-Nahe-Gebiet wurden 18 Karten und für das Mainzer Becken 13 Karten bereitgestellt. Damit wurde ein Großteil der Untersuchungsgebiete abgedeckt, einzig für die Ränder der Gebiete lagen keine Karten vor. Diese Datengrundlage war in den ersten Schritten der Arbeit ausreichend, da die Daten einzig für die Erstellung des Projekt bezogenen Rutschungsinventars hinzugezogen wurden. Im Laufe der Bearbeitung dieser Arbeit wurden vom Landesamt für Geologie und Bergbau weitere aufbereitete Daten bereitgestellt.

Diese stammten von der Arbeitsgruppe Fachinformationssysteme und Integrierte Geologische Landesaufnahme (kurz: FISE/IGL) welche Teil des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz ist. Innerhalb dieser Arbeitsgruppe soll eine flächendeckende blattschnittfreie digital integrierte Geologischen Karte von Rheinland-Pfalz erstellt werden, die als Grundlage für fachbezogene Auswertungen und Fragestellungen dienen soll (WEHINGER et al. 2022). Diese aufbereiteten Daten wurden dem Projekt zur Verfügung gestellt und dienten als Grundlage für die Erstellung einer ingenieurgeologischen Klassifizierung (Kapitel 4.6.4).

4.2.3 Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz

Um Rutschungen besser verstehen, dokumentieren und entsprechende Vorsorgemaßnahmen ergreifen zu können, wurde die Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz aufgebaut. Ursprünglich wurde die Datenbank im damaligen Geologischen Landesamt (GLA) angelegt und in der Forschungsstelle Rutschungen weitergeführt. Seit dem Jahr 2009 erfolgt eine gemeinsame vollständige Neubearbeitung durch das LGB Rheinland-Pfalz, die Forschungsstelle Rutschungen und das MABEIS-Projekt.

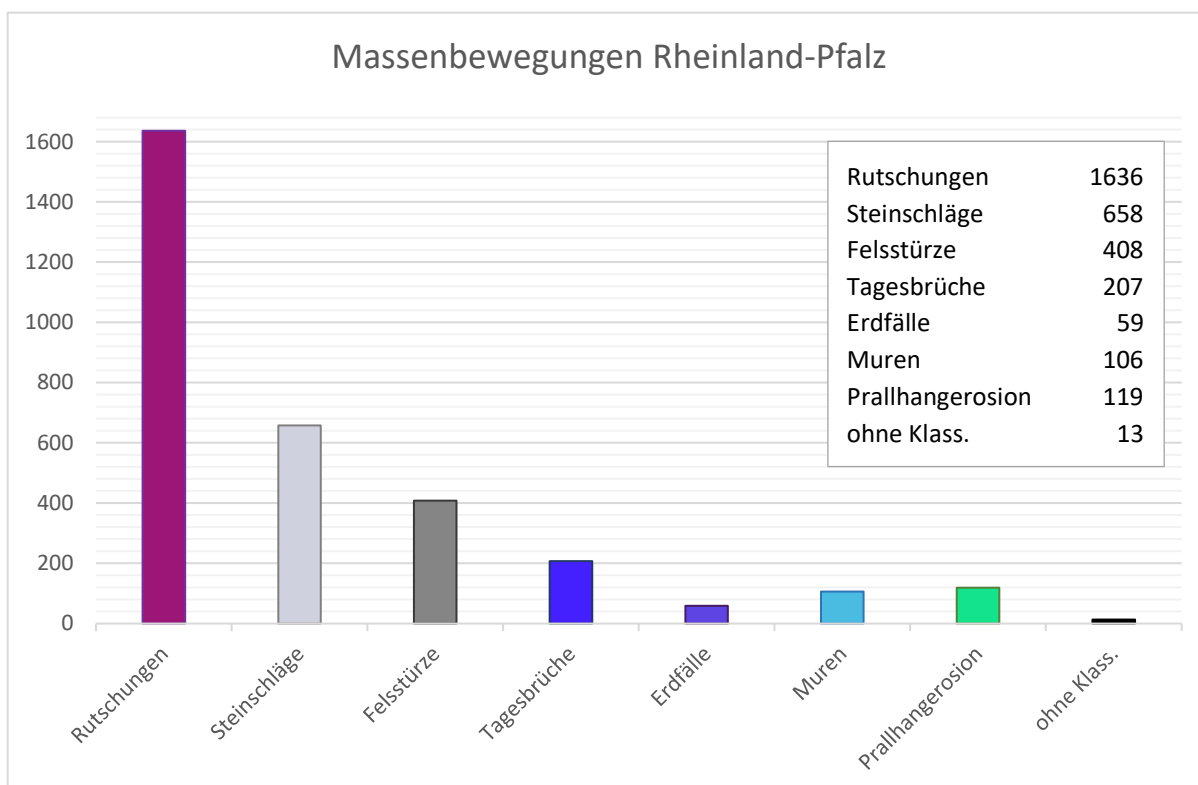


Abbildung 21: Die Verteilung der verschiedenen Massenbewegungstypen in Rheinland-Pfalz die in der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz aufgenommen wurden.

Die Datenbank beinhaltet Rutschungen, Felsstürze, Steinschläge, Muren, Erdfälle, Prallhangerosionen und Tagesbrüche in Rheinland-Pfalz (Abbildung 21). Sie umfasst derzeit etwa 3206 Massenbewegungen aus dem Zeitraum 1655 bis 2022. Die meisten Ereignisse umfassen den Zeitraum von 1950 bis heute. Überwiegend handelt es sich bei den aufgezeichneten Ereignissen um Massenbewegungen, welche vom GLA RLP bzw. LGB RLP geotechnisch im Gelände untersucht wurden. Die Datenfelder beinhalten Angaben zur Lage, Geologie, Ursachen und Sicherungsmaßnahmen der Rutschungen (BOCK et al. 2012). Von den insgesamt 3206 Einträgen sind 1636 Gleitrutschungen. Abbildung 22 zeigt die Verteilung der Ereignisse innerhalb von Rheinland-Pfalz. Von den insgesamt über 3000 Ereignissen sind 977 (30%) in den beiden Untersuchungsgebieten verortet. Im Saar-Nahe-

Gebiet sind insgesamt 544 Ereignisse in der Datenbank eingetragen 385 davon sind Rutschungen (70%). Im Mainzer Becken sind insgesamt 433 Massenbewegungen, davon 358 Rutschungen (82%) eingetragen. Andere von Rutschungen stark betroffene Gebiete in Rheinland-Pfalz sind das Mosel- und Mittelrheintal.

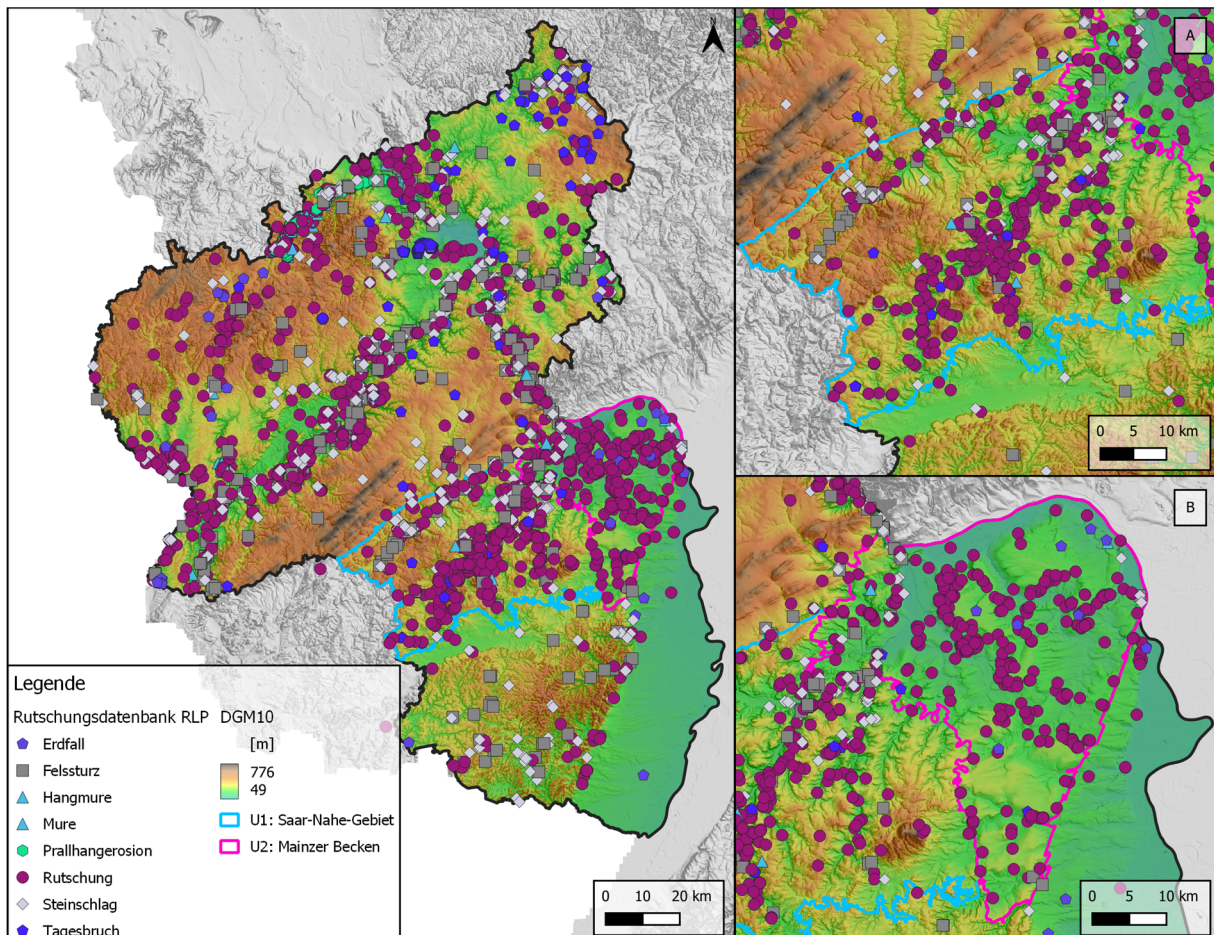


Abbildung 22: Übersicht der vorhandenen Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz vom LGB, mit Detailansichten der Rutschungsdatenbank in den Bereichen des A) Saar-Nahe-Gebiets und dem B) Mainzer Becken.

Anzumerken ist, dass die Rutschungsdatenbank mit Ausnahme der registrierten Ereignisse noch einige wenige Rutschungen von Diplomkartierungen beinhaltet. Gerade Rutschungen in Wäldern oder unbesiedelten Gebieten werden nicht gemeldet da diese nicht direkt die Bevölkerung betreffen und somit oft unbemerkt bleiben. Somit ist zu erwarten, dass bei weitem nicht alle in Rheinland-Pfalz stattgefundenen Massenbewegungen in der Rutschungsdatenbank enthalten sind. Zusätzlich dazu liegen für die Rutschungen nur Punktkoordinaten vor, was bei der Analyse von beeinflussenden Faktoren und der Berechnung von Anfälligkeitskarten ein Nachteil darstellen kann. Die Verortungsqualität der Einträge ist insbesondere bei älteren Ereignissen unzureichend und weist eine hohe Verortungsungenauigkeit auf. In einigen archivierten Gutachten des Landesamts für Geologie und Bergbau konnten keine präzisen Ortsangaben ermittelt werden. Um dieses Problem zu bewältigen, wurde eine Klassifikation eingeführt, um die Genauigkeit der Koordinaten zu

differenzieren. Die Klassifizierung erfolgte in die Kategorien "sehr gut", "gut", "mittelmäßig", "geschätzt" und "grob geschätzt". Dabei wurden die Koordinaten des Mittelpunktes von Abrisskanten bei Rutschungen sowie der Ausbruchsnische bei Felsstürzen oder Steinschlägen verwendet (Bock et al. 2012). Die beste Verortungsqualitätsklasse gibt eine Genauigkeit von <100 m an. Gerade die Verortung war im Hinblick auf die Studie besonders wichtig, da die Anfälligkeitsberechnungen auf Grundlage von räumlichen Zusammenhängen beruhen. Aus diesem Grund konnten die Daten der Rutschungsdatenbank RLP nicht als Trainings- und Testdatensätze für die Berechnung und Bewertung der Anfälligkeitskarten verwendet werden. Stattdessen wurden sie als Hilfe zur Erstellung des projektinternen Rutschungsinventars genutzt.

4.3 Datenaufbereitung

Wie bereits erwähnt, sind verschiedene Faktoren für das Versagen von Hängen verantwortlich und müssen bei der Modellierung der Rutschungsanfälligkeit berücksichtigt werden. Die Zuverlässigkeit der daraus resultierenden Karte hängt von der Genauigkeit der verwendeten Daten ab. Deshalb ist die Qualität der Datengrundlagen und die daraus abgeleiteten Parameter besonders wichtig. Ein notwendiges Kriterium für die Erstellung jedes Geoinformationssystems ist außerdem die Datenkonformität. Alle Datenebenen müssen identische geografische Koordinaten (Rasterzeilen und -spalten), Pixelgröße und Kartenprojektion haben, wenn die Verarbeitung mehrerer Ebenen möglich sein soll.

Die errechneten DGMs und einzelne Parameter lagen Anfangs in Kartenblatt Größe vor. Einer der ersten Schritte war die Zusammenführen aller Kartenblätter zu einer Karte. Dadurch wurde die Berechnungsdauer der einzelnen Parameter zwar deutlich länger, aber es musste nicht mit vielen einzelnen Karten gearbeitet werden.

In der Arbeit wurden alle erforderlichen Daten mit Hilfe von Fernerkundungsdaten zusammen mit Felduntersuchungen erstellt. Das Koordinatenbezugssystem (KBS) aller räumlichen Daten des Projektes (Projekt-KBS) ist ETRS89-UTM32N auf Basis des WGS84 Ellipsoids (EPSG:25832). Viele Datenquellen lagen in anderen Bezugssystemen und Projektionen vor (z.B. DHDN). Diese Daten und Ableitungen wurden auf das Projekt-KBS transformiert, damit diese auch für die Arbeit verwendet werden konnten.

4.4 Rutschungsinventar

Ein Rutschungsinventar ist eine der wichtigsten Informationsquellen für die quantitative Analyse der Rutschungssuszeptibilität. Deshalb sollte in einem Rutschungsinventar mindestens der Ort und sofern bekannt das Datum des Ereignisses sowie der Typ der Massenbewegung erfasst werden (GUZZETTI et al. 2012). Wenn möglich sollten außerdem weitere Informationen wie Größe, Aktivität, ursächliche Faktoren und resultierende Schäden von Rutschungen angegeben werden. Rutschungsinventare können unter anderem bei der Kartierung der Anfälligkeit für Rutschungen sowie für die Zuverlässigkeitsanalyse bei der Vorhersagemodellierung und bei der Häufigkeitsanalyse verwendet werden. In dieser Arbeit werden die Begriffe "Inventar", "Rutschungsinventar", und "Rutschungskarte" synonym verwendet.

Rutschungskarten werden nach ihrem jeweiligen Maßstab und der Art der Kartierung unterschieden. Kleinmaßstäbliche Inventare (<1:200 000) werden meist auf der Grundlage von Literatur erstellt. Durch Anfragen bei öffentlichen Organisationen, privaten Beratern oder durch die Befragung von Rutschungsexperten werden Daten für diese Inventare gewonnen. Mittelgroße Inventare (1:25 000 bis 1:200 000) werden durch die Auswertung von Luftbildern in einem Maßstab von 1:60 000 bis 1:10 000 erstellt. Darüber hinaus werden zusätzlich lokale Geländekontrollen mit historischen Informationen genutzt. Bei der Erstellung von großmaßstäblichen Inventaren (>1:25 000) werden Luftbilder in Maßstäben von mehr als 1:20 000 ausgewertet. Außerdem kommen aufgelöste Satellitenbilder, Digitale Geländemodelle und Geländeuntersuchungen zum Einsatz (MALAMUD et al. 2004; GUZZETTI et al. 2012).

Rutschungsinventare können je nach Art der Kartierung als **Archiv-** oder **geomorphologische Inventare** klassifiziert werden. Ein Archivinventar beinhaltet Informationen über Rutschungen, die aus verschiedenen Archivquellen oder der Literatur stammen. Wohingegen geomorphologische Inventare Informationen aus Auswertungen von Luftbildern im Zusammenhang mit Geländebegehungen enthalten (MALAMUD et al. 2004). Bei geomorphologischen Inventaren wird zwischen historischen, ereignisbezogenen, saisonalen oder multitemporalen Inventare unterschieden (GUZZETTI et al. 2012).

Ein geomorphologisches **historisches Inventar** zeigt viele Rutschereignisse die über einen Zeitraum von zehn, hundert oder tausend Jahren stattgefunden haben. Ein Problem historischer Rutschungsinventare ist, dass die Merkmale kleinerer Rutschungen aufgrund unterschiedlich starker Veränderungen wie z.B.: Hangbewegungen, Erosionsprozesse, anthropogene Einflüsse und Vegetation verloren gegangen sind. Die Merkmale kleinere Rutschungen gehen mit der Zeit verloren und sind

deshalb immer schwerer zu erkennen (MALAMUD et al. 2004). Das Alter von Rutschung wird bei einem historischen Inventar nicht unterschieden oder nur als kürzlich, alt oder sehr alt angegeben (GUZZETTI et al. 2012).

Ein **Ereignisinventar** zeigt Rutschungen, die durch einen einzigen Auslöser (z.B. Erdbeben) verursacht wurden. Das Datum der Rutschung entspricht bei solchen Inventaren dem Datum (oder Zeitraum) des auslösenden Ereignisses. Durch die Verwendung von Luft- oder Satellitenbildern unterschiedlichen Alters können multitemporale und saisonale Inventare erstellt werden. Ein saisonales Inventar beinhaltet Rutschungen, die durch ein oder mehrere Ereignisse ausgelöst wurden. Der Zeitraum umfasst bei diesen Ereignissen entweder nur eine oder mehrere Saisons. Multitemporale Inventare dagegen zeigen Rutschungen, die über längere Zeiträume durch mehrere Ereignisse ausgelöst wurden. In beiden Inventartypen wird als Datum der Rutschungen das Datum der Auslöser eingetragen. Eine andere Möglichkeit, das Datum in das Inventar aufzunehmen, besteht darin, das Datum der Bildaufnahmen oder der Geländearbeiten zu verwenden, die zur Erstellung des Inventars durchgeführt wurden. (GUZZETTI et al. 2012).

Die Erstellung eines Rutschungsinventars ist ein komplexer Prozess, der aus mehreren Schritten besteht. Ziel dieser Arbeit war das Detektieren und Inventarisieren von Rutschungsflächen anhand eines hochauflösenden digitalen Geländemodells. Im Rahmen zweier Masterarbeiten (HEINRICHS 2017; BRAUNSHAUSEN 2017) wurden hierzu Vorgehensweisen erarbeitet und erste Ergebnisse erzielt. Die einzelnen Schritte zur Erstellung des Rutschungsinventars (geomorphologisch-historisch) werden in den weiteren Unterkapiteln genauer erläutert.

4.4.1 Computergestützte Kartierung

Die Kartierung von Rutschungen im Gelände birgt einige Schwierigkeiten, da gerade alte Rutschungen im Gelände oft schwer zu erkennen sind. Nach GUZZETTI et al. (2012) können Ursachen dafür sein:

- (1) Die Größe der Rutschung; oftmals sind Rutschungen zu groß, um im Feld vollständig erkannt zu werden.
- (2) Der Beobachtungspunkt des Untersuchers; je nach Beschaffenheit des Terrains können oftmals nicht alle Merkmale einer Rutschung erkannt werden.
- (3) Bedeckte, abgetragene oder überprägte Rutschungen; alte Rutschungen sind oft teilweise oder vollständig von Wald bedeckt oder wurden durch andere Massenbewegungen, Erosionsprozesse und menschliche Eingriffe, einschließlich Land- und Forstwirtschaft, teilweise abgetragen oder überprägt.

Es ist eine herausfordernde Aufgabe, die Grenze einer Rutschung im Gelände genau zu verfolgen. Dies gilt insbesondere aufgrund der eingeschränkten Sichtbarkeit des Hanges, die durch lokale Gegebenheiten wie Vegetation und Topographie bedingt ist. der Größe der Rutschung und der Tatsache, dass die Grenze von Rutschungen oft undeutlich sind (SANTANGELO et al. 2010). Durch ihren erhöhten Beobachtungsabstand ermöglichen Luftbilder ein leichteres Erkennen und Abgrenzen der morphologischen Merkmale von Rutschungen. Dazu gehören Abrisskanten, Verebnungsflächen und Aufwölbungen oder Wülste. Im Geländearbeit ist dies oft nicht möglich. Die Vegetation spielt sowohl beim Erkennen und Kartieren von Rutschungen im Gelände als auch durch die Analyse von Luft- und Satellitenbildern eine Rolle. Die Art, Höhe und Dichte der Vegetation sowie die jahreszeitlichen Veränderungen der Vegetation kann dabei ein Problem werden. Für solche Bereiche eignen sich DGMs (siehe Abbildung 23). Die visuelle Analyse und Interpretation hochauflösender DGMs ist die häufigste Anwendung für die Erkennung und Kartierung von Rutschungen (GUZZETTI et al. 2012).

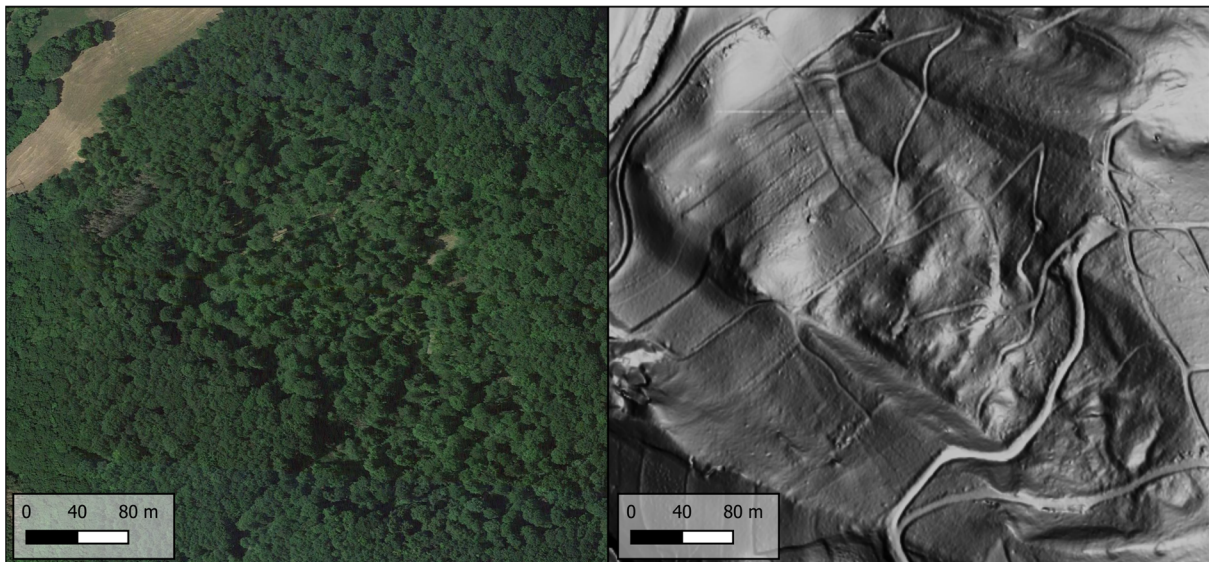


Abbildung 23: Links: Satellitenbild einer Rutschung. Es sind leichte Veränderungen der Vegetationsdichte zu erkennen, jedoch können keine Rutschungsmerkmale kartiert werden. Rechts: Die gleiche Rutschung im DGM1. Rutschungsmerkmale sind gut zu erkennen und können so im GIS kartiert werden.

In dieser Arbeit wurde die Kartierung der Rutschungsverdachtsflächen hauptsächlich mit Hilfe von QGIS, unter Verwendung von hochauflösenden digitalen Geländemodellen, Luftbildern und den geologischen Karten, vorgenommen. Im ersten Schritt der Verdachtsflächenkartierung wurden "unruhige" Geländestrukturen im DGM gesucht, mit einem Punkt markiert. Diesem Punkt wurde dann ein Status zugewiesen. Er gibt an, wie sicher es ist, dass es sich bei der Fläche um eine Rutschung handelt. Ob es sich bei Flächen um eine Rutschung handelt, ist abhängig davon wie deutlich Rutschungsmerkmale im DGM zu erkennen sind. Je mehr Merkmale erkannt werden, umso sicherer handelt es sich um eine Rutschung (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Definitionen der Statusklassen. Der Status einer Rutschung gibt die Sicherheit an, ob es sich bei der kartierten Fläche um eine Rutschung handelt.

ID	Beschreibung Status
1	Rutschung, alle wichtigen Rutschungsmerkmale vorhanden
2	Deutlich identifizierte Rutschung, einzelne Merkmale fehlen
3	Identifizierte Rutschung, mehrere Rutschungsmerkmale fehlen (möglichweise überprägt)
4	Sehr stark unruhiges Gelände (möglicherweise überprägte/potenzielle Rutschung)
5	Unruhiges Gelände (potentielle Rutschung/ keine Rutschung)
6	Keine Rutschung; Steinbruch oder Abbau (anthropogen)

In Abbildung 24 sind zwei Beispiele solcher Verdachtsflächen gegenübergestellt. Sie zeigt links eine Verdachtsfläche, die mit dem Status 2 eingestuft wurde. Es handelt sich hierbei um eine Rutschung, bei der allerdings einzelne Merkmale fehlen. Sehr gut erkennbar ist die Abrisskante sowie die Grenzen der Rutschmasse. Rechts wurde eine Verdachtsfläche markiert und mit dem Status 5 versehen. Hauptaugenmerk hier ist das unruhige Gelände was auf eine potentielle oder überprägte Rutschung hinweisen kann. Außerdem könnten oberhalb Anfänge eines Abrisses oder ein überprägter Abriss zu erkennen sein.

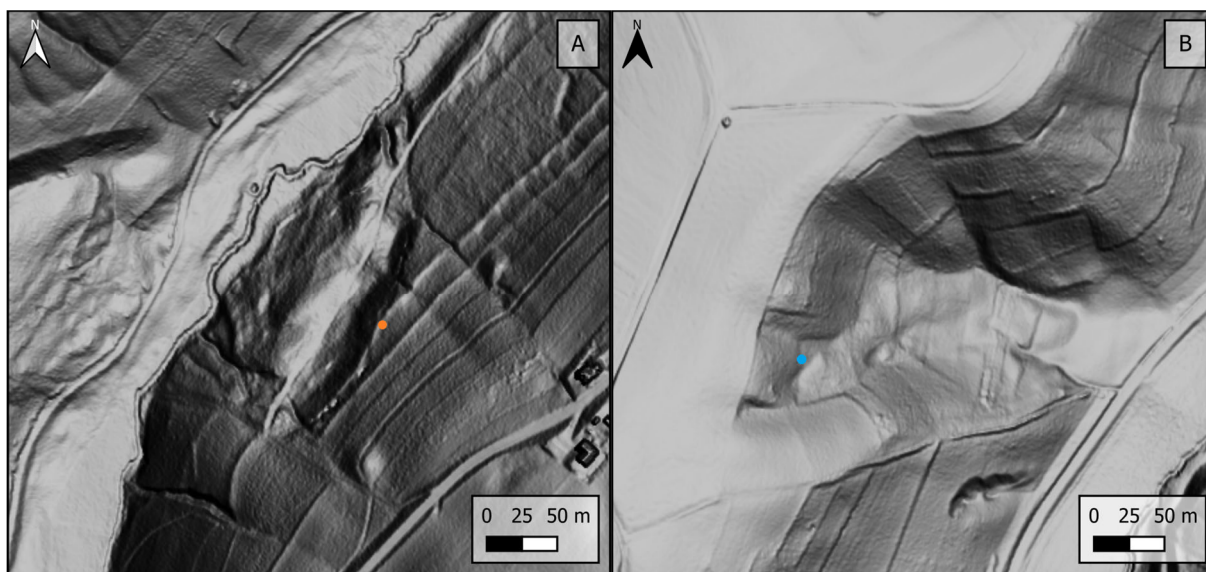


Abbildung 24: Der Vergleich von Flächen A) mit dem Status 2 und B) mit dem Status 5. A) Abrisskante ist erkennbar (orangener Punkt) außerdem ist die Rutschmasse zu erkennen die in Richtung Bach rutscht, was zu einer Bachlauf Änderung geführt hat. B) Hang weist unruhiges Gelände auf, möglicher überprägter Abriss (blauer Punkt).

Neben den Rutschungsmerkmalen wurde auch nach anderen Hinweisen zur Identifizierung von Hangbewegungen gesucht. Durch Rutschungen kann es z.B. zu einer Veränderung von Bach- oder Flussläufen kommen aber auch Infrastrukturen wie Straßen und Wege können von Rutschungen beeinflusst werden, was im DGM oftmals erkennbar ist. Zwei Beispiele hierfür sind in der nachfolgenden Abbildung 25 dargestellt.

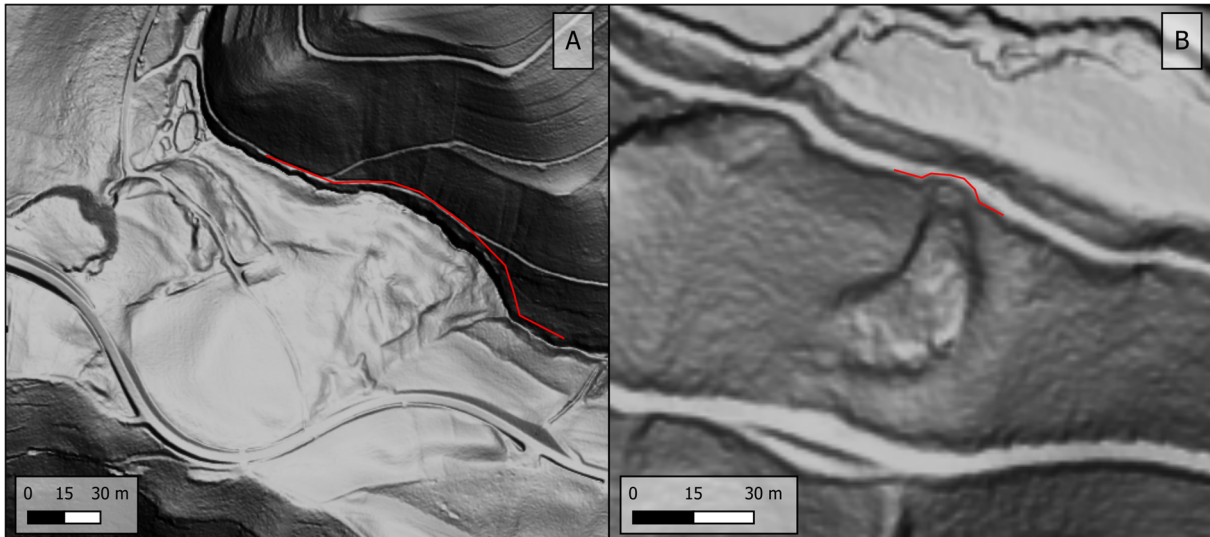


Abbildung 25: A) Zeigt die Veränderung eines Bachlaufs (rote Linie) durch hangabwärts gleitende Rutschmassen. B) Rutschmasse die hangabwärts auf einen Weg rutscht und somit zu einer Verengung führt (rote Linie).

Bei Ausschnitt A kam es womöglich durch eine große Rutschung zu einer Verengung des Tals und daraufhin zu einer Veränderung des darin fließenden Gewässers. In Abschnitt B wurde durch eine Rutschung Teil des darunter liegenden Weges blockiert. Solche Merkmale können neben den klassischen Rutschungsmerkmalen Aufschluss auf mögliche Bewegungen geben. Die mit diesen Methoden im GIS kartierten Verdachtsflächen wurden im nächsten Schritt, wenn möglich im Gelände aufgesucht, um ihren Status zu verifizieren und zusätzliche Informationen zu sammeln.

4.4.2 Überprüfung im Gelände

Im Gelände wurde Hauptaugenmerk auf morphologische Auffälligkeiten gelegt, die im Zusammenhang mit Rutschungen stehen könnten. Dazu gehörten, im oberen Teil der Hänge (unbewachsene) Steilhänge, morphologische Geländestufen, Dellen sowie Senken, die nicht auf einen anthropogenen Ursprung zurückzuführen waren. Der konkave Initialbereich der Rutschungen zeichnete sich dabei oft von den konvexen Formen des unteren Hangbereiches ab. Hier wurde besonders auf Buckel oder zungenartige Wülste geachtet wurde. Auch Verebnungsflächen zwischen Abriss- und Ablagerungsbereich wurden im Gelände öfter erkannt. Die Merkmale waren bei rezenten oder jüngeren Rutschungen noch gut erkennbar. Ältere Rutschungen waren durch Erosion und Vegetation oft so stark überprägt, dass sie häufig nur schwer zu erkennen waren und hier eine Einstufung eher

schwergefallen ist. Bei Abbildung 26 handelt es sich um eine Rutschung, die im DGM kartiert wurde und dann im Gelände aufgesucht wurde. Der Abriss befand sich dabei oberhalb des Hangs am Rande des Waldes. Neben der Abrisskante und Rutschmasse konnte im Gelände auch noch die Wulst erkannt werden. Die Rutschung konnte jedoch auf Grund der Vegetation und Größe nicht in ihrer Ganzheit fotografiert werden. Während den Geländeexkursionen kam es außerdem vor, dass Rutschungen entdeckt wurden, die vorher nicht im DGM erkannt wurden.



Abbildung 26: Foto einer Rutschung in einem bewaldeten Gebiet. Gut zu erkennen sind die Abrisskante sowie die Rutschmasse. Die Wulst konnte im Gelände auch erkannt werden ist jedoch im Bild nicht zu erkennen.

Abbildung 27 zeigt den oberen Teil so einer Rutschungen. Hier wurde auf einem Feld eine sehr kleine oberflächennahe Rutschung der Deckschichten entdeckt. Dabei handelte es sich um ein nur Monate altes Ereignis bei dem scheinbar nach Starkniederschlägen die oberen Erdschichten in Bewegung gerieten und so den darunter liegenden Weg bedeckten. Zur Zeit der Geländeaufnahme war der Weg geräumt, die Merkmale der Rutschung wie Abriss, Nassstellen und Wulst waren aber noch erkennbar.



Abbildung 27: Rutschung die zum Zeitpunkt der Aufnahme nur wenige Wochen alt war. Hier kam es durch Starkregen zum Abgang der Deckschichten auf einem Feld. Wobei der unterhalb liegende Weg beschädigt wurde.

Auch die Vegetation gab oft Hinweise auf mögliche Hangbewegungen. Die Krümmungen von Stämmen (Säbelwuchs) oder die Stellung der Äste kann Informationen liefern, um welche Art von Bewegung es sich handelt und welches Alter die Rutschung hat (PRINZ & STRAUB 2011). Deshalb wurde im Gelände auch auf die in der Verdachtsfläche liegende Vegetation geachtet (siehe Abbildung 28). An steileren Hängen kann Säbelwuchs eine reine Folge der Hangneigung sein und sollte deshalb mit Vorsicht betrachtet werden (PRINZ & STRAUB 2011). Es wurde außerdem auf fehlenden Baumbestand, Zerrungserscheinungen in der Grasdecke geachtet. Auch Zerrung von Baumwurzeln an möglichen Abrissen kann ein Indiz für Bewegung sein. Ein weiterer Hinweis für Bewegungen des Hangs waren auch Schäden an Infrastrukturen wie z.B. Straßen und Wege die nicht auf die Benutzung zurückzuführen waren.

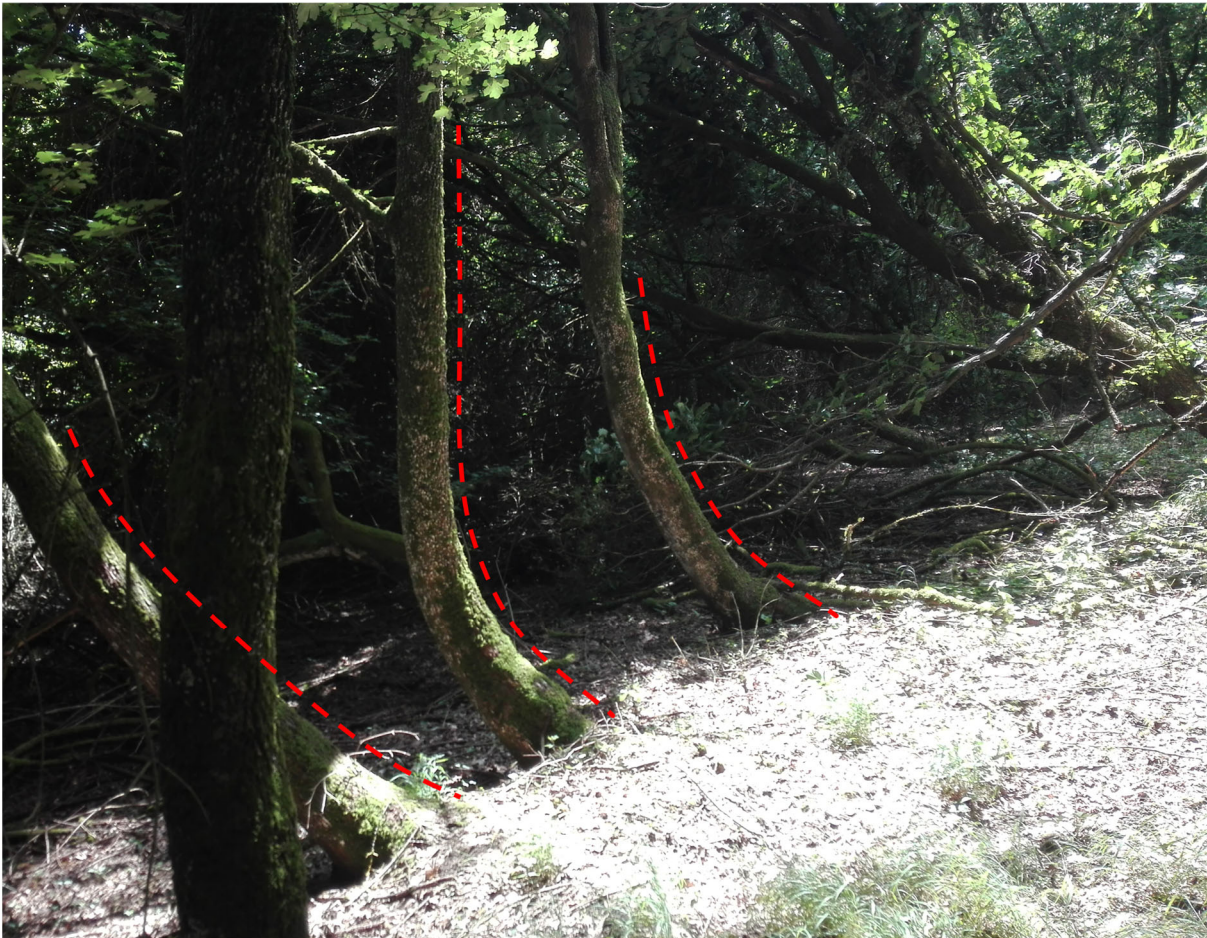


Abbildung 28: Beispiel von Säbelwuchs im Gelände. Aus der Krümmung des Stammes und der Richtung der Jungtriebe können Rückschlüsse auf Bodenbewegungen gezogen werden.

Je nach Vegetationsdichte und Wetter nahm die Überprüfung der Verdachtsflächen mehr oder weniger Zeit in Anspruch. Der Status des Punktes wurde je nach Beschaffenheit der vermuteten Rutschung nach der Geländebegehung angepasst. Es wurden außerdem Notizen und wenn möglich Fotos zu möglichen Merkmalen und der Morphologie gemacht. Alle diese im Gelände gesammelten Informationen wurden später in das Inventar mit aufgenommen.

4.4.3 Erstellung des Rutschungsinventars

Nachdem die Verdachtsflächen im Gelände verifiziert wurden, bestand der nächste Schritt bei der Erstellung des Rutschungsinventars darin, die Flächen in QGIS mithilfe des DGM zu kartieren. Als erstes wurden zu allen Punkten die Rutschungsflächen als Polygone kartiert und gespeichert. Die einzelnen Merkmale von Rutschungen, wurden wenn im DGM erkennbar ebenfalls auskartiert. Abbildung 29 zeigt eine in QGIS aufbereitete Rutschung des Rutschungsinventars. Im unteren Hangbereich zeichnet sich ein Rutschungsfuß (blaue Fläche) ab, die rote Linie zeigt die stark ausgeprägte Abrisskante im Abrissgebiet (gelbe Fläche) der Rutschung an.

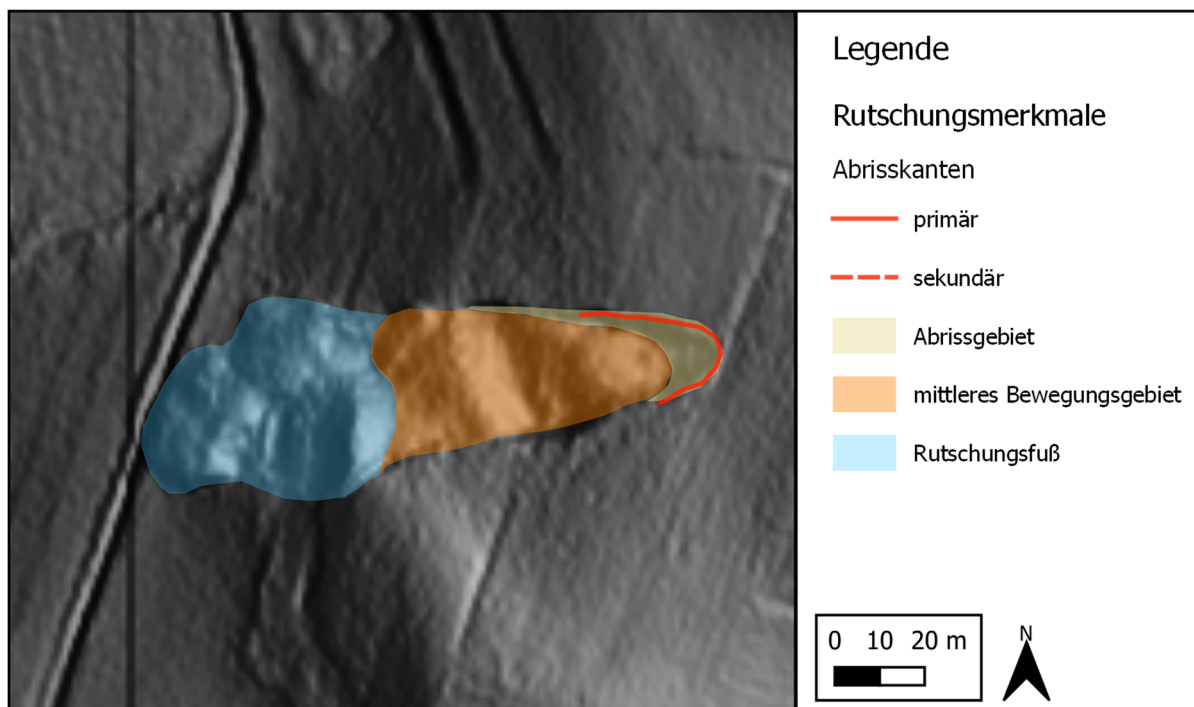


Abbildung 29: Kartierte Rutschung im Saar-Nahe-Gebiet. Hier wurde der gesamte Einflussbereich der Rutschung dargestellt. Die gelbe Fläche stellt den Abrissbereich mit der Abrisskante (rote Linie) dar. Die Wulst wird durch die blaue Fläche dargestellt und das mittlere Bewegungsgebiet durch die orangefarbene Fläche.

Für eine zuverlässige Inventarisierung ist die Unterscheidung der verschiedenen Bewegungstypen und Massen unerlässlich. Dabei wurde sich an der in Kapitel 2.2 eingeführten Klassifizierung orientiert. Bei der Benennung der Rutschungstypen wurde hier von der Bewegung in der Initialphase des Ereignisses ausgegangen. Außerdem wurden mögliche Übergänge in andere Bewegungsformen außen vorgelassen. Auch das bewegte Material spielt eine entscheidende Rolle, da je nach tiefe der Rutschung andere beeinflussende Faktoren und Auslöser bei der Initiierung entscheidend sind. Das so erstellte Rutschungsinventar enthält zusätzlich Informationen aus den möglichen Geländebegehungen sowie Bemerkungen zu den Flächen. Außerdem enthält das Inventar die Koordinaten der Rutschungen, in Rechts- und Hochwert und die TK-Blattnummer, auf der die Fläche liegt. Das Rutschungsinventar wurde außerdem mit der Rutschungsdatenbank RLP verglichen und auf Überschneidungen geprüft. Wenn möglich wurde dann die ID der Rutschung aus der Datenbank hinterlegt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Die Begriffserklärung der Felder in der Attributtabelle des erstellten Rutschungsinventars.

Kürzel	Beschreibung
ID	Bei Kartierung zugewiesene ID
Status_1	Der Status einer Verdachtsfläche gibt die Sicherheit an, ob es sich bei der im DGM
Bem	Etwaige Bemerkungen zur Verdachtsfläche (VDA)
Status_RDB	Status der Verdachtsfläche in der Rutschungsdatenbank vom LGB
GrCh	Wurde die VDA im Gelände geprüft
Stat_GC	Status nach Geländebegehung (gleich Zuordnung wie Status_1)
GC_Bem	Bemerkungen zur Geländebegehung
Rechts	Rechtswert
Hoch	Hochwert
TK25	TK-Blattnummer auf welchem die VDA liegt
RDB_ID	ID der dazugehörigen Rutschung in der Rutschungsdatenbank LGB
RDB_ID2	Mögliche andere Rutschung die der VDA zugeordnet werden kann
ID_Bewegungsart	ID für die Bewegungsart der Rutschung
ID_Material	ID für Material das bewegt wird

4.4.4 Rutschungsinventar in den Untersuchungsgebieten

Insgesamt wurden in beiden Untersuchungsgebieten 850 Rutschungsverdachtsflächen in das Rutschungsinventar aufgenommen. Wovon jedoch nur 505 Flächen im DGM als Rutschungen klassifiziert wurden. In den Untersuchungsgebieten variieren Rutschungen in Art und Größe von großen komplexen und tiefen, bis hin zu kleinen flachen Rutschungen. Durch die hochauflösenden DGMs und die Geländebegehungen konnte in der Regel grob zwischen verschiedenen Rutschungstypen unterschieden werden.

Insgesamt wurden im Saar-Nahe-Gebiet 379 Verdachtsflächen als Rutschungen mit dem Status 1 bis 3 klassifiziert. Auf Grundlage der DGMs und den Überprüfungen im Gelände konnten die Rutschungen in verschiedene Rutschungstypen klassifiziert werden. Die größeren Rutschungen im Saar-Nahe-Gebiet konnten dabei nach der Klassifizierung von HUNGR et al. (2014) als Felsrutschungen (Rotations- oder Translationsrutschungen) klassifiziert werden. Dabei handelt es sich um tiefliegende Rutschungen von anstehenden Gesteinsmassen. Zum Großteil handelt es sich dabei um fossile und rezente Rutschungen, die nicht mehr aktiv sind, sich aber möglicherweise durch Änderungen am Hanggleichgewicht reaktivieren können. Ein genaues Alter kann durch die Kartierung im DGM und eine einfache Geländebegehung nicht festgestellt werden. Bei den kleineren Rutschungen im Untersuchungsgebiet 1 handelt es sich vermutlich um flache Rutschungen der Deckschichten. Bei diesen Rutschungen gleiten Lockergesteine wie Bodenmassen oder Schutt hangabwärts. Sie sind durch Verlagerungen der Lockergesteinsdecke in der Regel als flachgründige, translative Rutschungen ausgebildet. Bei diesen Rutschungen im Saar-Nahe-Gebiet handelt es sich meist um rezente Bewegungen, die innerhalb der letzten Jahrzehnte aktiv waren bzw. ausgelöst wurden. Aufgrund ihrer Entstehung und der nur oberflächennahen Bewegungen würden ältere Rutschungen im DGM nicht mehr gut zu erkennen sein. Vereinzelt wurden im Untersuchungsgebiet bei den Geländebegehungen auch „frische“ Deckschichtenrutschungen gefunden, die erst einige Monate alt waren. Meist waren diese auf Äckern oder landwirtschaftlichen Flächen zu finden. Im Saar-Nahe-Gebiet wurden 232 Flächen so als oberflächennahe Deckschichtenrutschungen identifiziert und 147 als Felsrutschungen (Abbildung 30). Die Flächen der Felsrutschungen reichen von wenigen Quadratmetern bis $0,67 \text{ km}^2$. Im Gegensatz dazu liegen die Flächen der Deckschichtenrutschungen mit maximal $0,11 \text{ km}^2$ deutlich darunter.

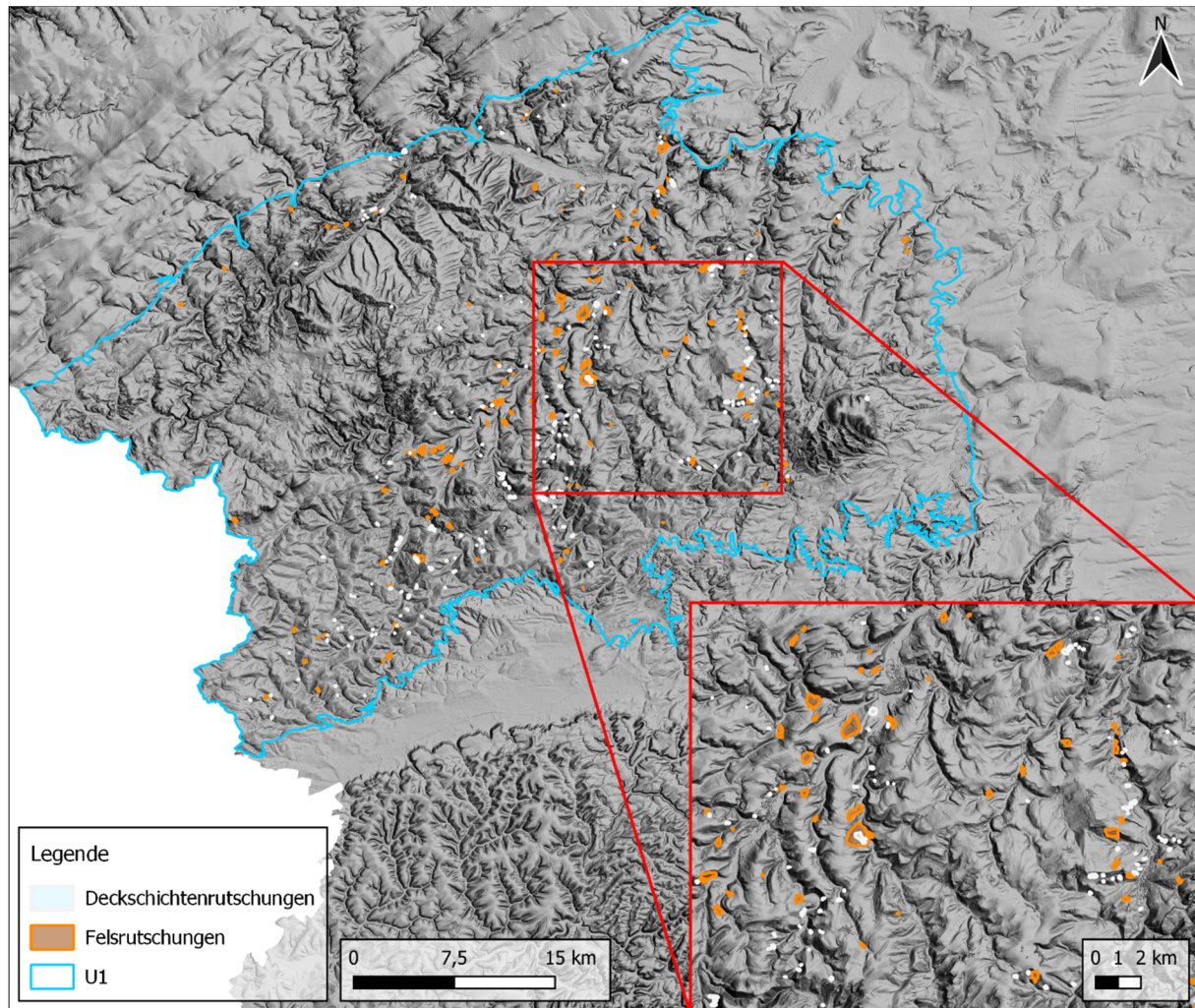


Abbildung 30: Die Rutschungsinventarkarte für das Saar-Nahe-Gebiet (U1). Sie zeigt, wie die zwei Rutschungstypen im Gebiet verteilt sind. Im roten Rechteck sind im Untersuchungsgebiet besonders viele Rutschungen im LIDAR erkennbar.

Im Mainzer Becken wurden 126 Verdachtsflächen laut dem Status als Rutschungen klassifiziert. Die Größen der Rutschungen reichen von 888 m² bis 2,25 km². Meist sind dabei gesamte Hänge von Rutschungen betroffen (siehe Abbildung 31). Dabei handelt es sich größtenteils um fossile Rutschungen, die jedoch durch kleinere Eingriffe ins Hanggleichgewicht und/oder stärkere Niederschläge reaktiviert werden können. Eine bekannte aktive Rutschung liegt am Rande des Mainzer Beckens bei Mandel (siehe Kapitel 3.2.3). Für das Mainzer Becken wurde keine weitere Differenzierung der Rutschungen vorgenommen, da die Rutschungen im DGM nicht ausreichend differenziert werden konnten.

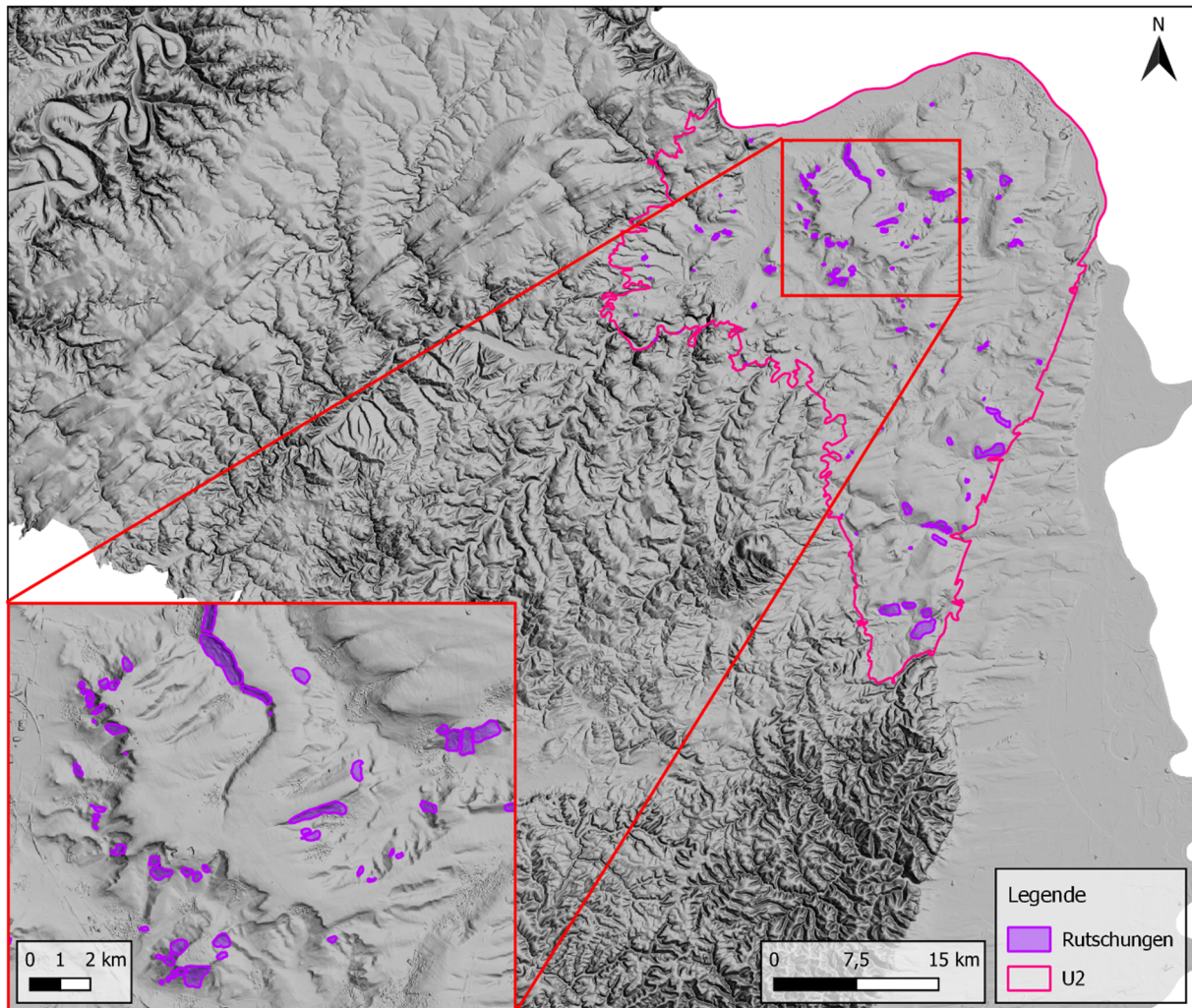


Abbildung 31: Die Rutschungsinventarkarte für das Mainzer Becken (U2). Die Rutschungen sind gleichmäßig an den Hängen im gesamten Untersuchungsgebiet verteilt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Rutschungen des Saar-Nahe-Gebiets vereinfacht als Felsrutschungen (tiefliegend) und Deckschichtenrutschungen (flach/oberflächennah) bezeichnet. Im Mainzer Becken werden die Bewegungen einfach als Rutschungen bezeichnet, da sie nicht weiter in Typen klassifizierbar waren. Aufgrund der Erstellungsmethode des Inventars kann jedoch nicht garantiert werden, dass diese Begrifflichkeiten immer korrekt sind. Abhängig von verschiedenen Faktoren wie dem Bearbeiter, der verwendeten Klassifikation oder der spezifischen Problematik können die in den Untersuchungsgebieten vorkommenden Rutschungen auch anders klassifiziert werden.

Nachdem das Rutschungsinventar aufbereitet wurde, bestand das Verfahren darin die Rutschungsinventare in Trainings- und Testdatensätze für die Modellentwicklung und Bewertung aufzuteilen.

4.4.5 Trainings- und Testdatensätze

Für die Suszeptibilitätsanalyse werden Trainings- und Testdatensätze benötigt, die aus dem vorhandenen Rutschungsinventar erstellt wurden. Diese Daten dienen unterschiedlichen Zwecken:

- Trainingsdaten: Der Datensatz, auf dem ein Modell "trainiert" wird. Die Trainingsdaten sind in der Regel größer als die Testdaten, da das Modell so viele Daten wie möglich zum Finden sinnvoller Muster braucht. In dem spezifischen Fall dieser Arbeit werden mithilfe dieser Daten die Anfälligkeitswerte für die einzelnen Parameter berechnet, mit denen später die rutschungsanfälligen Flächen identifiziert werden.
- Testdaten: Der Datensatz für die finale Beurteilung des berechneten Modells. Mit diesen Daten wird überprüft, ob das Modell auf bislang ungesehenen Daten, die richtigen Vorhersagen trifft. In diesem Fall wird überprüft, ob die mit den Trainingsdaten berechneten rutschungsanfälligen Flächen auch in den Rutschungsflächen der Testdaten liegen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Aufteilung von Inventaren in Trainings- und Testdatensätze. In der Literatur wurden dafür zeitliche, räumliche oder zufällige Auswahlstrategien genutzt. Bei der zeitlichen Auswahl werden Rutschungsflächen auf der Basis von zeitlichen Informationen in zwei Gruppen aufgeteilt. Beispiel dafür ist die Aufteilung von Rutschungen, die vor und nach einem bestimmten Datum bekannt sind. Dabei beinhaltet der Testdatensatz in der Regel die aktuelleren und der Trainingsdatensatz die älteren Ereignisse. Bei der räumlichen oder zufälligen Auswahl werden die Flächen auf der Grundlage räumlicher Kriterien segmentiert. Im Fall der räumlichen Auswahl repräsentiert der Testdatensatz typischerweise einen anderen Teil des Gebiets als der Trainingsdatensatz. Im Fall der zufälligen Auswahl werden die Trainings- und Testdatensätze durch eine zufällige geografische Auswahl gewonnen (REICHENBACH et al. 2018). Die meisten Studien greifen auf eine zufällige Auswahl der Trainings- und Testdatensätze zurück (REICHENBACH et al. 2018; SAMEEN et al. 2020).

Neben der Auswahlmethode wird auch der Prozentsatz der Trainings- und Testdaten als entscheidend für die Rutschungssuszeptibilitätsanalysen angesehen. Dabei sollte die Größe des Trainingsdatensatzes systematisch und nicht zufällig bestimmt werden. Ist der Trainingsdatensatz zu klein werden die räumliche Variabilität der beeinflussenden Faktoren möglicherweise nicht gut erkannt. Wohingegen ein zu großer Trainingsdatensatz aufgrund der räumlichen Autokorrelation die Annahmen der unabhängigen Beobachtung beeinträchtigen kann. Zusätzlich zur Anzahl der Trainings- und Testdatensätze spielt auch die Qualität der Daten eine entscheidende Rolle bei der Leistung von Modellierungsansätzen (SAMEEN et al. 2020).

Für die vorliegende Studie wurde eine zufällige Aufteilung der Untersuchungsgebiete in Trainings- und Testdatensätze gewählt. Es wurden verschiedene Prozentsätze von Trainings- und Testdaten getestet, und zwar im Verhältnis von 50/50, 60/40 und 70/30. Bei der Verwendung eines geringeren Trainingsdatensatzes nahmen aufgrund der Rutschungsdichte die Werte im Allgemeinen stark ab, wodurch es zu geringerer Korrelation zwischen Parametern und Rutschungen kam. Aus diesem Grund wurde ein höherer Anteil an Trainingsdaten und ein niedrigerer Satz für die Testdaten gewählt. Für die vorliegende Studie wurde deshalb eine zufällige Aufteilung der Rutschungsdatsätze in 70 % Trainings- und 30 % Testdaten gewählt.

4.5 TOBIA (Lagerungsverhältnisse)

Die Vorbereitung von Parametern wie Geomorphologie und Lagerungsverhältnissen für die Erstellung von digitalen Rutschungssuszeptibilitätskarten für Massenbewegungen durch Geländekartierungen ist eine kostspielige und zeitaufwendige Aufgabe. Der Einsatz von Fernerkundungsdaten kann jedoch dazu beitragen, den Zeit- und Kostenfaktor in diesem Bereich zu optimieren. Um detaillierte Informationen über die Orientierung geologischer Formationen zu erfassen, wurde im Rahmen des Projekts eine GIS-gestützte halbautomatische Methode zur Gewinnung von flächendeckenden Daten geologischer Lagerungsverhältnisse entwickelt. Diese Methode basiert auf der Verwendung von digitalen Geländemodellen, um parallele Geländekanten als Ausbisslinien geologischer Formationen nachzuvollziehen. Die daraus gewonnenen Einfallswinkel werden dann mit dem *Topographic Bedding Intersection Angle* (TOBIA) -Modul von MEENTEMEYER & MOODY (2000) verwendet, um entsprechende Lagerungsverhältnisse der geologischen Schichten zu berechnen. Das TOBIA-Modul ist eine SAGA-GIS-Anwendung, die den Winkel zwischen Topographie und geologischen Schichtflächen bestimmt und darstellt. Es benötigt vier Variablen, darunter Hangneigung, Exposition, Einfallswinkel und -richtung. Da einer der Hauptfaktoren bei der Entstehung von Rutschungen die Lagerungsverhältnisse der Geologie darstellt und dieser erweiterte TOBIA Ansatz innerhalb des MABEIS-Projektes neu entwickelt wurde, wird das Modell im Folgenden deutlich detaillierter beschrieben als andere in der Arbeit verwendete Parameter.

4.5.1 Morpho-Lines

Sedimentärer Festgesteine und deren geologische Strukturen sind in hochauflösenden digitalen Geländemodellen häufig leicht zu identifizieren. In den meisten Fällen lassen sich bestimmte Geländeformationen durch ausgeprägte Kanten und Hebungen charakterisieren, die sich periodisch in einer Richtung wiederholen (Abbildung 32). Um die Lagerungsverhältnisse solcher Strukturen anhand von DGMs zu ermitteln, wurde das Konzept von SANTANGELO et al. (2015) genutzt. Dabei kamen GIS-basierte Algorithmen zum Einsatz, um das Einfallen von sogenannten *bedding traces* (dt.: Schichtlinien) zu berechnen. Ähnliche Ergebnisse konnten auch von BANERJEE & MITRA (2004) sowie CRACKNELL et al. (2013) erzielt werden, um das Einfallen geologischer Schichten zu bestimmen. Angelehnt an das Konzept wurden diese Merkmale in QGIS als Linien digitalisiert, die im weiteren Verlauf der Arbeit als *Morpho-Lines* (MLs) bezeichnet werden. Dieser allgemeinere Begriff wurde eingeführt, um in Zukunft auch andere strukturelle Merkmale wie Kluft- oder Störungsflächen mit einzubeziehen (WERNER et al. 2021).

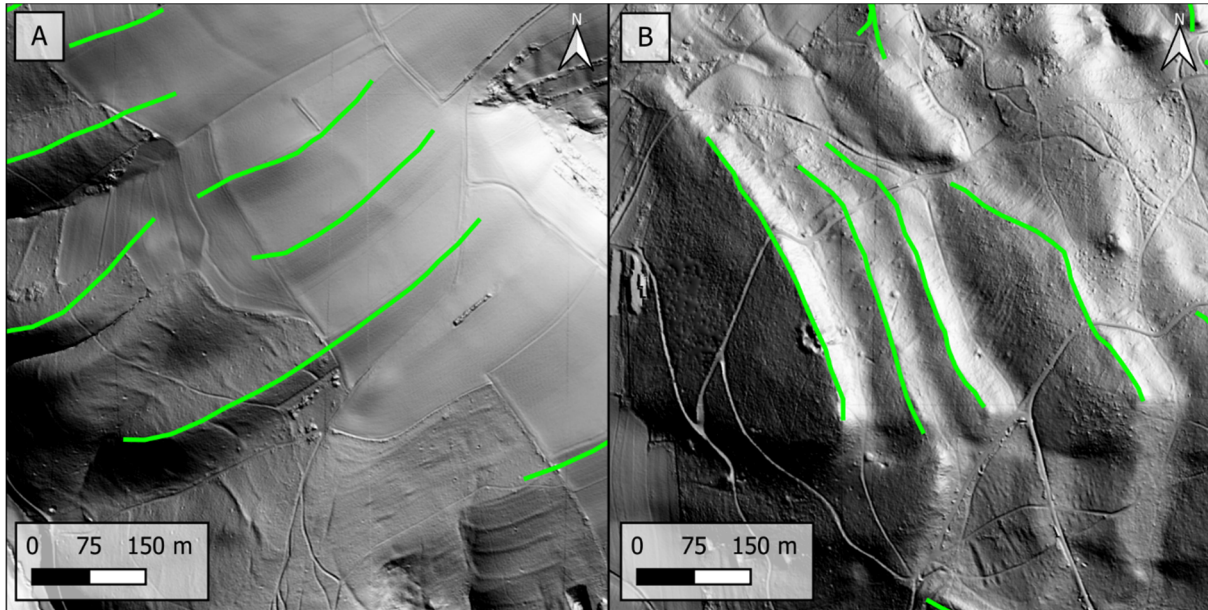


Abbildung 32: Darstellung von Morpho-Lines (grün), die Geländekanten erfassen. Die Grafik zeigt zwei typische Beispiele für die stufenhafte (periodische) Geometrie von geologischen Schichten.

Bereiche, in denen MLs fehlten, erforderten zusätzliche Daten, um die Genauigkeit des Modells zu erhöhen. In ausgewählten Gebieten wurden deshalb Geländemessungen durchgeführt um Standorte ohne MLs zu modellieren. Diese Daten konnten außerdem genutzt werden, um die berechneten Lagerungsverhältnisse zu validieren. Neben den *Morpho-Lines* wurden außerdem noch *Synthetic-Lines* (SL) mit gleicher Funktion hinzugefügt. Diese dienen der Schließung von Informationslücken und orientieren sich nicht an der Morphologie. Eine SL kann beispielsweise zwischen zwei weit entfernten *Morpho-Lines* gesetzt werden. Voraussetzung dafür sollte jedoch sein, dass an der Stelle ebenfalls die Lagerungsverhältnisse der ML vorliegen. Dies erfordert jedoch eine detaillierte Kenntnis der vorliegenden Geologie. Außerdem wurden *Synthetic-Lines* genutzt, um bekannte Lagerungsverhältnisse aus geologischen Karten oder durch Geländemessungen in das Gebiet zu übertragen (WERNER et al. 2021).

Um diese Geländearbeit zu vereinfachen und Aufschlüsse effizienter und schneller zu finden, wurde ein spezieller Index entwickelt. Dieser basiert auf einem hochauflösten (1 m) bzw. einem sehr hochauflösten (20 cm) digitalen Höhenmodell. Dieser Index (SIDX/HDSIDX) wurde als Quotient aus der realen Oberfläche (engl.: *surface*) des Geländes und der Hangneigung (engl.: *slope*) nach der folgenden Formel berechnet (WERNER et al. 2021):

$$surface\ index = \frac{\log(surface)}{\log(slope)} \quad (1)$$

Der Index zeigt geologische Aufschlüsse mit hoher Auflösung und Präzision an, wie in Abbildung 33 dargestellt ist. Aufschlüsse oder anthropogenes Mauerwerk weisen Werte größer null auf, Werte kleiner null hingegen weisen nur auf steiles Gelände hin (WERNER et al. 2021). Die Auswertung der *Surface* Indizes im Zuge einer Abschlussarbeit zeigte eine hervorragende Trefferquote im Gelände. Die beiden *Surface* Indizes (SIDX & HDSIDX) eignen sich aufgrund ihrer sehr guten Genauigkeit für die digitale Detektion von Aufschlüssen im Gelände. Dabei ergänzen sich die Stärken beider Indizes, wodurch der Fehler weiter minimiert werden kann. Durch seine hohe Vorhersagegenauigkeit kann der HDSIDX dazu beitragen, diejenigen Flächen zu identifizieren, die vom SIDX fälschlicherweise als Aufschluss erkannt wurden, aber keine sind. Der SIDX kann hingegen dazu beitragen, Aufschlüsse zu identifizieren, die vom HDSIDX nicht erkannt wurden (PAUSAR 2023). Die Aufschlusskarten können somit verwendet werden, um gezielt nach einmessbaren Aufschlüssen zu suchen und um Geländemessungen sowie Gesteinsbeschreibungen durchzuführen (WERNER et al. 2021).

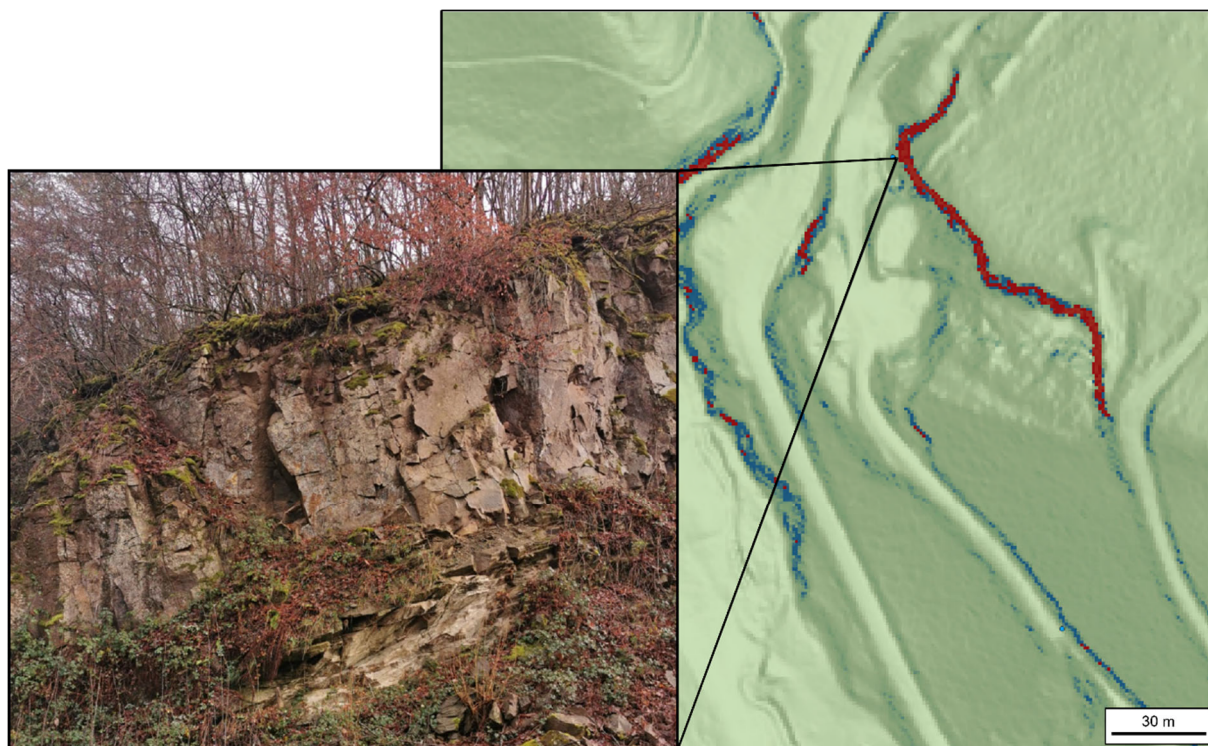


Abbildung 33: Farbcodierte Darstellung eines Aufschlusses im Saar-Nahe-Gebiet im GIS. Die Aufschlüsse sind rot, das steile Gelände blau dargestellt (aus WERNER et al. 2021).

4.5.2 Berechnung der Einfallswerte

Für die Berechnung der Orientierung geologischer Schichten wurde in MATLAB ein automatischer Ansatz entwickelt, der die geografische Lage der *Morpho-Lines* nutzt, um Werte für Einfallswinkel und -richtung zu berechnen. Dazu werden anhand der MLs Ebenen interpoliert, die in ihrer Annäherung die geologischen Schichten darstellen. Um dies zu ermöglichen, werden die Linien zunächst in ihre Stützpunkte zerlegt. Anschließend wird jedem Punkt die x-, y- und z-Koordinaten des Geländemodells zugeordnet. Mit dem *Curvefitting*-Tool in MATLAB kann dann eine Ebene durch die *Morpho-Line* interpoliert werden, wobei das Tool automatisch die *Least-Squares*-Methode verwendet (WERNER et al. 2021). Nach GAVIN (2011) werden bei diese Methode die Parameter einer Gleichung iterativ bestimmt, um sicherzustellen, dass die Summe der quadratischen Abweichung von allen Messpunkten zur Funktion am kleinsten ist. Obwohl der Algorithmus mehr Iterationen erfordert, liefert er robuste Ergebnisse unabhängig von guten Startwerten. Für jede *Morpho-Line* werden dann die angepassten Ebenenparameter (a,b,c,d) ausgewählt und zur Bestimmung des Normalvektors verwendet. Durch die Beziehung zwischen der Normalform und der Koordinatenform kann aus den Ergebnissen der Normalvektor $\vec{n} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$ ausgewählt werden (WERNER et al. 2021).

Im Folgenden werden die zur Berechnung der Einfallswerte verwendeten Gleichungen aus WERNER et al. 2021 aufgeführt. Der Einfallswinkel ist geometrisch äquivalent zum Winkel zwischen der z-Achse und dem Normalenvektor und kann daher mithilfe von Gleichung (2.0) ermittelt werden.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{c}{r}\right) \quad (2.0)$$

Dabei ist c die z-Koordinate für den Normalenvektor und r steht für die Länge des Normalenvektors (Gl. 2.1).

$$r = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (2.1)$$

Um die Einfallsrichtung zu berechnen, wird die Projektion des Normalenvektors m auf die Horizontalebene gemäß Gleichung 2.2 bestimmt. Anschließend kann der Winkel α zwischen m und der x-Achse berechnet werden.

$$m = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.2)$$

Wie bei SANTANGELO et al. (2015) werden die Koordinaten des Normalenvektors gemäß Gleichung (2.3) bis (2.6) auf die korrekten Quadranten der Clar-Notationen projiziert.

$$0^\circ\text{-}90^\circ \quad \text{I: } \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{a}{m}\right) \quad ; \quad \text{wenn } a \geq 0 \ \& \ b \geq 0 \quad (2.3)$$

$$270^\circ\text{-}360^\circ \quad \text{II: } \alpha = 180 - \sin^{-1}\left(\frac{-a}{m}\right) \quad ; \quad \text{wenn } a < 0 \ \& \ b \geq 0 \quad (2.4)$$

$$180^\circ\text{-}270^\circ \quad \text{III: } \alpha = 180 + \sin^{-1}\left(\frac{-a}{m}\right) \quad ; \quad \text{wenn } a < 0 \ \& \ b < 0 \quad (2.5)$$

$$90^\circ\text{-}180^\circ \quad \text{IV: } \alpha = 360 - \sin^{-1}\left(\frac{a}{m}\right) \quad ; \quad \text{wenn } a \geq 0 \ \& \ b < 0 \quad (2.6)$$

Um die Qualität der Anpassung der Punkte an die Ebene zu bewerten, werden zusätzlich der Determinationskoeffizient (R^2) und der mittlere quadratische Wurzelfehler (RMSE) berechnet. Je höher R^2 und je niedriger der RMSE, desto besser die Korrelation (KELLEY 1999). Punkte mit einer schlechten Korrelation wurden anschließend aus dem Modell entfernt (WERNER et al. 2021).

4.5.3 Interpolation

Für die räumliche Interpolation der Einfallswerte aus den *Morpho-Lines*, *Synth-Lines* und Geländemessungen wurde ein SAGA-Modul verwendet, das mithilfe von Thiessen-Polygonen Punktdaten in die Fläche interpoliert (WERNER et al. 2021). Bei dieser Methode werden keine neuen Werte für unbekannte Punkte aus den wenigen vorhandenen Werten an Messpunkten berechnet. Stattdessen wird das Gebiet in eine Anzahl an Polygone aufgeteilt. Dabei liegt jeder Punkt in einem Polygon dem zugehörigen Messpunkt am nächsten. Die Punkte in einem Polygon erhalten dadurch denselben Wert wie der zugehörige Messpunkt. So entsteht eine homogene Werteverteilung innerhalb der Polygone. An den Kanten kommt es jedoch zu Sprungstellen, die sich allein aus dieser Rechenmethode ergeben. Zur Konstruktion der Thiessen-Polygone werden die Mittelsenkrechten der Verbindungen zwischen den benachbarten Punkten bestimmt. Diese Mittelsenkrechten schneiden sich

im Umkreismittelpunkt des zugehörigen Dreiecks. Diese Umkreismittelpunkte bilden die Ecken der Thiessen-Polygone und die Mittelsenkrechten bilden die Kanten (DE LANGE, 2020). Sie beschreiben hier den mittleren Abstand zwischen den umliegenden Punktwerten der Messdaten, der berechneten Einfallswerte. Abbildung 34 zeigt die Erstellung solcher Thiessen-Polygone. Diesen Polygonen werden anschließend die Messwerte, bzw. berechneten Einfallswerte zugeordnet und somit in die Fläche interpoliert.

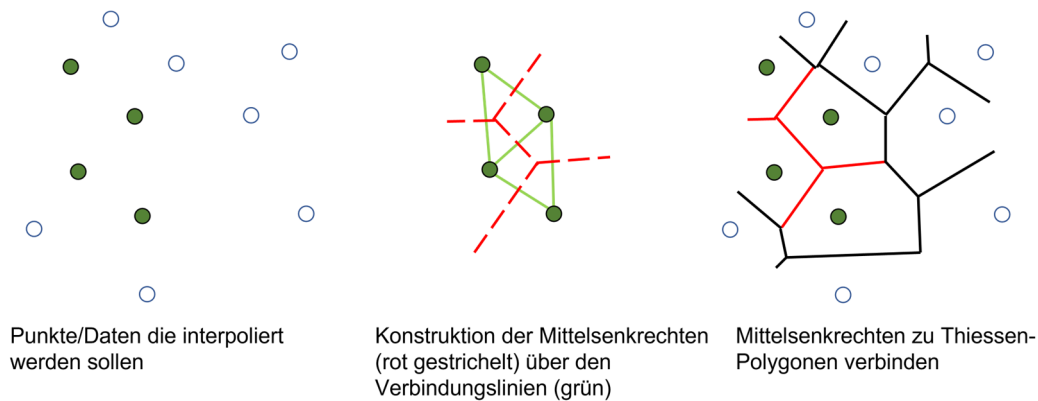


Abbildung 34: Die schematische Darstellung der Erstellung von Thiessen Polygonen (modifiziert nach DE LANGE 2020).

Durch das in SAGA-GIS verwendete Modul können außerdem Störungen, Flussläufe sowie Vulkanite als „Break-Lines“ in die Interpolation integriert werden. Sie dienen als Grenzen für die Berechnung der Polygone. Mit Hilfe des Tools wird ein Polygon-Raster erstellt, über das man die gewünschten Messdaten automatisch in die Fläche erweitern kann und gleichzeitig definierte Break-Lines berücksichtigt werden (Abbildung 35) (WERNER et al. 2021).

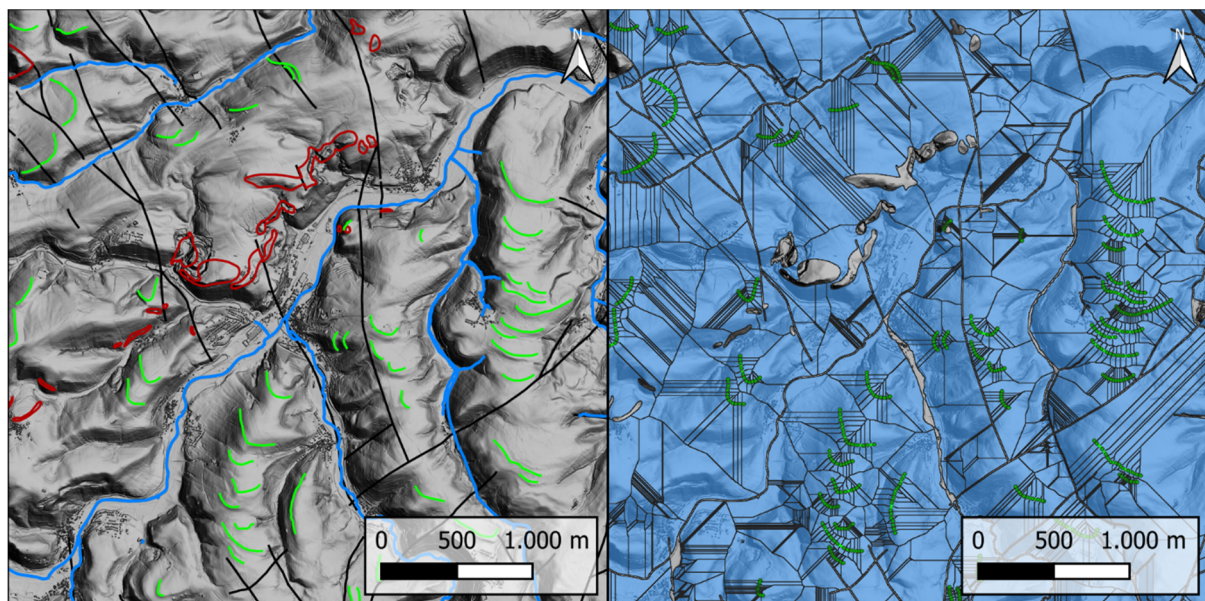


Abbildung 35: Links: Ausschnitt des DGMs innerhalb des U1 mit Morpho-Lines (grüne Linien) und Vulkaniten (rote Linien), Störungen (schwarze Linien) und Flussläufen (blaue Linien) als Break-Lines. Rechts: Die errechneten Polygone die nur bis an den Rand der Break-Lines konstruiert werden.

4.5.4 Erweitertes TOBIA Modell

Das kategorische TOBIA Modell klassifiziert Flächen anhand der Winkeldifferenz zwischen Einfallrichtung des Hanges und der Einfallrichtung der geologischen Schicht. Es weist so jedem Hang einen Hangtypen zu. Die Ausrichtung einer Gesteinsformation kann zur Klassifizierung des Hangs verwendet werden, wenn eine ausgeprägte Schichtung oder Schieferung vorhanden ist. Anhand dieser können Hänge in drei grundlegende Klassen eingeteilt werden: anaklinale, kataklinale und orthoklinale Hänge (Abbildung 36). Bei kataklinalen Hängen fällt die geologische Schicht in die gleiche Richtung ein wie der Hang. Bei anaklinalen Hängen hingegen fällt die Schicht in die der Topographie entgegengesetzte Richtung ein. Orthoklinale Hänge sind definiert als Hänge, die senkrecht zur Schicht verlaufen unabhängig ihrer Lage im Raum (CRUDEN 1989; CRUDEN & HU 1996).

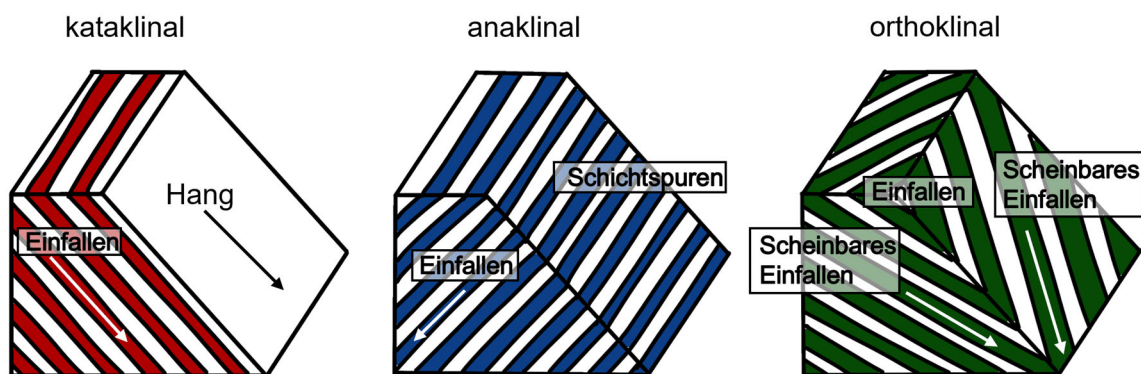


Abbildung 36: Die drei Hauptangtypen des TOBIA Modells. Eigene Darstellung nach MEENTEMEYER & MOODY (2000).

Die Einteilung der Hangklassen erfolgt durch die Berechnung der Sehnenlänge (L) auf dem Einheitskreis. Die Sehnenlänge ergibt sich aus dem Winkel zwischen Hangausrichtung A und Einfallrichtung α (MEENTEMEYER & MOODY 2000). Sie wird durch folgende Funktion (GL. 3) mit Werten zwischen 0 und 2 beschrieben:

$$L = \sqrt{(\cos \alpha - \cos A)^2 + (\sin(\alpha) \sin(A))^2} \quad (3)$$

Nach MEENTEMEYER & MOODY (2000) werden Sehnenlängen im Bereich $0 \leq L \leq 0,7654$ kataklinalen Hängen zugeordnet, Längen von $0,7654 < L \leq 1,8478$ orthoklinalen Hängen und der Bereich $1,8478 < L \leq 2$ den anaklinalen Hängen. Zusätzliche Winkelbedingungen unterteilen kataklinale und anaklinale Hänge weiter (MEENTEMEYER & MOODY 2000). Diese Einteilung erfolgt anhand der Winkelbeziehung zwischen der Hangneigung S und dem Einfallswinkel der geologischen Schicht ϑ (siehe Tabelle 6).

Frühere Modelle wiesen einen hohen Anteil (~50%) an orthoklinalen Hängen auf, was zu erwarten ist, da orthoklinale Hänge, Gebiete mit $45^\circ < \alpha - A \leq 135^\circ$ und $225^\circ < \alpha - A \leq 315^\circ$ umfassen. Diese Bereiche schließen 50 % des gesamten Winkelbereichs ein (Abbildung 37, links) (WERNER et al. 2021). Infolgedessen wurden anfänglich viele Rutschungsflächen an orthoklinalen Hängen gesichtet. Von dem von MEENTEMEYER & MOODY (2000) entwickelten ursprünglichen TOBIA-Modell werden keine weiteren Unterteilungen in Subklassen wie bei anaklinalen und kataklinalen Hängen vorgenommen. Das überarbeitete TOBIA-Modell gliedert die Hänge in insgesamt 12 Hangkategorien auf, wobei jede Kategorie den gleichen theoretischen Flächenanteil besitzt. Im erweiterten Modell wurde im Fall der orthoklinalen Klasse eine zusätzliche Sehne auf dem Einheitskreis mit Länge 1,4142 gezogen. Durch diese Maßnahme kann die bisher 50% große orthoklinale Klasse in zwei Klassen von jeweils 25 % Größe aufgeteilt werden. (Abbildung 37, rechts). Die orthoklinale Klasse deckt nun nicht mehr alle Bereiche zwischen $45^\circ - 135^\circ$ und $225^\circ - 315^\circ$ ab, sondern besteht aus zwei Klassen. Diese decken bei kataklinaler Trend die Bereiche von $45^\circ - 90^\circ$ und $270^\circ - 315^\circ$, sowie bei anaklinalem Trend die Bereiche von $90^\circ - 135^\circ$ und $225^\circ - 270^\circ$ ab. Diese neue Einteilung trägt wesentlich zur Verbesserung der Aussagekraft in die Fläche bei (WERNER et al. 2022).

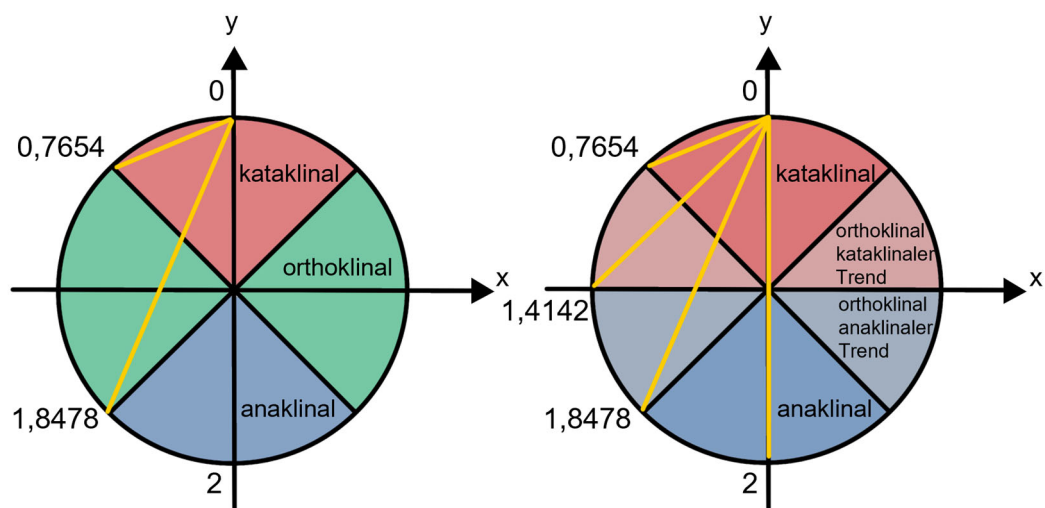


Abbildung 37: Vergleich der durch die Sehnenlängen (gelb) auf dem Einheitskreis definierten Bereiche der Hangklassen des Modells von MEENTEMEYER & MOODY (2000) (links) und dem erweiterten TOBIA-Modell (rechts) (aus WERNER et al. 2021).

Die weitere Teilung in der neuen Hangtypen orientiert sich an der bisherigen Abgrenzung, die auch für die anderen Klassen gewählt wurde. Dabei wird die Differenz der Hangneigung S und dem Einfallswinkel der geologischen Schicht ϑ betrachtet. Eine Teilung in eine der drei Unterklassen wird vorgenommen, wenn $\vartheta - S < -5^\circ$, $\vartheta - S > 5^\circ$ oder $-5^\circ \leq \vartheta - S \leq 5^\circ$ der Fall ist (Tabelle 6) (WERNER et al. 2021).

Tabelle 6: Klassifikation der Hänge nach dem erweiterten TOBIA Modell in Abhängigkeit von Neigung, Neigungsrichtung, Gefälle und Aspekt. ^{*1} $\pm 45^\circ$ /^{*2} $\pm 22,5^\circ$ modifiziert nach MEENTEMEYER & MOODY (2000) aus WERNER et al. (2021).

Klasse	Hangtyp	Winkel	Richtungswinkel	L	Winkel erw.
Kataklin (CAT)	overdip	$S > \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 0^{*1}$	$0 \leq L \leq 0,7654$	$\vartheta - S < -5^\circ$
	dip	$S = \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 0^{*1}$	$0 \leq L \leq 0,7654$	$-5^\circ \leq \vartheta - S \leq 5^\circ$
	underdip	$S < \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 0^{*1}$	$0 \leq L \leq 0,7654$	$\vartheta - S > 5^\circ$
anaklin (ANA)	steepened	$S > \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 180^{*1}$	$1,8478 \leq L \leq 2$	$\vartheta - S < -5^\circ$
	normal	$S = \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 180^{*1}$	$1,8478 \leq L \leq 2$	$-5^\circ \leq \vartheta - S \leq 5^\circ$
	subdued	$S < \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 180^{*1}$	$1,8478 \leq L \leq 2$	$\vartheta - S > 5^\circ$
Orthoklin (OCL)	CAT overdip	$S > \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 67,5^{*2}$	$0,7654 \leq L \leq 1,4142$	$\vartheta - S < -5^\circ$
	CAT dip	$S = \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 67,5^{*2}$	$0,7654 \leq L \leq 1,4142$	$-5^\circ \leq \vartheta - S \leq 5^\circ$
	CAT underdip	$S < \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 67,5^{*2}$	$0,7654 \leq L \leq 1,4142$	$\vartheta - S > 5^\circ$
	ANA steepend	$S > \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 292,5^{*2}$	$1,4142 \leq L \leq 1,8478$	$\vartheta - S < -5^\circ$
	ANA normal	$S = \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 292,5^{*2}$	$1,4142 \leq L \leq 1,8478$	$-5^\circ \leq \vartheta - S \leq 5^\circ$
	ANA subdued	$S < \vartheta$	$\Delta \alpha$ und $A = 292,5^{*2}$	$1,4142 \leq L \leq 1,8478$	$\vartheta - S > 5^\circ$

Die Validierung des erweiterten TOBIA-Modells ergab, dass die Verwendung von *Morpho-Lines* zu aussagekräftigen Ergebnissen führt. In der Regel war die Übereinstimmung zwischen den berechneten Einfallswerten durch die *Morpho-Lines* und den Geländemessungen im Saar-Nahe-Becken sehr hoch und es wurden plausible Werte in der Fläche ermittelt. MLs eignen sich somit zur Bestimmung der geologischen Lagerungsverhältnisse, insbesondere in Gebieten mit einer hohen Dichte an *Morpho-Lines* und einer dichten Staffelung an parallelen, sich wiederholenden Geländekanten, wie sie in weiten Teilen des Saar-Nahe-Gebiets (U1) vorhanden sind (Pausar 2023).

Im zweiten Untersuchungsgebiet, dem Mainzer Becken, konnte aufgrund der dominierenden geologischen Gegebenheiten, die hauptsächlich aus tertiären und quartären Sedimenten bestehen, keine Erstellung von *Morpho-Lines* anhand von Strukturen im Digitalen Geländemodell durchgeführt werden. Stattdessen wurden *Synth-Lines* verwendet, die auf Informationen aus der Literatur und vorhandenen Geländemessungen basieren. Aufgrund der geringen Anzahl von Geländemessungen, insbesondere im mittleren Teil des Untersuchungsgebiets, wurden die SLs manuell platziert, um ein möglichst breites Bild der Lagerungsverhältnisse zu erhalten. Das daraus resultierende erweiterte TOBIA-Modell und die daraus folgenden Ergebnisse der Suszeptibilitätsanalyse wurden aufgrund dieser Vorgehensweise im weiteren Verlauf der Arbeit mit Vorsicht betrachtet.

4.6 Berechnung und Klassifizierung modellrelevanter Parameter

Für einen umfassenden Überblick über die Situation in den Untersuchungsgebieten sollte grundsätzlich eine möglichst große Menge an Daten erhoben werden. Trotzdem sollten nur die Faktoren berücksichtigt werden, die aus (ingenieur)geologischer und statistischer Sicht, den größten Einfluss auf die Rutschungen besitzen. Die Faktoren, die bei der Erstellung der Anfälligkeitskarten berücksichtigt wurden, sind auf Basis von Literaturrecherchen und ausführlichen Geländebeobachtungen ausgewählt worden. Im Fall der Berechnung der Rutschungsanfälligkeit gibt es keine Regel für die Auswahl der Faktoren, die verwendet werden sollten. Vielmehr ist dies abhängig von der Art des Gebietes und den zur Verfügung stehenden Daten (AYALEW & YAMAGISHI 2005).

Auf dieser Grundlage wurden 6 weitere Einflussfaktoren für das Auftreten von Rutschungen ausgewählt, die aus verschiedenen Datenquellen berechnet wurden. Morphologische Parameter wie Hangneigung, Exposition und Höhenlage wurden aus den DGM1 extrahiert. Die ingenieurgeologische Klassifizierung wurde auf Grundlage der geologischen Daten vom LGB durch eine detaillierte Abschlussarbeit erstellt (Ohliger 2022). Der *Topographic Wetness Index* und der *Stream Power Index* wurden auch aus dem DGM errechnet. Jeder Parameter wurde dann je nach Art der Karte oder seiner Werte in entsprechende Klassen eingeteilt. Die Auswahl dieser Faktoren und ihrer Klassen basierte in erster Linie auf den Geländebeobachtungen vorgefundener Rutschungen und den damit verbundenen Geländefaktoren. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Parameter beschrieben und kurz erläutert, wie sie berechnet und klassifiziert wurden.

4.6.1 Hangneigung

Die Hangneigung ist definiert als die Neigung eines Hanges in Bezug zu einer horizontalen Ebene (BECKER 2005). Sowohl die Hangneigung als auch die Exposition wurden mithilfe des SAGA-Moduls „*Morphometry – Slope, Aspect, Curvature*“ berechnet. Das Programm bietet dafür verschiedene Berechnungsmethoden an. Die Neigung wurde mit Hilfe des „*9 parameter 2nd order polynom*“ Verfahrens nach Zevenbergen & Thorne (1987) berechnet. Dabei wird ein Polynom zweiten Grades an die Geländeoberfläche angepasst und die erste Ableitung daraus berechnet. Die Informationen der Geländeoberfläche werden dabei von einer 3x3 Submatrix (siehe Abbildung 38) in einem dreidimensionalen Koordinatensystem bereitgestellt. Die geeignete Oberfläche wird durch die folgende partielle Gleichung zweiten Grades erzeugt (ZEVENBERGEN & THORNE 1987):

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (4)$$

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5]/L^4 \quad (4.1)$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)/4 - (Z_2 - Z_8)/2]/L^3 \quad (4.2)$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_6)/2]/L^3 \quad (4.3)$$

$$D = [(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5]/L^2 \quad (4.4)$$

$$E = [(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5]/L^2 \quad (4.5)$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4L^2 \quad (4.6)$$

$$G = (-Z_4 + Z_6)/2L \quad (4.7)$$

$$H = (Z_2 - Z_8)/2L \quad (4.8)$$

$$I = Z_5 \quad (4.9)$$

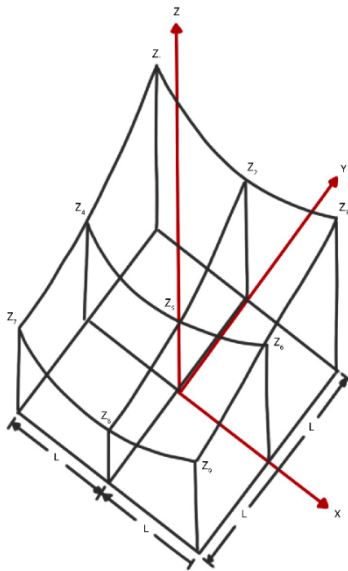


Abbildung 38: 3x3 Matrix und die Beziehung zwischen den neun Parametern von Gleichung 1 und den neun Submatrix Punkten. Z1 bis Z9 sind die neun Untermatrixpunkte. L ist der Abstand zwischen den Matrixpunkten in der Zeilen- und Spaltenrichtung und muss derselbe sein wie Z (ZEVENBERGEN & THORNE 1987).

Die Hangneigung wird dabei wie folgt berechnet (ZEVENBERGEN & THORNE 1987):

$$slope = \frac{\partial Z}{\partial S} = G \cos \theta + H \sin \theta \quad (5)$$

$$\text{mit } \cos \theta = -\frac{G}{(G^2+H^2)^{\frac{1}{2}}} \text{ \& } \sin \theta = -\frac{H}{(G^2+H^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.1) \text{ \& } (5.2)$$

$$slope = -(G^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Die Hangneigung ist der wichtigste Faktor für das Auftreten von Rutschungen und wird daher immer in Studien für die Bestimmung der Anfälligkeiten verwendet (AYALEW & YAMAGISHI 2005). Je größer die Neigung, desto größer ist das Risiko einer Rutschung aufgrund der durch die Schwerkraft verursachten

größeren Scherkräfte. Bei der Einteilung der Hangneigungsklassen wurde sich an verschiedenen Klassifikationen aus der Literatur orientiert (z.B.: DAI & LEE 2002; CHEN et al. 2019). Nach Testberechnungen diverser Klassifizierungen wurde sich für eine Einteilung in zehn Klassen entschieden. Die ersten neun Klassen haben dabei jeweils eine Klassengröße von 5°. Die letzte Klasse (Klasse 10) deckt den Bereich von 45° bis 90° ab (siehe Tabelle 5). Dabei wurde berücksichtigt, dass die einzelnen Klassen zum einen in Bezug zur Hangneigungsverteilung im Gesamtgebiet und zum anderen zur Verteilung innerhalb der Rutschareale, sinnvoll gewählt wurden. Es wurde sich außerdem für eine kleine Klassengröße entschieden um später genauere Aussagen darüber treffen zu können bei welchen Hangneigungen Rutschungen im Gebiet auftraten.

Tabelle 7: Klasseneinteilung für den Parameter Hangneigung in Untersuchungsgebiet 1 & 2.

ID	Klasse	Min [°]	Max [°]
1	0 – 5°	0	5
2	5 – 10°	5	10
3	10 – 15°	10	15
4	15 – 20°	15	20
5	20 – 25°	20	25
6	25 – 30°	25	30
7	30 – 35°	30	35
8	35 – 40°	35	40
9	40 – 45°	40	45
10	45° <	45	90

4.6.2 Exposition

Die Exposition eines Hanges bezieht sich auf die horizontale Ausrichtung der Hangneigung zur Himmelsrichtung (0° - 360°). Diese kann anhand der Richtung der benachbarten Zellen mit der höchsten Neigung zur zentralen Rasterzelle in einer 3x3-Matrix bestimmt werden (BECKER 2005). Der maximale Aspekt, ϑ , wird durch Differenzieren der Gleichung 5 ermittelt. Die Vorzeichen der Gleichung 8 bestimmen dabei, in welchem Quadranten ϑ liegt (ZEVENBERGEN & THORNE 1987).

$$\frac{\partial Slope}{\partial \theta} = -G \sin \theta + H \cos \theta = 0 \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-H}{-G} \right) \quad (8)$$

Für die statistische Auswertung wurde die Exposition in 8 Klassen gegliedert. Die Klassen wurden entsprechend den Hauptrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W und NW) klassifiziert und haben jeweils eine Klassengröße von 45° (siehe Tabelle 8; Abbildung 39). Eine Einteilung der Hangexposition in 8 Klassen kann genauer sein als eine Einteilung in die nur 4 Himmelsrichtungen (N, O, S, W), da sie eine genauere Unterscheidung zwischen den verschiedenen Expositionen ermöglicht. Dies lässt eine bessere Berücksichtigung von Gelände- und Bodenbedingungen zu, die je nach Exposition stark variieren können.

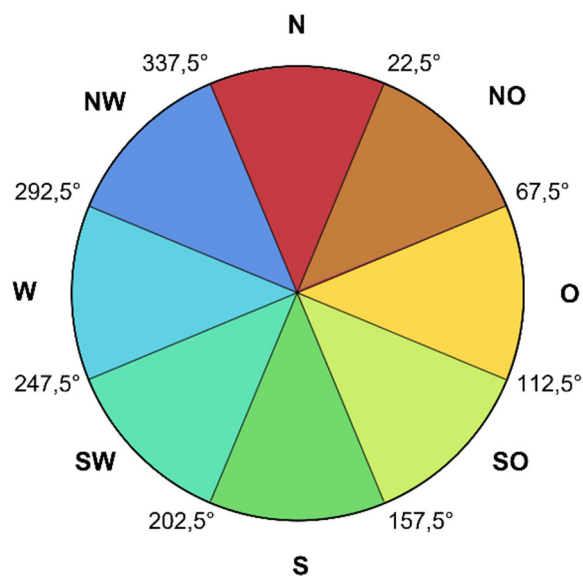


Abbildung 39: Die grafische Darstellung der acht Hangexpositionsklassen. Eine Einteilung der Klassen erfolgt in 45° Schritten und umfasst die Richtungen Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West und Nordwest.

Tabelle 8: Klasseneinteilung für die Hangexposition im Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.

ID	Klasse	Min [°]	Max [°]
1	Nord	337,5	22,5
2	Nordost	22,5	67,5
3	Ost	67,5	112,5
4	Südost	112,5	157,5
5	Süd	157,5	202,5
6	Südwest	202,5	247,5
7	West	247,5	292,5
8	Nordwest	292,5	337,5

4.6.3 Höhenlage

Die Höhenkarten wurden mit Hilfe der jeweiligen DGMs der Untersuchungsgebiete mit einer Auflösung von 1×1 m erstellt. In der Literatur gibt es bezüglich der Klassifizierung kein eindeutiges Schema. Vielmehr ist sie abhängig von den verschiedenen Höhenlagen, die in verschiedenen Untersuchungsgebieten auftreten. Im Saar-Nahe-Gebiet reichen die Höhenlagen von 108 m bis 687 m und wurden in fünf Klassen mit einer Klassengröße von 100 m (Tabelle 9) aufgeteilt. Einzig die letzte Klasse ist etwas kleiner, da sie nur die Höhen von 600 m bis 687 m einschließt. Im Mainzer Becken reichen die Höhenlagen nur von 75 m bis gerade mal 405 m. Aufgrund der niedrigeren Höhendifferenz wurde hier eine Klassengröße von 50 m gewählt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Klasseneinteilung der Höhenlagen für die zwei Untersuchungsgebiete.

Mainzer Becken			Saar-Nahe-Gebiet		
ID	Min [m]	Max [m]	ID	Min [m]	Max [m]
1	50	100	1	100	200
2	100	150	2	200	300
3	150	200	3	300	400
4	200	250	4	400	500
5	250	300	5	500	600
6	300	350	6	600	687
7	350	405			

4.6.4 Ingenieurgeologische Klassifizierung (Geologie)

Einer der entscheidenden Faktoren, welcher die Rutschanfälligkeit eines Hanges beeinflusst, sind die geologischen Eigenschaften des Untergrundes. Neben der Hangneigung stellt die Geologie in den zwei Untersuchungsgebieten den wichtigsten Faktor zur Modellierung einer Anfälligkeitskarte für Rutschungen dar. Jedoch liegen in den Untersuchungsgebieten dieser Arbeit geologische Karten nur in größeren Maßstäben (ab 1:25 000) vor. Genauere geologische Untersuchungen oder Kartierung sind nur für kleine Teilbereiche vorhanden.

Die Kenntnisse des geologischen Untergrundes können Informationen zum Baugrund sowie verschiedenen Geogefahren liefern. Eine Unterteilung der verschiedenen geologischen Einheiten bezüglich ihrer geotechnischen Eigenschaften und Anfälligkeiten für verschiedene Untergrundgefahren ist jedoch dafür notwendig. Ingenieurgeologische Klassen sind dabei eine geeignete Methode, um natürliche Materialien unterschiedlicher geologischer Einheiten mit vergleichbaren geotechnischen Eigenschaften zusammenzufassen. Eigenschaften wie Alter oder Genese spielen dabei keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Die geotechnischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Scherfestigkeit, die Verformbarkeit oder die Beständigkeit/Löslichkeit, bestimmen die Anfälligkeiten für verschiedene Georisiken. Die Arbeiten zur Entwicklung der Ingenieurgeologischen Klassen wurden vom Referat Ingenieurgeologie im LGB sowie Bachelor- und Masterarbeiten in Zusammenarbeit mit der FISE/IGL-Arbeitsgruppe durchgeführt. Seit einigen Jahren arbeitet das LGB RLP an einem interdisziplinären Projekt zur Erstellung einer blattschnittfreien geologischen Karte für die gesamte Landesfläche. Hierfür hat die FISE/IGL-Arbeitsgruppe eine allgemeine lithostratigraphische Legende aller geologischen Einheiten in Rheinland-Pfalz erstellt, die neben vielen anderen Aufgaben durchgeführt wurde. Durch den Einsatz eines spezifischen Datensatzes für Rheinland-Pfalz konnten die geologischen Besonderheiten des Bundeslandes bei der Erstellung einer lithostratigraphischen Generallegende berücksichtigt werden (WEHINGER et al. 2022). In RLP sind jedoch mehr als 700 Formationen in dieser Legende gelistet. Infolgedessen ist es einfacher, die Anfälligkeiten der ingenieurgeologischen Klassen zu definieren und nicht jede Formation einzeln zu betrachten (OHLIGER 2022).

Die Notwendigkeit verschiedener Ingenieurgeologischer Klassen für die Rutschungsanfälligkeit kann beispielhaft gezeigt werden. In Rheinland-Pfalz gibt es Schwerpunktregionen mit einer hohen Anzahl von Rutschungen. Dazu gehören die Mittelmosel und der Mittelrhein mit Hunsrückschiefern des Unterdevons (Festgestein), das Saar-Nahe-Becken mit Ton bis Schluffsteine des Rotliegenden (Halbfestgestein) und das Mainzer Becken mit Ton/Tonmergel des Tertiärs (Lockergestein). Obwohl in den genannten Fällen toniges Material eine hohe bis sehr hohe Rutschungsanfälligkeit bedingt,

wurden die genannten Gesteine aufgrund sonstiger geotechnischer Unterschiede in getrennte Klassen aufgenommen. Die Tone und Tonmergel des Tertiärs weisen eine geringe Festigkeit und höhere Quell-/Schrumpfanfälligkeit auf. Demgegenüber besitzen die Ton und Schluffsteine des Rotliegend im Vergleich zu den anderen angesprochenen Gesteinen eine sehr hohe Verwitterungsfähigkeit (WEHINGER et al. 2022).

Die erste grobe Unterteilung der Klassen ist eine Unterscheidung zwischen Locker-, Halbfest- und Festgestein. Die weitere Einteilung der Gesteine erfolgte über verschiedene Eigenschaften der Gesteine, wie z.B. Bindigkeit, organischer Anteil, Korngröße und Wasserlöslichkeit. Die Klassen 1 - 9 beinhalten dabei Lockergesteine wie z.B. Löss und Auffüllmassen, die Klassen 10 - 16 bestehen aus Halbfestgesteinen wie vulkanischen Tuffen und Mergeln und die Klassen 17 - 21 umfassen Festgesteine wie u.a. Sandstein und Tonschiefer (siehe Tabelle 10). Für eine genaue Beschreibung der einzelnen Klassen empfiehlt es sich die Arbeit von OHLIGER (2022) oder den dazu veröffentlichten Artikel von WEHINGER et al. (2022) zu lesen.

Diese Ingenieurgeologischen Klassifizierung wurde, aus der erstmals für die gesamte Landesfläche zur Verfügung stehenden geologischen Generallegende entwickelt. Jedoch handelt es sich hierbei nicht um eine endgültige Klassifizierung. Vielmehr ist die Erstellung der Ingenieurgeologischen Klassifizierung ein iterativer Vorgang. Mit Erweiterung der geologischen Grundlage sowie den nach und nach gewonnenen Erfahrungen bei der Verwendung sind Anpassungen der jetzigen Klassifizierung zu erwarten (WEHINGER et al. 2022). Außerdem fehlen Angaben zu geotechnischen Parametern, die gerade für geomechanische Modellierungen benötigt werden. Des Weiteren sind noch einige kleinere Lücken gerade an den Blatträndern vorhanden, welche überarbeitet werden sollten. Innerhalb dieser Arbeit wurde aus diesem Grund zusätzlich eine Klasse 0 hinzugefügt, für Bereiche, in denen keine Daten zur Ingenieurgeologischen Klassifizierung vorliegen.

Tabelle 10: Die Ingenieurgeologische Klassifizierung der Geologischen Einheiten in Rheinland-Pfalz anhand der Generallegende des LGB RLP (modifiziert nach WEHINGER et al. 2022).

ID	Verfestigung	Benennung
0		Keine Daten
1	Lockergestein	Auffüllmassen
2	Lockergestein	Organische Lockergesteine
3	Lockergestein	Bindige Lockergesteine, gering konsolidiert
4	Lockergestein	Bindige Lockergesteine, konsolidiert
5	Lockergestein	Löss und Lösslehm
6	Lockergestein	Gemischtkörnige Lockergesteine
7	Lockergestein	Nicht bindige Lockergesteine
8	Lockergestein	Umgelagerte Lockergesteine, fein- bis gemischtkörnig
9	Lockergestein	Umgelagerte Lockergesteine, blockig
10	Halbfestgestein	Tonige und wechselgelagerte Halbfestgesteine
11	Halbfestgestein	Tonige organische Halbfestgesteine und Kohle
12	Halbfestgestein	Mergel/Mergelsteine
13	Halbfestgestein	Ausgeprägt wasserlösliche Gesteine (gipshaltige Mergel/Mergelsteine)
14	Halbfestgestein	Vulkanische Tuffe, Laacher See-Tephra (Bims)
15	Halbfestgestein	Vulkanische Tuffe, verfestigt
16	Halbfestgestein	Vulkanische Tuffe, verwittert
17	Festgestein	Tonschiefer und Phyllite
18	Festgestein	Sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen
19	Festgestein	Sandsteine, Quarzite, Konglomerate
20	Festgestein	Kalksteine, Dolomitsteine
21	Festgestein	Magmatische Festgesteine

4.6.5 Topographic Wetness Index (TWI)

Der Bodenfeuchteindex (engl.: *topographic wetness index*, TWI) nach BEVEN & KIRKBY (1979) ist ein Maß für die potentielle Durchfeuchtung des Bodens und geht davon aus, dass die Geländeform die Bodenfeuchteverteilung in einem Einzugsgebiet beeinflusst. Die Divergenz bzw. Konvergenz des oberflächennahen Bodenwasserflusses und die Hangneigung bestimmen die Verteilung des Bodenwassers. Der TWI zeigt somit in welchen Gebieten bei Niederschlägen zuerst Sättigung eintritt und somit ein Oberflächenabfluss auftritt (BECKER 2005).

Der TWI setzt sich aus der logarithmischen Verknüpfung von spezifischem Einzugsgebiet A_s und Hangneigung β , sowie der Transmissivität T zusammen (Gl. 9). Die Einzugsgebietsgröße kann als proportional zu der, die betrachtete Rasterzelle durchfließenden Wassermenge angesehen werden (MOORE et al. 1991).

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{T \tan \beta}\right) \quad (9)$$

Daraus lässt sich schließen, dass in Bereichen von konvexen, flachen Hängen hohe Bodenwassergehalte zu erwarten sind, wohingegen in steilen divergierenden Bereichen mit kleinem Einzugsgebiet eine geringere Bodenfeuchte zu erwarten ist (BECKER 2005). Im Saar-Nahe-Gebiet wurde der TWI in sechs Klassen mit Klassengrößen von 3 (Klasse 1) bis 2 (Klasse 2 - 6) aufgeteilt. Die Werte des TWI reichen im U1 von -3 bis 10. Im Mainzer Becken hingegen wurde der TWI in neun Klassen geteilt. Hier reichen die Werte von -4 bis 14. Die ersten zwei Klassen decken dabei den Bereich von -4 bis 0 ab und die weiteren sieben Klassen den Bereich von 0 bis 14 (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Klassifizierung des TWI für das Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.

Saar-Nahe-Gebiet			Mainzer Becken		
ID	Min	Max	ID	Min	Max
1	-3	0	1	-4	-2
2	0	2	2	-2	0
3	2	4	3	0	2
4	4	6	4	2	4
5	6	8	5	4	6
6	8	10	6	6	8
			7	8	10
			8	10	12
			9	12	14

4.6.6 Stream Power Index (SPI)

Der SPI ist ein Index der Aussagen über die räumliche Verteilung der, durch abfließendes Niederschlagswasser stattfindenden, Bodenerosion zulässt. Er zeigt die Verteilung von potentiellen Erosionsrinnen, über die bei Starkniederschlägen das Oberflächenwasser abfließt und ein Bodenabtrag stattfindet (BECKER 2005).

Der SPI ist ein Maß für die erosive Kraft des fließenden Wassers. Der SPI wird auf der Grundlage des Gefälles und dem spezifischen Einzugsgebiets berechnet. Er gibt Aufschluss darüber, an welchen Stellen in der Landschaft die Bildung von Rinnen wahrscheinlicher ist. Der SPI wird anhand der folgenden Gleichung berechnet (WILSON & GALLANT 2000):

$$SPI = A_s \tan \beta \tag{10}$$

Der Index basiert auf der Annahme, dass der Abfluss proportional zum spezifischen Einzugsgebiet (A_s) ist. Der SPI gibt Auskunft über die Nettoerosion in Bereichen von Profilkonvexität (Fließbeschleunigungszonen) und tangentialen Konkavität (Konvergenzzonen) und die

Nettoablagerung in Bereichen von Profilkonkavität (Zonen mit abnehmender Fließgeschwindigkeit) (WILSON & GALLANT 2000).

Die Klassifizierung des SPI wurde anhand von Literaturrecherche und der Verteilung des SPI in den Untersuchungsgebieten vorgenommen. Da beide Untersuchungsgebiete ähnliche Verteilungen aufweisen wurde für beide Gebiete die gleiche Klassifizierung verwendet (Tabelle 12). Der SPI wurde dabei in 7 Klassen unterteilt. Die Werte von 0 bis 50 wurden in 5 Klassen eingeteilt. Die letzten zwei Klassen umfassen die Werte 50 bis 100 (Klasse 6) und alle Werte über 100 (Klasse 7).

Tabelle 12: Klassifizierung des SPI für das Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken.

ID	Min	Max
1	0	10
2	10	20
3	20	30
4	30	40
5	40	50
6	50	100
7	100	100<

4.7 Modelle zur Erstellung von Suszeptibilitätskarten

Bei der Berechnung der Rutschungsanfälligkeit wird davon ausgegangen, dass die räumliche Verteilung von Ereignissen durch die verursachenden Faktoren beeinflusst wird und künftige Rutschungen unter den gleichen Bedingungen wie die vergangenen auftreten werden (LEE & TALIB 2005). Anfälligkeitskarten können zur Beschreibung der Hanggefährdung durch Massenbewegungen genutzt werden, indem sie räumliche Vorhersagen über das Auftreten und die Verteilung von Rutschungen liefern. Die Wahl des Ansatzes hängt dabei von der Art der Massenbewegungen und den zur Verfügung stehenden Daten ab. Qualitative und quantitative Methoden unterscheiden sich grundlegend voneinander (ALEOTTI & CHOWDHURY 1999; PARDESHI et al. 2013).

Qualitative Methoden beruhen auf dem Wissen von Experten oder ausschließlich auf dem Urteil der Person, die die Bewertung der Anfälligkeit durchführt (ALEOTTI & CHOWDHURY 1999; AYALEW & YAMAGISHI 2005). Diese Methode umfasst die geomorphologische Analyse im Gelände und das Überlagern von Indexkarten (LEROI 1996). Quantitative Methoden sind datengesteuert und basieren auf numerischen Analyse zwischen den Faktoren, die Rutschungen kontrollieren und den tatsächlich stattgefundenen Rutschungen. Der auf Anfälligkeit zu klassifizierende Hang wird bei statistischen Methoden mittels bi- und multivariater statistischer Verfahren mit Hängen von z.B. aktiven und historischen Rutschungen verglichen. (ALEOTTI & CHOWDHURY 1999; CARRARA et al. 2003; PARDESHI et al. 2013).

Bei der Auswahl der Methoden zur Erstellung von Anfälligkeitskarten für die zwei Untersuchungsgebiete dieser Arbeit musste zunächst die Größe der Gebiete sowie die Datenlage berücksichtigt werden. Aufgrund der Größe der einzelnen Untersuchungsgebiete sowie der Datengrundlage konnten keine detaillierten Geländeanalysen oder geotechnische Analysen durchgeführt werden. Für die Berechnung der Anfälligkeitskarten wurde deshalb auf statistische (quantitative) Methoden zurückgegriffen. Auf Grundlage der bestehenden Literaturrecherche wurden verschiedene Methoden zur Anfälligkeitsberechnung getestet. Hinsichtlich der Datengrundlage und der Rutschungsdichte wurden für die Berechnungen die Methoden *Frequency-Ratio* und *Weight-of-Evidence* verwendet. Es wurden außerdem Methoden wie der *Random Forest* getestet, aufgrund der sehr geringen Rutschungsdichte lieferte diese Methode jedoch keine bzw. keine plausiblen Ergebnisse.

4.7.1 Frequency-Ratio

Unter mehreren statistischen Methoden zur Berechnung der Rutschungsanfälligkeit wurde für diese Arbeit unter anderem das *Frequency-Ratio* Modell, kurz FR-Modell, gewählt. Das FR-Modell ist ein einfaches probabilistisches Modell (LEE & TALIB 2005) welches in vielen Studien angewendet und getestet wurde (z.B.: MOHAMMADY et al. 2012; REGMI et al. 2014; FAYEZ et al. 2018). Der FR ist definiert als der Quotient zweier Verhältnisse. Er ist das Verhältnis von den Rutschungszellen einer Klasse zu der Gesamtanzahl an Rutschungszellen und das Verhältnis der Klassenzellen zu den gesamten Zellen des Testgebietes (LEE & TALIB 2005; REGMI et al. 2014). Er wird also wie folgt berechnet:

$$FR_i = \frac{\frac{RP_i}{RP_{total}}}{\frac{KP_i}{KP_{total}}} \quad (11)$$

RP_i ist die Anzahl an Pixeln die Rutschungen in einer Faktorenklasse enthalten, KP_i ist die Anzahl aller Pixel einer Faktorenklasse im Untersuchungsgebiet. RP_{total} ist die Anzahl aller Rutschungspixel und KP_{total} ist die Anzahl aller Faktorpixel im Untersuchungsgebiet.

Ein Wert größer 1 steht dabei für eine hohe Korrelation und ein Wert < 1 für eine geringe Korrelation (OZDEMIR & ALTURAL 2013). Je niedriger der Wert ist, desto geringer ist der Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Rutschungen und der jeweiligen Faktorklasse (LEE & TALIB 2005). Zur Ermittlung des *Landslide Susceptibility Index* (LSI) (dt.: Rutschungssuszeptibilitätsindex) werden die FR-Werte aller Faktoren aufsummiert (LEE & TALIB 2005):

$$LSI_{FR} = \sum FR_i = FR_1 + FR_2 + FR_3 + FR_4 \dots + FR_n \quad (14)$$

Diese berechneten LSIs werden daraufhin klassifiziert, was in Kapitel 4.8 genauer beschrieben ist, umso Rutschungsanfälligkeitskarten zu erstellen.

4.7.2 Weight-of-Evidence

Der *Weight-of-Evidence* (WoE) ist eine quantitative Methode zur Kombination von Datensätzen. Sie nutzt das Bayes'sche Wahrscheinlichkeitsmodell und verwendet prioräre und konditionelle Wahrscheinlichkeiten. Der *WoE* wurde ursprünglich von BONHAM-CARTER et al. (1988) für die Bewertung des Mineralienpotenzials entwickelt. Die Methode wurde später auf verschiedene geologische Probleme angewandt (REGMI et al. 2014). Wie REICHENBACH et al. (2018) feststellten, wurde das *WoE*-Modell in den letzten Jahren häufiger bei der Kartierung der Rutschungsanfälligkeit eingesetzt.

Bei dieser Methode wird die Vorabwahrscheinlichkeit auf der Grundlage der vergangenen Rutschungen ohne zusätzliche Informationen ermittelt. Die Vorabwahrscheinlichkeit wurde berechnet, indem die Anzahl der Rasterzellen mit Rutschungen durch die Gesamtzahl der Rasterzellen des Testgebietes geteilt wurde (BONHAM-CARTER 1994).

$$P_{prior} = \frac{Fläche_{Rutschungen}}{Fläche_{Total}} \quad (12)$$

Wenn zusätzliche Informationen über jeden beeinflussenden Faktor gefunden werden, wird die vorherige Wahrscheinlichkeit in eine bedingte Wahrscheinlichkeit geändert. Nach BONHAM-CARTER (1994) sollte jeder Faktor bedingt unabhängig sein, und die bedingte Wahrscheinlichkeit kann wie folgt ausgedrückt werden (GETACHEW & METEN 2021):

$$P(S|B) = \frac{N_{Zellen}(R \cap F)}{N_{Zellen}(R)} \quad (13)$$

N_{Zellen} steht für die Anzahl der Zellen, R für die Rutschung und F repräsentiert den Faktor. Durch die Integration von Rutschungen mit rutschungsbeeinflussenden Faktoren wird der statistische Zusammenhang zwischen Klassen eines Faktors und Rutschungen ermittelt. So können die Gewichtswerte auf Grundlage der Faktoren zum Auftreten von Rutschungen berechnet werden. Die positiven und negativen Gewichtswerte (W^+ und W^-) werden berechnet, um die räumliche Korrelation in Anwesenheit oder Abwesenheit des Faktors zu erhalten (GETACHEW & METEN 2021). Hierfür wurde die folgende Formel nach BONHAM-CARTER et al. (1989) und BONHAM-CARTER (2004) verwendet:

$$W^+ = \ln \left[\frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}} \right] \quad (14)$$

$$W^- = \ln \left[\frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}} \right] \quad (15)$$

Wobei:

- $Npix1 = RP$
- $Npix2 = RP_{total} - RP$
- $Npix3 = KP - RP$
- $Npix4 = KP_{total} - RP_{total} - KP + RP$

Ein positives Gewicht (W^+) zeigt, dass die jeweilige Faktorklasse bei Rutschungen vorhanden ist, und die Größe weist auf eine positive Korrelation zwischen Rutschungen und Faktorenklasse hin. Ein negatives Gewicht (W^-) zeigt an, dass der beeinflussende Faktor nicht vorhanden ist, und die Größe ist ein Hinweis auf den Grad der negativen Korrelation (GETACHEW & METEN 2021). Die Differenz zwischen W^+ und W^- wird als Gewichtscontrast C bezeichnet, wobei C den gesamten räumlichen Zusammenhang zwischen einer Faktorenklasse und dem Auftreten von Rutschungsereignissen widerspiegelt. Ein Kontrastwert gleich Null bedeutet, dass die betrachtete Klasse von Kausalfaktoren für die Analyse nicht signifikant ist. Ein positiver Kontrast weist auf eine positive räumliche Korrelation hin, und umgekehrt ein negativer Kontrast auf eine negative Korrelation (CORSINI et al. 2009).

$$C = W^+ - W^- \quad (16)$$

Anschließend kann auch hier der LSI durch das Aufsummieren der einzelnen Faktoren berechnet werden. Die endgültige Karte der Rutschungsanfälligkeit wird dann, wie auch schon bei der FR-Methode nach der Klassifizierung des LSI erstellt.

$$LSI_C = \sum C_i = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \dots + C_n \quad (17)$$

4.8 Validierungsmodell

Die Validierung beinhaltet einen Vergleich zwischen den aus den Modellen gewonnenen Karten und den Testdatensätzen. Rutschungsanfälligkeitskarten (engl.: *landslide susceptibility maps*, LSMs) können validiert werden, indem die Anfälligkeitskarten mit den Testdaten verglichen werden, die während des Modellierungsprozesses nicht verwendet wurden. Dieser Vergleich kann qualitativ z.B. visuell durch eine einfache Überlagerung oder quantitativ mit Hilfe von Funktionen wie der ROC-Kurve erfolgen.

Zur Validierung der errechneten LSMs wurde die Methode der *Receiver Operating Characteristic* (ROC)-Kurve (deutsch: Grenzwertoptimierungskurve) verwendet. Sie ist einfach in der Anwendung und wurde schon in mehreren Studien (z.B.: OZDEMIR & ALTURAL 2013; MALKA 2021) und Abschlussarbeiten erfolgreich verwendet.

4.8.1 Konfusionsmatrix

Die Grenzwertoptimierungskurven beruhen auf sogenannten Konfusionsmatrizen. Eine Konfusionsmatrix ist ein Werkzeug zur Bewertung der Leistung von Klassifikationsmodellen. Die Suche nach einem guten Klassifikator für einen Datensatz und die spätere Abstimmung des Klassifikators werden oft durch Kreuzvalidierungstests unterstützt. Das allgemeinste Ergebnis eines solchen Tests ist die gemittelte Anzahl der Falschklassifikationen. Um detailliertere Informationen über die Klassifikationsergebnisse zu erhalten, kann eine Konfusionsmatrix berechnet werden, die zeigt, welche Klassen während des Tests mit welchen verwechselt wurden. Die Analyse von Konfusionsmatrizen ist daher nützlich, um zu verstehen, welche Klassen richtig klassifiziert wurden. Außerdem zeigt sie an, welche Klassen in welchem Ausmaß falsch klassifiziert/verwechselt wurden (SUSMAGA 2004). Zur Überprüfung der Ergebnisse und Erstellung von Grenzwertoptimierungskurven sowie den Sensitivitätsanalysen wurden Konfusionsmatrizen mittels einer integrierten Funktion in SAGA-GIS erstellt.

4.8.2 Grenzwertoptimierungskurven

Eine Grenzwertoptimierungskurve ist eine Methode zur Bewertung und Optimierung von Analysestrategien. ROC-Kurven werden seit langem in der Signaldetektionstheorie verwendet, um das Verhältnis zwischen Trefferquoten und Fehlalarmquoten von Klassifikatoren darzustellen. Die Analyse basiert auf der endgültigen Verteilung einer Klassifizierungsmethode, die zwischen korrekten und fehlgeschlagenen Vorhersagen gemäß einer 2x2 Kontingenztabelle (Tabelle 13) unterscheidet (FAWCETT 2006).

Tabelle 13: Kontingenztabelle für die Rutschungsanalyse

True Positive Rutschung vorhanden und vorhergesagt	False Positive Rutschung vorhergesagt, aber nicht vorhanden
False Negative Rutschungen vorhanden aber nicht	True Negative Keine Rutschungen vorhergesagt und keine

- Ein wahres positives Ergebnis (TP) ist ein Ergebnis, bei dem das Modell die positive Klasse richtig vorhergesagt hat. Ähnlich verhält es sich bei einem wahren negativem Ergebnis (TN), bei dem das Modell die negative Klasse richtig vorhergesagt hat.
- Ein falsch positives Ergebnis (FP) ist ein Ergebnis, bei dem das Modell die positive Klasse falsch vorhersagt. Ein falsch negatives Ergebnis (FN), bei dem das Modell die negative Klasse falsch vorhergesagt hat.

Für jeden möglichen Parameterwert können die resultierenden relativen Häufigkeitsverteilungen in Form der Richtig-Positiv-Rate (engl.: *True Positive Rate (TPR)*) und Falsch-Positiv-Rate (engl.: *False Positive Rate (FPR)*) ermittelt. In einem Diagramm trägt man die Richtig-Positiv-Rate als Ordinate (y -Achse) und Falsch-Positiv-Rate als Abszisse (x -Achse) ein. Der Parameterwert selbst taucht dabei nicht auf. Es resultiert typischerweise eine gekrümmte, aufsteigende Kurve (siehe Abbildung 40). Die TPR oder Trefferquote wird definiert als (FAWCETT 2006):

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{TP}{P} \quad (21)$$

Die Falsch-Positiv-Rate (auch: Fehlalarmrate) ist definiert als:

$$FPR = \frac{FP}{FP + FN} = \frac{FP}{N} \quad (22)$$

Eine ROC-Kurve nahe der Diagonalen deutet auf einen Zufallsprozess hin: Werte nahe der Diagonalen bedeuten eine gleiche Trefferquote und Fehlalarmrate, was der zu erwartenden Trefferhäufigkeit eines Zufallsprozesses entspricht. Die ideale ROC-Kurve steigt zunächst senkrecht an (die Trefferquote liegt nahe bei 100%, während die Fehlerquote anfangs noch nahe bei 0% bleibt), erst danach steigt die FPR an (Abbildung 40). Zu der ROC-Kurve berechnet man die *Area Under Curve (AUC)* (dt.: Fläche unter

der Kurve). Die AUC misst die Fläche unter der gesamten ROC-Kurve von (0,0) bis (1,1). Dieser Wert kann zwischen 0 und 1 liegen. Ein Modell, dessen Vorhersagekraft zu 100% falsch ist, hat eine AUC von 0. Vorhersagen die zu 100% richtig sind, haben entsprechend eine AUC von 1. Dabei ist eine AUC von 0,5 der schlechteste Wert. Wie zuvor beschrieben, ist eine ROC-Kurve nahe der Diagonalen das zu erwartende Ergebnis eines Zufallsprozesses, der eine Fläche von 0,5 hat. Die zuvor als optimal beschriebene Kurve hat eine Fläche zwischen 0,5 und 1 (FAWCETT 2006).

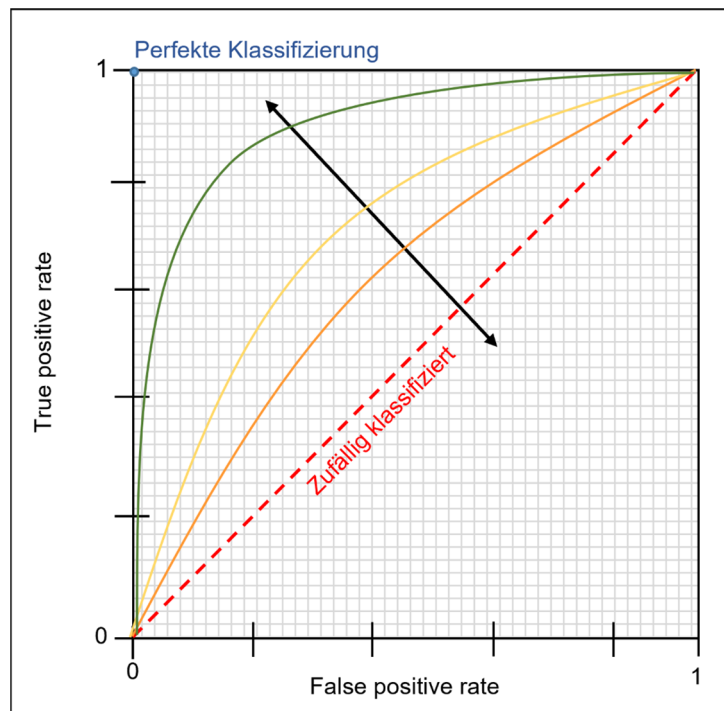


Abbildung 40: Beispiele für Grenzwertoptimierungskurven. Ein Wert von 0,5 beschreibt eine zufällige Klassifizierung. Ein Wert von 1 zeigt eine perfekte Klassifizierung also eine 100% Vorhersagegenauigkeit.

Je nach Kontext und Anwendung können unterschiedliche AUC als gut gelten. Im Allgemeinen gilt jedoch eine AUC von 0,7 bis 0,8 als akzeptabel, während eine AUC von über 0,8 als gut und eine AUC über 0,9 als ausgezeichnet gilt (Hand & Till 2001). Für die Beurteilung der Qualität eines Modells kann laut Tape (2001) eine ähnliche Einstufung der AUC-Indizes genutzt werden:

- > 0,9: ausgezeichnetes 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.

In dieser Arbeit wurden Konfusionsmatrizen der LSIs erstellt. Diese geben an, ob ein Treffer (Rutschung oder *True Positive*) oder kein Treffer (keine Rutschung oder *False Positive*) vorliegt. Diese Konfusionsmatrix wurde dann in ein R-Skript eingelesen und mit diesem die jeweiligen ROC-Kurven errechnet. Für die verbesserte Darstellung der Kurven wurden die Anfälligkeitswerte in 100 Klassen eingeteilt, was dazu führt, dass die ROC- Kurven geglättet werden. Diese ROC-Kurven und die daraus resultierenden AUCs wurden verwendet, um die Vorhersagegenauigkeit der Modelle zu bestimmen und zu interpretieren. Die besten/genausten Modelle wurde dann ausgewählt, um die Rutschungsanfälligkeitskarten zu erstellen.

4.9 Klassifizierung der Rutschungsanfälligkeitskarten

Für einen besseren Überblick wurden die Anfälligkeitsindexkarten klassifiziert. Dementsprechend wurden folgende 5 Anfälligkeitsklassen (AK) in der nachfolgenden Tabelle 14 definiert:

Tabelle 14: Anfälligkeitsklassen für die LSMs.

AK	Beschriftung	Beschreibung
1	Keine bis sehr gering	Keine bis sehr geringe Rutschungsanfälligkeit
2	gering	Geringe Rutschungsanfälligkeit
3	mittel	Mittlere Rutschungsanfälligkeit
4	hoch	Hohe Rutschungsanfälligkeit
5	Sehr hoch	Sehr hohe Rutschungsanfälligkeit

Die Klassen wurden mit verschiedenen Methoden eingeteilt und im Anschluss validiert. Die Methoden sind: Drei dieser Klassifizierungssysteme sind automatisch und in SAGA-GIS integriert:

- Gleiches Intervall: Der Bereich der Suszeptibilitätswerte werden in gleich große Intervalle unterteilt.
- Quantil: Jeder Klasse werden die gleiche Anzahl an Zellen zugewiesen. In diesem Fall wird der Bereich der möglichen Anfälligkeitswerte in ungleich große Intervalle unterteilt.
- Natürliche Unterbrechung: Die Klassenbildung beruht auf den natürlichen Gruppierungen in den Daten, die Grenzen werden statistisch bestimmt, wenn es (relativ) große Sprünge in den Werten der Suszeptibilitätsdaten gibt.

Die letzte Klassifizierungsmethode ist die manuellen Bildung von Klassen. Dabei wurden die Klassen manuell, mit Hilfe der ROC-Kurven und Konfusionsmatrizen eingeteilt.

4.10 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse ist für die Validierung und Kalibrierung von Modellen von entscheidender Bedeutung. Sie kann verwendet werden, um die Robustheit des Endergebnisses gegenüber geringfügigen Änderungen der Eingabedaten zu überprüfen. Sie wird durchgeführt, um zu untersuchen, wie Modelle unter verschiedenen Bedingungen und Annahmen reagieren. Sensitivitätsanalysen werden somit verwendet, um die Schlüsselfaktoren zu identifizieren, die die Ausgabe des Modells beeinflussen und die Robustheit der Ergebnisse des Modells zu beurteilen (CHEN et al. 2010). Es gibt verschiedene Arten von Sensitivitätsanalysen, wie zum Beispiel:

- Ein-nach-dem-anderen (engl.: *One-at-a-time, OAT*) Sensitivitätsanalyse: Diese Methode beinhaltet das Ändern des Werts einer Eingabevariable nach der anderen, während alle anderen Eingabedaten konstant bleiben.
- Szenarioanalyse: Diese Methode beinhaltet das Erstellen verschiedener Szenarien basierend auf unterschiedlichen Kombinationen von Eingabewerten.
- Globale Sensitivitätsanalyse: Diese Methode beinhaltet die Verwendung von statistischen Techniken, um die Beziehung zwischen den Eingaben und Ausgaben des Modells zu analysieren, um die Schlüsselfaktoren zu identifizieren, die die Ausgabe des Modells beeinflussen (CHEN et al. 2010).

Die Sensitivitätsanalyse ist also ein Verfahren, um festzustellen, wie empfindlich ein Modell auf Veränderungen der Methodik reagiert. Die Sensitivitätsanalyse kann helfen, die wichtigsten Eingabedaten zu identifizieren und Einblicke darüber zu geben, wie sich die Ausgabe des Modells unter verschiedenen Bedingungen und Annahmen ändern könnte.

Diese Studie interessiert sich für die Veränderung verschiedener Eingabedaten, wobei vier spezifische Aspekte von Interesse sind: (1) Veränderung der Trainings- und Testdatensätze und ihrer Auswirkung auf die Anfälligkeitsberechnung einzelner Parameter; (2) Veränderung der Trainings- und Testdatensätze und ihrer Auswirkung auf die Rutschungsanfälligkeitskarten; (3) Veränderung der Klassifizierung spezifischer Parameter (4) und die Änderungen der Klassifizierungsmethode der Anfälligkeitsklassen für die Rutschungsanfälligkeitskarten. Diese Änderungen wurden einzeln vorgenommen, getestet und unter Verwendung von Konfusionsmatrizen dargestellt.

5 Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse bestehend aus der Parameteranalyse, Suszeptibilitätsanalyse, Berechnung und Validierung der Rutschungsanfälligkeitskarten für das Saar-Nahe-Gebiet beschrieben. Abschließend werden die in dieser Arbeit finalen Anfälligkeitskarte gezeigt und erläutert sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse beschrieben. Eine zusammenfassende Betrachtung und Diskussion der wichtigsten Ergebnisse folgen in Kapitel 7 und 8.

5.1 Parameteranalyse

Die Parameteranalyse war ein wichtiger Bestandteil der Datenanalyse und diente dazu, die wichtigsten Merkmale der verwendeten Parameter im Untersuchungsgebiet 1 sowie innerhalb der dort auftretenden Rutschungen zu identifizieren und zu beschreiben. Hierbei wurde noch nicht nach Rutschungstypen differenziert.

5.1.1 Hangneigung

Die Hangneigung stellt im Untersuchungsgebiet 1 einen der wichtigsten Faktoren für die Entstehung von Rutschungen dar. Die Auswertung der Hangneigungsverteilung für das gesamte Saar-Nahe-Gebiet zeigt, dass Hänge bis 10° Neigung (Klasse 1 & 2) mit 27,2 % und 31,5 % den größten Teil im Untersuchungsgebiet ausmachen, wobei hier hauptsächlich die flachen Bereiche der Talauen und der zahlreichen Hügel zusammengefasst sind (Abbildung 41). Für Flächen mit 10° bis 15° Neigung ergibt sich noch eine relative Häufigkeit von 17,4 %. Alle weiteren Hangneigungsklassen von 15° bis 45° haben eine relative Häufigkeit von unter 10% und nehmen mit dem Anstieg der Neigung in ihrer Häufigkeit ab. Insgesamt kommen diese Flächen auf eine Gesamthäufigkeit von ~22,9 % im Untersuchungsgebiet. Hangneigungen von 15° bis 45° liegen im Untersuchungsgebiet ohne ein gewisses Muster vor. Sie können sowohl an Unterhängen aber auch an Mittel- bis Oberhängen gefunden werden. Flächen mit Hangneigungen über 45° (Klasse 10) haben eine Häufigkeit von 0,97 %, wobei hier hauptsächlich die Steilhänge, Felswände und Felsnasen sowie Steinbrüche des Untersuchungsgebiets zusammengefasst sind. Außerdem werden in dieser Hangneigungsklasse auch die im DGM vorhandenen Infrastrukturen wie Mauern und Gebäude eingeschlossen.

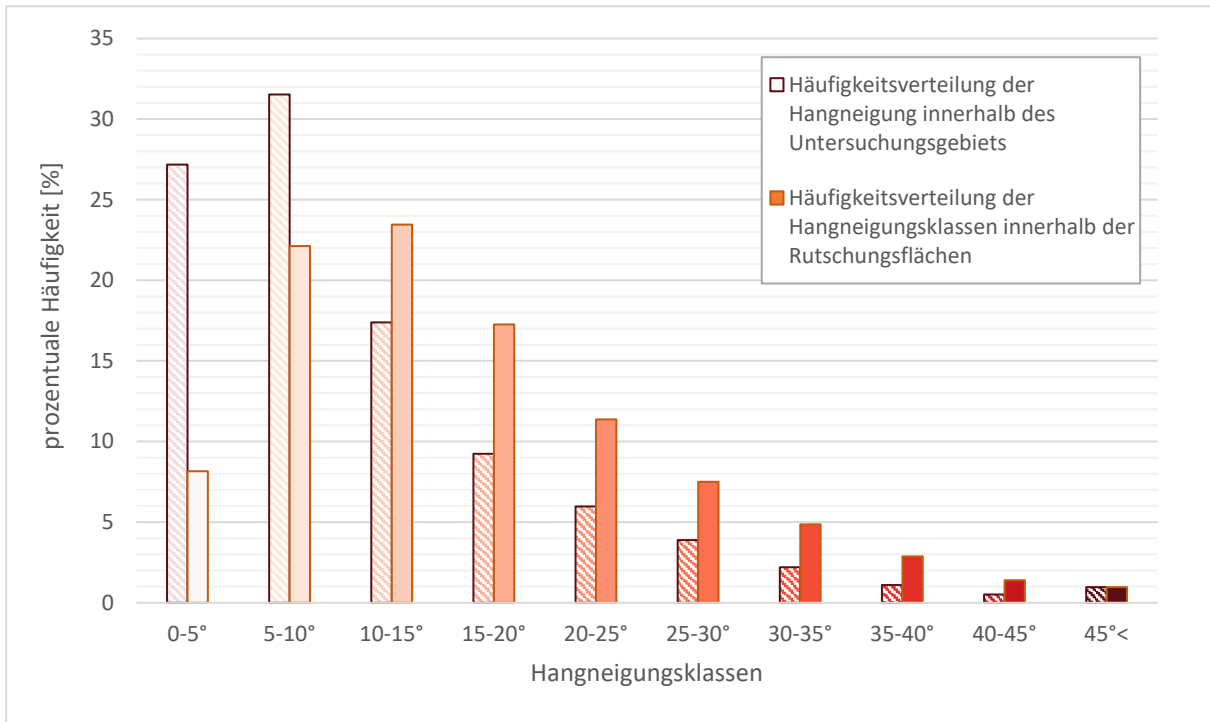


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Hangneigungsklassen innerhalb des gesamten Untersuchungsgebiets 1 und aller in dem Gebiet vorkommenden Rutschungen.

Die Hangneigungsverteilung der Rutschungsflächen zeigt, dass der Schwerpunkt im Bereich von 5° bis 20° Neigung (Klasse 2, 3 & 4) liegt, in die 62,8 % aller durch kartierte Rutschungen betroffenen Flächen einzuordnen sind. Innerhalb dieser Neigungsklassen zeigt sich darüber hinaus die höchste Häufigkeit von Rutschungen im Bereich zwischen 10° und 15°. Hangneigungen von 20° – 25° konnten noch 11,4 % der durch Rutschungen betroffenen Flächen zugeordnet werden. Der Neigungsklasse 1 (Hangwinkel bis 5°) noch 8,2 %. Für die Hangneigungsklassen 6 bis 10 ergibt sich innerhalb der Rutschungsflächen eine insgesamt Häufigkeit von 17,7 %, wobei die Häufigkeit mit steigendem Neigungswinkel abnimmt (Abbildung 41). In Abbildung 42 ist außerdem zu erkennen dass sowohl die Abrisse der Felsrutschungen als auch die der Deckschichtenrutschungen häufig in den Mittel- bis Oberhängen liegen.

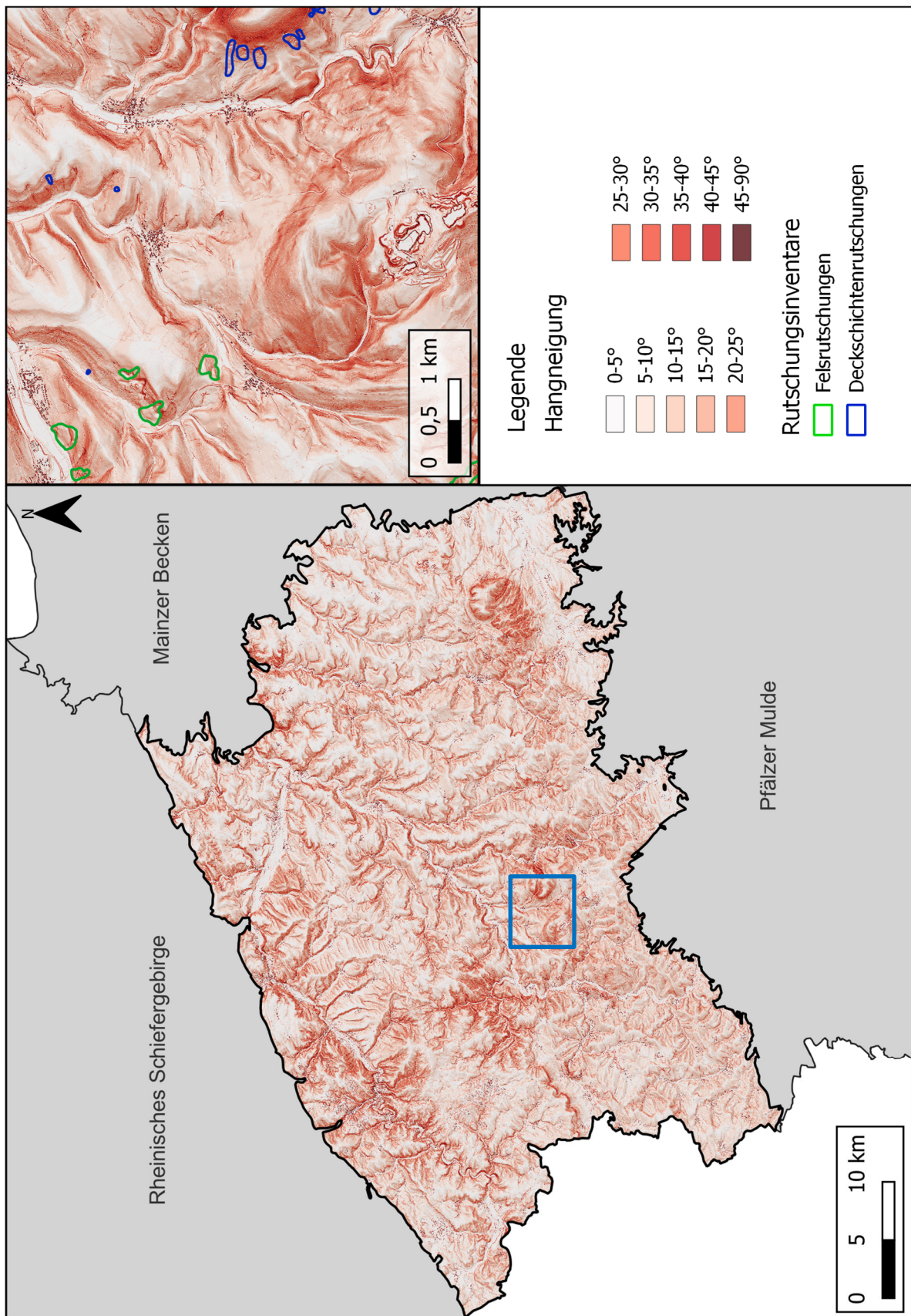


Abbildung 42: Hangverteilungskarte Saar-Nahe-Gebiet. Außerdem eine Detailansicht mit Rutschungen in der Nähe vom Pötzberg

5.1.2 Exposition

Die Auswertung der Expositionsverteilung im Saar-Nahe-Gebiet zeigt kein eindeutiges Maximum in der Verteilung. Südosthänge (15,9 %) sowie Nordhänge (15,4 %) haben eine annähernd gleiche relative Häufigkeit im Untersuchungsgebiet. Flächen mit einer Ausrichtung nach Nordwesten haben eine relative Häufigkeit von 14,5 %. Hänge die nach Nordosten bzw. Osten exponieren kommen im Saar-Nahe-Gebiet gleichermaßen vor. Das Minimum liegt bei Flächen, die nach Südwesten bzw. Westen exponieren diese haben relative Häufigkeiten unter 10 % (Abbildung 43).

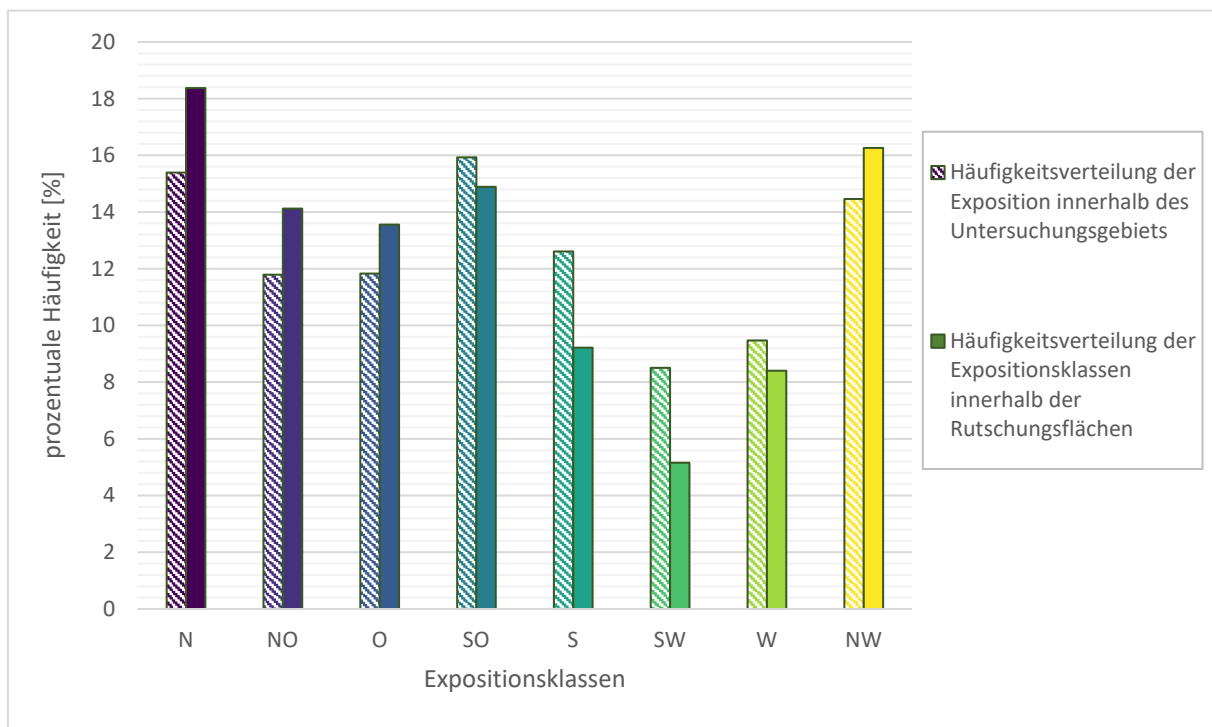


Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung der Hangexpositionsklassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.

Bei den Rutschungsflächen divergiert die Verteilung der einzelnen Richtungen stärker. Die meisten Rutschungen traten an nördlichen (18,4 %), nordwestlichen (16,3 %) und südöstlichen (14,9 %) Hängen auf, gefolgt von nordöstlich (14,1 %) und östlich exponierten Hängen (13,6 %). Am wenigsten Rutschungen wurden an Südwesthängen (5,2 %) kartiert (Abbildung 43). zeigt, dass die kartierten Felsrutschungen häufig an nördlich exponierten Hängen auftraten. Die Deckschichtenrutschungen hingegen an südwestlichen bis westlichen Hängen.

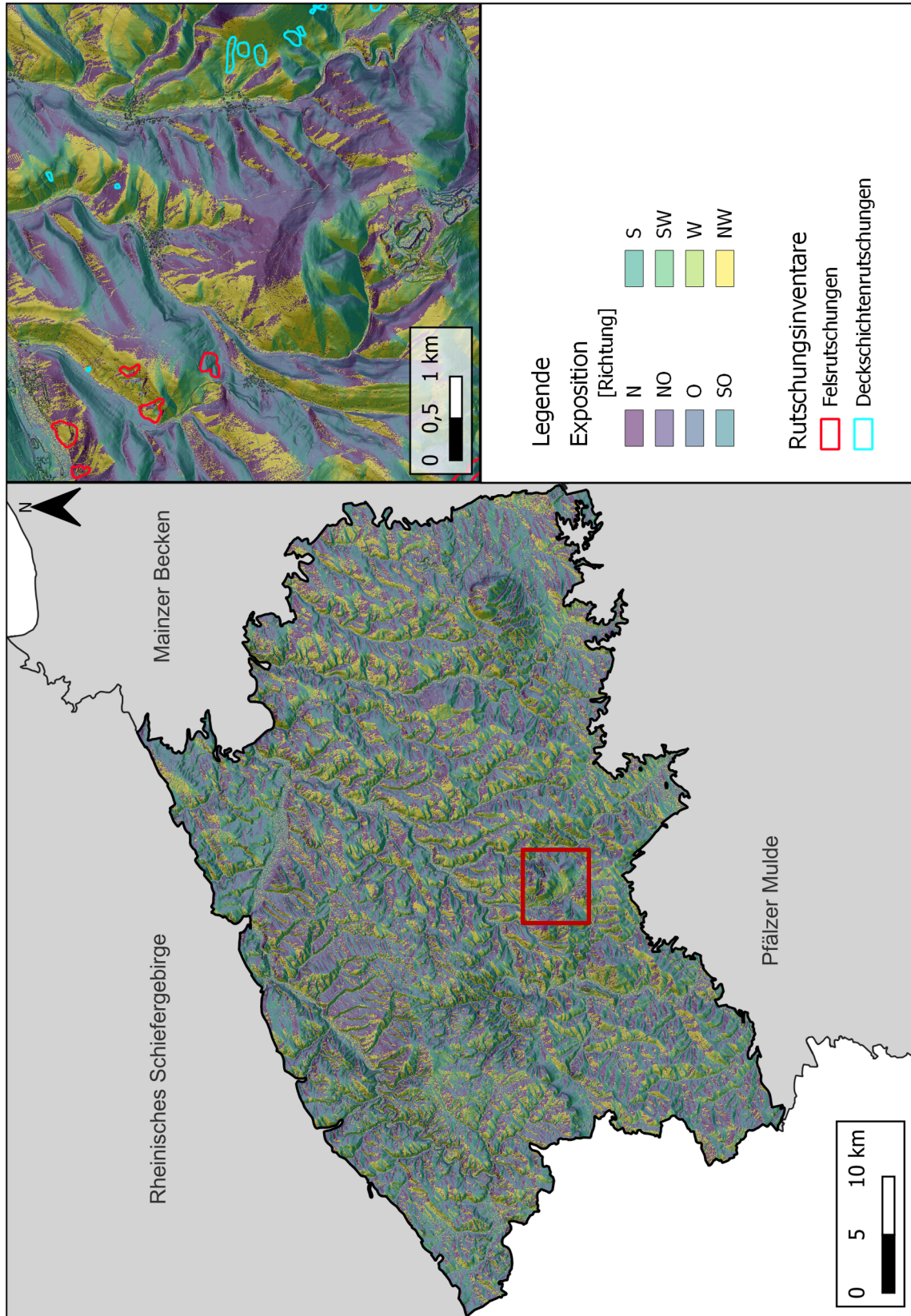


Abbildung 44: Expositionsverteilung innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets. Detailsicht mit den zwei Rutschungstypen in der Nähe des Pottberg

5.1.3 Höhe

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenlagen im Untersuchungsgebiet 1 ergibt eine annähernd normale Verteilung. Das Maximum liegt bei Flächen von 300 m bis 400 m (Klasse 3) mit einer relativen Häufigkeit von 41,2 % (Abbildung 45). Am Rand des Untersuchungsgebiets in Richtung Pfälzer Mulde liegen fast nur noch Höhenlagen zwischen 200 m und 300 m vor und auch Richtung Mainzer Becken flacht das Gebiet wieder ab. Diese Höhenlagen (Klasse 2) liegen mit einer Häufigkeit von 33,4 % im Untersuchungsgebiet vor. Die dritt größte Klasse mit einer deutlichen Häufigkeitsabnahme umfasst die Höhen von 400 m bis 500 m mit 17,8 %. Die Niedrigsten Stellen im Untersuchungsgebiet umfassen die vor allem die Talauen der Nahe und Glan. Mit Höhenlagen von 100 m bis 200 m kommen diese Untersuchungsgebiet mit einer Häufigkeit von 4,7 % vor. Die letzten zwei Klassen schließen Höhen von 500 m bis über 600 m ein und liegen im Gebiet mit einer gemeinsamen Häufigkeit von 2,7 % vor (siehe Abbildung 45). Diese Klassen schließen die Gebiete des Donnersberg, Potzberg und Idar-Oberstein mit ein (Abbildung 46).

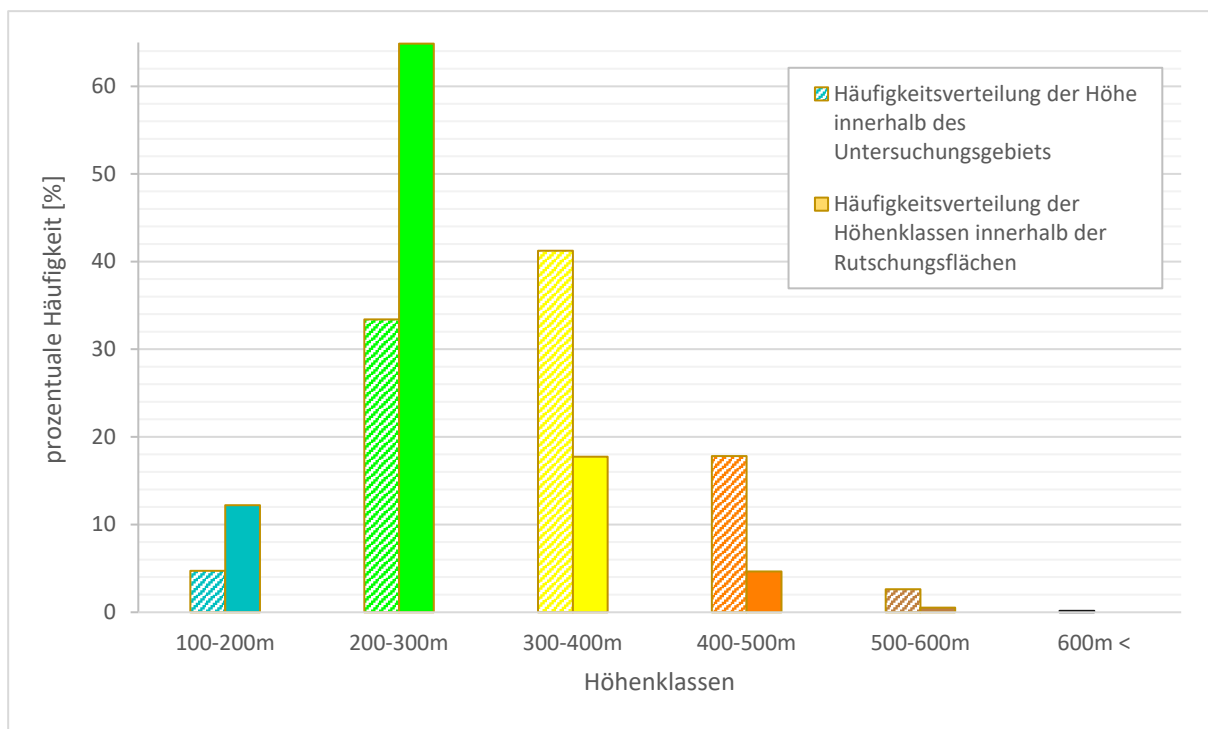
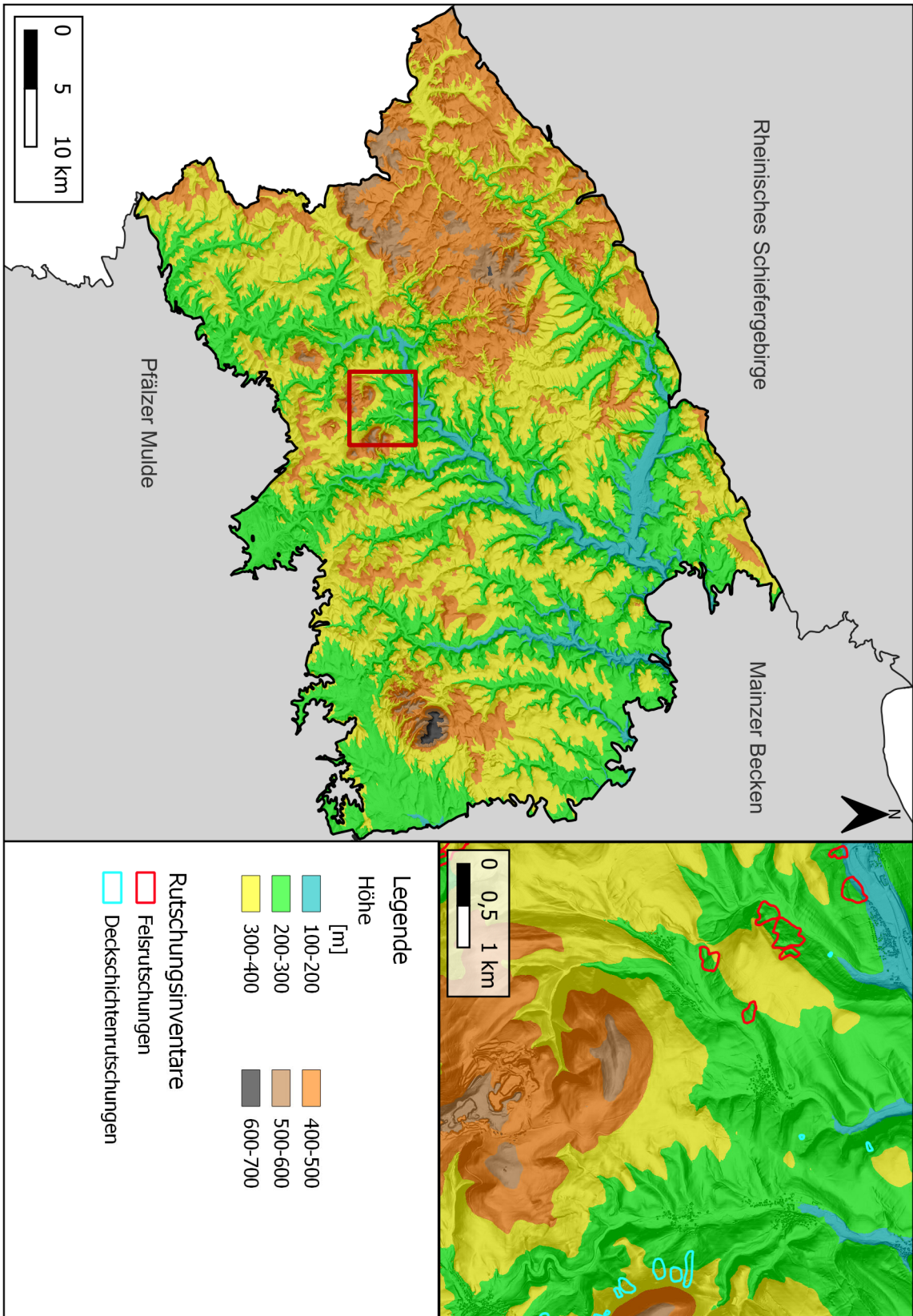


Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der klassifizierten Höhenlagen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.

Die Höhen in denen Rutschungsflächen kartiert wurden verteilen sich deutlich anders. Die meisten Rutschungen liegen in Höhelagen von 200 m bis 300 m (Klasse 2). Die Klasse schließt 64,9 % der Rutschungen ein und bildet ein deutliches Maximum bei der Häufigkeitsverteilung. Mit großem Abstand ist die zweithäufigste Klasse (17,7 %) in der Rutschungen auftreten die, mit Höhenlagen zwischen 300 m und 400 m. In Klasse 1 (Höhen von 100 - 200 m) treten 12,2 % aller Rutschungen in Untersuchungsgebiet auf. Die wenigsten Rutschungen (~5,1 %) liegen in Höhen zwischen 400 m bis 600 m vor. In Höhen über 600 m sind im Untersuchungsgebiet keine Rutschungen im DGM zu erkennen verzeichnet, diese Flächen sind aber wie oben erwähnt kaum im Untersuchungsgebiet vertreten (Abbildung 46).



5.1.4 TOBIA

Die Auswertung der TOBIA-Klassen für das gesamte Saar-Nahe-Gebiet zeigt, dass kataklinale Hänge im Untersuchungsgebiet mit ~29,85 % am häufigsten vorkommen (Klasse 1-3). Mit 14 % kommen dabei parallel zum Hang einfallende Schichten (Klasse 2) am häufigsten vor (Abbildung 47). Für die Klasse 1 ergibt sich eine relative Häufigkeit von 9,17 % und für die Klasse 3 eine Häufigkeit von 6,66 %. Die Klassen 4 bis 6 (anaklinale Hänge) haben insgesamt eine Häufigkeit von 20,71 %. Hier kommt die Klasse 5 mit 8,19 % am häufigsten vor. Orthoklinale Hänge mit einem kataklinalen Trend (Klasse 7-9) kommen im Untersuchungsgebiet mit einer Häufigkeit von 21,57 % vor. Orthoklinale Hänge mit anaklinalem Trend haben hingegen nur eine Häufigkeit von 19,66 % im Saar-Nahe-Gebiet. Somit kommen alle 4 übergeordnete TOBIA-Klassen im Untersuchungsgebiet ungefähr gleich häufig vor. Aufgrund der Berechnungsmethode des TOBIA-Modells gibt es außerdem Bereiche die keine Informationen (*no data*, Klasse 0) enthalten (siehe Abbildung 48) diese Bereiche nehmen innerhalb des Untersuchungsgebiets eine Häufigkeit von 8,2 % ein. Die größten Flächen ohne Daten finden sich am Untersuchungsgebietsrand Richtung Pfälzer Mulde und Mainzer Becken sowie am Potzberg.

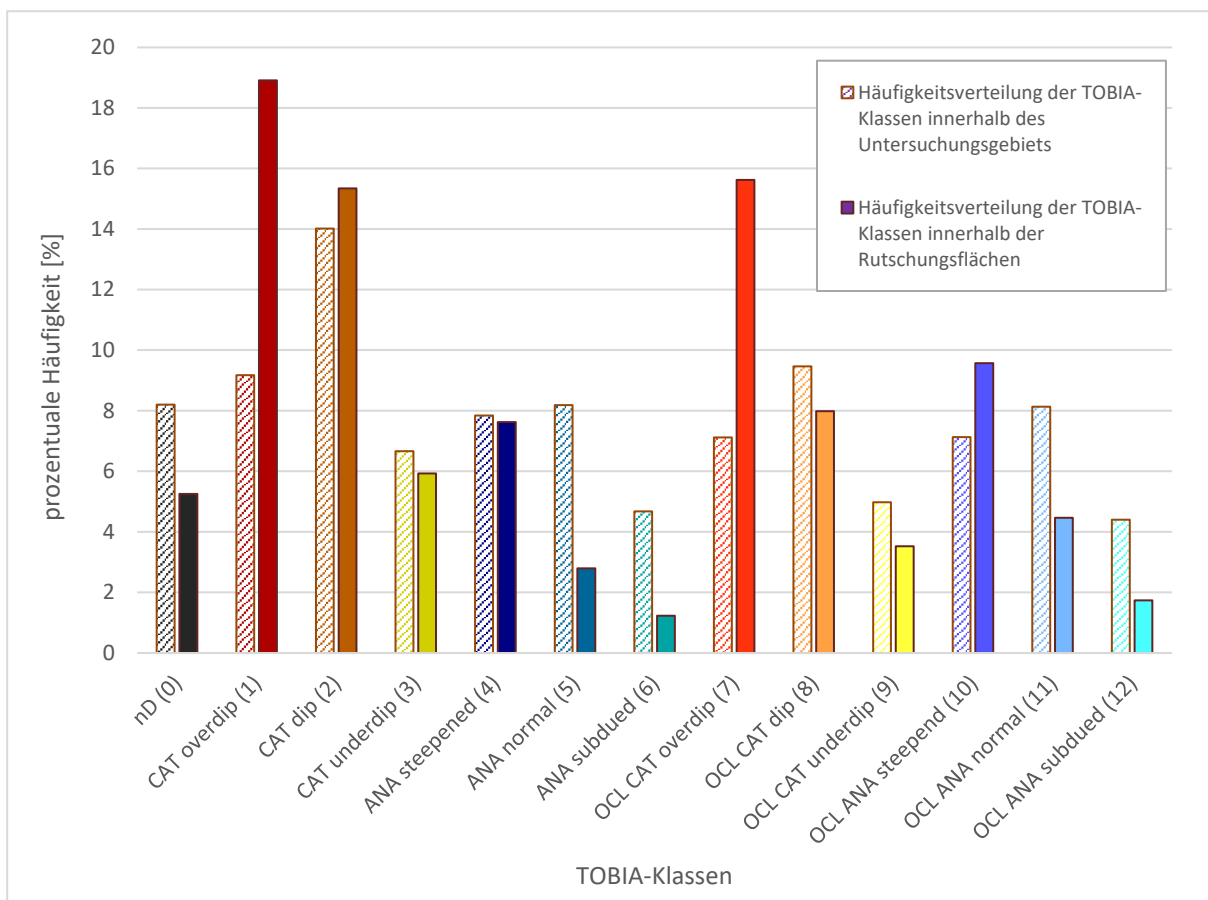


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der TOBIA-Klassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.

Die Verteilung der TOBIA-Klassen innerhalb der kartierten Rutschungsflächen zeigt drei deutliche Maxima. Am häufigsten treten Rutschungen an kataklinalen Hängen der Klasse 1 (*CAT overdip slope*) mit 18,9 % auf. Orthoklinale Hänge mit einem kataklinalen Trend der Klasse 7 haben innerhalb der Rutschungen die zweit höchste Häufigkeit mit 15,62 %. Danach treten an kataklinalen Hängen mit einem hangparallelen Einfallen (*CAT dip slope*, Klasse 2) die meisten Rutschungen auf. Klasse 2 hat eine relative Häufigkeit von 15,34 %. Alle anderen Klassen haben Häufigkeiten unter 10 %, die am wenigsten von Rutschungen betroffenen Hänge sind orthoklinale Hänge mit anaklinalem Trend der Klasse 12 mit 1,74 % (*OCL ANA subdued*) und anaklinale Hänge der Klasse 6 (*ANA subdued escarpment*) mit 1,23 %. Bereiche die keine Informationen (*no data*, Klasse 0) enthalten (siehe Abbildung 48) sind innerhalb der Rutschungen zu 5,25 % vertreten.

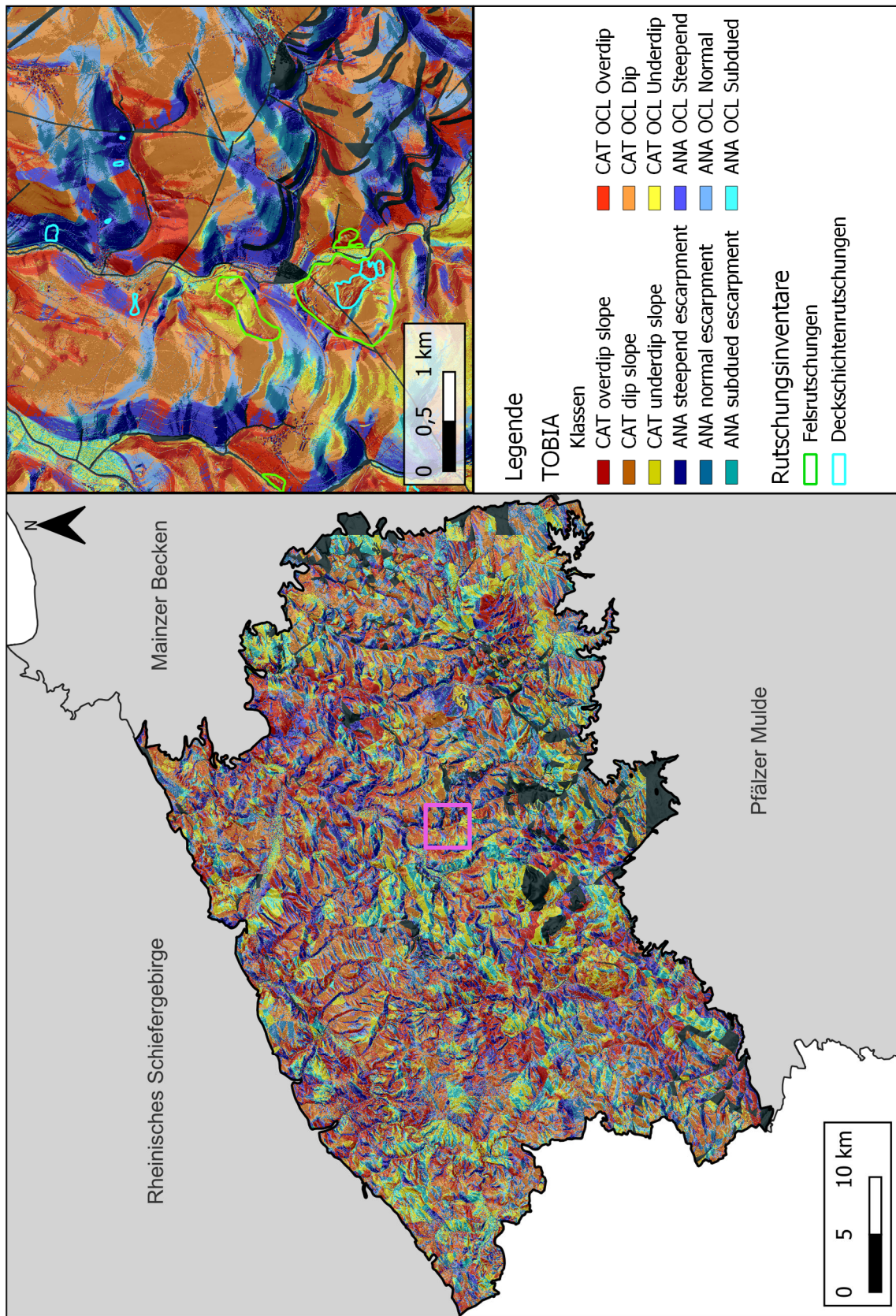


Abbildung 48: TOBIA Klassen innerhalb des Saar-Nahe-Gebiets sowie eine Detailansicht von mehreren Rutschungen im Untersuchungsgebiet

5.1.5 Ingenieurgeologische Klassen

Von den insgesamt 21 ingenieurgeologischen Klassen sind 16 im Untersuchungsgebiet 1 aufzufinden. Die Klassen 2, 12, 13, 14 und 15 sind im Saar-Nahe-Gebiet nicht abgelagert. Gesteine der Klasse 10, die tonigen und wechselgelagerten Halfestgesteine, treten mit Abstand (45,11 %) am häufigsten auf (Abbildung 49). Magmatische Festgesteine (Klasse 21), wie am Donnersberg und im Nordwesten des Untersuchungsgebiets treten mit einer Häufigkeit von 20,17 % auf. Sandsteine, Quarzite, Konglomerate (Klasse 19) liegen im Bereich des Donnersbergs und im Norden des Gebietes mit einer Häufigkeit von 12,92 % vor (Abbildung 50). Auch gering konsolidierte, bindige Lockergesteine (Klasse 3) treten mit einer Häufigkeit von 10,82 % im Untersuchungsgebiet auf. Löss und Lösslehm (Klasse 5) sind im Untersuchungsgebiet nur selten mit einer Häufigkeit von gerade mal 4,07 % vertreten. Alle weiteren Klassen haben eine Häufigkeit von unter 1 % im Untersuchungsgebiet und werden deswegen nicht weiter beschrieben.

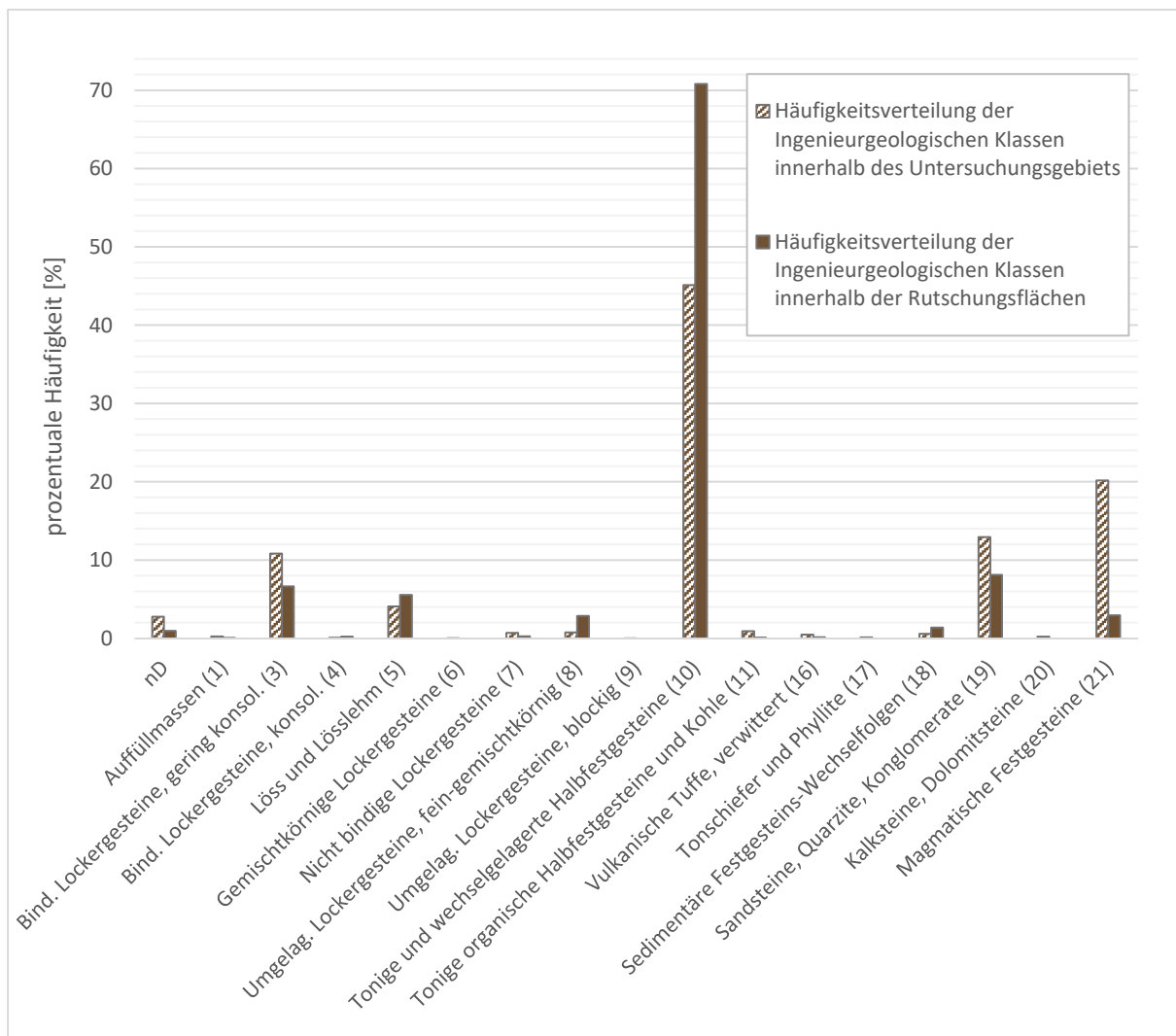
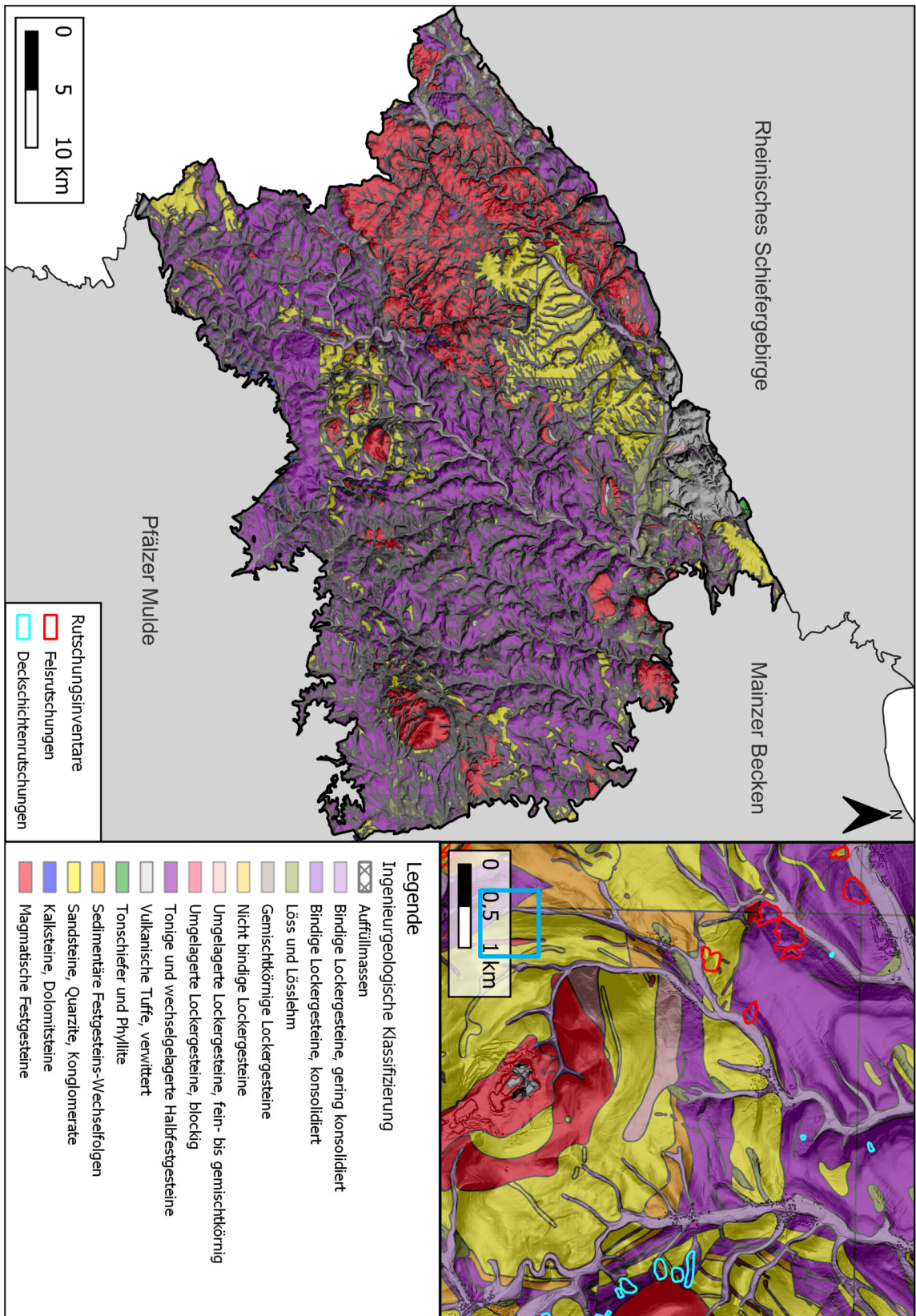


Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der Ingenieurgeologischen Klassen im Untersuchungsgebiet 1 und den in dem Gebiet kartierten Rutschungen.

Im Saar-Nahe Gebiet liegen Rutschungen in 13 der 21 ingenieurgeologischen Klassen vor. Klassen, in denen keine Rutschungen vorkommen sind die Klassen 6, 9, 17 und 20. Wie bei der Häufigkeitsverteilung innerhalb des gesamten Gebiets treten Rutschungen am häufigsten (70,8 %) in geologischen Einheiten der Klasse 10 auf (Abbildung 49). Alle anderen Klasse liegen mit Häufigkeiten von unter 10 % vor. Klasse 19 „Sandsteine, Quarzite, Konglomerate“ kommt innerhalb der Rutschungsflächen mit gerade 8,11 % vor und auch Klasse 3 „Bindige Lockergesteine, gering konsolidiert“ ist nur mit einer relativen Häufigkeit von 6,63 % bei den auftretenden Rutschungen vertreten. Klasse 5 „Löss und Lösslehm“ ist mit 5,54 % die viert häufigste Klasse innerhalb der Rutschungen. Klasse 21 und 8 überschreiten nicht mal die 3 % und alle restlichen Klassen liegen mit <1 % in den kartierten Rutschungsflächen vor. Der Ausschnitt in Abbildung 50 zeigt, dass Gebiet um den Potzberg hier treten Rutschungen vor allem in der Klasse 10 “Tonige & wechselgelagerte Halbfestgesteine“ auf.



5.1.6 TWI

Die Häufigkeitsverteilung des TWI im Saar-Nahe-Gebiet zeigt mit Abstand sein Maximum bei TWIs von 2 bis 6 (Klasse 3 und 4) mit 48,7 % und 45,4 %. TWIs von 2 bis 4 kommen dabei zum Großteil an den Hängen im Untersuchungsgebiet vor und Werte von 4 bis 6 in den Talauen sowie auf den flachen Bereichen der Hügelkämme (). Dritt höchste Klasse sind TWIs von 6 - 8 mit 3,1 %. Diese treten in Bereichen auf wo das abfließende Wasser gestaut wird und kaum ablaufen kann. Klasse 2 mit TWIs zwischen 0 und 2 haben im Untersuchungsgebiet eine Häufigkeit von 2,6 %, wobei diese Flächen hauptsächlich die Wände an Steinbrüchen sowie Infrastrukturen umfassen. Klasse 1 und 6 kommen am wenigsten im Untersuchungsgebiet vor mit Häufigkeiten von unter 1 % (Abbildung 51).

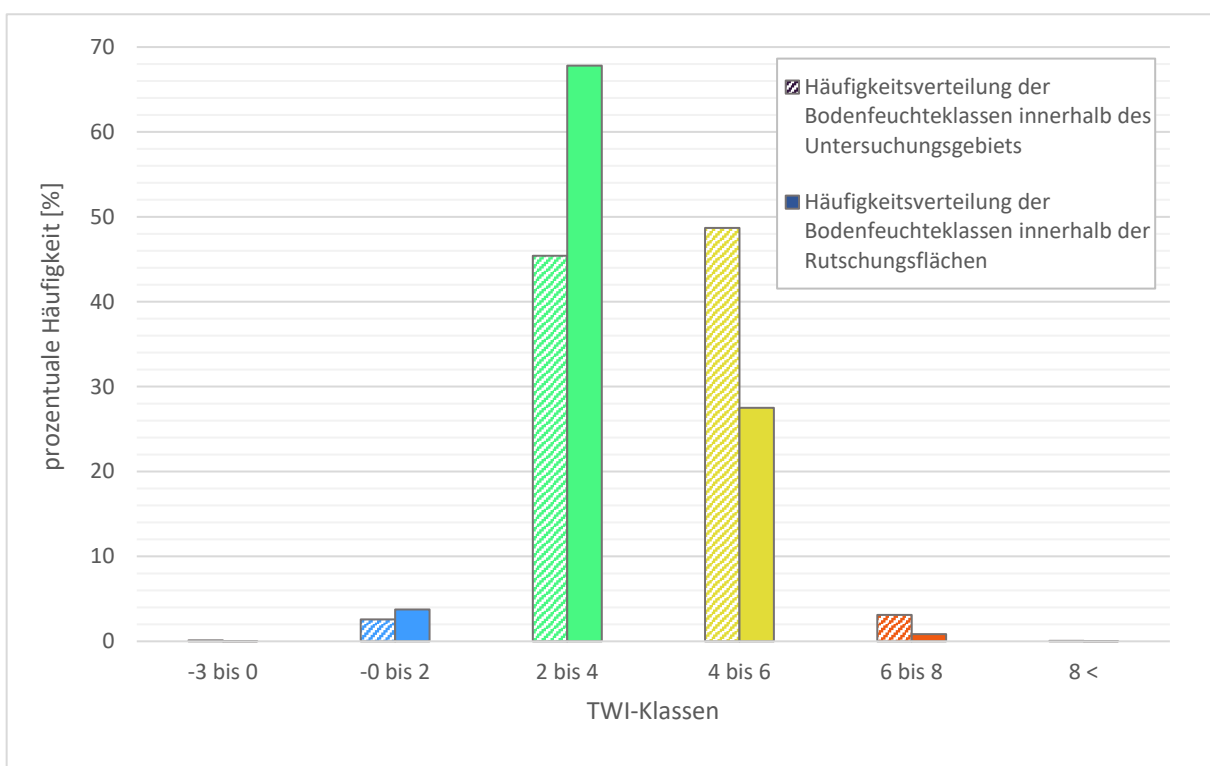
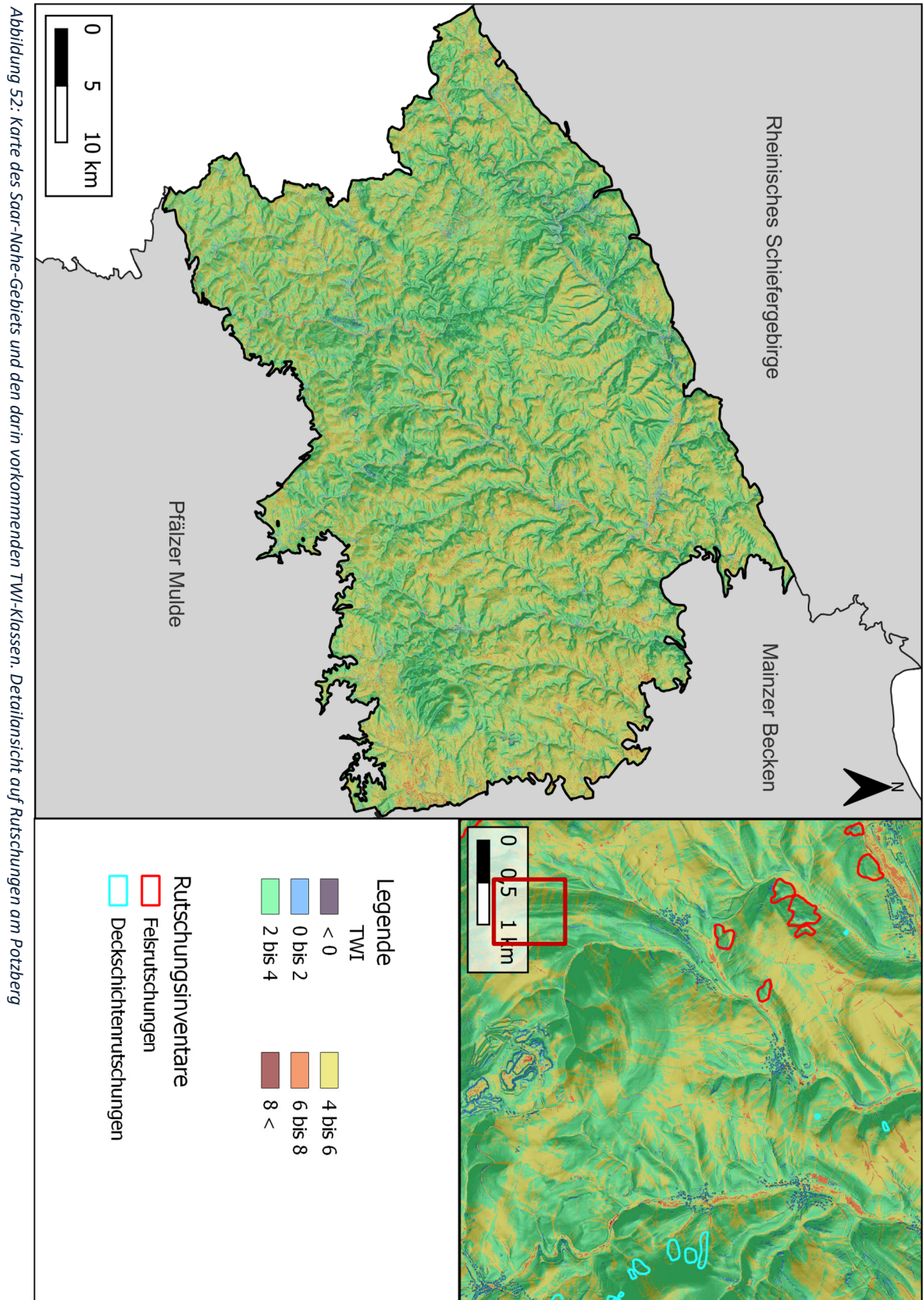


Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung des TWI innerhalb des Untersuchungsgebiet 1 und den dort auftretenden Rutschungen.

Die Verteilung innerhalb der Rutschungen zeigt ein klares Maximum bei Klasse 3 mit 67,8%. Hier treten am häufigsten Rutschungen auf. Am zweit häufigsten mit 27,5% treten Hangbewegungen in der Klasse 4 mit einem TWI von 4 bis 6 auf. Gefolgt von Klasse 2 mit 3,8%. Klasse 5, 6 und 1 haben mit Häufigkeiten unter 1% das geringste Rutschungsvorkommen. zeigt, dass sowohl die Felsrutschungen als auch Deckschichtenrutschungen in Hängen auftreten wo der TWI einen Wert von 2 bis 4 hat.



5.1.7 SPI

Die Häufigkeitsverteilung für den SPI innerhalb des Untersuchungsgebiets 1 zeigt ein Maximum bei Klasse 1 (0-10) mit einer Häufigkeit von 57,44 %. Diese eine Klasse nimmt somit über die Hälfte der Fläche des Untersuchungsgebiets ein (Abbildung 53). Dies ist zu erwarten, da auf den flachen Bereichen des Gebiets weniger Erosion stattfindet was auch gut in Abbildung 54 erkennbar ist. In flachen Bereichen hat Wasser tendenziell eine niedrigere Fließgeschwindigkeit, was bedeutet, dass weniger Energie zur Verfügung steht, um Erosion zu erzeugen. Durch Pflanzen, Steine und andere Hindernisse kann die Fließgeschwindigkeit in flachen Bereichen weiter gestört werden, was die Geschwindigkeit weiter reduziert und den SPI senkt. Die Häufigkeiten der Klassen nehmen bis zu Klasse 5 ab (SPI von 40 bis 50). Mit Häufigkeiten von 18,68 % bis 2,86 %. Danach steigt die Häufigkeit der zwei letzten Klassen gering an. Klasse 6 ist mit 4,82 % im Untersuchungsgebiet vorhanden und Klasse 7 mit 3,23 %.

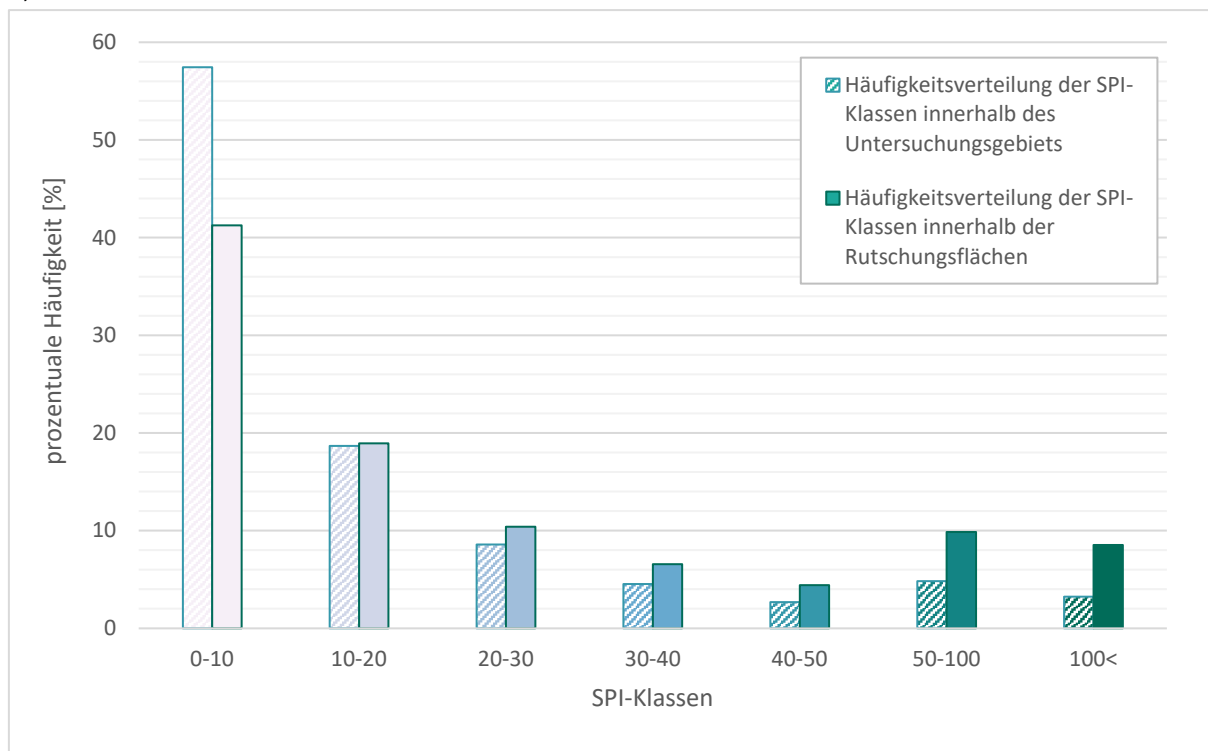


Abbildung 53: Häufigkeitsverteilung des SPI innerhalb des Untersuchungsgebiet 1 und den dort auftretenden Rutschungen.

Bei den Rutschungsflächen zeigt sich der gleiche Verteilungstrend wie im Untersuchungsgebiet allerdings mit einem geringeren Maximum. Es liegt auch bei Klasse 1 jedoch mit nur 41,26 %. Danach folgt Klasse 2 mit 18,94 %. Absteigende Häufigkeiten innerhalb der Rutschungsflächen treten bis Klasse 5 mit einem Minimum der Häufigkeitsverteilung bei 4,42 % auf. Klasse 6 mit einem SPI zwischen 50 und 100 erreicht innerhalb der Rutschungsflächen fast 10 % und Klasse 7 mit Werten über 100 hat eine Häufigkeit von 8,53 %.

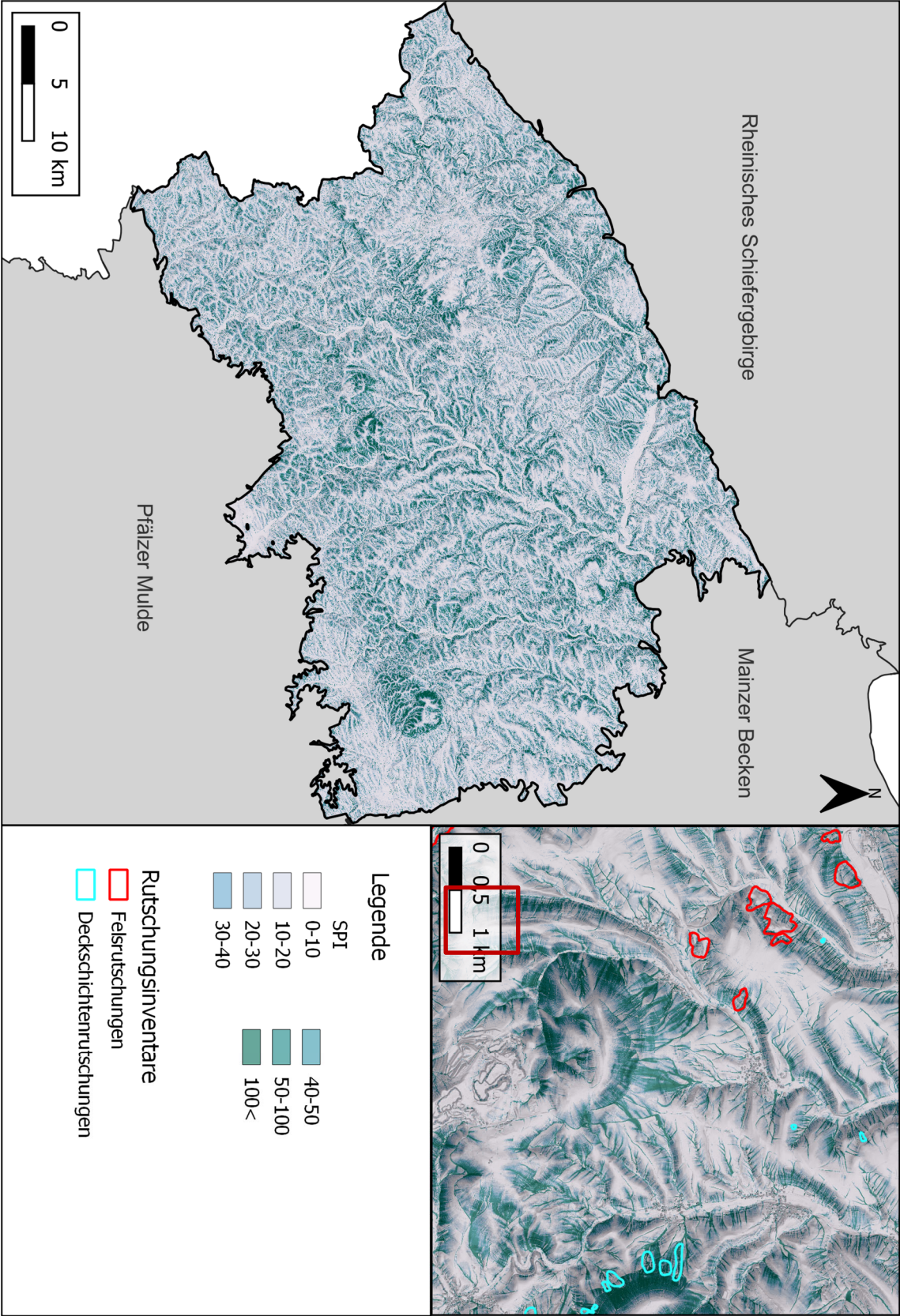


Abbildung 54: Karte des Saar-Nahe-Gebiets und den darin vorkommenden SPI-Klassen. Detailsicht auf Rutschungen um den Potzberg

5.2 Suszeptibilitätsanalyse

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der *Frequency-Ratio-Analyse* und *Weight-of-Evidence-Analyse* differenziert für Felsrutschungen und Deckschichtenrutschungen im Untersuchungsgebiet 1 präsentiert. Durch die Analyse wurden Bereiche (Parameterklassen) hoher Anfälligkeit identifiziert und diese Ergebnisse im nächsten Schritt verwendet, um verschiedene Modelle (Karten) für die Rutschungsanfälligkeit zu erstellen. Diese Modelle (Karten) werden in Kapitel 5.3. (5.4.) gezeigt und genauer erläutert.

5.2.1 Felsrutschungen

Aus Tabelle 15 geht hervor, dass Felsrutschungen bei Hängen mit einer Neigung bis 10° selten vorkommen. Die FR-Werte der beiden Klassen liegen unter 1 und korrelieren somit kaum mit den Rutschungen. Dies zeigt auch der Kontrast C, welcher bei diesen beiden Klassen negativ ist, was einer negativen Korrelation entspricht. Felsrutschungen kommen bei Hängen mit einer Neigung von mehr als 10° häufiger vor. Die Anfälligkeit für Rutschungen steigt mit zunehmender Hangneigung. Der FR-Wert und der Kontrast C ist am höchsten für die Hangklasse 40° - 45°, gefolgt von der Hangklasse 35° - 40°. Mit zunehmender Hangneigung nimmt die Scherspannung generell zu. Bei flachen Hängen ist somit mit einer geringen Häufigkeit von Rutschungen zu rechnen, da die Scherspannung hier im Allgemeinen niedriger ist. Das spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider. Hangneigungen über 45° sind auch anfällig für Rutschungen (FR > 1) korrelieren aber nicht so stark mit den Rutschungen (C = 0,19) wie der Rest der anfälligen Klassen. Dies könnte daran liegen, dass bei Hangneigungen über 45° andere Hangbewegungstypen wie Steinschläge oder Felsstürze initiiert werden können.

Tabelle 15: Räumliche Beziehung zwischen der Hangneigung und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Hangneigung Felsrutschungen							
ID	Klasse	Pixel mit RF	Pixel ohne RF	FR	W+	W-	C
1	0° bis 5°	279053	555033969	0,27	-1,31	0,24	-1,55
2	5° bis 10°	814821	643242243	0,68	-0,38	0,14	-0,52
3	10° bis 15	874099	354378026	1,32	0,28	-0,07	0,35
4	15° bis 20°	669977	188225893	1,91	0,65	-0,10	0,75
5	20° bis 25°	436559	121693747	1,92	0,66	-0,06	0,72
6	25° bis 30°	293982	79267441	1,99	0,69	-0,04	0,73
7	30° bis 35°	197801	44797362	2,37	0,86	-0,03	0,90
8	35° bis 40°	121989	22298911	2,93	1,08	-0,02	1,10
9	40° bis 45°	61076	10448827	3,13	1,14	-0,01	1,16
10	45° bis 90°	44407	19838952	1,20	0,18	-0,002	0,19

Die FR- und WoE-Analyse der Exposition zeigt, dass die nach Nordwesten ausgerichteten Hänge am stärksten von Felsrutschungen betroffen sind. Sie haben FR-Werte von 1,19 und einen Kontrast C von 0,2. Auch nordost-, nord- und südostexponierte Hängen sind anfällig für Felsrutschungen (FR >1). Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass alle mit den Felsrutschungen stark korrelierenden Hänge eine ähnliche Anfälligkeit haben, da sich diese in den FR- und C-Werten kaum unterscheiden (Tabelle 16). Alle anderen Hangrichtungen (O, S, SW und W) korrelieren kaum mit den Rutschungsflächen da sie FR-Werte unter 1 bzw. negative Kontraste aufweisen.

Tabelle 16: Räumliche Beziehung zwischen der Hangexposition und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.

Hangexposition Felsrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	Nord	635311	313827211	1,09	0,08	-0,02	0,10
2	Nordost	489922	240441958	1,10	0,09	-0,01	0,10
3	Ost	419980	241312012	0,94	-0,07	0,01	-0,08
4	Südost	625083	324840739	1,03	0,03	-0,01	0,04
5	Süd	427832	257219026	0,89	-0,11	0,02	-0,13
6	Südwest	220263	173536321	0,68	-0,38	0,03	-0,41
7	West	324462	193148698	0,90	-0,10	0,01	-0,11
8	Nordwest	650908	294883199	1,19	0,17	-0,03	0,20

Im Falle der Höhe ist die Rutschungsdichte am höchsten in Lagen zwischen 100 m und 200 m, gefolgt von 200 m bis 300 m. Der Frequency Ratio der Klasse 1 liegt mit einem Wert >3 deutlich über den anderen Parameterklassen. In Klasse 2 liegt der FR knapp unter 2 (Tabelle 17). Höhenlagen zwischen 300 m und über 600 m würden nach den Anfälligkeitsberechnungen kaum mit den kartierten Rutschungen korrelieren. Hier sind die FR-Werte < 1 und der Kontrast C ist negativ. In Höhen zwischen 600 m und 700 m treten im Untersuchungsgebiet keine Rutschungen auf der FR ist 0 und der Kontrast C ist $-\infty$ (-Inf). Aufgrund der Berechnungsmethode über den Logarithmus kommt es bei dem Fall, dass keine Rutschungen kartiert sind zu einem unendlich negativen Wert (-Inf) für W+ und im Umkehrschluss auch für den Kontrast C. Die Felsrutschungen liegen mit ihren auskartierten Flächen auf Grund ihrer Größe und Länge häufig in mehreren Metern Höhenlage. Somit ist hier die Höhe als Faktor eher ungeeignet und sollte mit Vorsicht betrachtet werden.

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

Tabelle 17: Räumliche Beziehung zwischen den Höhenlagen und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Höhe Felsrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	100-200m	569341	95954336	3,18	1,16	-0,11	1,27
2	200-300m	2338134	680197221	1,84	0,61	-0,55	1,17
3	300-400m	671413	842066835	0,43	-0,85	0,34	-1,19
4	400-500m	172643	363962599	0,26	-1,37	0,15	-1,52
5	500-600m	42233	53717494	0,42	-0,86	0,02	-0,88
6	600-700m	0	3326633	0	-Inf	0,002	-Inf

In Bezug auf die Korrelation von tiefen Rutschungen und den Lagerungsverhältnissen von geologischen Schichten lassen sich interessante Zusammenhänge feststellen. Bei kataklinalen Hängen, also bei Hängen, in denen die Schichten mit dem Hang einfallen, treten im Saar-Nahe-Gebiet am häufigsten Rutschungen auf. Die Korrelation ist hier mit am größten und alle drei Klassen weisen FR-Werte größer als 1 bzw. einen positiven Kontrast C auf (Tabelle 18). Die größte Korrelation innerhalb der kataklinalen Hänge lässt sich bei *overdip*-Hängen feststellen, die einen FR-Wert von über 2 und einen Kontrast C von 0,88 aufweisen. Hänge, die anaklinal klassifiziert sind, also die Schichten gegen den Hang einfallen, weisen hingegen kaum eine Korrelation mit den Rutschungen im Untersuchungsgebiet auf, der größte FR-Wert ist hier bei Hängen der Klasse "*steepend*" mit 0,66 zu finden. Bei orthoklinalen Hängen korrelieren sowohl "*CAT OCL overdip*" mit einem FR-Wert von 2,69 als auch "*ANA OCL steepend*" mit einem FR-Wert von 1,48 mit Rutschungen. Alle weiteren orthoklinalen Hänge weisen hingegen keine Korrelation mit Rutschungen auf.

Tabelle 18: Räumliche Beziehung zwischen den TOBIA-Klassen und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.

TOBIA Felsrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	no data	89443	167519376	0,29	-1,25	0,06	-1,31
1	CAT overdip	740736	186678889	2,13	0,76	-0,12	0,88
2	CAT dip	578861	285808354	1,09	0,08	-0,01	0,09
3	CAT underdip	270879	135858721	1,07	0,07	-0,01	0,07
4	ANA steepend	196328	160038661	0,66	-0,42	0,03	-0,45
5	ANA normal	98538	167200764	0,32	-1,15	0,06	-1,21
6	ANA subdued	45516	95525889	0,26	-1,36	0,04	-1,40
7	CAT OCL overdip	727756	144736641	2,69	0,99	-0,14	1,13
8	CAT OCL normal	301474	193130050	0,84	-0,18	0,02	-0,19
9	CAT OCL underdip	152971	101562465	0,81	-0,21	0,01	-0,22
10	ANA OCL steepend	399013	145274466	1,48	0,39	-0,04	0,43
11	ANA OCL normal	130928	166040286	0,42	-0,86	0,05	-0,91
12	ANA OCL subdued	61321	89856261	0,37	-1,00	0,03	-1,03

Im Rahmen der Berechnungen wurden auch die verschiedenen Ingenieurgeologischen Klassen hinsichtlich ihrer Korrelation mit Rutschungen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass bestimmte Klassen im Untersuchungsgebiet nicht auftreten, nämlich organische Lockergesteine, Mergel/Mergelsteine, ausgeprägte wasserlösliche Gesteine, vulkanische Tuffe/Laacher-See-Tephra und verfestigte vulkanische Tuffe (vgl. Kapitel 5.1.5). Ebenso wurde festgestellt, dass keine Rutschungen in Auffüllmassen, konsolidierten bindigen Lockergesteinen, gemischtkörnigen Lockergesteinen, blockig umgelagerten Lockergesteinen, Tonschiefer & Phylliten und Kalksteinen/Dolomitsteinen auftreten. Alle diese Klassen haben einen FR-Wert von 0 bzw. einen Kontrast C von $-\infty$, was auf eine fehlende Korrelation zum Rutschungsaufreten hinweist. Interessant ist auch das, die höchste Korrelation zwischen Gesteinsklasse und Rutschungen bei fein- bis gemischtkörnigen, umgelagerten Lockergesteinen mit einem FR-Wert von 4,98 ($C = 1,64$) festgestellt wurde. Sedimentäre Festgestein-Wechselfolgen haben einen FR-Wert von über 3, gefolgt von Löss & Lösslehmen mit einem FR-Wert über 1,5 (siehe Tabelle 19). Tonige & wechselgelagerten Halbfestgesteinen die im Saar-Nahe-Gebiet als sehr rutschungsanfällig gelten (Wehinger et al. 2022) haben "nur" einen FR-Wert von 1,48 ($C = 0,89$). Die Klassen 0,3,7,11, 19 und 21 weisen einen FR-Wert unter 1 auf und zeigen somit kaum Korrelation zwischen den jeweiligen ingenieurgeologischen Klassen und dem Rutschungsaufreten. Auf diese Klassen wird somit nicht weiter eingegangen.

Tabelle 19: Räumliche Beziehung zwischen den Ingenieurgeologischen Klassen und den Felsrutschungen unter Verwendung des FR und dem WoE für das Saar-Nahe-Gebiet. NaN = Not a Number, hier konnten keine Ergebnisse berechnet werden da die Klassen nicht im Untersuchungsgebiet vorkommen.

Ingenieurgeologische Klassifizierung Felsrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	NoData	3941	56609722	0,04	-3,29	0,03	-3,31
1	Auffüllmassen	0	4919732	0	-Inf	0,00	-Inf
2	Organische Lockergesteine	0	0	NaN	NaN	0	NaN
3	Bindige Lockergesteine, gering konsolidiert	256894	220900472	0,63	-0,47	0,04	-0,51
4	Bindige Lockergesteine, konsolidiert	0	1632463	0	-Inf	0,00	-Inf
5	Löss und Lösslehm	254111	83035636	1,64	0,50	-0,03	0,53
6	Gemischtkörnige Lockergesteine	0	592690	0	-Inf	0,00	-Inf
7	Nicht bind. Lockergesteine	20368	14220851	0,77	-0,26	0,00	-0,26
8	Umgel. Lockergesteine, fein- bis gemischtkörnig	144219	15442377	4,98	1,61	-0,03	1,64
9	Umgelagerte Lockergesteine, blockig	0	175592	0	-Inf	0,00	-Inf
10	Tonige & wechselgelagerte Halbfestgesteine	2531315	919110942	1,48	0,39	-0,50	0,89
11	Tonige organische Halbfestgesteine und Kohle	3312	18547723	0,10	-2,34	0,01	-2,35
12	Mergel/ Mergelsteine	0	0	NaN	NaN	0	NaN

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

13	Ausgeprägt wasserlösliches Gestein	0	0	NaN	NaN	0	NaN
14	Vulkanisch Tuffe, Laacher See-Tephra	0	0	NaN	NaN	0	NaN
15	Vulkanische Tuffe, verfestigt	0	0	NaN	NaN	0	NaN
16	Vulkanische Tuffe, verw.	0	9768884	0	-Inf	0,01	-Inf
17	Tonschiefer und Phyllite	0	2521397	0	-Inf	0,00	-Inf
18	Sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen	78357	11520861	3,64	1,30	-0,02	1,31
19	Sandsteine, Quarzite, Konglomerate	345943	263681157	0,71	-0,35	0,04	-0,39
20	Kalksteine, Dolomitsteine	0	4676820	0	-Inf	0,00	-Inf
21	Magmatische Festgesteine	155304	411892385	0,20	-1,6	0,18	-1,78

Im Falle des Topografischen Bodenfeuchteindex ist die Felsrutschungsdichte bei Werten zwischen 0 und 4 am höchsten. Bei TWIs mit Werten zwischen 0 und 2 liegt der FR bei 1,44 und der Kontrast C bei 0,38. Bei Werten zwischen 2 bis 4 liegt der FR etwas höher bei 1,56 und der Kontrast C sogar bei 1,08. Die restlichen Klassen korrelieren kaum ($FR < 1$) mit den Rutschungsflächen (Tabelle 20).

Tabelle 20: Räumliche Beziehung zwischen dem TWI und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

TWI-Felsrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	-3 bis 0	720	2355828	0,16	-1,81	0,00	-1,81
2	0 bis 2	141266	52652854	1,44	0,37	-0,01	0,38
3	2 bis 4	2696280	925238482	1,56	0,45	-0,64	1,08
4	4 bis 6	924669	994134770	0,50	-0,69	0,39	-1,08
5	6 bis 8	30008	63592754	0,25	-1,37	0,02	-1,40
6	8 bis 10	818	1208610	0,36	-1,01	0,00	-1,01

Die FR- und WoE-Analyse des *Stream Power Index* zeigt, dass die Korrelation zwischen Rutschungsflächen und Index mit zunehmendem SPI steigt (siehe Tabelle 21). Werte von 0 bis 10 weisen kaum Korrelation auf, hier wurden FR von 0,71 und ein Kontrast C von -0,68 berechnet. Somit gibt es starke Korrelationen zwischen SPI und Felsrutschungen bei SPIs von 10 bis über 100. Am anfälligsten sind SPIs über 100 mit einem FR von $> 2,5$ bzw. einem Kontrast C von 1, hier sind im Untersuchungsgebiet 1 am häufigsten Rutschungen kartiert.

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

Tabelle 21: Räumliche Beziehung zwischen dem SPI und den Felsrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

SPI-Felsrutschungen								
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C	
1	0-10	1543554	1172058350	0,71	-0,35	0,33	-0,68	
2	10-20	746443	380813143	1,05	0,05	-0,01	0,06	
3	20-30	405345	174853474	1,25	0,22	-0,02	0,24	
4	30-40	249534	92643503	1,45	0,37	-0,02	0,39	
5	40-50	166689	54682589	1,64	0,49	-0,02	0,51	
6	50-100	365682	98288178	2,00	0,69	-0,05	0,75	
7	100<	316517	65847837	2,58	0,95	-0,05	1,00	

5.2.2 Deckschichtenrutschungen

Aus Tabelle 22 geht hervor, dass Deckschichtenrutschungen, genau wie Felsrutschungen im Untersuchungsgebiet nur selten bei Hängen mit einer Neigung bis 10° vorkommen. Die FR-Werte der beiden Klassen liegen unter 1 und korrelieren somit kaum mit den Rutschungen. Dies zeigt auch der Kontrast C, welcher bei diesen beiden Klassen stark negativ ist. Deckschichtenrutschungen kommen im Saar-Nahe-Gebiet bei Hängen mit einer Neigung von 10° bis 45° häufiger vor. Die Anfälligkeit für Rutschungen steigt mit Hangneigung bis 25° und sinkt danach wieder etwas ab. Der FR-Wert und der Kontrast C ist am höchsten für die Hangklassen 20° - 25°, gefolgt von der Hangklasse 15° - 20° (siehe Tabelle 22). Aber auch Hangneigungen zwischen 25° - 40° haben eine hohe Korrelation mit den Deckschichtenrutschungen (FR > 2). Im Vergleich zu den Felsrutschungen sind kaum Rutschungen bei Hangneigungen von über 45° verzeichnet und haben somit einen FR < 1 und einen negativen Kontrast C. Bei dieser Hangklasse kann somit nicht von einer Korrelation zwischen Hangneigung und Rutschungsauftreten ausgegangen werden.

Tabelle 22: Räumliche Beziehung zwischen der Hangneigung und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Hangneigung Deckschichtenrutschungen							
Klassen ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	0° bis 5°	84120	555228902	0,18	-1,71	0,27	-1,97
2	5° bis 10°	320220	643736844	0,60	-0,52	0,17	-0,69
3	10° bis 15°	445431	354806694	1,50	0,41	-0,11	0,52
4	15° bis 20°	347346	188548524	2,21	0,79	-0,13	0,92
5	20° bis 25°	226051	121904255	2,22	0,80	-0,08	0,88
6	25° bis 30°	135879	79425544	2,05	0,72	-0,04	0,76
7	30° bis 35°	77169	44917994	2,06	0,72	-0,02	0,75
8	35° bis 40°	40950	22379950	2,19	0,79	-0,01	0,80
9	40° bis 45°	17078	10492825	1,95	0,67	-0,01	0,67
10	45° bis 90°	9242	19874117	0,56	-0,58	0,00	-0,59

Die FR- und WoE-Analyse der Exposition zeigt, dass die nach Osten ausgerichteten Hänge am stärksten von Deckschichtenrutschungen betroffen sind. Sie haben FR-Werte von 1,76 und einen Kontrast C von 0,68 (Tabelle 23). Auch anfälliger für solche Arten von Rutschungen sind die Nordost und Südost ausgerichteten Hängen mit FR-Werten über 1 und einem positiven Kontrast C. Alle anderen Hangrichtungen (N, S, SW, W und NW) korrelieren kaum mit den Rutschungsflächen da sie FR-Werte unter 1 bzw. negative Kontraste aufweisen.

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

Tabelle 23: Räumliche Beziehung zwischen der Hangexposition und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Hangexposition Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	Nord	168431	314294091	0,64	-0,44	0,06	-0,51
2	Nordost	310735	240621145	1,55	0,44	-0,08	0,51
3	Ost	355642	241376350	1,76	0,57	-0,11	0,68
4	Südost	315027	325150795	1,16	0,15	-0,03	0,18
5	Süd	193051	257453807	0,90	-0,11	0,01	-0,13
6	Südwest	103969	173652615	0,72	-0,33	0,03	-0,36
7	West	143584	193329576	0,89	-0,12	0,01	-0,13
8	Nordwest	113047	295421060	0,46	-0,78	0,09	-0,87

Im Falle der Höhe ist die Rutschungsdichte bei Deckschichtenrutschungen am höchsten in Höhen zwischen 200 m und 300 m, gefolgt von 100 m bis 200 m. Beide Klassen haben einen Frequency Ratio über 1,5. Höhenlagen zwischen 300 m und 500 m würden nach den Anfälligkeitsberechnungen kaum mit den kartierten Rutschungen korrelieren. Hier sind die FR-Werte < 1 und der Kontrast C ist negativ. In Höhen zwischen 500 m und >600 m liegen keine flachen Rutschungen vor (Tabelle 24). Ähnlich wie bei den Felsrutschungen liegen die Deckschichtenrutschungen mit ihren auskartierten Flächen auf Grund ihrer Größe und Länge häufig in mehreren Metern Höhenlage. Somit ist auch hier die Höhe als Faktor eher ungeeignet.

Tabelle 24: Räumliche Beziehung zwischen den Höhenlagen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Höhe Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	100-200	121869	96401808	1,51	0,42	-0,03	0,44
2	200-300	989058	681546297	1,74	0,55	-0,46	1,02
3	300-400	441000	842297248	0,63	-0,47	0,23	-0,70
4	400-500	151559	363983683	0,50	-0,70	0,10	-0,80
5	500-600	0	53759727	0	-Inf	0,03	-Inf
6	600-700	0	3326633	0	-Inf	0,002	-Inf

Die Auswertung der TOBIA-Klassen in Bezug auf das Rutschungsverhalten in kataklinalen und anaklinalen Hängen im Untersuchungsgebiet ergab keinen eindeutigen Trend. Bei den kataklinalen Hängen weisen lediglich *overdip*- und *underdip*-Hänge einen FR über 1 bzw. einen positiven Kontrast C auf und zeigen somit eine positive Korrelation zwischen Rutschungen und den TOBIA-Klassen. Die größte Korrelation aller Klassen mit einem FR von 1,65 (C = 0,57) konnte bei kataklinalen *overdip*-

Hängen festgestellt werden (Tabelle 25). Im Gegensatz dazu weisen die anaklinalen Hänge keine bzw. eine negative Korrelation ($C < 0$) zwischen den TOBIA-Klassen und Rutschungen auf, ausgenommen hiervon ist die *steepend*-Klasse mit einem FR von 1,64 die fast genauso viele Rutschungen aufweist wie die kataklinalen *overdip*-Hänge. Auch bei den Hängen der Klasse „CAT OCL *overdip*“ und „ANA OCL *steepend*“ wurde ein FR über 1 ($C > 0$) gemessen und somit eine Korrelation zwischen Rutschungsaufreten und den Lagerungsverhältnissen festgestellt.

Tabelle 25: Räumliche Beziehung zwischen den TOBIA-Klassen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Untersuchungsgebiet 1.

TOBIA Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	no data	206007	167402812	1,47	0,39	-0,04	0,43
1	CAT overdip	258149	187161476	1,65	0,50	-0,07	0,57
2	CAT dip	161039	286226176	0,67	-0,39	0,05	-0,45
3	CAT underdip	127267	136002333	1,12	0,11	-0,01	0,12
4	ANA steepend	218685	160016304	1,64	0,49	-0,06	0,55
5	ANA normal	60609	167238693	0,43	-0,83	0,05	-0,88
6	ANA subdued	30153	95541252	0,38	-0,97	0,03	-1,00
7	CAT OCL overdip	176086	145288311	1,45	0,37	-0,04	0,41
8	CAT OCL normal	92835	193338689	0,58	-0,55	0,04	-0,60
9	CAT OCL underdip	75649	101639787	0,89	-0,11	0,01	-0,12
10	ANA OCL steepend	149153	145524326	1,23	0,21	-0,02	0,22
11	ANA OCL normal	100594	166070620	0,73	-0,32	0,02	-0,34
12	ANA OCL subdued	47260	89870322	0,63	-0,46	0,02	-0,48

Im Rahmen einer Suszeptibilitätsanalyse für Deckschichtenrutschungen wurden im Untersuchungsgebiet 1 verschiedene Ingenieurgeologische Klassen identifiziert, in denen keine Rutschungen auftreten. Dazu gehören gemischtkörnige, nicht bindige oder umgelagerte, blockige Lockergesteine, tonige organische Halbfestgestein & Kohle, Tonschiefer & Phyllite und Kalkstein bzw. Dolomitstein. Diese Klassen haben einen Frequency Ratio (FR) von 0 und einen Kontrast von $-\infty$. Die höchste Korrelation mit Deckschichtenrutschungen wurde für die Klasse bindige, konsolidierte Lockergesteine festgestellt, mit einem FR von 12,7 und einem Kontrast C von 2,56. Die Klasse der umgelagerten Lockergesteine (blockig) hat ebenfalls eine hohe Korrelation mit einem FR über 4 und einem Kontrast von 1,46 (Tabelle 26). Die folgenden Klassen, die eine positive Korrelation mit Deckschichtenrutschungen aufweisen, sind sedimentäre Festgesteine, tonige und wechselgelagerte Halbfestgesteine, verwitterte vulkanische Tuffe und Auffüllmassen mit einem FR über 1. Die Klassen „bindige Lockergesteine, gering konsolidiert“, „Löss und Lösslehme“, „Sandsteine, Quarzite und Konglomerate“ und „magmatische Festgesteine“ weisen einen FR-Wert unter 1 auf und zeigen somit

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

kaum Korrelation zwischen den jeweiligen ingenieurgeologischen Klassen und dem Rutschungsaufreten.

Tabelle 26: Räumliche Beziehung zwischen den Ingenieurgeologischen Klassen und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

Ingenieurgeologische Klassifizierung Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	NoData	55749	56557914	1,18	0,17	-0,01	0,17
1	Auffüllmassen	4774	4914958	1,16	0,15	-0,00	0,15
2	Organische Lockergesteine	0	0	NaN	NaN	0	NaN
3	Bindige Lockergesteine, gering konsolidiert	165725	220991641	0,90	-0,17	0,01	-0,12
4	Bindige Lockergesteine, konsolidiert	17289	1615174	12,70	2,56	-0,01	2,56
5	Löss und Lösslehm	54142	83235605	0,78	-0,25	0,01	-0,26
6	Gemischtkörnige Lockergesteine	0	592690	0	-Inf	0,00	-Inf
7	Nicht bindige Lockergesteine	0	14241219	0	-Inf	0,01	-Inf
8	Umgel. Lockergesteine, fein- bis gemischtkörnig	54667	15531929	4,21	1,44	-0,02	1,46
9	Umgelagerte Lockergesteine, blockig	0	175592	0	-Inf	0,00	-Inf
10	Tonige & wechselgelagerte Halbfestgesteine	1134545	920507712	1,48	0,39	-0,50	0,89
11	Tonige organ. Halbfestgesteine & Kohle	0	18551035	0	-Inf	0,01	-Inf
12	Mergel/ Mergelsteine	0	0	NaN	NaN	0	NaN
13	Ausgeprägt wasserlösl. Gestein (gipshaltige Mergel/ Mergelsteine)	0	0	NaN	NaN	0	NaN
14	Vulkanische Tuffe, Laacher See-Tephra (Bims)	0	0	NaN	NaN	0	NaN
15	Vulkanische Tuffe, verfestigt	0	0	NaN	NaN	0	NaN
16	Vulkanische Tuffe, verwittert	11277	9757607	1,38	0,33	-0,00	0,33
17	Tonschiefer und Phyllite	0	2521397	0	-Inf	0,00	-Inf
18	Sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen	17061	11582157	1,76	0,57	-0,00	0,57
19	Sandsteine, Quarzite, Konglomerate	151216	263875884	0,69	-0,38	0,05	-0,42
20	Kalksteine, Dolomitsteine	0	4676820	0	-Inf	0,00	-Inf
21	Magmatische Festgesteine	37041	412010648	0,11	-2,23	0,20	-2,43

Die Analyse des TWI bei Deckschichtenrutschungen zeigt, einen ähnlichen Trend wie bei den Felsrutschungen. Deckschichtenrutschungen treten bei einem TWI-Wert zwischen 0 und 4 am häufigsten auf. Eine Differenzierung ergibt, dass bei TWIs zwischen 0 und 2 ein FR von 1,48 und ein Kontrast von 0,41 berechnet wurde. Bei TWIs zwischen 2 und 4 erhöht sich der FR auf 1,53 und der Kontrast steigt sogar auf 1,01 (siehe Tabelle 27). In diesen zwei Klassen ist die Korrelation zwischen Rutschungsaufreten und TWI also am stärksten. Für die restlichen Klassen besteht kaum Korrelation mit den Rutschungsflächen, hier wurde ein FR von unter 1 bzw. ein negativer Kontrast C festgestellt.

Tabelle 27: Räumliche Beziehung zwischen dem TWI und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet.

TWI-Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	-3 bis 0	164	2356384	0,08	-2,48	0,00	-2,49
2	0 bis 2	65270	52728850	1,48	0,39	-0,01	0,41
3	2 bis 4	1185680	926749082	1,53	0,43	-0,59	1,01
4	4 bis 6	441852	994617587	0,53	-0,63	0,37	-1,00
5	6 bis 8	10067	63612695	0,19	-1,66	0,03	-1,69
6	8 bis 10	453	1208975	0,45	-0,80	0,00	-0,80

Der Zusammenhang zwischen dem *Stream Power Index* und den Rutschungsflächen der Deckschichtenrutschungen ist ähnlich wie bei den Felsrutschungen. Die Korrelation zwischen SPI und Rutschungen steigt mit zunehmendem SPI. Bei Werten zwischen 0 und 20 wurde kaum Korrelation festgestellt, und die FR-Werte lagen knapp unter 1, worauf auch der negative Kontrast C hindeutet. Hingegen gibt es Korrelationen zwischen Rutschungen und SPI bei Werten von 20 bis über 100. Die am stärksten betroffenen Gebiete sind diejenigen mit einem SPI von über 100, wo der höchste FR-Wert (FR = 3,16) und ein Kontrast C von 1,23 berechnet wurden (Tabelle 28). Hier sind im Saar-Nahe-Gebiet am häufigsten Rutschungen kartiert.

Tabelle 28: Räumliche Beziehung zwischen dem SPI und den Deckschichtenrutschungen unter Verwendung des Frequency Ratios und dem Weight-of-Evidence für das Saar-Nahe-Gebiet

SPI-Deckschichtenrutschungen							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	0-10	600684	1173001220	0,61	-0,49	0,42	-0,91
2	10-20	310281	381249305	0,98	-0,03	0,01	-0,03
3	20-30	193388	175065431	1,32	0,28	-0,03	0,31
4	30-40	129592	92763445	1,67	0,52	-0,03	0,55
5	40-50	89607	54759671	1,96	0,67	-0,03	0,70
6	50-100	205372	98448488	2,50	0,92	-0,08	1,00
7	100<	174562	65989792	3,16	1,15	-0,08	1,23

5.2.3 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Suszeptibilitätsanalysen

Wie zu erwarten, nimmt die Anfälligkeit für Rutschungen mit steigender Hangneigung zu. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Felsrutschungen als auch Deckschichtenrutschungen bei Hängen mit einer Neigung bis 10° selten vorkommen. Am anfälligsten für Felsrutschungen sind Hangneigungen von 35° - 45°. Hangneigungen zwischen 20° und 25° haben die höchste Anfälligkeit für Deckschichtenrutschungen. Im Vergleich zu Felsrutschungen treten bei steileren Hängen weniger Deckschichtenrutschungen auf.

Die Analyse zeigt außerdem, dass nordwestlich ausgerichtete Hänge am stärksten von Felsrutschungen betroffen sind, gefolgt von nordöstlichen, nördlichen und südöstlichen Hängen. Die nach Osten ausgerichteten Hänge sind am stärksten von Deckschichtenrutschungen betroffen, gefolgt von nach Nordost und Südost gerichteten Hängen.

Bei den Höhen waren Bereiche von 100 m bis 300 m anfällig für Fels- und Deckschichtenrutschungen. Zwischen den anderen Höhenlagen und den Rutschungen gab es kaum Korrelationen. Dafür gibt es jedoch eine simple Erklärung. Sowohl die Fels als auch die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet liegen mit ihren auskartierten Flächen auf Grund ihrer Größe und Länge häufig in mehreren Metern Höhenlage. Gerade der Initialbereich der Rutschung (Abriss) der meist höher liegt macht nur einen Bruchteil der Rutschungsfläche aus. Außerdem spielt die Höhe bei der Rutschungssuszeptibilitätsanalyse in Hochgebirgen zwar eine wichtige Rolle, da die Bedingungen in höheren Lagen aufgrund von Faktoren wie Steilheit, Bodenbeschaffenheit, Klima und Vegetation oft sehr unterschiedlich sind als in tieferen Lagen. In höheren Lagen kann der Boden aufgrund von geringerer Vegetation und niedrigeren Temperaturen weniger durch Wurzeln stabilisiert sein. Zusätzlich kann Frost- und Tauwetter in höheren Lagen das Bodenmaterial aufbrechen und destabilisieren. Im Gegensatz dazu sind Mittelgebirge in der Regel niedriger und haben weniger extreme klimatische Bedingungen. Die Höhe spielt daher bei der Rutschungssuszeptibilitätsanalyse in Mittelgebirgen eine geringere bzw. vernachlässigbare Rolle. Aus diesem Grund wurde die Höhe in den weiteren Schritten der Erstellung von den Rutschungsanfälligkeitskarten nicht berücksichtigt.

Bei kataklinalen Hängen, in denen Schichten mit dem Hang einfallen, treten im Saar-Nahe-Gebiet am häufigsten Felsrutschungen auf. „*Overdip*“-Hänge weisen dabei die größte Korrelation auf. Orthoklinale Hänge zeigen unterschiedliche Korrelationen mit Rutschungen je nach Subklasse. Bei den Deckschichtenrutschungen gibt es keine eindeutig rutschungsanfälligere Klasse. Alle Klassen, die eine Korrelation mit den Rutschungen aufweisen haben ähnlich hohe FR-Werte. Die „*overdip*“- und „*underdip*“-Hänge bei kataklinalen Hängen sowie die „*steepend*“-Hänge bei anaklinalen Hängen

weisen eine positive Korrelation mit Rutschungen auf. Die Hänge der Klasse „*CAT OCL overdip*“ und „*ANA OCL steepend*“ weisen auch eine Korrelation zwischen Rutschungsauftreten und den Lagerungsverhältnissen auf.

Die höchste Korrelation zwischen Felsrutschungen und Ingenieurgeologischer Klasse wurde bei fein- bis gemischtkörnigen, umgelagerten Lockergesteinen festgestellt. Sedimentäre Festgestein-Wechselfolgen, gefolgt von Löss & Lösslehmen und tonigen & wechselgelagerten Halbfestgesteinen sind laut Suszeptibilitätsanalyse auch anfällig für Felsrutschungen. Die höchste Korrelation mit Deckschichtenrutschungen wurde für die Klasse bindige, konsolidierte Lockergesteine festgestellt. Die Klasse der umgelagerten Lockergesteine hat ebenfalls eine hohe Korrelation. Weitere Klassen, die eine positive Korrelation aufweisen, sind sedimentäre Festgesteine, tonige und wechselgelagerte Halbfestgesteine, verwitterte vulkanische Tuffe und Auffüllmassen.

Bei dem TWI wurde sowohl für die Felsrutschungen als auch für die Deckschichtenrutschungen der anfälligste Bereich zwischen Werten von 0 bis 4 ermittelt. In den restlichen Klassen besteht keine bzw. nur eine geringe Korrelation mit den Rutschungsflächen.

Die Analyse des Stream Power Index zeigt, dass die Korrelation zwischen Fels- und Deckschichtenrutschungen und Index mit steigendem SPI ansteigt. Eine sehr schwache Korrelation wurde bei Werten zwischen 0 und 10 festgestellt, während die am stärksten anfälligsten Gebiete SPI-Werte von über 100 aufweisen. Hier gibt es eine hohe Korrelation mit Rutschungen.

5.3 Berechnung & Validierung der Rutschungsanfälligkeitsmodelle

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Erstellung von Rutschungsanfälligkeitsmodellen im Saar-Nahe-Gebiet unter Verwendung der *Frequency Ratio*- und der *Weight-of-Evidence*-Methode. Mehrere Parameterkombinationen wurden sowohl für Felsrutschungen als auch Deckschichtenrutschungen berechnet und die Modelle mittels ROC-Kurven und AUC verglichen, um das beste Anfälligkeitsmodell für den jeweiligen Rutschungstyp zu ermitteln. Die Modelle mit der besten Genauigkeit wurden als endgültige Rutschungssuszeptibilitätskarten mit fünf Anfälligkeitsklassen verwendet (Kapitel 5.4).

5.3.1 Felsrutschungen

Die verschiedenen Modelle mit den unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden mittels Aufsummierung des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die jeweiligen Parameter und die zwei verschiedenen Methoden erstellt. Für die Felsrutschungen wurden 3 Modelle mit dem *Frequency-Ratio* berechnet (Tabelle 29). Das erste Modell besteht dabei aus den vier Hauptfaktoren: Hangneigung, Exposition, Ingenieurgeologischer Klassifizierung und den TOBIA-Klassen. Zwei weitere Modelle mit zusätzlich dem TWI und dem SPI wurden danach berechnet. Diese drei Modelle wurden mittels des Testdatensatzes validiert, um zu schauen wie genau die Modelle sind und welchen Einfluss der TWI bzw. SPI auf die Modell Vorhersagekraft haben.

Tabelle 29: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der *Frequency-Ratio* Methode für die Felsrutschungen.

Modellname	Stat. Methode	Rutschungen	Verwendete Faktoren
RSK_FR_FR_M1	FR	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_FR_FR_M2	FR	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, TWI
RSK_FR_FR_M3	FR	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, SPI

Das erste Modell (RSK_FR_FR_M1) mit den vier Hauptfaktoren hat eine AUC von 0,741. Bei den weiteren Modellen wurde jeweils ein weiterer Parameter verrechnet und untersucht was für einen Einfluss der Faktor auf die Vorhersagekraft des Modells hat (siehe Abbildung 55, links). Beim Modell 2 (RSK_FR_FR_M2) wurde der Faktor TWI als fünfter Parameter in das Modell mit einbezogen. Er hat einen negativen Einfluss auf die Vorhersagekraft des *Frequency-Ratio*-Modells und eine AUC von 0,735. Aufgrund dessen wurde der Faktor in dem weiteren Modell nicht mit einbezogen. Bei dem Modell 3 (RSK_FR_FR_M3) wurde zusätzlich noch der SPI mit den vier Hauptfaktoren verrechnet. Dieser hat genau wie der TWI einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit des Modells die AUC sinkt hier im Vergleich zu Modell 1 auf 0,727. Das beste Modell der FR-Methode ist somit das Modell 1 mit den vier Hauptfaktoren.

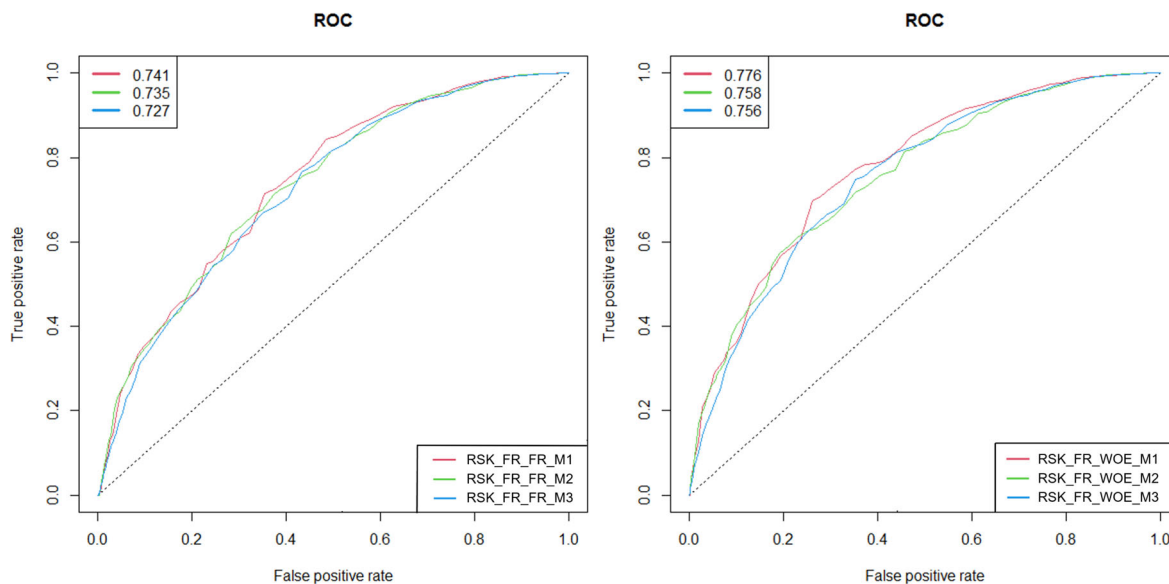


Abbildung 55: ROC-Kurven und die dazugehörigen AUCs für die Rutschungsanfälligkeitsmodelle der Felsrutschungen. Links: Modelle die mit der *Frequency-Ratio* Methode berechnet wurden. Rechts: Modelle die mit der *Weight-of-Evidence* Methode berechnet wurden.

Bei der Auswahl der Modelle für die *Weight-of-Evidence*-Methode wurde gleich vorgegangen wie bei der FR-Methode (Tabelle 30). Die Validierung der Modelle zeigt ähnliche Ergebnisse wie die der *Frequency-Ratio*-Methode (siehe Abbildung 55, rechts). Das erste Modell (RSK_FR_WOE_M1) mit den vier Hauptfaktoren hat die höchste AUC mit 0,776. Das Modell 2 (RSK_FR_WOE_M2) mit dem zusätzlichen Faktor TWI eine AUC von 0,758. Bei dem Modell 3 (RSK_FR_WOE_M3) mit dem Faktor SPI und den vier Hauptfaktoren sinkt die AUC auf 0,756. Das beste Modell ist somit auch hier das Modell 1 mit den vier Hauptfaktoren.

Tabelle 30: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der Weight-of-Evidence-Methode für die Felsrutschungen.

Modellname	Stat. Methode	Rutschungen	Verwendete Faktoren
RSK_FR_WOE_M1	WoE	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_FR_WOE_M2	WoE	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, TWI
RSK_FR_WOE_M3	WoE	Felsrutschungen	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, SPI

Es ist zu beobachten, dass im Allgemeinen die *Area Under the Curve* der *Weight-of-Evidence*-Methode höher sind als die der *Frequency-Ratio*-Methode. Das Modell 1, welches mit der *WoE*-Methode berechnet wurde, erreichte eine AUC von 0,776 und war somit um 0,035 präziser als das entsprechende Modell, das mit der *FR*-Methode erstellt wurde. Beide Methoden lassen einen negativen Einfluss des *Topographic Wetness Index* und des *Stream Power Index* auf die Modellgenauigkeit erkennen. Alle Modelle, die in dieser Studie berechnet wurden, wiesen eine ähnliche Vorhersagegenauigkeit auf. Das Modell 1, das mit der *WoE*-Methode erstellt wurde, ergab jedoch das beste Ergebnis für die Berechnung der Anfälligkeit für Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Deshalb wurde dieses Modell im letzten Schritt verwendet, um die Anfälligkeitskarte für Felsrutschungen im Saar-Nahe-Becken zu erstellen. Mit einer AUC von 0,776 weist das Modell eine akzeptable bzw. mäßige Vorhersagegenauigkeit auf und ist somit für die räumliche Vorhersage der Anfälligkeit im Untersuchungsgebiet geeignet

5.3.2 Deckschichtenrutschungen

Verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden für die Deckschichtenrutschungen erstellt, ähnlich wie bei den Felsrutschungen zuvor. Diese wurden durch die Aufsummierung des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die jeweiligen Parameter und die *Frequency-Ratio* Methode bzw. *Weight-of-Evidence*-Methode berechnet. In Tabelle 31 und Tabelle 32 sind die jeweiligen Modelle aufgeführt. Auch hier wurde eine Validierung mit Testdaten durchgeführt, um die Vorhersagekraft und den Einfluss von TWI und SPI auf die Modelle zu überprüfen.

Tabelle 31: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der *Frequency-Ratio* Methode für die Deckschichtenrutschungen.

Modellname	Stat. Meth.	Rutschungen	Verwendete Faktoren
RSK_DR_FR_M1	FR	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_DR_FR_M2	FR	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, TWI
RSK_DR_FR_M3	FR	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, SPI

Das erste Modell der FR-Methode (RSK_DR_FR_M1) mit den vier Hauptfaktoren hat einen AUC von 0,776. Wie bei den Felsrutschungen auch wurde beim Modell 2 (RSK_DR_FR_M2) der Faktor TWI als fünfter Parameter in das Modell mit einbezogen. Er hat auch wie bei den Felsrutschungen einen negativen Einfluss auf die Vorhersagekraft des *Frequency-Ratio*-Modells und eine AUC von 0,757 (siehe Abbildung 56, links). Aufgrund dessen wurde der Faktor in dem weiteren Modell nicht mit einbezogen. Bei dem Modell 3 (RSK_DR_FR_M3) wurde zusätzlich noch der SPI mit den vier Hauptfaktoren verrechnet. Dieser hat anders als bei den Felsrutschungen einen positiven Einfluss auf die Genauigkeit des Modells die AUC steigt mit dem SPI auf 0,818. Das Beste Modell der FR-Methode ist somit das Modell 3 mit den vier Hauptfaktoren und dem SPI.

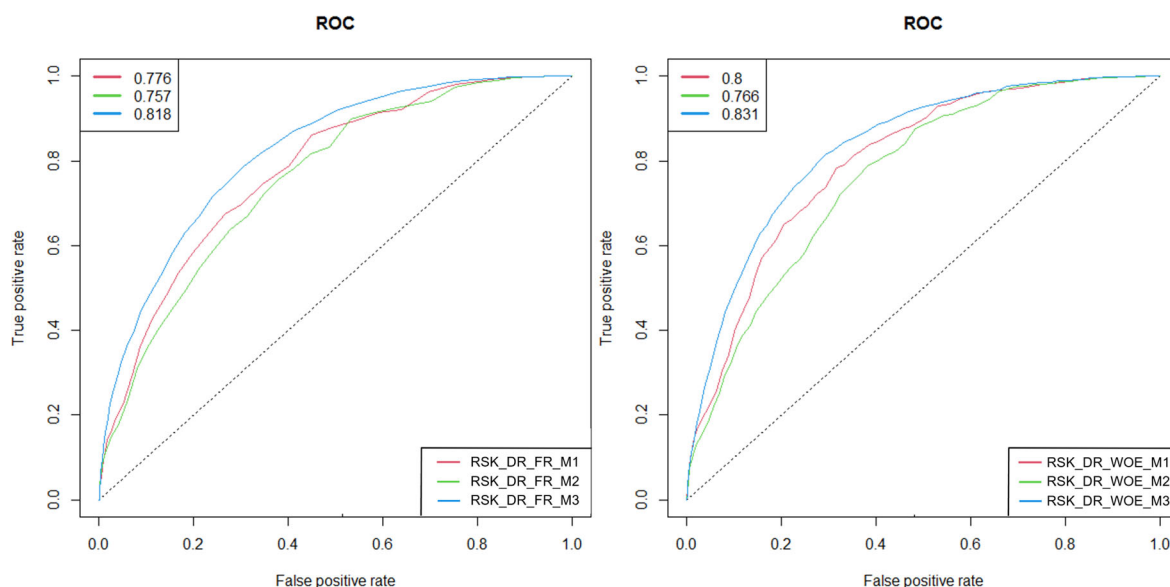


Abbildung 56: ROC-Kurven und die dazugehörigen AUCs für die Rutschungsanfälligkeitsmodelle der Deckschichtenrutschungen Links: Modelle die mit der Frequency-Ratio Methode berechnet wurden. Rechts: Modelle die mit der Weight-of-Evidence Methode berechnet wurden.

Bei der *Weight-of-Evidence*-Methode wurde gleich vorgegangen. Modell 1 (RSK_DR_WOE_M1) wurde aus den vier Hauptfaktoren berechnet. Was auffällt ist, dass die AUC der WoE-Methode im Allgemeinen höher sind als die AUC der FR-Methode. So hat Modell 1 bereits einen AUC von 0,8 (siehe Abbildung 56, rechts). Auch bei der WoE-Methode hat der Faktor TWI einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit des Modells (RSK_DR_WOE_M2) die AUC sinkt auf 0,766. Der Faktor wurde also in die restlichen Modellberechnungen nicht mit aufgenommen. Das Modell mit dem SPI (RSK_DR_WOE_M3) hat hingegen wie bei der FR-Methode auch, einen höheren AUC als Modell 1 (AUC = 0,831). Somit ist auch bei der WoE-Methode das beste Modell das dritte.

Tabelle 32: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der *Weight-of-Evidence*-Methode für die Deckschichtenrutschungen.

Modellname	Stat. Meth.	Rutschungen	Verwendete Faktoren
RSK_DR_WOE_M1	WoE	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_DR_WOE_M2	WoE	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, TWI
RSK_DR_WOE_M3	WoE	Deckschichtenrutsch.	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA, SPI

Auch bei den Deckschichtenrutschungen ist zu beobachten, dass die AUC der *Weight-of-Evidence*-Methode höher sind als die der *Frequency-Ratio*-Methode. Das Modell 1, welches mit der WoE-Methode berechnet wurde, erreichte eine AUC von 0,8 und war somit um 0,024 präziser als das entsprechende Modell, das mit der FR-Methode erstellt wurde. Beide Methoden lassen einen negativen Einfluss des TWI und einen positiven Einfluss des SPI auf die Modellgenauigkeit erkennen. Das Modell 3, das mit der WoE-Methode erstellt wurde, ergab jedoch das beste Ergebnis für die Berechnung der Anfälligkeit für Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Deshalb wurde dieses Modell im letzten Schritt verwendet, um die Rutschungsanfälligkeitskarte für das Saar-Nahe-Becken zu erstellen. Das Modell weist eine AUC von 0,831 auf und hat somit eine gute Vorhersagegenauigkeit ($AUC > 0,8$) auf und ist somit für die räumliche Vorhersage der Anfälligkeit von Deckschichtenrutschungen im Untersuchungsgebiet geeignet.

5.4 Rutschungssuszeptibilitätskarten Saar-Nahe-Gebiet

In diesem Kapitel werden die Rutschungssuszeptibilitätskarten für das Saar-Nahe-Gebiet präsentiert und kurz beschrieben. Dabei wird zwischen der Karte der Felsrutschungen und Deckschichtenrutschungen unterschieden. Die Karten wurden unter Verwendung der in Kapitel 4.9 beschriebenen Klassifizierungsmethoden erstellt. Die Karten dienen als wichtige Grundlage für die räumliche Planung und Entscheidungsfindung in Bezug auf potenzielle Rutschungsanfälligkeit im Saar-Nahe-Gebiet.

5.4.1 Suszeptibilitätskarte Felsrutschungen

Zur Erstellung der finalen Suszeptibilitätskarte für Felsrutschungen wurde das Modell 1 der *Weight-of-Evidence*-Methode ausgewählt, da es bei der Validierung die besten Ergebnisse erzielt hatte. Die Karte wurde basierend auf den Parametern Hangneigung, Hangexposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung und TOBIA-Modell berechnet. Die daraus resultierenden Werte wurden gemäß dem Schema in Kapitel 4.9 manuell in fünf Anfälligkeitsklassen eingeteilt. Eine manuelle Klassifizierung wurde gewählt, da die anderen Klassifizierungsmethoden eine geringere Vorhersagegenauigkeit aufwiesen. Die ROC-Kurven für verschiedene Klassifizierungsmethoden können im Anhang eingesehen werden.

Die erstellte Suszeptibilitätskarte der Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet ist in Abbildung 57 dargestellt. Die Klassifikation ergab, dass nur 1,17 % der Flächen als nicht bis sehr niedrig anfällig für Felsrutschungen eingestuft wurden. Eine niedrige Suszeptibilität wurde bei 23,91 % der Fläche des Saar-Nahe-Gebiets berechnet. 38,12 % der Flächen wurden als mittelmäßig anfällig klassifiziert. 36,79 % der Fläche im Saar-Nahe-Gebiet wurden als hoch bis sehr hoch disponiert für Felsrutschungen eingestuft, wobei 23,10 % als hoch und 13,69 % als sehr hoch anfällig klassifiziert wurden.

Eine nähere Betrachtung der Karte zeigt, dass die Anfälligkeit für Felsrutschungen im Nordwesten vergleichsweise gering ist. Dieser Umstand ist in erster Linie auf die geologische Situation zurückzuführen, da sich im Westen des Saar-Nahe-Gebiets eine abweichende Geologie vom übrigen Gebiet zeigt. In diesem Bereich sind keine tonigen und wechselgelagerten Halbfestgesteine mehr vorhanden, sondern stattdessen magmatische Festgesteine, die eine geringere Anfälligkeit für Felsrutschungen aufweisen. Auch der Donnersberg wird als nur gering bis mittel anfällig für Rutschungen eingestuft. Dies ist sowohl auf das Vorhandensein vulkanischer Festgesteine als auch auf die TOBIA-Berechnung zurückzuführen, da diese Bereiche durch die *Break-Lines* aus dem TOBIA-Modell herausfallen. Ähnlich verhält es sich beim Potzberg.

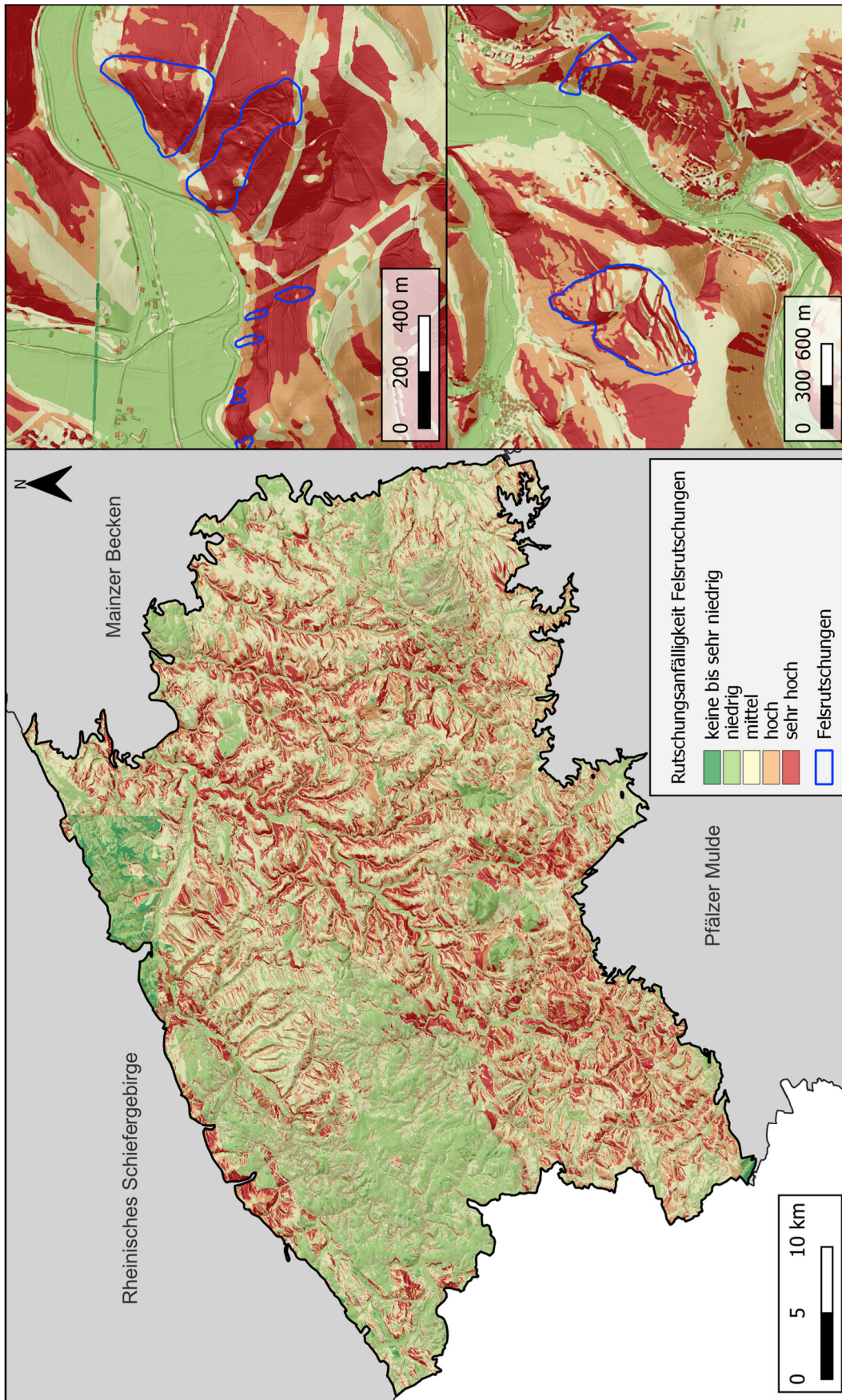


Abbildung 57: Finale Suszeptibilitätskarte für Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Abschnitt A zeigt mehrere Felsrutschungen an steilen Hängen an den Rändern der Talau. Abschnitt B zeigt unter anderem eine sehr große Rutschungen an einem im Vergleich zu anderen Hängen eher flachen Hang. Aus Übersichtlichkeit wurden die Rutschungsfächen in der Gesamtansicht ausgeblendet.

Im Ausschnitt A der vorliegenden Karte ist zu erkennen, dass die Rutschungen im Saar-Nahe-Gebiet bevorzugt in Gebieten auftraten, die als besonders anfällig für solche Ereignisse gelten. Hierbei handelt es sich um nord-nordwestlich exponierte, steile Hänge mit steilen Hanglagen, bei denen tonige und wechselgelagerte Halbfestgesteine mit dem Hang einfallen. Gerade in diesem Bereich überschneiden sich somit die besonders als anfällig geltenden Parameterklassen und die Anfälligkeit ist besonders hoch (Abbildung 58). Im Ausschnitt B der Abbildung 57 ist eine große Rutschungen in „nur“ mittel bis hoch anfälligen Bereichen zu beobachten, die an einem vergleichsweise flachen Hang liegt. Es ist möglich, dass hier weitere Parameter eine Rolle bei der Initiierung des Ereignisses gespielt haben, die in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt wurden. In der geologischen Karte dieses Abschnitts ist eine Störung zu erkennen, die durch die Rutschung verläuft. Es wird vermutet, dass diese Störung dazu beigetragen hat, dass es an dieser Stelle bei vergleichsweise geringer Hangneigung zu einer tiefliegenden Rutschung gekommen ist.

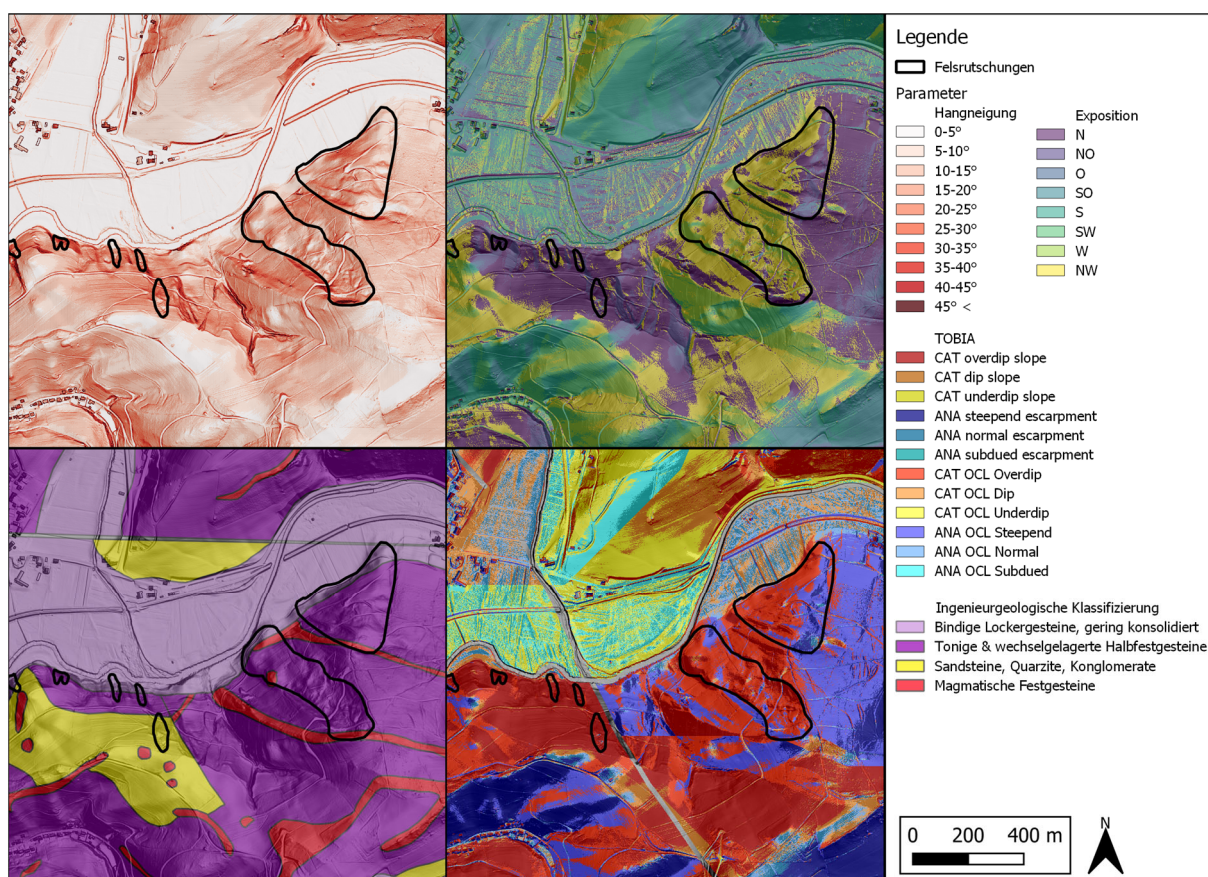


Abbildung 58: Parameterkarten des Abschnitts A der Suszeptibilitätskarte für die Felsrutschungen. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells.

5.4.2 Suszeptibilitätskarte Deckschichtenrutschungen

Zur Erstellung der finalen Suszeptibilitätskarte für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet wurde das Modell 3 der *Weight-of-Evidence*-Methode ausgewählt, da es bei der Validierung die besten Ergebnisse erzielte. Die Karte wurde basierend auf den Parametern Hangneigung, Hangexposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung, TOBIA-Modell und SPI berechnet. Die daraus resultierenden Werte wurden wie schon bei den Felsrutschungen gemäß dem Schema in Kapitel 4.9 manuell in fünf Anfälligkeitsklassen eingeteilt. Auch hier wurde die manuelle Klassifizierung gewählt, da die anderen Klassifizierungsmethoden eine geringere Vorhersagegenauigkeit aufwiesen. Die ROC-Kurven für verschiedene Klassifizierungsmethoden können im Anhang eingesehen werden.

Die Anfälligkeitskarte der Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet ist in Abbildung 59 dargestellt. Die Klassifikation ergab, dass 7,42 % der Flächen als nicht bis sehr niedrig anfällig für Rutschungen eingestuft wurden. Das sind um die sechs Prozent mehr als bei den Felsrutschungen. Eine niedrige Suszeptibilität wurde bei 32,51 % der Fläche des Saar-Nahe-Gebiets berechnet, was fast 10 % mehr sind als bei den tiefliegenden Rutschungen. Als mittelmäßig anfällig wurden 36,41 % der Flächen klassifiziert, was fast genau so viel ist wie bei den Felsrutschungen. 23,66 % der Fläche im Saar-Nahe-Gebiet wurden als hoch und sehr hoch anfällig für Deckschichtenrutschungen eingestuft (Abbildung 59).

Betrachtet man die Karte der Deckschichtenrutschungen genauer fällt auf das, der Norden und Westen des Saar-Nahe-Gebiets wenig anfällig für Rutschungen sind. Auch Bereiche am Rand des Untersuchungsgebiets Richtung Mainzer Becken haben keine bis eine geringe Anfälligkeit für Deckschichtenrutschungen (Abbildung 59). Diese Verteilung hängt wieder hauptsächlich mit der geologischen Situation im Untersuchungsgebiet zusammen. Hier sind hauptsächlich „magmatische Festgesteine“ abgelagert die nicht mit den Deckschichtenrutschungen korrelieren. Die anfälligsten Gesteine der Klasse „bindige Lockergesteine, konsolidiert“ sind kaum im Gebiet abgelagert und kommen nur selten im Norden bzw. Nordosten vor. Je nach tiefe der flachen Rutschungen spielt die Geologie eher eine untergeordnete Rolle, da die Rutschungen hauptsächlich in den lockeren Deckschichten auftreten. Allerdings können geologische Schichten unter dem Lockermaterial als Gleitfläche fungieren. Insbesondere die Halbfestgesteine, die im Saar-Nahe-Gebiet weit verbreitet sind und können eine optimale Gleitfläche für das darüber liegende Material bilden. Daher ist es möglicherweise sinnvoller, bodenkundliche Karten bei der Betrachtung von Deckschichtenrutschungen zu berücksichtigen.

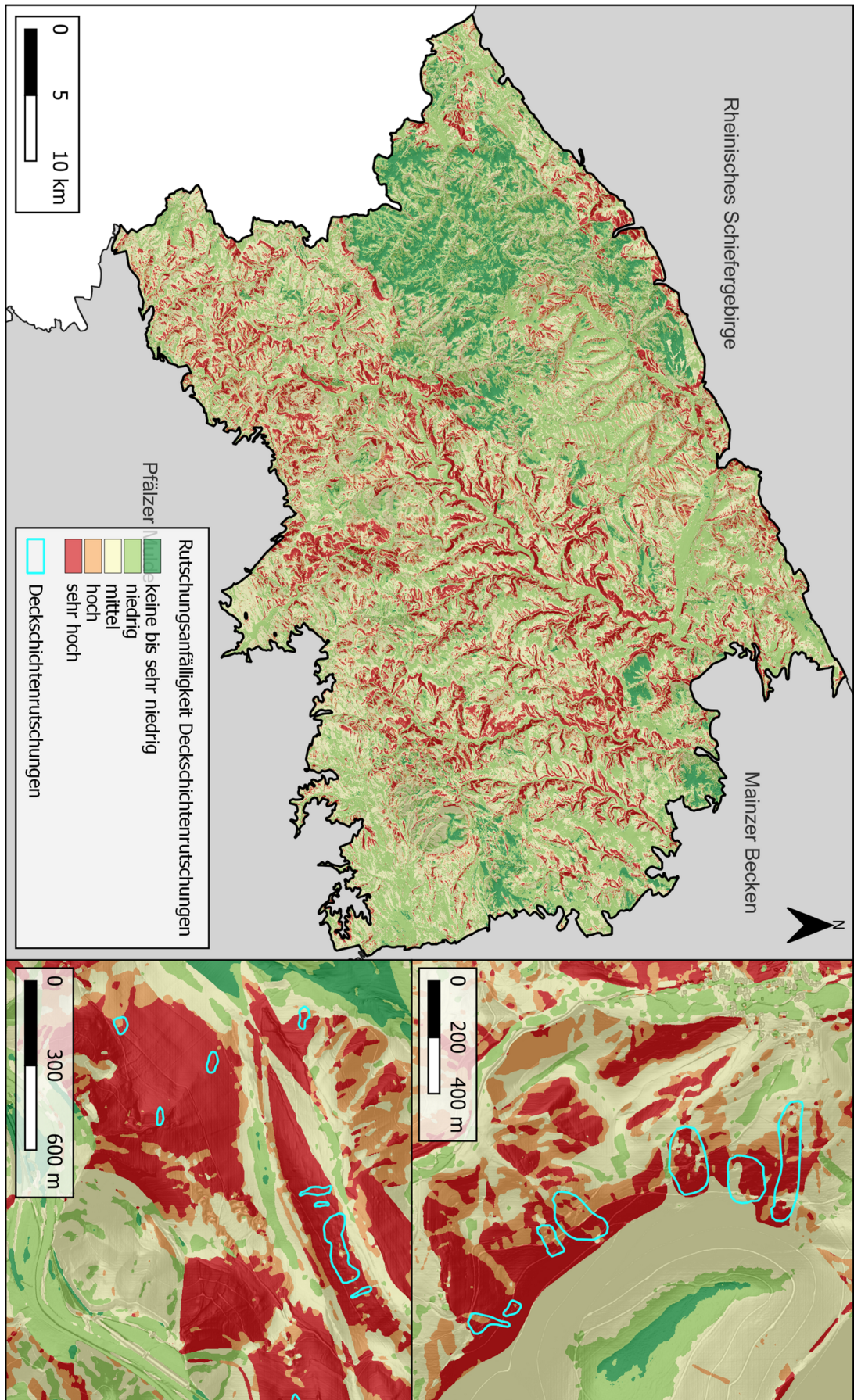


Abbildung 59: Finale Suszeptibilitätskarte für Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Abschnitt A zeigt Deckschichtenrutschungen an steilen Hängen am Donnersberg. Abschnitt B zeigt sehr viele kleine Rutschungen im Norden des Untersuchungsgebiets. Aus Übersichtlichkeit wurden die Rutschungsflächen in der Gesamtansicht ausgeblendet.

In Abbildung 59 ist zu erkennen, dass die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet bevorzugt in Gebieten auftraten, die als besonders anfällig für solche Ereignisse gelten. Abbildung 60 zeigt die in Abschnitt B liegenden flachen Rutschungen und die Karten der vier Hauptparameter. Hier treten Rutschungen vor allem an den Ober bis Mittelhängen bei Neigungen von 20° - 35° auf. Die meisten Flächen liegen an Südost exponierten Hängen, einige wenige an nördlichen Hängen. Bis auf eine Rutschung treten alle in der Ingenieurgeologischen Klasse "tonige & wechselgelagerte Halfestgesteine" auf. Innerhalb der TOBIA-Klassen lässt sich kein Trend erkennen es wurden sowohl Rutschungen an anklinalen als auch kataklinalen Hängen kartiert.

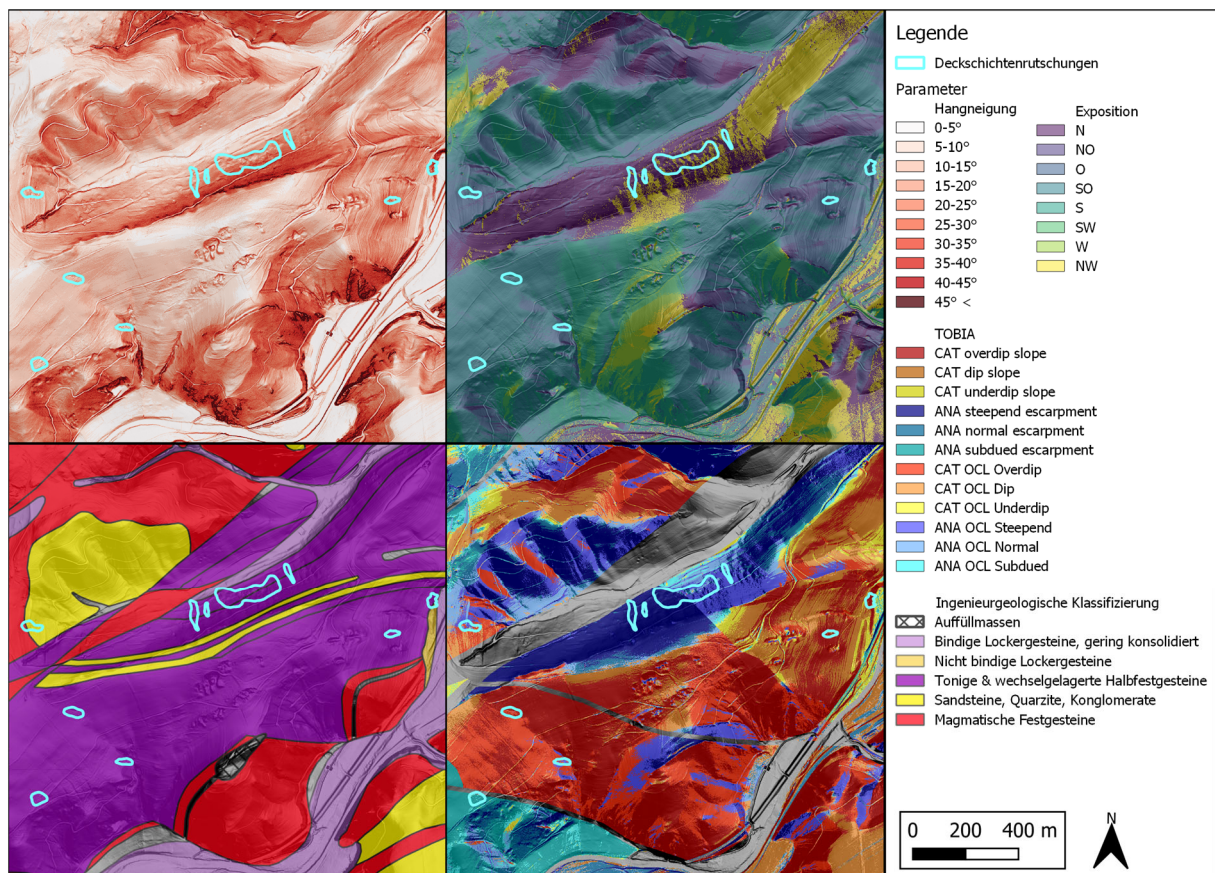


Abbildung 60: Parameterkarten des Abschnitts B der Suszeptibilitätskarte für die Deckschichtenrutschungen. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells.

5.5 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse stellt einen wichtigen Schritt im Rahmen der Analyse der Rutschungsanfälligkeit dar, da sie es ermöglicht, den Einfluss von Veränderungen in der Modellberechnung auf das finale Modell zu verstehen. Der Fokus liegt hierbei auf der Sensitivitätsanalyse der Modellberechnungen für Felsrutschungen, die anhand von Beispielen präsentiert werden. Zusätzlich werden im Anhang die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Deckschichtenrutschungen dargestellt.

5.5.1 Änderung der Trainings- und Testdatensätze

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde die Auswirkung unterschiedlicher Trainings- und Testdatensätze auf die Modellierung untersucht. Es wurden räumliche und in der Größen Aufteilung variierende Datensätze verwendet. Dabei wurden Berechnungen mit zwei verschiedenen Datensätzen durchgeführt, bei einem Datensatz wurde die Aufteilung von 70/30 beibehalten, jedoch wurden andere Rutschungsflächen zufällig ausgewählt, während bei dem anderen Datensatz eine Aufteilung von 50/50 verwendet wurde. Bei dieser Analyse wurden die Parameter und Klassifizierungen beibehalten. Die Berechnungen wurden für alle Parameter durchgeführt jedoch werden in diesem Kapitel nur die vier Hauptfaktoren genauer betrachtet. Außerdem wird zur Vereinfachung die Aufteilung 70/30, Aufteilung 1 (A1) und die Aufteilung 50/50, Aufteilung 2 (A2) genannt.

Bei dem Parameter Hangneigung für die Aufteilung 1 gibt es leichte Unterschiede in den Werten. Der Trend, dass der *Frequency-Ratio* mit zunehmender Hangneigung steigt, mit Ausnahme der letzten Klasse ($45^\circ <$) bleibt hier jedoch weiter bestehen. Die Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen bei nur 0,002 bis 0,17 (Tabelle 33). Bei dem Datensatz mit nur 50 % Trainingsflächen ist der Trend auch größtenteils erhalten geblieben, es kommt lediglich bei Hangneigungen zwischen 20° - 25° zu einer Abweichung. Hier wird der FR-Wert niedriger, obwohl er eigentlich, wie beim Original steigen sollte. Jedoch bleibt der Wert stark über 1 und es ändert sich somit nur die Intensität der Korrelation. Der Kontrast C der Hangneigung zeigt die gleichen Änderungen jedoch mit unterschiedlichen Differenzen. Die größte Differenz ist hier 0,280 und kleinste 0,001 (Tabelle 33). In Anbetracht der sehr geringen Unterschiede in diesen Fällen sowie der weiterhin vorhandenen Korrelation scheint es zumindest in Bezug auf die Hangneigung keinen großen Auswirkungen auf die Veränderung der Trainingsdatensätze zu geben.

Ergebnisse für das Saar-Nahe-Gebiet

Tabelle 33: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für unterschiedliche Trainingsdaten.

Klasse	70/30	A1	A2		70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2	
	FR	FR	FR	Diff A1	Diff A2	C	C			C
0° bis 5°	0,271	0,350	0,240	0,079	0,031	-1,550	-1,270	-1,678	0,280	0,129
5° bis 10°	0,681	0,732	0,683	0,050	0,002	-0,522	-0,430	-0,517	0,092	0,004
10° bis 15°	1,325	1,235	1,382	0,090	0,057	0,353	0,262	0,408	0,091	0,055
15° bis 20°	1,910	1,740	1,904	0,170	0,006	0,746	0,634	0,742	0,112	0,004
20° bis 25°	1,925	1,855	1,897	0,070	0,027	0,717	0,675	0,700	0,042	0,017
25° bis 30°	1,990	1,992	1,946	0,002	0,044	0,731	0,732	0,706	0,001	0,025
30° bis 35°	2,367	2,400	2,338	0,032	0,029	0,896	0,910	0,882	0,014	0,014
35° bis 40°	2,930	2,851	3,068	0,079	0,138	1,100	1,072	1,147	0,028	0,047
40° bis 45°	3,129	2,974	3,407	0,155	0,277	1,156	1,104	1,241	0,052	0,085
45° bis 90	1,203	1,107	1,134	0,095	0,068	0,187	0,103	0,128	0,084	0,059

Bei der Exposition gibt es größere Änderungen beim Vergleich verschiedener Trainingsdaten. Auch hier zeigt die Aufteilung 1 wieder leichte Unterschiede in den Werten. Der Trend, und die durch die Berechnung als anfällig ausgewiesenen Ausrichtungen, bleiben mit Ausnahme der Nordost-Klasse weiter bestehen, nach der neuen Berechnung gäbe es hier kaum eine Korrelation zwischen Rutschungen und Ausrichtung da der FR unter 1 liegt. Die Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen bei 0,018 bis 0,203 (Tabelle 34) und sind somit also höher als bei der Hangneigung. Bei der Aufteilung 2 ist der Trend auch größtenteils erhalten geblieben. Auch hier kommt es durch die Berechnung zu einer Änderung der anfälligen Ausrichtungen. Die Südost ausgerichteten Hänge korrelieren nach der neuen Berechnung kaum mehr mit den Rutschungen. Der FR liegt hier unter 1. Allgemein ist die Differenz der Aufteilung 2 größer als die der Aufteilung 1. Im Vergleich zu der Hangneigung sind hier die Unterschiede deutlicher und auch die Korrelationen einzelner Faktorklassen bleiben nicht immer gleich. Die Exposition scheint also zumindest im Saar-Nahe-Gebiet anfälliger auf die Veränderung der Rutschungsdaten zu sein.

Tabelle 34: Anfälligkeitswerte der Exposition für unterschiedliche Trainingsdaten.

Klasse	70/30	A1	A2		70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2	
	FR	FR	FR	Diff A1	Diff A2	C	C			C
Nord	1,088	1,197	1,474	0,110	0,386	0,101	0,217	0,479	0,117	0,378
Nordost	1,095	0,892	1,305	0,203	0,210	0,104	-0,129	0,309	0,233	0,205
Ost	0,936	0,816	0,806	0,120	0,130	-0,075	-0,229	-0,242	0,153	0,166
Südost	1,034	1,000	0,747	0,034	0,287	0,040	0,000	-0,339	0,040	0,379
Süd	0,894	0,861	0,442	0,033	0,452	-0,127	-0,170	-0,895	0,043	0,768
Südwest	0,683	0,701	0,498	0,018	0,184	-0,411	-0,383	-0,742	0,028	0,331
West	0,903	0,968	0,937	0,065	0,034	-0,112	-0,036	-0,072	0,076	0,040
Nordwest	1,186	1,347	1,506	0,161	0,320	0,203	0,359	0,500	0,156	0,297

Wie bei der Hangneigung fällt auch bei der Betrachtung der Ingenieurgeologischen Klassifizierung für die Aufteilung 1 auf, dass es zwar leichte Unterschiede in den Werten gibt, der Trend der originalen werte jedoch gleichbleibt. Die Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen zwischen 0 und 0,154 (Tabelle 35). Bei der Aufteilung 2 ist der Trend auch größtenteils erhalten geblieben, es gibt lediglich bei den Klassen 7 und 8 Abweichungen. Hier wird der FR-Wert sehr viel kleiner, obwohl er eigentlich, wie beim Original steigen sollte. Bei Klasse 7 gäbe es so laut neuer Berechnung keine Rutschungen (FR = 0). Die größte Differenz ist hier 3,842 und die kleinste 0. Der Kontrast C zeigt die gleichen Änderungen jedoch mit unterschiedlichen Differenzen. Es wurden sowohl bei Aufteilung 1 als auch bei Aufteilung 2 alle Klassen als nicht korrelierend erkannt die auch im Originaldatensatz keine Rutschungen aufwiesen (Tabelle 35).

Tabelle 35: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassifizierung für unterschiedliche Trainingsdaten.

Klasse	70/30	A1	A2		70/30	A1	A2			
	FR	FR	FR	Diff A1	Diff A2	C	C	C	Diff A1	Diff A2
0	0,037	0,093	0,020	0,055	0,018	-3,313	-2,406	-3,959	0,906	0,647
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
3	0,626	0,510	0,711	0,116	0,085	-0,514	-0,732	-0,376	0,218	0,138
4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
5	1,643	1,797	1,539	0,154	0,104	0,525	0,622	0,455	0,097	0,070
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
7	0,770	0,763	0,000	0,007	0,770	-0,263	-0,273	-Inf	0,010	0,000
8	4,983	4,935	1,141	0,048	3,842	1,645	1,634	0,133	0,010	1,512
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
10	1,479	1,520	1,707	0,041	0,227	0,893	0,977	1,405	0,084	0,512
11	0,096	0,123	0,044	0,027	0,052	-2,352	-2,102	-3,126	0,250	0,774
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
18	3,638	3,603	2,254	0,035	1,384	1,312	1,302	0,821	0,010	0,490
19	0,706	0,661	0,214	0,044	0,491	-0,392	-0,464	-1,652	0,071	1,260
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
21	0,203	0,166	0,200	0,037	0,003	-1,780	-1,991	-1,795	0,211	0,015

Anders als bei den drei vorherigen Parametern fällt bei den TOBIA Klassen auf, dass der Trend und die anfälligen Klassen für die Aufteilung 2 also einem Trainingsdatensatz mit 50 % im Vergleich zum Original gleichbleiben. Lediglich kleine Änderungen treten bei den einzelnen FR- und WoE-Werten auf. Die Differenzen der FR-Werte liegen zwischen 0,001 und 0,369 (Tabelle 36). Hingegen werden bei der Aufteilung 1 bei der Klasse *CAT underdip* die FR- und WoE-Werte so stark unterschätzt, dass Rutschungen mit der Klasse keine Korrelation aufweisen und somit nicht anfällig für Rutschungen wären. Die Differenzen liegen hier anders als bei der Aufteilung 2 nur zwischen 0,009 und 0,192 (Tabelle 36).

Tabelle 36: Anfälligkeitswerte der TOBIA-Klassen für unterschiedliche Trainingsdaten.

Klasse	70/30	A1	A2			70/30	A1	A2		
	FR	FR	FR	diff	diff	C	C	C	diff	diff
no data	0,287	0,326	0,365	0,039	0,078	-1,310	-1,181	-1,064	0,129	0,246
CAT overdip	2,128	2,186	2,497	0,058	0,369	0,879	0,912	1,081	0,033	0,203
CAT dip	1,088	1,118	1,223	0,029	0,135	0,100	0,131	0,239	0,031	0,139
CAT underdip	1,072	0,975	1,170	0,096	0,099	0,074	-0,027	0,170	0,101	0,095
ANA steepend	0,660	0,827	0,423	0,167	0,237	-0,445	-0,205	-0,909	0,240	0,464
ANA normal	0,317	0,363	0,239	0,046	0,078	-1,209	-1,070	-1,497	0,139	0,288
ANA subdued	0,256	0,247	0,278	0,009	0,022	-1,398	-1,435	-1,314	0,037	0,084
CAT OCL overdip	2,694	2,502	2,568	0,192	0,127	1,134	1,043	1,073	0,091	0,061
CAT OCL normal	0,839	0,804	0,848	0,036	0,009	-0,192	-0,239	-0,181	0,047	0,012
CAT OCL underdip	0,810	0,706	0,811	0,104	0,001	-0,221	-0,364	-0,219	0,142	0,002
ANA OCL steepend	1,475	1,488	1,099	0,013	0,376	0,427	0,437	0,102	0,010	0,325
ANA OCL normal	0,424	0,440	0,346	0,016	0,079	-0,908	-0,870	-1,119	0,038	0,211
ANA OCL subdued	0,367	0,308	0,357	0,059	0,010	-1,032	-1,211	-1,060	0,179	0,028

Berechnet man mit diesen Werten eine neue Rutschungsanfälligkeitskarte und vergleicht diese mit der Originalkarte kann man mittels Konfusionsmatrix vergleichen, wo es durch die Änderungen in der Modellberechnung zu Anfälligkeitsklassenänderungen kommt und wie stark diese sind. Dabei werden Klassen die unverändert bleiben grün, Nachbarklassen der größten prozentualen Änderungen orange und die größte Änderung insgesamt rot dargestellt.

Im ersten Schritt wurden die Rutschungsanfälligkeitskarten die mit 50 % Trainingsdaten und den originalen 70 % Trainingsdaten modelliert wurden, mittels Konfusionsmatrix verglichen. Das Ergebnis dieser Matrix (Tabelle 37) zeigt, dass in 71 % aller Fälle eine Rasterzelle in beiden Karten die gleiche Einstufung bekommen hat und 29 % unterschiedlich klassifiziert wurden. Davon kommt es bei 28,7 % zur Änderung in die Nachbarklasse wie z.B. bei Klasse 4. Dabei tritt die größte Änderung von Klasse 2 auf Klasse 3 mit 7,5 % auf. Die kleinste Änderung zur Nachbarklasse gibt es bei Klasse 4 auf Klasse 5 mit 1,4 %. Bei ca. 0,3 % kommt es zu Änderungen über die Nachbarklassen hinaus wie z.B. bei Klasse 2 und 3, jedoch fallen diese Änderungen so gering aus, dass sie vernachlässigbar sind. Die Rutschungsanfälligkeitskarte auf Basis von 50 % Trainingsflächen hat trotzdem noch eine insgesamt Genauigkeit von 71 %.

Tabelle 37: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50).

AK	1	2	3	4	5
1	1,17	0	0	0	0
2	2,08	19,31	2,52	0	0
3	0	7,48	25,20	5,44	0
4	0	0,07	4,64	13,28	5,12
5	0	0	0,26	1,42	12,01

Tabelle 38: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30).

AK	1	2	3	4	5
1	0,36	0,81	0	0	0
2	0,08	21,00	2,83	0	0
3	0	0,86	34,78	2,48	0
4	0	0	1,86	19,38	1,87
5	0	0	0	1,05	12,65

Danach wurde das gleiche mit den Modellen der neuen 70 % Trainingsdaten und den originalen 70 % Trainingsdaten gemacht. Dabei fällt sofort auf, dass hier nur Änderungen in die Nachbarklassen auftreten. Das Modell hat eine insgesamt Genauigkeit von über 80%. Dabei wurden 88 % der Flächen gleich klassifiziert (keine Klassenänderung) und bei 12 % der Flächen kam es zu einer Klassenänderung in eine der Nachbarklassen. Die größte Änderung tritt von Klasse 3 auf Klasse 2 mit 2,8 % auf, die niedrigste Änderung von Klasse 1 auf 2 mit nur 0,08 % (Tabelle 38). Sowohl bei einem einer Änderung des Trainingsdatensatzes von 70 % als auch 50 % treten Änderungen in der Klassifizierung auf, mit einer insgesamt Genauigkeit von 80 % ist die Genauigkeit bei 70 % Trainingsdaten jedoch höher als die bei 50 %. Das Modell ist somit anfällig für die Änderung der Trainingsdaten, jedoch kommt es hierbei primär auf die Größe des Datensatzes an. Je weniger Trainingsdaten desto schlechter die Genauigkeit des Modells.

5.5.2 Änderung von Parameterklassifikationen

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde neben den Auswirkungen unterschiedlicher Trainings- und Testdatensätze auf die Rutschungsanfälligkeitskarten, auch die Änderung von Parameterklassifikationen untersucht. Dabei wurde nur ein Parameter, und zwar die Hangneigung verändert. Es wurden einmal nur die Klassengröße bei gleichbleibender Klassenanzahl und beim anderen Durchlauf sowohl Klassengröße als auch Klassenanzahl variiert. Damit wurden dann die Berechnungen normal wiederholt und jeweils eine neue Rutschungsanfälligkeitskarte modelliert welche mit der Originalkarte mittels Konfusionsmatrizen verglichen wurden.

Berechnet man die Anfälligkeitskarte mit einer der veränderten Hangneigungsklassifikation (Änderung der Klassengröße bei gleicher Klassenanzahl) werden 79,7 % der Flächen richtig klassifiziert, es kommt also nicht zu einer Klassenänderung (Tabelle 39). Bei 20,3 % der Flächen hingegen kommt es zu einer Klassenänderung innerhalb des Modells. Dabei treten außer bei Klasse 3 nur Änderungen in die Nachbarklassen auf. Die größte Änderung findet von Klasse 3 zu Klasse 4 statt hier wurden über 7 % der Flächen anders klassifiziert. Die kleinste Änderung findet wieder bei Klasse 1 zu Klasse 2 statt mit nur 0,27%. Das neue Modell hat dabei eine insgesamte Genauigkeit von 77,8%.

Tabelle 39: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Anfälligkeitsklasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl, veränderte Klassengröße).

AK	1	2	3	4	5
1	0,74	0,43	0	0	0
2	0,27	20,15	3,49	0	0
3	0	2,15	33,14	2,83	0
4	0	0	7,28	13,45	2,38
5	0	0	0,05	1,46	12,19

Tabelle 40: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl & Klassengröße).

AK	1	2	3	4	5
1	0,72	0,45	0	0	0
2	0,26	20,39	3,26	0	0
3	0	2,11	33,99	2,02	0
4	0	0	8,63	12,56	1,91
5	0	0	0	1,74	11,95

Verändert man nicht nur die Klassengröße, sondern auch die Klassenanzahl eines Parameters in diesem Fall die Hangneigung und berechnet damit ein neues Modell werden 79,6 % Flächen richtig klassifiziert und bei 20,4 % findet eine Änderung in die Nachbarklasse statt. Diese Werte sind fast identisch mit dem Modell, wo es nur eine Änderung der Klassengröße gab. Die größte Änderung findet auch hier bei Klasse 3 zu Klasse 4 mit 8,6 % statt. Das Modell hat ähnlich wie das andere dabei eine insgesamte Genauigkeit von 77,7 %. Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen das, dass Modell anfällig für Änderungen in der Parameterklassifikation ist. Jedoch ist zumindest in diesem Fall nicht wichtig, ob es sich um die Änderung der Klassengröße oder -anzahl handelt.

5.5.3 Änderung der Klassifikationsmethode für die Anfälligkeitskarten

Um zu schauen, wie stark der Einfluss der Klassifizierungsmethode auf die Anfälligkeitskarten ist, wurde mittels ROC-Kurve ermittelt, welche Klassifizierungsmethode die niedrigste AUC hat. Diese wurden dann bei gleicher Klassenanzahl mit der bei der Rutschungsanfälligkeitskarte verwendet Klassifizierung, verglichen. Somit wurde für die Felsrutschungen die manuelle Klassifikation mit der Methode der Quantile verglichen und eine Konfusionsmatrix berechnet. In Tabelle 41 sieht man, dass

57 % der Flächen gleich richtig und 43 % falsch klassifiziert wurden. Die größten Änderungen treten von Klasse 1 auf Klasse 2 mit über 18 % und Klasse 2 auf Klasse 3 mit über 14 % auf. Auffällig ist das bei Klasse 3 keine Klassenänderungen vorgekommen sind. Dies liegt möglicherweise daran das der Bereich, in dem diese Klasse liegt für Klasse 3 in beiden Methoden gleichgesetzt wurde. Das Modell hat eine insgesamt Genauigkeit von 63 %. Das Ergebnis zeigt, dass das Modell sehr sensitiv auf die Änderungen der Klassifikationsmethoden der Anfälligkeitsklassen ist. Angesichts der verwendeten Klassifizierungsmethoden war dieses Ergebnis vorhersehbar, da zwar die Anzahl der Klassen gleich ist, jedoch die Bereiche innerhalb der Klassen sehr unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 41: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierungsmethode).

AK	1	2	3	4	5
1	1,17	0	0	0	0
2	18,73	5,17	0	0	0
3	0	14,56	20,53	3,04	0
4	0	0	0	16,72	6,39
5	0	0	0	0	13,69

6 Ergebnisse für das Mainzer Becken

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse für das Mainzer Becken bestehend aus der Parameteranalyse, Suszeptibilitätsanalyse sowie der Berechnung und Validierung der Rutschungsanfälligkeitskarten beschrieben. Abschließend werden die in dieser Arbeit finalen Anfälligkeitskarten für das Mainzer Becken dargestellt und erläutert sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse beschrieben. Eine zusammenfassende Betrachtung und Diskussion der wichtigsten Ergebnisse sowie ein Vergleich beider Untersuchungsgebiete folgt in Kapitel 7 und 8.

6.1 Parameteranalyse

Die Parameteranalyse war ein wichtiger Bestandteil der Datenanalyse und diente dazu, die wichtigsten Merkmale der verwendeten Parameter im Untersuchungsgebiet 2 sowie innerhalb der dort auftretenden Rutschungen zu identifizieren und zu beschreiben.

6.1.1 Hangneigung

Die Auswertung der Hangneignungsverteilung für das gesamte Mainzer Becken Gebiet zeigt, dass die Hangneignungsklasse 1 (Flächen bis 5°) mit Abstand (68,1 %) am häufigsten vorkommt (Abbildung 61). Dabei handelt es sich hauptsächlich um die flachen Bereiche der Rhein- und Naheterrassen, sowie der Hochplateaus. Mit nur noch 19,6 % sind Hangneigungen von 5° - 10° im Untersuchungsgebiet vertreten und machen vor allem die flachen Unterhänge der Plateaus aus. Hangneigungen von 10° - 45° kommen mit einer Gesamthäufigkeit von 10,6 % vor und nehmen die mittleren bis oberen Hänge im Untersuchungsgebiet ein (Abbildung 62). Hangneigungen über 45° haben eine Häufigkeit von 1,7 %, und umfassen zum Großteil die Infrastrukturen aber auch Felswände des Rotenfels am Rand des Untersuchungsgebiets im Nordosten sowie Steilhangbereiche im Westen.

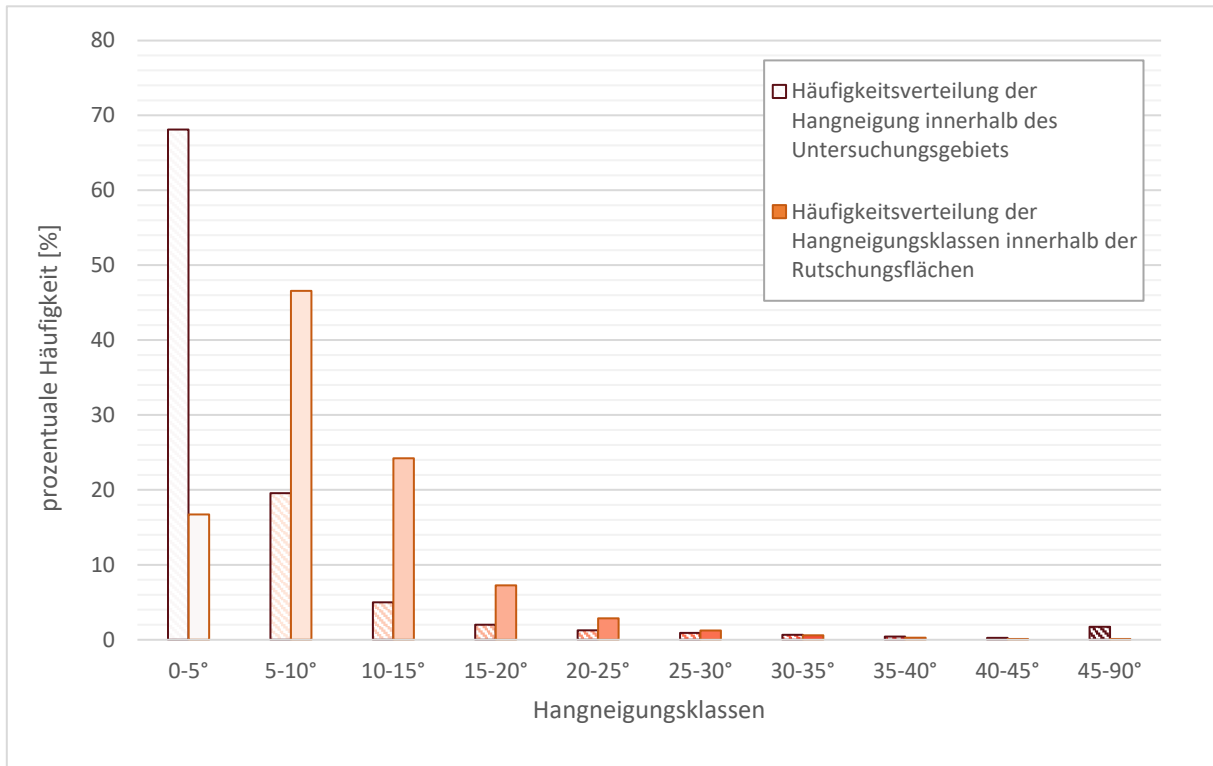


Abbildung 61: Hangneigungsverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Die Hangneigungsverteilung der Rutschungsflächen zeigt, dass der Schwerpunkt im Bereich der Hangneigungsklasse 2 und 3 (Flächen von 5° bis 15°) liegt, in die 70,7 % aller durch Rutschungen betroffenen Flächen einzuordnen sind. Innerhalb dieser Neigungsklassen zeigt sich darüber hinaus die höchste Häufigkeit von Rutschungen im Bereich zwischen 5° und 10°. Der Klasse 1 (0° – 5°) konnten noch 16,7 % der durch Rutschungen betroffenen Flächen zugeordnet werden. Der Neigungsklasse 4 (Hangwinkel von 15° bis 20°) noch 7,3 %. Für die Hangneigungsklassen 5 bis 10 ergibt sich eine insgesamt Häufigkeit von gerade mal ~5,2 %, wobei die Häufigkeit der Rutschungen mit steigendem Neigungswinkel abnimmt (Abbildung 61). Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 62 fällt auf das, die Rutschungen häufig an den Oberhängen initiiert werden, jedoch gibt es auch kleinere Rutschungen, die an den Mittel- bis Unterhängen auftreten.

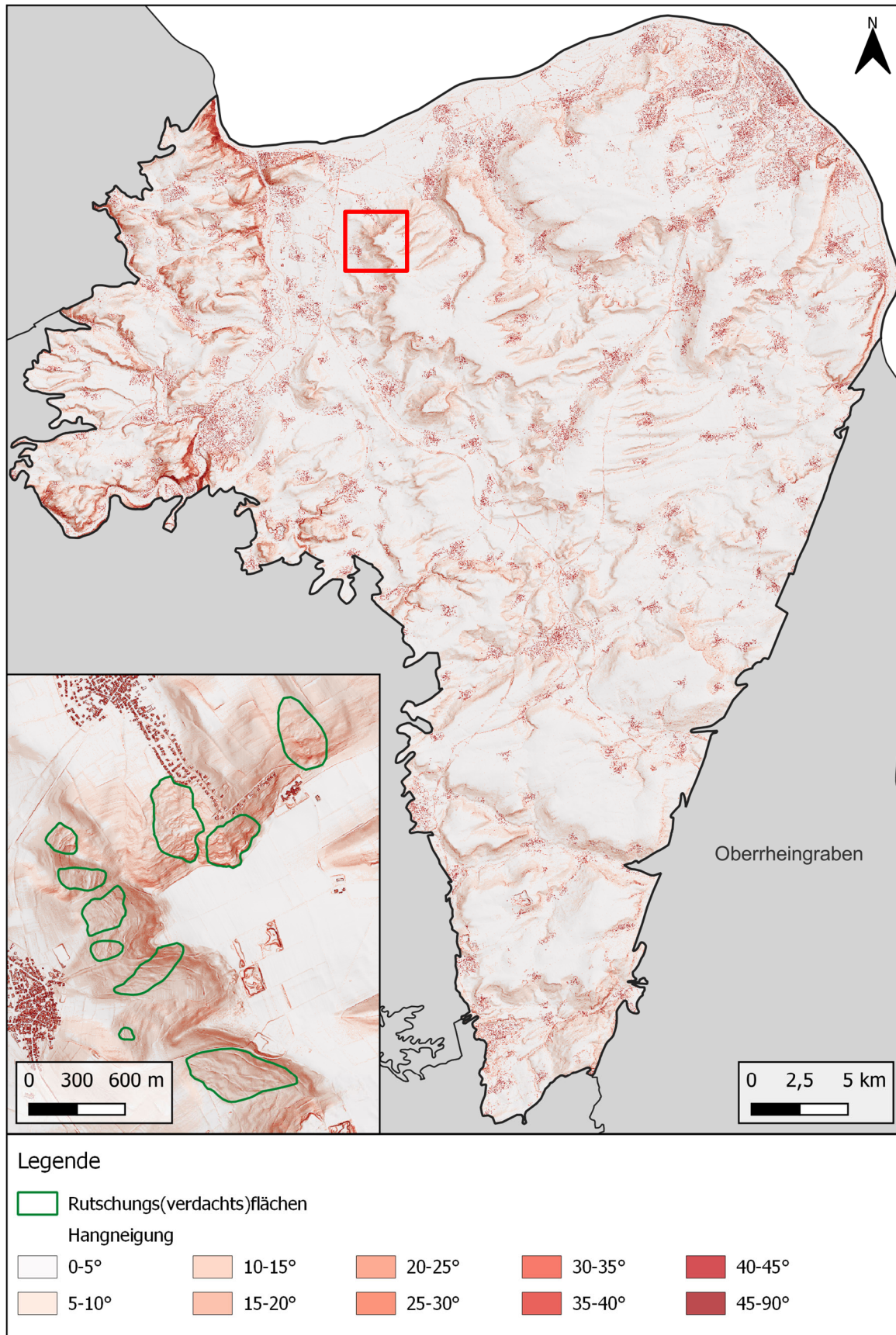


Abbildung 62: Hangneigungsverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.2 Exposition

Die Auswertung der Expositionsverteilung im Mainzer Becken zeigt kein eindeutiges Maximum in der Verteilung (Abbildung 63). Von Nord bis Süd tritt hier eine annähernd gleichmäßige Verteilung auf. Das Maximum liegt hier bei Nordhängen (16,3 %) gefolgt von Südosthängen (14,7 %) und Nordwesthängen (13,4 %). Nordost-, Ost- sowie Südhänge haben eine annähernd gleiche relative Häufigkeit (~12 %) im Untersuchungsgebiet. Das Minimum liegt bei Flächen, die nach Südwesten bzw. Westen exponieren diese haben relative Häufigkeiten unter 10 %.

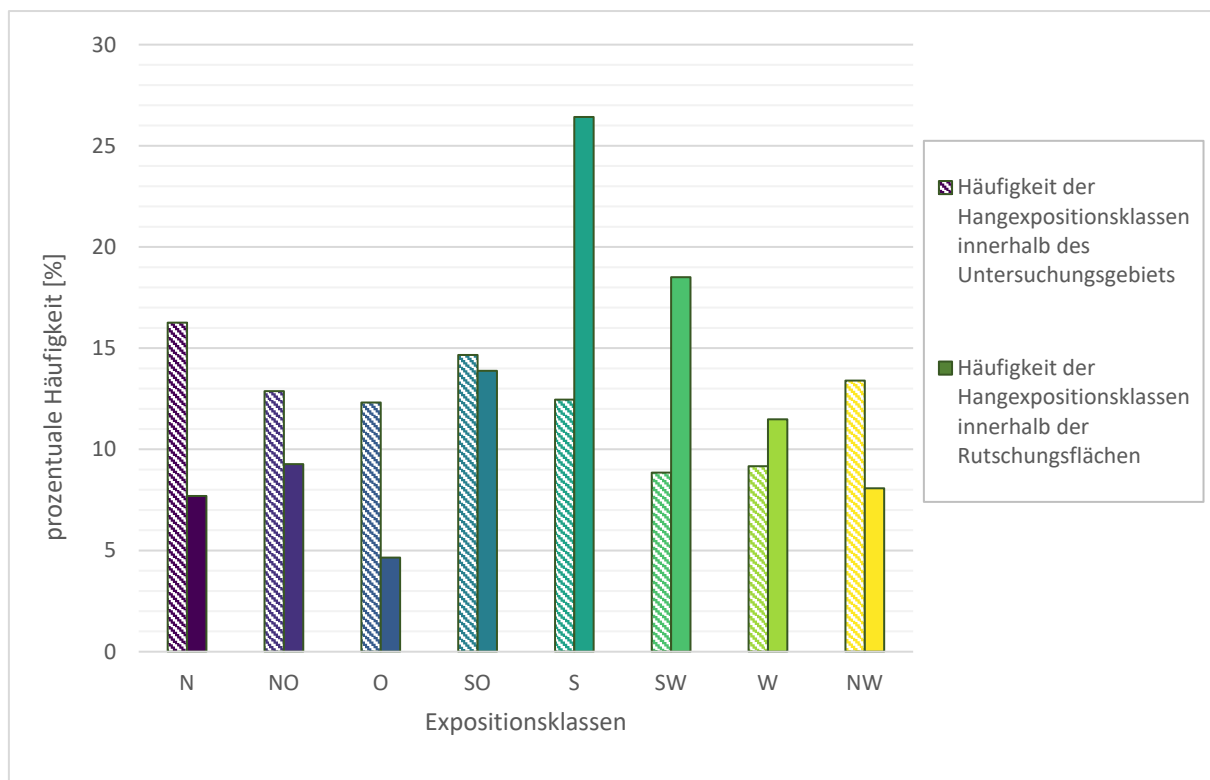


Abbildung 63: Hangexpositionsverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Bei den Rutschungen divergierte die Verteilung der einzelnen Richtungen stärker (Abbildung 63). Die meisten Rutschungen traten an südlichen (26,4 %) und südwestlichen (18,5 %) Hanglagen auf, gefolgt von südost- (13,9 %) und westexponierten Hängen (11,5 %). Mit Abstand am wenigsten Rutschungen wurden an Osthängen (4,6 %) kartiert. Hänge die in nördlicher Richtung exponieren (N, NO, NW) haben innerhalb der Rutschungsflächen immerhin noch Häufigkeiten von ungefähr 7 % bis 9 %. In Abbildung 64 ist dieser Trend in den Rutschungen deutlich zu erkennen, die meisten Rutschungen liegen hier in südlichen bzw. südwestlichen Hängen aber auch nördlich exponierte Hänge sind teils von Rutschungen betroffen.

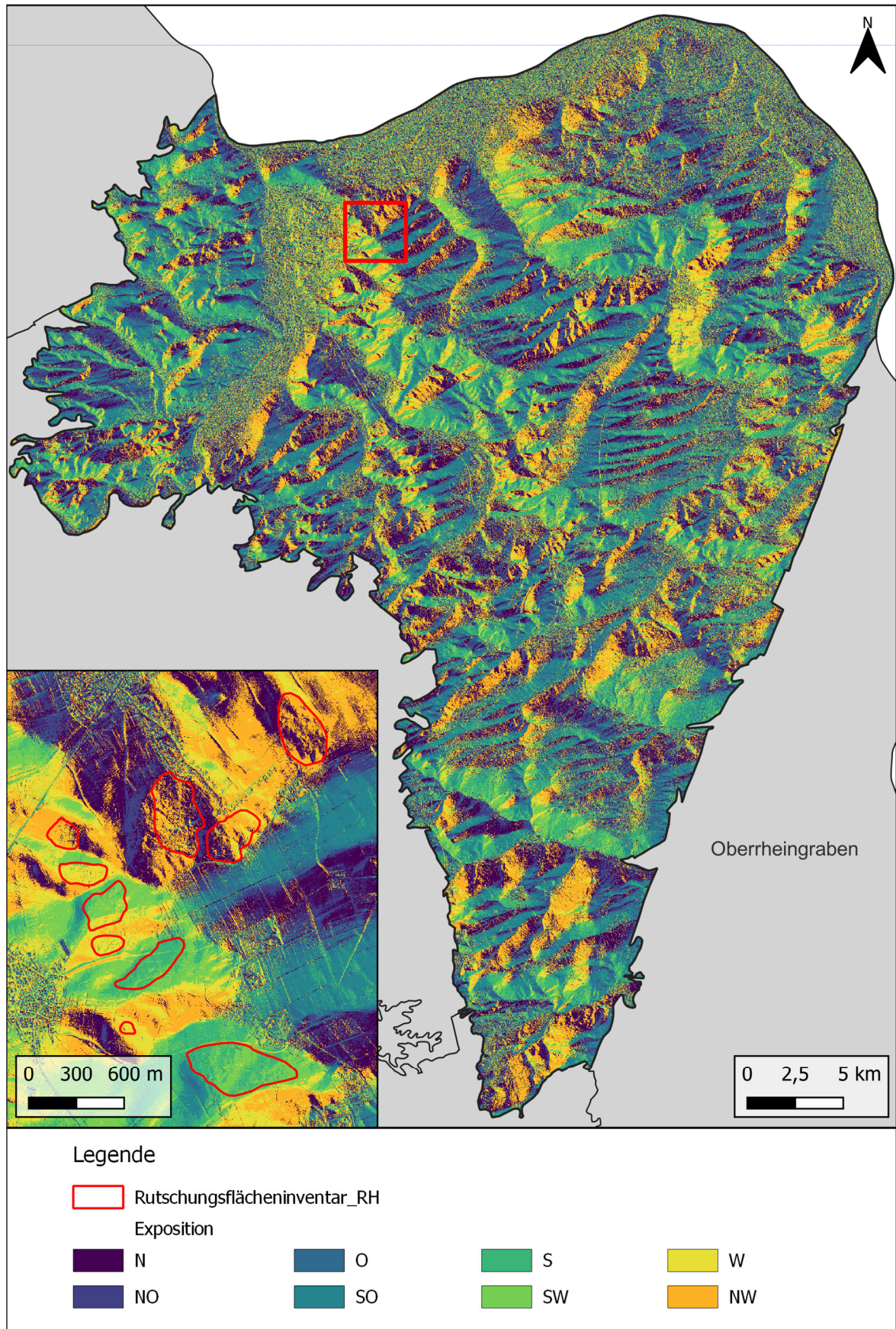


Abbildung 64: Expositionsverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.3 Höhe

Die Analyse der Häufigkeitsverteilung der Höhenlagen im Untersuchungsgebiet 2 zeigt das, dass Maximum der Höhen zwischen 150 m - 200 m mit einer relativen Häufigkeit von 29,3 % liegt (Abbildung 65). Dahinter liegen mit 22,4 % die Klasse 2 mit Höhenlagen zwischen 100 m und 150 m und mit 22,3 % die Klasse 3 mit Höhen von 200 m - 250 m. Die viert größte Klasse mit 15 % Häufigkeit umfasst die Höhen von 250 m - 300 m. Höhenlagen von 50 m bis 100 m kommen im Untersuchungsgebiet noch mit einer Häufigkeit von 8 % vor. Die letzten zwei Klassen, die Höhen von 300 m bis über 400 m einschließen liegen im Gebiet mit einer Häufigkeit von ungefähr 2,9 % vor. Sie umfassen hauptsächlich die Plateaus und die an das Mainzer Becken im Westen anschließenden Hügellandschaften (Abbildung 66).

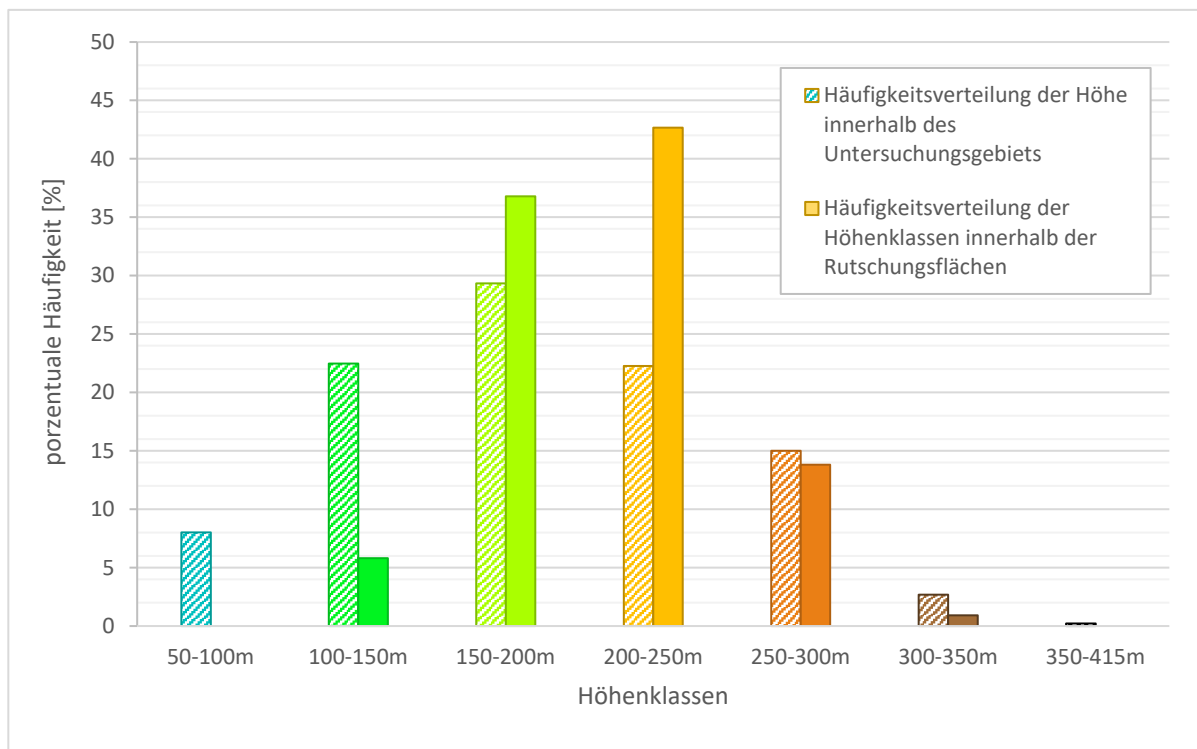


Abbildung 65: Höhenverteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Die Höhenklassen der Rutschungsflächen verteilen sich deutlich anders. Die meisten Rutschungen liegen hier an Hängen mit einer Höhe von 200 m - 250 m (Klasse 4). Die Klasse schließt 42,7 % der Rutschungen ein. Die zweithäufigste Klasse (36,8 %) in der Rutschungen auftreten umfasst Höhen zwischen 150 m und 200 m. In Höhen von 250 m - 300 m treten 13,8 % aller Rutschungen in Untersuchungsgebiet auf. Die wenigsten Rutschungen (0,9 %) liegen in Klasse 4 vor. In Höhen über 350 m sowie in den niedrigsten Lagen des Mainzer Beckens (50 m - 100 m) sind keine Rutschungen im DGM kartiert (Abbildung 65). Die Rutschungen liegen mit ihren auskartierten Flächen auf Grund ihrer Größe häufig in verschiedenen Höhenlagen. Gerade der Initialbereich der Rutschung der meist höher liegt macht dabei nur einen Bruchteil der Rutschungsfläche aus (Abbildung 66).

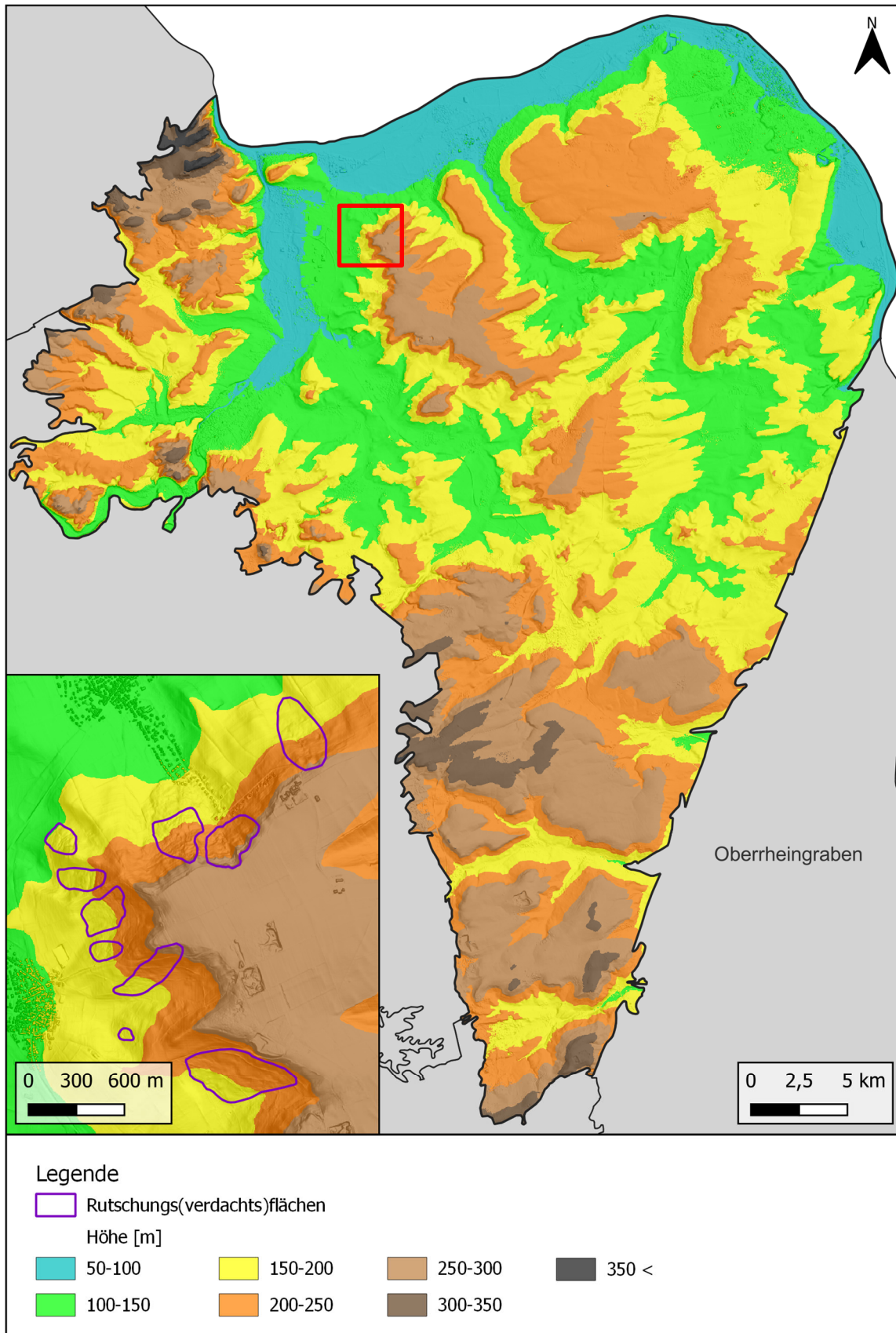


Abbildung 66: Höhenverteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.4 TOBIA

Die Auswertung der TOBIA-Klassenverteilung für das gesamte Mainzer Becken zeigt, dass die kataklinalen Hänge (Klasse 1 bis 3) im Untersuchungsgebiet am häufigsten mit 27,1 % vorkommen (Klasse 1 - 3). Mit 16,9 % kommt die zweite Klasse am häufigsten vor. Für die Klasse 1 ergibt sich eine relative Häufigkeit von gerade einmal 2,7 % und für die Klasse 3 eine Häufigkeit von 8,5 %. Die Klassen 4 bis 6 (anaklinale Hänge) haben insgesamt eine Häufigkeit von 24,1 %. Hier kommt die Klasse 5 am häufigsten mit 14,5 % vor. Orthoklinale Hänge mit einem kataklinalen Trend (Klasse 7 - 9) kommen im Untersuchungsgebiet mit einer Häufigkeit von 22,9 % vor. Orthoklinale Hänge mit anaklinalem Trend haben hingegen eine etwas niedrigere Häufigkeit mit 21,1 % im Mainzer Becken. Somit kommen alle 4 übergeordnete TOBIA-Klassen im Untersuchungsgebiet ungefähr gleich häufig vor (Abbildung 67).

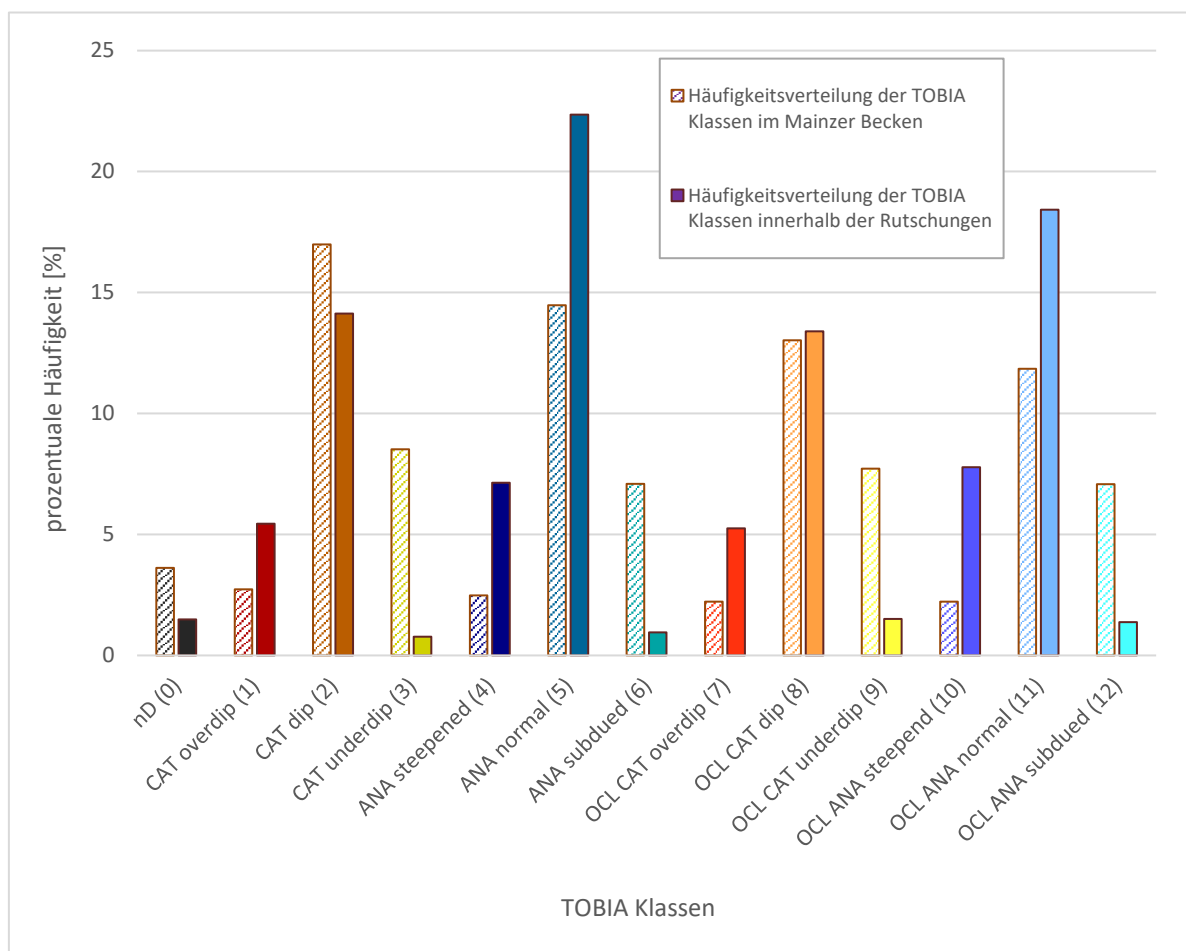


Abbildung 67: TOBIA-Verteilung im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Die Verteilung der TOBIA-Klassen der Rutschungsflächen hat ein Maxima. Am häufigsten treten Rutschungen an anaklinalen Hängen der Klasse 5 (ANA normal) mit über 22,4 % auf. Orthoklinale Hänge mit einem anaklinalem Trend der Klasse 11 haben innerhalb der Rutschungen die zweit höchste

Häufigkeit mit 18,4 % (Abbildung 67). Danach treten an kataklinalen Hängen mit einem hangparallelen Einfallen (*CAT dip slope*, Klasse 2) die meisten Rutschungen auf, mit einer relativen Häufigkeit von 14,1 %. Mit einer ähnlich großen Häufigkeit von 13,4 % sind Rutschungen an orthoklinalen Hängen mit kataklinalen Trend der Klasse 8 kartiert. Alle anderen Klassen haben Häufigkeiten unter 10 %, die am wenigsten von Rutschungen betroffenen Hänge sind kataklinalen Hänge der Klasse 3 (*CAT underdip slope*) mit 0,7 %.

Aufgrund der Berechnungsmethode des TOBIA-Modells gibt es außerdem Bereiche die keine Informationen (*no data*, Klasse 0) enthalten, diese Bereiche sind innerhalb der Rutschungen zu 5,25 % vertreten. zeigt das, dass TOBIA-Modell für das Mainzer Becken gerade im Norden und Osten größere scharfe Grenzen zwischen kataklinalen und anaklinalen Hängen hat, was wenig plausibel ist. Wie schon in Kapitel 4.5.4 erklärt, konnten aufgrund der vorherrschenden Geologie und dem daraus resultierenden Relief keine *Morpho-Lines* in dem Gebiet gezogen werden. Es wurde sich ausschließlich auf die in der Literatur erwähnten und in den Geologischen Karten gekennzeichneten Geländemessungen bezogen und diese gegebenenfalls über *Synth-Lines* in die Fläche ausgeweitet, sodass genügend Daten für eine Berechnung vorlagen. Daher werden für das TOBIA-Modell in nächsten Kapitel zwar die Berechnung von FR und WoE durchgeführt diese sind jedoch aufgrund der Erstellungsmethode mit Vorsicht zu betrachten.

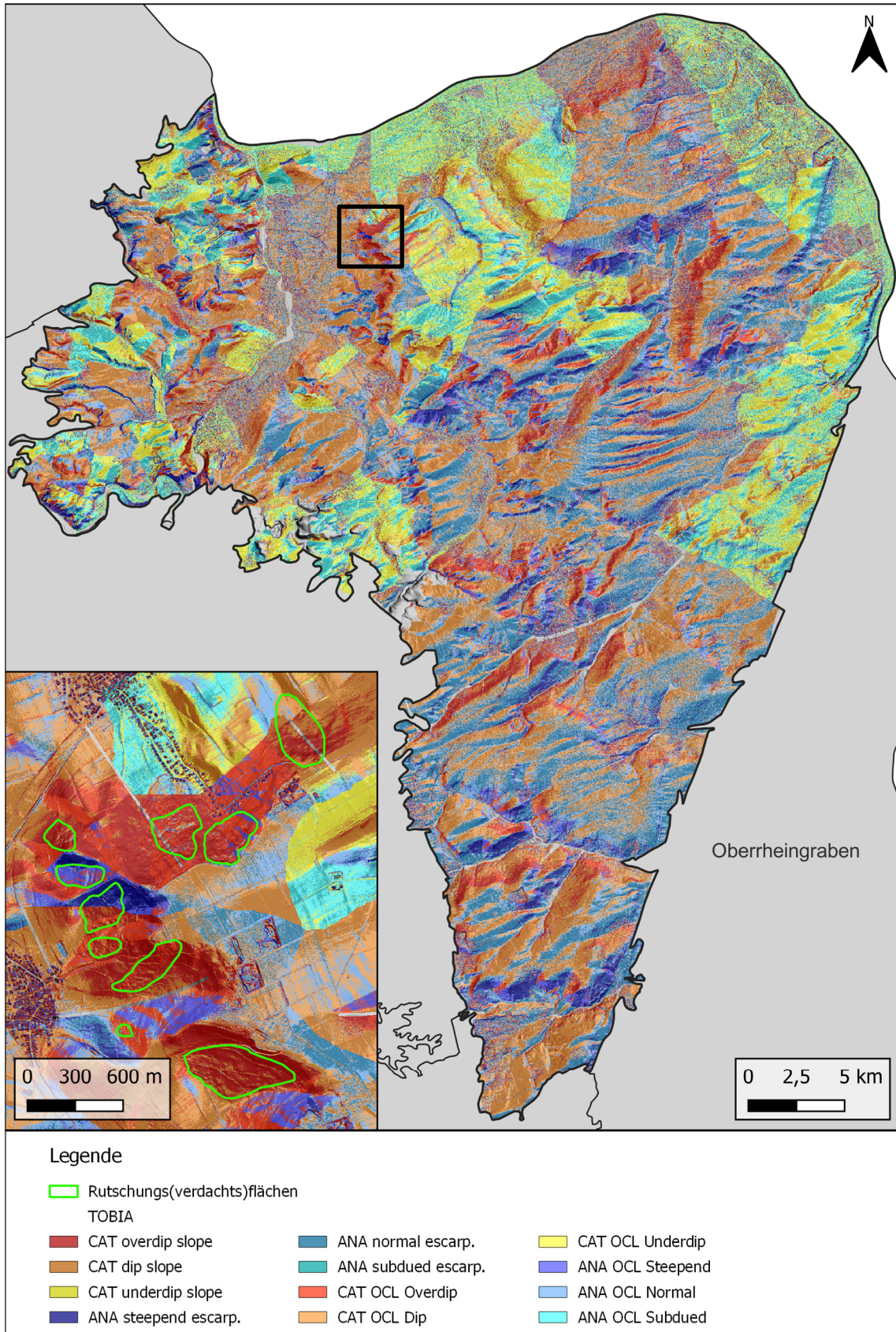


Abbildung 68: TOBIA-Verteilung im Mainzer Becken mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.5 Ingenieurgeologische Klassen

Von den insgesamt 21 ingenieurgeologischen Klassen sind 18 im Untersuchungsgebiet 2 aufzufinden, nicht im Untersuchungsgebiet zu findende Klassen sind "Ausgeprägte wasserlösliche Gesteine", "Vulkanische Tuffe, Laacher See-Tephra" und "Vulkanische Tuffe, verfestigt". Auffällig bei der Betrachtung der Häufigkeiten ist, dass Klasse 5 "Löss und Lösslehm", mit Abstand am häufigsten im Mainzer Becken auftritt. Diese Klasse ist hauptsächlich auf den Ebenen der Plateaus abgelagert (Abbildung 70). Bindige Lockergesteine, gering konsolidiert (Klasse 3) treten mit einer Häufigkeit von 16,2 % auf. Bingige Lockergesteine, konsolidiert (Klasse 4) liegen mit 10,7 % im Gebiet vor. Mit knapp über 5 % treten nicht bindige Lockergesteine vor allem im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets auf (Abbildung 69). Alle weiteren Klassen haben eine Häufigkeit von unter 5 % im Untersuchungsgebiet und werden hier nicht weiter betrachtet.

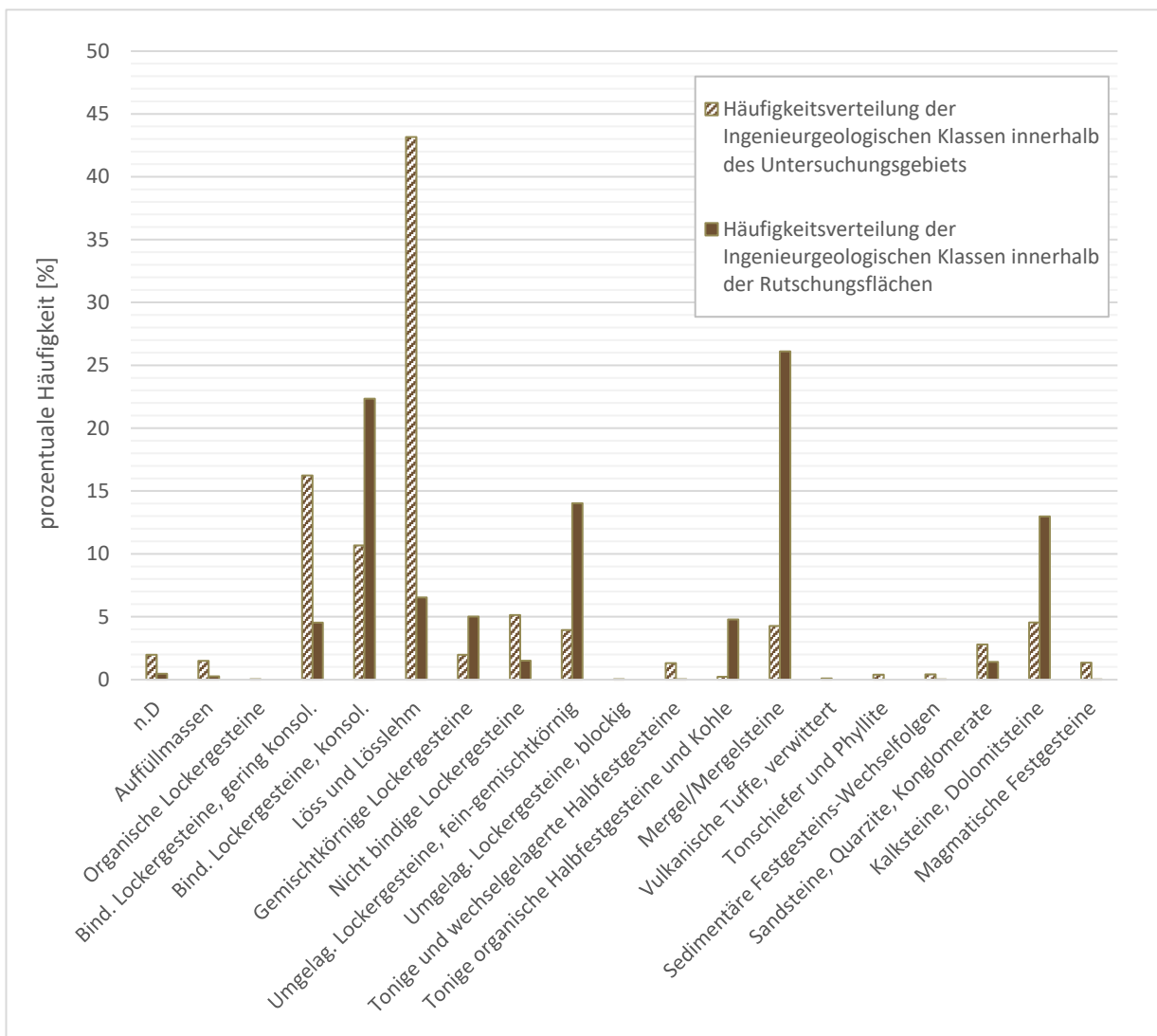


Abbildung 69: Verteilung der Ingenieurgeologischen Klassen im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Im Mainzer Becken liegen Rutschungen in 15 der 21 ingenieurgeologischen Klassen vor. Anders als bei der Häufigkeitsverteilung innerhalb des gesamten Gebiets treten Rutschungen am häufigsten (26,1 %) in geologischen Einheiten der Klasse 12 auf. Diese Klasse umfasst geologische Formationen mit geotechnischen Eigenschaften von Mergel bzw. Mergelstein. Diese kommen im Mainzer Becken zum Großteil an den Mittel- und Oberhängen vor (Abbildung 70). Am zweit häufigsten treten Rutschungen in der Klasse 4 "bindige Lockergesteine, konsolidiert" mit 22,3 % auf. Klasse 8 "Umgelagerte Lockergesteine, fein-bis gemischtkörnig" sowie Klasse 20 „Kalksteine/Dolomitsteine“ haben innerhalb der Rutschungen eine Häufigkeit von über 10 %. Alle weiteren Klassen liegen mit Häufigkeiten unter 10 % in den Rutschungen vor. In Klassen wie z.B. "Sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen" sowie "Magmatische Festgesteine" treten im Mainzer Becken keine Rutschungen auf.

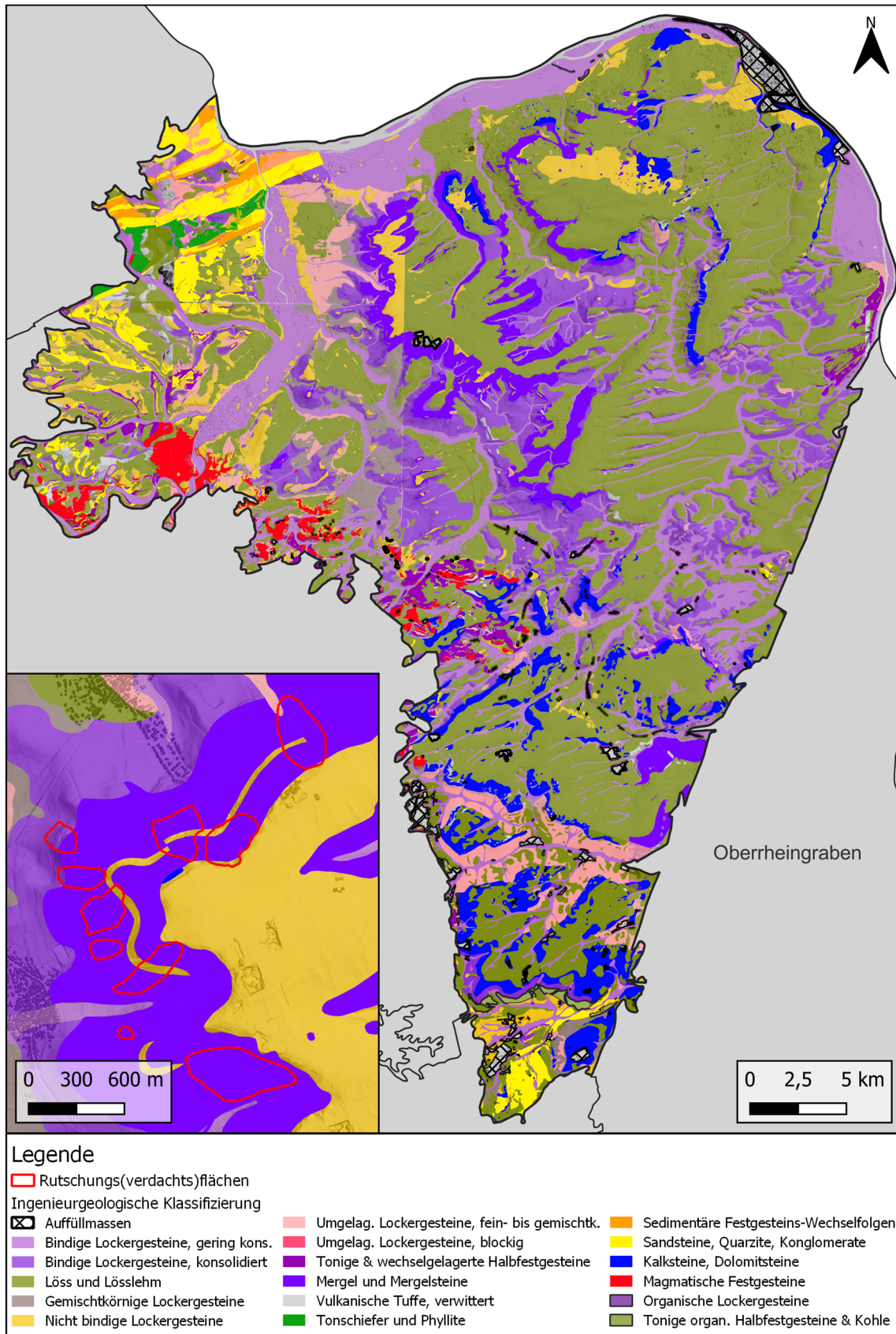


Abbildung 70: Ingenieurgeologische Klassifizierung innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.6 TWI

Die Häufigkeitsverteilung der Bodenfeuchte (TWI) im Mainzer Becken zeigt ein eindeutiges Maximum bei TWI-Werten von 4 bis 6 (Klasse 5) mit 65,4 % (Abbildung 72). Die zweit höchste Klasse sind TWI-Werte von 2 bis 4 mit 18,2 %. Klasse 6 (TWI 6 bis 8) kommen mit einer Häufigkeit von 12,3 % im Mainzer Becken vor. Klasse 3 kommt nur noch mit 3,4 % im Untersuchungsgebiet vor (Abbildung 71). Klassen 1, 2, 7, 8 und 9 kommen am wenigsten im Untersuchungsgebiet vor mit Häufigkeiten von unter 0,5 %.

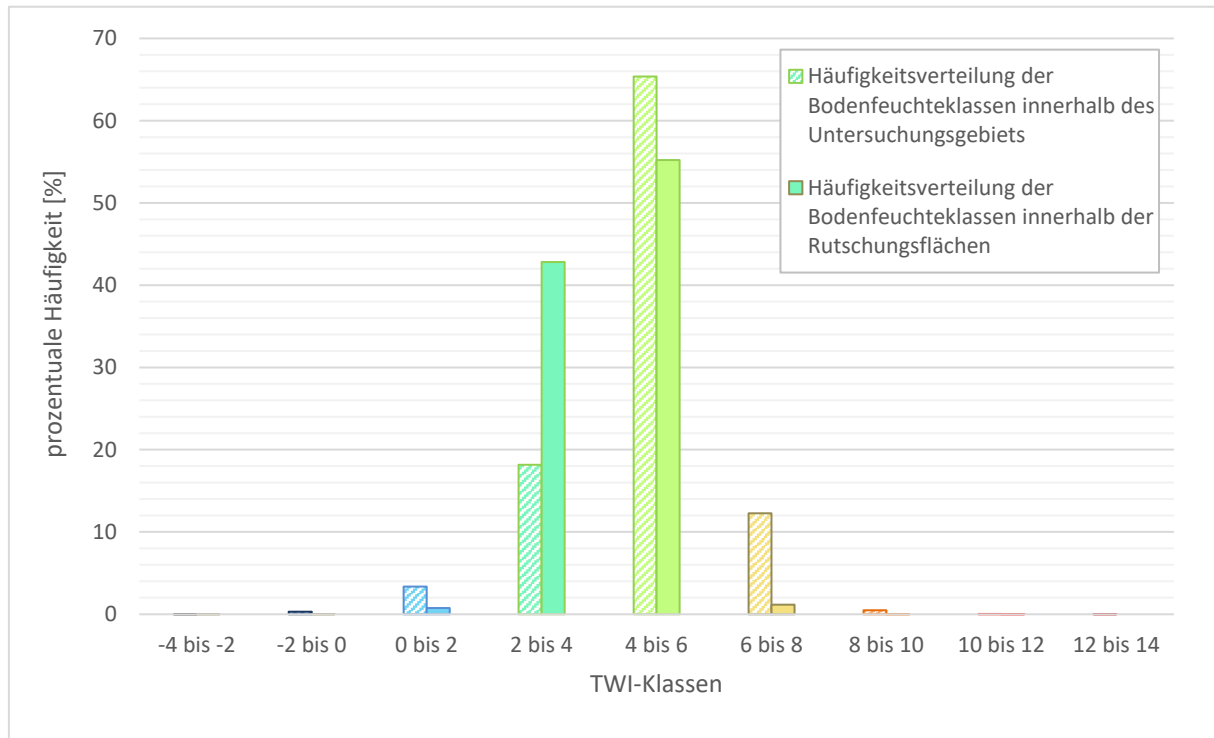


Abbildung 71: Verteilung des TWI im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Die Verteilung innerhalb der Rutschungen zeigt ein Maximum bei Klasse 5 mit 55,2 %. Hier treten am häufigsten Rutschungen auf (Abbildung 71). Am zweit häufigsten mit 42,8 % treten Hangbewegungen in der Klasse 4 mit einem TWI von 2 bis 4 auf. In Klasse 6 kommen gerade einmal mit 1,7 % der Rutschungen im Mainzer Becken vor. Klasse 1, 2,3,7 und 8 haben mit Häufigkeiten unter 1 % das geringste Rutschungsvorkommen. In Klasse 9 mit den höchsten TWIs kommen gar keine Rutschungen vor. Abbildung 72 zeigt einige Rutschungen im Norden des Untersuchungsgebiets, hier treten Ereignisse besonders häufig in Bereichen mit TWIs von 2 bis 4 auf.

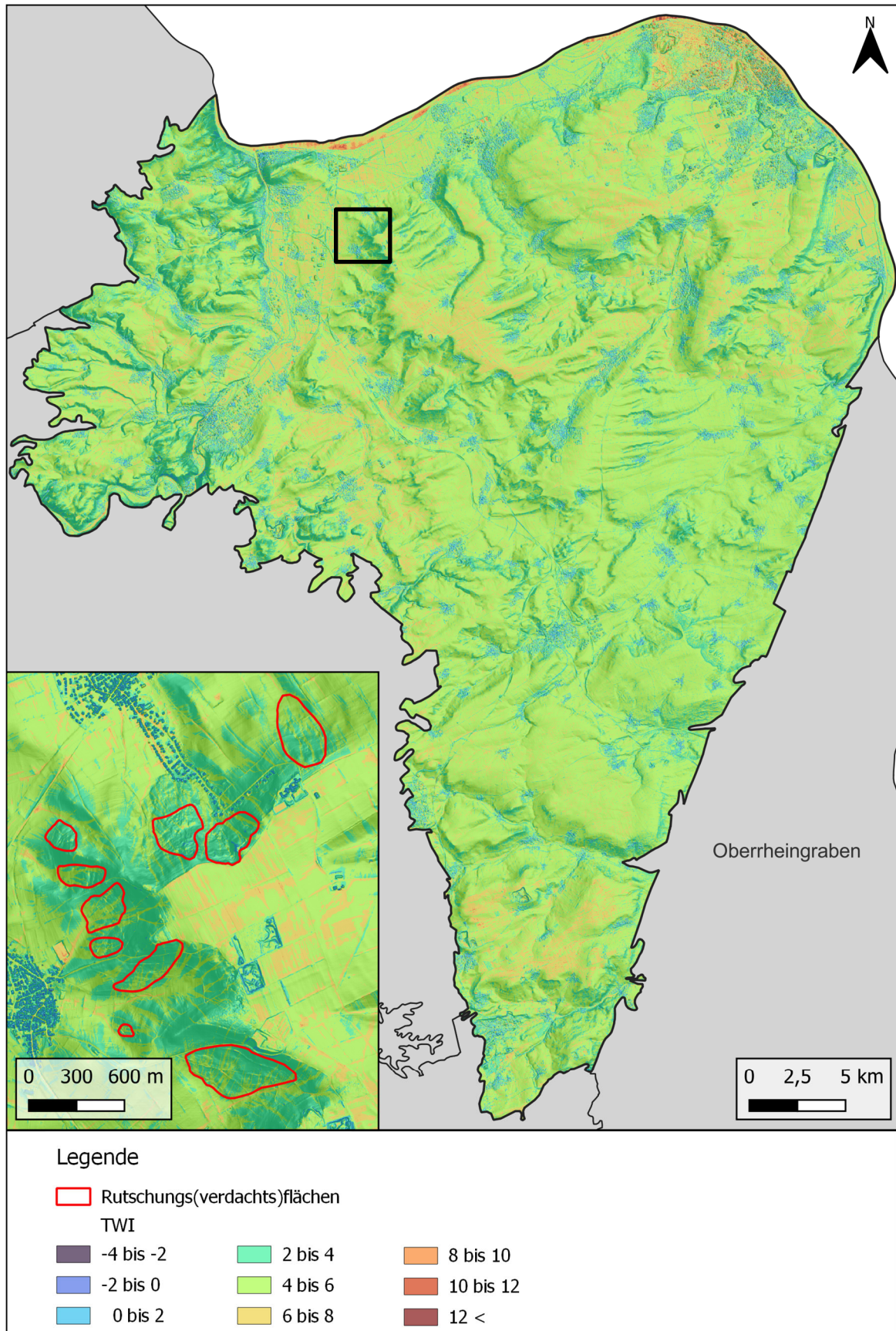


Abbildung 72: TWI innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (schwarzes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.1.7 SPI

Die Häufigkeitsverteilung für den SPI innerhalb des Untersuchungsgebiets 2 zeigt ein eindeutiges Maximum bei Klasse 1 (0 - 10) mit einer Häufigkeit von über 80 % (Abbildung 73). Dies ist zu erwarten, da auf den flachen Bereichen des Gebiets weniger Erosion stattfindet (siehe Kapitel 5.1.7) was auch gut in Abbildung 74 erkennbar ist. Die Häufigkeiten nehmen bis zu Klasse 5 ab (SPI von 40 bis 50). Mit Häufigkeiten von 9,5 % bis 0,99 %. Danach steigt die Häufigkeit der zwei letzten Klassen gering an. Klasse 6 ist mit 1,8 % im Untersuchungsgebiet vorhanden und Klasse 7 mit 1,2 %

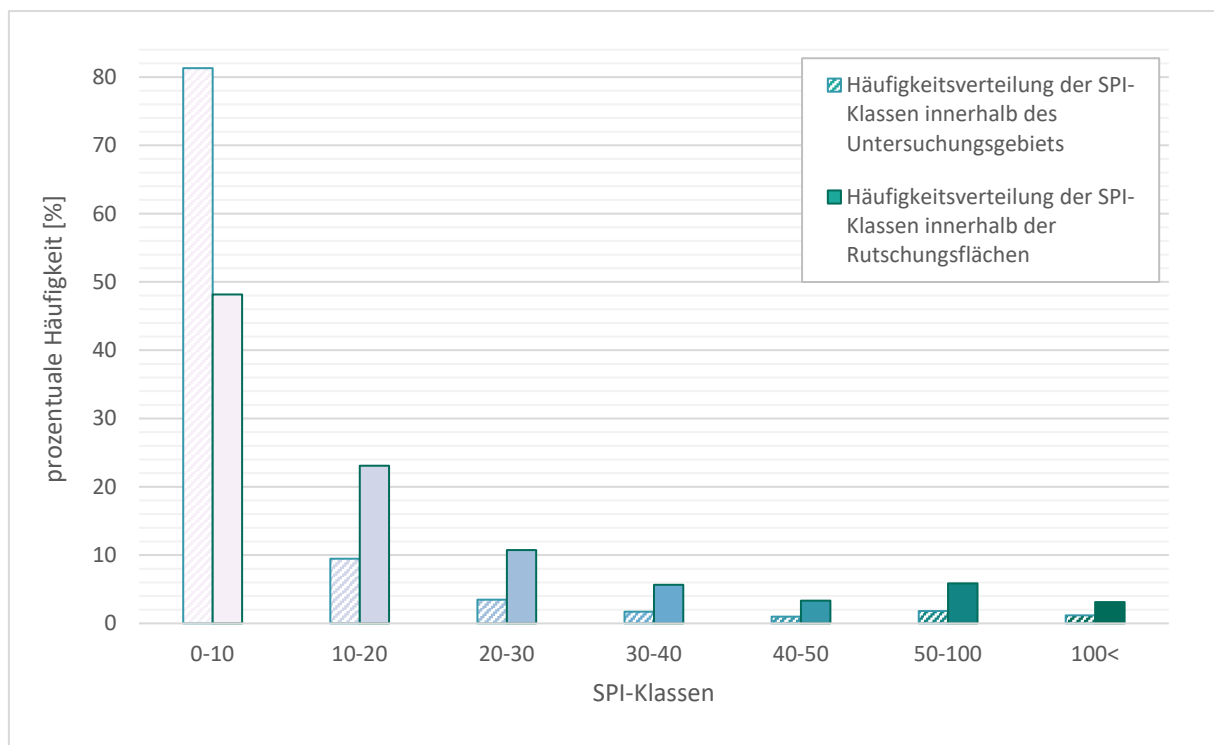


Abbildung 73: Verteilung des SPI im Untersuchungsgebiet U2 und innerhalb der Rutschgebiete.

Innerhalb der Rutschungsflächen zeigt sich der gleiche Verteilungstrend wie im Untersuchungsgebiet allerdings mit einem geringeren Maximum. Das Maximum liegt bei Klasse 1 mit 48,2 %. Danach folgt Klasse 2 mit 23,1 %. Die Häufigkeiten sinken innerhalb der Rutschungsflächen bis Klasse 5 mit einem Minimum der Häufigkeitsverteilung bei 3,3 %. Klasse 6 mit einem SPI zwischen 50 und 100 erreicht innerhalb der Rutschungsflächen 5,9 % und Klasse 7 mit Werten über 100 hat eine Häufigkeit von 3,1 % (Abbildung 73). Abbildung 74 zeigt, dass die größten SPIs unter anderem an den Hängen des Untersuchungsgebiets vorkommen. Häufig treten in diesen Bereichen auch die Rutschungen auf.

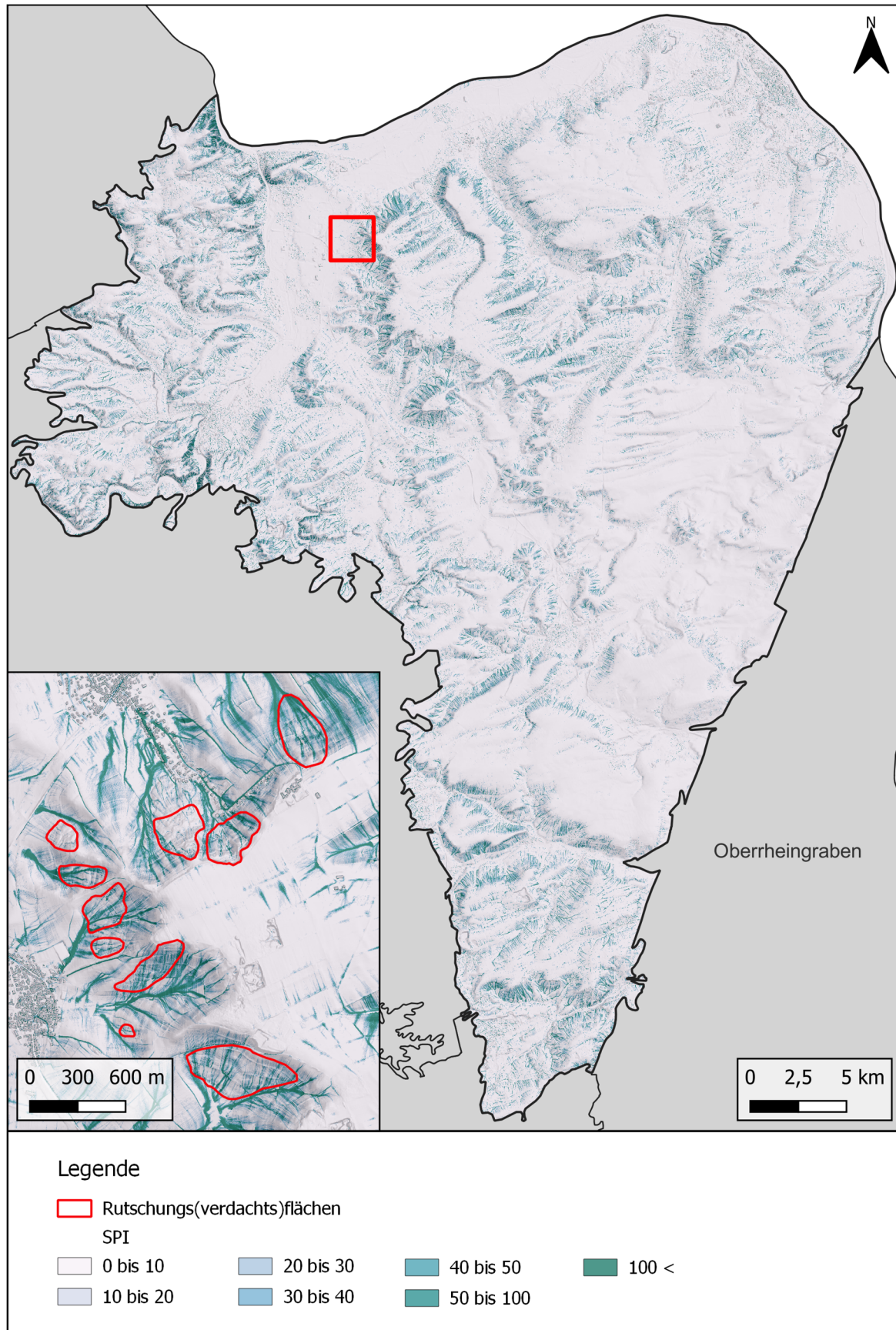


Abbildung 74: SPI-Verteilung innerhalb des Mainzer Beckens mit Ausschnitt (rotes Rechteck) auf ein Gebiet das von vielen Rutschungen betroffen ist.

6.2 Suszeptibilitätsanalyse

Aus Tabelle 42 geht hervor, dass Rutschungen im Gebiet des Mainzer Beckens nur selten bei Hängen mit einer Neigung bis 5° vorkommen. Die FR-Werte der Klasse liegt bei 0,25 mit einem Kontrast C von -2,37. Außerdem kommen Rutschungen nur selten in Hängen mit einer Neigung 30° bis 90° vor. Im Mainzer Becken nimmt die Anfälligkeit für Rutschungen ab einer Hangneigung von 15° mit zunehmender Hangneigung wieder ab. Rutschungen kommen im Mainzer Becken häufig an Hängen mit Neigungen von 5° bis 30° vor. Der FR-Wert (4,73) und der Kontrast C (1,81) ist am höchsten für die Hangklasse "10° - 15°", gefolgt von der Hangklasse "15° - 20°" (siehe Tabelle 42). Aber auch Hangneigungen zwischen 5° - 10° und 20° - 25° haben eine hohe Korrelation mit den Rutschungen im Untersuchungsgebiet ($FR > 2$).

Tabelle 42: Hangneigungsstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

Hangneigung							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	0° bis 5°	2308745	897066646	0,25	-1,40	0,97	-2,37
2	5° bis 10°	6423861	252123017	2,41	0,89	-0,42	1,32
3	10° bis 15°	3225086	62861325	4,73	1,59	-0,22	1,81
4	15° bis 20°	1014574	25643099	3,69	1,33	-0,06	1,39
5	20° bis 25°	373902	16334551	2,17	0,79	-0,02	0,80
6	25° bis 30°	153560	12095756	1,21	0,20	-0,00	0,20
7	30° bis 35°	71433	8703638	0,79	-0,24	0,00	-0,24
8	35° bis 40°	34700	5701971	0,59	-0,54	0,00	-0,54
9	40° bis 45°	13803	3440514	0,39	-0,96	0,00	-0,96
10	> 45°	9459	22928218	0,04	-3,23	0,02	-3,25

Die FR- und WoE-Analyse der Exposition zeigt, dass die nach Süden, Südwesten und Westen ausgerichteten Hänge anfällig für Rutschungen im Mainzer Becken sind. Sie haben FR-Werte von 2,40 bis 1,29 und einen Kontrast C von 1,04 bis 0,37 (siehe Tabelle 43). Die nach Südwesten exponierten Hänge sind dabei am anfälligsten für Rutschungen. Alle anderen Hangrichtungen (N, NO, O, SO und NW) korrelieren kaum mit den Rutschungsflächen da sie FR-Werte unter 1 bzw. negative Kontraste aufweisen. Diese Hänge sind somit nicht prädisponiert für Hangbewegungen wie Rutschungen.

Ergebnisse für das Mainzer Becken

Tabelle 43: Hangexpositionsstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

Hangexposition								
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C	
1	Nord	887794	213857410	0,40	-0,92	0,11	-1,03	
2	Nordost	1090624	168922956	0,62	-0,48	0,06	-0,53	
3	Ost	504969	162094243	0,30	-1,21	0,09	-1,31	
4	Südost	1737727	191930168	0,87	-0,14	0,02	-0,16	
5	Süd	3624233	160916573	2,13	0,77	-0,18	0,95	
6	Südwest	2891588	113977527	2,40	0,89	-0,15	1,04	
7	West	1733623	119314156	1,39	0,33	-0,04	0,37	
8	Nordwest	1158534	175827576	0,63	-0,46	0,06	-0,51	

Im Falle der Höhe ist die Rutschungsdichte bei Rutschungen im Mainzer Becken am höchsten in Höhen zwischen 150m und 250m (Tabelle 44). Klasse 3 (150 m - 200 m) hat dabei einen *Frequency Ratio* von 1,4 und einen Kontrast C von 0,53. Klasse 4 (200 m – 250 m) einen FR von 1,94 und einen Kontrast C von 0,99. Höhenlagen zwischen 100 m – 150 m und 250 m – 300 m sind selten von Rutschungen betroffen was sich in den niedrigen FR-Werten bzw. negativen Kontrast C widerspiegelt, hier kann kaum eine Korrelation zwischen Rutschungsflächen und Höhen festgestellt werden. Höhenlagen zwischen 50 m und 100 m sowie 300 m bis über 400 m weisen keine Rutschungen im Mainzer Becken auf, nach den Anfälligkeitsberechnungen ist hier der FR = 0 und der Kontrast C geht gegen $-\infty$.

Tabelle 44: Höhenstatistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

Höhe								
ID	Höhe	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C	
1	50 - 100m	0	105944245	0	-Inf	0,08	-Inf	
2	100 - 150m	927663	295877684	0,30	-1,20	0,19	-1,39	
3	150 - 200m	5608586	381698750	1,40	0,34	-0,18	0,53	
4	200 - 250m	5881167	288069902	1,94	0,67	-0,32	0,99	
5	250 - 300m	1211707	196930612	0,59	-0,53	0,07	-0,60	
6	300 - 350m	0	35473261	0	-Inf	0,03	-Inf	
7	350 - 405m	0	2901973	0	-Inf	0,00	-Inf	

Die Auswertung der TOBIA-Klassen in Bezug auf das Rutschungsverhalten im Mainzer Becken ergab eine erhöhte Anfälligkeit für die Klasse 10 "ANA OCL *steepend*" mit einem FR von über 4 und einem Kontrast C von 1,5. Bei den anaklinalen Hängen weisen sowohl die "*steepend*" als auch die „*normal*“ Hänge FR-Werte von 2,99 und 1,51 bzw. einen positiven Kontrast C auf und zeigen somit eine positive Korrelation zwischen Rutschungen und den TOBIA-Klassen (Tabelle 45). Auch bei den orthoklinalen

Hängen mit kataklinalem Trend weisen die "overdip" und "dip" Hänge eine Korrelation mit den Rutschungen auf mit FRs von 2,82 (C = 1,1) und 1,21 (C = 0,23). Auch bei den Hängen der Klasse "CAT overdip" wurde ein FR über 1 (C > 0) gemessen und somit eine Korrelation zwischen Rutschungsaufreten und den Lagerungsverhältnissen festgestellt. Im Gegensatz dazu weisen die "CAT dip", "CAT underdip", "ANA subdued", "CAT OCL underdip" sowie "ANA OCL subdued" Hänge kaum eine Korrelation zwischen den TOBIA-Klassen und Rutschungen auf.

Tabelle 45: TOBIA Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

TOBIA							
ID	Klassen	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	no data	197875	47557719	0,40	-0,92	0,02	-0,94
1	CAT overdip	589755	35467887	1,58	0,47	-0,02	0,48
2	CAT dip	1057031	223240557	0,46	-0,79	0,11	-0,90
3	CAT underdip	94518	112436235	0,08	-2,52	0,08	-2,60
4	ANA steepend	1007960	31698290	2,99	1,11	-0,05	1,17
5	ANA normal	2973686	188121526	1,51	0,42	-0,09	0,51
6	ANA subdued	136427	93521653	0,14	-1,97	0,06	-2,03
7	CAT OCL overdip	852602	28454846	2,82	1,06	-0,04	1,10
8	CAT OCL dip	2148817	169838114	1,21	0,19	-0,03	0,23
9	CAT OCL underdip	251977	101665969	0,24	-1,44	0,06	-1,50
10	ANA OCL steepend	1262014	28077251	4,17	1,46	-0,08	1,54
11	ANA OCL normal	2832055	153604441	1,75	0,57	-0,11	0,68
12	ANA OCL subdued	224410	93232047	0,23	-1,47	0,06	-1,52

Im Rahmen der Suszeptibilitätsanalyse für Rutschungen wurden im Mainzer Becken verschiedene Ingenieurgeologische Klassen identifiziert, in denen keine Rutschungen auftreten. Dazu gehören organische Lockergesteine, umgelagerte (blockige) Lockergesteine, vulkanische Tuffe (verwittert), Tonschiefer & Phyllite, sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen und magmatische Festgesteine. Diese Klassen haben einen Frequency Ratio von 0 und einen Kontrast von $-\infty$. Die höchste Korrelation mit Rutschungen wurde für die Klasse "Mergel/Mergelsteine" festgestellt, mit einem FR von 7 und einem Kontrast C von 2,34. Die Klasse der tonigen organischen Halbfestgesteine & Kohle hat ebenfalls eine hohe Korrelation mit einem FR über 5 und einem Kontrast von 1,7 (Tabelle 46). Die folgenden Klassen, die auch eine Korrelation mit dem Rutschungsaufreten aufweisen, sind "bindige Lockergesteine, konsolidiert", "umgelagerte Lockergesteine, fein- bis gemischtkörnig" und "Kalksteine, Dolomitsteine" mit FRs über 1. Die restlichen Klassen weisen FR-Wert unter 1 und einen negativen Kontrast C auf und zeigen somit kaum eine Korrelation bzw. eine negative Korrelation zwischen den jeweiligen ingenieurgeologischen Klassen und dem Rutschungsaufreten.

Ergebnisse für das Mainzer Becken

Tabelle 46: Ingenieurgeologische Klassifizierung. Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

Ingenieurgeologische Klassifizierung							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
0	NoData	83401	25920197	0,31	-1,18	0,01	-1,19
1	Auffüllmassen	51416	19590411	0,25	-1,38	0,01	-1,39
2	Organische Lockergesteine	0	298647	0,00	-Inf	0,00	-Inf
3	Bindige Lockergesteine, gering kons.	808219	213559743	0,37	-1,01	0,12	-1,13
4	Bindige Lockergesteine, konsolidiert	3100102	137893662	2,13	0,77	-0,15	0,91
5	Löss und Lösslehm	1065947	568848186	0,18	-1,72	0,49	-2,21
6	Gemischtkönige Lockergesteine	2685	25984820	0,01	-4,61	0,02	-4,63
7	Nicht bindige Lockergesteine	123802	67696798	0,18	-1,74	0,04	-1,78
8	Umgelag. Lockergesteine, fein- bis gemischtkörnig	2558528	49456924	4,77	1,60	-0,17	1,77
9	Umgelag. Lockergesteine, blockig	0	420901	0,00	-Inf	0,00	-Inf
10	Tonige & wechselgelag. Halbfestgesteine	6661	17295749	0,04	-3,30	0,01	-3,31
11	Tonige organ. Halbfestgesteine & Kohle	155949	2766460	5,17	1,69	-0,01	1,70
12	Mergel/ Mergelsteine	4100433	52232447	7,05	2,02	-0,32	2,34
13	Ausgeprägt wasserlösliches Gestein	0	0	NaN	NaN	NaN	NaN
14	Vulkanische Tuffe, Laacher See-Tephra	0	0	NaN	NaN	NaN	NaN
15	Vulkanische Tuffe, verfestigt	0	0	NaN	NaN	NaN	NaN
16	Vulkanische Tuffe, verwittert	0	1190017	0,00	-Inf	0,00	-Inf
17	Tonschiefer und Phyllite	0	5218904	0,00	-Inf	0,00	-Inf
18	Sedimentäre Festgesteins-Wechselfolgen	0	5410695	0,00	-Inf	0,00	-Inf
19	Sandsteine, Quarzite, Konglomerate	13722	36921432	0,04	-3,33	0,03	0,00
20	Kalksteine, Dolomitsteine	1558262	58398497	2,52	0,94	-0,08	0,00
21	Magmatische Festgesteine	0	17812058	0,00	-Inf	0,01	-Inf

Im Falle des TWI weist nur eine Klasse einen FR >1 auf und ist somit die einzige Klasse, bei der eine positive Korrelation zwischen Rutschungsaufreten und TWI-Werten besteht (Tabelle 47). Die Rutschungen im Mainzer Becken treten am häufigsten bei Werten zwischen 2 und 4 auf mit einem FR von 2,57 und einem Kontrast C von 1,39. In den restlichen Klassen treten kaum Rutschungen auf, diese haben somit einen FR von unter 1 bzw. einen negativen Kontrast C. In der Klasse mit den niedrigsten und höchsten TWIs sind keine Rutschungen verzeichnet, somit haben diese Klassen einen FR von 0 und einen Kontrast C von $-\infty$.

Ergebnisse für das Mainzer Becken

Tabelle 47: TWI-Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

TWI							
ID	TWI	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	-4 bis -2	0	49313	0	-Inf	3,77	-Inf
2	-2 bis 0	361	4099936	0,01	-4,77	0,00	-4,78
3	0 bis 2	84291	44415483	0,18	-1,70	0,03	-1,73
4	2 bis 4	6359388	233394228	2,57	0,96	-0,43	1,39
5	4 bis 6	7054168	856210094	0,79	-0,24	0,34	-0,57
6	6 bis 8	129163	161931955	0,08	-2,57	0,12	-2,69
7	8 bis 10	1672	6234238	0,03	-3,66	0,01	-3,67
8	10 bis 12	13	512371	0,002	-6,02	0,00	-6,02
9	12 bis 14	0	69046	0	-Inf	5,28	-Inf

Die FR- und WoE-Analyse des SPI zeigt, dass die Korrelation zwischen Rutschungsflächen und Index bei SPIs zwischen 20 und 50 in etwa gleichbleibend ist. Am anfälligsten sind SPIs zwischen 30 und 40 mit einem FRs von 2,99 bzw. einen Kontrast C von 1,15 hier sind im Untersuchungsgebiet 2 am häufigsten Rutschungen kartiert (Tabelle 48). Interessant ist hier das SPIs von 20 bis 30 mit einem FR von 2,90 einen leicht höheren Kontrast C als die vorherige Klasse aufweist (siehe Tabelle 48). Flächen mit einem SPI über 100 weisen auch einen FR über 1 auf und sind somit anfällig für Rutschungen. Einzig Klasse 1 (0 – 10) weist kaum eine Korrelation mit den Rutschungsflächen auf, hier wurde ein FR von 0,64 und ein Kontrast C von -1,41 berechnet.

Tabelle 48: SPI-Statistik der Suszeptibilitätsanalyse für den Frequency Ratio und Weight-of-Evidence im Mainzer Becken.

SPI							
ID	Klasse	P mit RF	P ohne RF	FR	W+	W-	C
1	0-10	7086047	1066746795	0,64	-0,45	0,96	-1,41
2	10-20	3084631	122075097	2,39	0,89	-0,16	1,04
3	20-30	1375967	44624673	2,90	1,08	-0,07	1,16
4	30-40	700264	22004611	2,99	1,12	-0,04	1,15
5	40-50	397067	12769028	2,92	1,09	-0,02	1,11
6	50-100	662299	23275209	2,68	1,00	-0,03	1,04
7	100<	322781	15421264	1,99	0,70	-0,01	0,71

Wie im Saar-Nahe-Gebiet wird auch hier eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Anfälligkeitsberechnungen gegeben.

Die im Mainzer Becken durchgeführten Anfälligkeitsberechnungen für Rutschungen zeigen, dass Hängen zwischen 5° bis 30° am häufigsten von Rutschungen betroffen sind. An Hängen mit einer Neigung von 10° bis 15° sind dabei am häufigsten Rutschungen aufgetreten. Südwestlich ausgerichtete Hänge waren am anfälligsten für Rutschungen, gefolgt von südlichen und westlichen Hängen.

Bei den Höhen waren Bereiche von 150 m bis 250 m am anfälligsten für Rutschungen, während zwischen anderen Höhenlagen und Rutschungen keine Korrelation bestand. Wie jedoch in Kapitel 5.2.1 erwähnt, spielt die Höhe primär in Hochgebirgen eine Rolle bei der Analyse der Rutschungsanfälligkeit. Daher wird sie auch wie beim Saar-Nahe-Gebiet nicht mit in die weiteren Modellberechnungen mit einbezogen.

Bei orthoklinalen Hängen mit anaklinalem Trend, ist die Anfälligkeit für das berechnete TOBIA-Modell für Rutschungen im Mainzer Becken am größten. Allerdings ist dieses aufgrund der Erstellung im Mainzer Becken nicht aussagekräftig, wie in Kapitel 4.5.4 erläutert.

Die höchste Korrelation zwischen Rutschungen und Ingenieurgeologischer Klassifizierung wurde bei der Klasse "Mergel/Mergelsteine" berechnet. "Tonige, organische Halbfestgesteine" sind laut Suszeptibilitätsanalyse danach am anfälligsten für Rutschungen und auch die Klasse der "Kalksteine/Dolomitgesteine" weist eine erhöhte Korrelation mit den auftretenden Rutschungen auf. Dies deckt sich mit den Beobachtungen und Ergebnissen in der Literatur. KRAUTER & STEINGÖTTER (1983) geben an das, das Tertiär im rheinhessischen Hügelland mit seinen Wechsellagerungen von Ton und Feinsand, Mergelton und Kalkmergelbänken sehr anfällig für Rutschungen ist. Besonders rutschungsanfällig sind in Rheinhessen dabei die mächtigen, wasserwegsamen miozänen Kalksteine, die auf den oligozänen Tonen liegen.

Bei dem TWI wurde für die Rutschungen der anfälligste Bereich zwischen Werten von 2 bis 4 ermittelt. In den restlichen Klassen besteht kaum eine Korrelation mit den Rutschungsflächen. Die Analyse des *Stream Power Index* zeigt, dass die Korrelation zwischen Rutschungen und Index bei SPIs von 20 bis 50 ähnlich hoch ist. Die am stärksten anfälligsten Gebiete im Mainzer Becken sind Bereiche von 30 bis 40.

6.3 Berechnung & Validierung der Rutschungsanfälligkeitsmodelle

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Erstellung von Rutschungsanfälligkeitsmodellen im Mainzer Becken. Dabei wurden, wie im Saar-Nahe-Gebiet mehrere Parameterkombinationen berechnet und die Modelle mittels ROC-Kurven und AUC verglichen, um das beste Suszeptibilitätsmodell für die Rutschungen im Mainzer Becken zu ermitteln. Das Modell mit der besten Genauigkeit wurde als endgültige Rutschungssuszeptibilitätskarte mit fünf Anfälligkeitsklassen klassifiziert (Kapitel 6.4).

Die verschiedenen Modelle mit den unterschiedlichen Parameterkombinationen wurden mittels Aufsummierung des Rutschungssuszeptibilitätsindex für die jeweiligen Parameter und die zwei verschiedenen Methoden erstellt. Für das Mainzer Becken wurden 4 Modelle mit dem *Weight-of-Evidence* berechnet (Tabelle 49). Das erste Modell besteht dabei aus den drei Faktoren: Hangneigung, Exposition und Ingenieurgeologischer Klassifizierung. Drei weitere Modelle mit dem TOBIA, TWI und SPI wurden danach zusätzlich berechnet. Anders als im Saar-Nahe-Gebiet wurde der Parameter TOBIA nicht in das erste Modell mit einbezogen. Dies liegt daran, dass das TOBIA-Modell im Mainzer Becken sehr experimentell berechnet wurde und deshalb nicht so aussagekräftig ist wie im Saar-Nahe-Becken. Deshalb wurde der Parameter TOBIA im Modell 2 mit einbezogen. Die vier Modelle wurden mittels des Testdatensatzes validiert, um zu schauen, wie die Vorhersagegenauigkeit der einzelnen Modelle ist und welchen Einfluss die drei weiteren Parameter auf die Modell Vorhersagekraft haben.

Tabelle 49: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der *Weight-of-Evidence* Methode für Rutschungen im Mainzer Becken.

Modellname	Stat. Methode	Verwendete Faktoren
RSK_R_WoE_M1	WoE	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung
RSK_R_WoE_M2	WoE	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_R_WoE_M3	WoE	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TWI
RSK_R_WoE_M4	WoE	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TWI, SPI

Das erste Modell (RSK_R_WoE_M1) mit den drei Faktoren Hangneigung, Exposition und Ingenieurgeologische Klassifizierung hat eine AUC von 0,796. Bei den weiteren Modellen wurde jeweils ein weiterer Parameter verrechnet und untersucht was für einen Einfluss der Faktor auf die Vorhersagekraft des Modells hat (siehe Abbildung 75, links). Beim Modell 2 (RSK_R_WoE_M2) wurde der Faktor TOBIA als vierter Parameter in das Modell mit einbezogen. Er hat einen leicht negativen Einfluss auf die Vorhersagekraft der *Weight-of-Evidence* Methode und eine AUC von 0,795. Aufgrund dessen und der unsicheren Datenqualität wurde der Faktor in den weiteren Modellen nicht mit

einbezogen. Bei dem Modell 3 (RSK_R_WoE_M3) wurde zusätzlich noch der TWI verrechnet. Dieser hat einen leicht positiven Einfluss auf die Genauigkeit des Modells. Die AUC steigt hier im Vergleich zu Modell 1 auf 0,798 an. Verrechnet man das Modell 3 mit dem SPI wird in der ROC-Kurve ersichtlich, dass dieser Faktor einen relativ großen positiven Einfluss auf die Vorhersagekraft des Modells hat. Die AUC steigt bei Modell 4 (RSK_R_WoE_M4) auf 0,831 an. Das Beste Modell mit der WoE-Methode ist somit das Modell 4 mit den fünf Faktoren Hangneigung, Exposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung, TWI und SPI.

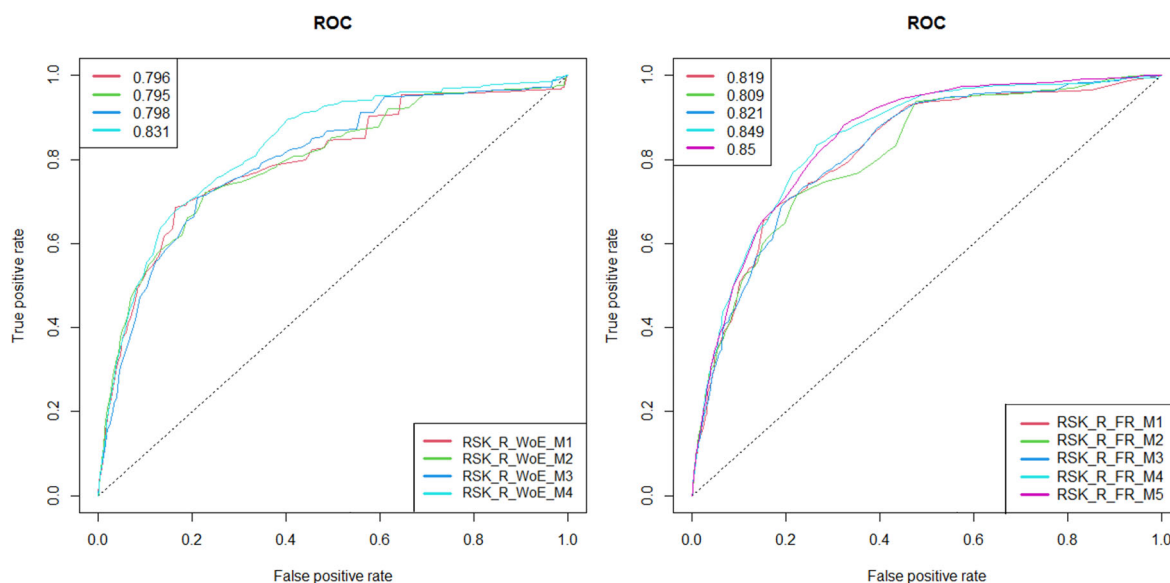


Abbildung 75: ROC-Kurven für die Anfälligkeitsmodelle im Mainzer Becken. Links: ROC-Kurven und AUC für die Weight-of-Evidence Methode Rechts: ROC-Kurven und AUC für die Frequency-Ratio Methode.

Bei der Auswahl der Modelle für die *Frequency-Ratio* Methode wurde ähnlich vorgegangen wie bei der WoE-Methode (Tabelle 50). Die Validierung der Modelle zeigt Ergebnisse mit höheren AUCs als die der *Frequency-Ratio*-Methode (siehe Abbildung 75, rechts). Das erste Modell (RSK_R_FR_M1) beinhaltet die gleichen Parameter wie bei der WoE-Methode. Das Modell hat eine AUC von 0,819. Das Modell 2 (RSK_R_FR_M2) mit dem zusätzlichen Faktor TOBIA hat eine AUC von nur 0,809. Der Faktor hat somit auch bei dieser Methode einen negativen Einfluss auf die Modellgenauigkeit und wird somit bei den weiteren Modellen nicht mitberücksichtigt. Bei dem Modell 3 (RSK_R_FR_M3) mit dem Faktor SPI steigt die AUC im Vergleich zum Modell 1 leicht auf 0,821 an. Beim Modell 4 (RSK_R_FR_M4) wurde zusätzlich zu der Hangneigung, Exposition und Ingenieurgeologischen Klassifizierung noch der TWI als beeinflussender Faktor berücksichtigt. Dieses Modell hat genau wie Modell 3 eine höhere AUC als Modell 1 mit 0,849. Sowohl der Faktor SPI als auch TWI haben einen positiven Einfluss auf die Modellgenauigkeit. Modell 5 (RSK_R_FR_M5) wird somit aus allen Parametern mit Ausnahme von

TOBIA berechnet. Das Modell hat eine AUC von 0,85 und ist das Modell mit der besten Vorhersagegenauigkeit.

Tabelle 50: Verschiedene Parameterkombinationen zur Erstellung von Anfälligkeitsmodellen mithilfe der *Frequency-Ratio* Methode für Rutschungen im Mainzer Becken.

Modellname	Stat. Methode	Verwendete Faktoren
RSK_R_FR_M1	FR	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung
RSK_R_FR_M2	FR	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TOBIA
RSK_R_FR_M3	FR	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, SPI
RSK_R_FR_M4	FR	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, TWI
RSK_R_FR_M5	FR	Hangneigung, Exposition, Ing. Klassifizierung, SPI, TWI

Im Vergleich zum Saar-Nahe-Becken haben die Modelle, die mit der *Frequency-Ratio* Methode berechnet wurden im Mainzer Becken eine höhere Modellgenauigkeit als die der *Weight-of-Evidence* Methode. Das Modell 5, welches mit der *FR*-Methode berechnet wurde, erreichte eine AUC von 0,85 und war somit um 0,019 präziser als das entsprechende Modell, das mit der *WoE*-Methode erstellt wurde. Beide Methoden lassen einen negativen Einfluss des TOBIA-Modells auf die Modellgenauigkeit erkennen. Alle Modelle für das Mainzer Becken weisen eine hohe Vorhersagegenauigkeit auf und sind für die räumliche Vorhersage der Rutschungsanalyse im Untersuchungsgebiet geeignet. Das Modell RSK_R_FR_M5 hatte jedoch mit einer AUC von 0,85 die beste Genauigkeit für die Anfälligkeit der Rutschungen im Mainzer Becken. Deshalb wurde dieses Modell im letzten Schritt verwendet, um die Rutschungsanfälligkeitskarte für das Mainzer Becken zu erstellen.

6.4 Rutschungssuszeptibilitätskarte Gebiet Mainzer Becken

In diesem Kapitel wird die Rutschungssuszeptibilitätskarte für das Mainzer Becken präsentiert und kurz beschrieben. Die Karte wurde unter Verwendung der in Kapitel 4.9 beschriebenen Klassifizierungsmethoden erstellt. Die Karte dient als wichtige Grundlage für die räumliche Planung in Bezug auf potenzielle rutschungsanfällige Gebiete im Mainzer Becken und zur späteren Erstellung einer möglichen Gefahrenkarte.

Zur Erstellung der finalen Suszeptibilitätskarte für Rutschungen im Mainzer Becken wurde das Modell 5 der *Frequency-Ratio* Methode ausgewählt, da es bei der Validierung die besten Ergebnisse erzielt hatte. Die Karte wurde basierend auf den Parametern Hangneigung, Hangexposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung, TWI und SPI berechnet. Die daraus resultierenden Werte wurden gemäß dem Schema in Kapitel 4.9 manuell in fünf Anfälligkeitsklassen eingeteilt. Eine manuelle Klassifizierung wurde gewählt, da die anderen Klassifizierungsmethoden eine geringere Vorhersagegenauigkeit aufwiesen. Die ROC-Kurven für verschiedene Klassifizierungsmethoden können im Anhang eingesehen werden.

Bei der Rasteranalyse der Rutschungsanfälligkeitskarte für das Mainzer Becken sind 5,53 % der Flächen als nicht bis sehr niedrig anfällig klassifiziert. Flächen die eine niedrige Anfälligkeit für Rutschungen besitzen liegen zu 41,87 % im Untersuchungsgebiet vor. Damit ist fast die Hälfte der Fläche eher wenig anfällig für Rutschungen. Eine Mittlere Anfälligkeit für Rutschungsereignisse liegt bei 25,35 % der Flächen vor. Eine hohe bis sehr hohe Anfälligkeit machen über 27 % des Mainzer Becken aus. Davon werden 20 % als hoch anfällig und 7,25 % als sehr hoch anfällig für Rutschungen klassifiziert.

Eine genaue Betrachtung der Karte zeigt, dass vor allem die Hänge in Rheinhessen und im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets eine hohe bis sehr hohe Anfälligkeit für Rutschungen aufweisen, die in der Regel an die Mittel- und Oberhänge gebunden ist. Die mittlere Anfälligkeit ist meist an die flach auslaufenden Unterhänge gebunden. Niedrige bis keine Anfälligkeit für Rutschungen ist in der Regel den flachen und relativ ebenen Gebieten der Täler (z.B. Rheinebene) und Plateaus zuzuordnen (Abbildung 76). Ausschlaggebender Faktor ist auch hier die Geologie und die Verteilung der als besonders anfällig geltenden Schichten im Untersuchungsgebiet Mainzer Becken.

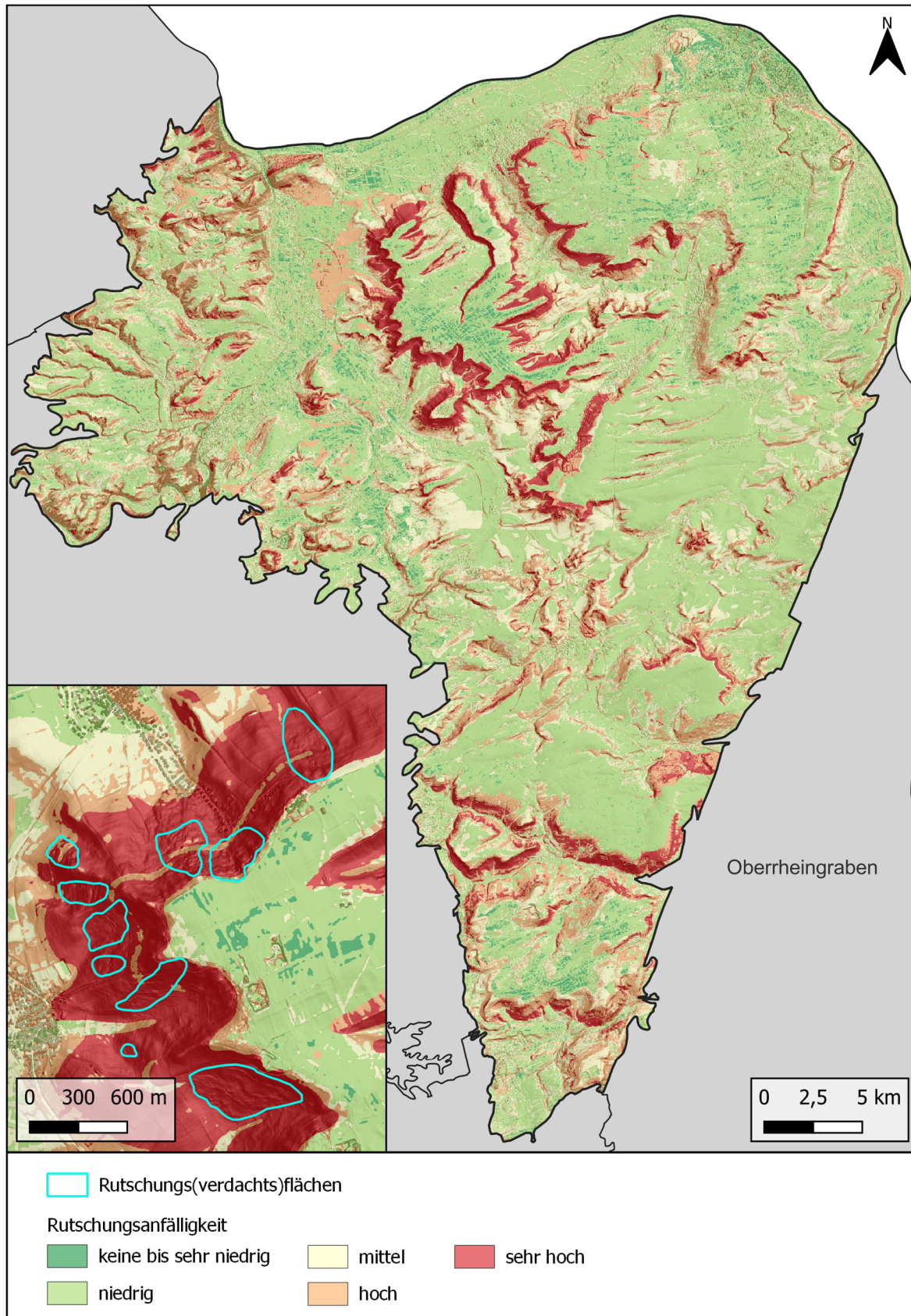


Abbildung 76: Finale Rutschungssuszeptibilitätskarte für das Mainzer Becken. Der Ausschnitt aus der Karte (schwarzes Rechteck) zeigt mehrere Rutschungen an einem Hang der als sehr hoch anfällig eingestuft wurde.

Im Ausschnitt der vorliegenden Anfälligkeitskarte ist zu erkennen, dass die Rutschungen im Mainzer Becken bevorzugt in Gebieten auftraten, die als besonders anfällig für solche Ereignisse gelten. Hierbei handelt es sich um zum Großteil südlich bis südwestlich exponierte Hänge mit einer relativ flachen Hangneigung, an denen Gesteine der Klasse "Mergel/Mergelsteine" vorkommen. Die Rutschungen liegen außerdem in einem TWI-Bereich von 2 bis 4 vor. Gerade in diesem Bereich überschneiden sich somit die besonders als anfällig geltenden Parameterklassen und es kommt zu sehr hoch anfälligen Bereichen in denen vorzugsweise Rutschungen aufgetreten sind (Abbildung 77).

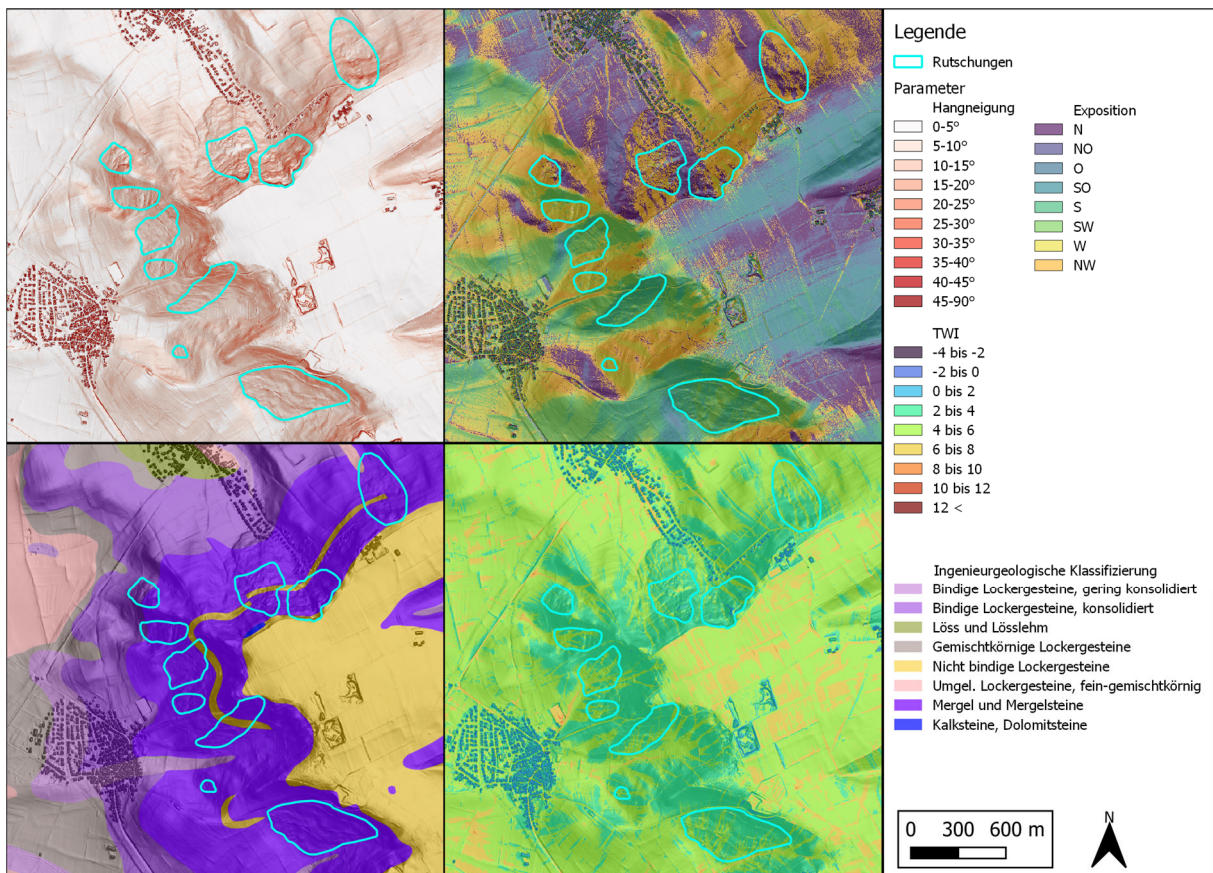


Abbildung 77: Parameterkarten des Ausschnitts der Suszeptibilitätskarte für die Rutschungen im Mainzer Becken. Gezeigt sind die vier Hauptfaktoren des Anfälligkeitsmodells (Hangneigung, Exposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung und TWI).

6.5 Sensitivitätsanalyse

In diesem Kapitel werden wie beim Saar-Nahe-Gebiet die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Mainzer Becken dargestellt.

6.5.1 Änderung der Trainings- und Testdatensätze

Wie beim Saar-Nahe-Becken wurde auch für das Mainzer Becken getestet wie sich unterschiedliche Trainings- und Testdaten auf die Anfälligkeitsberechnungen und die daraus resultierenden Anfälligkeitskarten auswirken. Dabei wurde nach der gleichen Methode vorgegangen wie beim Saar-Nahe-Gebiet. Die Berechnungen wurden für alle Parameter durchgeführt jedoch werden in diesem Kapitel nur die drei Hauptfaktoren genauer betrachtet. Außerdem wird auch hier zur Vereinfachung die Aufteilung 70/30, Aufteilung 1 (A1) und die Aufteilung 50/50, Aufteilung 2 (A2) genannt.

Bei dem Parameter Hangneigung gibt es sowohl für die Aufteilung 1 als auch die Aufteilung 2 nur leichte Unterschiede in den Werten. Der Trend, der sich im Originaldatensatz abzeichnet, bleibt bei den beiden anderen Aufteilungen weiter bestehen. Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen bei nur 0,013 bis 0,211. Bei dem Datensatz mit nur 50% Trainingsflächen ist die größte Differenz 0,291 und kleinste 0,005 (Tabelle 51). In Anbetracht der sehr geringen Unterschiede sowie der weiterhin vorhandenen Korrelationen zu den Faktorklassen scheint es zumindest in Bezug auf die Hangneigung keinen großen Auswirkungen auf die Veränderung der Trainingsdatensätze zu geben.

Tabelle 51: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.

Klasse	70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2	70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2
	FR	FR	FR			C	C	C		
0° bis 5°	0,249	0,197	0,214	0,051	0,034	-2,373	-2,644	-2,545	0,270	0,171
5° bis 10°	2,407	2,486	2,513	0,079	0,106	1,316	1,377	1,396	0,061	0,080
10° bis 15°	4,728	4,939	4,589	0,211	0,140	1,814	1,869	1,764	0,055	0,050
15° bis 20°	3,688	3,865	3,840	0,178	0,152	1,391	1,440	1,430	0,049	0,039
20° bis 25°	2,168	2,372	2,459	0,204	0,291	0,801	0,894	0,931	0,093	0,129
25° bis 30°	1,215	1,333	1,406	0,118	0,191	0,199	0,293	0,348	0,095	0,149
30° bis 35°	0,789	0,910	0,918	0,121	0,129	-0,241	-0,096	-0,087	0,145	0,154
35° bis 40°	0,586	0,680	0,649	0,094	0,063	-0,540	-0,390	-0,437	0,151	0,104
40° bis 45°	0,387	0,439	0,366	0,052	0,021	-0,957	-0,829	-1,012	0,128	0,055
45° bis 90	0,040	0,053	0,045	0,013	0,005	-3,247	-2,964	-3,130	0,283	0,117

Bei der Exposition gibt es größere Änderungen beim Vergleich verschiedener Trainingsdaten. Auch hier zeigt die Aufteilung 1 wieder leichte Unterschiede in den Werten. Der Trend, und die durch die Berechnung anfälligen Ausrichtungen, bleiben jedoch weiter bestehen. Die Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen bei 0,013 bis 0,118 (Tabelle 52). Sind somit also niedriger als bei der Hangneigung. Bei der Aufteilung 2 ist der Trend auch erhalten geblieben. Hier kommt es durch die unterschiedlichen Trainingsdaten zu einer Änderung der als anfällig ausgewiesenen Hangexpositionen. Die Nordwest ausgerichteten Hänge korrelieren nach der neuen Berechnung mit den Rutschungen. Der FR liegt hier anders als beim Original über 1. Allgemein sind die Differenzen von Originaldatensatz zu der Aufteilung 2 größer als die der Aufteilung 1. Im Vergleich zur Hangneigung sind hier die Unterschiede deutlicher und auch die Korrelationen einzelner Faktorklassen bleiben nicht immer gleich. Die Exposition scheint also genau wie im Saar-Nahe-Gebiet anfälliger auf die Veränderung der Rutschungsdaten zu sein.

Tabelle 52: Anfälligkeitswerte der Exposition für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.

Klasse	70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2	70/30	A1	A2	Diff A1	Diff A2
	FR	FR	FR			C	C	C		
A2Nord	0,401	0,321	0,967	0,080	0,566	-1,033	-1,268	-0,041	0,236	0,992
Nordost	0,622	0,467	0,622	0,155	0,001	-0,535	-0,843	-0,532	0,309	0,003
Ost	0,301	0,344	0,206	0,043	0,094	-1,303	-1,161	-1,691	0,142	0,388
Südost	0,869	0,846	0,582	0,023	0,287	-0,164	-0,195	-0,614	0,031	0,451
Süd	2,134	2,198	1,673	0,064	0,461	0,948	0,987	0,621	0,040	0,326
Südwest	2,397	2,464	1,935	0,067	0,462	1,036	1,070	0,764	0,034	0,272
West	1,388	1,401	1,167	0,013	0,220	0,372	0,382	0,173	0,011	0,199
Nordwest	0,634	0,752	1,232	0,118	0,598	-0,515	-0,325	0,247	0,190	0,762

Wie bei der Exposition fällt auch bei der Betrachtung der Ingenieurgeologische Klassifizierung für die veränderten Aufteilungen auf, dass es Unterschiede in den Werten gibt und sich der Trend der originalen Werte leicht verändert. Sowohl bei der Aufteilung 1 als auch bei der Aufteilung zwei gibt es bei Klasse 11 die größten Änderungen. Die Differenzen zwischen den FR-Werten des Originaldatensatzes und der Aufteilung 1 liegen zwischen 0 und 21,436 (siehe Tabelle 53). Bei der Aufteilung 2 liegen die Differenzen zwischen 0 und 6,341. Der Kontrast C zeigt die gleichen Änderungen jedoch mit unterschiedlichen Differenzen. Die Ingenieurgeologische Klassifizierung scheint somit besonders anfälliger auf Änderungen des Trainingsdatensatzes zu reagieren. Dies ist jedoch aufgrund der geologischen Situation im Mainzer Becken nachvollziehbar. Im Mainzer Becken ist die Geologie an den Hängen im südlichen Teil und Richtung Saar-Nahe-Bergland anders als im restlichen Gebiet. Rutschungen in diesen Bereichen, die vorher nicht in den Trainingsdaten enthalten waren, können so die Verteilung der Ergebnisse bei Änderung der Trainingsdaten stark verändern.

Ergebnisse für das Mainzer Becken

Tabelle 53: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassifizierung für unterschiedliche Trainingsdaten im Mainzer Becken.

Klasse	70/30	70/30 (2)	50/50			70/30	70/30 (2)	50/50		
	FR	FR	FR	Diff A1	Diff A2	C	C	C	Diff A1	Diff A2
0	0,311	0,395	0,189	0,084	0,122	-1,190	-0,946	-1,691	0,244	0,501
1	0,254	0,233	0,256	0,021	0,003	-1,391	-1,477	-1,379	0,086	0,012
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
3	0,365	0,232	0,103	0,133	0,263	-1,131	-1,607	-2,444	0,476	1,313
4	2,130	2,494	1,313	0,363	0,818	0,915	1,126	0,313	0,211	0,602
5	0,181	0,108	0,145	0,073	0,036	-2,206	-2,753	-2,444	0,546	0,238
6	0,010	0,011	4,799	0,001	4,789	-4,634	-4,508	1,680	0,126	6,314
7	0,177	0,414	0,249	0,237	0,072	-1,785	-0,920	-1,437	0,865	0,347
8	4,766	3,671	4,181	1,095	0,585	1,771	1,442	1,598	0,329	0,173
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
10	0,037	0,045	0,014	0,007	0,023	-3,312	-3,131	-4,294	0,181	0,982
11	5,170	26,606	11,511	21,436	6,341	1,697	3,608	2,557	1,912	0,860
12	7,053	7,588	8,057	0,536	1,004	2,336	2,439	2,526	0,104	0,190
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf	-Inf
19	0,036	0,075	0,791	0,039	0,755	-3,362	-2,623	-0,242	0,739	3,120
20	2,518	1,903	2,411	0,615	0,108	1,015	0,696	0,961	0,319	0,054
21	0,000	0,018	0,021	0,018	0,021	-Inf	-4,023	-3,903	-Inf	-Inf

Berechnet man mit diesen Werten eine Rutschungsanfälligkeitskarte und vergleicht diese mit der Originalkarte kann man mittels Konfusionsmatrix vergleichen, wo es durch die Änderungen in der Modellberechnung zu Anfälligkeitsklassenänderungen kommt und wie stark diese sind. Dabei werden wie bei der Analyse des Saar-Nahe-Gebiets Klassen die unverändert bleiben grün, Nachbarklassen der größten prozentualen Änderungen orange und die größte Änderung insgesamt rot dargestellt.

Das Ergebnis der Konfusionsmatrix (Tabelle 54) zeigt, dass in 74 % aller Fälle in der Karte aus den 50 % Trainingsdaten die Klassen richtig und 26 % falsch klassifiziert wurden. Davon kommt es bei ungefähr 21 % zur Änderung in die Nachbarklasse wie z.B. bei Klasse 2 und 3. Dabei tritt die größte Falschklassifizierung von Klasse 2 nach Klasse 3 mit 5,4 % auf. Bei ca. 5 % kommt es zu Änderungen über die Nachbarklassen hinaus wie z.B. bei Klasse 4 und 5. Die Rutschungsanfälligkeitskarte auf Basis von 50 % Trainingsflächen hat eine insgesamt Genauigkeit von 70 %.

Tabelle 54: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50).

AK	1	2	3	4	5
1	1,02	3,91	0	0,29	0,32
2	0	34,06	5,43	1,57	0,83
3	0	0,93	20,69	2,60	1,14
4	0	0	3,53	13,89	2,59
5	0	0	0	2,00	5,22

Tabelle 55: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30).

AK	1	2	3	4	5
1	5,45	0,09	0	0	0
2	5,85	34,70	1,41	0	0
3	0	2,90	20,38	2,13	0
4	0	0	2,67	16,38	0,94
5	0	0	0	0,63	6,47

Wird das Modell mit einer gleichen Aufteilungsgröße der Trainingsdaten mit der originalen 70 % Aufteilung verglichen fällt auf, dass hier nur Änderungen in die Nachbarklassen auftreten. Das Modell hat eine insgesamt Genauigkeit von über 83 %. Dabei wurden 82 % der Flächen gleich klassifiziert (keine Klassenänderung) und bei 18 % der Flächen kam es zu einer Klassenänderung in eine der Nachbarklassen. Die größte Änderung tritt von Klasse 1 zu Klasse 2 mit 5,9 % auf, die niedrigste Änderung von Klasse 2 auf 1 mit nur 0,09 % (Tabelle 55). Ähnlich wie bei der Sensitivitätsanalyse im Saar-Nahe-Gebiet ist das Modell auch hier anfällig bei Änderung der Trainingsdaten.

6.5.2 Änderung von Parameterklassifikationen

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde neben den Auswirkungen unterschiedlicher Trainings- und Testdatensätze auf die Rutschungsanfälligkeitskarten, auch die Änderung von Parameterklassifikationen untersucht. Dabei wurde, wie beim Saar-Nahe-Gebiet nur ein Parameter verändert. Es wurde einmal nur die Klassengröße bei gleichbleibender Klassenanzahl und beim anderen Durchlauf sowohl Klassengröße als auch Klassenanzahl variiert. Damit wurden dann die Berechnungen normal wiederholt und jeweils eine neue Rutschungsanfälligkeitskarte modelliert welche mit der Originalkarte mittels Konfusionsmatrizen verglichen wurden.

Berechnet man die Anfälligkeitskarte mit einer der veränderten Hangneigungsklassifikation (Änderung der Klassengröße bei gleicher Klassenanzahl) werden 76,8 % der Flächen richtig klassifiziert, es kommt also nicht zu einer Klassenänderung (Tabelle 56). Bei 23,2 % der Flächen hingegen kommt es zu einer

Klassenänderung innerhalb des Modells. Dabei treten nur Änderungen in die Nachbarklassen auf. Die größte Änderung findet von Klasse 3 zu Klasse 4 statt hier wurden über 5 % der Flächen anders klassifiziert. Die kleinste Änderung findet wieder bei Klasse 1 zu Klasse 2 statt mit nur 0,03 %. Das neue Modell hat dabei eine insgesamt Genauigkeit von 76 %.

Tabelle 56: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl (10), veränderte Klassengröße).

AK	1	2	3	4	5
1	2,21	3,32	0	0	0
2	0,03	36,83	5,01	0	0
3	0	3,53	18,91	2,91	0
4	0	0	5,51	13,60	0,89
5	0	0	0	1,48	5,76

Tabelle 57: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl (6) & Klassengröße).

AK	1	2	3	4	5
1	0,0004	5,16	0,068	0,31	0
2	6,06E-07	32,46	8,54	0,87	0
3	0	3,68	16,92	4,30	0,45
4	0	0,06	7,28	11,86	0,81
5	0	0	0	2,95	4,29

Im Mainzer Becken wirkt sich eine Änderung der Klassenanzahl und -größe stärker auf das Modell aus. Bei dem neuen Modell werden ungefähr 66 % der Flächen richtig klassifiziert und bei 34 % findet eine Änderung, also eine falsche Klassifizierung statt (Tabelle 57). Am schlimmsten davon betroffen ist die Klasse 4 hier tritt in jede andere Klasse eine Änderung auf. Größte Änderung von Klasse 3 zu Klasse 2 mit 8,5 %. Das Modell hat dabei nur eine insgesamt Genauigkeit von 63 %. Wie beim Saar-Nahe-Gebiet reagiert auch hier das Modell auf Änderungen in der Parameterklassifikation. Jedoch ist zu erkennen, dass die Änderung der Klassengröße und -anzahl größere Auswirkungen auf das Modell hat als eine reine Änderung der Klassengröße (bei gleichbleibender Klassenanzahl).

6.5.3 Änderung der Klassifikationsmethode für die Anfälligkeitskarten

Um zu schauen, wie stark der Einfluss der Klassifizierungsmethode auf die Anfälligkeitskarten ist, wurde wie in Kapitel 5.5.3 mittels ROC-Kurve ermittelt, welche Methode die niedrigste AUC hat. Diese wurden dann bei gleicher Klassenanzahl mit der bei der Rutschungsanfälligkeitskarte verwendet Klassifizierung, verglichen. Somit wurde für das Mainzer Becken die manuelle Klassifikation mit der Methode „Gleicher Intervall“ verglichen und eine Konfusionsmatrix berechnet. Anders als bei Untersuchungsgebiet 1 hat hier die Auswahl einer anderen Klassifikationsmethode eine stärkere Auswirkung auf die Genauigkeit des Modells. Insgesamt bleiben im Mainzer Becken nur 6 % den ursprünglichen Klassen zugeordnet und bei ~94 % kommt es zu einer Klassenänderung. Größte

Änderung tritt bei Klasse 1 zu Klasse 2 auf mit über 40 % (Tabelle 58). Das Modell hat dem entsprechend nur eine insgesamt Genauigkeit von ~22 %. Wie im Saar-Nahe-Gebiet zeigt, die Sensitivitätsanalyse auch hier, dass das Modell sehr sensitiv auf die Änderungen der Klassifikationsmethoden der Anfälligkeitsklassen ist. Aufgrund der verwendeten Klassifizierungsmethoden war dieses Ergebnis vorhersehbar, da zwar die Anzahl der Klassen gleich ist, jedoch die Bereiche innerhalb der Klassen sehr unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 58: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierungsmethode).

AK	1	2	3	4	5
1	5,53	0	0	0	0
2	41,87	0	0	0	0
3	14,29	11,06	0	0	0
4	0	13,08	6,92	0	0
5	0	0	3,49	3,19	0,57

7 Diskussion

Die nachfolgende Diskussion erörtert verschiedene Aspekte der durchgeführten Analysen, wobei ein Schwerpunkt auf die Datenqualität und -verfügbarkeit und Parameter- und Modellauswahl und den daraus resultierenden Limitationen der Methodik gelegt wird. Außerdem werden in diesem Kapitel die zwei Untersuchungsgebiete hinsichtlich ihrer Ergebnisse miteinander verglichen und die grundlegenden Unterschiede beider Gebiete aufgezeigt.

7.1 Vergleich der Untersuchungsgebiete

Das Saar-Nahe-Gebiet und das Mainzer Becken unterscheiden sich hinsichtlich ihrer geologischen Strukturen und Landschaftsformen. Das Saar-Nahe-Gebiet zeichnet sich durch eine hügelige bis bergige Landschaft mit Höhenlagen bis ungefähr 690 m, sowie eine Vielzahl von Tälern und Schluchten aus. Das Gebiet ist durchzogen von Flüssen (z.B.: Nahe und Glan) und Bächen. Das Mainzer Becken hingegen zeichnet sich durch eine flache bis hügelige Landschaft mit Höhenlagen bis ungefähr 400 m aus.

Geologisch besteht das Saar-Nahe-Gebiet aus einer Abfolge von devonischen Schichten, die von einer Decke aus permokarbonischen Gesteinen bedeckt werden. Die Schichten im Saar-Nahe-Gebiet sind tektonisch stark beansprucht und gefaltet. Im Gegensatz dazu besteht das Mainzer Becken hauptsächlich aus Tertiärschichten, die relativ ungestört und flach gelagert sind. Diese Schichten sind hauptsächlich aus Ton-, Sand-, Kalk- und Mergelsteinen zusammengesetzt. Im Bereich des Mainzer Beckens gibt es auch einige Störungen und Verwerfungen, jedoch sind diese im Vergleich zu den Strukturen im Saar-Nahe-Gebiet weniger ausgeprägt. Diese Unterschiede in der geologischen Struktur führen auch zu Unterschieden in der Rutschungsanfälligkeit, im Mainzer Becken gelten besonders die tonigen, organischen Halbfestgesteine und Kalksteine auf oligozänen Tonen als anfällig, während im Saar-Nahe-Gebiet vor allem die tonigen, wechselgelagerten Halbfestgesteine anfällig sind, die zum Großteil im Saar-Nahe-Gebiet vorkommen.

Rutschungen kommen im Untersuchungsgebiet 1 je nach Rutschungstyp in unterschiedlichen Hangneigungen vor. Felsrutschungen kommen am häufigsten in Hangneigungen von 30° - 45° vor, bei wobei die Anfälligkeit mit der Hangneigung (bis 45°) steigt. Deckschichtenrutschungen liegen in Bereichen 15° und 25° am häufigsten vor, hier ist die Anfälligkeit am größten. Im Mainzer Becken sind die Hänge schon bei einer geringeren Hangneigung (10° - 20°) anfällig für Rutschungen, was mit der Geologie im Gebiet zusammenhängt. Für die tonigen, organischen Halbfestgesteine und Kalksteine,

die auf den oligozänen Tonen zum Rutschen kommen reicht oftmals eine kleiner Hangneigung aus, da diese eine geringere Scherfestigkeit aufweisen. Auch bilden sich im Mainzer Becken gerade in den Sommermonaten Trockenrisse, durch die bei Starkregenereignissen Wasser schnell zu den tieferen Schichten gelangen kann und so als Schmiermittel auf der Gleitfläche fungiert.

Im Saar-Nahe-Gebiet sind die nördlichen Hanglagen von tiefliegenden Felsrutschungen betroffen, für Deckschichtenrutschungen sind vor allem nordöstlich bis südöstlich exponierte Hänge anfällig. Im Mainzer Becken sind Süd- bis Westhänge besonders anfällig für Rutschungen.

Die Anfälligen Bereiche sind beim TWI in beiden Untersuchungsgebieten ähnlich. Im Saar-Nahe-Gebiet sind Flächen mit einem TWI von 0 bis 4 besonders anfällig für Fels- und Deckschichtenrutschungen, im Mainzer Becken bei TWIs von 2 bis 4. Jedoch hat der TWI im U1 einen negativen Einfluss auf die Vorhersagegenauigkeit der Rutschungsanfälligkeitsmodelle. Je höher der SPI im Saar-Nahe-Gebiet, desto höher die Anfälligkeit, somit gibt es die größten Anfälligkeiten bei Werten über >100. Im Mainzer Becken verhält sich der SPI anders hier nimmt die Anfälligkeit nicht mit steigendem SPI zu. Die größten Anfälligkeiten gibt es hier bei Flächen mit einem SPI von 30 bis 40.

Für die Berechnung im Testgebiet des Saar-Nahe-Gebiets wurde zusätzlich das TOBIA Modell integriert, um die Lagerungsverhältnisse der geologischen Schichten in dem Gebiet abzubilden. So sind vor allem die Schichten anfällig, welche mit dem Hang einfallen. Dies ist zu erwarten, da durch das Einfallen der geologischen Schichten mit dem Hang die Ausbildung von Gleitflächen begünstigt wird. Im Mainzer Becken gibt es hingegen kein aussagekräftiges TOBIA-Modell aufgrund der in Kapitel 4.5.4 ausgeführten Gründe. Dies ist aber für die Rutschungen im Mainzer Becken eher ein nebensächlicher Faktor da hier anders als im Saar-Nahe-Becken die Schichten meist horizontal bis sehr flach einfallen und die Initiierung der Rutschungen hauptsächlich auf die Geologie und Hangneigung zurückzuführen sind.

Werden die Rutschungsanfälligkeitskarten beider Untersuchungsgebiete miteinander verglichen, zeigt sich, dass die AUC des Mainzer Beckens mit 0,85 um 0,05 und 0,07 höher ist als die AUCs für das Saar-Nahe-Gebiet. Dies liegt vor allem an den unterschiedlichen ingenieurgeologischen Klassen der beiden Testgebiete. Im Mainzer Becken gibt es eine viel differenziertere Ingenieurgeologische Klassifizierung, wogegen das Saar-Nahe-Gebiet überwiegend aus einer Klasse besteht. Diese eine Klasse ist besonders anfällig für Rutschungen. Die Rutschungsanfälligkeitskarte des Mainzer Beckens weist der Anfälligkeitsklasse 1 und 2 47,4 % der Flächen zu. Im Saar-Nahe-Gebiet sind es für die Felsrutschungen 25,1 % und für die Deckschichtenrutschungen 39,9 %. Somit werden in der Rutschungsanfälligkeitskarte des Mainzer Beckens mehr Flächen als nicht oder nur sehr niedrig anfällig

klassifiziert. Die Klassen 4 und 5 kommen im Mainzer Becken nur zu 27,3 % vor, im Saar-Nahe-Gebiet liegt der Wert bei den Deckschichtenrutschungen ähnlich, bei den Felsrutschungen ist er mit 36,8 % jedoch deutlich höher. In der Anfälligkeitskarte der Felsrutschungen wurden somit mehr Flächen als hoch bis sehr hoch anfällig klassifiziert. Dem zugrunde liegt die Ingenieurgeologische Klassifizierung im Saar-Nahe-Gebiet, die hier wie schon erwähnt zum Großteil aus einer als anfällig geltenden Klasse besteht. Jedoch ist zu beachten, dass im Saar-Nahe-Gebiet zwei Rutschungstypen berücksichtigt werden, im Mainzer Becken aber nicht. Durch eine zusätzliche Differenzierung im Mainzer Becken könnten sich diese Flächenverteilungen verschieben. Gerade an den Randgebieten, in denen sich die Geologie ändert, könnten andere Rutschungstypen auftreten wie im Rest des Mainzer Beckens.

7.2 Datenqualität und -verfügbarkeit

Voraussetzung für die Erstellung von verwendbaren Rutschungsanfälligkeitskarten sind verschiedenen Kriterien, wie die Art der verwendeten Daten (Verfügbarkeit und Qualität) und den zur Berechnung der Anfälligkeit verwendeten Methoden. Neben den geologischen Daten sind für geomorphologische Berechnungen und Analysen auch die Digitalen Geländemodellen unabdingbar. Die Verarbeitung der Daten erforderte eine häufige Konvertierung der Datenformate, z.B. von Vektor- in Rasterdaten. Außerdem musste darauf geachtet werden, dass das Koordinatensystem, die Kartenprojektion und die Größe der einzelnen Kartenebenen exakt übereinstimmen.

Die in dieser Studie entwickelten Anfälligkeitskarten eignen sich zur Bewertung der regionalen Anfälligkeit von Rutschungen in den Untersuchungsgebieten. Die Zuverlässigkeit der Analyse hängt jedoch stark von den zur Verfügung stehenden räumlichen Daten und ihrer Qualität ab, insbesondere jedoch von der Ingenieurgeologischen Klassifizierung und den Rutschungsinventare, sowie im Saar-Nahe-Becken vom TOBIA-Modell. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten kommen aus verschiedenen Quellen mit unterschiedlicher Qualität. Auf Grundlage der LIDAR-Daten des LVerGeo ließen sich hochauflösende Digitale Geländemodelle mit einer Auflösung von 0,2m und 1m berechnen. Das 1m DGM lieferte dabei eine gute Grundlage zur Berechnung aller in dieser Arbeit verwendeten geomorphologischen Parameter und gewährleisteten so eine gute Qualität. In Bezug auf die geologischen Daten ist zu beachten, dass die Ingenieurgeologischen Flächen auf den GK25 basieren. Die Qualität dieser Daten variiert je nach Bearbeiter und Alter stark. Dies führt insbesondere an den Rändern der Karten häufig zu Inkonsistenzen oder Datenlücken, die sich auch in der Ingenieurgeologischen Klassifizierung wieder finden. Darüber hinaus war die ingenieurgeologische Klassifizierung zum Zeitpunkt der Berechnungen an den Rändern der Untersuchungsgebiete noch nicht vollständig, was zu Bereichen ohne Informationen über die ingenieurgeologischen Klassen führte.

Rutschungsinventare sind wichtig für die statistische Berechnung der Rutschungsanfälligkeit, da sie Informationen über vergangene Rutschungsereignisse und die damit verbundenen morphologischen und geologischen Bedingungen liefern. Deshalb sind diese Inventare von essentieller Bedeutung für die Arbeit gewesen. Während der Arbeit wurde festgestellt, dass insbesondere die genaue Lokalisierung der Rutschungen und die Informationen zu den Rutschungstypen von Bedeutung sind. Im Projekt MBID wurden erhebliche Unterschiede zwischen den Bundesländern bei der Erfassung von Rutschungsinventaren festgestellt, einschließlich Unterschiede in der Lokalisierung, Beschreibung und Anzahl der kartierten Ereignisse (BALZER et al. 2020). Die verschiedenen bestehenden Inventare sind somit oft nicht vergleichbar.

Für eine statistische Auswertung ist bei großen Gebieten eine ausreichende Qualität und Quantität von Inventaren erforderlich. Darüber hinaus erfordern multivariate und maschinelle Lernverfahren im Vergleich zu bivariaten statistischen Methoden grundsätzlich größere Inventare (BALZER et al. 2020). Dies ist auch bei der Auswahl der Berechnungsmethoden in dieser Arbeit aufgefallen. Versuche eine Random Forest Analyse auf unseren Untersuchungsgebieten auszuführen, ergab aufgrund der geringen Rutschungszahlen keine brauchbaren Ergebnisse. Deshalb wurde sich für die zwei statistischen Methoden (FR und WoE) entschieden da diese auch ohne große Trainings- und Testdatensätze plausible (verwendbare) Ergebnisse lieferten. Bei der GIS-gestützten statistischen Analyse der Anfälligkeit für Rutschungen ist die Wahl des Ansatzes zur Darstellung von Rutschungen (Punkte, Rutschungsfläche, Abrisse usw.) außerdem von Bedeutung. Es wurde sich in dieser Arbeit für die Rutschungsflächen entschieden, da Punkte einen zu kleinen Bereich dargestellt hätten. Abrisse konnten aufgrund der nicht guten Erkennbarkeit im DGM oftmals nicht kartiert werden. Diese wären jedoch besser geeignet als die gesamte Fläche, weil sie speziell den Bereich zeigen, in dem die Rutschungen initiiert wurden.

Die Ergebnisse der Studie unter Verwendung der statistischen Methoden zeigen, dass für die Analyse der Rutschungsanfälligkeit die Rutschungen nach Bewegungs- und Materialtypen differenziert, werden sollten. Die Klassifizierung der Rutschungen in unterschiedliche Rutschungstypen im Saar-Nahe-Gebiet beruhte einzig auf der Untersuchung im DGM und den, wenn vorgenommenen Geländebegehungen. Somit kann es zu Falschklassifikationen kommen, welche natürlich einen Einfluss auf die Ergebnisse der Anfälligkeitsberechnungen haben können. Die Klassifikation ist jedoch notwendig, da je nach Prozesstypen unterschiedliche Parameter zur Anfälligkeit beitragen. Das Rutschungsinventar ist nur eine Aufnahme des Geländes bis zum Zeitpunkt der Befliegung. Alte tiefliegende Rutschungen sind meist noch gut im DGM erkennbar, da sie die Morphologie des Hanges stark verändern. Oberflächennahe Deckschichtenrutschungen hingegen sind oftmals nur erkennbar, wenn sie relativ

frisch sind, da sie leicht und schnell überprägt werden können. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung durch die DGM-Befliegung werden aktuelle, nach der Befliegung stattgefundenere Ereignisse nicht berücksichtigt.

Die Sensitivitätsanalyse beider Untersuchungsgebiete zeigt, dass die Modellberechnung gut mit unterschiedlichen Flächen bei gleichbleibender Trainingsdatensatzgröße zurechtkommt. Was auf eine gute Qualität des Rutschungsinventars hinweist. Wird zusätzlich zu unterschiedlichen Flächen auch noch die Aufteilungsgröße verändert z.B. wie hier von 70 % Trainingsflächen auf 50 % Trainingsflächen hat dies eine größere Auswirkung auf die Modellberechnung und die daraus entstehenden Rutschungsanfälligkeitskarten. Durch die Verkleinerung des Trainingsdatensatzes (und der damit automatisch verbundenen Flächenänderungen) fallen bei der Berechnung von *Frequency-Ratio* und *Weight-of-Evidence* "Ausreißerflächen" mehr ins Gewicht. Je mehr Rutschungen, umso größer kann der Trainingsdatensatz gewählt werden. Bei wenig Daten sollte die Mehrheit der Flächen zum Berechnen der Anfälligkeitswerte genutzt werden. Sinnvoll wäre somit die Erstellung eines Rutschungsinventars auf Basis der Inventare dieser Arbeit und dem Ereignisinventar des LGBs (nach Überprüfung der Verortung), da so die Menge an Rutschungsdaten um ein Vielfaches höher wäre.

7.3 Parameter- und Modellauswahl

Wichtig bei der Parameterauswahl ist, dass die Faktoren je nach Rutschungstyp sinnvoll gewählt werden und nur Parameter bei der Modellierung verwendet werden, die auch wirklich Einfluss auf die Hangstabilität haben. Die Auswahl der Parameter für diese Studie wurde anhand der zur Verfügung stehenden Daten getroffen. Weitere Parameter bedeuten je nach Qualität der Daten auch weitere mögliche Unsicherheitsquellen. Zur weiteren Einschätzung der Anfälligkeit können Parameter wie z.B. Störungen für tiefe Rutschungen und Bodenkarten für flache Rutschungen mit einbezogen werden, wenn diese in geeigneter Qualität verfügbar sind. Parameter wie der Niederschlag, der in internationalen Studien häufig in Anfälligkeitsberechnungen verwendet wurde, waren für diese Arbeit wenig geeignet. Hauptgrund dafür ist die Auflösung der Daten (1x1 km), dadurch wäre keine ausreichend differenzierte Darstellung in unseren Untersuchungsgebieten möglich. Außerdem wäre die Benutzung bei unseren Rutschungsinventaren auch nicht sinnvoll da die meisten Rutschungen vor allem im Saar-Nahe-Gebiet schon sehr alt sind (bzw. kein genaues Alter festgestellt werden konnte) und die Bedingungen zur damaligen Rutschungsauslösung andere sein können wie heute. Das gleiche Problem findet sich auch bei der Landnutzung wieder. Diese Faktoren können bei weiteren Modellierungen z.B. der Gefahr oder des Risikos von Bedeutung sein.

Die *Frequency-Ratio*-Methode sowie die *Weight-of-Evidence*-Methode ergeben in der Validierung ähnliche Vorhersagegenauigkeiten für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete an. Für das Saar-Nahe-Gebiet scheint die *Weight-of-Evidence*-Methode besser zu funktionieren. Sowohl bei den Felsrutschungen als auch bei den Deckschichtenrutschungen haben die Modelle höhere Genauigkeiten. Im Mainzer Becken liefert die *Frequency-Ratio*-Methode ein höheres Ergebnis als der WoE. Es wurde sich in dieser Studie für diese zwei statistischen Methoden entschieden da diese gut mit der Größe der Trainings- und Testdatensätze zurechtkamen. Andere Methoden wie Random Forest ergaben, wie in Kapitel 7.2. bereits erwähnt, aufgrund der geringen Trainingsgebiete keine bzw. schlechte nicht aussagekräftige Ergebnisse. Außerdem dauerte die Berechnung der Anfälligkeitswerte für die zwei Methoden nicht lange. Zudem wiesen die beiden Methoden eine vergleichsweise kurze Berechnungsdauer für die Ermittlung der Anfälligkeitswerte auf.

Das Projekt MBID hat in verschiedenen Bundesländern Deutschlands Fallbeispiele mit verschiedenen Zielen bearbeitet, darunter die Fränkische/Schwäbische Alb, den Elbtalgraben, Siegtal und Simbach. In drei der Gebiete wurde unter anderem die *Weight-of-Evidence*-Methode zur Analyse der Hangrutschungsempfindlichkeit verwendet. In der Fränkischen Alb wurde die Rutschungsempfindlichkeit analysiert und das WoE-Modell aus Hangneigung und GÜK250 ergab für Rotationsrutschungen eine AUC von 0,96 und für Translationsrutschungen eine AUC von 0,94. In einem weiteren Beispiel in der Fränkischen Alb wurde anstelle der GÜK250 die GK25 von Bayern verwendet, was zu einer besseren Vorhersagegenauigkeit führte. Die GÜK 250 erzielte dabei eine AUC von 0,86 und die GK25 eine AUC von 0,88. Somit ergab sich für die detailliertere Datenquelle eine bessere Vorhersagegenauigkeit. Im Elbtalgraben wurde auch die WoE-Methode zur Abschätzung der regionalen Rutschungsempfindlichkeit verwendet und das Modell zeigte einen AUC-Wert von 0,98. Im Gebiet Simbach wurden verschiedene Methoden zur Analyse der Rutschungsempfindlichkeit erprobt und die Modellergebnisse verglichen. Dabei wurden die Parameter Hangneigung und die BÜK200 verwendet. Für die WoE-Methode und die logistische Regression ergab sich hier eine AUC von 0,9 und für das künstliche neuronale Netz eine AUC von 0,88 (BALZER et al. 2020). Die in diesen Beispielen berechneten AUC-Werte sind höher als die in dieser Arbeit modellierten AUCs. Jedoch lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeit nicht ohne weiteres mit den Ergebnissen des MBID vergleichen. Die Berechnungen basieren auf unterschiedlichen Datengrundlagen. Sowohl in den Projektgebieten Fränkische/Schwäbische Alb und Elbtal gab es eine größere Anzahl an Ereignissen, die als Trainings- und Testdaten verwendet werden konnten. Zusätzlich wurden die Rutschungen zu diesem Projekt abweichend klassifiziert, in den meisten Fällen findet innerhalb des MDIB-Projektes eine Unterteilung in Translations- und Rotationsrutschungen statt. In dieser Arbeit wurde jedoch eher nach dem verlagerten Material (bzw. tief/flach) unterschieden und es fand keine Unterteilung in Rotations- und

Translationsrutschungen statt. Ein weiterer Punkt sind die Daten, die für die einzelnen Parameter verwendet wurden, hier handelt es sich meist um Übersichtskarten bzw. Karten mit einer geringeren Auflösung. In dieser Arbeit wurde mit Ausnahme der ingenieurgeologischen Klassifizierung nur mit hochauflösenden Daten gerechnet. Die Ergebnisse sollten also nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden, viel mehr können aus dem Projekt mögliche Informationen auf weitere Methodiken gewonnen werden. Außerdem zeigt, dass MBID-Projekt auch das, die *Weight-of-Evidence*-Methode ausgezeichnete Ergebnisse ($AUC > 0,9$) liefern kann und sich somit als Methode zur Berechnung der Anfälligkeit eignet.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des MABEIS-Projektes durchgeführt und stellt eine räumliche Analyse der rutschungsfördernden Faktoren im Saar-Nahe-Gebiet sowie dem Mainzer Becken dar. Die durch statistische Modellierungen ausgewiesenen rutschungsanfälligen Bereiche konnten hierbei anhand von Suszeptibilitätskarten räumlich differenziert ausgewiesen werden. Sämtliche Analysen wurden auf Grundlage eines Rutschungsinventars durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein eigens für das MABEIS-Projekt generiertes Rutschungsinventar, in welchem aus einer hochaufgelösten Schummerungskarte die Rutschungen kartiert und im Gelände geprüft wurden. Die in der Arbeit gestellten Ziele und Forschungsfragen wurden alle bearbeitet und so gut es möglich war beantwortet. Nachfolgend werden die Forschungsziele nochmals aufgelistet und kurz beschrieben, was die Ergebnisse dieser waren:

- **Kartierung von Rutschungsverdachtsflächen auf digitalen Geländemodellen (DGMs) in zwei Schwerpunktgebieten und stichprobenartige Geländebegehung der Verdachtsflächen für die ausgesuchten Untersuchungsgebiete.**

Die Ziel wurde innerhalb der Arbeit erfüllt. Es wurde sich innerhalb dieser Arbeit für das Saar-Nahe-Gebiet und Mainzer Becken als Schwerpunktgebiete entschieden. Hier wurden iterativ die Rutschungen im DGM kartiert und wenn möglich im Gelände aufgesucht. Lediglich die verschiedenen Merkmale konnten selten im DGM kartiert werden. Nur bei eindeutigen Abrisskanten wurden diese aufgenommen ansonsten wurden nur die Rutschungsfläche kartiert.

- **Erstellung eines Rutschungsinventars, als Ergänzung der vorhandenen Rutschungsdatenbank, sowie zur Verwendung als Trainings- und Testgebiete.**

Ein erstes vorläufiges Inventar wurde erarbeitet, jedoch sind der Aufbau und die dort enthaltenen Informationen noch ausbaufähig. Für die Suszeptibilitätsanalyse ist es außerdem von Bedeutung, was die Initialbewegung der Rutschung ist, es sollte also versucht werden von so vielen Rutschungen wie möglich den Typ zu bestimmen. Die Daten wurden dann mittels Zufallsauswahl in 70 % Trainingsdaten und 30 % Testdaten aufgeteilt.

- **Weiterentwicklung einer Methode zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Rutschungsflächen und Lagerungsverhältnissen (erweitertes TOBIA-Modell).**

Das TOBIA-Modell wurde in mehreren Iterationen weiterentwickelt. Es können Geländemessungen und Altdaten eingepflegt werden. Außerdem können jetzt unter anderem Störungen und Flussläufe in der Modellierung berücksichtigt werden. Eine Validierungsanalyse des Modells hat außerdem gezeigt, dass die im DGM kartierten *Morpho-Lines* die realen

Einfallswerte gut darstellen. Das TOBIA-Modell ist jedoch nicht in allen Gebieten gleich gut anwendbar, Voraussetzung ist die Erkennung von MLs oder wenn diese nicht erkennbar sind die Einmessung der geologischen Schichten.

- **Parameterselektion für Rutschungstypen in den Untersuchungsgebieten.**

Die Hauptfaktoren für Rutschungen: Morphologie, Geologie und Lagerungsverhältnisse wurden in dieser Studie abgedeckt. Die Auswahl der Parameter erfolgte nach Verfügbarkeit der Daten und den Untersuchungsgebieten. Sinnvoll wäre es in Zukunft weitere Faktoren mit einfließen zu lassen wie z.B.: Niederschlag und Störungen. Aufgrund der Datenqualität und Verfügbarkeit wurden "nur" die Parameter Hangneigung, Exposition, Ingenieurgeologische Klassifizierung, Lagerungsverhältnisse (TOBIA), TWI und SPI in der Arbeit mit einbezogen.

- **Analyse der Rutschungssuszeptibilität und Erstellung von Rutschungsanfälligkeitskarten in den Untersuchungsgebieten.**

Zu allen Parametern konnte mithilfe der *Frequency-Ratio*- und *Weight-of-Evidence*-Methode die rutschungsanfälligen Faktorklassen ausfindig gemacht werden. Anhand der Anfälligkeitswerte wurden verschiedene Modelle für Anfälligkeitsindexkarten berechnet und für jedes Untersuchungsgebiet das beste Modell verwendet, um eine Rutschungsanfälligkeitskarte zu berechnen.

- **Validierung der Ergebnisse und Bewertung der Genauigkeit der resultierenden Anfälligkeitskarten.**

Die einzelnen Modelle wurden mittels ROC-Kurve auf ihre Vorhersagegenauigkeit geprüft. Dabei wurden gute Ergebnisse (AUC > 0,8) im Mainzer Becken und akzeptable bis gute Ergebnisse (AUCs von 0,7 bis über 0,8) für das Saar-Nahe-Gebiet erzielt. Eine durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte, dass das Modell auf eine Verkleinerung des Trainingsdatensatzes negativ reagiert. Auch eine Änderung der Parameterklassifikation hat Auswirkung auf das Modell, diese sind jedoch nicht so stark und es können dadurch immer noch plausible Anfälligkeitskarten berechnet werden.

In Anbetracht der anhaltenden Siedlungsentwicklung und der potenziellen Klimaauswirkungen ist die Bewertung der Anfälligkeit für Rutschungen in dichtbesiedelten Gebieten von entscheidender Bedeutung für die Verringerung künftiger Katastrophen. Aufgrund ihrer Qualität können die Karte für die Entwicklung erster Potenzial-, Gefahren- und Risikokarten für die zwei Untersuchungsgebiete verwendet werden. Die Methoden zur Anfälligkeitsbewertung, die in dieser Arbeit entwickelt wurden, können außerdem für andere Gebiete übernommen werden, sollten jedoch je nach Morphologie und Geologie angepasst werden. Des Weiteren können die in dieser Arbeit berechneten Karten unter anderem für die allgemeine Flächennutzungsplanung verwendet werden. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten der Modelle kommt der Kommunikation der Ergebnisse jedoch eine entscheidende Rolle zu. Dem Endnutzer sollte stets klar gemacht werden, dass ein Modell nicht zu 100 % die Realität darstellt und die Ergebnisse daher nicht direkt in die Wirklichkeit projiziert werden dürfen. In der Realität weist jede einzelne Rutschung ihre eigene Dynamik auf, ein Modell kann demnach nur korrekt verifiziert werden, indem gewartet wird, ob ein Ereignis nun eintritt oder nicht.

9 Literaturverzeichnis

- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58(1), 21-44.
- Allaire, J. (2012). RStudio: integrated development environment for R. Boston, MA, 770(394), 165-171.
- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering geology*, 32(4), 269-277.
- 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(1-2), 15-31.
- Bai, S. B., Wang, J., Lü, G. N., Zhou, P. G., Hou, S. S., & Xu, S. N. (2010). GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), 23-31.
- 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 Direktoren-kreises der Staatlichen Geologischen Dienste in Deutschland. – Abschlussbericht: 269 Seiten, 90 Abbildungen, 75 Tabellen; Augsburg, Freiberg, Freiburg, Hannover und Krefeld.
- Banerjee, S., & Mitra, S. (2004). Remote surface mapping using orthophotos and geologic maps draped over digital elevation models: Application to the Sheep Mountain anticline, Wyoming. *AAPG bulletin*, 88(9), 1227-1237.
- Bartelme, N. (2005). Semantik und Objektstruktur. *Geoinformatik: Modelle Strukturen Funktionen*, 179-209.
- De Lange, N. (2020). *Geoinformatik: in Theorie und Praxis*. 4. Aufl. Springer-Verlag.
- Barth, S., Henschel, J., Hering, D. & Wieland, C. (2018). Die Teilvermessung zweier Rutschungen im Saar-Nahe-Gebiet. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

- Beck, N. (1994). Reliefentwicklung im nördlichen Rheinhessen unter besonderer Berücksichtigung der periglazialen Glacis- und Pedimentbildung (Vol. 237). Zentralausschuss für Deutsche Landeskunde.
- Becker, A., & Schäfer, A. (2021). Entwicklung des Saar-Nahe-Beckens im späten Paläozoikum. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, 211-233.
- Becker, M. (2005). Entwicklung von computergestützten Hangstabilitätsmodellen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Region Rheinhessen. Dissertation. Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Berhane, G., & Tadesse, K. (2021). Landslide susceptibility zonation mapping using statistical index and landslide susceptibility analysis methods: A case study from Gindeberet district, Oromia Regional State, Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 180, 104240.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24(1), 43-69.
- Bock, B., Wehinger, A., & Krauter, E. (2012). Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz—Ergebnisse der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz. *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen*, 40, 147-178.
- Bonham-Carter, G. F., & Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS* (No. 13). Elsevier.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., & Wright, D. F. (1988). Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1585-1592.
- Boy, J. (2005). *Geologie von Rheinland-Pfalz*. Hrsg.: Landesamt für Geologie & Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Braunshausen P. E. (2017). Geländekartierung von Massenbewegungsverdachtsflächen im Raum Kusel. Unveröffentlichte Masterarbeit. Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

- Carrara, A., Crosta, G., & Frattini, P. (2003). Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 28(10), 1125-1142.
- Chen, W., Zhao, X., Shahabi, H., Shirzadi, A., Khosravi, K., Chai, H., ... & Li, R. (2019). Spatial prediction of landslide susceptibility by combining evidential belief function, logistic regression and logistic model tree. *Geocarto International*, 34(11), 1177-1201.
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental modelling & software*, 25(12), 1582-1591.
- Chen, Z., Liang, S., Ke, Y., Yang, Z., & Zhao, H. (2019). Landslide susceptibility assessment using evidential belief function, certainty factor and frequency ratio model at Baxie River basin, NW China. *Geocarto International*, 34(4), 348-367.
- Conrad, O. (2007). SAGA-Entwurf, Funktionsumfang und Anwendung eines Systems für automatisierte geowissenschaftliche Analysen. Dissertation.
- Corsini, A., Cervi, F., & Ronchetti, F. (2009). Weight of evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology*, 111(1-2), 79-87.
- Cracknell, M. J., Roach, M., Green, D., & Lucieer, A. (2012). Estimating bedding orientation from high-resolution digital elevation models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 2949-2959.
- CRED (2021) Disasters in numbers. Brussels: CRED; 2022. This document is available at: https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf
- Cruden, D. M. (1989). Limits to common toppling. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 737-742.
- Cruden, D. M., & Hu, X. Q. (1996). Hazardous modes of rock slope movement in the Canadian Rockies. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(4), 507-516.
- Cruden, D. M., Thomson, S., & Hoffman, B. A. (1991). Observation of graben geometry in landslides. In *Slope stability engineering developments and applications: Proceedings of the international conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15–18 April 1991* (pp. 33-35). Thomas Telford Publishing.

- Dai, F., & Lee, C. F. (2002). Landslides on natural terrain. *Mountain Research and Development*, 22(1), 40-47.
- Davies, T., & Rosser, N. (2015). *Landslide Hazards, Risks And Disasters, Landslide Hazards, Risks, and Disasters*.
- De Lange, N. (2020). *Geoinformatik in Theorie und Praxis: Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung*. Springer-Verlag.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... & Althuwaynee, O. F. (2013). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, 65(1), 135-165.
- Dikau, R., Schmidt, J., 2004. Modeling historical climate variability and slope stability. *Geomorphology* 60 (3-4), 433-447.
- Dou, J., Tien Bui, D., P. Yunus, A., Jia, K., Song, X., Revhaug, I., ... & Zhu, Z. (2015). Optimization of causative factors for landslide susceptibility evaluation using remote sensing and GIS data in parts of Niigata, Japan. *PloS one*, 10(7), e0133262.
- Falke, H. (1974). Das Rotliegende des Saar-Nahe-Gebietes. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 21-34.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861-874.
- Fayez, L., Pazhman, D., Pham, B. T., Dholakia, M. B., Solanki, H. A., Khalid, M., & Prakash, I. (2018). Application of frequency ratio model for the development of landslide susceptibility mapping at part of Uttarakhand State, India. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 13(9), 6846-6854.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, 102(3-4), 85-98.
- Gadtaula, A., & Dhakal, S. (2019). Landslide susceptibility mapping using weight of evidence method in Haku, Rasuwa district, Nepal. *Journal of Nepal Geological Society*, 58, 163-171.

- Getachew, N., & Meten, M. (2021). Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1-22.
- Glade, T., Anderson, M. G., & Crozier, M. J. (Eds.). (2005). *Landslide hazard and risk* (Vol. 807). Chichester: Wiley.
- Grelle, G., Revellino, P., Donnarumma, A., & Guadagno, F. M. (2011). Bedding control on landslides: a methodological approach for computer-aided mapping analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1395-1409.
- Günther, A. (2003). SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes. *Computers & Geosciences*, 29(7), 865-875.
- Guzzetti, F. (2006). *Landslide hazard and risk assessment* (Doctoral dissertation, Universitäts- und Landesbibliothek Bonn).
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Hagge-Kubat, T., Fischer, P., Süßer, P., Rotter, P., Wehinger, A., Vött, A., & Enzmann, F. (2022). Multi-Methodological Investigation of the Biersdorf Hillslope Debris Flow (Rheinland-Pfalz, Germany) Associated to the Torrential Rainfall Event of 14 July 2021. *Geosciences*, 12(6), 245.
- Hagge-Kubat, T., Süßer, P., Enzmann, F., & Wehinger, A. (2021). Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. *Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen*, 49, 197.
- Hand, D. J., & Till, R. J. (2001). A simple generalisation of the area under the ROC curve for multiple class classification problems. *Machine learning*, 45, 171-186.
- Heinrichs, C. (2017). Verdachtsflächenkartierung von Rutschungen anhand von LIDAR-Daten. Unveröffentlichte Masterarbeit. Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Henk, A. (1993). Subsidenz und Tektonik des Saar-Nahe-Beckens (SW-Deutschland). *Geologische Rundschau*, 82(1), 3-19.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* (p. 129). Reston: US Geological Survey.

- Höfle, B., & Rutzinger, M. (2011). Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie-Supplementband*, 55(2), 1.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Kalia, A. C., Frei, M., & Lege, T. (2021). BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. *ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, (zfv 4/2021).
- Kelley, C. T. (1999). Iterative methods for optimization. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24.
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4-15.
- Kose, D. D., & Turk, T. (2019). GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods. *Physical Geography*, 40(5), 481-501.
- Krauter, E. & Steingötter, K. (1983). Die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens.- *Geol. Jb.*, C34, 3-31, Hannover.
- Krauter, E. (1995): Geologische Ursachen von Hang- und Böschungsrutschungen.
- Krauter, E. (2001). Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. *Grundbautaschenbuch, Teil 1*, 613-665.

- Krauter, E., Kumerics, C., Feuerbach, J., & Lauterbach, M. (2012). Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen.
- Kwis-rlp.de (2023). Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz. <https://www.kwis-rlp.de/de/anpassungsportal/regionale-informationen/rheinhessen/>. (Letzter Zugriff: 31.03.2023)
- LVerGeo.rlp.de (2023). Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen Rheinland-Pfalz. <https://lvermgeo.rlp.de/de/produkte/geotopografie/3d-geodaten/digitale-gelaendemodelle/dgm/#:~:text=Die%20Lagegenauigkeit%20des%20Verfahrens%20liegt,sie%20bei%20etwa%2015%20cm>
https://lvermgeo.rlp.de/fileadmin/lvermgeo/pdf/produktblaetter/ProduktbeschreibungRP_Laserpunkte.pdf (Letzter Zugriff: 31.03.2023)
- Lee, S., & Sambath, T. (2006). Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*, 50(6), 847-855.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Lee, S., Ryu, J. H., Won, J. S., & Park, H. J. (2004). Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71(3-4), 289-302.
- Leroi, E. (1996). Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. In *Landslides*. 35-51.
- Li, L., Lan, H., Guo, C., Zhang, Y., Li, Q., & Wu, Y. (2017). A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment. *Landslides*, 14, 727-741.
- Lin, L., Lin, Q., & Wang, Y. (2017). Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1411-1424.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- Małka, A. (2021). Landslide susceptibility mapping of Gdynia using geographic information system-based statistical models. *Natural Hazards*, 107(1), 639-674.

- Martha, T. R., Kerle, N., Van Westen, C. J., Jetten, V., & Kumar, K. V. (2012). Object-oriented analysis of multi-temporal panchromatic images for creation of historical landslide inventories. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 67, 105-119.
- Meentemeyer, R. K., & Moody, A. (2000). Automated mapping of conformity between topographic and geological surfaces. *Computers & Geosciences*, 26(7), 815-829.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 221-236.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- Neuhäuser, B., Damm, B., & Terhorst, B. (2012). GIS-based assessment of landslide susceptibility on the base of the weights-of-evidence model. *Landslides*, 9(4), 511-528.
- Nhu, V. H., Mohammadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B. B., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., ... & Nguyen, H. (2020). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and remote sensing data in a tropical environment. *International journal of environmental research and public health*, 17(14), 4933.
- Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B. T., ... & M. Melesse, A. (2019). Landslide susceptibility mapping using different GIS-based bivariate models. *Water*, 11(7), 1402.
- Oh, H. J., Lee, S., & Hong, S. M. (2017). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio technique with iterative random sampling. *Journal of Sensors*, 2017.
- Ohliger, J. (2022). Ingenieurgeologische Klassifizierung der Gesteine Rheinland-Pfalz. Unveröffentlichte Masterarbeit. Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197.
- Pal, S. C., & Chowdhuri, I. (2019). GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using frequency ratio model of Lachung River basin, North Sikkim, India. *SN Applied Sciences*, 1(5), 1-25.

- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 1-11.
- Pausar, N. (2023). Evaluierung des erweiterten TOBIA-Modells durch geologische Geländemessungen. Unveröffentlichte Masterarbeit. Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Prinz, H., & Strauß, R. (2011). *Ingenieurgeologie*. 5.Auflage. Springer-Verlag.
- QGIS.org, 2022. QGIS 3.22. Geographic Information System User Guide. QGIS Association. Electronic document: https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user_manual/index.html (Letzter Zugriff: 12.10.2022)
- Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 725-742.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-science reviews*, 180, 60-91.
- Rickli, C., Zimmerli, P., & Boll, A. (2001). Effects of vegetation on shallow landslides: an analysis of the events of August 1997 in Sachseln, Switzerland. In *International Conference on landslides- Causes, impacts and countermeasures*, 575-584.
- Rothausen, K., & Sonne, V. (1988). Das Tertiär des Mainzer Beckens (Südwestdeutschland). *Geologisches Jahrbuch. Reihe A, Allgemeine und regionale Geologie BR Deutschland und Nachbargebiete, Tektonik, Stratigraphie, Paläontologie*, (110), 5-16.
- Sameen, M. I., Pradhan, B., Bui, D. T., & Alamri, A. M. (2020). Systematic sample subdividing strategy for training landslide susceptibility models. *Catena*, 187.
- Santangelo, Á., Cardinali, Á., Rossi, Á., Mondini, A. C., & Guzzetti, F. (2010). Remote landslide mapping using a laser rangefinder binocular and GPS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(12), 2539-2546.

- Santangelo, M., Marchesini, I., Cardinali, M., Fiorucci, F., Rossi, M., Bucci, F., & Guzzetti, F. (2015). A method for the assessment of the influence of bedding on landslide abundance and types. *Landslides*, 12(2), 295-309.
- Schäfer, A. (1989). Variscan molasse in the Saar-Nahe Basin (W-Germany), Upper Carboniferous and Lower Permian. *Geologische Rundschau*, 78, 499-524.
- Schmidt, J., & Dikau, R. (2004). Modeling historical climate variability and slope stability. *Geomorphology*, 60(3-4), 433-447.
- Schäfer, P. (2012). Mainzer Becken–Sammlung geologischer Führer. Band 79. Gebr. Vorntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Stapf, K.R.G. (1987). Die naturräumliche Gliederung von Rheinhessen-Pfalz aus geologischer Sicht. *Mitt. POLLICHIA*, 74, 5-16, Bad Dürkheim/Pfalz.
- Sujatha, E. R., & Sridhar, V. (2021). Landslide susceptibility analysis: a logistic regression model case study in Coonoor, India. *Hydrology*, 8(1), 41.
- Susmaga, R. (2004). Confusion matrix visualization. In *Intelligent Information Processing and Web Mining: Proceedings of the International IIS: IIPWM '04 Conference held in Zakopane, Poland, May 17–20, 2004*, 107-116. Springer Berlin Heidelberg.
- Tape, T. G. (2001). The area under an ROC curve. *Interpreting Diagnostic Tests*.
- The Mathworks, Inc (2021). MATLAB version 9.10.0.1602886 (R2021a). – Natick, Massachusetts.
- Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W., ... & Tian, Y. (2018). Landslide detection and susceptibility mapping by airsar data using support vector machine and index of entropy models in cameron highlands, malaysia. *Remote Sensing*, 10(10), 1527.
- UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (1993): *Multilingual Landslide Glossary*; The Canadian Geotechnical Society; BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Wang, Y., Zhao, B., & Li, J. (2018). Mechanism of the catastrophic June 2017 landslide at Xinmo village, Songping river, Sichuan province, China. *Landslides*, 15(2), 333-345.

- Wehinger A., Rogall M. & Ohliger J. (2022). Ingenieurgeologische Klassifizierung der Locker-, Halbfest- und Festgesteine von Rheinland-Pfalz. Mainzer geowissenschaftliche Mitteilung, 50, 233-266.
- Werner A., Süßer P., Schürmann T., Wehinger A., Enzmann F. (2021). Analyse des Einflusses der Lagerungsverhältnisse auf die Rutschungssuszeptibilität unter Verwendung eines erweiterten TOBIA-Modells. Mainzer geowissenschaftliche Mitteilung, 49, 81–104.
- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (Eds.). (2000). Terrain analysis: principles and applications. John Wiley & Sons.
- Xie, Z., Chen, G., Meng, X., Zhang, Y., Qiao, L., & Tan, L. (2017). A comparative study of landslide susceptibility mapping using weight of evidence, logistic regression and support vector machine and evaluated by SBAS-InSAR monitoring: Zhouqu to Wudu segment in Bailong River Basin, China. Environmental Earth Sciences, 76, 1-19.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. Earth surface processes and landforms, 12(1), 47-56.
- Zhang, Y. X., Lan, H. X., Li, L. P., Wu, Y. M., Chen, J. H., & Tian, N. M. (2020). Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. Journal of Mountain Science, 17(2), 340-357.
- Zhou, C., Yin, K., Cao, Y., Ahmed, B., Li, Y., Catani, F., & Pourghasemi, H. R. (2018). Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China. Computers & Geosciences, 112, 23-37.

Anhang

- Rutschungssuszeptibilitätsindexkarten für das Saar-Nahe-Gebiet
- ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden für das Saar-Nahe-Gebiet
- Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Deckschichtenrutschungen (Tabellen & Konfusionsmatrizen)
- Rutschungssuszeptibilitätsindexkarten für das Mainzer Becken
- ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden für das Mainzer Becken

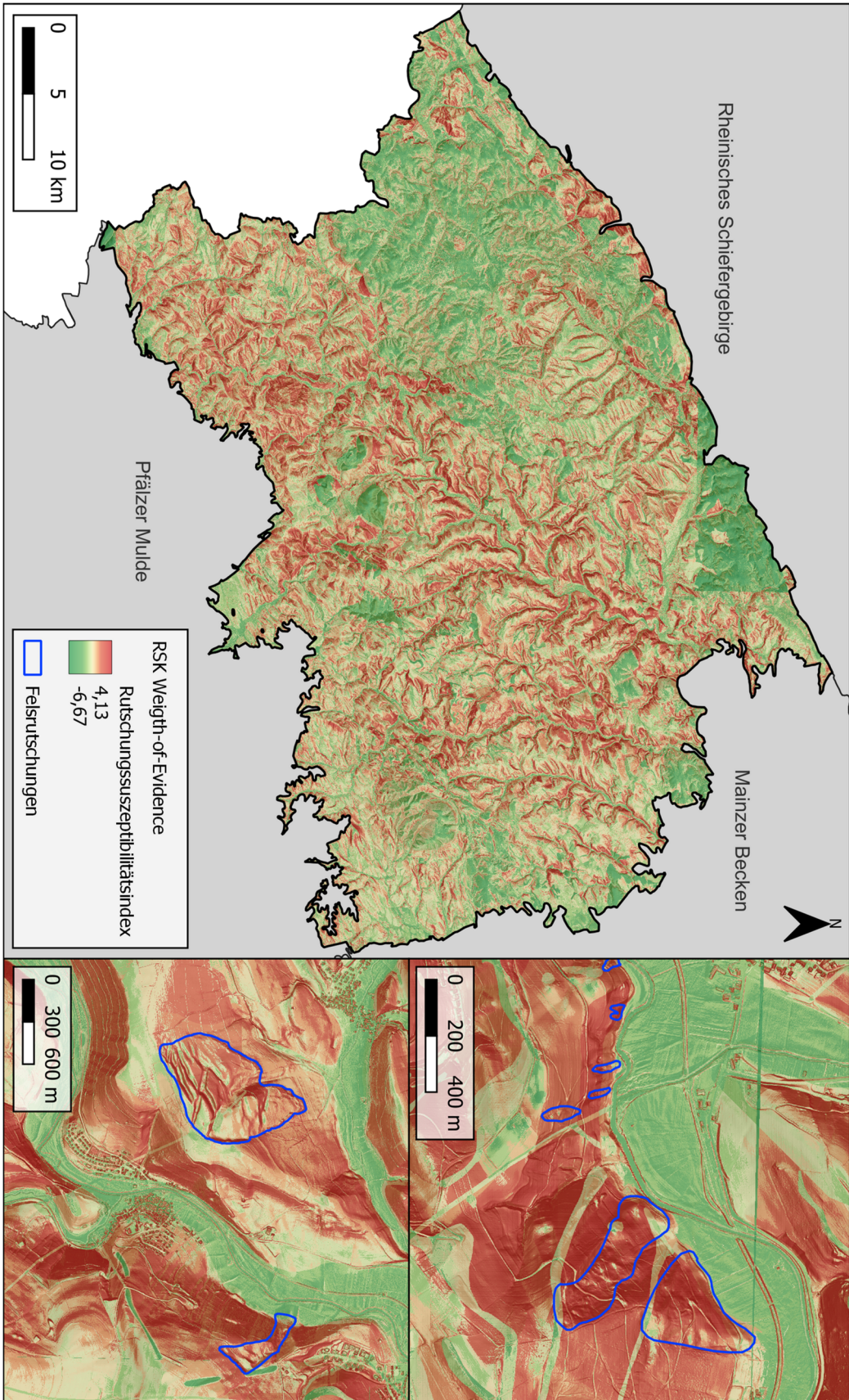


Abbildung 78: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden.

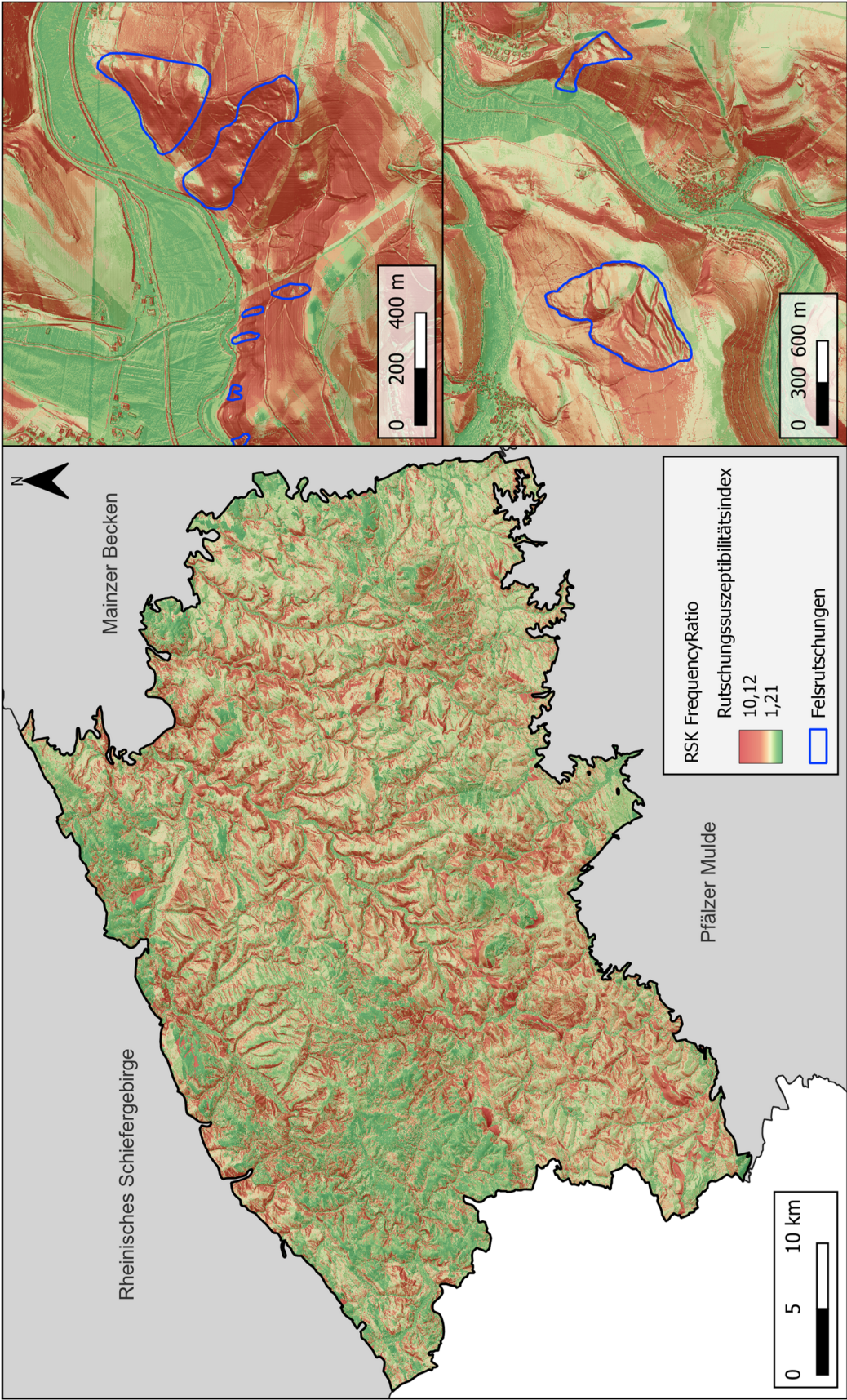


Abbildung 79: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden

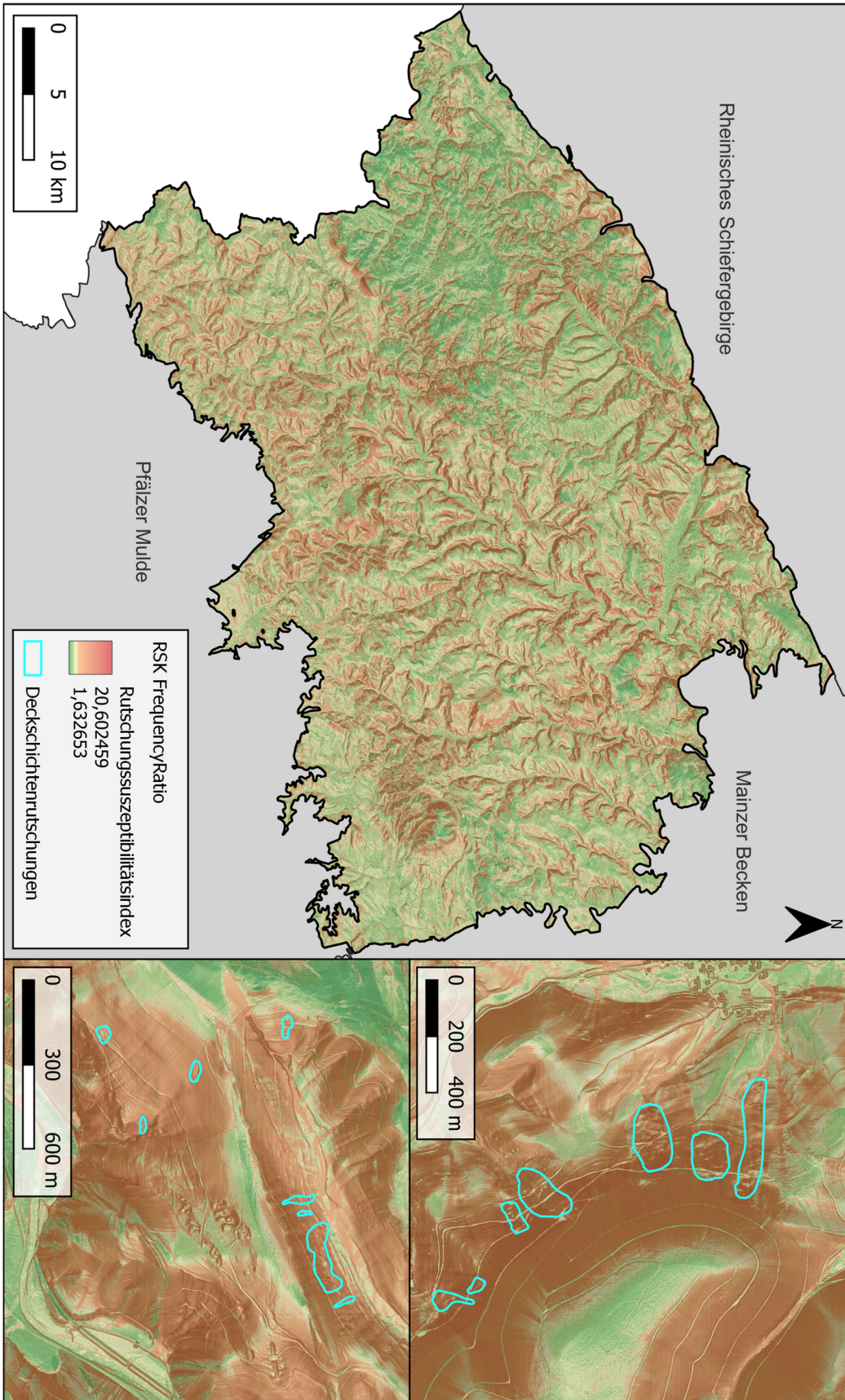


Abbildung 80: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden

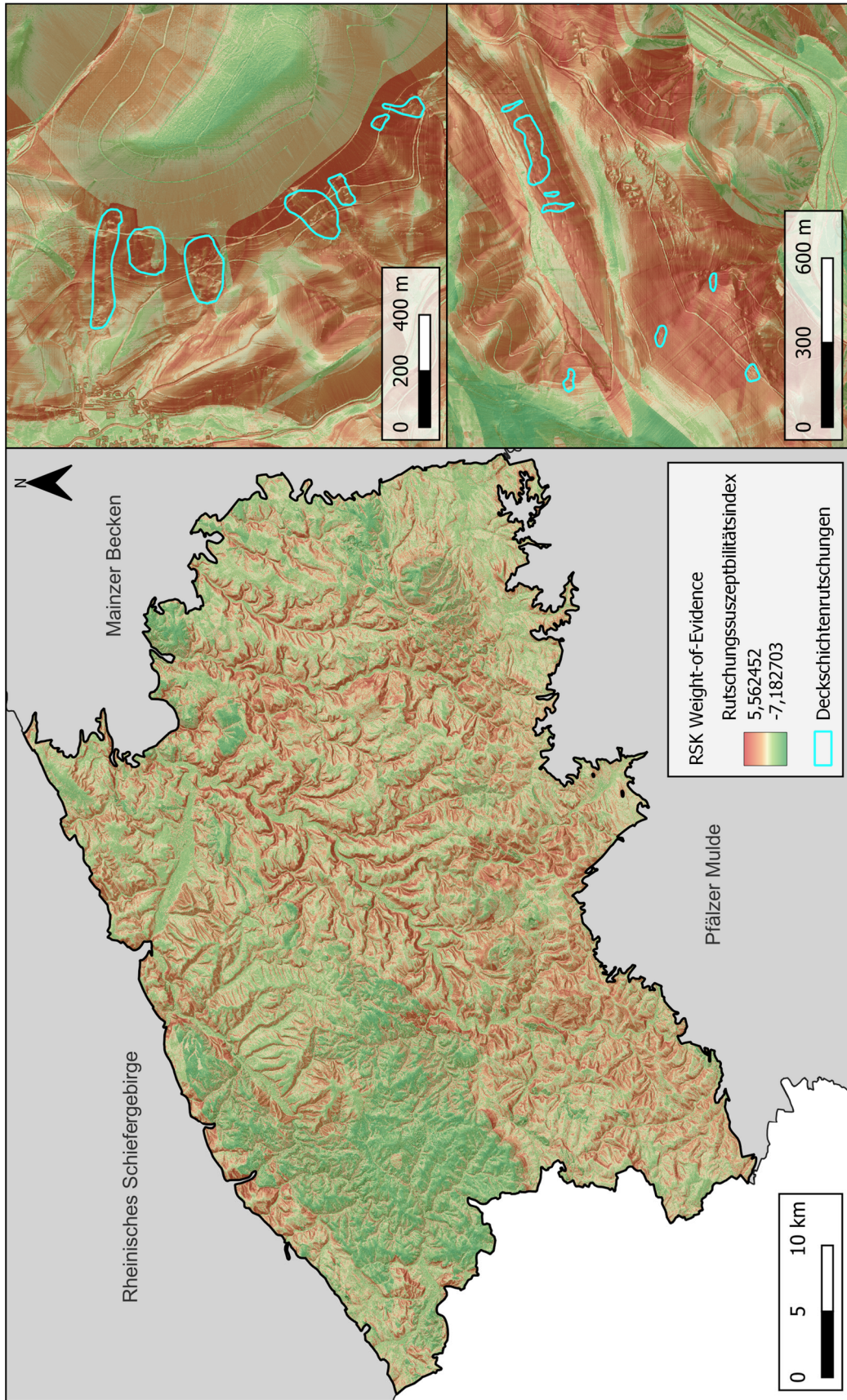


Abbildung 81: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden

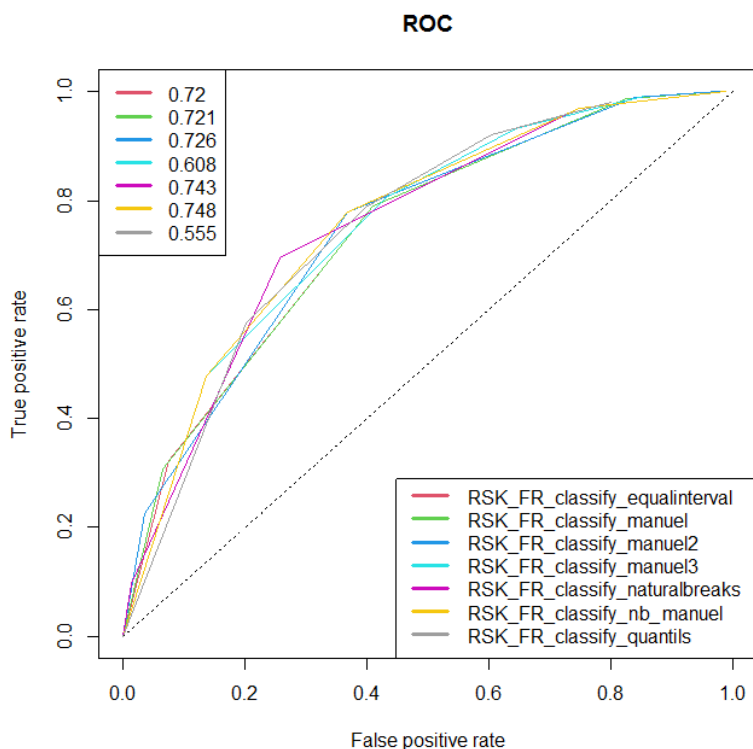


Abbildung 83: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitskarte für die Felsrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet

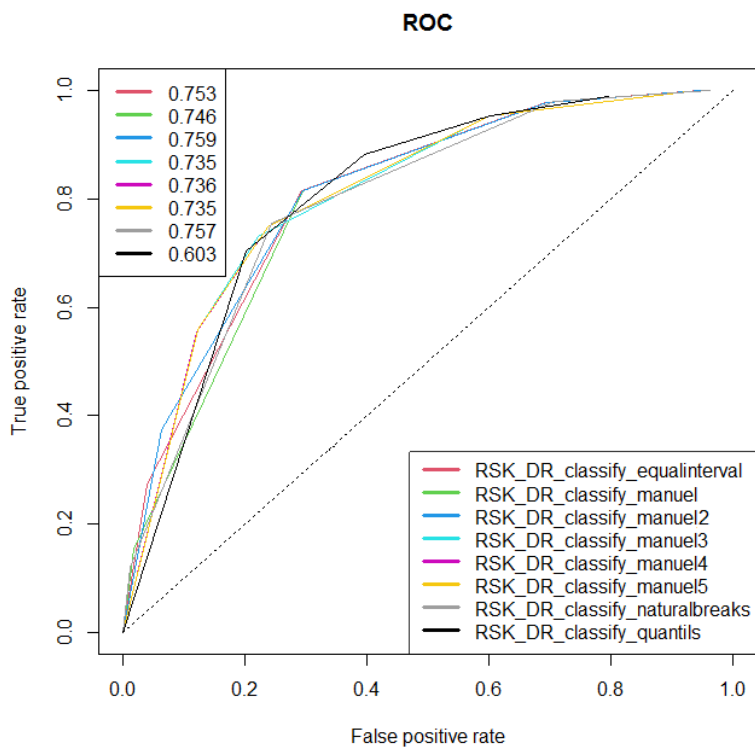


Abbildung 82: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitskarte für die Deckschichtenrutschungen im Saar-Nahe-Gebiet

Anhang

Tabelle 59: Anfälligkeitswerte der Hangneigung für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten

Klasse	70/30	A1	A2		70/30	A1	A2			
	FR	FR	FR	diff	diff	C	C	C	diff	diff
0° bis 5°	0,182	0,189	0,194	0,007	0,012	-1,973	-1,934	-1,904	0,039	0,069
5° bis 10°	0,596	0,608	0,612	0,012	0,016	-0,688	-0,663	-0,656	0,025	0,032
10° bis 15°	1,504	1,530	1,570	0,026	0,066	0,521	0,544	0,579	0,024	0,059
15° bis 20°	2,205	2,151	2,237	0,054	0,032	0,923	0,892	0,941	0,031	0,018
20° bis 25°	2,220	2,154	2,110	0,066	0,109	0,879	0,844	0,821	0,035	0,058
25° bis 30°	2,048	2,048	1,905	0,000	0,144	0,761	0,761	0,682	0,000	0,079
30° bis 35°	2,057	2,032	1,823	0,024	0,233	0,746	0,734	0,620	0,013	0,126
35° bis 40°	2,190	2,127	1,904	0,063	0,286	0,798	0,768	0,655	0,030	0,144
40° bis 45°	1,949	1,918	1,642	0,031	0,307	0,673	0,657	0,500	0,016	0,173
45° bis 90	0,557	0,571	0,480	0,014	0,077	-0,589	-0,564	-0,739	0,025	0,150

Tabelle 60: Anfälligkeitswerte der Exposition für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten

Klasse	70/30	A1	A2		70/30	A1	A2			
	FR	FR	FR	diff	diff	C	C	C	diff	diff
Nord	0,642	0,932	0,677	0,290	0,034	-0,506	-0,082	-0,448	0,424	0,058
Nordost	1,547	1,624	1,667	0,077	0,120	0,513	0,573	0,605	0,060	0,092
Ost	1,764	1,757	1,972	0,007	0,207	0,677	0,672	0,819	0,005	0,142
Südost	1,161	0,902	1,025	0,258	0,136	0,180	-0,121	0,029	0,301	0,151
Süd	0,899	0,857	0,755	0,041	0,143	-0,122	-0,174	-0,315	0,053	0,194
Südwest	0,718	0,732	0,736	0,014	0,019	-0,358	-0,338	-0,331	0,020	0,027
West	0,890	0,736	0,930	0,154	0,040	-0,128	-0,334	-0,079	0,206	0,049
Nordwest	0,459	0,506	0,393	0,047	0,066	-0,867	-0,762	-1,033	0,106	0,166

Anhang

Tabelle 61: Anfälligkeitswerte der Ingenieurgeologischen Klassen für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten

Klasse	70/30	A1	A2			70/30	A1	A2		
	FR	FR	FR	diff	diff	C	C	C	diff	diff
0	1,181	1,236	0,127	0,055	1,054	0,172	0,219	-2,090	0,047	2,262
1	1,164	1,182	1,799	0,019	0,635	0,152	0,168	0,589	0,000	0,000
3	0,899	0,866	1,014	0,033	0,115	-0,119	-0,161	0,016	0,042	0,135
4	12,702	12,906	19,630	0,204	6,928	2,561	2,577	3,002	0,000	0,000
5	0,780	1,018	0,642	0,239	0,138	-0,258	0,019	-0,459	0,277	0,200
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
8	4,206	4,324	5,136	0,117	0,930	1,464	1,493	1,671	0,028	0,207
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
10	1,476	1,456	1,421	0,020	0,056	0,887	0,847	0,776	-0,040	-0,112
11	0,000	0,224	0,341	0,224	0,341	-Inf	-1,504	-1,083	-Inf	-Inf
16	1,384	1,407	0,139	0,022	1,245	0,327	0,344	-1,977	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
18	1,764	1,792	3,688	0,028	1,924	0,573	0,589	1,322	0,016	0,749
19	0,687	0,615	0,706	0,072	0,019	-0,421	-0,542	-0,392	0,121	0,030
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-Inf	-Inf	-Inf	0,000	0,000
21	0,108	0,144	0,221	0,036	0,114	-2,432	-2,137	-1,688	0,295	0,744

Tabelle 62: Anfälligkeitswerte der TOBIA Klassen für Deckschichtenrutschungen berechnet mit unterschiedlichen Trainingsdaten

Klasse	70/30	A1	A2			70/30	A1	A2		
	FR	FR	FR	diff	diff	C	C	C	diff	diff
no data	1,474	1,496	2,165	0,022	0,691	0,432	0,449	0,883	0,017	0,451
CAT overdip	1,652	1,623	1,629	0,029	0,022	0,571	0,550	0,554	0,021	0,016
CAT dip	0,674	0,743	0,474	0,068	0,200	-0,446	-0,339	-0,829	0,107	0,383
CAT underdip	1,121	0,953	0,707	0,168	0,414	0,123	-0,052	-0,367	0,175	0,490
ANA steepend	1,637	1,719	2,064	0,083	0,428	0,549	0,606	0,820	0,057	0,271
ANA normal	0,434	0,406	0,418	0,028	0,016	-0,883	-0,953	-0,922	0,069	0,039
ANA subdued	0,378	0,280	0,517	0,099	0,139	-1,002	-1,309	-0,684	0,307	0,319
CAT OCL overdip	1,452	1,436	1,078	0,016	0,374	0,408	0,396	0,081	0,012	0,327
CAT OCL normal	0,576	0,682	0,455	0,106	0,121	-0,596	-0,416	-0,844	0,180	0,248
CAT OCL underdip	0,892	0,765	0,707	0,127	0,185	-0,120	-0,280	-0,362	0,160	0,242
ANA OCL steepend	1,228	1,344	1,299	0,116	0,071	0,223	0,323	0,285	0,100	0,062
ANA OCL normal	0,726	0,673	0,800	0,053	0,074	-0,344	-0,424	-0,241	0,080	0,104
ANA OCL subdued	0,630	0,547	0,596	0,084	0,034	-0,479	-0,625	-0,536	0,146	0,057

Tabelle 63: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (50/50) für die Deckschichtenrutschungen

AK	1	2	3	4	5
1	3,62	1,70	0,00	0,00	0,00
2	1,24	21,52	2,52	0,00	0,00
3	0,09	5,20	32,49	2,23	0,00
4	0,00	0,08	3,96	18,28	0,76
5	0,00	0,00	0,05	1,00	5,26

Tabelle 64: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung des Trainingsdatensatzes (70/30) für die Deckschichtenrutschungen

AK	1	2	3	4	5
1	4,41	0,90	0,00	0,00	0,00
2	0,35	22,94	1,99	0,00	0,00
3	0,00	2,01	36,59	1,42	0,00
4	0,00	0,00	1,56	20,92	0,59
5	0,00	0,00	0,00	0,86	5,45

Tabelle 65: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Anfälligkeitsklasse bei Änderung eines Parameters (gleiche Klassenanzahl, veränderte Klassengröße) für die Deckschichtenrutschungen

AK	1	2	3	4	5
1	4,41	0,90	0,00	0,00	0,00
2	1,81	19,16	4,30	0,00	0,00
3	0,00	5,97	31,04	3,01	0,00
4	0,00	0,00	2,95	19,21	0,91
5	0,00	0,00	0,00	0,42	5,90

Tabelle 66: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung eines Parameters (veränderte Klassenanzahl & Klassengröße) für die Deckschichtenrutschungen

AK	1	2	3	4	5
1	4,48	0,84	0,00	0,00	0,00
2	2,02	18,89	4,38	0,00	0,00
3	0,00	6,40	31,87	1,75	0,00
4	0,00	0,00	3,28	18,56	1,23
5	0,00	0,00	0,00	0,22	6,09

Anhang

Tabelle 67: Tabelle der Konfusionsmatrix mit den jeweiligen prozentualen Änderungen je Klasse bei Änderung der Anfälligkeitsklassifizierung). Klassen die unverändert bleiben sind grün dargestellt. für die Deckschichtenrutschungen

AK	1	2	3	4	5
1	5,31	0,00	0,00	0,00	0,00
2	15,05	10,23	0,00	0,00	0,00
3	0,00	9,30	20,49	10,23	0,00
4	0,00	0,00	0,00	9,18	13,89
5	0,00	0,00	0,00	0,00	6,32

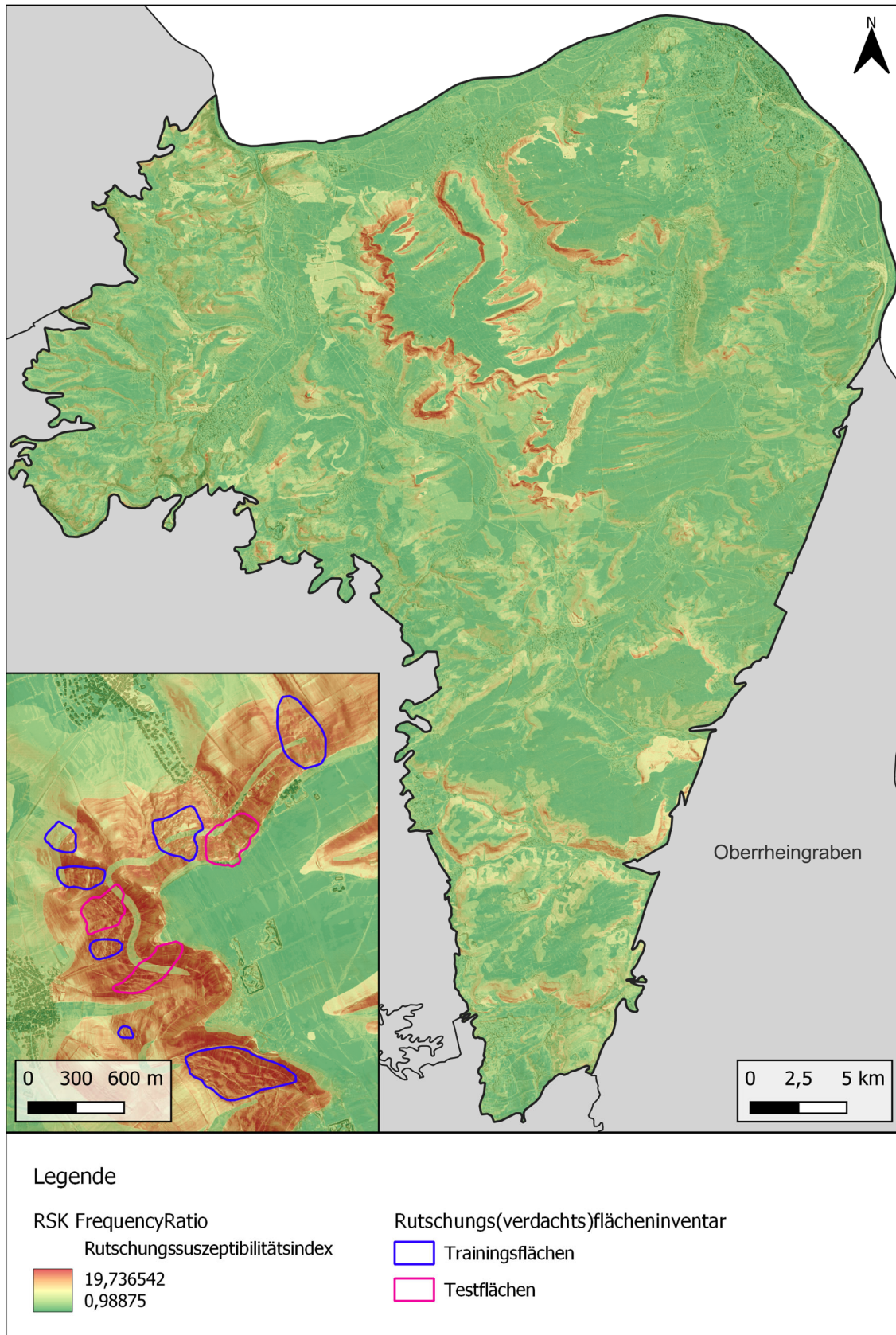


Abbildung 84: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für Rutschungen im Mainzer Becken die mit der Frequency-Ratio-Methode berechnet wurden

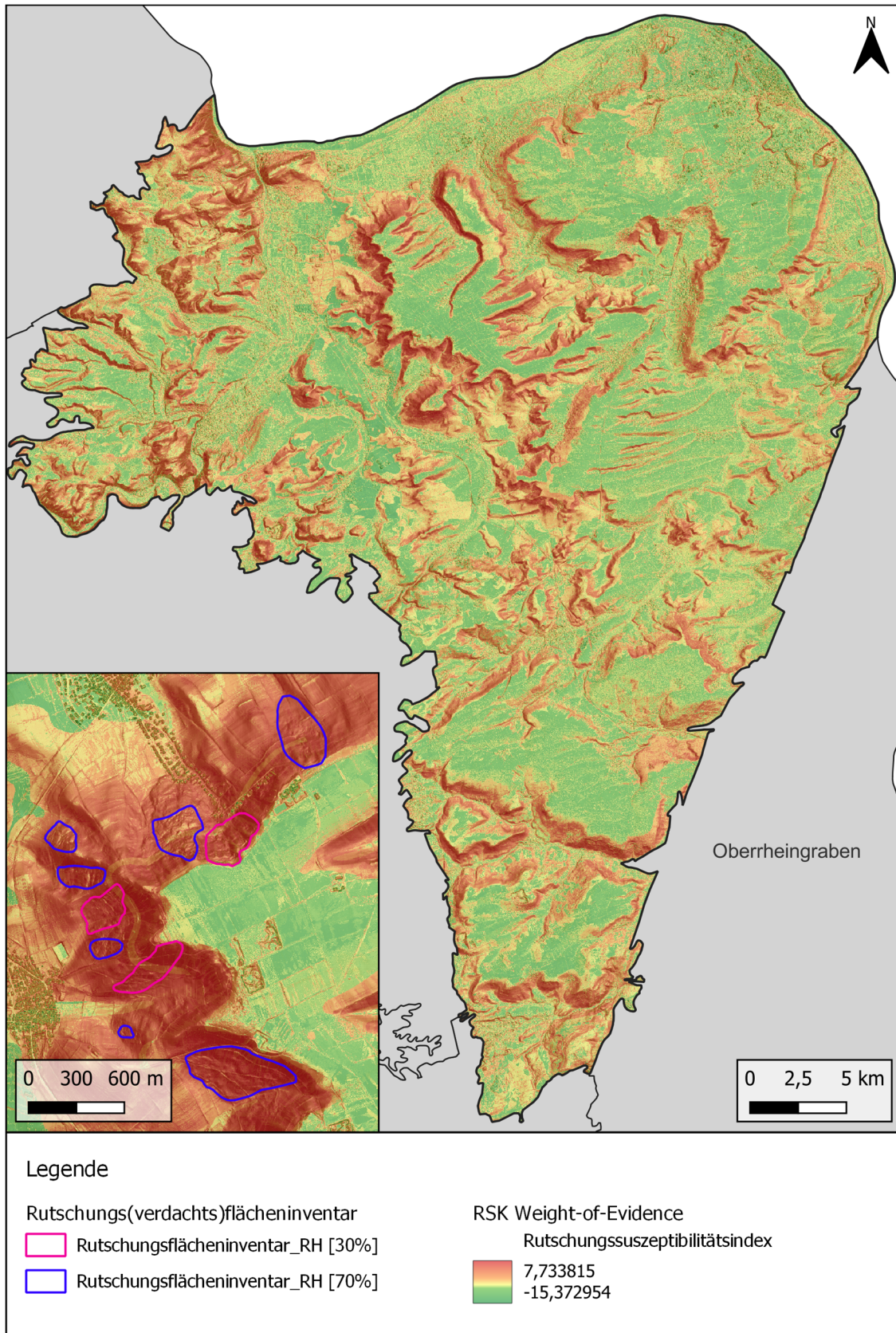


Abbildung 85: Karte des Rutschungssuszeptibilitätsindexes für Rutschungen im Mainzer Becken die mit der Weight-of-Evidence-Methode berechnet wurden

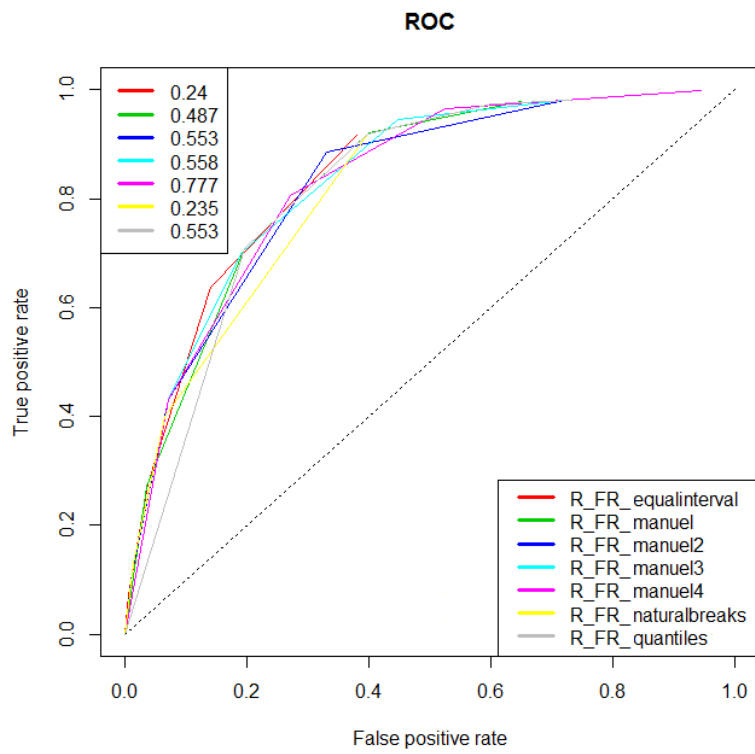


Abbildung 86: ROC-Kurven unterschiedlicher Klassifikationsmethoden zur Erstellung der Rutschungsanfälligkeitskarte für die Rutschungen im Mainzer Becken

Erratum

GIS-gestützte Kartierung von Rutschungen und Modellierung der Rutschungssuszeptibilität im Saar-Nahe-Gebiet und dem Mainzer Becken

Der vorliegende Text kann trotz sorgfältiger Bemühungen Fehler in Rechtschreibung und Formatierung aufweisen.

Seite 54: Im dritten Satz wurde der Anfang vergessen. Der vollständige Satz sollte lauten:

Aber auch an der Größe der Rutschung und der Tatsache, dass die Grenze von Rutschungen oft undeutlich sind (Santangelo et al. 2015).

Seite 73: Formel 3 enthält einen Fehler. Die korrekte Formel lautet:

$$L = \sqrt{(\cos \alpha - \cos A)^2 + (\sin \alpha - \sin A)^2}$$

Seite 73: Für die Abbildung 36 wurde die falsche Quelle angegeben. Der korrekte Ursprung des Bildes ist Ilinca et al. (2022). Die vollständige Quellenangabe lautet:

Ilinca, V., Șandric, I., Jurchescu, M., & Chițu, Z. (2022). Identifying the role of structural and lithological control of landslides using TOBIA and Weight of Evidence: case studies from Romania. *Landslides*, 19(9), 2117-2134.

Seite 112: Der Detailansichtsrahmen auf Abbildung 50 ist auf die Region des Potzbergs zu beziehen.

Seite 113: Am Anfang des letzten Satz wurde vergessen, auf Abbildung 52 zu verweisen. Der korrekte Satz sollte lauten:

Abbildung 52 zeigt, dass sowohl die Felsrutschungen als auch Deckschichtenrutschungen in Hängen auftreten wo der TWI einen Wert von 2 bis 4 hat.

Seite 114 & 116: Die Detailansichtsrahmen auf Abbildung 52 & Abbildung 56 sind auf die Region des Potzbergs zu beziehen.

Seite 137: In Abbildung 57 sind die Detailansichtsbereiche A (oben) und B (unten) nicht beschriftet.

Seite 140: In Abbildung 59 sind die Detailansichtsbereiche A (oben) und B (unten) nicht beschriftet.

Seite 157: Am Anfang des zweiten Satzes nach dem Absatz wurde vergessen, auf Abbildung 68 zu verweisen. Der korrekte Satz sollte lauten:

Abbildung 68 zeigt das, dass TOBIA-Modell für das Mainzer Becken gerade im Norden und Osten größere scharfe Grenzen zwischen kataklinalen und anaklinalen Hängen hat, was wenig plausibel ist.

Seite 173: Im zweiten Satz nach der Abbildung sollte anstelle der Frequency-Ratio Methode die Weight-of-Evidence-Methode genannt werden.