



Prozessorientierte Analyse der Murgangs- und
Steinschlagsgefährdung infolge von natürlichen
Erosionsprozessen sowie konvektiven
Starkregenereignissen am Mittelrhein- und Moseltal

Untertitel:

Entwicklung eines Modellierungssystems zur Erstellung von
regionalen Gefahrenhinweiskarten in Rheinland-Pfalz

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

im Promotionsfach Geologie/ Paläontologie
am Fachbereich Chemie, Pharmazie, Geographie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Teemu Hagge-Kubat
geb. in Duisburg

Mainz, August 2023

Berichterstatter:

1. Gutachter: *[Name gelöscht]*

2. Gutachter: *[Name gelöscht]*

3. Gutachter: *[Name gelöscht]*

Tag der mündlichen Prüfung:

01.12.2023

Zusammenfassung

Das Mittelrhein- und Moseltal sind in den letzten Jahren gehäuft von Steinschlägen und Felsstürzen sowie von Murgängen betroffen gewesen. Durch die hohe geogene Exposition gegenüber diesen Prozessen sowie die dichte Verkehrsinfrastruktur innerhalb der Täler kommt es in diesem Gebiet immer wieder zu erheblichen Schadensfällen mit weitreichenden wirtschaftlichen und infrastrukturellen Folgen, bei denen auch Personenschäden nicht auszuschließen sind. Es besteht daher der konkrete Bedarf einer vorsorgenden Gefahrenanalyse, um weitere Schäden nach Möglichkeit zu minimieren und Präventionsmaßnahmen zu realisieren.

Der hier vorgestellte Forschungsansatz wurde mit dem Ziel entwickelt, in einem ersten Schritt Gefahrenhinweiskarten für diese Massenbewegungsprozesse im Mittelrhein- und Moseltal zu erstellen. Dazu wurde auf der Basis von hochauflösenden LiDAR-Geländemodellen mit Hilfe von Open Source GIS-Systemen ein teilautomatisiertes System entwickelt, das in der Lage ist potenzielle Steinschlag- und Murgangquellgebiete hochaufgelöst zu definieren und sie in ihrer Ausbreitung zu simulieren. Die Qualität dieser Modellierungen zeigte sich in der Tatsache, dass bekannte Ereignisse auf lokaler Ebene plausibel rekonstruiert werden konnten. Auch die Ergebnisse der im nächsten Schritt durchgeführten flächenhaften Modellierungen konnten durch Validierung anhand der Rutschungsdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz sowie durch zahlreiche Geländebegehungen bestätigt werden. Durch die Verschneidung von realen Infrastruktur- und Schutzbauwerksdaten wurden darüber hinaus Vulnerabilitätsberechnungen für die angrenzenden Verkehrswege unter Berücksichtigung der bereits existierenden Schutzverbauung durchgeführt.

Damit konnte erstmals eine flächendeckende Gefahrenhinweiskarte für die Prozesse Steinschlag und Murgang am Mittelrhein- und Moseltal erstellt werden, welche aufgrund ihrer offenen und automatisierten Modellierungsstruktur in der Lage ist zukünftig laufend weiterentwickelt und auch für andere Gebiete angewandt zu werden.

Abstract

In recent years the Middle Rhine- and Moselle-valley has often been affected by rockfall- and debris flow events. Due to the high geogenic exposure as well as the dense traffic infrastructure in the valleys, significant cases of damage with far-reaching economic and infrastructural consequences occurred in this area. Therefore there is a specific need for a precautionary risk analysis in order to prevent further damage and to implement preventive measures.

The research approach presented here aims to identify different danger zones for adjacent infrastructure in the valleys. For this purpose, a semi-automated system was developed based on high-resolution LiDAR terrain models using open source GIS systems. The model is able to define potential rockfall and debris flow source areas and to model their run out area. It was shown that known events plausibly be reconstructed at the local level. In the next step the modelling procedure was carried out for the whole area and also be confirmed by validation via the landslide database of the state geological survey Rhineland-Palatinate as well as numerous ground checks. Through the intersection of real infrastructure and protective structure data, additional vulnerability calculations for the adjacent traffic routes could be carried out, taking the already existing protective barriers into account.

This made it possible for the first time to create a comprehensive hazard warning map for the rockfall and debris flow processes in the Middle Rhine and Moselle valleys, which, thanks to its open and automated modeling structure, is able to be further developed in the future and also adapted for other regions.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich beim Gelingen dieser Arbeit unterstützt haben.

[Namen und fortfolgende Abschnitte gelöscht]

Erklärung der Urheberschaft

Diese Dissertation basiert in Teilen auf drei Vorab-Veröffentlichungen, die im Rahmen der Arbeit und des MABEIS-Projektes in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert wurden. In allen Artikeln wurde vom Verfasser dieser Dissertation die Erstautorenschaft, Konzeption sowie die Text- und Abbildungsausfertigung übernommen. Die Publikationen in den Mainzer Geowissenschaftlichen Mitteilungen sind nicht peer-reviewed. Der Artikel in Geoscience ist peer-reviewed. Diese Artikel lauten in Reihenfolge des Erscheinens:

HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2020): Simulation von Abfluss und Sedimenttransport bei Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 48: 7-32. DOI: <https://doi.org/10.23689/fidgeo-5681>.

HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220. DOI: <https://doi.org/10.23689/fidgeo-5739>.

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. In: Geoscience: 12: 245-263. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences/12060245>.

Diese Artikel liefern jeweils einen wissenschaftlichen Beitrag zu aktuellen und in dieser Arbeit behandelten Fragestellungen. So werden hier am konkreten Beispiel die Abflussbildung und Modellierung nach Starkregenereignissen am Mittelrheintal untersucht, die Erstellung und Validierung eines Modellierungskonzeptes von Steinschlag und Felsstürzen am Mittelrhein- und Moseltal beschrieben sowie ein Beitrag zur Aufarbeitung und genetischen Untersuchung einer Hangmure bei Biersdorf am See geliefert, die während des verheerenden Niederschlagsereignisses vom 14/15.06.2021 ausgelöst wurde. Ausgehend von den in diesen Artikeln beschriebenen Fallbeispielen wird in dieser Dissertation der Weg zu einer flächendeckenden Modellierung und Erstellung von Gefahrenhinweiskarten gegenüber den Prozessen Steinschlag und Murgang am Mittelrhein- und Moseltal beschrieben. Die verwendeten Passagen aus den Artikeln sind im Text dabei jeweils klar gekennzeichnet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Abstract

Danksagung

Erklärung der Urheberschaft

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	Grundlagen	6
2.1	Gravitative Massenbewegungen.....	7
2.2	Steinschlag und Felssturz.....	12
2.2.1	Sturztypen	12
2.2.2	Ablösemechanismen	17
2.2.3	Faktoren für die Entstehung von Steinschlägen und Felsstürzen.....	21
2.2.4	Modellierung von Sturzprozessen.....	23
2.2.5	Bautechnische Maßnahmen gegen Steinschläge und Felsstürze	28
2.3	Starkregen.....	31
2.3.1	Entstehung von Starkregen.....	32
2.3.2	Schadenspotenziale	33
2.3.3	Oberflächenabflussprozesse	36
2.4	Murgang und Hangmure	39
2.4.1	Fließtypen	42
2.4.2	Auslösung von Murgängen	50
2.4.3	Faktoren für die Entstehung von Murgängen und Hangmuren.....	53
2.4.4	Modellierung von Murgängen	59
2.4.5	Bautechnische Maßnahmen gegen Murgänge und Hangmuren	63
2.5	Gefahrenhinweiskarten	66
2.6	Massenbewegungen im Klimawandel	70
3	Untersuchungsgebiet	75
3.1	Auswahl des Untersuchungsgebietes	76

3.2	Geographie	78
3.3	Geologie	88
3.4	Klimatologie	94
3.5	Historische Massenbewegungsereignisse im Mittelrhein- und Moseltal	99
3.5.1	Rutschungen.....	100
3.5.2	Steinschläge und Felsstürze	106
3.5.3	Murgänge	113
4	Methodik	120
4.1	Datengrundlage und Projektion.....	120
4.1.1	Software und Hardware	122
4.1.2	Digitale Geländemodelle.....	123
4.1.3	Spezifischer Oberflächen Index (SIDX).....	125
4.1.4	Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz.....	127
4.2	Niederschlagsgrenzwerte.....	132
4.3	Schutzbauwerke im Untersuchungsgebiet.....	135
4.4	Modellierungen	140
4.4.1	The Gravitational Process Path Model (GPP)	140
4.4.2	Aufbau des GPP	142
4.4.3	Modelleinstellungen und Algorithmus.....	147
4.4.4	Felssturzmodellierung im GPP	153
4.4.5	Murgangsmodellierung im GPP	155
4.5	Verwendung des GPP für regionale Gefahrenkartenhinweiskarten.....	157
4.6	GRASS Modul r.sim.water	159
5	Vorgehensweise	165
5.1	Erstellung von Gefahrenhinweiskarten	165
5.2	Prozessablauf Steinschlag	168
5.2.1	Ableitung der Quellgebiete.....	172
5.2.2	Einfluss der Vegetation.....	175
5.2.3	Modellierungsparameter im GPP	180
5.2.4	Skalierung und Darstellung.....	182
5.3	Prozessablauf Murgang.....	186
5.3.1	Abflussmodellierung	189
5.3.2	Ableitung der Murgangsauslösebereiche	199

5.3.3	Modellierungsparameter im GPP	206
5.3.4	Skalierung und Darstellung	209
6	Modellierungsergebnisse	212
6.1	Steinschlag und Felssturz	212
6.1.1	Fallbeispiele	213
6.1.2	Validierung	222
6.1.3	Ermittlung der infrastrukturellen Vulnerabilität	225
6.1.4	Gefahrenhinweiskarte Prozesstyp Steinschlag und Felssturz	229
6.2	Murgang	233
6.2.1	Fallbeispiele	235
6.2.2	Validierung	267
6.2.3	Gefahrenhinweiskarte Prozesstyp Murgang	274
7	Interpretation der Ergebnisse	280
7.1	Qualitäten und Skalierung	281
7.2	Grenzen der Modelle	285
7.3	Möglichkeiten der Nutzung	292
7.4	Potenzielle Weiterentwicklungen	295
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	300
	Literaturverzeichnis	303
	Anhang	331

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Bewegungsformen von gravitativen Massenbewegungen.....	8
Abb. 2: Schematische Darstellung von Sturzprozessen.....	15
Abb. 3: Felssturz am Trierer Augenscheiener vom 25.01.2023	16
Abb. 4: Darstellung von Translationsgleitungen auf einer Trennfläche	18
Abb. 5: Schematische Darstellung des Dispostionsvorgangs „Kippen“	19
Abb. 6: Translation mehrerer Gleitkörper auf einer polygonalen Gleitfläche	20
Abb. 7: Darstellung des Fallens eines Klufftkörpers aus einem Überhang.....	20
Abb. 8: Schematische Darstellung einer Rotationsgleitung im Fels	21
Abb. 9: 2D-Simulation der Kinematik und Reichweite von Sturzprozessen.....	26
Abb. 10: Steinschlagfangzaun an einem Felshang in der Schweiz.....	30
Abb. 11: Hangbezogene Abflussprozesse bei Niederschlagsereignissen	37
Abb. 12: Fotoaufnahme während eines Murgangs im Spreitgraben (Schweiz).....	40
Abb. 13: Schematische Darstellung eines Murschubs.....	41
Abb. 14: Murgangskanal in den Neuseeländischen Southern Alps	44
Abb. 15: Schematische Darstellung einer Hangmure	45
Abb. 16: Schematische Darstellung eines Murgangsausbreitungsgebiets	47
Abb. 17: Schematischer Murgangspfad mit eingezeichnetem Entrainmentvorgang .	48
Abb. 18: Drohnenaufnahme eines Murkegels im Ahrtal bei Insul	49
Abb. 19: Verbindung von Grunddisposition, variabler Disposition und auslösendem Ereignis von Murgängen.....	54
Abb. 20: Globaler I-D-Grenzwert für Rutschungen und Murgänge.....	57
Abb. 21: Übersicht über die verschiedenen Ansätze der Murgangsmodellierung	62
Abb. 22: Klassische alpine Murgangssperre in Sitebach (Schweiz)	65
Abb. 23: Ausschnitt der Gefahrenkarte des Schweizer Kantons Luzern innerhalb der Webanwendung.....	68
Abb. 24: Begleitwerk der Gefahrenhinweiskarte Garmisch-Partenkirchen.....	70
Abb. 25: Reliefkarte von Rheinland-Pfalz mit den eingezeichneten Projektgebieten am Mittelrhein- und Moseltal	77
Abb. 26: Schematische geologische Karte des Rheinischen Schiefergebirges	79
Abb. 27: Typisches Terrassenschema am unteren Mittelrheintal.....	82

Abb. 28: Zeichnerischer Querschnitt durch die typische Talmorphologie des Oberen Mittelrheintals.....	83
Abb. 29: Schematischer Querschnitt durchs Obere Mittelrheintal bei Kaub.....	84
Abb. 30: Geotektonisch-paläogeographische Situation des Rheinischen Schiefergebirges im Oberdevon	89
Abb. 31: Geologische Übersichtskarte und Profilschnitt durchs Mittelrheintal	92
Abb. 32: Jahresmitteltemperaturen in Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 1971-2000.	95
Abb. 33: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur im Bereich des Mittelrheintals.....	96
Abb. 34: Projizierte Entwicklung des mittleren Niederschlags in den Sommermonaten im Moseltal bis Ende des 21.Jahrhunderts.....	97
Abb. 35: Temperatur- und Niederschlagsverlauf der Jahre 2018-2022 an der Wetterstation Berkastel-Kues.....	98
Abb. 36: Historische Aufnahme der Felsgleitung bei Kaub von 1876.....	101
Abb. 37: Zeichnung der Felsgleitung bei Kaub aus dem Jahr 1876.....	102
Abb. 38: Ausschnitt aus der Hangstabilitätskarte Mittelmosel bei Bernkastel-Kues	106
Abb. 39: Seitliche Ansicht des Felssturzes von Kestert vom 15.03.2021.....	108
Abb. 40: Drohnenaufnahme des Felssturzes am Trierer Augenscheiner.....	110
Abb. 41: Straßensperrung nach einem Steinschlagereignis vom 02.01.2008 nahe der Burg Rheinstein.....	111
Abb. 42: Beschädigung eines parkenden PKW durch ein Steinschlagereignis	112
Abb. 43: Fotos der allgemeinen Zeitung Mainz zum Murgang aus dem Jahr 2011 ..	114
Abb. 44: Blick in den verstopften Bahndurchlass nach dem Murgang am 11.09.2011 bei Werlau.....	115
Abb. 45: Schutzzaun in einem Murgangsserinne bei Sankt Goar-Werlau	116
Abb. 46: Verfüllter Fangzaun bei Dörscheid in Folge eines Murgangs.....	117
Abb. 47: Hang mit staffelartig errichteten Murgangsschutzzäunen bei Dörschied ..	118
Abb. 48: Murgangsablagerung in der Kreuzbachklamm im Mittelrheintal.....	120
Abb. 49: Durch Murgang zerstörte Fußgängerbrücke in der Kreuzbachklamm.....	120
Abb. 50: SIDX-Darstellung eines Felsaufschlusses bei Mehring an der Mosel	127
Abb. 51: Felssturz bei Neef an der Mosel aus dem Jahr 2012	129
Abb. 52: Murgang bei Kordel an der Kyll aus dem Jahr 2021	129

Abb. 53: Verteilung der Schadensfälle durch Steinschläge und Felsstürze in Rheinland-Pfalz mit eingezeichneten Verläufen der Flusstäler von Rhein und Mosel.....	130
Abb. 54: Kostra-Starkniederschlagswerte für die Region St. Goarshausen	134
Abb. 55: Verfüllter Steinschlagfangzaun oberhalb des Rösssteintunnels nach einem Felssturzereignis aus dem Jahr 2005	137
Abb. 56: Digitalisierung von Schutzbauwerken im MABEIS-Projekt	139
Abb. 57: Schematische Darstellung der im GPP wälzbaren Runout-Modelle	143
Abb. 58: Veranschaulichung des Ansatzes zum Füllen von Senken im GPP.....	145
Abb. 59: Flowchart einer typischen GPP Konfiguration	146
Abb. 60: Schematischer Ablauf einer Oberflächenabflusssimulation mit dem Modul r.sim.water unter Grass Gis	163
Abb. 61: Schematischer Aufbau von Gefahrenhinweiskarten im MABEIS-Projekt ..	167
Abb. 62: Flowchart des Modellierungsablaufs für den Prozess Steinschlag	171
Abb. 63: SIDX-Darstellung der anstehenden Felspartien am Rössstein.....	173
Abb. 64: Charakteristische Felspartien am Rössstein.....	174
Abb. 65: Vergleich der Vegetationsverteilung am Rössstein zwischen Luftbild und LiDAR-Vegetationsdaten	176
Abb. 66: Schematische Darstellung von Sturztrajektorien in bewaldeten Gebieten ..	177
Abb. 67: Beispiel der Schutzwirkung von Vegetation an einem bewaldeten Hang bei Bacharach.....	178
Abb. 68: Flowchart des Modellierungsablaufs für den Prozess Murgang	187
Abb. 69: Gis-technische Segmentierung von Einzugsgebieten und Unterteilung in Großgebiete	191
Abb. 70: Graphische Darstellung der Umwandlung der Großgebiete in ein abgeleitetes DGM hin zu einer flächenhaften Abflussmodellierungen.....	192
Abb. 71: Vergleich der Abflussmodellierung ohne und mit Baumstämmen.....	195
Abb. 72: Vergleich der errechneten Abflusswerte zwischen der Modellierungen mit und ohne Baumstämme.....	196
Abb. 73: Ausschnitt aus einer flächendeckenden Abflussmodellierung des Oberen Mittelrheintals bei Bad Salzig.	199
Abb. 74: Darstellung der automatisiert errechneten qDc-Tognacca-Werte für einen Gerinnebeispiel bei Müden (Mosel).....	205

Abb. 75: Darstellung der errechneten Murgangstartzellen bei Müden (Mosel)	206
Abb. 76: Steinschlagmodellierung des Rosssteins mit eingezeichneten Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen	214
Abb. 77: Simulation der maximalen Sturzgeschwindigkeiten am Rossstein	217
Abb. 78: Steinschlagmodellierung des Burgbergs bei Beilstein (Mosel) mit eingezeichneten Schadensfällen	219
Abb. 79: Drohnenaufnahme des Burgbergs (Beilstein) mit hervorgehobenem Steinschlagfangzaun auf halber Hanghöhe	219
Abb. 80: Drohnenaufnahme der offenen Felspartie unterhalb der Burg Metternich (Beilstein) mit hervorgehobenen stummen Zeugen	219
Abb. 81: Steinschlagmodellierung und Geländeaufnahme des Felssturzereignisses bei Wellmich vom 10.04.2018	221
Abb. 82: Statistischer Vergleich der Lage und Qualität der Einträge der Rutschungsdatenbanken mit den Modellierungsergebnissen	224
Abb. 83: Beispiel eines stummen Zeugen bei Valwig an der Mosel	225
Abb. 84: Beispiel einer zerklüfteten Felswand bei Cochem an der Mosel	225
Abb. 85: Schematische Darstellung der Identifikation von steinschlaggefährdeten Streckenabschnitten mittels des VulWay-Prinzips	226
Abb. 86: Vulnerabilitätsberechnung der Infrastruktur auf Basis der Steinschlagmodellierung bei Filsen im Oberen Mittelrheintal	228
Abb. 87: Gefahrenhinweiskarte Steinschlag und Felssturz auf dem TK-Blatt 5809 ..	230
Abb. 88: Modellierung der VulWay-Segmente am Mittelrhein und Moseltal	233
Abb. 89: Übersichtskarte der Gerinne bei Henschhausen im Oberen Mittelrheintal.	237
Abb. 90: Steigung und Höhenverlauf des Gebietes bei Henschhausen	238
Abb. 91: Entgleister Zug durch einen Murgang am 25.06.2016 bei Henschhausen ..	239
Abb. 92: Vergleich der Abflussmodellierungen im Projektgebiet Henschhausen	240
Abb. 93: 3D-Ansicht des Oberflächenabflusses aus nördlicher Perspektive	241
Abb. 94: Vergleich der verschiedenen Abflusssimulationen mit den lokal errechneten Tognacca-Werten zur Entstehung eines Murgangs	243
Abb. 95: Vergleich des modellierten Abflusses zwischen der Ereignissituation vom 25.06.2016 und dem Niederschlagswert des Starkregens von Münster 2014 ..	245
Abb. 96: Simulation des Oberflächenabflusses bei Änderung des Geländemodells.	247

Abb. 97: Automatisierte Murgangsmodellierung der Gerinne bei Henschhausen...	249
Abb. 98: Luftbild der Hangmure in Biersdorf am See vom 14.07.2021	251
Abb. 99: Auswertungen der Niederschlagsverteilung, Bodensättigung, Topographie und Geologie im Bereich des Murgangs bei Biersdorf	253
Abb. 100: Stündliche Niederschlagsverteilung der Wetterstation Wiersdorf vom 14.07.2021	254
Abb. 101: Photogrammetrisch berechnetes Modell des Hangmurgangs.....	257
Abb. 102: ERT-Transekt BIE ERT 1 mit Position von DP-HPT und Sedimentkernen	259
Abb. 103: Foto der Sedimentkerne BIE 1, BIE 2 und BIE 3.....	260
Abb. 104: Sedimentkerne BIE 1 bis 3 im Vergleich mit DP HPT-Daten	261
Abb. 105: Modelliertes Auslauf- und Ablagerungsverhalten der Hangmure bei Biersdorf.....	263
Abb. 106: Oberflächenabflussmodellierung der Hangsituation bei Biersdorf	266
Abb. 107: Automatisierte Murgangsmodellierung des Hanggerinnes bei Werlau ...	269
Abb. 108: Vergleich zwischen der automatisierten Murgangsmodellierung und Fotoaufnahmen des Murgerrines bei Dörschied	271
Abb. 109: Vergleich der automatisierten Murgangsmodellierung mit dem Standort von Murgangsbarrieren bei Bad Salzig.....	273
Abb. 110: Gefahrenhinweiskarte Murgang auf dem nordöstlichen Ausschnitt des TK- Blattes 5711	276
Abb. 111: Schematische Darstellung einer möglichen Suszeptibilitätsanalyse von Hangbereichen in Rheinland-Pfalz	299

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikationen von Sturztypen	13
Tab. 2: Liste der für die Modellierung verwendeten Datengrundlagen	121
Tab. 3: Run-Out-Einstellungsmöglichkeiten im GPP-Modell.....	151
Tab. 4: Verwendete Raugikeitsbeiwerte für die Modellierung von Sturzprozessen	179
Tab. 5: Verwendete Modellierungsparameter für Sturzprozesse im GPP-Modell....	181
Tab. 6: Farbliche Darstellung der Steinschlagtrajektorien.....	185
Tab. 7: Verwendete Raugikeitsbeiwerte für verschiedene Vegetationshöhen	194
Tab. 8: Verwendete Parameter der Abflusssimulation im r.sim.Water-Modul	198
Tab. 9: Tognacca-Werte für beispielhafte Schuttdurchmesser und Sohlneigungen.	204
Tab. 10: Verwendete Modellierungsparameter Fließprozesse im PCM- Modell.....	207
Tab. 11: Farbliche Darstellung der Murgangmodellierungsergebnisse	211
Tab. 12: Geotechnischer Beschreibung der Sedimenteinheiten in den Bohrkernen..	262
Tab. 13: Gesamtübersicht über die Murgangspotenziale der Gerinne am Mittelrhein- und Moseltal.....	278

Abkürzungsverzeichnis

ATKIS - Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
DGM - Digitales Geländemodell
DOM – Digitales Oberflächenmodell
DWD - Deutscher Wetterdienst
FSR – Forschungsstelle Rutschungen
GIS - Geographisches Informationssystem
GPP – Gravitational Process Path Modell
Grass Gis - Geographic Resources Analysis Support System
KOSTRA - Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung
LBM – Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz
LFU – Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
LfU – Landesamt für Umwelt Bayern
LGB - Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
LiDAR - Light Detection And Ranging
LVermGeo – Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz
MABEIS – Massenbewegungsinformationssystem Rheinland-Pfalz
NN - Normalnull
SAGA - System for Automated Geoscientific Analysis
SIDX – Spezifischer Oberflächen Index
SIMWE - Simulated Water Erosion
SGD – Staatlich Geologische Dienste
WMS – Web Map Service

1 Einleitung

In der jüngsten Vergangenheit haben Meldungen über gravitative Massenbewegungen in Form von Muren und Felsstürzen mit zum Teil katastrophalen Auswirkungen diese Prozesse verstärkt in die Öffentlichkeit rücken lassen (HÄUSLER et al. 2022, WILHELM et al. 2019, BOCHTER 2023). Auch in der Fachöffentlichkeit rückte stärker in den Mittelpunkt, dass diese für den alpinen Raum lange bekannten Massenbewegungstypen auch in kleineren Einzugsgebieten und an Felshängen in den deutschen Mittelgebirgen eine reale Bedrohung darstellen können (WEHINGER et al. 2022). Das gilt besonders dort, wo diese in großer Nähe zu Siedlungen, Verkehr und sonstiger Infrastruktur auftreten. Insbesondere die Hangflanken der tief eingeschnittenen rheinland-pfälzischen Flusstäler sind dabei verstärkt von solchen gravitativen Massenbewegungsprozessen betroffen und weisen hier durch die direkt unterliegende Infrastruktur ein großes Schadenspotenzial auf (ALBERTI et al. 2013, WEHINGER & KATLLER 2014).

Aus den letzten Jahren sind aufgrund dieser Prozesse entsprechend etliche Schadensfälle bekannt, die besonders den Verkehr (Bahnstrecke und Bundesstraße) innerhalb des Nadelöhres Mittelrhein- und Moseltal in erheblichem Maße betrafen und zu großen wirtschaftlichen-, infrastrukturellen- und nicht zuletzt auch zu Personenschäden geführt haben. Als jüngere Beispiele dafür sind unter anderem die Zugentgleisungen in den Jahren 2011 und 2016 durch Murgänge infolge von konvektiven Starkregenereignissen, der Felssturz in Kestert aus dem Jahr 2021, der Felssturz am Trierer Augenscheiner an der B53 (vgl. Kap. 3.5) sowie diverse weitere Streckensperrungen sowie Beräumungs- und Sicherungsmaßnahmen in mehrstelliger Millionenhöhe zu nennen.

Vor allem Steinschläge und Felsstürze, bei denen einzelne Festgesteinspartien der Gravitation folgend ins Tal stürzen, sind durch die hohe Reliefenergie der Hänge und die anstehenden, zerklüfteten devonischen Felsausbisse häufige Phänomene in diesen

Flusstälern. Steinschläge sind zumeist an Quellgebiete wie offene Felsvorsprünge oder auch kollabierende alte Weinbergsmauern gekoppelt und werden vornehmlich durch physikalische Verwitterungsprozesse losgelöst (DIKAU 2019). Dabei kommt es entlang des Trennflächengefüges zu Stabilitätsversagen einzelner Gesteinspartien und einer initialen Bewegung. Diese Prozesse entwickeln sich schnell und oft unvorhergesehen mit zum Teil sehr hohen Geschwindigkeiten und kinetischen Energien in der Sturzphase. Daher treten unter Umständen eine hohe Schadenswirkung und ein Risiko für die anliegende Infrastruktur auf.

Neben Steinschlägen und Felsstürzen treten gehäuft auch in Folge von konvektiven Starkregenereignissen oder langanhaltenden Landregen lokal Hangmuren und Gerinnemurgänge auf. Bei Murgängen wird ein Gemisch aus Wasser und Lockergesteinsmaterial verschiedener Korngrößen aus den natürlich vorhandenen Gerinnen im Hang schlagartig ausgeräumt und lagert sich als Murgangskegel am Hangfuß ab. Ort und Ausmaß dieser Muren hängen insbesondere von den lokalen Abflussbedingungen sowie der Hangneigung, der Landnutzung und dem Vorhandensein von Lockergesteinsmassen innerhalb der Gerinne ab.

Zur Minimierung der Auswirkung solcher Naturgefahren gilt es zunächst die Prozesse genau zu verstehen und auf dieser Basis Ansatzpunkte für Schutzmaßnahmen unterschiedlichster Art herauszuarbeiten. Bereits seit Jahrhunderten werden solche Ereignisse und daraus resultierende Schadensfälle in diesen Gebieten dokumentiert und die talseitigen Ortschaften sowie die kritische Infrastruktur stellenweise durch Hangsicherungsmaßnahmen geschützt (GRUNERT & HESS 2010). Heutzutage steht das Erkennen der Gefahr und die Ableitung des Risikos an erster Stelle. Ausgehend von der Einstufung der Gefahr können anschließend weitere messtechnische Beobachtungen sowie konkrete bautechnische Schutzmaßnahmen angewendet werden. Den gängigsten Weg der flächigen Darstellung stellen dabei Gefahrenhinweiskarten dar. In Rheinland-Pfalz ist ein solches Kartenmaterial bisher jedoch für die Prozesse Steinschlag und Murgang nur in

Ansätzen vorhanden, so dass sich Sicherungsmaßnahmen bisher vornehmlich auf Orte mit bereits stattgefundenen Ereignissen beschränken und potenziell gefährdete Gebiete zum Teil nicht bekannt sind.

Daraus ergibt sich der konkrete Bedarf einer Gefahren- und Risikoabschätzung für diese Prozesse im Mittelrhein- und Moseltal, um flächendeckend gefährdete Gebiete zu identifizieren und zukünftig geeignete Sicherungsmaßnahmen zur Vulnerabilitätsminimierung zu entwickeln.

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Diese Dissertation dokumentiert die Entwicklung eines Modellierungssystems zur Erstellung einer solchen hochaufgelöste Gefahrenhinweiskarte für die Prozesse Steinschlag und Murgang für das Mittelrhein- sowie für das Moseltal. Sein besonderer Beitrag besteht in der Entwicklung von Modellierungsabläufen, die auf Basis von digitalen Geländemodellen (DGMs) mithilfe verschiedener geologischer, klimatischer sowie fernerkundlicher Daten mit Einsatz von GIS-Systemen, diese Prozesse auf Open Source Basis berechnet und darstellen können. Mit diesem Ansatz ist es, wie im Verlauf Forschungsprozesses erkennbar war, möglich bei gleichbleibender hoher Auflösung auch in die Fläche zu rechnen und damit flächendeckende Gefahrenhinweiskarten auch für größere Untersuchungsgebiete zu erstellen. Damit stellt es ein Kernstück des MABEIS-Projektes dar, in dessen Rahmen dieses Forschungsvorhaben bearbeitet wurde. Das MABEIS-Projektes (Massenbewegungs Informationssystem Rheinland-Pfalz) ist ein Kooperationsprojekt zwischen der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, dem Landesbetrieb Mobilität (LBM) und dem Landesamt für Geologie und Bergbau (LGB) zur Untersuchung von gravitativen Massenbewegungen in Rheinland-Pfalz. Wesentliches Ziel ist die Entwicklung von hochauflösenden, dynamischen Anfälligkeits- und Gefahrenhinweiskarten für unterschiedliche Arten von Massenbewegungen. Dabei sollen diese

Gefahrenhinweiskarten mittels hochaufgelösten Computermodellierungen erstellt werden und laufend aktualisierbar sein. Als Resultat der Modellierungen und Kartenwerke sollen Gefahrenbereiche frühzeitig erkannt werden um Schutzmaßnahmen angepasst initiieren zu können. Dafür sollen die entwickelten Ansätze rekursiv transparent und nachvollziehbar dokumentiert sein sowie dem aktuellen Stand von Forschung und Technik entsprechen.

Für die in dieser Arbeit maßgeblichen Massenbewegungsarten wurden ausgehend von konkreten Fallstudien zu aufgetretenen Ereignissen Prozessabläufe der Modellierungen scriptbasiert automatisiert, sodass es nach der Bearbeitung des in dieser Dissertation vorgestellten Ansatzes am Mittelrhein und Moseltal zukünftig möglich sein könnte, auch weitere Gebiete in Rheinland-Pfalz zu modellieren und gefahrentechnisch abzubilden.

Für beide Arten der untersuchten Massenbewegung wurde im Verlauf des Forschungsprojekts parallel an der Validierung der Modellierung und damit an der Gefahreneinschätzung gearbeitet. Die entwickelten Ergebnisse wurden an realen Ereignissen und über die Rutschungsdatenbanken und Fachgutachten des Landesamtes für Geologie und Bergbau und Landesbetriebes Mobilität getestet und mit Geländeuntersuchungen verglichen. Ziel ist es dabei eine differenzierte Einschätzung der Plausibilität der Ergebnisse aufzuzeigen.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war es, den Effekt von bestehenden Schutzbauwerken in die Modellierung und die Gefahrenaussage einzubeziehen. Im Zusammenspiel der beiden Ansätze lässt sich so eine angepasste „reale“ Gefahrenhinweiskarte erstellen. Dabei kann ein Teil der vorher als „gefährdet“ eingeschätzte Gebiete durch die Sicherungsmaßnahmen, angepasst an ihre Schutzwirkung als „gesichert“ eingestuft werden können. Auf der anderen Seite lassen sich somit Gebiete erkennen, welche modelltechnisch eine Gefährdung aufweisen, in der Realität jedoch noch nicht, beziehungsweise nicht ausreichend

gesichert sind. Somit lässt sich eine Priorisierung von Gefährdungsbereichen erreichen.

Diese Dissertation lässt sich somit als zweigliedrig einteilen. Zum einen soll der Weg der Entwicklung eines Modellierungssystems sowie dessen einzelne Komponenten beschrieben werden. Darüber hinaus sollen ausgehend aus Fallbeispielen die Plausibilität der Modellierungen aufgezeigt und anhand von großmaßstäblicher Darstellung eine flächenhafte Modellierung im Untersuchungsgebiet visualisiert werden. Insgesamt besteht die Bestrebung dieser Arbeit somit darin ein System zu entwickeln und zu validieren, dass die potenziell gefährdeten Bereiche des Mittelrhein- und Moseltals flächendeckend für die Prozesstypen Steinschlag und Murgang verorten kann und in ihrem Gefahrenpotenzial einstuft.

Nach einem ersten Kapitel Grundlagen (Kap. 2) in dem die wissenschaftlichen Grundzüge sowie der Stand der Forschung zu den untersuchten Prozessen und ihrer einzelnen Teilelemente dargelegt wird, erfolgt dafür eine genauere geographische und geologische Analyse des Projektgebietes am Mittelrhein- und Moseltal (Kap. 3). Im Anschluss wird der methodische Aufbau und die verwendenden Daten und Programme beschrieben (Kap. 4), bevor Kapitel 5 das Vorgehen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten mit dem hier entwickelten Ansatz schematisch aufzeigt. Im sechsten Kapitel werden die Modellierungsergebnisse sowie die Validierung anhand von Fallbeispielen hin zu der angestrebten flächenhaften Kartendarstellung dargelegt. Diese Ergebnisse werden abschließend interpretiert, wobei die Anwendbarkeit, Grenzen und Qualitäten diskutiert werden (Kap. 7).

Es handelt sich bei dieser Dissertation also um einen sehr detaillierten Forschungsbericht, der zunächst die komplexen Zusammenhänge bei der Entstehung und dem Verlauf von Felsstürzen bzw. Murgängen am Mittelrhein- und Moseltal wissenschaftlich analysiert. Er stellt damit einen Betrag für die Weiterentwicklung computergestützter Modellierungsrahmen auf makroskopischer Ebene in Mittelgebirgsregionen dar, der diese Prozesse und Auswirkungen zukünftig variabel

besser berechenbar machen könnte. Wie realitätstauglich dieser Ansatz und seine gefahrentechnischen Aussagen sind, wird in vielfältiger Weise durch Abgleich mit real aufgetretenen Massenbewegungen evaluiert. Dazu sind verschiedene Vorabveröffentlichungen des Autors zu dieser Arbeit integriert. Der hier zugrundeliegende Modellierungsansatz ist bewusst in einer Open Source Umgebung entwickelt und wird daher im Sinne eines offenen Forschungsprojekts auch entsprechend weiterbehandelt. Das heißt alle notwendigen Schritte und Anpassungen werden genau dokumentiert damit diese rekursiv auch in anderen Gebieten nachgestellt werden können. Dieses Vorgehen begründet auch die Aufnahme von vielfältigem Bild und Tabellenmaterial in dieser Dissertation.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die für das Thema und die Fragestellung grundlegenden Phänomene der gravitativen Massenbewegungen im Allgemeinen und der Prozesse Steinschlag und Murgang im Speziellen erläutert. Anschließend werden der aktuelle Stand der Forschung zu diesen Massenbewegungsprozessen sowie die Probleme und Möglichkeiten einer Erfassung dieser in einem modellhaften Simulationskonzept und bei der Erstellung von Gefahrenhinweiskarten skizziert. Abschließend werden die verschiedenen prognostizierten Auswirkungen einer Klimaveränderung in Bezug auf die Frequenz und Auswirkungen dieser Prozesse im Untersuchungsgebiet am Mittelrhein- und Moseltal beleuchtet. Dabei ist zu beachten, dass die Darstellung dieser Prozesse im Rahmen dieser Arbeit nur ein Ausschnitt der dahinterstehenden deutlich größeren Forschungskomplexe geben kann. Entsprechend werden zumeist am Ende der Kapitel weiterführende Literaturangaben angefügt, die einen tiefergehenden Einblick in die beschriebenen Themenfelder ermöglichen.

2.1 Gravitative Massenbewegungen

Im Allgemeinen versteht man unter dem Begriff der gravitativen Massenbewegungen per Definition natürliche hangabwärts gerichtete erosive Abtragungs-, Transport- und Ablagerungsvorgänge, die auf schwach geneigten bis steilen Hängen überwiegend unter dem Einfluss der Schwerkraft erfolgen (ZEPP 2017). Dabei können gravitative Massenbewegungen sowohl Fels- als auch Lockergesteine betreffen (CRUDEN & VARNES 1996). Sie bilden eine Naturgefahren-Prozessgruppe, die primär an den obersten, der Verwitterung ausgesetzten Teil der Gesteinsschicht gebunden ist. Die Beschreibung und Klassifizierung von gravitativen Massenbewegungen ist aufgrund der vielfältigen und zum Teil ineinander übergehenden Erscheinungsformen herausfordernd. So werden allgemein große Bergstürze und Bergzerreibungen, bei denen ganze Bergflanken kollabieren und abrutschen ebenso wie flachgründige, hangparallele Translationsgleitungen bis hin zu kleineren Uferabbrüchen an Gerinnen zu den gravitativen Massenbewegungen gezählt (GLADE & DIKAU 2001). Erschwerend kommt hinzu, dass sich Massenbewegungen meist aus mehreren unterschiedlichen Bewegungstypen mit z.T. unterschiedlichem Alter zusammensetzen können (DIKAU et al. 2019). Die Art der Hangbewegung bestimmt die potenzielle Geschwindigkeit der Bewegung, deren Ausbreitungsstrecke sowie die möglichen Auswirkungen der Massenverlagerung. Die am weitesten verbreitete Methode der Klassifizierung von Massenbewegungen ist die Einteilung entsprechend der Bewegungsart. Nach VARNES (1978) können dabei die Prozesse der Bewegungen in fünf Hauptgruppen unterteilt werden: Gleiten/Rutschen (*slides*), Kippen (*topples*), Driften (*spreads*), Fallen (*falls*) und Fließen (*flows*) (vgl. Abb. 1). Eine sechste Gruppe umfasst komplexe Hangbewegungen, die sich aus einer Kombination von zwei oder mehr Bewegungsarten zusammensetzen, da in Praxis Erscheinungsformen mitunter nicht eindeutig einem der genannten Typen zugeordnet werden können.

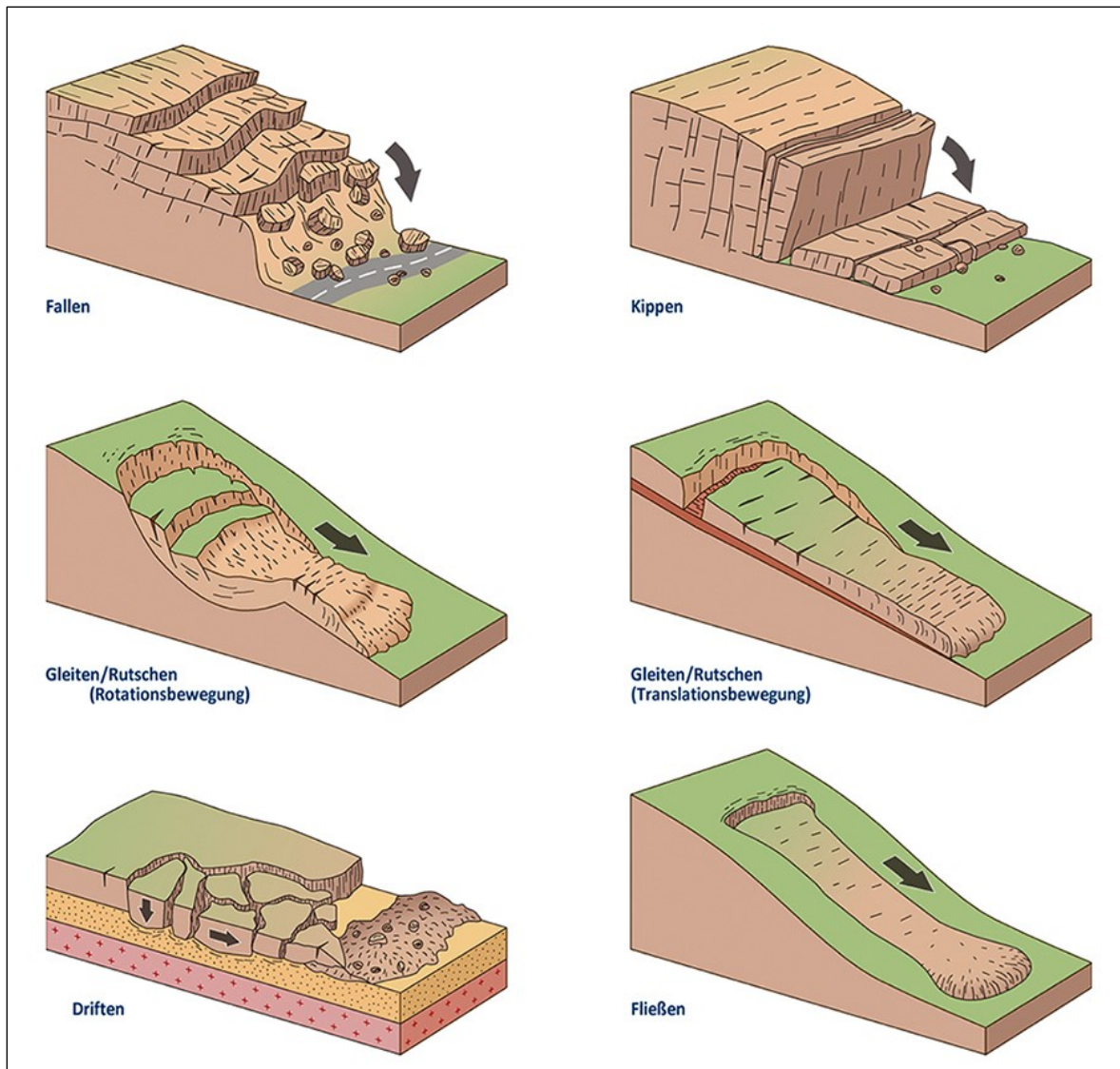


Abb. 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Bewegungsformen von gravitativen Massenbewegungen (GFZ 2020)

Neben der Bewegungsform ist die Art des verlagerten Materials eine der wichtigsten Faktoren, die das Verhalten von Verlagerungsbewegungen beeinflusst. Entsprechend wurde durch HUNGR et al. (2014) aufbauend auf dem Ansatz nach VARNES (1978) ein allgemein anerkannter Klassifizierungsansatz nach der Art der Bewegung und des bewegten Materials in zehn verschiedenen Klassen eingeführt. Dabei werden die geotechnischen Terminologien: Fels, Ton, Schlamm, Schlick, Sand, Kies, Geröll, Schutt, Torf und Eis entsprechend ihrer mechanischen Materialeigenschaften differenziert.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Bewegungstypen nach dem von HUNGR et al. (2014) modifizierten Ansatz von VARNES (1978) beschrieben, wobei die Prozesstypen „Fließen“ und „Fallen“ entsprechend der Fragestellung dieser Arbeit in den nachfolgenden Kapiteln 2.2- 2.4 deutlich ausführlicher beschrieben werden.

Beim Prozesstyp **Gleiten** besteht die Bewegung von Fels- und Lockergesteinen aus Scherdehnung und Verschiebung entlang einer oder mehrerer Gleitflächen oder Zonen intensiver Scherverformung. Die beiden wichtigsten Arten von Gleitrutschungen sind Rotations- und Translationsrutschungen. 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 Abb.1, Mitte 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 kann sich nach hinten zur Böschung neigen. Bei Rutschungen in der oberen Verwitterungszone mit nach der Tiefe hin fester werdendem Untergrund verläuft die Gleitfläche meist flachschalig (VARNES 1978).

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 (vgl. Abb. 1 oben rechts). Je nach Geometrie der versagenden Masse und der Ausrichtung ist es möglich, dass das Kippen in andere Bewegungsarten, wie zum Beispiel Sturzprozessen in den Bewegungstyp Fallen übergeht (VARNES 1978). Als Beispiele nennt HUNGR et al. (2014) unter anderem Felsblockstürze (*rock block topples*) und Sandblockstürze (*sand block topples*).

Bei der Bewegungsart **Driften** werden Fels- oder kohäsive Bodenmassen bei gleichzeitigem Einsinken in die liegenden, weniger kompetenten Schichten bewegt

(siehe Abb.1, unten links). Diese Bewegungen entstehen unter anderem durch Liquefaktion oder Ausquetschen der weniger kompetenten Schichten (VARNES 1978).

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 meist durch die Luft im freien Fall, springend, rollend oder gleitend bergab (siehe Abb.1). Ereignisse dieser Bewegungsart haben schnelle Bewegungsgeschwindigkeiten und hohe Energieeinwirkung beim Auftreffen auf unterliegende Gegenstände (VARNES 1978). Ein Beispiel für solche Bewegungen sind Steinschläge oder Felsstürze (weiter ausgeführt ab Kapitel 2.2).

Eine Sonderstellung innerhalb dieser Klassifikation nehmen Murgänge ein, da sie aus einem Lockergesteins-Wassergemisch bestehen und sich **fließend** hangabwärts bewegen. Sie folgen größtenteils hydraulischen Fließgesetzen und sind somit deutlich von den anderen gravitativen Massenbewegungen abzugrenzen. Der Prozessablauf Fließen wird ab Kapitel 2.4 tiefergehend beschrieben.

Grundsätzlich werden bei der Untersuchung gravitativer Massenbewegungen die vorbereitenden Faktoren der Bewegung, auch Disposition genannt, von den prozessauslösenden Faktoren (Trigger) und den kontrollierenden Faktoren unterschieden (CROZIER 1989). Während Faktoren wie Verwitterung, Vegetationsveränderung oder Änderungen der Hanggeometrie einen stabilen Zustand eines Hanges in einen instabilen überführen können, wird der Bewegungsprozess selbst durch ein bestimmtes Trigger-Ereignis ausgelöst (GLADE & DIKAU 2001). Am häufigsten sind das ergiebige Niederschläge mit Änderungen der Poren-/ Kluftwasserdruck- und Hangwasserverhältnisse, wobei die Wirkung des Wassers auf vielfältiger Weise negativ auf das Hanggleichgewicht wirkt (PRINZ & STRAUß 2011). Aber auch Erdbeben, Vulkanausbrüche und Temperaturveränderungen können Auslöser für gravitative Massenbewegungen sein. Von Bedeutung für den Bewegungsablauf sind die kontrollierenden Faktoren wie die Hanggeometrie

(Konkavität, Konvexität, Hangneigung, Exposition etc.) die Vegetationsbedeckung und Durchwurzelung oder der anthropogene Einfluss auf den Hang. Die Eingriffe des Menschen in das Hanggleichgewicht sind dabei zahlreich und vielfältig. Viele kurzfristige (episodische) Faktoren stehen im direkten Zusammenhang zu den anthropogenen Eingriffen. Bei Hanganschüttungen oder Hanganschnitten wird die Hanggeometrie verändert und die Statik des Hanges kann instabil werden (PRINZ & STRAUß 2011). Die künstlichen Hänge (Böschungen) zeigen häufig eine vermehrte Rutschungsaktivität. Eine Massenbewegung wird durch die natürlichen und anthropogenen Faktoren nicht direkt ausgelöst, sie disponieren aber einen Hang für Massenbewegungen. Bewegungsauslösende Faktoren initiieren die Massenbewegung und überwinden die rückhaltenden Kräfte des Hanges. Ist ein einzelner Faktor verantwortlich und zeitlich zusammenhängend mit der Massenbewegung, spricht man von einem auslösenden Faktor (KRAUTER 2001).

Die Geschwindigkeit der Massenbewegung ist für die Auswirkung der Prozesse auf den Menschen und seine Infrastruktur von entscheidender Bedeutung. Während schnell ablaufende Prozesse wie Felsstürze oder Murgänge mit hohen Geschwindigkeiten auftreten (Murgänge bis über 80 km/h, Bergstürze sogar bis über 300 km/h) und für den Menschen in den Auslaufzonen kaum eine Reaktionszeit erlauben, kann auf langsame Prozesse mit Geschwindigkeiten von Zentimetern bis Metern pro Tag unter Umständen noch angemessen reagiert und Personen- und Sachschäden vermieden werden (GLADE & DIKAU 2001). Dabei können von tiefergehenden Rotationsrutschungen oft große Flächen betroffen sein. Diese alt angelegten Rutschungen befinden sich oft scheinbar in Ruhe (dynamisches Gleichgewicht) oder bewegen sich nur noch unmerklich langsam. Oft besteht hier trotzdem die Gefahr einer Reaktivierung oder Beschleunigung, insbesondere nach langanhaltenden Starkniederschlägen und/oder nach der Schneeschmelze (LFU 2017, WEHINGER et al. 2021).

Um einen Schutz gegen über gravitativer Massenbewegungen zu errichten und Sach- oder Personenschäden zu vermeiden ist es wichtig, die möglichen Gefahren und vor allem die Gefahrenbereiche zu erkennen. Die Erfahrung zeigt, dass Ereignisse meist dort auftreten, wo früher schon ähnliche Ereignisse geschehen sind. Die Meidung dieser Gefahrenbereiche ist daher die wichtigste Strategie um Leben, Gesundheit und Sachwerte zu schützen. Deshalb werden für die verschiedenen Massenbewegungsprozesse in Deutschland und anderen Ländern sukzessive Gefahrenhinweiskarten und Studien zu integrativen Frühwarnsystemen herausgegeben (BELL et al. 2010, BALZER et al. 2020).

2.2 Steinschlag und Felssturz

Da die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten gegenüber Prozessen des Bewegungstyps **Fallen** in Form von Steinschlägen und Felsstürzen in dieser Arbeit einen zentralen Teil darstellt, wird im folgenden Kapitel tiefergehend auf die theoretischen Grundlagen, den Prozessablauf, die Auslösemechanismen und die Modellierungsmöglichkeiten dieser Phänomene eingegangen. Markante bisherige Felssturzereignisse und deren Auswirkungen im Projektgebiet am Mittelrhein- und Moseltal werden weiterführend in Kapitel 3.5.1 beschrieben.

2.2.1 Sturztypen

Generell unterscheidet man Sturzprozesse definitorisch auf Basis der Masse und dem Zerkleinerungsgrad der bewegten Kubatur. Diese Prozesse werden in drei Kategorien unterteilt (siehe Tab. 1). Einzelne Blöcke mit einer Masse unterhalb von 10m^3 werden als **Steinschlag** bezeichnet, während stürzende Massen oberhalb von 10m^3 meist in Kombination mit einer Zerteilung in kleinere Blöcke als **Felssturz** bezeichnet werden. Massenbewegungen oberhalb von 1 Mio. m^3 , bei denen ganze Hangflanken kollabieren, werden **Bergstürze** genannt, sind aber in Rheinland-Pfalz äußerst seltene

Phänomene und können eher im hochalpinen Terrain beobachtet werden (DIKAU 2019).

Tab. 1: Klassifikationen von Sturztypen

<i>Prozess</i>	<i>Durchmesser der Komponenten</i>	<i>Volumen</i>	<i>Geschwindigkeit</i>	<i>Bemerkungen</i>
Steinschlag	< 50 cm	-	< 30 m/s	<i>i.d.R. Einzelsteine pro Ereignis</i>
Blockschlag	>50 cm	< 100 m ³	< 30 m/s	<i>i.d.R. Einzelblöcke pro Ereignis</i>
Felssturz	-	100 m ³ bis 1 Mio. m ³	10 - 40 m/s	<i>Felssturzmasse, i.d.R. Absturz einer Vielzahl von Fels- und Gesteinsblöcken, anschließend Fragmentierung Felsstürze können sich in verschiedenen Phasen ereignen (Teilabbrüche)</i>
Bergsturz	-	> 1 Mio. m ³	> 40 m/s	<i>Initialphase mit kompakter Bergsturzmasse Prozessraum inkl. Ablagerungszone kann große Flächen betreffen</i>

Steinschlag ist definiert als periodisches Sturzereignis von einzelnen, kleineren Festgesteinspartien (0,1 – 10 m³) bis hin zur Blockgröße (**Blockschlag**). Zu diesem spontanen Abstürzen von Kluftkörpern neigen zumeist Festgesteinsausbisse im Bereich von steilen Felswänden oder Klippen, meistens über 40°. Die Kubatur der abstürzenden Kluftkörper werden dabei von angelegten Trennflächen im Fels bestimmt (LFU 2017). Sich vom Felsverband gelöste Gesteinsmassen stürzen dann der Gravitation folgend in mehr oder weniger freiem Fall bis auf eine unterliegende Gelände­fläche. Je nach Körperform, Gesteinsart und aufgenommenener

Geschwindigkeit in der Sturzphase können die Kluffkörper dort zerbrechen und sich oder springend, rollend oder gleitend weiterbewegen. Die aufgenommene Energie wird dabei hauptsächlich aus der Fallhöhe und der stürzenden Blockgröße bestimmt (GERBER 2019, PREH et al. 2020). Bei jedem (weiteren) Kontakt mit dem Untergrund verliert der Block sukzessive an kinetischer Energie. Dabei hängt der Energieverlust hauptsächlich von der aufgenommenen Rotation, der Intaktheit des Kluffkörpers und vom Dämpfungsfaktor des Untergrundes ab. Anstehender kompetenter Fels am Untergrund führt dabei zu einem kaum gebremsten Fall, während beispielsweise tiefgründiger Waldboden viel Energie aufnehmen kann und somit den Block stark verlangsamt (LFU 2017). Diese Faktoren bedingen dementsprechend die Reichweite, die ein einzelner Kluffkörper während eines Sturzereignis erreichen kann. Bereits abgegangene Steinschläge bieten für eine Reichweitenabschätzung einen guten Anhaltspunkt bei dem durch „**Stumme Zeugen**“ also Spuren von vorangegangenen Ereignissen, wie zum Stehen gekommene Sturzkörper oder Einschläge in der Vegetation herangezogen werden kann (DORREN et al. 2015).

Eine schematische Darstellung der Bewegungsarten von Sturztypen ist in Abbildung 2 dargestellt.

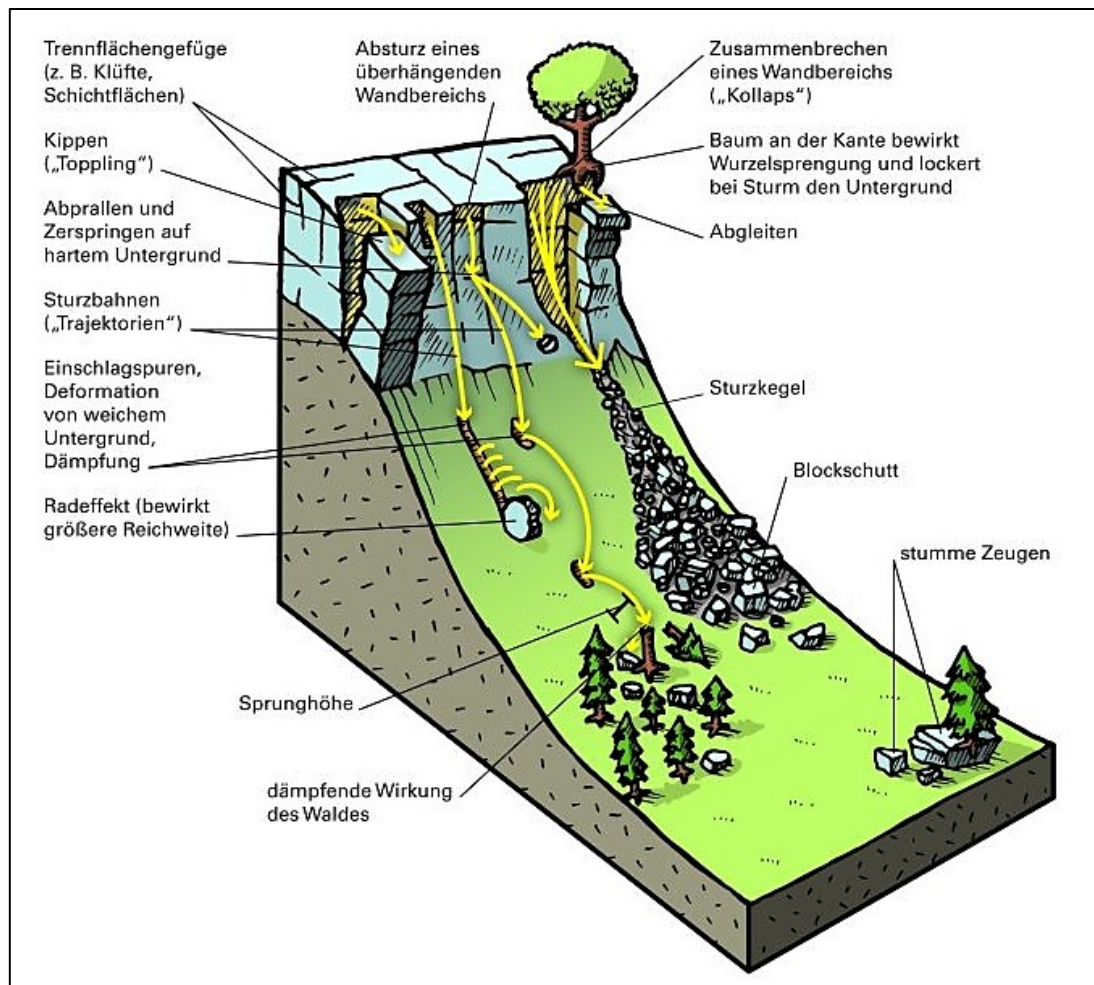


Abb. 2: Schematische Darstellung von Sturzprozessen (LFU Bayern 2022)

Beim **Felssturz** lösen sich größere Felspartien ($< 10 \text{ m}^3$) aus Wandstufen und stürzen ab. Gegenüber einem Bergsturz sind das Volumen ($> 1 \text{ Million m}^3$) und die Geschwindigkeiten in der Sturzphase deutlich geringer (ABELE 1974). Der theoretische Prozessablauf ähnelt dabei der zuvor beschriebenen Dynamik bei Steinschlägen. Im Gegensatz zum Stein- oder Blockschlag, der aus Einzelkomponenten besteht, erfolgt beim Felssturz jedoch eine gegenseitige Beeinflussung der Blöcke während der Sturz- und Ablagerungsphase (LOTTER & HABERLER 2013). Im Laufe des Ablöse- und Sturzprozesses wird die abgegangene, zunächst noch intakte Felsmasse in zahlreiche Blöcke zerkleinert. Bei größeren Felsstürzen und Bergstürzen beeinflusst dabei die Interaktion der Blöcke untereinander sowie das Zerbrechen der Blöcke infolge eines Aufschlages maßgeblich die Reichweite der Sturzmasse und hinsichtlich ihrer

horizontalen Ausbreitung (MELZNER & PREH 2012, vgl. Abb. 3, näher beschrieben in Kap. 3.5.2). Größere Felssturzereignisse können sich über mehrere Teilabbrüche entwickeln, bei denen nach einem initialen Abgang durch Entspannungsvorgänge im verbleibenden Gesteinsverband in der Felswand weitere Gesteinspartien instabil werden und abgehen. Aufgrund des plötzlichen Auftretens und der hohen Energie sind Felsstürze als sehr gefährlich für eine darunterliegende Infrastruktur einzustufen. Die Ursache für Felsstürze ist in Faktoren wie einer Spannungsumlagerung, Verwitterung an Trennflächen oder Erdbeben zu suchen. Die Auslöser sind oft jedoch weniger eindeutig als bei anderen Hangbewegungen (LFU 2017, vgl. Kapitel 2.2.3). Häufig erfolgen Felsstürze aber auch nach einer gewissen Vorbereitungsphase ohne weitere erkennbare Anlässe. Ein typisches Beispiel für einen Felssturz ist in Abbildung 3 mit dem Felsabgang am Trierer Augenscheiner aus dem Januar 2023 dargestellt.



Abb. 3: Felssturz am Trierer Augenscheiner vom 25.01.2023 (Foto: T. Hagge-Kubat)

Generell wird beobachtet, dass mit dem Abbruchvolumen die Mobilität der Sturzmasse steigt. Dies wird oft damit erklärt, dass die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten (d.h. dass das Verhalten als Sturzstrom) mit dem Volumen zunehmen. Neben den Abbruchvolumen haben aber auch die Beschaffenheit der Sturzbahn und die Morphologie des Geländes einen maßgeblichen Einfluss auf die Mobilität der Sturzmasse (PREH 2018).

Eine umfassendere Beschreibung von Sturzprozessen und deren Unterscheidungen findet sich unter anderem in GERBER (2019), HUNGR et al. (2014), PREH et al. (2020).

2.2.2 Ablösemechanismen

Massenbewegungen des Prozesstyps Fellen beginnen zuallermeist mit einer Phase der Ablösung der Festgesteinsmassen vom Gesteinsverband, die nachfolgend in einen Sturz- bzw. Auslaufprozess (im englischen „runout“ genannt) übergehen kann. Diese beiden Phasen sind physikalisch vollkommen unterschiedliche Vorgänge und müssen daher unterschiedlich betrachtet werden (POISEL 2018). Die Mechanismen, welche die Sturzkörper initial in Bewegung bringen, sind vielfältig und gehen zum Teil ineinander über. Entscheidend für die finale Ablösung sind die Lage des Schwerpunkts des Sturzkörpers sowie dessen Verbindung zum umliegenden Fels. Kritische Lageeigenschaften resultieren vor allem aus einer ungünstigen Kombination des Trennflächensystems und der Geländeoberfläche (LFU 2015). Diese Disposition beeinflusst die Größe, Form und damit die Bewegungseigenschaften des abgehenden Blocks. Im Folgenden werden verschiedene Ablösemechanismen bzw. Versagensmechanismen im Fels kurz beschrieben. Eine tiefergehende Beschreibung dieser Vorgänge findet sich unter anderem in WYLLIE & MAH (2004), POISEL (2018) & FRAYSSINES & HANTZ (2006)

Translation eines Gleitkörpers auf einer Trennfläche

Gleiten eines Klufftkörpers (ähnlich jenem eines Blocks auf einer schiefen Ebene; Abb. 4) ist einer der in Felsböschungen am häufigsten auftretenden Versagensmechanismen (POISEL 2018). Gleiten tritt auf, wenn die Scherfestigkeit der Trennfläche, an der der Klufftkörper hangabwärts gleitet, durch die Scherkräfte überschritten wird. Diese Initialbewegung kann z.B. durch das Eigengewicht in Kombination mit hohen Klufftwasserdrücken hervorgerufen werden.

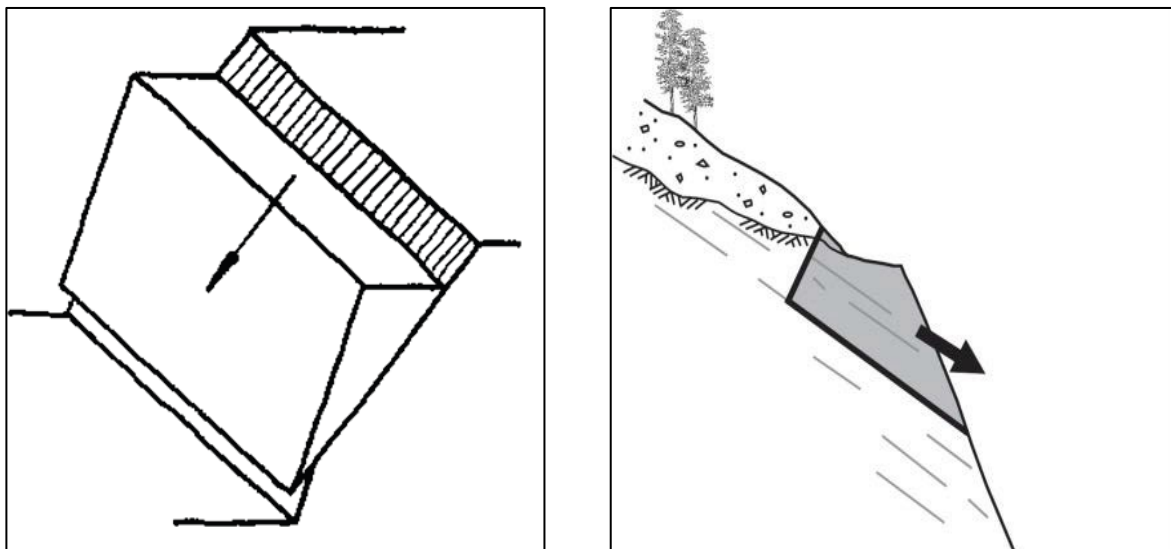


Abb. 4: Schematische Darstellung von Translationsgleitungen auf einer Trennfläche (POISEL 2018)

Kippen

Wird der Fels in einem Hang durch steil in den Hang einfallende Trennflächen sowie durch hangauswärtsfallende, etwa normal auf die in den Hang steil einfallenden Trennflächen stehende Klüfte in säulen- oder tafelförmige Klufftkörper zerlegt, kann es zum Hangauswärtkippen von schmalen länglichen Klufftkörpern kommen (Abb. 5). Dieser Vorgang ist dem Umfallen von Büchern im Regal oder jenem von Dominosteinen ähnlich (POISEL 2018).

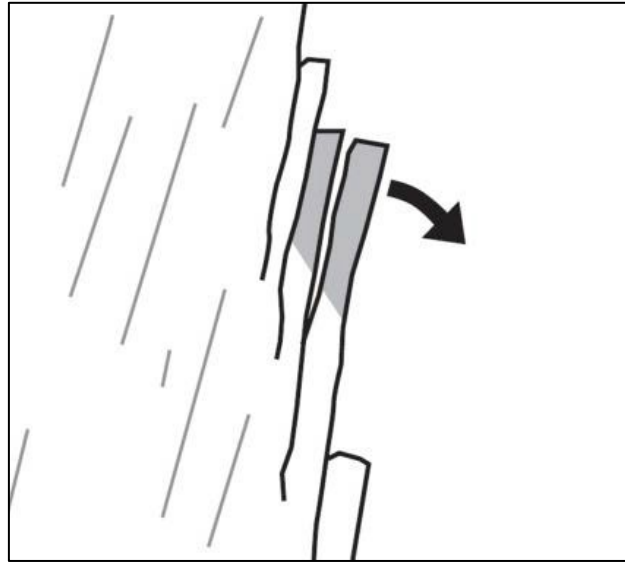


Abb. 5: Schematische Darstellung des Dispositionsvorgangs „Kippen“ bei Blockschlägen im Hang (WYLLIE & MAH 2004)

Translation mehrerer Gleitkörper auf einer polygonalen Gleitfläche

Eine Felsmasse kann ähnlich einer Lockergesteins-Rotationsrutschung auf einer polygonalen Gleitfläche gleiten (Abb. 4), wenn die als Gleitfläche dienenden Bruch- und Trennflächenflächen, in den Knickpunkten einer als mögliche Gleitfläche dienenden Trennfläche in Teilstücke zerlegt sind (POISEL 2018, vgl. Abb. 6). Diese Bruchflächen können sowohl bereits vorhanden sein, als auch im Zuge der Bewegung erst gebildet werden und ermöglichen ein Zerschneiden der abgleitenden Felsmasse in Teilkörper. Ein Herausbrechen eines vorderen Kluttkörpers sorgt für eine Entspannung des Gesteinsverbandes, sodass in der Folge auch weitere Teilstücke abgehen können. Dieses Phänomen ist häufig bei größeren Felsstürzen zu beobachten (PREH et al. 2020).

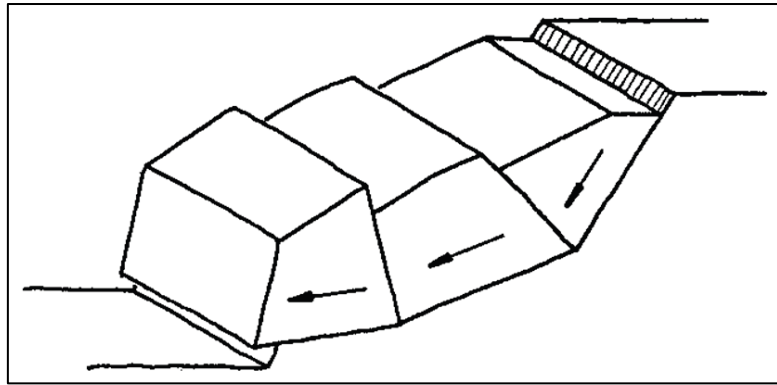


Abb. 6: Schematische Darstellung einer Translation mehrerer Gleitkörper auf einer polygonalen Gleitfläche (POISEL 2018)

Fallen von Kluftkörpern aus Überhängen

Reines Fallen als Ablösemechanismus einer initialen Bewegung kann defacto nur aus Überhängen in massivem Fels mit (nahezu) vollständig durchtrennten Klüften erfolgen (Abb. 7). Meist entstehen diese markanten Felsreliefs durch die Rückverlegung einer schneller verwitternden Gesteinsschicht unterhalb einer harten Felspartie, wie sie etwa in Schichtstufenmorphologie häufig anzutreffen ist (POISEL 2018, LFU 2017).

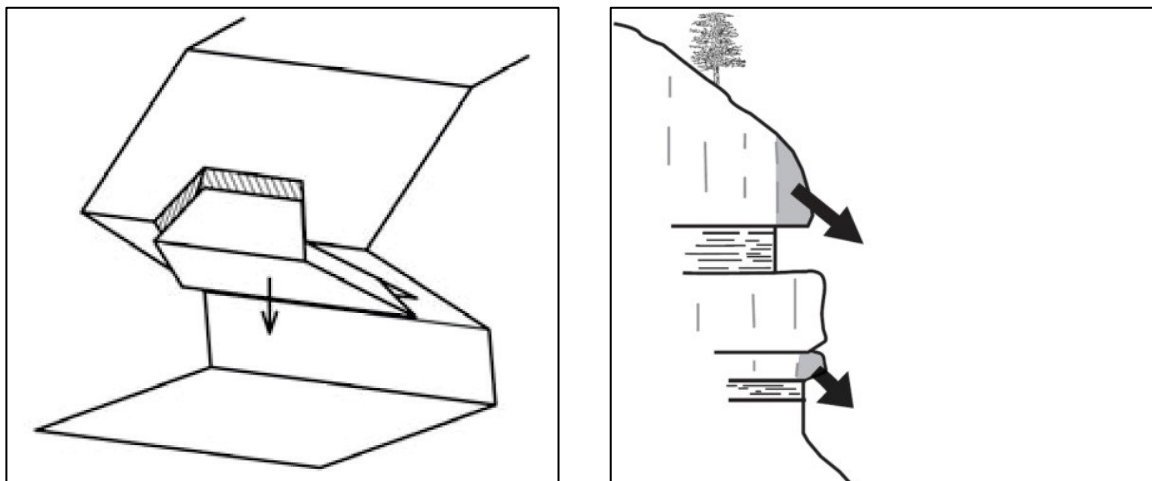


Abb. 7: Schematische Darstellung des Fallens eines Kluftkörpers aus einem Überhang (verändert nach WYLLIE & MAH 2004 & POISEL 2018)

Rotationsgleitung

Ein Sonderfall bei der Auslösung von Sturzprozessen tritt in stark zerlegtem oder verwittertem Fels mit geringer Festigkeit auf welches eher einem Lockergestein ähnlich ist. Dieser Mechanismus ähnelt damit dem Versagen einer Lockergesteinsböschung in Form eines Gleitkreises (vgl. Abb. 1). Die Kluftkörpergröße die aus der Böschung oder dem Hang austritt ist dabei in der Regel wesentlich kleiner als die Böschungshöhe und die Raumstellungen der Trennflächen spielen eine untergeordnete Rolle.

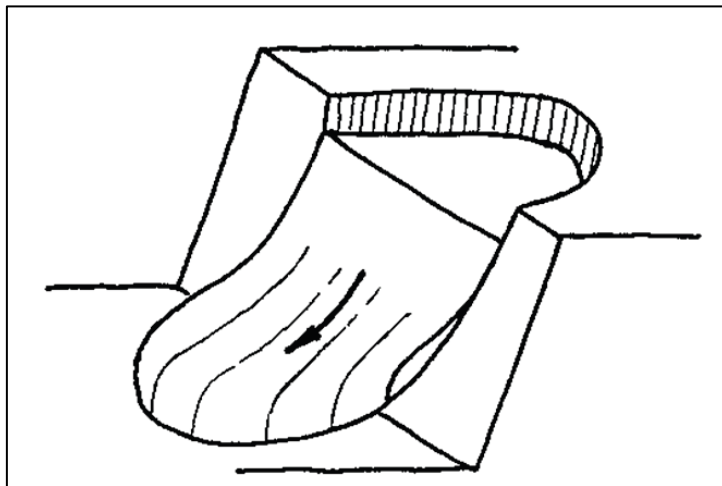


Abb. 8: Schematische Darstellung einer Rotationsgleitung im Fels (POISEL 2018)

2.2.3 Faktoren für die Entstehung von Steinschlägen und Felsstürzen

Die Ursachen für Stein- und Blockschlag liegen generell in langfristiger Materialentfestigung und Verwitterung an den in der Gebirgsbildung angelegten Trennflächen (PREH et al. 2020). Die exakten Ursachen von einzelnen Sturzereignissen sind naturbedingt komplex und können meist nur für den Einzelfall untersucht und damit nur bedingt verallgemeinert werden. Generell wird die Felsdestabilisierung

und -ablösung hauptsächlich durch die physikalische und chemische Verwitterung gesteuert. Diese ist zeitlich und räumlich maßgeblich an die vorherrschenden Klimaverhältnisse gekoppelt. Durch extreme Niederschläge oder Frost-Tauzyklen mit ihrer Volumenveränderung beim Phasenübergang des Wassers verändert sich beispielsweise der Wasserdruck in den Gesteinsklüften und die Verbandsfestigkeit im Fels wird reduziert. Die Ausbildung von Klüften wird durch extreme Ereignisse wie Trockenperioden zusätzlich begünstigt und kann ein vermehrtes Eindringen von Wasser ermöglichen. Eine starke Insolation wirkt sich im Fels ebenfalls volumenvergrößernd aus, wobei ein periodisches Schrumpfen und Vergrößern über tausende Zyklen ebenfalls destabilisierend wirkt (SPANG 1997). Eine besondere Form der physikalischen Verwitterung stellt die biogene Verwitterung von Fels dar. Dabei wird durch die auf dem Fels wachsende Vegetation und deren in die Klüfte einwachsende Wurzeln diese Trennflächen sukzessive aufgeweitet bis die Scherbeanspruchung zu groß wird und es zum Bruch kommt (SPANG 1997). Dieser als Wurzelsprengung bezeichnete Vorgang ist dabei nicht der Einzige der zur Auslösung von Kluffkörpern aus dem Gesteinsverband führen kann. Gerade bei Sturm ist vermehrt mit Steinschlag unter Felswänden zu rechnen, da Bäume die dynamische Belastung des Windes über ihren Stamm und die Wurzeln in den Untergrund einleiten. Falls Bäume infolge eines Sturms umstürzen, können dabei ebenfalls Steine freigelegt oder sogar hoch gehobelt werden, sodass diese abstürzen können (LFU 2017). Auch Erdbeben können durch eine plötzliche rüttelnde Bodenbewegung bereits vorgelöste Gesteinspartien in Bewegung versetzen und somit initial Stein- und Blockschlag auslösen (VALAGUSSA et al. 2014).

Zusätzlich wird die Stabilität von Felswänden in Folge der zunehmenden Besiedlung und Nutzung von Gebirgsregionen durch den Menschen beeinflusst. Die landwirtschaftliche Nutzung, Rodung und Hangeinschnitte sind anthropogene Faktoren, die ebenfalls für die Hang- und Felsstabilität mit verantwortlich sind (PRINZ & STRAUß 2011). Eine tiefergehende Beschreibung von natürlichen und anthropogenen

Auslösemechanismen von Steinschlägen und Felsstürzen beschreiben unter anderem SPANG (1997), DORREN (2003) oder WYLLIE & MAH (2004).

2.2.4 Modellierung von Sturzprozessen

In der Praxis stellt die Abgrenzung potentieller Wirkungsbereiche von Sturzprozessen mit Hilfe von Reichweitenmodellen einen der wichtigsten Bestandteile einer Gefährdungsanalyse dar (PREH et al. 2020). Für die Simulation der Reichweite und den Verlauf der Sturzbahnen potentieller Sturzprozesse, auch *Trajektorien* genannt, stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die von einfachen empirischen Ansätzen bis hin zu komplexen numerischen 3D-Berechnungsansätzen reichen. Kenntnisse der kinetischen Energie der stürzenden Blöcke, ihrer Sturzbahn, Sprunghöhen und Reichweiten sind dabei die entscheidenden Faktoren für die Beurteilung eines eventuellen Schaden, aber auch für die Planung von Schutzmaßnahmen notwendig. Sind die Eingangsparameter wie etwa die Blockgröße, Dämpfung oder Hanggeometrie gut bekannt, können mit Hilfe von numerischen Simulationsmodellen die Reichweiten und Energien von Sturzprozessen treffend berechnet werden (DORREN 2003).

Die ersten Forschungsarbeiten in Zusammenhang mit Steinschlagprozessen und dem Versuch diese modelltechnisch zu erfassen wurden im alpinen Raum initiiert. Grundlagen dafür waren vor allem die Dokumentationen der immer wieder stattfindenden Schadensereignisse (GERBER 2019). In der Literatur finden sich für den englischsprachigen Raum dazu bereits Daten aus den 60er-Jahren (RITCHIE 1963). Bald darauf folgten Fallversuche mit Steinen an Böschungen, um die zu Grunde liegende Dynamik des Steinschlages besser zu verstehen (BROILI 1973). Auch an Rhein und Mosel wurden bereits seit den 1970er Jahren verschiedene Grundlagenuntersuchungen zu Steinschlagprozessen durchgeführt. So wurden vornehmlich von Prof. Dr. Edmund Krauter Studien zu Bewegungen an Felshängen

sowie Fallversuche durchgeführt und das Verhalten von Steinschlagschutznetzen in dieser Region dokumentiert (KRAUTER 1973, KRAUTER et al. 1978 KRAUTER & SCHOLZ 1996). Aus diesen international gesammelten Erkenntnissen wurde das erste numerische Modell in Italien entwickelt (PITEAU 1976). Das Modell wurde bei internationalen Konferenzen vorgestellt und in der Folge wurden weltweit weitere Modelle zur Simulation von Steinschlag entwickelt. Bis in die 80er-Jahre beruhten dabei noch fast alle Modelle auf zweidimensionalen Längenprofilen. Erst in den 90er-Jahren begannen mit der Verbesserung der Rechenleistung von Computern auch der Einbezug der dritten Dimension (GERBER 2019).

Grundsätzlich werden bei Steinschlagmodellen verschiedene Funktionsweisen eingesetzt. Beispielsweise DORREN (2003) unterscheidet dabei drei Arten von Modellen: **empirisch basierte-, Prozess basierte- und GIS basierte Modelle**. Nach VOLKWEIN (2011) werden diese Modelle zusätzlich noch nach der Art, in welcher Form die Kubatur des stürzenden Blocks in die Modellrechnung einfließt, differenziert. Im Folgenden werden diese Modellansätze kurz beschrieben. Eine weiterführende Beschreibung dieser Modellansätze und deren Vergleich untereinander ist unter anderem in DORREN (2003), HANTZ et al. (2021), VOLKWEIN et al. (2011) zu finden.

Empirische Ansätze oder analytischen Modelle stellen einfache aber zeitextensive Methoden für die Ausweisung relativer maximaler Reichweiten von Sturzprozessen dar. Diese Methoden wie etwa die des Shadow-Angles beruhen auf einfachen geometrischen Annahmen bzw. Algorithmen, sodass der Anwender bei der Durchführung den meisten dieser Ansätze sehr wenig Eingangsparameter benötigt (vgl. dazu HEIM 1932; SCHEIDEGGER 1975; SASSA 1988; DORREN, 2003 VOLKWEIN et al. 2011; MELZNER & PREH 2012).

Mit Hilfe komplexer Prozessmodelle kann im Gegensatz zu den empirischen Ansätzen die Kinematik eines Sturzprozesses/einer Sturzmasse (z.B. Energien, Sprunghöhen, Baumtreffer etc.) berechnet werden. Beispielsweise bei Modellen für Felsstürze hat, wie in Kap. 2.2.1 beschrieben, die interne Deformation der Sturzmasse während des

Sturzphase einen maßgeblichen Einfluss auf ihre Ausbreitung. Die seitliche Ausbreitung und der Energieverlust infolge der internen Deformation der Masse können dabei nur mit komplexen numerischen Modellen abgeschätzt werden (HANTZ et al. 2021). Bei den Modellen für Einzelabstürze werden die Sturzblöcke zumeist als starrer Körper betrachtet und die Sturzbahn analytisch berechnet (MELZNER & PREH 2012).

Die analytischen Prozessmodelle für Einzelabstürze werden in 2D- und 3D-Modelle unterschieden. Mittels 2D-Modellen kann entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Kinematik eines Sturzblockes berechnet werden (VOLKWEIN et al. 2011, vgl. Abb. 9). Die Simulationsergebnisse (z.B. Energien und Reichweiten) werden meistens für die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (z.B. Netze, Fangzäune) auf der Hangskala verwendet. 2D-Modelle können jedoch auch für die Ausweisung von Gefahrenzonen für größere Hangabschnitte (lokale Hangskala) eingesetzt werden, indem mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt werden und die Simulationsergebnisse von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert werden (VOLKWEIN et al. 2011). Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. Hingegen erweist sich die zeitextensive Datenerhebung und Datenaufbereitung der relevanten Modellparameter und Durchführung der Simulationen mittels übersichtlicher Benutzeroberflächen bei 2D-Modellen als sehr anwenderfreundlich.

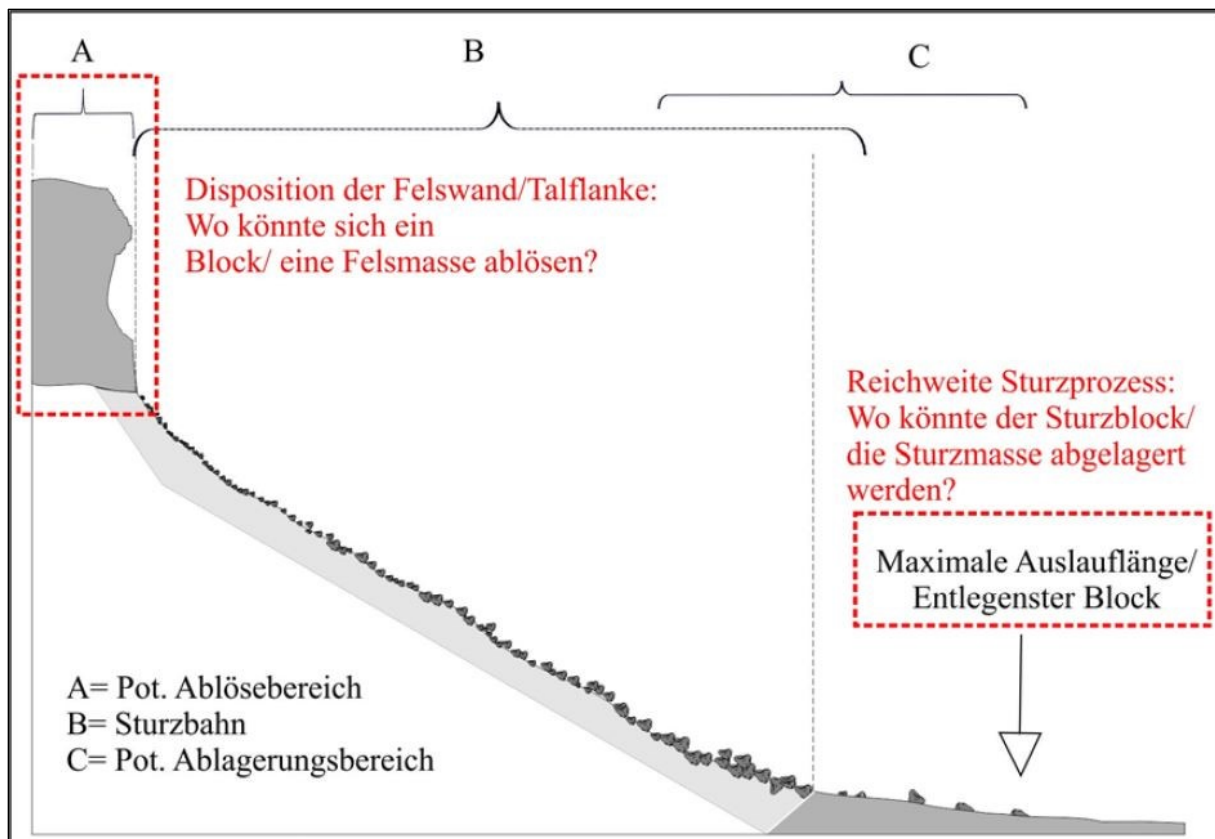


Abb. 9: Schematische Darstellung der Verknüpfung von Dispositionsanalyse einer Felswand mit einer 2D-Simulation der Kinematik und Reichweite des Sturzvorgangs (Melzner 2012 verändert nach Meißl 1998).

Mit 3D-Modellen werden die Trajektorien von Sturzprozessen räumlich berechnet. Nach dem derzeitigen Stand der Forschung und der softwareseitigen Entwicklung gibt es noch kein Modell, das sowohl die Versagensmechanismen in Hangflanken und Felswänden als auch den danach potentiell auftretenden Sturzprozess in einem Rechengang simulieren kann. Die meisten der Modelle berücksichtigen daher lediglich die Position des Ablösebereichs und die Kubatur des Sturzblockes (MELZNER & PREH 2012). Dennoch sind so flächendeckende Aussagen über potentielle Wirkungsbereiche von Sturzereignissen möglich und die Interpolation von Simulationsergebnissen kann auf Basis von Expertenwissen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten genutzt werden. Der große Vorteil in der Anwendung dieser Methodik gegenüber den 2D-Ansätzen besteht in der Fähigkeit, die Komplexität des Sturzprozesses besonders im Hinblick auf 3D-Effekte der Topographie z.B. seitliche Ablenkung zum steilsten Gefälle bei der Abgrenzung potentieller gefährdeter Bereiche

einzubeziehen (VOLKWEIN et al. 2011, HANTZ et al. 2021). Bekannte und vielfach genutzte Beispiele für 3D Steinschlagmodelle sind unter anderem *Ramms: Rockfall* (CAVIEZEL et al. 2019) und *Rockyfor3D* (DORREN 2013).

Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erhöhte Aufwand für die flächendeckende Datenerhebung und -aufbereitung als auch die Berechnungsdauer, die je nach Modellauflösung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen sehr hoch sein kann. Anwender dieser Modelle benötigen fundierte Kenntnisse von GIS-Systemen, um die erforderlichen Eingabedaten des Modells für die Simulation vorbereiten zu können (MELZNER & PREH 2012). Die Modellierung der Bewegung der Sturzblöcke erfolgt bei den 3D-Modell in der Regel nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Mechanik und ist in die Prozesse Fallen, Springen und Rollen unterteilt. Die Berechnungen stellen eine Abfolge dieser Prozesse mit den dazwischenliegenden Kontaktreaktionen mit dem Untergrund sowie auch mit Baumstämmen dar. Beim simulierten Bodenkontakt des Sturzblockes wird durch die Geometrie des Blockes ein Aufpralltrichter im Untergrund erzeugt, der die Bewegungsrichtung des Blockes maßgeblich beeinflusst (GERBER 2019). Beim Eindringprozess in den Untergrund entsteht dadurch ein Energieverlust. Zur Berechnung des Energieverlustes bei der Materialverdrängung wird in vielen Modellen ein Reibungseffekt berücksichtigt. Entsprechend den Untergrundeigenschaften und der Dimension des Blocks wird ein spezifischer Energieverlust berechnet (weiterführend beschrieben in GERBER 2019). Die genaue physikalische Beschreibung des Sturzprozesses des in dieser Arbeit verwendeten GPP-Moduls findet sich in Kapitel 4.3.

Beim derzeitigen Stand der Forschung hat sich noch kein Sturzmodell herauskristallisiert, welches ohne Einschränkungen für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden kann. Erfahrungen in der Anwendung mehrerer Modelle, Modellierungserfahrung in unterschiedlichen Landschaftsräumen und die Entwicklung quantitativer Validierungsmethoden sind notwendig, um realistischere

Aussagen über die Anwendbarkeit solch eines Modells auf unterschiedliche Fragestellungen treffen zu können (MELZNER & PREH 2012).

2.2.5 Bautechnische Maßnahmen gegen Steinschläge und Felsstürze

Steinschläge und Felsstürze werden als natürliche Erosionsvorgänge auch zukünftig den Menschen in seinem Lebensraum beeinflussen. Dabei können Steinschlagschutzverbauungen eingesetzt werden, um bewohnte Gebiete und Verkehrswege vor den Auswirkungen dieser Prozesse zumindest teilweise zu schützen. Dadurch lässt sich zwar das Schadenspotenzial dieser Prozesse reduzieren, das Restrisiko zukünftiger Massenbewegungen oder ein Versagen der bestehenden Verbauung lässt sich jedoch mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand in den meisten Fällen nicht komplett ausschließen (WALTER 2022). Verschiedene ingenieurgeologische Maßnahmen stehen dabei heutzutage zur Verfügung um entweder instabile Felspartien direkt an der labilen Stelle in der Felswand zu sichern und vor dem Abstürzen zu bewahren, oder abstürzende Kluffkörper in der Sturzphase aufzuhalten und ein Auftreffen auf kritische Infrastruktur zu verhindern. In der Folge werden diese Maßnahmen kurz beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung und weiterführende Informationen zu einzelnen beschriebenen Sicherungsmaßnahmen ist unter anderem in BRANDL (2018), WIETEK (2017) & VOLKWEIN et al. (2019) beschrieben. Im ersten Fall können instabile Felspartien vor einem potenziellen initialen abgleiten beispielsweise mit Felsnägeln verankert werden und so durch externe Zugkraft an den dahinterliegenden kompetenten Fels gespannt werden. Stahlgurte, Stahlbetonkorsetten, stützenden Lisenen, Spritzbeton oder Mauern sichern den Fels in einem ähnlichen Prinzip und sollen durch eine stützende Wirkung das Herausbrechen bereits in der Felswand verhindern. Im oberflächennahen Bereich im Fels selber kann der Kraftschluss durch Vermörtelung und Verplombung von Spalten und Klüften wiederhergestellt werden, wobei sichergestellt sein muss, dass es dabei durch die

Gefahr von Frostsprengung nicht zu keinem Rückstau des Kluftwassers kommen kann (WIETEK 2017). Viele Felsböschungen sind zum Schutz gegen Steinschlag heutzutage mit Schutznetzen überzogen. Diese verhältnismäßig kostengünstigen Steinschlagnetze ermöglichen sowohl einen aktiven als auch einen passiven Schutz von Abgängen und begünstigen darüber hinaus der Möglichkeit der Begrünung. Das Steinschlagnetz besteht bei modernen Varianten aus einem hochfesten Diagonaldraht- oder Sechskantgeflecht mit doppelt gedrillten Maschen und eingewobenen, verstärkten Kantendrähten. Zur Verankerung ist es meist mit Felsnägeln in einem engmaschigen Ankerraster an den Fels gepresst (VOLKWEIN et al. 2019). Als Alternative oder Ergänzung zu einer Vernetzung können Felswände auch regelmäßig von lockeren Steinen und Blöcken beräumt werden (LFU 2017).

Auffangmulden, Fangmauern, Wälle oder Steinschlagfangzäune am Böschungsfuß sind Schutzsysteme, die abstürzende Kluftkörper in der Bewegungsphase aufhalten und deren kinetische Energie beim Aufprall absorbieren sollen. Durch speziell aufgebaute Schutzdämme können dabei Felsblöcke oder Felssturzmassen mit Sturzenergien von bis zu 10'000 kJ zurückgehalten werden (BRANDL 2018). Der Steinschlagschutzzaun ist dabei vermutlich die am meiste verbreitete Variante dieser Schutzklasse. Diese modernen Verbaue können und sollen Blöcke durch die dynamische Lasteinwirkung mittels Verformung der Bauteile bis zum Stillstand abbremsen. In der Regel bestehend diese Zäune aus verankerten oder betonierten Stützen, einem Stahldrahtgeflecht sowie seitlichen und rückwärtigen Abspannungen mit Bremsselementen (VOLKWEIN et al. 2019). Diese Zäune gibt es in verschiedenen Ausführungen und mit verschiedenen Energieaufnahmefähigkeiten. Abb. 10 zeigt beispielhaft ein solchen Steinschlagschutzzaun in der Bauphase in den Alpen. Moderne Steinschlagschutzsysteme können Blöcke mit Sturzenergien bis maximal 10'000 kJ aufhalten. Diese Werte werden beispielsweise erreicht, wenn ein 25 t schwerer Brocken mit 105 km/h ungebremst in ein Netz fällt (VOLKWEIN et al. 2021). In der Planungsphase werden diese Systeme über Modellrechnungen entsprechend der Gefahrensituation und des Schadenspotenzials dimensioniert.



Abb. 10: Rückabgespannter Steinschlagfangzaun an einem Felshang in der Schweiz (Foto: Trumer Schutzbauten o.J)

Nach Treffern im Zaun müssen solche Barrieren in regelmäßigen Abständen von manuell beräumt und kontrolliert werden, da sich im Netz befindliche Sturzkörper negativ auf die Rückhaltefähigkeit vor weiteren Treffern auswirken kann (VOLKWEIN et al. 2021). Ein Abflachen des Hangs oder das Anlegen von Bermen mit Auffangmulden ist wegen der meist ausgesetzten Steillagen und dem oft geringen Platzangebot in der Praxis nur selten möglich.

Neben den ingenieurbaulichen Maßnahmen wirkt auch ein intakter Wald (im Falle von Naturgefahrenschutz auch Schutzwald genannt) auf verschiedenen Ebenen positiv auf einen Steinschlagrückhalt aus. Ein gesunder Wald kann damit im Vergleich einen ökologisch nachhaltigen und deutlich günstigeren Steinschlagschutz darstellen (LINGUA et al. 2020, MOOS et al. 2020).

Falls die Ausdehnung der aus dem Felsverband abgetrennten Felspartien selbst für kombinierte Sicherungsmaßnahmen zu groß ist, können diese Bereiche im Einzelfall auch durch Sprengungen abgetragen werden. Dabei besteht die Gefahr, dass durch Sprengungen das benachbarte Gestein zerrüttet wird und eine anschließende Abtragung schonend mit hydraulischem Felsspaltgerät erfolgen muss (BRANDL 2018). In der Praxis bieten alle baulichen Sicherungsmaßnahmen keinen absoluten Schutz gegen spätere Felsbewegungen, sodass sich mittels der vorgestellten Verbaumethoden nur bis zu einem gewissen Grad vor diesen Ereignissen geschützt werden kann.

Die hier aufgezählten Sicherungsmaßnahmen und -bauwerke stellen nur eine grobe Übersicht dar. In der Praxis sind noch eine deutlich größere Anzahl an Bauwerkssystemen, Subtypen dieser und Kombinationsbauwerken auf dem Markt verfügbar (vgl. WIETEK 2017).

2.3 Starkregen

Niederschlag ist häufig der initiale Auslöser für gravitative Massenbewegungen. Besonders Starkregenereignisse führen durch eine markante Menge an Niederschlag in kurzer Zeit dazu, dass Hangbewegungen ausgelöst werden können (KRAUTER et al. 2012). Besonders Ereignisse des Massenbewegungsprozestyps **Fließen** entstehen häufig infolge von Starkregenereignissen. Bevor also diese Prozesse ab Kap. 2.4. näher beschrieben werden, werden im Folgenden zunächst die grundsätzliche Entstehung von Starkregenereignissen, deren oberflächliche Abflussbildung und deren Schadenspotenziale beschrieben.

2.3.1 Entstehung von Starkregen

Nach der Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) handelt es sich bei Starkniederschlägen um massive Niederschlagsmengen, die in sehr kurzer Zeit von 5 Minuten bis maximal 6 Stunden hintereinander auftreten und oft lokal sehr begrenzt sind. Sie entstehen aus lokal auftretenden, kleinräumigen, stark konvektiven Gewitterzellen wie zum Beispiel Kumulonimbus-Wolken (DWD 2016). Starkregen entsteht, wie andere Niederschlagsarten auch, zunächst durch natürliche Konvektion: Warme, wassergesättigte Luft steigt in Bodennähe auf und kühlt sich dabei langsam trockenadiabatisch ab. Dabei kondensiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf zu Wasser und latente Wärme wird freigesetzt. Diese wiederum unterstützt das Aufsteigen der Luftmassen zusätzlich. Die in Abhängigkeit vom Taupunkt einsetzende konvektive Wolkenbildung wird dadurch verstärkt und die Wolken werden in noch größere Höhen getrieben (DWD 2016). Folge davon können die markanten ambossförmigen Hitzegewitterzellen sein. Starke vertikale Strömungen innerhalb einer solchen Gewitterzelle verhindern zunächst das Abregnen von kleineren Regentropfen, die erneut in die Höhe getrieben werden, wobei sich Eiskristalle und Wassermoleküle anheften. Dies wirkt sich wiederum verstärkend auf die Größe der Tröpfchen aus. Dadurch kann es, nachdem die gewachsenen Tropfen aufgrund ihres Gewichtes nicht mehr von dieser aufwärts gerichteten Strömung gehalten werden können, zu einem starken Regen oder Hagel kommen (DWD 2016). Der Zusammenhang zu warmen Luftmassen begründet auch die Tatsache, dass im Jahresgang vornehmlich die Monate Mai bis September von Starkregen betroffen sind, da nur in diesen Monaten in Mitteleuropa die Temperatur eine solch intensive Konvektion ermöglichen (BECKER et al. 2016). Hier liegt auch die Basis für die Annahme, dass durch steigende Temperaturen, die zu stärkerer Konvektion führen, ein Zusammenhang mit dem Klimawandel denkbar ist (BECKER et al. 2016). Der Trend einer Zunahme von diesen lokalen konvektiven Gewitterzellen und Starkregenereignissen lässt sich entsprechend der Literatur unter anderem bei PIEPER

et al. (2016), BECKER et al. (2016) oder BOESSENKOOL et al. (2016) bereits heute anhand von statistischen Zeitreihenbetrachtungen feststellen. Daher ist davon auszugehen, dass sich äquivalent auch die Schadensauswirkungen durch Sturzflutereignisse und dadurch initiierte Massenbewegungen erhöhen könnten. Dies begründet maßgeblich das wissenschaftliche, öffentliche und ökonomische Interesse an diesem Themengebiet und spiegelt sich in einer markanten Zunahme an Publikationen, populärwissenschaftlichen Artikeln und insbesondere Handlungsempfehlungen für Kommunen von Seiten der öffentlichen Hand wider (u.a. ILLGEN 2017, DEUTSCHER STÄDTETAG 2015, LAW 2018).

2.3.2 Schadenspotenziale

Von solchen intensiven und kurzzeitigen Starkniederschlägen sind häufig nur wenige kleine Einzugsgebiete lokaler Entwässerer wie Bäche oder sonst nicht wasserführende Gerinne in den Vorflutern betroffen. Dadurch kommt es in der Regel nicht zu einem flächendeckenden Hochwasser im Vorfluter, wie dies bei großräumigen Niederschlagswetterlagen der Fall ist. Vielmehr beschränken sich die Auswirkungen im Wesentlichen auf die Einzugsgebiete in den betroffenen Regionen, die der Niederschlagswirkung direkt ausgesetzt sind. Die Größe der betroffenen Einzugsgebiete variiert dabei und bezieht sich nach PETERSEIM et al. (2013) zumeist auf kleinere Einzugsgebiete von teilweise nur 10 bis 100 km².

Neben den dadurch kurzzeitig massiv erhöhten Pegelständen und Abflussmengen in den dem Abfluss dienenden Bächen bzw. Gerinnen können unter bestimmten landschaftlichen Bedingungen, in denen ein ausreichendes Gefälle vorliegt, sogenannte lokale Sturzfluten ausgelöst werden (BEYER 2016). Hierbei wird durch die erhebliche Wassermenge, die zum Teil innerhalb von nur wenigen Minuten auf den Boden auftrifft, die Infiltrationskapazität der Böden markant übertroffen (näher erläutert in Kapitel 2.3.3). Ein großer Teil der Niederschlagsmenge wird dann an der

Oberfläche abgeführt (SCHERRER 1996). Aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen in Kombination mit dem transportierten Sedimentanteil, der durch die massive Erosionswirkung des fließenden Wassers gegeben ist, kann eine solche Sturzflut in einem relativ kleinen Gebiet große Schäden anrichten (BEYER 2016). Ein Beispiel hierfür ist das extreme Hochwasserereignis an der Starzel, einem Nebenfluss des Neckars auf der Schwäbischen Alb. Bei diesem Ereignis, das zu den stärksten je in Deutschland gemessenen zählt, wurden innerhalb einer Stunde 240 mm Niederschlag gemessen (HOHENRAINER 2009). Die Sturzflut forderte drei Todesopfer und zerstörte entlang des Flusses liegende Ortschaften (HOHENRAINER 2009). In solchen Konstellationen wird die Kraft des Wassers durch die Menge und Art der mitgeführten Sedimente sowie das Gefälle potenziert, so dass sich aus solchen Ereignissen auch in den deutschen Mittelgebirgen Muren und Schlammlawinen entwickeln können, wie sie eher aus dem Alpenraum bekannt sind (BRONSTERT et al. 2017). Ähnliche Beobachtungen wurden auch in Teilen des Oberlaufs der Ahr am 14./15.07.2021 bei der schwersten Naturkatastrophe in der Geschichte des Bundeslandes Rheinland-Pfalz gemacht (WEHINGER et al. 2021, DIETZE et al. 2022).

Die Ausbreitung des abfließenden Wassers folgt dem Gefälle und kann damit auch Gebiete erreichen, die nicht direkt von Starkregen betroffen waren. Die Niederschlagsmenge des einzelnen Starkregenereignisses beeinflusst dabei maßgeblich als treibende Kraft die Entstehung und das Ausmaß von extremen Hangabflüssen. Daneben spielen ebenso Faktoren wie die Topographie, die Landnutzung im Einzugsgebiet, die Einzugsgebietsgröße und das Gefälle eine Rolle. Aus diesen Werten ergibt sich die sogenannte Rauigkeit der Oberfläche, die nach Manning-Strickler (siehe Kapitel 2.3.3), die für die Geschwindigkeit und die Abflussintensität entscheidend ist (ASSMANN et al. 2012).

Nach BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) sowie dem DWD (2016) gibt es jedoch keine allgemeinen Schwellenwerte für Niederschlagsmengen, ab denen man gesichert mit dem Eintreten von Sturzfluten rechnen kann. Dies hängt immer auch von den lokalen

Gegebenheiten wie beispielsweise den aufgeführten Faktoren Gefälle und Einzugsgebietsgröße ab.

Für das Ausmaß der Schäden spielt neben den genannten Faktoren die Verweilzeit des Niederschlags über einem bestimmten Gebiet eine wesentliche Rolle und die ist im Einzelfall stand heute fast unmöglich exakt vorherzusagen (DWD 2016). Die Hauptursache für quasi-stationäre konvektive Niederschlagsereignisse ist die Entwicklung neuer Niederschlagszellen an den Rückseiten vorangegangener konvektiver Gewitterzellen (MEON et al. 2009). Der DWD spricht in der Auswertung der räumlichen Verteilung von Starkregenereignissen und Sturzfluten explizit von keinem verfolgbaren Muster, sodass diese fast überall auftreten können und eine verlässliche Vorhersage in Deutschland und Rheinland-Pfalz nach jetzigem Stand nicht möglich ist (LFU RLP 2016, BECKER et al. 2016).

Die finanziellen Schäden durch erfasste Sturzflutereignisse in besiedelten Regionen sowie auch in Bereichen, in denen kritische Infrastruktur wie beispielsweise größere Straßen, Bahnstrecken oder Stromtrassen betroffen sind, wurden in der Periode von 1990 - 2007 in der Bundesrepublik Deutschland auf ca. 3 Mrd. Euro geschätzt (TYRNA & HOCHSCHILD 2010 nach HYDROTEC, FH AACHEN & DWD 2008). Allein in Rheinland-Pfalz geht das Umweltministerium für das Jahr 2018 von einem durch Starkregen verursachtem Schadensvolumen, von über 100 Millionen Euro aus (mdl. Mitt. DR. GOLL (MUEEF RLP 2018). Diese Statistik ist durch die extreme Ahrtalflut aus dem Juli 2021 sowie den weiteren Schäden an der Kyll und an anderen Orten für das Jahr 2021 mutmaßlich noch zusätzlich massiv weiter erhöht worden.

Während für Flusshochwasser bereits landesweite Gefahrenkarten erstellt wurden (u.a. MEON et al. 2009, HEGG 2005, NEAF et al. 2007), fehlen bisher flächendeckende Gefahren- und Risikokarten für den Ereignistyp „Sturzflut“ sowie „Mure und Schlammstrom“ außerhalb des alpinen Raums in den deutschen Mittelgebirgen (TYRNA & HOCHSCHILD 2010). Dies hängt einerseits damit zusammen, dass diese Ereignisse im allgemeinen Bewusstsein eher auf den alpinen Raum beschränkt sind

und daher bislang vielerorts in ihrem Schadenspotenzial unterschätzt wurden und andererseits die notwendigen, für den Naturraum angemessenen Modellierungsansätze fehlen (REISCHL 2017, HAGGE-KUBAT 2020). Diese müssten, bevor flächendeckende Kartierungen erstellt werden können, zunächst durch verschiedene Fallstudien für unterschiedliche Natur- und Siedlungsräume erprobt und validiert werden (TYRNA & HOCHSCHILD 2010). Erste Arbeiten für das Mittelrheintal dazu finden sich unter anderem bei REISCHL (2017) und JOHNEN (2017) sowie WERNER (2018), HAGGE-KUBAT (2020) und BAUMGÄRTNER (2020) unter Verwendung verschiedener methodischer Ansätze.

2.3.3 Oberflächenabflussprozesse

Bei Starkregenereignissen tragen die verschiedenen Geländeformen je nach Aufbau, Nutzung und Relief unterschiedlich zum oberflächlichen Wasserabfluss bei. Auf gering durchlässigen, flachgründigen Böden kommt es in der Regel zu einem sofortigen oder leicht verzögerten Oberflächenabfluss, während auf Flächen mit durchlässigen, tiefgründigen Böden mit großem Porenvolumen viel Wasser versickern und zurückgehalten werden kann (SCHERRER & DEMUTH 2007).

Diese Prozesse sind schematisch Abbildung 11 dargestellt. Neben dem oberflächigen Abfluss kann das infiltrierte Wasser auch in permeablen Bodenschichten unterirdisch der Gravitation folgend als Zwischenabfluss, auch als Interflow bezeichnet, bis ins Grundwasser oder in den Vorfluter fließen (BEVEN 1989). Nähere Beschreibungen zum Phänomen Interflow sind unter anderem in FLEIGE & HORN (2000) & BEVEN (1989) zu finden.

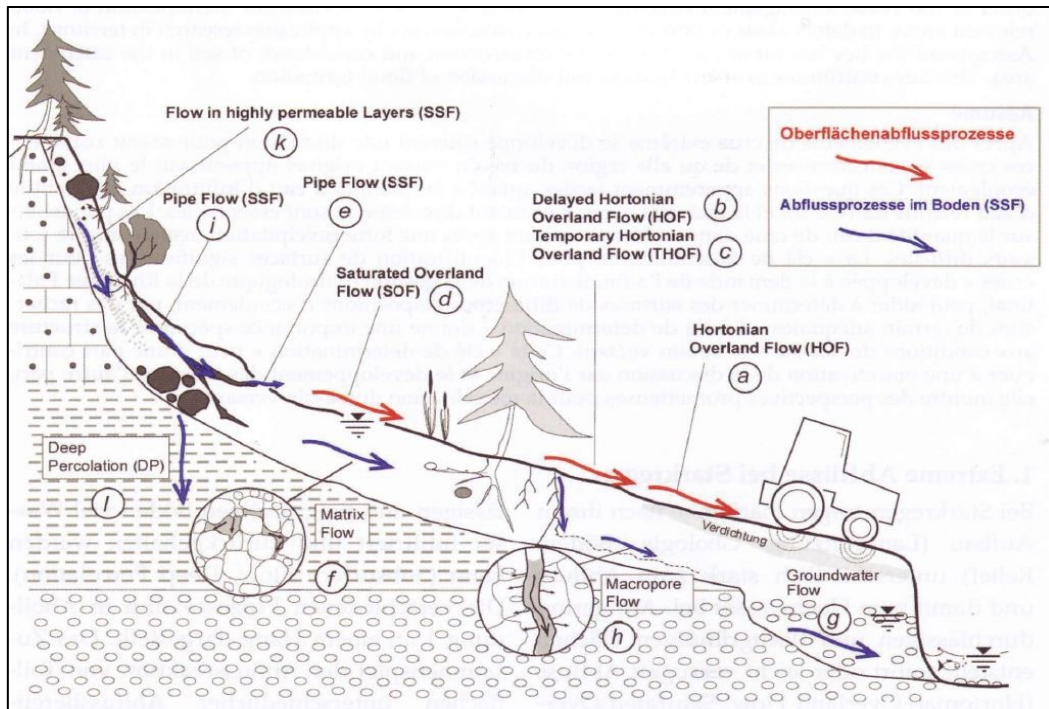


Abb. 11: Hangbezogene Abflussprozesse bei Niederschlagsereignissen (verändert nach Scherrer & Demuth 2007)

Bereits HORTON (1933) stellte im Rahmen von ersten Infiltrationsuntersuchungen fest, dass Oberflächenabfluss dann entsteht, „wenn die Niederschlagsintensität die momentane Infiltrationsrate des Bodens übersteigt“ (NAEF 2004 nach HORTON 1933). In der Literatur (u.a. MEON et al. 2009, HÜMANN 2012) wird dieser nach seinem Entdecker auch „Hortscher Landoberflächenabfluss“ genannt und dabei in mehrere verschiedenen Arten untergliedert (vgl. Abb. 11).

Insgesamt hängt die Entstehung des Oberflächenabflusses stark von der Art, der Nutzung und der Vegetationsbedeckung des jeweiligen Bodens ab. Die Bodenbearbeitung beeinflusst die Bodenstruktur und damit die Infiltrationsfähigkeit des Bodens bei Niederschlägen. Eine hohe Infiltrationskapazität des Bodens ist somit die Grundvoraussetzung für einen geringen Oberflächenabfluss bei Starkregenereignissen (BERG et al. 2012). So tritt Oberflächenabfluss in den mitteleuropäischen, gemäßigten Klimaregionen bei üblichen Niederschlagsereignissen vor allem bei (teil-) versiegelten Flächen, bei anthropogen verdichteten Böden mit sehr niedriger Infiltrationskapazität sowie bei gefrorenen

Böden auf (BOTT 2002). Im Gegensatz dazu wird es bei tiefgründigen Böden mit einem hohen Porenvolumen und damit hoher Infiltrationskapazität oder Flächen mit hohem Vegetationsvorkommen wie zum Beispiel bei Wäldern mit hoher Interzeption kaum zu Oberflächenabfluss innerhalb einer üblichen Niederschlagsdauer und Intensität kommen. BOTT (2002) führt weiter aus, „dass basierend auf Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes lediglich hundertjährige Starkniederschlagsereignisse in der Lage sind, selbst unter Wald Oberflächenabfluss hervorzurufen“ (BOTT 2002).

Neben dem klassischen Oberflächenabfluss nach HORTON (1933) gibt es darüber hinaus den sogenannten *Sättigungsflächenabfluss*. Hierbei handelt es sich um Landflächenabfluss von gesättigten bzw. auf gesättigten Böden, welche bereits über eine gewisse Zeit einen Teil ihrer Infiltrationskapazität gesättigt haben. Dann fließt unabhängig von der Niederschlagsintensität jede weitere Wasserzugabe oberflächlich ab (WEILER 1999). Zum Sättigungsflächenabfluss trägt häufig noch zusätzliches Wasser bei, welches bereits infiltriert war und als sogenannter „Return Flow“ wieder an die Oberfläche tritt. Im eigentlichen Sinne besteht Sättigungsabfluss aber nur aus Niederschlag, der direkt auf gesättigte Flächen fällt (HÜMANN 2012). Niederschlag, der direkt auf bereits fließendes Gerinne oder eine bestehende Wasserfläche fällt, gehört ebenfalls dazu und erzeugt die schnellste Reaktion in Form von unverzögertem Abfluss (BOTT 2002).

Zusätzlich dazu kann es bei feinkörnigen Böden zu Verschlammung kommen, was eine weitere Reduzierung der Infiltrationskapazität des Bodens zur Folge hat (MEON 2009, HÜMANN 2012). So ist es in der Regel eine Kombination aus Sättigungsüberschuss und massiv reduzierter Infiltrationskapazität des Bodens, die die Entstehungsbedingungen für ein Sturzflutereignis maßgeblich bestimmt, da bei einem Starkregenereignis in der Regel innerhalb kürzester Zeit so hohe Niederschlagsmengen anfallen, dass selbst bei relativ tiefgründigen Böden die Zeit nicht ausreicht, um diese Wassermengen aufzunehmen (SCHERRER 1996). Das Zusammenwirken dieser Abflussreaktionen verschiedener Böden und Teilflächen mit

unterschiedlichem Bewuchs und Relief innerhalb eines Einzugsgebietes bestimmt letztlich die abfließende Wassermenge und damit das Schadenspotenzial (SCHERRER & DEMUTH 2007).

Bei steigenden Wasserständen in den als Abfluss dienenden Fließgerinnen nehmen auch die die Fließgeschwindigkeit und entsprechend die Schubkraft des Wassers zu. Die dadurch erhöhte kinetische Energie verstärkt Sediment- und Geschiebetransport. Es kommt daraufhin zu Sohl- und Ufererosion in den Gerinnebetten. Weiterhin ermöglicht die reduzierte Scherfestigkeit durchnässter Böden den Kollaps von Böschungen, der durch Unterspülung noch weiter begünstigt wird (PRINZ & STRAUSS 2012). Insbesondere an steilen Hängen im Uferbereich werden dadurch Massenbewegungen wie Erdrutsche oder Murgänge begünstigt, die neben Boden auch Grobmaterial und Gesteinsfragmente mobilisieren können. Murgänge entstehen bevorzugt dann, wenn kaum verfestigtes Lockermaterial auf steilen Hängen durch anhaltende oder starke Regenfälle wasserübersättigt wird und schließlich in einem Strom aus Schlamm und größerem Gesteinsmaterial talabwärts fließt (COSTA 1984). Dieser Vorgang wird im folgenden Kapitel 2.4 näher betrachtet.

2.4 Murgang und Hangmure

Um die Gefahren von Murgängen antizipieren zu können und sie auf dieser Basis modellhaft zu erfassen, ist es notwendig ihre Entstehung, ihre Bewegung und ihre Schadenswirkung differenziert zu betrachten. Zu beachten ist, dass Muren in ihrer Allgemeinheit bis heute noch ein Quell wissenschaftlicher Fragestellungen und Forschungen sind und daher noch nicht abschließend in allen Facetten erklärbar sind (SCHEID 2011, SIMONI et al. 2020).

Generell bezeichnet man als Muren, die auch Schlamm- bzw. Schuttströme genannt werden, eine Form der fließenden gravitativen Massenbewegungen, bei denen sich Lockermaterial, Felsen, organisches Material und Wasser durch Einfluss der

Gravitation unter enormen Geschwindigkeiten und Energiemengen hangabwärts bewegen (COSTA 1984, HUNGR et al. 2014, TAKAHASHI 1981, vgl. Abb. 12). Diese natürlichen Prozesse sind vornehmlich aus dem alpinen Raum bekannt. Sie können dort große Ausmaße und Zerstörungskraft entwickeln. Es sind in kleinerem Maßstab auch Fälle aus den deutschen Mittelgebirgen bekannt, die ihrerseits vor allem durch Unwissen und damit einhergehende fehlende Sicherungs- und Schutzmaßnahmen zu teilweise massiven Schäden an Gebäuden oder Infrastruktur führten (VOGEL et al. 2017, OZTURK 2018, HAGGE-KUBAT et al. 2022).



Abb. 12: Fotoaufnahme während eines Murgangs im Schweizer Spreitgraben vom 23.06.2010 (Kanton Bern 2010)

Der Einfluss der Wassermenge kann bei diesen Prozessen variieren, Wasser ist jedoch in der Regel der initiale Auslöser der Bewegung (TOGNACCA 1999, RICKENMANN 2002).

Daher werden Murgänge vornehmlich durch Starkregenereignisse oft auch im Zusammenhang mit intensiver Schneeschmelze ausgelöst. Dabei ist nicht unbedingt die absolute Wassermenge ausschlaggebend, sondern das Verhältnis des aktuellen Abflusses zum üblichen Wasserangebot der Region (SCHEID 2011, siehe Kap 2.4.2).

Nach SCHEID (2011) bestehen Murgänge generell aus einem Gemisch von bis zu 90% Feststoff unterschiedlicher Korngrößen und Wasser. Es können durch die transportierte Energie außerdem organische Materialien wie Wurzelstöcke oder ganze Baumstämme mitgeführt werden. Die höchste Geschiebekonzentration innerhalb eines Murgangs befindet sich an der Front, dahinter folgt häufig ein flüssigeres Gemisch aus Wasser und Geröll (RICKENMANN 2001, Abb. 13). Der Wassergehalt innerhalb eines Murschubes ist an der Murfront (Murkopf) demnach wesentlich geringer als am Murschwanz. Der Murkopf besteht also hauptsächlich aus Blöcken und grobem Material mit einem relativ geringen Wasser- und Feinmaterialanteil. Die Verteilung der Korngrößen des Murgangmaterials nimmt von der Murfront bis hin zum Murschwanz kontinuierlich ab (BUNZA 1982). Der Murschwanz besteht somit in der Regel zu einem hohen Prozentsatz aus Wasser und Feinsedimenten (TAKAHASHI 1981).

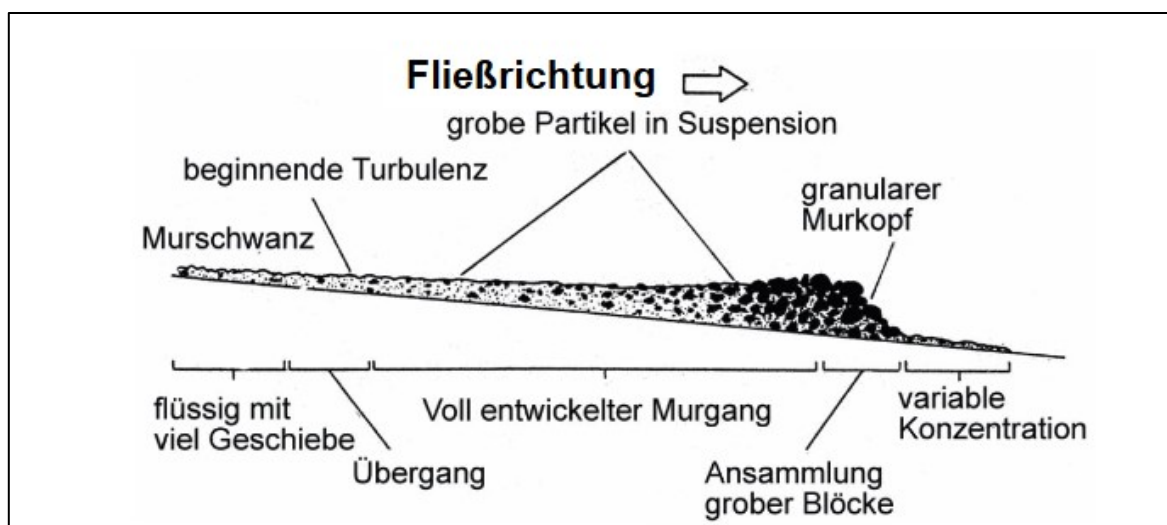


Abb. 13: Schematische Darstellung eines Murschubs (verändert nach PIERSON 1986)

Generell gelten Muren neben Schneelawinen als eine der gefährlichsten und unkontrollierbarsten Naturgefahren im alpinen Raum und sie richten dort regelmäßig massive Schäden an Infrastruktur und Menschenleben an (RICKENMANN 2001, DOWLING & SANTI 2014). Murgänge sind ein natürlicher und durchaus üblicher erosiver Prozess, der stark zur Landschaftsgestalt und Reliefbildung in gebirgigen Regionen beiträgt. Wie alle Massenbewegungen werden Muren erst zu einer Naturkatastrophe, wenn Menschen, Gebäude oder die Infrastruktur unmittelbar davon betroffen sind (HÜRLIMANN et al. 2003).

2.4.1 Fließtypen

Je nach Materialzusammensetzung gibt unterschiedliche Ansätze zu Beschreibung des Fließverhaltens von Murgängen (RICKENMANN 2014). Grundsätzlich werden murgangsartige Fließprozesse in zwei Hauptkategorien eingeteilt. Synonym dazu werden auch in dieser Arbeit die Prozesse nach der Definition von WEHINGER (2022) speziell für das Mittelgebirge verwendet:

Gerinnemurgang

Unter einem Gerinnemurgang, im Folgenden kurz Murgang oder Mure genannt, versteht man ein sich talwärts bewegendes Gemisch aus Feststoffen wie Gesteinsmaterial verschiedener Korngrößen, Holz u.a. und Wasser. Die Massenbewegung steht meist im Zusammenhang mit einem Starkregenereignis und ist zumindest im oberen Hangbereich an morphologisch vorgegebene Rinnen, Tiefenlinien o.ä. gebunden, die bei normalen Witterungsverhältnissen meist trocken sind. Eine weitere Voraussetzung ist das Vorhandensein von mobilisierbarem Lockergesteinsmaterial wie Geröll oder Rinnenfüllungen. Der Anteil der transportierten Feststoffe liegt in der Regel zwischen ca. 50 und 70 % des

Gesamtvolumens (LGB 2022). Gerinnemurgänge zeichnen sich zudem durch ein schubartiges Fließverhalten aus, das sich recht deutlich von normalen Reinwasserabfluss unterscheidet (RICKENMANN 2014). Murgänge haben im Vergleich zu „normalen“ Gerinnehochwässern eine größere Fließtiefe, führen zu deutlich markanteren Veränderungen im Gerinne und transportieren oft erhebliche Geschiebemengen zu Tal. Bei Murgängen mit hohen Feststoffkonzentrationen hat das Wasser-Gestein-Gemisch eine wesentlich höhere Zähigkeit als reines Wasser allein (TOGNACCA 1999). Damit solche Geröllmassen überhaupt in Bewegung geraten, sind zusätzlich zum Wasser ausreichend große Mengen an Lockermaterial sowie ein steiles Gefälle erforderlich. Sind in einem Gerinne flache Ufer vorhanden, so bilden die Murgänge durch Materialablagerungen entlang des Bachbettes gewissermaßen ihre eigene seitliche Begrenzung des Fließquerschnittes, so genannte Levées oder Murwälle (Abb. 14). Das Geschiebe wird im flacheren Gelände dann in unregelmäßiger Form abgelagert (IVERSON 1997). Die hohe Zähigkeit bzw. die große Kornreibung bei einem langsamen fließenden Gemisch führt zu einem relativ abrupten Anhalten des Frontbereiches von Murgangschüben in flacherem Terrain. Die vordersten Ablagerungen sind deshalb meist deutlich vom alten Terrain abgegrenzt (RICKENMANN 2014).



Abb. 14: Murgangskanal mit deutlich erkennbarer Tiefenerosion und Levees in den Neuseeländischen Southern Alps (TURNBULL et al. 2015)

Hangmure

Hierbei handelt es sich um spontane flachgründige Rutschungen, auch Hanganbrüche genannt, die zunächst dem Prozesstyp Gleiten zugeordnet werden können. Diese ereignen sich in der Lockergesteins- oder Verwitterungsdecke von Hängen. Das betroffene Material verflüssigt im Anschluss an einen initialen Abriss plötzlich, was zu erheblichen Reichweitenvergrößerungen und einem murartigen Fließen der Rutschmasse führen kann (HÜRLIMANN et al. 2015). Im Unterschied zu Muren sind die Hangmuren nicht an vorhandene Rinnen o.ä. gebunden. Gemeinsamer wesentlicher Auslöser ist die Entstehung im Zusammenhang mit Starkregen und die Fließeigenschaften. In der Regel treten Hangmuren nicht mehrfach am gleichen Ort auf und weisen auch nicht unbedingt mehrere Schübe auf (RICKENMANN 2014). Eine schematische Darstellung des Hangmurenprozesses ist in Abb. 15 dargestellt.

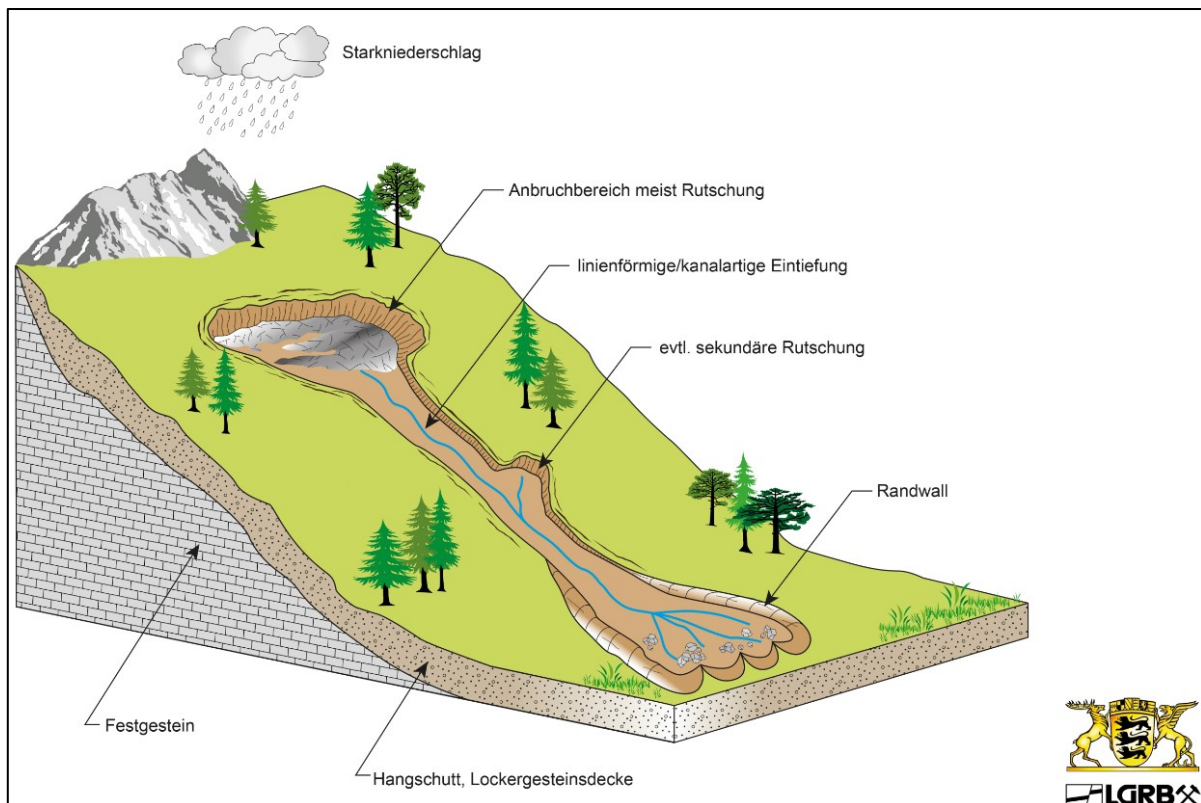


Abb. 15: Schematische Darstellung einer Hangmure (LGRB o.J.)

Nach HÜRLIMANN et al. (2015) sind Hangmuren als ungespannte Ströme von unverfestigtem körnigem Bodenmaterial an Stufenböschungen definiert. Sie entstehen in der Regel durch oberflächennahe Abrisse, wobei der niederschlagsbedingte Wassergehalt und Porenwasserdruck der unkonsolidierten Hangablagerungen durch Infiltrations- und Zwischenströmungsprozesse kritisch angestiegen ist. Obwohl die genauen Auslösemechanismen in der Literatur noch diskutiert werden und von Fall zu Fall validiert werden müssen, geht man allgemein davon aus, dass die beschriebenen hohen Infiltrationsraten und verstärkte Zwischenströmung zu einer kritischen Reduzierung der Schubspannung führen. Einhergehend mit dem Verlust der Kohäsion wird dann schlagartig körniges Bodenmaterial mobilisiert (DU ET AL. 2021, CARVEY et al. 2021, BAFU 2016, HUNGR et al. 2014). Nach einem Verflüssigungsmechanismus, der durch den immensen Porenwasserdruck und die Widerstandskraft des Oberflächenabflusses bereitgestellt wird, kann sich das verflüssigte Lockergesteinsmaterial in Kombination mit Oberflächenabfluss schnell zu

hochenergetischen Abwärtsströmungen entwickeln und suspendierten Schlamm, Kies und Holzschutt transportieren (AHMED et al. 2022, ZIMMERMANN et al. 2020, IVERSON & VALLANCE 2001, GAO et al. 2022). Der genaue Ort und das Ausmaß dieser Phänomene sind jedoch schwer vorherzusagen, was zu unzureichenden Schutzmaßnahmen und schweren Schäden an der angrenzenden Infrastruktur in Gebirgszügen führen kann. Der Hangmurenprozess ist darüber hinaus tiefergehend bei HÜRLIMANN et al. (2015), LOUP et al. (2012), ALBABA et al. (2019) und HIRSCHBERG et al. (2021) beschrieben.

Zur Unterscheidung weiterer Murgangstypen gibt es verschiedene Differenzierungskriterien, die sich auf Faktoren des transportierten Materials und deren Anteile beziehen. Ein hoher Feststoffanteil aus groben Komponenten definiert einen granularen Murgang (engl. debris-flow). Erhöht sich der Feinanteil, so spricht man von viskosem Murgang oder Schlammstrom (eng. mud-flow). Schlammströme weisen in der Regel keine größeren Gesteinsfragmente auf. Noch höhere Feinanteile treten in hyperkonzentrierten Abflüssen (eng. hyperconcentrated flows) auf (TAKAHASHI 2007, JAKOB et al. 2005).

In Hochgebirgen können bei einem einzigen Murgang dabei Geschiebemengen von insgesamt mehreren 10.000 m³ bis einigen 100.000 m³ transportiert werden (RICKENMANN 2001). Im Vergleich entsprechen die Geröllablagerungen auf einem Fußballfeld von etwa 5 m bis 50 m Höhe. Nach RICKENMANN (2001) können dabei Fließgeschwindigkeiten über 15 m/s (54 km/h) erreicht werden und mehr als 50 Tonnen schwere Blöcke verfrachtet werden. Das gesamte Material kann dabei durch nur einen Schwall transportiert werden oder durch mehrere, bei denen man dann von Murschüben spricht (PROSKE et al. 2008). Das durch einen Murgang transportierte Material reicht dann zumeist von tonigem Feinmaterial bis zu Geröllen mit mehreren Metern Durchmesser (STUMMER 2009).

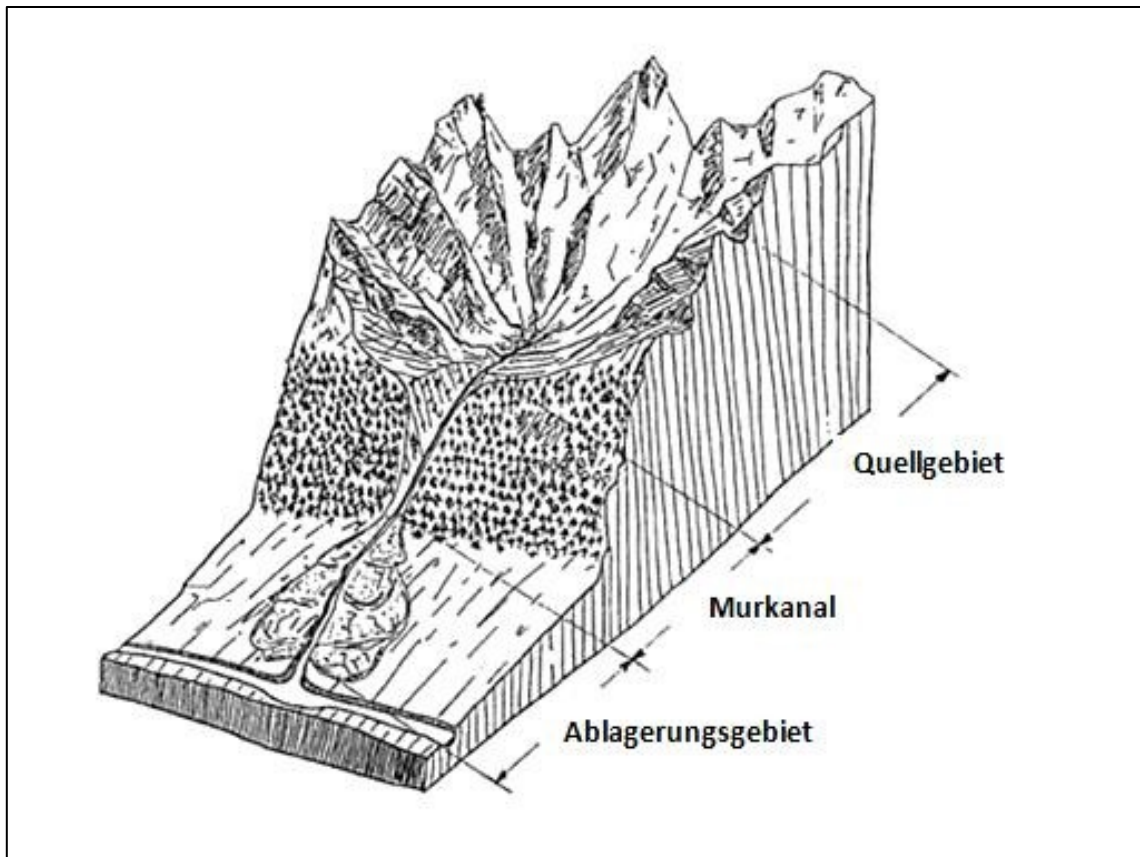


Abb. 16: Schematische Darstellung eines Murgangsausbreitungsgebiets (HÜBEL et al. 2003 nach Weber 1964)

Zur genaueren Untersuchung ihrer Fazies ist es sinnvoll Muren in drei Abschnitte ihres Bewegungsverlaufes einzuteilen (vgl. Abb. 16):

Im **Anrissgebiet**, auch Quellgebiet genannt, entsteht meistens hoch am Hangkopf der initiale Auslöser der Mure. In diesem Gebiet wird Material akkumuliert, somit verzeichnet der Murgang hier eine positive Geschiebebilanz.

In der **Transitzone**, auch Murkanal genannt, wird das akkumulierte Material weiter der Gravitation und dem Relief folgend hangabwärts transportiert. Der Murgang kann hier durch das sogenannte **Entrainment** oder mitreißen weiteres Material dazugewinnen oder bereits einen Teil seiner ursprünglichen Masse ablagern (vgl. Abb. 17). Die Geschiebebilanz kann hier also sowohl positiv als auch negativ ausfallen (SCHEID 2011, HAUSER 2011). Das Entrainment beschreibt den Vorgang des Mitreißens von Geröllmaterial auf dem Fließpfad im Gerinnebett. Ein Murgang kann dabei mit einem relativ kleinen Anrissvolumen starten und im Verlauf des Transportes durch

die Aufnahme von Material um ein Vielfaches wachsen. Die Überwachung und Analyse von Murgängen im Feldmaßstab hat gezeigt, dass die Front eines Murgangs dabei große Mengen dieses Sohlenmaterials während eines Murschubes mitreißt. Dabei kommt es zu einer massiven Volumenzunahme im Murgang und Tiefenerosion im Gerinnebett (IVERSON et al. 2011, JAKOB et al. 2005). Das Entrainment wird hauptsächlich durch den Strömungsdruck und die Schleppkraft der rapide fließenden Masse vollzogen und aufgrund einer schnellen Belastung der gesättigten Bodenschicht, in der Porendruck als Reaktion auf die anströmende Masse und deren Überlagerungsdruck massiv ansteigt. Infolge dessen wird der Reibungswiderstand des Materials gegen das Mitreißen massiv verringert (TURNBULL ET AL. 2015). Dabei ist das Gefälle des Gerinneabschnitts und die Schuttgröße entscheidend. Je steiler das Gefälle desto mehr Material wird aufgenommen (STRICKLER 2010).

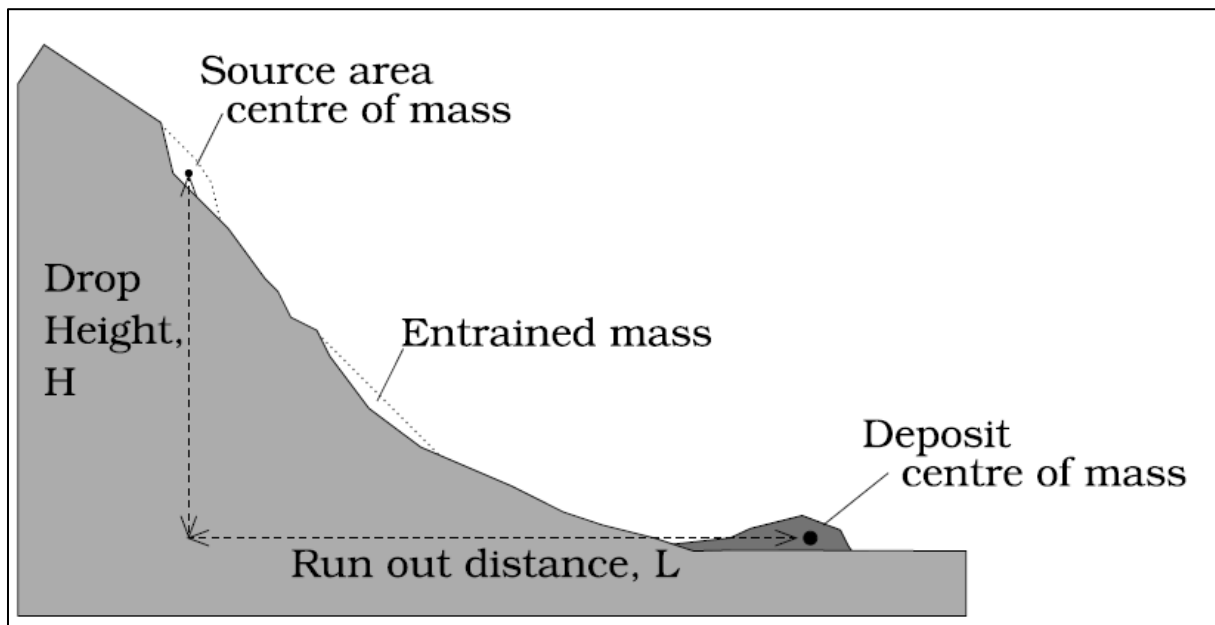


Abb. 17: Schematischer Murgangspfad mit eingezeichnetem Entrainmentvorgang (TURNBULL et al. 2015)

Im **Ablagerungsgebiet** verliert die Mure kontinuierlich oder bei Hindernissen auch schlagartig an Energie und das Material wird final abgelagert (SCHEID 2011). Der Murgang kommt damit zum Stehen und die Geschiebebilanz ist negativ (HAUSER

2011). Häufig sind Ablagerungen von Murgängen später die einzig nachweisbaren Zeichen einer vorangegangenen Muraktivität im Gelände. Ablagerungen von Murgängen zeigen dabei eine deutliche Charakteristik. Fächerartige, unsortierte und ungeschichtete Ablagerungen mit großer Korngrößenverteilung, eine scharfe seitliche Begrenzung und seitlich aus dem Gerinne ausgebrochene Murzungen sind dabei hauptsächliche Merkmale (HABERLI et al. 1991, IVERSON 1997, vgl. Abb. 18). Dabei liegen diese Murkegel vielfach auf früheren Murfrachten, welche frühere Ereignisse repräsentieren.



Abb. 18: Drohnenaufnahme eines Murkegels im Ahrtal bei Insul (Foto: T. Hagge-Kubat 15.12.2022)

Tiefergehende Grundlagen zum Prozess Gerinnemurgang werden u.a. in COSTA (1984), HABERLI et al. (1991), IVERSON (1997), TOGNACCA (1999), RICKENMANN (2001)

und TAKAHASHI (2007) und im speziellen zu Murablagerungen von CESCA (2008), SCHEIDL & RICKENMANN (2008) sowie D'AGOSTINO (2009) beschrieben.

2.4.2 Auslösung von Murgängen

Für die Auslösung eines Murgangs spielen viele Faktoren eine Rolle. Grundvoraussetzung für die Bildung von Murgängen sind das Vorhandensein von Lockermaterial, Wasser und eines genügend großen Hang- oder Gerinnegefälles (RICKENMANN 2001). Grundsätzlich gilt: „In Wildbachgerinnen können Murgänge auftreten, wenn in der Sohle genügend Geröll zum Abtransport bereitliegt. Für die Bildung eines Murgangs muss eine Mindestmenge an Gesteinsmaterial plötzlich in Bewegung geraten. Dieser Vorgang kann vor allem in steilen Gerinnen und bei Engstellen mit vorgängiger Behinderung des Materialflusses (zum Teil mit Verklausungserscheinungen), oder bei einer abrupten Zunahme der Erosion im Gerinne auftreten“ (RICKENMANN 2014). Muren werden zumeist durch einen raschen Anstieg des Wasserangebots ausgelöst. Dabei sind vornehmlich Einzugsgebiete an steilen Hängen betroffen, die durch Bäche, Rinnsale oder Tiefenlinien gekennzeichnet sind und eine hohe Akkumulation von Schutt und Feinmaterial in den Gerinnen aufweisen. Da dieses lockere Schuttmaterial sowohl gröberes Material als auch feinere sandig, schluffige Komponenten beinhaltet, kann Wasser in die Poren eindringen und erzeugt einen schlagartigen positiven Porenwasserdruck mit nachfolgendem totalen Abbau der effektiven Spannung. Das Material bewegt sich infolge dessen mit dem abfließenden Wasser viskos hangabwärts (TOGNACCA 1999).

Generell gerät Sediment in Bewegung, wenn es zu einem geotechnischen Versagen des Materials kommt. Dieses Versagen kann in verschiedenen Szenarien beschrieben werden (TAKAHASHI 2007). So kann ein Murgang durch Sohlerosion, bodenmechanische Instabilität in Form von Bodenverflüssigung oder durch das Brechen von natürlichen Dämmen entstehen. In natürlichen Gerinnen mit Gefällen

steiler als etwa 10 % gibt es nur wenige Messungen zum Geschiebetransport. Bei Gefällen steiler als etwa 20 % bis 25 % ist ein wassergesättigtes Bachbett schon nahe an der Grenze zur Instabilität und zur Auslösung von Murgängen aus dem Gerinnebett bereit, wie auch einige Laborversuche von SMART & JÄGGI (1983) zeigen (TAKAHASHI 1991, RICKENMANN 2014).

Zu einer Sohlerosion, auch *progressive Erosion* genannt, kommt es, sobald der nötige minimale kritische oberflächige Abfluss erreicht wird, bei dem die Scherspannung des fließenden Wassers groß genug ist, um einen Teil der locker geschichteten Sohlschicht zu erodieren (STUMMER 2009). Plötzliche starke Niederschläge, wie die in Kapitel 2.3 betrachteten konvektiven Starkregenereignisse, verursachen hierbei die Bildung eines starken Oberflächenabflusses, welcher durch die Geländemorphologie in der Regel in engen Kanälen gesammelt zu einer hydraulischen Belastung der Lockermaterialsohle führt (TOGNACCA 1999). Damit dieser Oberflächenabfluss einen Murgang erzeugen kann, muss er einen kritischen Abflusswert überschreiten. Dieser Wert ist gebietsspezifisch für jede einzelne Mure und jeden einzelnen Hang unterschiedlich, da er sich aus Faktoren wie Gefälle, Lockergesteinsparametern und dem kritischen Scherwiderstand berechnet. Wird dieser kritische Abfluss nicht erreicht, so entsteht kein Murgang, sondern maximal verlagertes feinkörniges Sediment (TOGNACCA 1999). Wird er jedoch überschritten, löst sich durch die kombinierte Belastung der Sohle ein Murgang aus, sobald genügend Material plötzlich in Bewegung gerät (RICKENMANN 2001).

Bei einer Bodenverflüssigung als Murgangsauslöser muss nach TOGNACCA (1999) zwischen innerer oder äußerer Instabilität des Bodens unterschieden werden. Äußere Ursachen haben eine Zunahme der auf den Boden wirkenden Spannung wie zum Beispiel durch den Anstieg des Grundwasserspiegels oder den Abbau der kapillaren Spannung zur Folge. Innere Ursachen, die eine Instabilität des Bodens zur Folge haben und zu einer Verminderung der inneren Scherfestigkeit führen, sind beispielsweise

die Veränderung der chemischen Struktur oder das Auftauen von Permafrostböden in Hochgebirgsregionen.

Beim letzten Szenario kommt es durch den Bruch eines natürlichen Dammes zum Murgang. Dabei wird das unkonsolidierte Material auf der Rückseite eines natürlichen Dammes, welcher beispielsweise durch eine Rutschung oder Verklausung von Vegetation entstand, erodiert, mobilisiert und fließt dem Gerinne folgend hangabwärts (TAKAHASHI 1991, STUMMER 2009). Eine besondere Rolle spielt dabei in das Gerinnebett eingebrachtes Totholz. In gebirgigen und bewaldeten Einzugsgebieten kann Holz durch Erosion und Rutschungen oder durch Sturm mit Windwurf in die Bachgerinne gelangen. Bei starken Abflussereignissen verursacht Schwemmholz oft Probleme durch Verklausungen bei Brücken, Durchlässen oder auch natürlichen Engstellen. Die zwei wichtigsten Auswirkungen dabei sind:

- (i) Verklausungen oder temporäre Blockierungen bzw. Behinderungen des Abflusses von Wasser und Geschiebe in natürlichen Gerinneabschnitten (RICKENMANN 2003)
- (ii) Das Ausbrechen des Abflusses aus dem eigentlichen Gerinnebereich kann zu großen seitlichen Ablagerungen und Übermürungen führen (RICKENMANN 2014)

Eine andere häufige und unerwünschte Folge bei zu viel Schwemmholz in Gerinnen ist das teilweise oder vollständige Verklausen von offenen Geschieberückhaltesperren, wodurch eine beabsichtigte Dosierwirkung bezüglich des Geschiebetransportes während eines Murgangereignisses beeinträchtigt oder vollständig unterbunden wird. Im Weiteren kann es dabei auch zur Zerstörung von Brücken kommen, oder das Schwemmholz kann durch Anprall an Gebäuden Schäden verursachen (RICKENMANN 2014).

In Bezug auf die Muren, die in den deutschen Mittelgebirgen vorzufinden sind, kann nach OZTURK et al. (2018), HAGGE-KUBAT et al. (2020) und REISCHL (2017) vor allem von

progressiver Sohlerosion in Kombination mit Verklausungserscheinungen als initialem Auslöser ausgegangen werden.

Tiefergehende Beschreibungen von Auslösungsprozessen von Murengängen, werden unter anderem von TAKAHASHI (1991), TOGNACCA (1999), GAMMA (2000), WIECZOREK & GLADE (2005), SCHEID (2011), TAKAHASHI (2014), RICKENMANN (2014) oder GUZZETTI et al. (2007) beschrieben.

2.4.3 Faktoren für die Entstehung von Murgängen und Hangmuren

Im Wesentlichen bestimmen die morphologischen, geologischen und hydrologischen Verhältnisse eines Einzugsgebietes dessen Disposition für die Entstehung von Murgängen. Dieses Konzept einer Murgangsdisposition beschreiben unter anderem ZIMMERMANN et al. (1997) und GOSTNER et al. (2008) in ihren Arbeiten. Darin führen sie eine Grunddisposition und eine variable Disposition für die Entstehung eines Murgangs auf. Für die initiale Auslösung eines Murganges ist dann eine markante extrinsische Systembelastung erforderlich, die je nach aktueller Größe der Disposition unterschiedlich groß sein muss. (BOVIS & JAKOB 1999, Abb. 19). Nachfolgend werden die verschiedenen Dispositionsarten nach ZIMMERMANN et al. (1997) näher erläutert:

1. Grunddisposition (basic disposition):

Einfluss auf räumliche Verteilung von Murgang-Gerinnen

- Relief: Neigung des Gerinnes, Höhenlage, Exposition
- Verfügbarkeit von Schutt und Art der Materialdepots im Anrissgebiet und auf der Transportstrecke
- Geologie und Materialeigenschaften (geotechnische Eigenschaften)

2. **Variable Disposition:**

variable Einflüsse auf die Murgangentstehung

- Jahreszeit
- Materialverfügbarkeit: stetige Akkumulation und episodischer Export von Geschiebe
- Materialeigenschaften: durch Niederschläge, Schneeschmelze, etc. beeinflusste Stabilität

3. **Auslösendes Ereignis:**

kurzfristige Belastung des Systems mit hoher zeitlicher Variabilität

- niederschlagsabhängige Ereignisse: kurze, intensive Niederschläge und lange Regenperioden
- niederschlagsunabhängige Ereignisse: Schnee- und Eisschmelze, Wassertaschen- und Seeausbrüche, Bruch respektive Überfluten natürlicher Dämme, Felssturz, Erdbeben, etc.

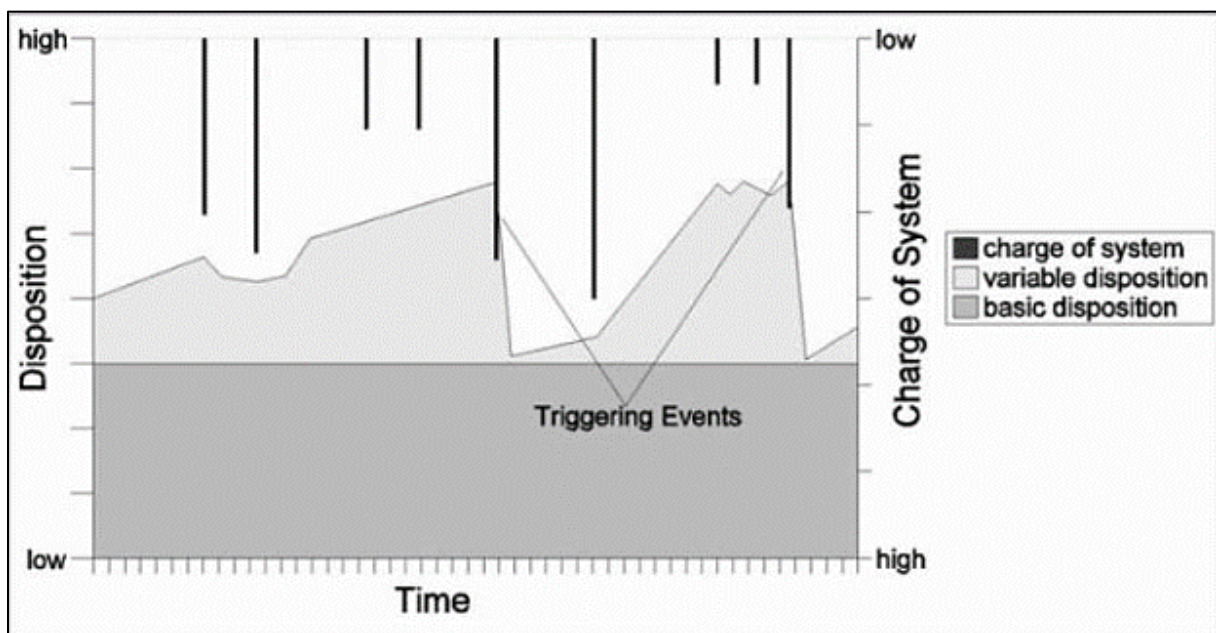


Abb. 19: Verbindung von Grunddisposition, variabler Disposition und auslösendem Ereignis von Murgängen (GOSTNER et al. 2008 nach ZIMMERMANN 1990).

Der Suche nach kritischen hydrologischen Bedingungen für die Auslösung von Murgängen liegen vielfach folgende Thesen zugrunde (nach ZIMMERMANN et al. 1997):

- i) Es gibt Niederschlags-Schwellenwerte für die Auslösung von Murgängen.
- ii) Je länger das Niederschlagsereignis dauert, desto geringer ist die für eine Auslösung nötige Regenintensität.
- iii) Je mehr „Vorregen“ gefallen ist (Bodensättigung), desto weniger Ereignisniederschlag ist für die Auslösung nötig.

Definition von zentralen Begriffen

Mit Hilfe dieser Vorannahmen können verschiedene Auswertungskonzepte erstellt werden (STRICKLER 2010). Die Vielzahl von Begriffen, die bei der Analyse von murgangrelevanten Niederschlägen unterschiedlich verwendet werden, macht es jedoch notwendig, im Folgenden zentral verwendete Begriffe zu definieren (nach GUZZETTI et al. 2007):

Als **Ereignisniederschlag** wird ein Niederschlagsereignis bezeichnet, das zur Auslösung eines Murgangs geführt hat. Dabei interessieren vor allem die für eine Grenzwertbestimmung zentralen Parameter Dauer und Intensität, deren Bestimmung je nach Datenlage mehr oder weniger Spielraum lässt. Aus diesem Grund fehlt bis heute eine allgemein gültige und akzeptierte Definition von Ereignisniederschlägen (GUZZETTI et al. 2007). In dieser Arbeit werden in Anlehnung an ZIMMERMANN ET AL. (1997) Niederschlagsereignisse mit nachfolgender Murgangauslösung werden als „Ereignisse“ und solche ohne Murgangauslösung als „Nicht-Ereignisse“ bezeichnet.

Die **Niederschlagsdauer** bezeichnet die Gesamtdauer des auslösenden Niederschlagsereignisses (z.B. WIECZOREK & GLADE 2005, GUZZETTI et al. 2007). Andere Autoren bezeichnen damit die Dauer bis zur Auslösung des Murgangs

(„critical rainfall“, z.B. MCARDELL & BADOUX 2007). Die letztgenannte Definition stellt die für eine Auslösung tatsächlich erforderliche Niederschlagsdauer besser dar. Ihre Anwendung setzt jedoch voraus, dass der genaue Zeitpunkt der Auslösung bekannt ist. Diese Information ist in der Regel nur in Einzugsgebieten mit einer Messstation und lokal installierten Pluviometern verfügbar. (STRICKLER 2010). Für die Verwendung der gesamten Niederschlagsdauer spricht jedoch, dass Murgangereignisse mit mehreren Schüben über einen längeren Zeitraum ablaufen können, also nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses ausgelöst werden.

Unter **Niederschlagsintensität** versteht man die Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit, die, wenn nicht anders angegeben, in Millimeter pro Stunde angegeben wird. Meist wird nach GUZZETTI et al. (2007) die mittlere Intensität eines Niederschlagsereignisses und nicht der stündliche Maximalwert verwendet. Da dieser jedoch im Nachhinein nicht immer zweifelsfrei bestimmt werden kann, wird in dieser Arbeit, wie auch in vielen anderen vergleichbaren Studien, auf den maximalen Stundenwert zurückgegriffen (z.B. HIRSCHBERG et al. 2019, COSTA & FRATTINI 2001).

Vorregen oder antecedent rainfall bezeichnet schließlich die Niederschlagsmenge, die in einem bestimmten Zeitraum vor dem eigentlichen Murgangs-auslösenden Niederschlag gefallen ist (STRICKLER 2010).

Eine zentrale Rolle in der Gefährdungsanalyse spielt der empirische Niederschlagsgrenzwert (rainfall threshold). Auf seiner Grundlage werden Niederschlagsereignisse nach ihrer Intensität und Dauer (kurz I-D-Grenze) in murgangrelevante und nicht murgangrelevante Ereignisse unterteilt. (WIECZOREK & GLADE 2005, GUZZETTI et al. 2007; siehe Abbildung 20). Wie STRICKLER (2010) beschreibt, wurden erste wichtige Meilensteine in der Forschung über Niederschlagsgrenzwerte durch die Arbeiten von CAMPBELL (1975) entwickelt, der die Beziehung von Starkniederschlägen mit der Auslösung von Hangmuren, die in Murgänge übergehen betrachtete. Ihm folgte CAINE (1980) der als erster einen globalen I-D-Grenzwert beschreibt und GUZZETTI et al. (2008) die ein Update der Arbeit von

CAINE unter Verwendung von über 2500 Niederschlagsereignissen weltweit lieferte. Letztere haben bedeutend tiefere globale Grenzwerte als Caine gefunden (STRICKLER 2010).

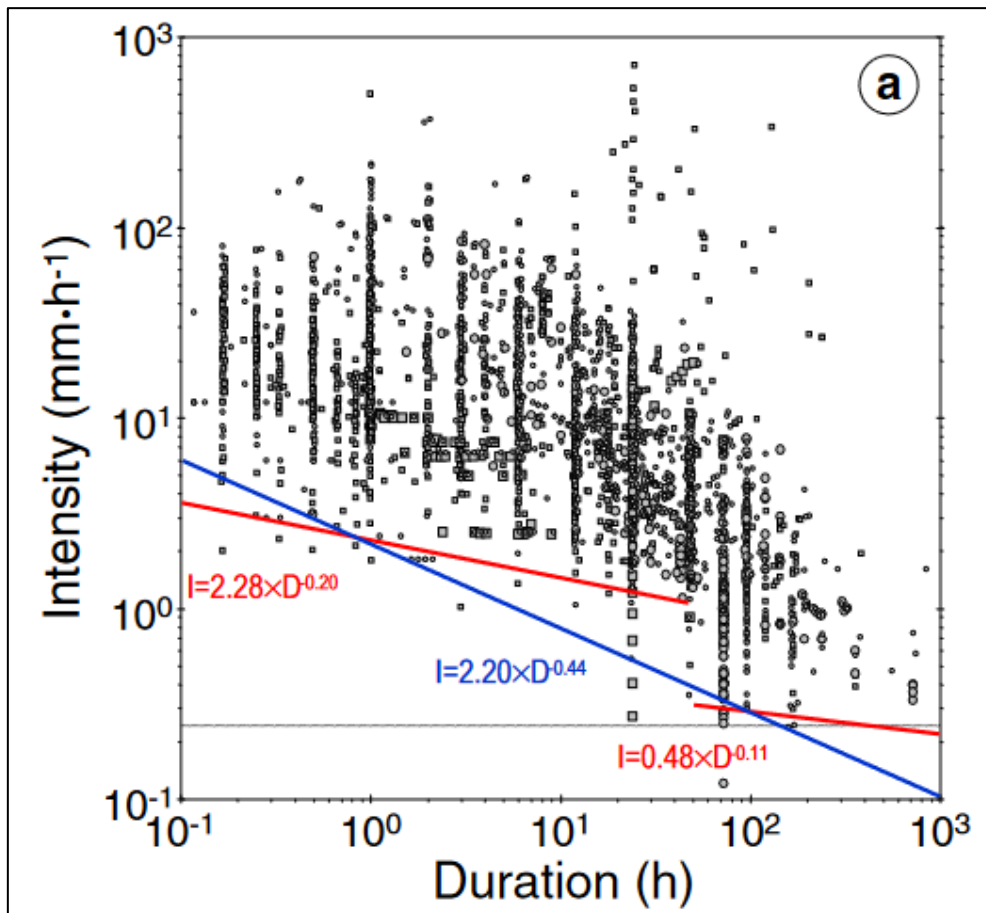


Abb. 20: Globaler I-D-Grenzwert für Rutschungen und Murgänge nach Guzzetti et al. (2008); schwarze Punktsymbole stehen für auslösende Niederschlagsereignisse; die roten Linien stehen für einen nach der Niederschlagsdauer (Grenze bei 48 h Dauer) spezifizierten Grenzwert, die blaue Linie für einen einfachen linearen Grenzwert in Anlehnung an Caine 1980 (Strickler 2010)

Primäre klimatische Faktoren als auslösende Ereignisse sind konvektive Starkniederschläge und intensive Schneeschmelze (u.a. HAEBERLI et al. 1991). Sekundäre klimatische Faktoren sind laut WIECZOREK & GLADE (2005) die einem auslösenden Regenereignis vorausgehenden Niederschlagsverhältnisse (Vorregen). Ihr Einfluss auf die Auslösung ist weniger genau bestimmbar als derjenige von Starkniederschlägen, weil oft keine klare Abgrenzung zu einem Wassereintrag

beispielsweise durch Quellen oder Grundwasser möglich ist. Der Einfluss von Vorregen auf die Auslösung von Murgängen hängt vom regionalen Klima, den lokalen Bodeneigenschaften und den geotechnischen Eigenschaften des Anrissgebietes ab (WILSON & WIECZOREK 1995, WIECZOREK & GLADE 2005). Als auslösungsrelevant haben sich bisher Vorregenperioden von 5 bis 30 Tagen (teilweise auch kürzer oder länger) erwiesen, wobei der lokal relevante Wert für jedes Einzugsgebiet spezifisch zu ermitteln ist (WIECZOREK & GLADE 2005, STRICKLER et al. 2010). ZIMMERMANN et al. (1997) verwendeten in ihren viel zitierten Untersuchungen zu Murgangereignissen in der Schweiz Perioden von 5, 20 und 60 Tagen. Sie fanden jedoch keinen eindeutigen Einfluss des Vorregens auf die Auslösung von Murgängen. BOVIS & JAKOB (1999) erwähnen ein ähnliches Konzept: Darin werden Einzugsgebiete aufgrund des Auslösemechanismus und der Murgangaktivität in **Verwitterungs- und Transport-limitierte Systeme** unterschieden:

In Verwitterungs-limitierten Systemen ist die Entstehung von Murgängen durch ein auslösendes Ereignis erst möglich, wenn eine kritische mobilisierbare Sedimentmenge (variable Disposition) akkumuliert worden ist.

In Transport-limitierten Systemen hingegen ist diese Bedingung aufgrund der unbegrenzt zur Verfügung stehenden Sedimentmengen praktisch immer erfüllt und ein Murgang entsteht, sobald ein auslösendes Ereignis von ausreichender Intensität eintritt. In diesem Sinne reduzieren sich die drei oben genannten variablen Dispositionsfaktoren auf den der Materialverfügbarkeit.

Eine weitere Beschreibung des Einflusses der Sedimentverfügbarkeit auf die Auslösung respektive die Häufigkeit von Murgängen findet sich beispielsweise in BOVIS & DAGG (1988), SASS et al. (2019) oder FULLER & MARDEN (2010).

2.4.4 Modellierung von Murgängen

Die physikalischen Fließ- und Ablagerungsprozesse eines Murgangs sind komplex und bislang noch nicht vollständig verstanden (RICKENMANN et al. 2006, SCHEID 2011, SIMONI et al. 2020). Mit Hilfe von Murgangsmodellen wird versucht, die Eigenschaften dieses Wasser-Sediment-Gemisches möglichst gut abzubilden, um Aussagen über die Ausbreitung und Intensität von Murgangseignissen im Sinne einer Gefahrenzonierung zu ermöglichen. Um die physikalische Komplexität des Murgangprozesses zu reduzieren, liegen diesen Modellen immer unterschiedlich starke Vereinfachungen zugrunde (MEDINA et al. 2008). Grundsätzlich wird in den meisten Modellen die Murgang-Fracht als einphasig flüssig oder zweiphasig fest-flüssig angenommen. In der Regel wird der Prozess auf eine, zwei oder drei pseudo-3D Berechnungsdimensionen reduziert, um eine Simulation in vertretbarer Zeit berechnen zu können (PUDASANI 2012). 1D-Modelle berechnen den Prozessweg in Fließrichtung (x-Achse), 2D-Modelle berechnen zusätzlich die laterale Ausbreitung (x- und y-Richtung). 3D-Modelle sollen alle drei Dimensionen (x-, y-, z-Achse) berücksichtigen, werden aber mit einer vollständigen Lösung bisher hauptsächlich in experimentellen Untersuchungen eingesetzt (WANG et al. 2016, STRICKLER 2010). Grundsätzlich ist bei Murgangsmodellen nach GAMMA 2000 zwischen **Dispositionsmodellen** und **Bewegungs- oder Reichweitenmodellen** zu unterscheiden:

Mit Dispositionsmodellen werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Murgängen bzw. die potenziellen Anrissgebiete modelltechnisch überwiegend statistisch ermittelt. Auf diese Modellgruppe wird im Folgenden nicht näher eingegangen, da sie in der vorliegenden Arbeit keine Anwendung findet. Vielmehr wird in dieser Arbeit diesbezüglich eine in Kapitel 5.3 beschriebene Weiterentwicklung des TOGNACCA (1999) Ansatzes zur Ermittlung des minimalkritischen Abflusswertes zur Auslösung eines Murgangs in die Fläche gerechnet und so potenzielle Startzellen ermittelt.

Grundsätzliche Studien zu Dispositionsmodellen liefern unter anderem HECKMANN & BECHT (2009) und HECKMANN et al. (2014).

Bewegungs- oder Reichweitenmodelle dienen der Bestimmung von Prozessparametern im Gerinne und auf einem Murkegel. Verschiedene Autoren kategorisieren die Bewegungs- oder Reichweitenmodelle nach unterschiedlichen Kriterien (z.B. RICKENMANN 2005, BARBOLINI et al. 2006, HÜRLIMANN et al. 2008, D'AGOSTINO et al. 2009). In Abb. 21 wird eine hierarchisch geordnete Übersicht über die wichtigsten Modellansätze nach STRICKLER 2010 aufgeführt. Die einzelnen Kategorien werden nachfolgend kurz erläutert:

Eine erste Einteilung erfolgt in **empirisch-statistische Beziehungen**, **empirische Modelle** und physikalisch basierte, **dynamische Modelle**:

Empirisch-statistische Beziehungen setzen verschiedene Prozessparameter zueinander in Beziehung. Die wichtigsten Größen sind die maximal zu erwartende Murgangfracht bzw. Feststoffmenge, die entsprechende maximale Reichweite und der maximale Abfluss. Der Hauptvorteil der Verwendung empirischer Beziehungen liegt in der einfachen Anwendung. (STRICKLER 2010). HÜRLIMANN et al. (2008) sieht dagegen die Grenzen des Ansatzes in der auf den Erfassungsbereich beschränkten Gültigkeit. Weitere Schwierigkeiten sind die Unsicherheit bei der Auswahl der Anrisspunkte und Fließwege und die notwendige Kombination von Schätzformeln zur Berechnung der Fließparameter mit der Gefahr der Fehlerfortpflanzung.

Empirische Modelle sind hydrologische Fließweg- oder Massenpunktmodelle, oft GIS-basiert die verschiedene Algorithmen zur Ermittlung des Flussweges umfassen. Diese Gruppe steht zwischen den empirisch-statistischen Beziehungs- und den dynamischen Modellen. Die Fließwegberechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Impuls- und Energieerhaltung auf Basis eines digitalen Geländemodells (STRICKLER 2010, GAMMA 2000, WICHMANN 2017). Darüber hinaus werden Anrissgebiet und Reichweite durch empirische Beziehungen definiert. Durch die Einbeziehung der Topographie und damit einer nachvollziehbaren Fließwegbestimmung erweitern

diese Modelle die empirischen Beziehungen um den wichtigen Punkt des pseudo 3D-Reliefs (HÜRLIMANN et al. 2008). Pseudo-3D beschreibt hier eine nicht vollwertige 3D-Darstellung (auch 2,5D genannt), bei der die dritte Dimension lediglich als Attribut verfügbar ist. Bei digitalen Geländemodellen werden dabei Effekte wie beispielsweise Überhänge im Relief oder anthropogene Konstruktionen wie Brücken oder Straßendurchlässe nicht berücksichtigt, da dort in der Realität Punkte verschiedener Höhe übereinanderliegen die im Modell nicht dargestellt werden können. Dennoch können diese Modelle je nach Auflösung des verwendeten digitalen Geländemodells eine sehr realistische und detailgetreue Abbildung des Fließwegs einer Mure darstellen.

Physikalisch basierte dynamische Modelle wurden entwickelt, um das Fließverhalten von Murgängen mit allen wesentlichen Parametern wie Reichweite, Ausbreitungsfläche, Geschwindigkeit und Fließtiefe zu berechnen. Der Murkörper wird dabei nicht als Kontinuum behandelt, d.h. die Dynamik der sich ändernden Masse wird berechnet (HUNGR & MCDUGALL 2009). Dabei berechnen dynamische Modelle die Fließdynamik der Mure unter verschiedenen Annahmen zu Materialeigenschaften und Rheologie (HUNGR 2008, HUNGR & MCDUGALL 2009). Weitere Merkmale dieser Modelle umfassen die Berücksichtigung von Erosion und Deposition sowie der Reibung. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal der numerischen Modelle ist die Rheologie der fließenden Masse. Das Reibungsmodell von VOELLMY (1955) gelangt dabei in den meisten Murgangmodellen zur Anwendung (HUNGR & MCDUGALL 2009, HORTON et al. 2013, RAMMS 2017).

Die hier aufgeführten Beschreibungen der Modellierungsansätze für Murgänge stellt nur einen grundlegenden Überblick über die vielen verschiedenen Modelltypen dar. Eine detailliertere Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Modellierungsansatzes des Gravitational Process Path Model (GPP) findet sich ab Kapitel 4.4. Vergleiche zwischen verschiedenen Murgangmodellierungen wurden in der Vergangenheit von zahlreichen Autoren durchgeführt, um die Qualitäten und

Grenzen der einzelnen Ansätze aufzuzeigen (O'BRIEN et al. 1993) FLOW-R (HORTON et al. 2013), DAN respektive die Weiterentwicklung DAN3D (HUNGR 1995, HUNGR & McDOUGALL 2009) RAMMS (RAMMS 2017) und GPP (WICHMANN 2017) breite Anwendung. Im Folgenden sind einige Studien aufgeführt, die verschiedene Modelle miteinander vergleichen: CESCA & D'AGOSTINO (2008), HUNGR & MC DOUGALL (2009), SCHEUNER et al. (2009).

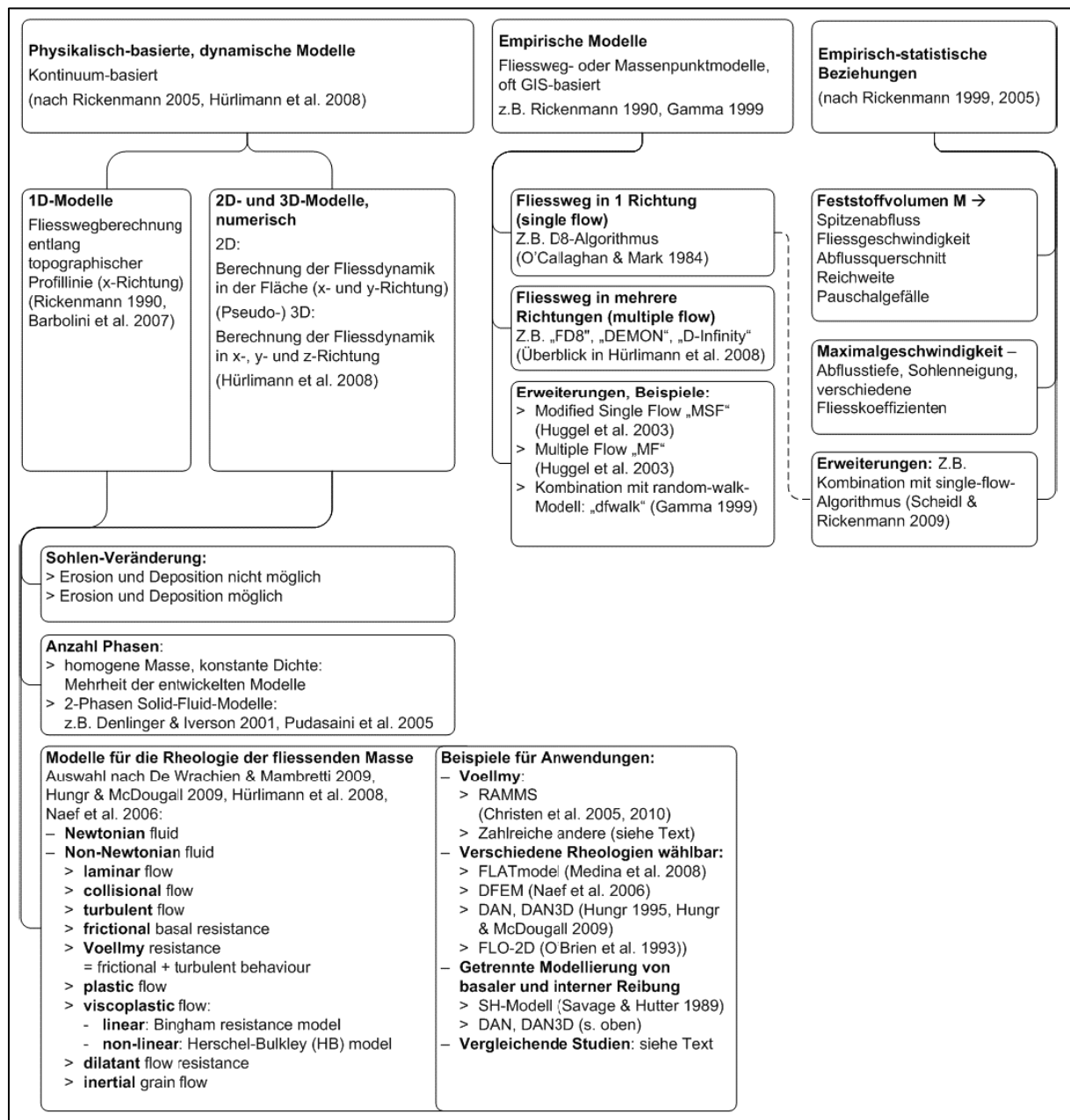


Abb. 21: Übersicht über verschiedene Ansätze der Murgangsmodellierung (STRICKLER 2010)

2.4.5 Bautechnische Maßnahmen gegen Murgänge und Hangmuren

In früheren Jahrhunderten galten Naturereignisse mit ihren teils verheerenden Wirkungen als „von Gott gewollte Bestrafung“ der Bevölkerung. Gefährliche Gebiete wurden daher, wenn möglich, gemieden und drohende Ereignisse mit Bittrufen und Segnungen beschworen (Kanton Graubünden 2021). Zudem schützten ausgedehnte Waldflächen vielerorts Siedlungen und Verkehrswege, indem sie Einzugsgebiete stabilisierten oder Murereignisse in seinen Auswirkungen abbremsen. Wo nun durch Rodung oder andere Faktoren der Wald fehlt, muss deshalb der Schutz vor Naturgefahren durch Bauwerke kompensiert werden. Der Bau von Schutzbauten ist entsprechend eng mit dem ständig wachsenden Bedarf an Siedlungsraum und Infrastruktur verknüpft (Kanton Graubünden 2021). Wurde ein Boden früher landwirtschaftlich genutzt, hat man Überschwemmungen und Muren in gebirgigen Regionen oft in Kauf genommen. Heute sind diese Flächen vielfach überbaut und müssen in Gefahrensituationen geschützt sein. Wie im Bereich der Steinschlaggefahr, werden dabei Murgänge und Hangmuren auch zukünftig als natürliche erosive Prozesse den Menschen in seinem sich verdichtenden Siedlungsraum bedrohen. Großereignisse wie beispielsweise in Bondo (Schweiz) im alpinen Raum oder die Ahrtalkatastrophe aus dem Juli 2021 haben Risiken auch in deutschen Mittelgebirgen aufgezeigt und auch neue Schutzlücken sichtbar gemacht (Wilhelm et al. 2019, WEHINGER et al. 2022, OZTURK et al. 2018). Zur Minimierung des Schadenspotenzials sind in den letzten Jahrzehnten deshalb Maßnahmen entwickelt worden, um die Auswirkungen von Murgängen zu minimieren die im Folgenden kurz aufgezeigt werden:

Im Bereich der Gerinnemurgänge können **Sperrentreppen** in steilen Gerinnen die Fließgeschwindigkeit des Wassers verlangsamen. Dadurch kann im extremen Abflussfall weniger Erd- und Gesteinsmaterial weggespült werden. Als Folge davon

reduziert sich die Gefahr von Murgängen und seitlichen Uferabbrüchen (BERGMEISTER 2009).

Geschiebesammler in Bachbetten können Felsblöcke, Steine und Holz aufnehmen, die ein Murgang während des Fließvorgangs mit sich führt. Sie verhindern, dass Material bis in tiefer gelegene Siedlungsgebiete gelangt und dort zu Überschwemmungs- oder Übermürungsschäden führt (BERGMEISTER 2009).

Murgangssperren sind in verschiedenen baulichen Ausfertigungen der klassische Gerinneverbau gegen Murgänge. Dabei werden massive halbdurchlässige Barrieren in den Gerinnequerschnitt gebaut, um im Murgangsfall die anströmende Suspension vom Wasser zu trennen und das Geschiebe zurückzuhalten. In neueren Varianten werden die aus Stahl, Beton oder Holz ausgefertigten vertikalen, rückverankerten Scheiben mit hochfesten Stahlnetzen behangen um möglichst viel Geschiebematerial zurückzuhalten zu können und das Volumen des Murgangs zu reduzieren (WENDELER 2008, Abb. 22).



Abb. 22: Klassische alpine Murgangssperre als Kombinationsbauwerk aus Betonscheiben und gespannten Netzen in Sitebach an der Lenk (Kanton Bern 2021)

Flexible Murgangszäune aus Ringnetzen wirken dank ihrer Durchlässigkeit wie ein Sieb und haben einen ähnlichen Effekt wie starre Barrieren, sodass auch hier ein Murgang effektiv entwässert wird. Die Netze werden ähnlich einem Steinschlagnetz an den Seiten und am Boden verankert und quer mit Zugseilen abgespannt und mit Bremsen versehen, sodass diese unscheinbaren Zäune massive Schutteinwirkung abfangen können. Diese Verbauvariante eignet sich besonders in steilem und oder schlecht zugänglichem Terrain und wird zur besseren Schutzwirkung im Gerrineverlauf mehrfach gestaffelt eingebaut (MONNEY et al. 2007, WENDELER 2008).

Im Bereich des Hangmurenverbbaus kann neben kleineren flexiblen Hangmurenzäunen dem Boden in steilem Terrain mittels einer oberflächigen

Hangentwässerung, also einer Drainage, überschüssiges Wasser entzogen werden, sodass die Gefahr einer initialen Abrissbildung minimiert wird (WENDELER 2008).

Daneben können verschiedene Verbauvarianten gegen Erosionserscheinungen und Hanginstabilitäten wie zum Beispiel Erosionsschuttmatten, Faschinen, bewährte Erde oder Drahtnetzte Schutz gegenüber Hangmuren bieten. Da Hangmuren jedoch sehr schwer vorherzusagen sind und meist spontan während eines Starkregens entstehen, werden entsprechende Maßnahmen jedoch oft erst nach Eintritt eines Schadensfalls geplant und umgesetzt (Kanton Graubünden 2021).

Die hier aufgezählten Sicherungsmaßnahmen und -bauwerke stellen nur eine grobe Übersicht dar. In der Praxis sind noch weitere Systeme verfügbar. Genauere Beschreibungen von Verbauvarianten und Maßnahmen gegenüber Murgängen und Hangmuren finden sich in WENDELER (2008), WENDELER et al. (2017), STRELE (1934) oder BERGMEISTER (2009).

2.5 Gefahrenhinweiskarten

Zur Minimierung der Folgen solcher natürlich auftretenden Massenverlagerungsprozesse stehen vor einer etwaigen Schutzverbauung das Erkennen der Gefahr und die Ableitung des Risikos an erster Stelle. Den gängigsten Weg einer flächigen Darstellung stellen dabei Gefahrenhinweiskarten dar. Aus diesen Kartenwerken lassen sich mit relativ geringem Aufwand mögliche Konfliktbereiche zwischen der dargestellten potenziellen Gefahr und einer anthropogenen Nutzung ableiten. Die Gefahrenhinweiskarten können und sollen dabei beispielsweise perspektivisch in die Flächennutzungs- und Bauleitplanung einer Kommune einfließen. In manchen Ländern wie der Schweiz, Österreich oder auch im deutschen Bundesland Bayern ist dies bereits gängige Praxis (LFU 2020, vgl. Abb. 23). In Rheinland-Pfalz ist ein solches Kartenmaterial bisher jedoch für die Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang/Schuttstrom nur vereinzelt und noch nicht

flächendeckend vorhanden, sodass sich Sicherungsmaßnahmen bisher vornehmlich auf Orte mit bereits stattgefundenen Ereignissen beschränken und potenziell gefährdete Gebiete zum Teil nicht bekannt sind.

Per Definition sind Gefahrenhinweiskarten „nach objektiven wissenschaftlichen Kriterien erstellte Übersichtskarten mit Hinweisen auf geogene Naturgefahren, die erkannt und lokalisiert, jedoch nicht im Detail analysiert und bewertet sind“ (Staatlich Geologischen Dienste 2008, im folgenden SGD genannt). Gefahrenhinweiskarten basieren dabei sowohl auf Modellrechnungen als auch auf empirischen Untersuchungen und werden mit Ereigniskatastern auf Plausibilität geprüft (LFU 2017). Gefahrenhinweiskarten enthalten im Gegensatz zu Gefahrenkarten noch keine Angaben zu Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität einer Naturgefahr. Ausgehend von Gefahrenhinweiskarten bilden diese in einem weiteren Entwicklungsschritt erstellten Gefahren- und Risikokarten dann die nächste Einschätzungsstufe dar. Die zunächst erstellten Gefahrenhinweiskarten sind damit vorrangig auf die Belange der Raumplanung ausgerichtet. Sie dienen insbesondere Ministerien, Fachbehörden, Kreis- und Kommunalverwaltungen sowie Wirtschaftsunternehmen und Bürgern als eine erste Grundlage zur Gefahreneinschätzung mit dem Ziel, Schäden durch vorausschauende Planung zu verhindern beziehungsweise zu minimieren (SGD 2008).

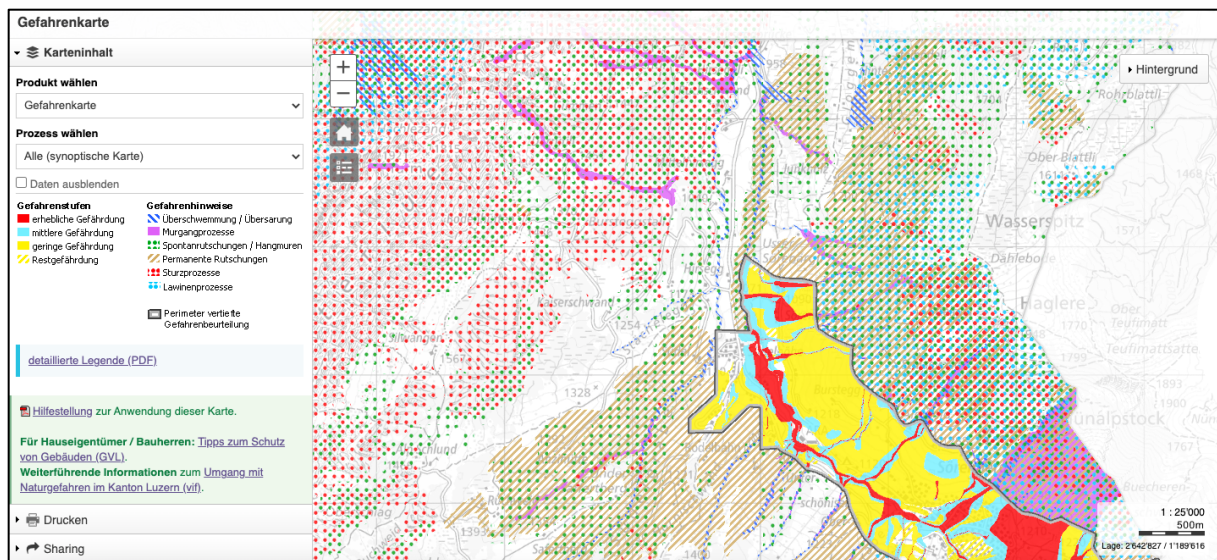


Abb. 23: Ausschnitt aus der Gefahrenkarte des Schweizer Kantons Luzern innerhalb der Webanwendung (Kanton Luzern 2023)

Grundsätzlich ist es in Deutschland, Österreich und der Schweiz eine Aufgabe der staatlichen geologischen Dienste der einzelnen Bundesländer oder Kantone diese Produkte den öffentlichen und privaten Nutzern als praxisnahes Arbeitsinstrument zur Verfügung zu stellen (SGD 2008). In Österreich und Bayern werden Gefahrenhinweiskarten für den Zielmaßstab 1:25.000 erarbeitet und stellen somit keine parzellenscharfe Einteilung von Gebieten in unterschiedliche Gefahrenbereiche dar. In der Schweiz ist dies anders, sodass dort auch frei verfügbar parzellenscharfe Gefahrenhinweise abrufbar sind (BAFU 2016, vgl. Abb. 23). Die Notwendigkeit, auch länderübergreifend vergleichbare Gefahrenhinweiskarten zur Verfügung zu stellen, ergibt sich aus den Beschlüssen der Kommission der Europäischen Union. Danach sollen die Mitgliedstaaten verstärkt im Bereich Hochwasser-, Boden- und Naturkatastrophenschutz agieren und für den Schutz der Bürger einstehen. Für den Aufbau der Gefahrenhinweiskarten sind darüber hinaus die Inhalte der INSPIRE-Richtlinie relevant, die vorgeben, dass bereits vorhandene sowie zukünftig erhobene Geodaten überregional einheitlich bereitgestellt werden sollen (SGD 2008, WIESMAIR 2022).

Gefahrenhinweiskarten in Deutschland sollen entsprechend der Einschätzung der Staatlichen Geologischen Dienste (2008) modular in zwei Bearbeitungsstufen aufgebaut sein, wobei die jeweilige Stufe auf dem Kartenwerk deutlich vermerkt sein sollte. Die Gefahrenhinweiskarten sollen nach Möglichkeit das konkrete Ereignis, in diesem Fall den Bewegungstyp und den jeweiligen Prozessraum, abbilden. Die Darstellung des Prozessraums soll demnach in Polygonen erfolgen, eine Farbgebung oder Schraffur wird jedoch nicht vordefiniert. Symbole und Flächenfarben richten sich nach den länderspezifischen Vorgaben der Kartendarstellung. Gebiete, in denen Naturgefahren unwahrscheinlich sind, werden nicht explizit dargestellt und gelten als Weißflächen. Konkrete Sachverhalte, zum Beispiel einzelne Felsstürze, können dabei als Einzelobjekte abgebildet werden. Bei der Darstellung der Gefahrenhinweisflächen sollte zudem nachvollziehbar sein, welche Methode oder Methodenkomposition, wie zum Beispiel Geländekartierung, DGM-Auswertung, Luftbild, Modellierung, etc., für die Erstellung angewandt wurde (SGD 2008).

Zu den herausgegebenen Gefahrenhinweiskarten sollte ein Erläuterungstext verfasst werden, aus dem die Randbedingungen zur Erstellung der Gefahrenhinweiskarten, die Aussagegenauigkeit, die Interpretationsgrenzen sowie Hinweise zur praktischen Anwendung hervorgehen (vgl. Abb. 24). Aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten in den einzelnen Bundesländern wird von den Staatlich Geologischen Diensten (2008) des Bundes daher zusätzlich empfohlen eine sinnvolle Kombination von Gefahrenhinweisthemen von den Bearbeitern und den jeweiligen Fachreferaten vorschlagen zu lassen.

Der erste Aufschlag eines solchen Kartenwerks zu den Prozesstypen Steinschlag und Murgang in den Hotspotregionen Mittelrhein- und Moseltal als Basis für eine landesweite Erstellung soll somit mit dieser Arbeit für das Bundesland Rheinland-Pfalz federführend durch das Landesamt für Geologie und Bergbau initiiert werden.



Abb. 24: Begleitwerk der Gefahrenhinweiskarte Garmisch-Partenkirchen herausgegeben vom LFU mit begleitenden Hinweisen zur Nutzung der Karte (LFU 2020)

2.6 Massenbewegungen im Klimawandel

Die aktuelle Erwärmung des Klimas in Mitteleuropa wird in Bezug auf geomorphologische Naturgefahren vielfach als Bedrohung wahrgenommen. Dies äußert sich in Schlagzeilen wie etwa sinngemäß: „Klimawandel: Kippen die Alpen?“, „Der Klimawandel macht die Berge gefährlicher“ oder „Klimawandel führt zu mehr Muren und Steinschlägen“ (National Geographic 2021, BR 2022, DerStandard 2022). Bisherige Studien in diesem Forschungsfeld zeigen, dass die Witterung und das Klima tatsächlich eine zentrale Rolle in der Dynamik der Erdoberflächenprozesse und für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen in Gebirgsregionen spielt (z.B. GLADE et al. 2017, STOFFEL et al. 2014, GARIANO & GUZZETTI 2016). Zu den in dieser Arbeit

untersuchten Prozessen Steinschlag/Felssturz und Murgang/Schuttstrom ist dieser Bezug genauer zu betrachten, da ihnen, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, unterschiedlichen Auslöse- und Beeinflussungsbedingungen zugrunde liegen und sie daher einer unterschiedlichen „Klimaempfindlichkeit“ unterliegen.

In Bezug auf **Steinschläge und Felsstürze** ist entsprechend der Literatur von einer moderaten Zunahme der Häufigkeit bei einer weiteren Zunahme der Temperatur vor allem im alpinen Raum auszugehen. HUGGEL et al. (2013) sehen für die Schweizer Alpen eine Korrelation von extrem warmen Tagen im Sommer und frühen Herbst mit dem Auftreten von Felsstürzen in den direkten Folgetagen. Der auftauende Permafrost in den Hochlagen der Alpen erhöht zudem durch die Entfestigung des Felsverbands die Wahrscheinlichkeit von Felsstürzen (RAVANEL & DELINE 2011, KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012, KRAUTBLATTER et al. 2013). Nach SASS & OBERLECHNER (2012) ist demgegenüber jedoch aus einem im Zeitraum 1900-2010 bestehenden Datenset für die österreichischen Alpen unterhalb der Permafrostgrenze keine signifikante klimabedingte Zunahme von Steinschlag/Felsturzereignissen zu erkennen. Sie prognostizieren eher: „With warmer summers in the coming decades, we will likely experience heightened rockfall frequency in retreating permafrost areas. However, in the much larger permafrost-free regions, milder winters will possibly reduce the number of rockfalls. Whether increasing precipitation and thus, higher pore pressures will counteract this effect is unclear“ (SASS & OBERLECHNER 2012).

In gewissem Maße können auch langanhaltende Niederschläge ein vorbereitendes Element für Felssturzereignisse sein. So erhöhen sich in Folge dieser Niederschläge der Kluftwasserdruck entlang des vorhandenen Trennflächeninventars des Gesteinsverbandes, was zur Auslösung von Steinschlägen und Felsstürzen führen kann (vgl. Kap. 2.2.3.) Selbiges kann auch durch eine anhaltende Schneeschmelze erreicht werden. Eine direkte Korrelation ist dabei jedoch noch nicht zu erkennen, es sich erhöht aber die Disposition der entsprechenden stabilitätsbeeinflussenden Variablen (GLADE et al. 2017). Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bei der

Betrachtung von Steinschlagereignissen in Zeiten einer Klimaveränderung, ist der Aspekt des Schutzwaldes. Wie LINGUA et al. (2020) und MOOS et al. (2021) weitergehend ausführen, hat die Erwärmung der Atmosphäre negative Auswirkungen auf die Schutzfunktion von Waldflächen in Bezug auf Steinschläge und Felsstürze.

Das Auftreten von **Murgängen** ist durch die direkte Korrelation der Auslösung durch die Abflussverhältnisse in den Einzugsgebieten noch deutlich klimasensibler als dies bei Steinschlägen der Fall ist. Viele Autoren bestätigen, dass die aktuelle Klimaerwärmung in Hochgebirgsregionen zu einem massiven Gletscher- und Permafrostrückgang führt (GOBIET et al. 2014, SOMMER et al. 2020). Als eine Konsequenz davon folgen auch veränderte hydrologischen Grundbedingungen in den Einzugsgebieten dieser Regionen, die beispielsweise zu einer potenziellen Erhöhung der Frequenz des Auftretens von Murgängen oder Verstärkung deren Magnitude führen kann (z.B. FISCHER et al. 2015, STOFFEL et al. 2014, DIETRICH & KRAUTBLATTER 2017). Jedoch sind in Deutschland weit unter 0,1% der Landesfläche vergletschert und nur etwa 0,2% von Permafrost geprägt. Unvergletscherte Einzugsgebiete sind im Vergleich zu ihrer flächenmäßigen Bedeutung in der Forschung bisher eher unterrepräsentiert und es ist kaum bekannt, wie Hang- und Gerinneprozesse in diesen großen Gebieten von einer Klimaveränderung beeinflusst werden (SASS et al. 2019). Bedeutend sind hier vor allem mögliche Veränderungen des Niederschlagsverhaltens. Die meisten Klimaszenarien gehen für den mitteleuropäischen Raum von einer Abnahme der Sommerniederschläge und einer Zunahme der Winterniederschläge aus (JAKOB et al. 2014, BRASSEUR et al. 2017). Dabei ist eine Zunahme der Intensität von sommerlichen Starkregen durch die Klimaerwärmung aus physikalischer Sicht im Sinne einer erhöhten Konvektion zu erwarten (DWD 2016, JAKOB et al. 2014). Es erscheint daher logisch eine Folgebeziehung zwischen einer Frequenzzunahme von Starkregen und einer entsprechend erhöhten Murgangsgefahr anzunehmen. Jedoch sind nicht nur die Starkregenereignisse allein bedeutend, sondern auch die Verfügbarkeit von mobilisierbaren Sedimenten, die einen großen Teil des potenziellen

Schadens bei einem Murgang verursachen. Bei begrenzter Sedimentverfügbarkeit muss eine erhöhte Anzahl an Starkregenereignissen nicht notwendigerweise eine höhere Frequenz von schadensträchtigen Murgängen bedeuten (HIRSCHBERG et al. 2020). So werden große Murgangereignisse, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, nur bei ausreichendem "Ladezustand" des Systems ausgelöst. Im Gegensatz dazu könnten durch eine höhere Frequenz von Starkregenereignissen häufiger, aber entsprechend kleinere Murgänge ausgelöst werden. Die unterschiedliche Reaktion verschiedener Einzugsgebiete auf den modernen Klimawandel deutet jedoch darauf hin, dass die Dynamik von Sedimentproduktion und -transfers ebenfalls entscheidend mit beeinflusst wird. Neue Studien schreiben dabei einer guten Konnektivität der Sedimentkaskade und einer ausgewogenen Transportkapazität eine zentrale Rolle zu (BUTER et al. 2022). Allerdings sind diese Aspekte innerhalb von Sedimentkaskaden in Hochgebirgsregionen und vor allem in Mittelgebirgen unter dem Gesichtspunkt von Klimaerwärmung bisher kaum erforscht. Daher ist die Frage nach der Reaktion der Murgangsaktivität in Bezug auf den Klimawandel nicht eindeutig und nicht für alle Einzugsgebiete in gleicher Weise zu beantworten (GLADE et al. 2017). Hinzu kommt der Einfluss des Menschen auf die Sedimentkaskade. Nach SASS et al. (2019) hat und wird eine steigende anthropogene Einflussnahme die Sedimentfracht in Gerinnen stark beeinflussen. Die Autoren stellen fest, dass eine Beendigung der Regulierung durch anthropogenen Einflussnahme die Sedimentfracht theoretisch noch stärker als klimatische Einflussnahme erhöhen könnte und somit gekoppelt zu einer noch stärkeren Erhöhung der Murgangsaktivität führen könnte.

In Bezug auf Rheinland-Pfalz wird entsprechend des Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen RLP (kurz KfK) prognostiziert, dass die Sommerhalbjahre neben einer Erhöhung der Temperatur zukünftig zum einen durch die generelle Abnahme der Niederschlagsmenge und zum anderen aber auch durch die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen charakterisiert sein könnten. In den hydrologischen Winterhalbjahren wird eine leichte Zunahme der Niederschlagsmenge insgesamt prognostiziert, bei der ebenfalls die Frequenz von Starkniederschlagsereignissen

zunehmen könnte (KfK-RLP 2020, vgl. Kap. 3.4). Hinzu kommt die deutliche Abnahme sowohl der einzelnen Frosttage als auch der Frostperioden. Eine daraus abgeleitete Vorhersage des Frequenzanstiegs von Massenbewegungen in Rheinland-Pfalz ist dennoch eine schwierig und bisher auf kaum Quellen gestützt. Während KRAUTER et al. (2012) davon ausgeht, dass die klimatische Entwicklung sich verstärkend auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Schadensausmaß von Rutschungen, Steinschlägen und Muren auswirken wird, sind andere Autoren in diesem Punkt vorsichtiger: „Es ist nicht sicher, welche Auswirkungen der viel diskutierte Klimawandel auf die Häufigkeit und / oder Größe von einzelnen Ereignisse haben wird“ (GRUNERT & HESS 2010).

Grundsätzlich ist jedoch zumindest plausibel, dass zukünftig an Lockergesteinsböschungen eine Zunahme von oberflächennahen Rutschungen, Schlamm- und Schuttströmen im Sommerhalbjahr und einen Anstieg des Rutschungsrisikos gegen Ende des Winterhalbjahres zu beobachten sein könnte. Im Bezug auf Steinschläge und Felsstürze ist nach momentanen Stand keine seriöse Abschätzung möglich, da noch nicht geschätzt werden kann ob es durch die genannten, sich gegenseitig beeinflussenden Parameter, zu einer Veränderung der Verwitterungsleistung kommen wird. Im Rahmen einer Masterarbeit im MABEIS-Projekt wurde im Jahr 2019 eine erste Analyse von Wetter- und Klimadaten des DWD sowie den Ereigniseinträgen in der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz durchgeführt (SOLAK 2019). Die Ergebnisse der Arbeit zeigen einen klaren statistischen Zusammenhang zwischen dem Niederschlagdargebot und dem Auftreten von Rutschungen mit augenscheinlich zyklischen Trends von extremen Jahren in 20-jährigen Rhythmus. Das Auftreten von Murgängen ist in der Studie dabei noch nicht berücksichtigt worden (vgl. Kap. 4.1.4). Die Daten zeigen zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit bisher keine klaren Korrelationen oder Trends zwischen Temperatur und Niederschlag sowie Ereigniseinträgen von Steinschlägen und Felsstürzen. Diese Studie ist als eine erste Auswertung des zur Verfügung stehenden Datensatzes zu verstehen und erfordert für eine weiterführende Aussage der

klimasensibilität von Massenbewegungsprozessen in Rheinland-Pfalz zukünftig zusätzliche Analysen und eine laufende Anpassung der Rutschungsdatenbank.

Die hier vorgestellten Studien sind daher als Übersicht über ein komplexes Forschungsfeld zu verstehen und belegen, dass es bisher noch keine eindeutige Einschätzung über das Ausmaß einer Klimaveränderung auf die Frequenz und Magnitude dieser Massenbewegungsprozesse im Mitteleuropäischen Raum gibt. Gerade zukünftige Forschungen und Auswertungen von Ereignisdatenbanken können dazu beitragen ein tiefergehendes Prozessverständnis zu entwickeln und angepasste Präventionsmaßnahmen anzustreben. In dieser Hinsicht sind jedoch bereits heute die Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten gegenüber diesen Prozessen von entscheidender Bedeutung, um zukünftig gefährdete Bereiche bereits identifiziert und beispielsweise in einer Bauleitplanung intergriert zu haben.

3 Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel werden die geographischen, klimatologischen und geologischen Standortbedingungen als wesentliche Voraussetzung für eine präzise Analyse der Gefährdungspotenziale des Untersuchungsgebietes am Mittelrhein- und Moseltal vorgestellt. Darüber hinaus werden Grundbedingungen diskutiert, welche für die Entstehung von Steinschlags- und Murgangsgefahr in diesem Gebiet ausschlaggebend sind. Im weiteren Verlauf werden ab Kapitel 3.5 rezente und geschichtliche Beispiele von Massenbewegungsereignissen und Schadensfällen in diesem Gebiet aufgezeigt.

3.1 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Die Auswahl des Projektgebietes am Mittelrhein- und Moseltal ergab sich aus dem Ansatz einer priorisierenden Modellentwicklung im MABEIS-Projekt. Das Mittelrhein- und Moseltal sind als Steinschlag- und Murgangsreviere überregional bekannt und bieten durch das dichte und stark frequentierte Verkehrsnetz und die dichte Bebauung gegenüber diesen Naturgefahren eine hohe Exposition (GRUNERT & HESS 2010). Die Rutschungsdatenbank des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz sowie die Schadenfalldokumentationen des Landesbetriebes Mobilität bieten in diesen Gebieten zudem eine hohe Anzahl an Einträgen zu Felsstürzen und Murgängen, sodass hier ein Validierungsinstrument für die flächendeckende modellhafte Simulation von diesen Prozessen vorhanden ist. Diese beiden Flusstäler weisen daher eine hohe Relevanz bei gleichzeitig guter Datenlage für eine Validierung, wodurch sie entsprechend in der Priorisierung der Modellentwicklung mit dieser Promotionsarbeit als erstes in einer zukünftig geplanten landesweiten Gefährdungseinschätzung bearbeitet wurden.

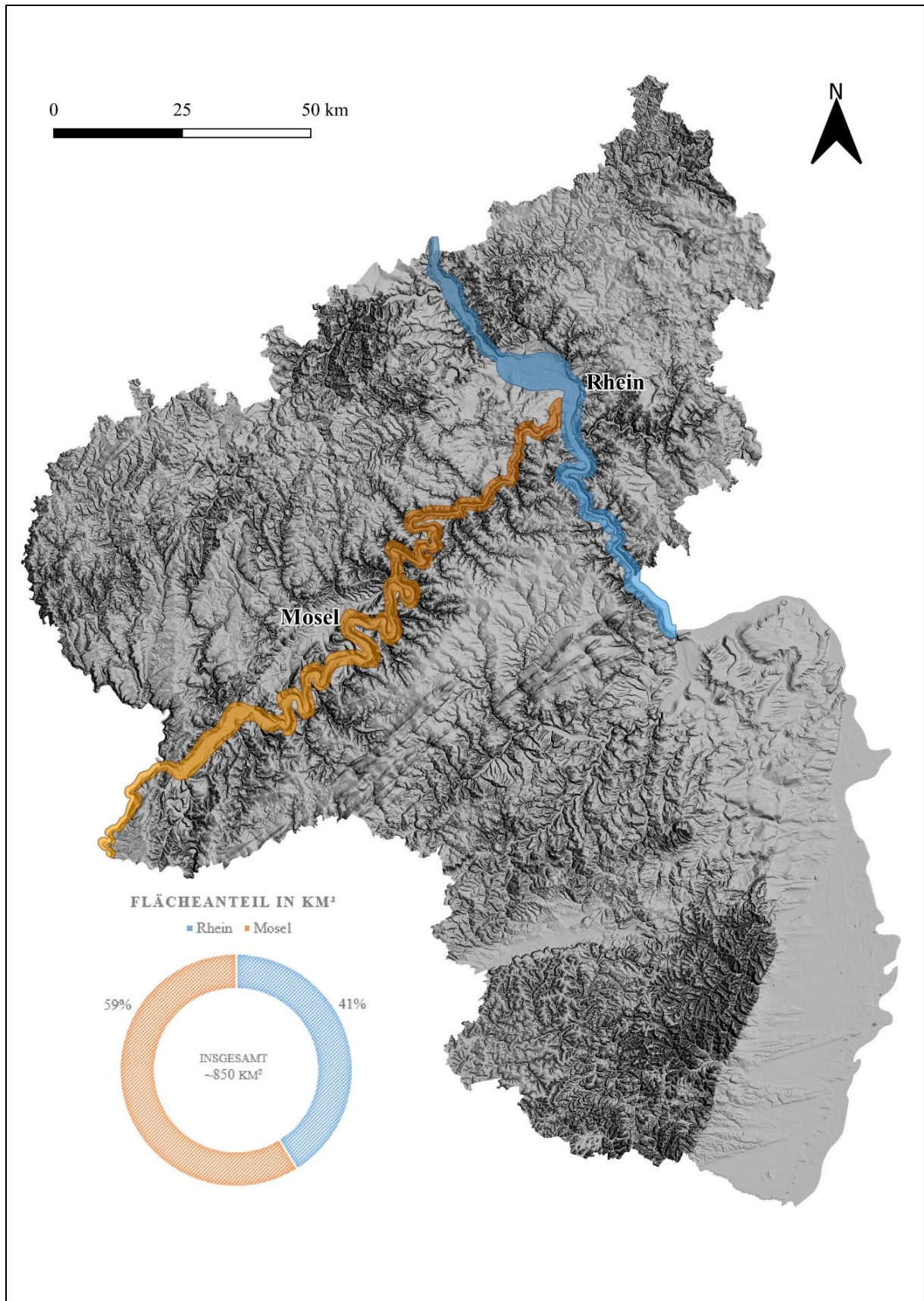


Abb. 25: Reliefkarte von Rheinland-Pfalz mit den eingezeichneten Projektgebieten am Mittelrhein- und Moseltal

Das Projektgebiet wird dabei durch die Städte Bingen im Südosten, Bonn im Nordwesten sowie Koblenz im Nordosten und Trier im Südwesten begrenzt. Entlang der topographischen Kartenblätter im Maßstab 1:25000 wurde das Projektgebiet in einem circa 5 km breiten Streifen entlang der Flussläufe begrenzt (siehe Abb. 25). Insgesamt hat das Projektgebiet eine Fläche von knapp 850 km² und zieht sich circa 230 km entlang der Mosel und 120 km entlang des Rheins.

3.2 Geographie

Großräumig betrachtet durchschneidet das Untersuchungsgebiet Mittelrhein- und Moseltal einen weiten Teil des nordwestlichen Landesgebietes von Rheinland-Pfalz. Dieses Gebiet ist in der geologisch-geographische Nomenklatur als Teilgebiet des Rheinischen Schiefergebirges bekannt. Das Rheinische Schiefergebirge ist Teil eines im Paläozoikum gefalteten und seit dem teilweise wieder abgetragenen variszischen Gebirges, das sich innerhalb des heutigen Europas von Südengland bis Polen erstreckte. Es gehört zur deutschen Mittelgebirgsschwelle, umfasst Teile von Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Hessen sowie des Saarlandes und zieht sich als Ardennen bis nach Belgien und Frankreich weiter (RIBBERT 2010). Durchschnitten wird das Rheinische Schiefergebirge in Nordwest-Südostrichtung durch den Rhein und wird somit geographisch in zwei Teile getrennt, für die die Bezeichnungen Linksbeziehungsweise Rechtsrheinisches Schiefergebirge gebräuchlich sind. Begrenzt wird das Rheinische Schiefergebirge im Westen und Südwesten vom Pariser Becken, im Süden vom Saar-Nahe-Becken, vom Mainzer Becken und im Südosten von der Wetterau. Den Ostrand bildet die zum Westhessischen Bergland gehörende Hessische Senke. Am Nordrand liegt das Niederrheinische Tiefland, die Niederrheinische Bucht und die Westfälische Bucht und damit Teile des Norddeutschen Tieflands.

Der rechtsrheinische Teil des Rheinischen Schiefergebirges wird maßgeblich von der Lahn durchschnitten. Südlich der Lahn liegt der Taunus, nördlich davon der

Westerwald, an den sich nach Norden das Siegerland und das Sauerland anschließen. Nach Nordwesten geht dieses in das Bergische Land über. Der Westflügel des Rheinischen Schiefergebirges wird von der aus Südwesten kommenden Mosel durchschnitten, wobei südlich davon der Hunsrück und nördlich davon die Eifel liegt. Nördlich der Eifel schließen sich im belgischen Teil des Rheinischen Schiefergebirges die Ardennen mit dem Hohen Venn an. Neben den drei eingeschnittenen Großtälern des (Mittel-)Rheins, der Lahn und der Mosel prägen zwei größere intramontane Becken das Landschaftsbild des Rheinischen Schiefergebirges: Das Neuwieder Becken zwischen Koblenz und Andernach sowie das beiderseits der Lahn um Limburg gelegene Limburger Becken (QUITZOW 1982). Von Norden greift die Niederrheinische Bucht entlang des Rheins weit in das Schiefergebirge ein, von Südwesten die Trierer Bucht (vgl. Abb. 26 sowie Anhang A).

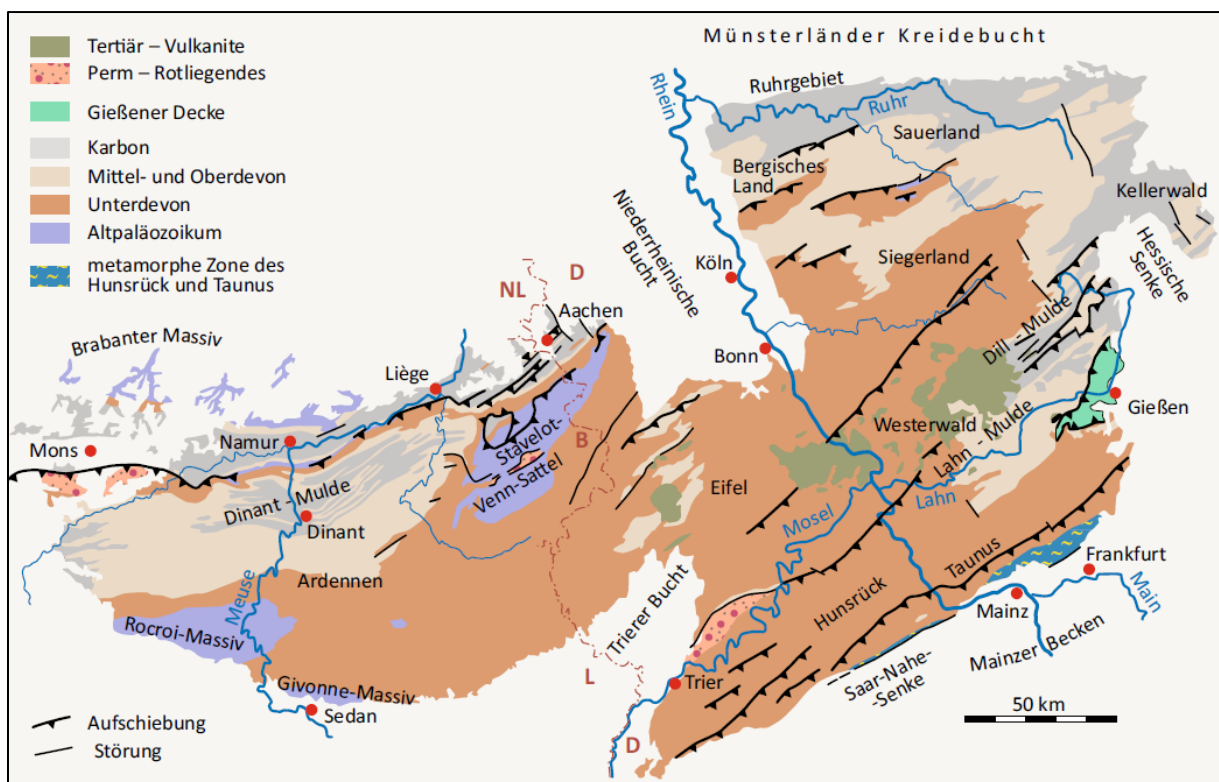


Abb. 26: Schematische geologische Karte des Rheinischen Schiefergebirges und angrenzender Gebiete mit eingezeichneten Gebietbezeichnungen (verändert nach MESCHÉDE 2018)

Das Rheinische Schiefergebirge ist mit seinen diversen Höhenzügen und seinen zuweilen schroff eingeschnittenen Tälern morphologisch typisch für ein deutsches Mittelgebirge. Landwirtschaftlich genutzte Wiesen und Weiden sind in der Regel auf den Hochflächen, den Talniederungen und flachen Hängen vorbehalten; ausgedehnte Wälder findet man bevorzugt an den Steilhängen oder auf Kammlagen (GD NRW 2017).

Das Gewässernetz des Rheinischen Schiefergebirges ist über die Hauptflüsse Mosel, Nahe, Lahn, Ahr und Sieg sowie sämtlicher weiterer Bäche und Nebengerinne ausschließlich zum Rhein als Vorfluter und damit zum Atlantik orientiert. Die vom Rheinischen Schiefergebirge kommenden zum Mittelrhein- und Moseltal orientierten Abflusssysteme bilden zumeist nur einen schmalen, wenige Kilometer breiten Streifen, in dem kurze nicht immer wasserführende Bäche von der Wasserscheide auf der Hochfläche steil über einen großen Höhenunterschied entwässern. Dieses recht ausgedehnte Fluss- und Gerinnenetz dient dem Abfluss der gebietsweisen recht hohen Niederschlagsmengen (>1000 mm/a) bei gemäßigttem ozeanischen Berglandklima (STETS 2021). Im Folgenden werden die geographischen Hauptcharakteristika der beiden für diese Arbeit maßgeblichen Flusstäler im Einzelnen noch einmal tiefergehend beschrieben.

Mittelrheintal

Als das Mittelrheintal bezeichnet man den etwa 130 km langen Abschnitt des Rheinverlaufs zwischen Bingen und Bonn. Der Rhein hat in diesem Bereich ein enges, aszendentes Durchbruchstal geschaffen, dessen Morphologie durch markant steile Felstalhänge und das tief eingeschnittene Flussbett gekennzeichnet ist. Durch seine zentrale Lage in Mitteleuropa diente das Mittelrheintal schon seit dem Mittelalter als eine der wichtigsten Verkehrswege zwischen Nord- und Süddeutschland sowie der Mittelmeerregion und Nordeuropa (TREILING 2009). Wirtschaftlich dominiert wird die Region Mittelrheintal dabei heutzutage vom Weinbau und Tourismus. Die Hauptelemente der Infrastruktur sind die Bundesstraßen 9 und 42 zwischen Mainz und

Bonn sowie die beidseitig des Flusses ausgebaute, überregionale, stark frequentierte Bahnstrecke, die sowohl vom Personenfern- und Nahverkehr als auch von Güterzügen genutzt wird. Schon GRUNERT & HESS (2010) berichten von der enormen Verkehrsbelastung im Mittelrheintal. So hat sich seit den 1950er Jahren das enge Tal zu einer der herausragenden europäischen Schiffs-, Straßen- und Eisenbahnverkehrslinien entwickelt (GORMSEN 1997). Die Bundesstraßen beiderseits des Flusses mit ihrem täglichen Pendlerstrom während der Woche und dem Freizeitverkehr an den Wochenenden tragen erheblich zu dem Verkehrsaufkommen innerhalb des engen Tals bei. Insbesondere gilt dies am rechten Ufer mit seinen täglich fast 200 Güterzügen. Das Mittelrheintal stellt dabei für den Güterverkehr als Nadelöhr das Verbindungsstück zwischen den großen Häfen in Nordeuropa und den Verbrauchern in Mittel- und Südeuropa dar. Insgesamt durchqueren im Durchschnitt täglich mehr als 170 Züge jeweils auf beiden Seiten das Tal (Auskunft der Deutschen Bahn aus parlamentarischer Anfrage an das BMVI). Naturräumlich unterscheidet man drei Haupteinheiten: das Obere Mittelrheintal, das Mittelrheinische Becken und das Untere Mittelrheintal (BEST 2020).

Das Obere Mittelrheintal erstreckt sich von der Mündung der Nahe in Bingen bis zur Lahn-Mündung in Lahnstein und trennt den Taunus im Osten vom Hunsrück im Westen. Seit 2002 ist das Obere Mittelrheintal bis zur Moselmündung in Koblenz Weltnaturerbe der UNESCO. Beginnend an der Binger Pforte ändert der Rhein von Westen aus dem Rheingau kommend seine Fließrichtung nach Norden bzw. Nordwesten und fließt zunächst noch recht linear in Richtung Lorch. Bei seinem Eintritt in das Rheinschische Schiefergebirge am Binger Loch verengt sich der Rhein markant auf eine Breite von durchschnittlich nur etwa 300 m und nimmt an Fließgeschwindigkeit zu (BEST 2020). Linksrheinisch wird das Rheintal in diesem Abschnitt kurz hinter Bingen von den sehr steil eingeschnittenen Mündungstälern des Morgenbachs, Kreuzbachs und Poßbachs gegliedert. Im Gegensatz zu den stark bewaldeten Hängen auf der linksrheinischen Seite sind die Südwesthänge der rechtsrheinischen Seite hier umfassend weinbaulich genutzt. Die Kammlagen in

diesem Abschnitt des Rheintals sind auf beiden Rheinseiten dabei nur etwa 1,5-2 km voneinander entfernt und erst auf der Höhe der altpleistozänen Hauptterrassen bei 200 – 220 m ü. NN weichen die sehr steilen Talflanken zum Plateau merklich auseinander (MEYER & STETS 1996). Generell wird am Mittelrhein morphologisch seit MORDZIOL (1908) eine 150 - 200 m hohe typische Terrassentreppe von vier Terrassenkörpern ausgegliedert, die von oben nach unten als Mittelterrasse 4-1 bezeichnet wird. Es existieren jedoch bei anderen Autoren weitere Bezeichnungen. Diese Rheinterrassen sind seit jeher Gegenstand und Thema wissenschaftlicher Forschungsaktivitäten spiegeln sie doch eindrücklich die quartäre Entwicklung des Rheintals zwischen Eintiefungen und Aufschotterungen wider (z.B. PREUß 2017, SEMMEL 1999, SCHIRMER 1990, vgl. Abb. 27).

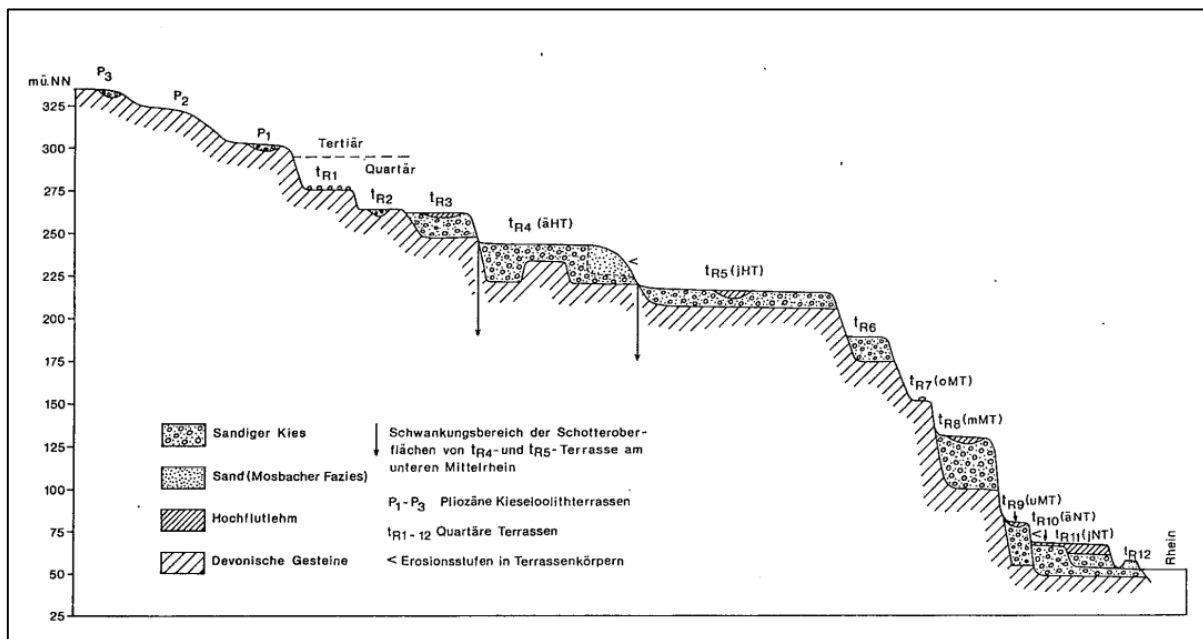


Abb. 27: Typisches Terrassenschema am unteren Mittelrhein (SCHIRMER 1990)

Das Bacharacher Tal zwischen Niederheimbach/Lorch und Oberwesel schließt sich an den Abschnitt ab der Binger Pforte an. Am Talfuß befinden sich an breiteren Talabschnitten langgestreckte mittelalterliche Siedlungen, welche heutzutage vom Weinbau und Tourismus geprägt sind. Zu diesen zählen die überregional bekannten

Gemeinden Lorch, Bacharach und Kaub. Ein Teil dieser Orte fungierte als mittelalterliche Zollstationen unterhalb der zahlreichen Burgen (TREILING 2009). Morphologisch markant sind hier die merklich erweiterten Mündungstäler rechtsrheinisch der Wisper in Lorch und linksrheinisch des Münzbaches in Bacharach (BEST 2020). Die Hänge sind hier deutlich durch eine Vielzahl südöstlich streichender Felsrippen gekennzeichnet, die dadurch deutlich weniger bewirtschaftet sind. Auf Abbildung 28 ist beispielhaft ein schematischer Querschnitt durchs Obere Mittelrheintal bei Bacharach mit typischer Talmorphologie und Nutzung dargestellt.

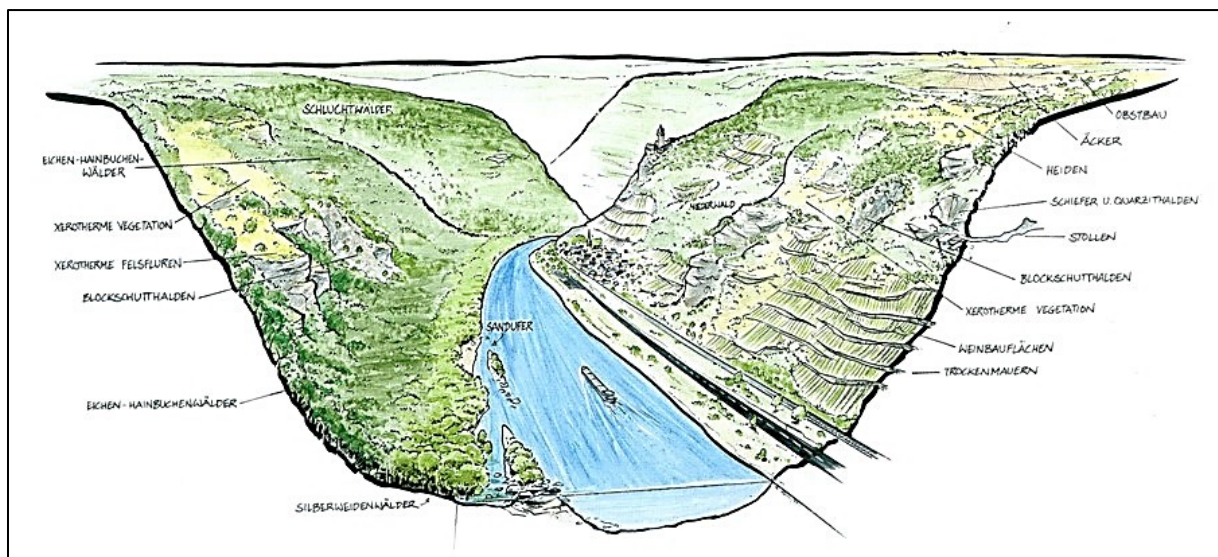


Abb. 28: Gezeichneter schematischer Querschnitt durch die typische Talmorphologie des Oberen Mittelrheintals (Illustration: Bernhard Speh, Gnor o.J.)

Das St. Goarer Tal zwischen Oberwesel und Bad Salzig umfasst den markant kurvig verlaufenden Abschnitt des Oberen Mittelrheintals. Dabei verengt sich der Rhein in mehreren bis zu 90° starken Kurven auf eine Breite von unter 200 m. Der Ufersaum ist hier sehr schmal und bietet so nur wenige Siedlungsflächen in unmittelbarer Flussnähe (BEST 2020). Dadurch sind mit Ausnahme der Städte St. Goar und St. Goarshausen fast nur die unteren Hänge und Höhenlagen besiedelt. In diesem Abschnitt des Oberen Mittelrheintals befinden sich auch die überregional bekannten, fast senkrecht ansteigenden, Rheinfelsen der Loreley, des Rossteins und des

Spitznacks. An die hoch aufragenden Steilhänge schließen sich in den Höhenlagen sanft gewellte Plateaus an, die mit zunehmender Entfernung zum Rhein immer weiter ansteigen (vgl. Abb. 28). Durch die markante canyonartige Morphologie sowie einer Vielzahl von herausgewitterten Felsrücken und Blockschutthalden kommt es in diesem Bereich zu einer besonders hohen Exposition gegenüber Massenbewegungen wie Felsstürzen oder Schuttströmen (GRUNERT & HESS 2010). In Abbildung 29 ist dies schematisch dargestellt.

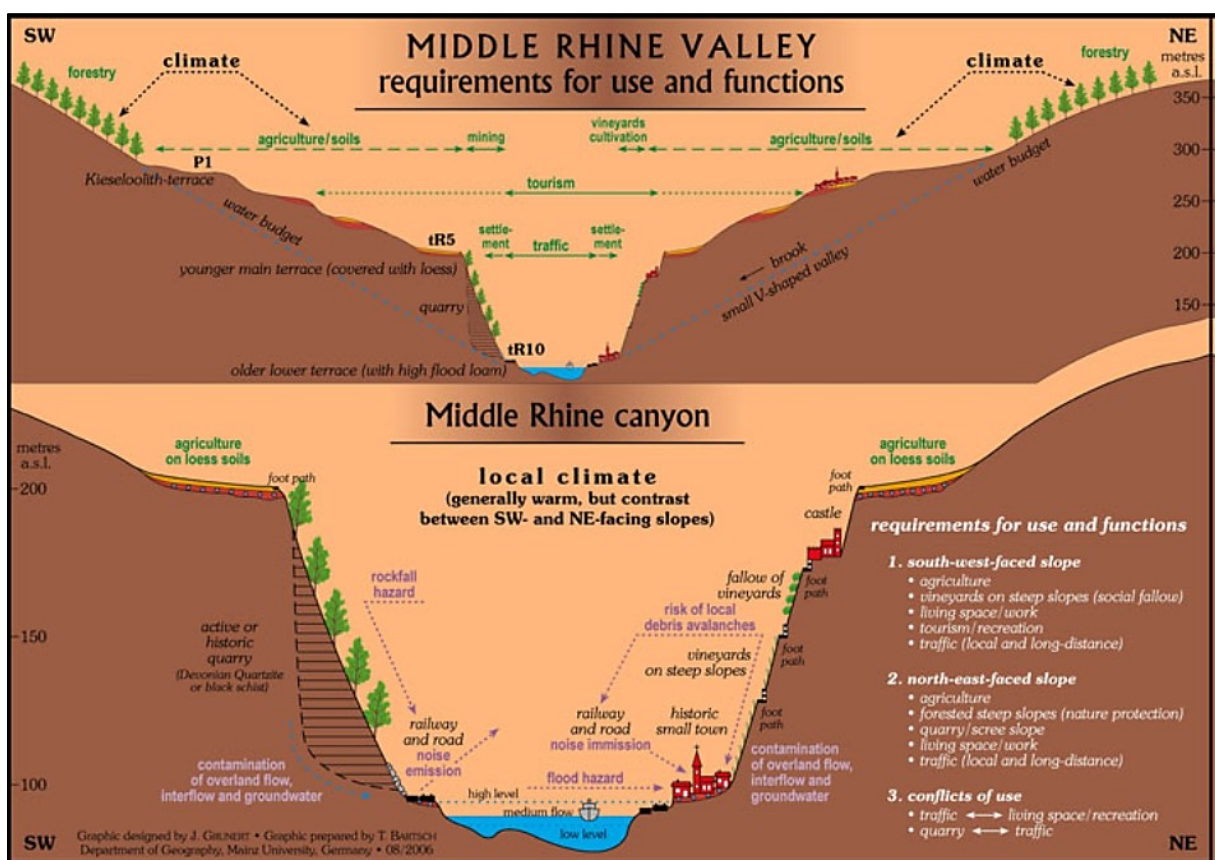


Abb. 29: Schematischer Querschnitt durchs Obere Mittelrheintal bei Kaub/Oberwesel (GRUNERT & HESS 2010)

Die Bopparder Schlingen zwischen Bad Salzig und Lahnstein umfassen die größten Rheinschleife des Mittelrheintals. Unmittelbar hinter Bad Salzig beschreibt der Fluss hier von einer leichten Linkskurve ausgehend eine rechtsseitige Wendung um 180° den sogenannten „Bopparder Hamm“ und geht anschließend in eine ca. 130° starke Linkskurve über (Best 2020). An den jeweiligen Prallhängen sind die Hänge auffallend

steil. An den Gleithängen befinden sich markant flache Hänge auf denen die Orte Boppard, Filsen und Spay liegen. Anschließend geht das Tal in die Koblenzer Talaufweitung und das Mittelrheinische Becken über.

Das Mittelrheinische Becken teilt das Obere- vom Unteren Mittelrheintal und bildet einen größeren intramontanen Senkungsraum innerhalb des Rheinischen Schiefergebirges. Das Becken wird rechtsrheinisch durch den Westerwald sowie linksrheinisch durch die Eifel und das Moseltal begrenzt (BEST 2020). Durch sein wintermildes und regenarmes Klima und aufgrund seiner fruchtbaren Böden wird das Becken seit frühester geschichtlicher Zeit besiedelt und intensiv landwirtschaftlich genutzt. Obstanbau prägt heute das Landschaftsbild ebenso wie größere Industrieansiedlungen entlang des Rheins (GRÄNITZ & GRUNDMANN 2003). Das tektonisch aktive Neuwieder Becken zwischen Koblenz und Neuwied stellt dabei die zentrale Landschaftseinheit des Mittelrheinischen Beckens dar. Auf einer Länge von ca. 22 km trennt es die beiden Engtäler des Oberen und unteren Mittelrheins (BEST 2020).

Das Untere Mittelrheintal erstreckt sich von Andernach bis nach Bonn, trennt den Westerwald von der Eifel und geht im Norden in die Kölner Bucht über. Die Andernacher Pforte zwischen Andernach und Niederhammerstein ist der Beginn des Durchbruchstals des Rheins durch die Ränder des Neuwieder Beckens und des nordwestlichen Rheinischen Schiefergebirges (BEST 2020). Am Eingang der Pforte verengt sich das Rheintal vom breiten und flachen Neuwieder Becken auf lediglich ca 1km Breite und weitet sich im Inneren auf höchsten 4km Breite aus. Ähnlich der Morphologie des Oberen Mittelrheintals hat der Rhein hier ein enges Tal mit steilen Hangfalten geschaffen, wobei die Hänge im Vergleich nicht ganz so steil und hoch aufragen. Auch im Unteren Mittelrheintal sind die zuvor beschriebenen pleistozänen Terrassenabfolgen in den Hängen deutlich zu erkennen (SCHIRMER 1990, vgl. Abb. 27). Linksrheinisch schließen sich im Bereich der Ahrmündung oberhalb der Sinziger Talweitung die Rhein-Ahr-Terrassen an. Nach einer markanten Engstelle bei Unkel,

die den Übergang zwischen den Bundesländern Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen beschreibt, schließt mit der Honnefer Talweitung der nördlichste Abschnitt des Mittelrheintals an. Hier verbreitert sich das Rheintal wieder und mündet in die Kölner Bucht (BEST 2020).

Moseltal

Die Mosel ist mit 544 km der zweitlängste Nebenfluss des Rheins. Der Fluss entspringt in den Vogesen am Col de Bussang und mündet in Koblenz in den Rhein. Dabei erstreckt sich der deutsche Teil der Mosel mit dem Unteren Saartal und dem Mittleren Moseltal als ca. 200 km langes und stark mäandrierendes Engtal zwischen dem Unterlauf der Saar im Südwesten und dem Eintritt ins Mittelrheinische Becken bei Koblenz im Nordosten. Der Fluss erreicht das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit und damit das Bundesland Rheinland-Pfalz im deutsch luxemburgischen Grenzgebiet mit einer Höhe von 127 m.ü.NN. und verlässt ihn auf einer Höhe von 78 m.ü.NN. bei Koblenz mit einem absoluten Höhenunterschied von 49 Metern. Dabei hat Flusslauf sich auf seinem Weg bis zu 300 m tief in das Gestein des Rheinische Schiefergebirges eingeschnitten. Die Tallage und hohe Reliefenergie der Hänge begünstigten ein Klima, das sich in der vom Weinbau geprägten Landschaft widerspiegelt. In den charakteristischen Engtalabschnitten geht die schmale Niederterrasse häufig direkt in die steilen, felsreichen Talhänge über, die in Südlagen Rebflächen sowie mediterrane Vegetationsstrukturen tragen. So finden sich im Moseltal die steilsten Weinbergslagen Europas (WINTER 2006). An den feuchteren Nordhängen hingegen findet man zumeist Wälder und Gebüsche.

In den breiteren Talabschnitten wechseln sich steile Prallhänge mit leicht ansteigenden Gleithängen mit ausgedehnten Flussterrassen ab. Diese landwirtschaftlich und weinbaulich genutzten Flächen dienen als Siedlungsstandorte für zahlreiche Winzerorte. Die Großlandschaft des Moseltals ist zu den angrenzenden Ausläufern von Eifel und Hunsrück durch markante Randhöhen deutlich abgesetzt. Eine Vielzahl

von Nebentälern durchbrechen diese auf ihrem Weg zur Mosel und zerschneiden die Moseltalflanken mit ihren steilen Kerbtälern. Die Wittlicher Senke als Anrainer des Moseltals nimmt dabei eine Sonderstellung ein: Sie liegt isoliert vom Flusstal der Mosel und ist nur über ein Durchbruchstal mit diesem verbunden. Die Lehm Böden bilden hier in Verbindung mit dem vergleichbar günstigen Klima des Moseltals die Voraussetzung für eine traditionell intensive Landwirtschaft und dichte Besiedlung dieses Raumes (BALLENSIEFEN 1957).

Als Mittelmosel bezeichnet man den etwa 120 km langen Flussabschnitt von Trier bis Reil. Die Landschaft ist hier geprägt durch die vielen Mäander des Flusses, der sich zwischen Hunsrück und Eifel in einem tief eingeschnittenen Tal mit teilweise steil abfallenden Hängen einen Weg gesucht hat. Aus dem Bereich der Mittelmosel sind eine Vielzahl von fossilen Großrutschungen bekannt, die sich häufig auf der Prallhangseite der Moselschleifen befinden (LGB 2005; vgl. Kap.3.5.1). Die Mittelmosel ist schon seit der Römerzeit von intensivem Weinbau geprägt und gilt heute als beliebtes Touristenziel.

Als Untermosel oder Terrassenmosel bezeichnet man den knapp 100 km langen Flussabschnitt zwischen Pünderich und der Rheinmündung in Koblenz. Die Landschaft unterscheidet sich durch ein zumeist engeres Tal mit zumeist hohen und steilen Hangflanken. In den nach Süden und Südwesten ausgerichteten Prallhängen wird vielfach Weinbau in oft terrassierten Steillagen betrieben. Hier finden sich auch die steilsten Weinbergslagen entlang der Mosel (WINTER 2006). Der Ausbau der Mosel zu einer durchgängig schiffbaren Wasserstraße mit mehreren Staustufen entlang des Flusslaufs hat das Flussbild und die Ufer nachhaltig verändert. Die Staustufen zwischen machten aus einem Fluss mit zumeist flachen Ufern und stark schwankenden Wasserspiegel ein kanalähnliches Gewässer, mit geregelteren Wasserabflüssen (BUSCH et al. 2007).

3.3 Geologie

Wie beschrieben, sind das Mittelrhein- und das Moseltal aus geologischer Sicht Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Der Bildungszeitraum der Festgesteine im Betrachtungsraum umfasst – wenn auch bisweilen lückenhaft überliefert – einen Zeitraum von rund 465 Mio. Jahren, der vom Mittelordovizium bis in die Oberkreide reicht. Dabei machen Gesteine des Paläozoikums, hauptsächlich aus dem Devon, den Hauptteil aus. Die jüngsten Gesteine aus der Tertiär- und Quartär-Zeit sind in der Regel wenig verfestigt und liegen als meist geringmächtige Bedeckung über den Festgesteinen. Die jüngeren Festgesteine treten vor allem an den Rändern des Rheinischen Schiefergebirges auf (GD NRW 2017). Der lange geologische Entwicklungszeitraum des Gebietes ist gekennzeichnet durch sich ständig verändernde paläogeographische Verhältnisse, das heißt, durch wechselnde Land/Meer-Verteilungen, die mit Änderungen der Klima- und Ablagerungsbedingungen verbunden waren. Deshalb wird im Folgenden kurz die Entwicklungsgeschichte dieses Gebietes skizziert. Tiefergehende Beschreibungen der geologischen Entwicklungsgeschichte des Mittelrhein- und Moseltals finden sich in MEYER & STETS (1996), STETS (2021) & LGB (2005). Im Anhang B findet sich zudem die generalisierte geologische Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz im Maßstab 1:300.000. Die Geschichte der Entstehung des Mittelrhein- und des Moseltals ist verbunden mit dem Einsetzen der variskischen Orogenese. Diese vollzog sich in diesem Gebiet zwischen Oberdevon und Unterkarbon (LGB 2005). Zu dieser Zeit befand sich im Gebiet des heutigen Rheinischen Schiefergebirges der sogenannte rhenohertzynische Ozean. Auf dessen Boden sedimentierten sich in der vorhandenen Trogform des Ozeanbodens im Wechsel tonige und sandige Sedimente in unterschiedlicher Mächtigkeit (NESBOR 2019, vgl. Abb. 30). Teilweise lagerten sich bis zu 10 km mächtige Gesteinsabfolgen bestehend aus überwiegend marinen, klastischen Sedimenten ab (MEYER & STETS 1996).

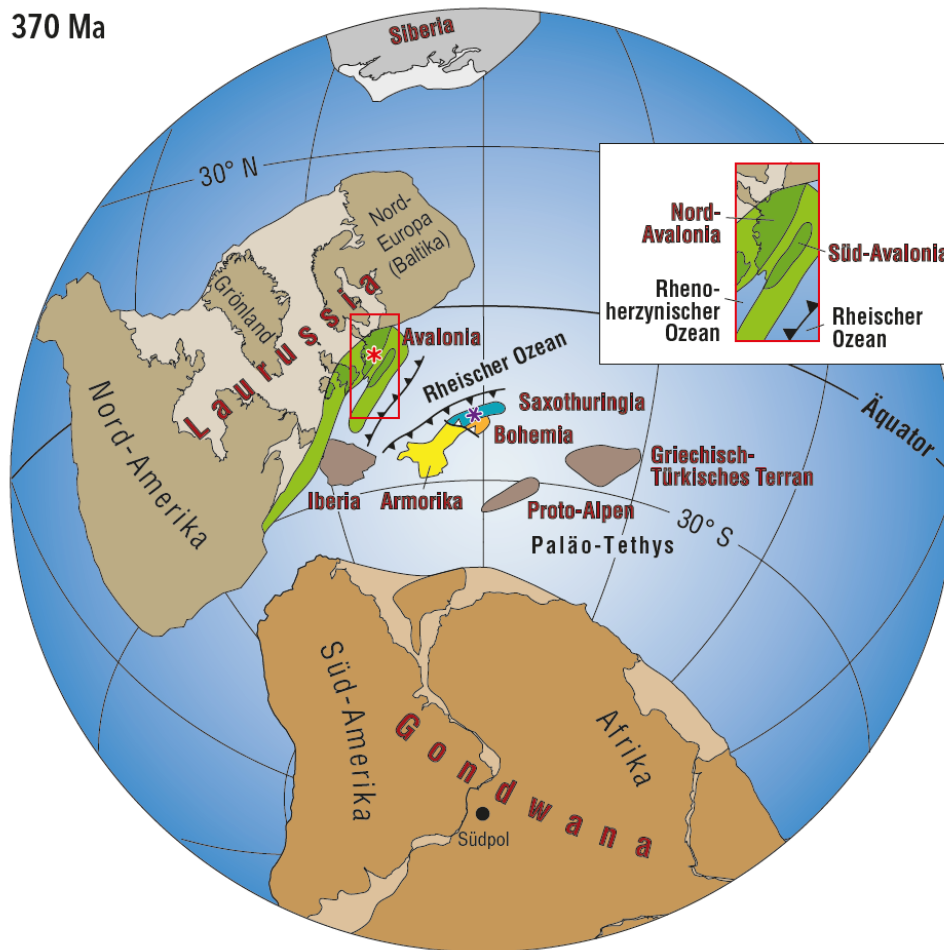


Abb. 30: Geotektonisch-paläogeographische Situation im Oberdevon, schematisiert unter Hervorhebung der europäischen Kontinentanteile. Roter Stern: Rheinisches Schiefergebirge (NESBOR 2019)

Im Unterkarbon kam es zur Schließung des südlichen Teils des rheinzynischen Ozeans durch eine nach Süden gerichtete Subduktion. Zeitgleich mit der Beckenschließung erfolgte im heutigen rheinischen Schiefergebirge eine von Südosten nach Nordwesten voranschreitende Deformation der Gesteine (LGB 2005). Diese variskische Faltung hatte ihren Höhepunkt im späten Unterkarbon. Sie ist vor allem durch Falten und Überschiebungen gekennzeichnet.

Durch diese tektonische Beanspruchung entstand ein natürliches intensiv verzweigtes Trennflächen- und Kluffinventar im Gesteinskörper (JOHNEN 2017). Die marinen Ablagerungen wurden durch den Druck der variskischen Orogenese daraufhin in fossilreiche, sandige Tonschiefer und Tonsteine zum Teil in Wechsellagerung sowie karbonatreiche, quarzitische Sandsteine und Quarzite verfestigt (LGB 2005). Nach

Abschluss der variskischen Orogenese am Ende des Unterperms wurde das gesamte Gebiet herausgehoben, wobei die Ablagerungen aus dem Karbon der Erosion und Abtragung ausgesetzt wurden. Die Verwitterung führte in der Folge dazu, dass das Gebirge bis etwa auf damaliges Meeresniveau einschrumpfte (SCHÖNBERGER 2010). Erst ab dem Jungtertiär konnte der Rhein entlang einer strukturell vorgezeichneten Schwächungszone des Mittelrheingrabs durchbrechen. Die finale Anhebung der vorherrschenden Gebirgsreste des Rheinischen Schiefergebirges fand erst im Quartär genauer im Mittelpleistozän statt und führte zu einem azendenten Einschneiden des Rheins (MEYER & STETS 1996). Die Entwicklung des engen Rheintals wurde so durch die anhaltende Absenkung des Oberrheingrabs und die gleichzeitige Anhebung des Rheinischen Schiefergebirges gefördert (SCHÖNBERGER 2010).

Auch die vormals in einem breiten Trog wenig über Normalnull träge mäandrierende Mosel wurde damit zur schnellen Tiefenerosion gezwungen. Die Mäander mit den typischen Prall- und Gleithängen änderten sich dabei nur wenig. Sie vertiefte ihr Flussbett und schuf die Grundzüge der heutigen Morphologie. Zusammen mit den wechselnden klimatischen Bedingungen im Periglazial des Pleistozän führte diese Einschneidung zudem zur Entstehung der klassischen Terrassenlandschaft des Mittelrheins und des Moseltals (MEYER & STETS 1996). Durch phasenweise Hebung und die Seitenerosion der in fünf oder sechs Eiszeiten entstanden Terrassen. Als da sind: Hoch (+- 370 m), Haupt- (+- 280 m), obere (+- 190 m), mittlere (+- 160 m) und untere Mittelterrasse (+- 130 m) sowie der Niederterrasse (+- 110 m), auf der die alten Siedlungen liegen (LGB 2005). Die kanalisierte Mosel liegt dabei +- 85 m über NN. Der schnelle Einschnitt des Moseltals bedingte Steilhänge mit hoher Reliefenergie. Diese jungen Hänge sind morphologisch noch nicht ausgereift und noch nicht im Gleichgewicht. Hinweise auf die geringe Hangstabilität geben rezente Prozesse wie Rutschungen an den Hangflanken, Steinschläge und Felsstürze, das Kippen von Häusern und Rissbildungen in Straßen (WEHINGER & KATTLER 2014).

Die Flüsse, die am Ende des Tertiärs noch in einem schwach eingeschnittenen Tal von mehreren Kilometern Breite flossen, begannen somit eine Schlucht aus oft kahlen, durchschnittlich 150 m hohen Hängen fast im rechten Winkel zu schneiden aus denen heutzutage steil abfallende, SW-NE streichende devonische Felsen stehen. Das angelegte Trennflächengefüge war dann Ansatzpunkt für chemische-, vor allem aber physikalische Erosionsprozesse, die den Fels an seiner Oberfläche entlang des angelegten Trennflächengefüges, in Fragmente unterschiedlicher Größe zerteilten. Neben der Widerstandsfähigkeit der Gesteine ist die heutige Morphologie der Täler stark vom Verlauf und der Neigung der Faltenachsen der Gesteinseinheiten sowie von Querstörungen und Hauptkluftzonen abhängig (ANDERLE 1976). Wie an zahlreichen Aufschlüssen entlang des Oberen Mittelrheintals zu sehen ist, sind die Gesteine von einer Vielzahl meist steil einfallender Störungen, meist Überschiebungen, zerschnitten, meist mit einem nach Südosten streichenden Block, der auf den nordwestlich davon aufragenden Block aufgeschoben ist. Die wichtigste davon ist die Bopparder Überschiebung (MEYER & STETS 1996). Tektonisch am stärksten betroffen sind jene Überschiebungen, bei denen die Spaltungsebenen steil aufgebogen sind. An solchen Stellen sind die Felsen am stärksten durch Frostsprengung im Winter und Sickerwasser im Frühjahr in Mitleidenschaft gezogen und daher weniger stabil als angrenzende weniger gestörte, aber gleich steile Hangabschnitte (KERZAN 1986). Die Quarzite und quarzitischen Sandsteine des Taunuskamms bilden als Härtlinge markante Höhenzüge mit sehr steilen Hangneigungen von zum Teil weit über 40°. Diese treten gegenüber den um 100–200 m tieferen hügeligeren Verebnungsflächen auf den Hunsrück-Schiefer-Folgen des Hintertaunus und Hunsrück deutlich hervor (ANDERLE 1976). Die geologische Übersichtskarte der Region im Maßstab 1:200.000 herausgegeben durch das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, findet sich auf Abbildung 31.

Diese Quarzite sind mehr oder weniger stabil. Aktuelle Felsstürze sind aus dieser Region nur vereinzelt gemeldet (GRUNERT & HESS 2010). Wegen der steilen Hänge sind hier nur an wenigen Stellen Schotterreste der jüngeren pleistozänen Flussterrassen erhalten, die für Rutschereignisse anfällig sein könnten, im Gegensatz zu den weiten Flächen der sogenannten unteren Hauptterrasse, die vor etwa 800 Jahren abgelagert und gut erhalten sind. Während vor allem die unteren und mittleren Hangpartien heutzutage von unterschiedlich mächtigen Deckschichten aus Schieferschutt überlagert sind, wurden mit der Zeit steilstehende härtere Tonschiefer und quarzitisches Sandsteinschichten rippenartig herausgeprägt und stehen nun als Felsvorsprünge und damit als potenzielle Steinschlagquellegebiete an (LGB 2005).

Der kiesige Sand der oberen Hauptterrasse ist mit tonigem Lösslehm in einer Mächtigkeit von 0,5–1 m bedeckt. Diese Terrasse bildet als Hochfläche ein großes Einzugsgebiet, das nicht nur oberflächlich, sondern auch unterirdisch via Interflow zum Fluss entwässert, was zu vielen temporären Quellen an den Wänden des Mittelrheintal führt (GRUNERT & HESS 2010).

Hydrogeologisch sind die Spaltflächen sowie die zahlreichen Verwerfungen, die das Gestein der Steilhänge durchschneiden, von großer Bedeutung. Die hydraulische Leitfähigkeit hängt dabei stark von der Ausrichtung und Breite der Trennflächen ab (LGB 2005). Ihre Wasserspeicherkapazität ist dabei oft beträchtlich und es können sich bei Sättigung hohe Kluftwasserdrücke aufbauen. Experimente haben gezeigt, dass der Wassergehalt von stark zerklüfteten Gesteinen dabei viel höher ist als der von schlecht zerklüfteten. Ein Beispiel dafür sind unter anderem die devonischen Schiefer des Oberen Mittelrheintals bei Kaub (GRUNERT & HESS 2010). Devonisches Schiefergestein weist aufgrund seiner eher feinkörnigen Komponenten eine geringe Scherfestigkeit und relativ große Wasserempfindlichkeit auf, was ihn rutschempfindlich macht. Der schnelle Einschnitt der Täler bedingte Steilhänge mit hoher Reliefenergie. Massenbewegungen wie Steinschläge oder Rutschungen sind daher und aufgrund der steilen Topographie und des markanten Trennflächengefüges dort häufig auftretende

Phänomene (ALBERTI et al. 2013). Die Schichten – meist Schiefer und Grauwacken – fallen hier in Winkeln zwischen 30 und 65° nach OSO ein, an Stellen, die den ebenfalls OSO-orientierten Hängen der Schlucht ähneln. Diese Koinzidenz begünstigt in hohem Maße Massenbewegungen auf den Einstreuebenen (KÖTT & ROGALL 2016). Kommt es zusätzlich zu Grundwasserversickerungen, ist die Gefahr von Rutschungen oder Steinschlägen besonders groß. Der rechtsrheinische, ca. 4 km lange Hang zwischen Kaub und dem Roßsteintunnel gegenüber von Oberwesel ist ein solch typisches Beispiel und entsprechend sehr steinschlaggefährdet (SCHMIDT 2009).

3.4 Klimatologie

Die klimatologischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebiets sind für die Analyse in dieser Arbeit ebenfalls von besonderem Interesse, da, wie in Kapitel 2.3 und 2.6 beschrieben, witterungsbedingte Faktoren wie etwa konvektive Niederschläge, eine starke Insolation oder markante Frost-Tau-Zyklen bei der Entstehung der hier betrachteten gravitativen Massenbewegungen eine entscheidende Rolle spielen.

Grundsätzlich liegen beide untersuchten Flusstäler im klimatischen Einflussbereich des atlantischen Ozeans und sind durch mäßig kalte Winter und warme Sommer gekennzeichnet. Entsprechend werden das Mittelrhein- und das Moseltal wie die meisten Orte in Rheinland-Pfalz nach Köppen und Geiger mit der Cfb-Signatur (Ozeanisches Klima) beschrieben (LÜERS 2005). Regionalklimatologisch nehmen das Mittelrhein- und Moseltal jedoch eine Sonderposition in Rheinland-Pfalz ein. Durch die zentrale Lage im Rheinischen Schiefergebirge umgeben von Taunus, Hunsrück, Eifel und Westerwald befinden sich die Täler jeweils im Niederschlagsschatten der Hauptwindrichtungen. Sie unterscheiden sich daher von dem Klima der angrenzenden Gebiete erheblich und weisen eine durchschnittliche Jahrestemperatur von knapp 10 Grad oder sogar darüber auf (LÜERS 2005, vgl. Abb. 32). Die mittlere Niederschlagssumme von ca. 600 mm pro Jahr der Wetterstationen in den Tälern ist

dabei etwa halb so gering wie in den angrenzenden Gebieten der Mittelgebirgshochflächen von Hunsrück Eifel oder Westerwald (TREILING 2009).

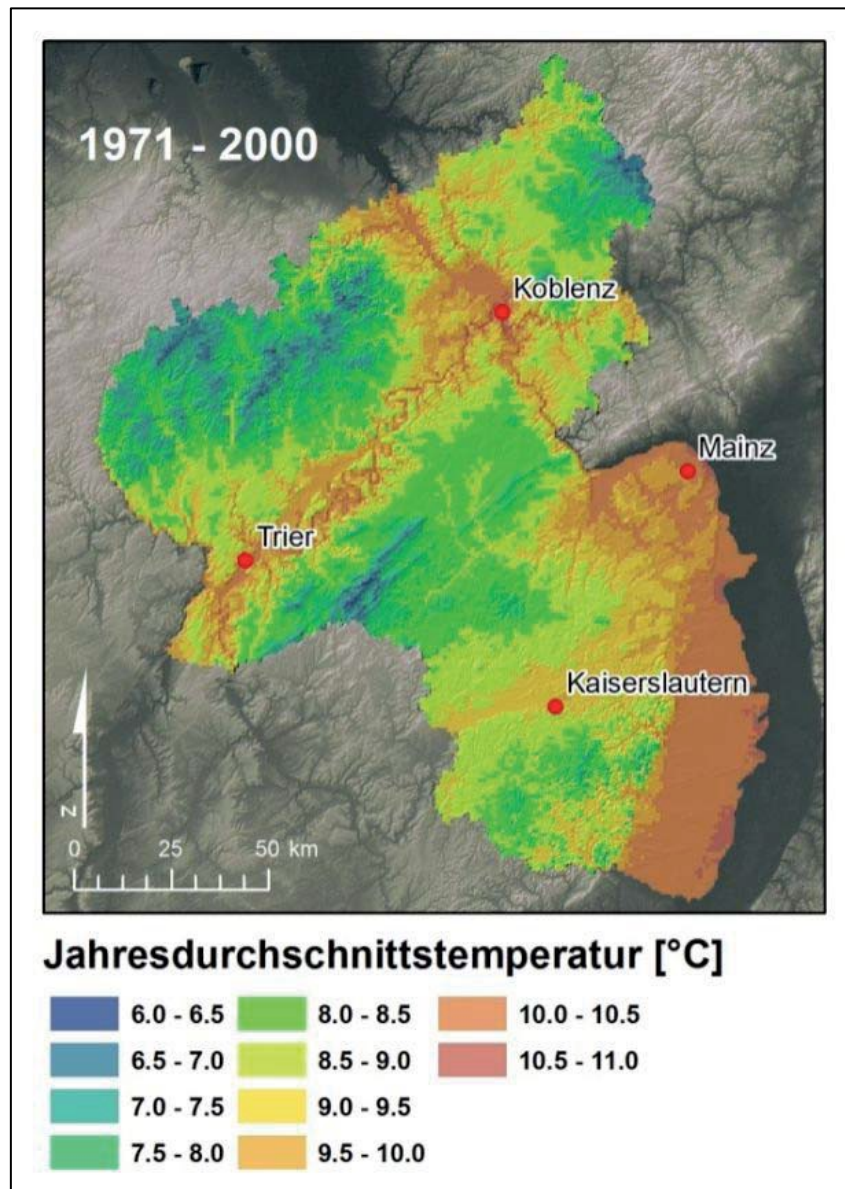


Abb. 32: Jahresdurchschnittstemperaturen in Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 1971-2000 (KfK-RLP 2013)

Es herrschen fast ausnahmslos niederschlagsarme und warme Bedingungen. Die Täler zählen somit auch zu den wärmsten und trockensten Regionen in Deutschland und ganz Mitteleuropa (JOHNEN 2017, LÜERS 2005). Sie sind durch milde Winter und ein frühzeitig einsetzendes Frühjahr gekennzeichnet. Begünstigt werden die

vergleichsweise hohen Temperaturen im Rhein- und Moseltal einerseits durch das warme Flusswasser und andererseits durch die südexponierten devonischen Schieferhänge, welche jeweils als gute Wärmespeicher fungieren (TREILING 2009). Die steilen Talhänge sorgen zudem morgens für einen schnellen Kaltluftabfluss. Schon die Römer erkannten das klimatisch-morphologische Potenzial der beiden Flusstäler, sodass sich die ältesten Weinorte Deutschlands entlang der Mosel und des Rheins ziehen (GILLES 1999).

Hinsichtlich der klimatologischen Kenntage ist nach Daten des Klimawandelinformationssystem-RLP (KWIS, KfK-RLP 2020) auffällig, dass die Anzahl der Sommertage in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen ist. Im Gegensatz dazu lässt sich ein abnehmender Trend der mittleren Anzahl von Frosttagen erkennen. Entsprechend ist auch ein Anstieg der durchschnittlichen Temperatur zu beobachten (vgl. Abb. 33).

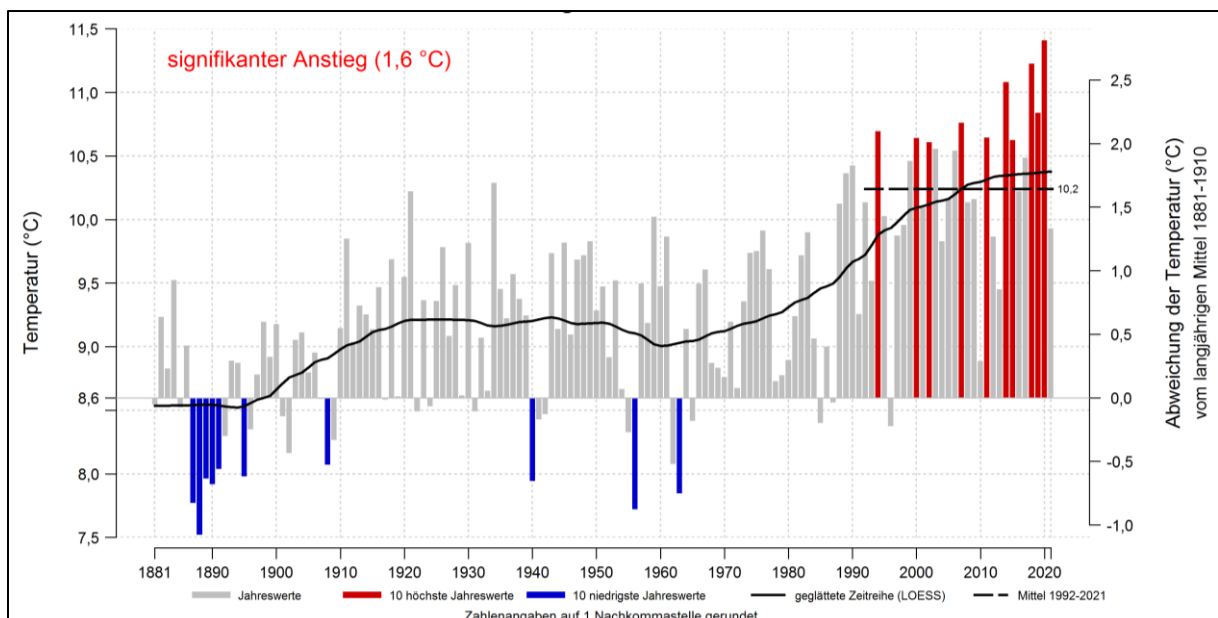


Abb. 33: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur seit 1881 im Bereich des Mittelrheintals (KfK-RLP 2020)

Die jährliche Niederschlagsmenge zeigt von Jahr zu Jahr große Schwankungen (zwischen 500 - 1050mm). Vor allem hohe Niederschläge in den Wintermonaten führen zu regelmäßig auftretenden Hochwassern im Einzugsgebiet der Mosel und der Rheins. Dennoch ist der langjährige Trend der Niederschlagsentwicklung in den beiden Tälern rückläufig. Abbildung 34 stellt diesen Trend schematisch dar und veranschaulicht die Auswirkungen zukünftiger klimatischer Szenarien beispielhaft für das Moseltal.

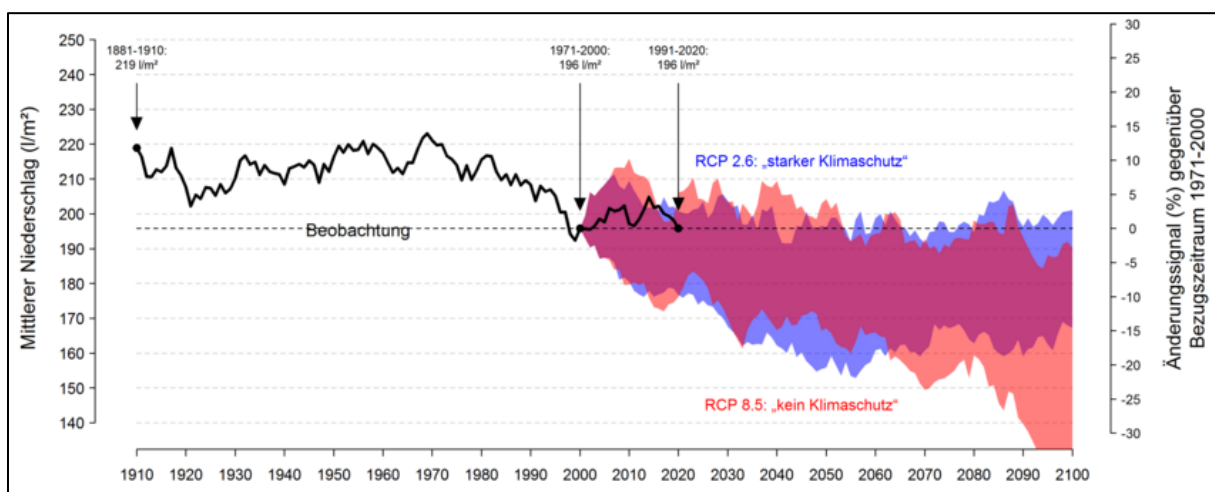


Abb. 34: Bandbreitengraphik der projizierten Entwicklung des mittleren Niederschlags in den Sommermonaten im Moseltal bis Ende des 21. Jahrhunderts (KfK-RLP 2020)

Wie WERNER (2018) jedoch beschreibt, stehen in den Flußtälern im Mittelrhein und Moseltal bei der Gesamtniederschlagsmenge vor allem im Sommer zunehmend einzelne starke Niederschlagsereignisse heraus. So wird beispielsweise für die Jahre 2016 und 2021 an der Klimastation Bacharach im Mittelrheintal oder an der Station Bernkastel-Kues an der Mosel deutlich, dass das jährliche Maximum der Monatsniederschläge ungewöhnlicherweise im Juni oder Juli lag (Agrarmeteo-RLP 2022, vgl. Abb. 35).

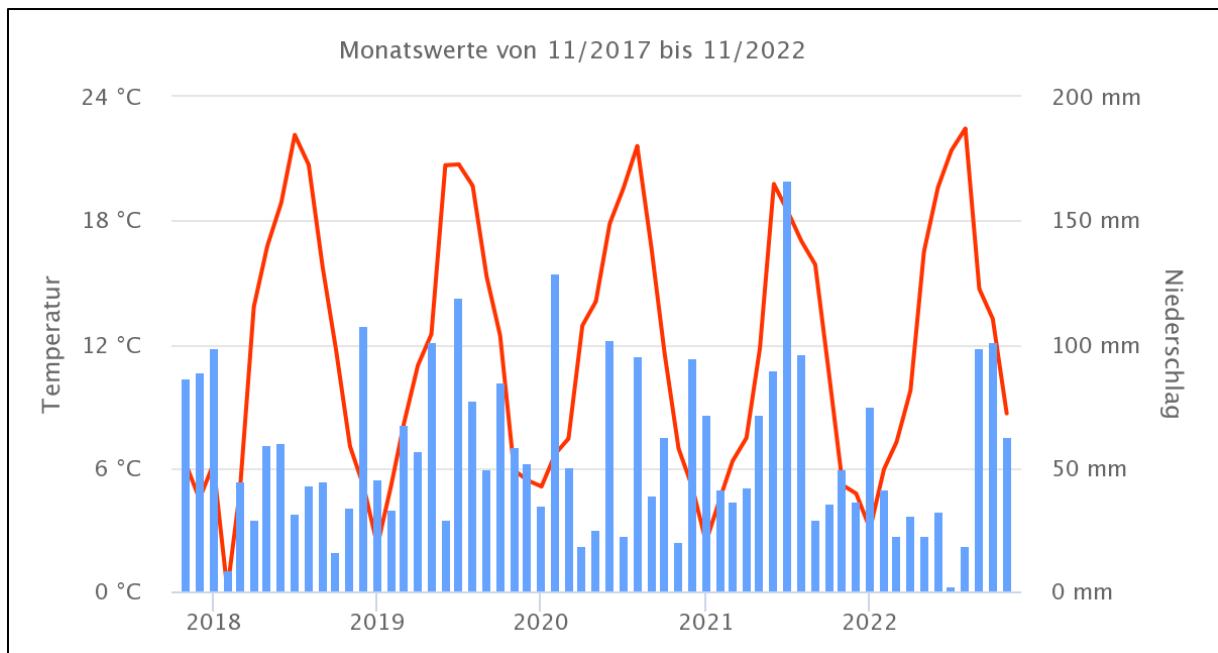


Abb. 35: Temperatur- und Niederschlagsverlauf der Jahre 2018-2022 an der Wetterstation Berkastel-Kues (Daten: Agrarmeteo-RLP 2023)

Insgesamt sind dort bei den sommerlichen Niederschlägen über 150 mm und damit mehr als 2/7 der Niederschlagssumme des gesamten Jahres gefallen, ein Großteil davon bei einzelnen konvektiven Unwetterereignissen.

Unter den Bedingungen des Klimawandels muss gemäß der Clausius-Clapeyron-Gleichung mit einer Zunahme der Wasserdampfmenge um etwa 7 % pro Grad Celsius Erwärmung gerechnet werden. Diese bedingt auch die Intensität von Niederschlagsereignissen, die somit mit vergleichbarer Rate ansteigt. Für den konvektiven Anteil des Niederschlagsgeschehens zeigen Untersuchungen im Zusammenspiel mit hohen Oberflächentemperaturen sogar eine Zunahme der Intensität um bis zu 14 % pro Grad Celsius Erwärmung (DWD 2016). Dabei wird von einigen Autoren prognostiziert, dass sich diese Entwicklung zunehmend verstärken wird und es zu einer generellen Abnahme des Niederschlages bei gleichzeitiger Zunahme von konvektiver Starkregenereignissen vornehmlich im Sommer kommen könnte (BECKER et al. 2016, BRASSEUR et al. 2017). Hier wird das generelle Phänomen deutlich, dass es vor allem die kaum prognostizierbaren konvektiven, hochintensiven

Gewitterzellen sind, die die in Bezug auf Massenbewegungen geologisch recht ungünstigen Rahmenbedingungen des Mittelrhein- und Moseltals noch einmal erheblich verschärfen. Somit liegt das Risiko für ein solches Ereignis im Projektgebiet zwar nicht höher als anderswo in Rheinland-Pfalz, seine Folgen sind jedoch aufgrund der geomorphologischen und infrastrukturellen Grundsituation deutlich weitreichender.

3.5 Historische Massenbewegungsereignisse im Mittelrhein- und Moseltal

Das Wissen um das Auftreten von Naturkatastrophen in den Flusstälern des Rheins und der Mosel ist bereits seit Jahrhunderten bekannt. Schon seit den ersten urkundlichen Besiedlungen zu Zeiten der Römer wird von Hochwassern und Massenbewegungen an den Hängen berichtet. Dahingehend sind auch Hangsicherungsmaßnahmen zum Schutz der Verkehrsinfrastruktur und zur Sicherung der weinbaulichen Nutzung der Hänge überliefert (SCHNEIDER 1851, BRANDES 2013). Bis in die heutige Zeit sind diese Themen in diesen Gebieten präsent und nehmen mit der immer dichteren Besiedlung und Nutzung der Täler einen immer größeren Stellenwert ein. In diesem Sinne sind sie auch bedeutungsvoll für die Entwicklung von treffsicheren Analyseansätzen. Das Verständnis dieser aufgetretenen Prozessabläufe und Schadensauswirkungen ist daher essentiell wichtig für die Entwicklung von angemessenen Modellierungen.

Bei den Massenbewegungen im Rheinischen Schiefergebirge ist klassischerweise zwischen Felsstürzen und Großrutschungen im Sinne von großvolumigen und z. T. tiefgreifenden Gleitbewegungen zu unterscheiden. Auch sind Kriechbewegungen und seit einigen Jahren auch Murabgänge präsent, die bis dahin in dieser Region noch nicht aufgetreten beziehungsweise noch nicht als solche klassifiziert wurden (KRAUTER et al. 2012). In diesem Kapitel werden die Ursachen, Abläufe, Statistiken,

Gefährdungspotenziale und Sicherungsmaßnahmen bisheriger charakteristischer Massenbewegungen in den Gebieten am Mittelrhein- und Moseltal analysiert. Dabei werden für Rutschungen, Felsstürze und Murgänge jeweils markante Beispiele näher beschrieben.

3.5.1 Rutschungen

Die meisten Rutschungen im Rheinischen Schiefergebirge sind Gleitungen auf vorgegebenen Trennflächen, meist Schicht- oder Schieferungsflächen, gelegentlich aber auch Störungszonen, die im Zusammenwirken mit anderen Trennflächen die Bewegungsbahnen und Gleitflächen bilden. Die Wechselfolgen von quarzitischen Sandsteinen und Tonsteinen bzw. Schiefertonen sowie die verbreitete tektonische Schichtverstellung und tektonische Störungen (Überschiebungsbahnen) bieten im Rheinischen Schiefergebirge günstige geologische Voraussetzungen für Rutschungen. Die Tonsteine sind generell wasserempfindlich und begünstigen somit Rutschungen zusätzlich (KRAUTER et al. 2012). Im Mittelrhein- und Moseltal herrschen durch die übersteilten Hänge der tief eingeschnittenen Flusstäler im Zusammenspiel mit der anstehenden Geologie daher eine sehr rutschungsbegünstigende Grundgemengelage. Das belegen auch eine Vielzahl rezenter Rutschungsereignisse sowie der in der Hangmorphologie erkennbare fossile Großrutschungen (LGB 2005).

Die größte Naturkatastrophe, die in historischer Zeit im Zusammenhang mit Massenbewegungen am Mittelrhein- und Moseltal steht, ereignete sich am späten Abend des 11. März 1876 in Kaub. Ausgelöst durch langanhaltende Niederschläge und starkes Infiltrieren des Wassers in den Hang, was zu einer Erhöhung des Hangwasserspiegels, einer Gewichtszunahme und einem Porenwasserüberdruck führte, begann sich der steile Hang hinter der Stadt über eine Breite von fast 100 m zu bewegen (vgl. Abb. 36). In einem von Zeitzeugen als rapide beschriebenen Tempo rissen die Rutschmassen auf dem Weg nach unten die zuvor angelegten Schutzmauern

mit fort und verschüttete am Fuß des Berges zehn Häuser. Deren Trümmer begruben die schlafende Bevölkerung, sodass auf tragische Art 28 Menschen ihr Leben verloren. Die lokale Zeitung *Cauber Nachrichten* schätzte in ihrem am 19. März 1876 erschienenen Bericht über die Katastrophe das Volumen der abgegangenen Kubatur auf über 100.000 m³.



Abb. 36: Historische Aufnahme der Felsgleitung von 1876 von der gegenüberliegenden Rheinseite (Stadt Kaub o.J.)

Im Nachgang des Ereignisses wurde festgestellt, dass die Menschen zuvor keineswegs nachlässig oder uninformiert waren. Die Gefahr war seit einiger Zeit bekannt und mit dem Bau einer Hangsicherung in Form einer Schwergewichtsmauer bereits begonnen worden, um den so wörtlich "bröckelnden Stein" an Ort und Stelle zu halten (GRUNERT & HESS 2010). Oberhalb des Steilhangs befand sich ein großer Schiefersteinbruch mit

dem Namen *Kalkgrub*. Sein Abraum war bei den Abbauarbeiten in den Hang abgekippt worden und es liegt nahe, dass es dieses unverfestigte Material war, welches sich bei dem Ereignis mit dem darunterliegenden Tonschieferschutt vermischte und verflüssigte (schematische Zeichnung findet sich in Abb. 37). Rückblickend war das Rutschereignis daher vermutlich kein rein natürlicher Vorgang, sondern war zumindest teilweise anthropogen induziert (GRUNERT & HESS 2010). Finaler Auslöser waren dann die anhaltenden Regenfälle der vorangegangenen Wintermonate, die den Boden und die Deponie vollständig durchnässt hatten. In den Ortschroniken ist der Winter 1875/76 als einer der nassesten überhaupt in der Kauber Geschichte vermerkt (GRUNERT & HESS 2010).

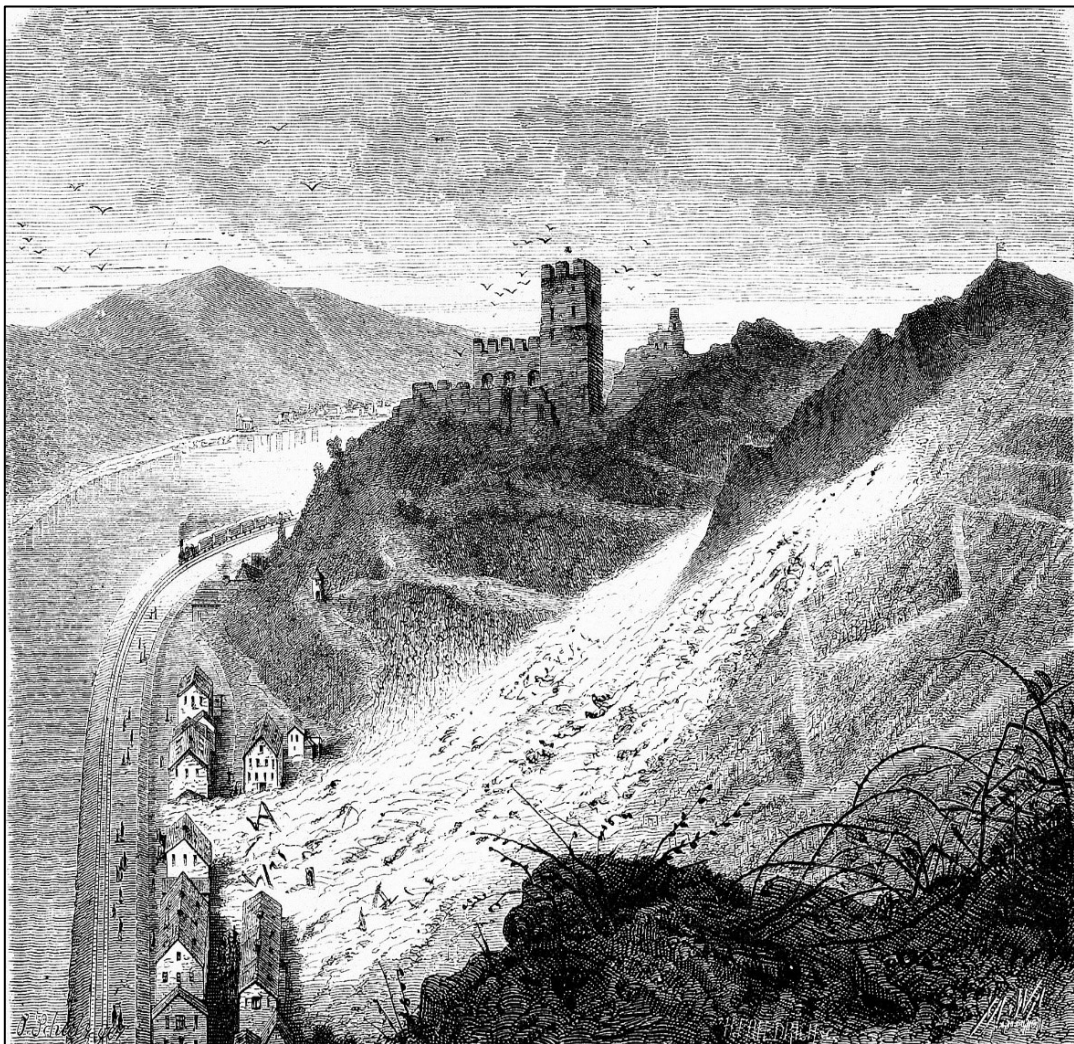


Abb. 37: Zeichnung der Felsgleitung von Kaub aus dem Jahr 1876 (Unbekannter Illustrator, Chroniken der Stadt Kaub o.J.)

Der Hang wurde im Nachgang von den Rutschmassen beräumt, stabilisiert und die Häuser am Hangfuß wieder aufgebaut. Noch heute sind in der Morphologie des Hanges deutliche Spuren des Ereignisses zu erkennen.

Ein weiteres markantes Fallbeispiel für eine Großrutschung am Mittelrhein- und Moseltal stellt die auch heute noch aktive Großrutschung bei Pünderich an der Mosel dar. Das aktive nach Ost-Südost exponierte Rutschareal befindet sich auf der Westflanke eines Moselprallhanges im Bereich der DB-Strecke Koblenz-Perl zwischen den Ortschaften Pünderich und Reil. Der Hang ist noch immer stetig in Bewegung und wird messtechnisch überwacht. Die Gesamterstreckung der Großrutschung umfasst eine Breite von etwa 300 m und eine Höhe von 158,8 m von der Mosel bis zum Reiler-Hals Bergkamm (KRAUTER et al. 2012).

Das Rutschareal ist überwiegend aus devonischen schwach metamorph überprägten Sedimentgesteinen aufgebaut. Wechselfolgen von Quarziten, quarzitischen Sandsteinen, Siltsteinen, sandigen Schiefen und Tonschiefern bilden die wichtigsten Gesteinseinheiten. Durch tektonische Beanspruchung ist das Gebirge in weiten Teilen des Moselprallhanges stark aufgelockert und die unterdevonischen Tonschiefer mit den quarzitischen Einschaltungen sind gefaltet und geschiefert. Eine intensive Durchfeuchtung des gesamten Geländes, die mit der hohen tektonischen Beanspruchung einhergeht, wird auch noch rezent besonders durch stark vernässte Böschungsbereiche und mehrere Wasseraustritte deutlich (KRAUTER 1996).

Schon bei der Begutachtung des Eisenbahn-Direktionsbezirks St. Johann-Saarbrücken 1896 wurde der betrachtete Abschnitt der Bahnstrecke Koblenz-Perl als rutschungsgefährdet eingestuft. Da es nach Aussagen von Winzern in den darauffolgenden Jahrzehnten immer wieder zu kleineren Rutschungen und hangabwärtsgerichteten Hangbewegungen in diesem Gebiet kam wurde der Hang auch für die Forschung an aktiven Großrutschgebieten interessant. Im Bereich des Rutschareals lässt sich eine für Rutschungsgebiete typische unruhige Morphologie

oberhalb der Bahntrasse mit zwei Aufwölbungs (Akkumulations-)Zonen erkennen (KRAUTER 2000). Anfang der 1990er Jahre nahmen die Böschungsverformungen – wahrscheinlich durch Verschlämmung von Entwässerungsstollen deutlich zu. Anfang Mai 1995 entstanden im Bereich des unteren Wirtschaftsweges Risse in der Schwarzdecke und in Wirtschaftswegen, die auf anhaltende und sich verstärkende Böschungsbewegungen schließen ließen. Die Schäden waren so groß, dass der obere Weg gesperrt werden musste. Der Einbau von einer Geotextilmatte unter die Schwarzdecke des oberen Weges sollte weitere Rissbildungen minimieren (KRAUTER 2000).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bis dahin eine deutliche Zunahme der Beschleunigung der Bewegung generell bei hohen Niederschlagsmengen im Winter/Frühling beobachtet werden konnte. Bewegungen wurden bei durchschnittlichen monatlichen Niederschlägen in den Monaten Dezember bis April von ca. 80 mm ausgelöst, wobei dieser Grenzwert nur einen relativen Richtwert angibt (KRAUTER 1996). Es kann durchaus auch vorkommen, dass durch das Zusammenspiel anderer Klimafaktoren über einen längeren Zeitraum auch wesentlich geringere Niederschlagsmengen ausreichen, um Verformungen auszulösen oder in Gang zu halten. Es stellte sich zudem in der wissenschaftlichen Nachbetrachtung heraus, dass Beschleunigungen der Bewegungen in direktem Zusammenhang mit größeren Wasserstandsänderungen der Mosel stehen. Bei allen Bewegungsmessungen zeigte sich deutlich, dass größere und länger anhaltende Moselhochwasser Bewegungsbeschleunigungen von mehreren Wochen bis wenige Monate Dauer verursachen (LAUTERBACH & FEUERBACH 2010).

Neben diesen Beispielen gibt es eine ganze Reihe weiterer fossiler Großrutschungen am Mittelrhein- und Moseltal, die sich scheinbar in einem labilen Gleichgewichtszustand befinden und bei langanhaltender Durchfeuchtung wieder in eine Bewegung übergehen könnten. Diese Großrutschungen sind auf hochaufgelösten digitalen Geländemodellen gut zu erkennen und befinden sich sehr häufig an

Prallhängen am Flusslauf. Das Alter und die Entstehung dieser Rutschgebiete ist bis heute Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung und nicht abschließend geklärt, hängt vermutlich jedoch eng mit der raschen Talgenese durch die Hebung des Rheinischen Schiefergebirges im Quartär zusammen. Manche Autoren vermuten zudem eine starke Häufung des Auftretens dieser Rutschungen im sehr feuchten Atlantikum in Mitteleuropa (PRINZ & STRAUß 2011, LGB 2005, WAGENPLAST 2005). Gerade an der Mittelmosel sind einige von diesen Rutschungen vergleichbar mit der Rutschung in Pünderich noch aktiv und bewegen sich kriechend korrelierend mit der Wasserverfügbarkeit um mehrere Zentimeter im Jahr.

Diese ausgedehnten alten Rutschgebiete können, wenn sie nicht rechtzeitig erkannt werden, bei Straßenbaumaßnahmen Ortserweiterungen oder Flurbereinigungen erhebliche Schäden und Mehrkosten in Millionenhöhe verursachen. Aufgrund dessen wurde vom Landesamt für Geologie und Bergbau ein Projekt zu Kartierung und Gefahreneinschätzung dieser Großrutschungen an der Mittelmosel durchgeführt (LGB 2005, siehe Abb. 38). Im Zuge der Bearbeitung zeigte sich rasch, dass die von Bergzerreißung und Talzusub betroffenen Gebiete an der Mittelmosel erheblich größer und tiefer reichend sind, als bisher allgemein angenommen wurde. Durch Bohrungen und geophysikalische Prospektionen konnten extrem tiefe Gleitflächen, teilweise sogar unter dem derzeitigen Moselniveau, rekonstruiert werden. Außerdem konnten zahlreiche neue Rutschgebiete durch detaillierte Kartierung gefunden werden (LGB 2005). Die entstandene Karte liefert wichtige Anhaltspunkte für die Planung und Vorerkundung von Bauprojekten. Eventuelle Problemfälle können so rechtzeitig erkannt, entsprechend untersucht und zweckmäßige Sicherungsmaßnahmen getroffen werden (LGB 2005). Dieses Projekt zeigt deutlich die Bedeutung und Notwendigkeit auch für andere Massenbewegungsarten an den besonders betroffenen Gebieten eine flächendeckende Gefährdungseinschätzung in Form von Gefahrenhinweiskarten zu erstellen.

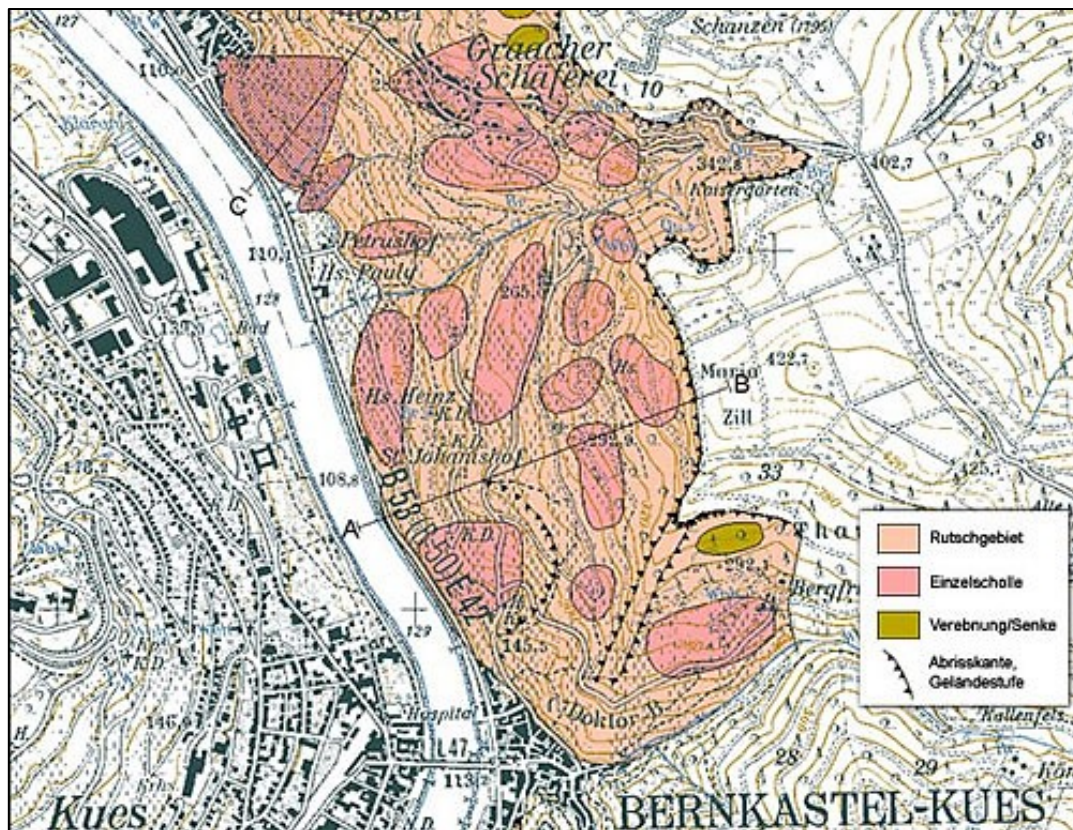


Abb. 38: Ausschnitt aus der Hangstabilitätskarte Mittelmosel bei Bernkastel-Kues (LGB 2022)

3.5.2 Steinschläge und Felsstürze

Steinschläge und Felsstürze sind an Mittelrhein- und Moseltal durch die hohe Reliefenergie der Hänge und die tausendfach anstehenden, zerklüfteten devonischen Felsausbisse relativ häufige Phänomene. Mehrmals jährlich treten diese Abgänge in verschiedenen Größen und mit unterschiedlicher Schadensauswirkung auf. Sich lösenden Einzelbrocken kleinerer Kubatur sind ein nahezu alltägliches Phänomen und betreffen beide Flusstäler in großen Gebieten. Größere Felsstürze treten weitaus seltener auf und gehen in ihren Auswirkungen mit zum Teil verheerenden Folgen für die unterliegende Infrastruktur einher. Diese Sturzprozesse sind zumeist an Quellgebiete wie offene Felsrippen, Steilwände oder auch kollabierende alte Weinbergsmauern gekoppelt und werden vornehmlich durch physikalische Verwitterungsprozesse wie anhaltende Frost-Tau Zyklen, hohe Kluftwasserdrücke oder Insulationsgradienten losgelöst (DIKAU 2019).

Teile der Flusstäler sind gerade seit dem Bau der Bahnstrecken im 19. Jahrhundert an den Talsohlen beidseitig der Flussläufe mit Sicherungsmaßnahmen gegen diese Phänomene gesichert (GRUNERT & HESS 2010). Große, zum Teil gestaffelte, Fangzäune und Vernetzungen bilden heutzutage einen wirksamen Schutz, der jedoch bei weitem nicht flächendeckend und auch nicht gegen extreme Ereignisse wirksam ist. Die folgenden aktuellen Fallbeispiele verdeutlichen dabei die mögliche Schadenswirkung und die Notwendigkeit einer tiefergehenden Analyse zur Ausweisung von Gefahrenzonen.

Am 15. März 2021 kam es etwa 500 m südöstlich der Ortslage von Kestert zu einem großen Felssturz, bei dem die am Hangfuß verlaufenden Bahngleise der rechtsrheinischen Bahnstrecke größtenteils verschüttet wurden (Abb. 39). Der Felssturz weist ein für das Mittelrhein- und Moselgebiet außergewöhnlich großes Volumen von schätzungsweise 15.000 – 20.000 m³ abgegangenen Gesteinsmassen auf. Die Ursache hierfür ist die Kombination aus der steilen Geländeform, der ungünstigen Raumlage von Trennflächen im Fels und von natürlichen Prozessen, die zu einem Verlust der Verbandsfestigkeit führten. Infolge von ergiebigen Niederschlägen kam es zu dem Abgleiten eines großen Gesteinspaketes, das sich bei dem Sturz hangabwärts in zahllose Blöcke und Steine zerlegte. Durch das Einschneiden der Gewässer in Folge der quartären Hebung des Rheinischen Schiefergebirges wurden große Felsbereiche der Talflanken durch die fehlende Einspannung druckentlastet und einer intensiven Verwitterung ausgesetzt (LGB 2021).



Abb. 39: Seitliche Ansicht des Felssturzes von Kestert vom 15.03.2021 (Foto: A. Wehinger 2021)

Die Felssturzmassen gehören den Bornhofen-Schichten des Unterdevons an. Diese bestehen aus einer Wechselfolge von Ton- und Siltschiefern mit eingeschalteten Quarziten. Die Schichten besitzen im Mittel ein Südwest-Nordost-Streichen. Im Bereich des Felssturzareals weisen sowohl die Schichtung als auch die Schieferung ein Einfallen nach Südosten und damit hangparallel auf. Dieses kataklinale Einfallen weist grundsätzlich ein erhöhtes Potenzial des Abgleitens auf (WERNER 2021).

Durch den Verschnitt der Trennflächen in Verbindung mit einem hohen Durchtrennungsgrad konnten verhältnismäßig große Felsplatten und Kluftkörper aus dem Verband gelöst werden. Wenn dann zusätzliche Faktoren, wie die Witterung, insbesondere Frost, in den Fels eindringende Niederschläge oder auch Wurzeln von Sträuchern und Bäumen für eine zusätzliche Auflockerung und Verwitterung sorgen, verringert sich die Gesteinsverbandsfestigkeit, bis irgendwann die haltenden Kräfte überschritten waren. Dabei war der Zeitpunkt des Felssturzes am Ende des Winters für Felsstürze durchaus typisch (LGB 2021).

Mehrere weitere große Felsstürze wurden bei ähnlichen Witterungsbedingungen in den letzten Jahren registriert. Ein Beispiel dafür ereignete sich am 26. Januar 2023 im Stadtgebiet von Trier an der Felswand oberhalb des Rebhangs „Augenscheiner“. Dabei lösten sich ca. 5.000 m³ Gestein aus der überregional bekannten Buntsandsteinfelswand und rollten den Weinberg hinab. Die einzelnen Kluffkörper zerlegten sich dabei kaum, sodass an der unterliegenden Bundesstraße B53 Blöcke mit einer Kantenlänge von bis zu 3 Metern ankamen. Auf dem Weg abwärts zerstörten die stürzenden Blöcke auf einer Schneise von ca. 15x 100 Metern die bestehende Rebfläche (vgl. Anhang C). Glücklicherweise konnten die stürzenden Blöcke von einem Fangzaun vor dem Aufprall auf der Straße aufgehalten werden, der nach einem vergleichbaren Felssturz im Jahre 2008 an dieser Stelle vom Landesamt für Geologie und Bergbau empfohlen und vom Landesbetrieb Mobilität zum Schutz der Straße bebaut wurde (siehe Abb. 40).

Ausgelöst wurde der Felssturz während einer starken Frostperiode, bei der es vermutlich zur Aufweitung der in der Buntsandsteinwand bestehenden Großklüfte kam. In Kombination mit einer, an der Stelle des Ausbruchs vorherrschenden markanten Unterschneidung und entsprechend fehlendem Wiederlager kam es zum initialen Abgleiten eines hervorstehenden Felsspornes. Durch die geringe Höhe des Ausbruchs in der Felswand konnten die Blöcke während der Sturzphase im freien Fall keine große kinetische Energie vor dem ersten Bodenkontakt aufnehmen, sodass der Sturz glücklicherweise verhältnismäßig langsam ablief und problemlos vom Fangzaun am Hangfuß gehalten werden konnte. Ohne den bestehenden Fangzaun wären mutmaßlich dennoch einzelne große Blöcke auf die Bundesstraße gestürzt und hätten bei einer Blockade oder einem Unfall mit einem Auto durch die als Ausfallstraße der Großstadt Trier genutzten Bundesstraße ein sehr hohes Schadenspotenzial gehabt.



Abb. 40: Drohnenaufnahme des Felssturzes vom 25.01.2023 am Trierer Augenscheiner (Foto: T. Hagge-Kubat 2023)

Diese Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit zeigen die Wirkungen, welche Felssturzereignisse mit mittlerem und großem Volumen auf die Verkehrsinfrastruktur in den Tälern haben und welche Bedeutung präventive Maßnahmen haben können. Kleinere Sturzvolumen wie Stein- und Blockschlag treten im Mittelrhein- und Moseltal dabei jedoch viel häufiger auf als Felssturzereignisse und sind aber dabei nur bedingt weniger gefährlich. Durch ein verhältnismäßig kleines Steinschlagereignis ausgehend aus einem teilweise kollabierten Felsausbiss aus devonischem Schiefer südlich der Burg Rheinstein am 02.01.2008, musste beispielsweise die komplette Bundesstraße B 9 sowie der Bahnstrecke Koblenz-Mainz zeitweise gesperrt werden. Mehrere Kubikmeter Fels hatten sich aus dem Bereich des sogenannten Aussichtsturms ca. 50 m oberhalb der Straße gelöst und waren auf die Verkehrswege gestürzt. Teile des

abgestürzten Materials hatten sich in einer Felsrinne angesammelt und drohten anschließend talwärts zu rutschen. Erst nach der Beräumung der labilen Schuttakkumulation und weiterer akut absturzgefährdeter Felsblöcke konnten die Verkehrswege wieder für den Verkehr frei gegeben werden (ALBERTI et al. 2013).



Abb. 41: Straßensperrung nach einem Steinschlagereignis vom 02.01.2008 nahe der Burg Rheinstein (Foto: M. Alberti 2008).

Ein weiteres Beispiel dieser Größenordnung ist die zweitweise Streckensperrung der der B49 bei Koblenz-Lay aus dem Jahr 2021, bei dem sich zwei größere Blöcke aus dem anstehenden Gesteinsverband oberhalb der Bundesstraße gelöst hatten und auf die Straße gefallen waren (LBM 2021). Glücklicherweise kam auch hierbei kein Mensch direkt zu Schaden. Nach der Beräumung der Gesteinsmassen konnte der Verkehr wieder freigegeben werden.

In den Archiven der Landesämter sind aus den letzten 50 Jahren dutzende solcher Fälle dokumentiert, die zum Teil auch zu Personenschänden geführt haben (vgl. Abb. 41 & 42). Diese Beispiele zeigen deutlich die Relevanz der präventiven Gefahrenanalyse und damit einhergehender Sicherungsmaßnahmen an.



Abb. 42: Beschädigung eines parkenden PKW durch ein Steinschlagereignis bei Lehmen an der Mosel (LGB Fotoarchiv)

Eine weitere Quelle von Steinschlägen ist, insbesondere am Mittelrhein- und Moseltal, aufgegebene mit der Zeit instabil gewordene Weinbergsmauern (HAGGE-KUBAT et al. 2021). Die zum Teil mehrere hundert Jahre alten Trockenmauern werden nach der Aufgabe des Weinbergs nicht mehr bewirtschaftet und werden mit der Zeit sukzessive mit verwittertem Hangschutt hinterfüllt. Diese statische Belastung führt irgendwann zur Überbelastung und zum Kollabieren der Mauer. Dabei können die kubisch behauenen Bruchsteine und die Hinterfüllung wie natürliche Felsstürze der

Gravitation folgend ins Tal stürzen. Eine Zunahme dieser Art von anthropogen bedingten Felsstürzen und Steinschlägen ist bereits erkennbar und wird vermutlich in den kommenden Jahren eine immer größer werdende Rolle einnehmen (mündliche Mitteilung von Geologiedirektor A. Wehinger & Dr. M. Rogall, beide LGB).

3.5.3 Murgänge

Murgänge sind an den Flanken der Mittelgebirgsflüsse Rhein und Mosel ein wissenschaftlich noch eher unbeachtetes, aber volkswirtschaftlich durchaus relevantes Phänomen. Infolge von konvektiven Starkregenereignissen kann es durch starken Oberflächenabfluss zur Auslösung von Muren in eingeschnittenen Tiefenlinien und Kerbtälchen an den Steilhängen kommen. Solche Ereignisse treten in diesen Gebieten etwa 1-2-mal im Jahr mit zum Teil schwerwiegenden Folgen für die unterliegende Infrastruktur auf. Die folgenden Beispiele verdeutlichen dabei die mögliche Schadenswirkung und die Notwendigkeit einer tiefergehenden Analyse der Auslösebedingungen zur Ausweisung von Gefahrenzonen.

Am 11.09.2011 ereignete sich zwischen Sankt Goar und Sankt Goar-Fellen auf der Höhe der Ortschaft Werlau ein starkregeninduzierter Murgang, bei dem der Murschub bis auf die unterliegenden Bahngleise reichte und der Murkegel sich auf selbigen ablagerte. In der Folge entgleiste gegen 14:00 Uhr der IC 2113 auf dem Weg von Hamburg nach Stuttgart, als er ungebremst in den Kegel fuhr. Von den etwa 800 Passagieren wurden 14 Personen leicht - und eine Person schwer verletzt. Die linksrheinische Bahnstrecke, wie beschrieben eine der wichtigsten Verkehrsachsen der Bundesrepublik Deutschland, musste in der Folge fast eine Woche voll gesperrt und der Fernverkehr zwischen Koblenz und Mainz rechtsrheinisch umgeleitet werden (WEHINGER & KATTLER 2014; Abb. 43). Für die Bergung und Reparatur von Lok und Waggons sowie des Gleisbettes, die Aufwendungen für die Umleitungen sowie die

späteren Sicherungsmaßnahmen entstand der DB AG ein enormer Schaden, der hinterher auf knapp 2.400.000 € geschätzt wurde (HEBISCH 2014).



Abb. 43: Fotos der allgemeinen Zeitung aus Mainz zum Murgang im Mittelrheintal aus dem Jahr 2011 (WEHINGER & KATTLNER 2013)

Oberhalb des Kerbtälchens, in welchem der Murgang ausgelöst wurde, sind auf der Hochfläche Felder angelegt, die über dem betreffenden Hangabschnitt muldenförmig zulaufen. Bei dem Starkregen konnte sich so bereits auf der Hochfläche vor Eintritt in die Steillage der Oberflächenabfluss kanalisieren und massiv an Strömungsenergie gewinnen. Das Kerbtälchen weist ein im Vergleich zu benachbarten Tiefenlinien in der Steillage dabei ein erheblich größeres Wassereinzugsgebiet auf. Mit Eintritt in das enge Kerbtälchen wurde der Abfluss zusätzlich beschleunigt und konnte so durch progressive Sohlerosion die Lockergesteinsdecke aus verwittertem Tonschieferschutt mobilisieren und knapp 80-100 m³ Material als Murschub talwärts transportieren. Der unterste Abschnitt des Kerbtälchens, das von der Hunsrückhochfläche zum Rhein hin knapp 120 m abfällt, war zu der Zeit kanalartig mit Mauern ausgebaut. Unter den

talseitig anschließenden Gleisen war zudem ein alter Wasserdurchlass vorhanden. Durch die mitgeführte Suspension wurde dieser jedoch schlagartig durch Geröll und Schlamm verstopft, sodass sich das abgehende Material aufstaute und über die Gleise geschwemmt wurde (Abb. 44). Der anschließend anführende Zug konnte nicht mehr rechtzeitig bremsen und wurde beim Auffahren auf den Murgangskegel zum Entgleisen gebracht (HEBISCH 2014).



Abb. 44: Blick in den verstopften Bahndurchlass nach Murgang am 11.09.2011 (Foto: H.J. Matthesius 2011)

Im Nachgang des Ereignisses wurden im Auftrag der Deutschen Bahn Sicherungsmaßnahmen am Hang durchgeführt. Insgesamt befinden wurden staffelartig sieben Murgangsbarrierezäune quer zum Gerinne verbaut (vgl. Abb. 45). Diese sollen bei einem erneuten Murgangsereignis die Suspension vom Wasser trennen und somit ein erneutes Verstopfen der Gleise durch Schutt verhindern.



Abb. 45: Schutzzaun in einem Murgangserinne bei Sankt Goar-Werlau (Foto: H.J. Matthesius 2011)

Dieses beschriebene Ereignis stellt jedoch keinen Einzelfall dar. Tatsächlich kommt es im langjährigen Mittel im Mittelrheintal etwa einmal jährlich zu größeren Schadensfällen infolge von Murgängen (ALBERTI et al. 2013).

Ein anderes Beispiel für einen starkregeninduzierten Murgang ereignete sich am 29.06.2012 zwischen Kaub und St. Goarshausen. Auf der Höhe von Dörscheid gingen hier rund 600 – 800m³ Schutt in einer Tiefenlinie den etwa 220 m hohen Steilhang ab. Nach der Aussage von hier ansässigen Bauern wurde an dem Tag ein Niederschlag von ca. 80 mm innerhalb von nur knapp zwei wenigen Stunden beobachtet (HEBISCH 2014). Wirtschaftliche Folge dieses Murganges waren auch hierbei eine mehrtägige Sperrung der zweigleisigen Strecke für Aufräumarbeiten und Prüfung der Hangstabilität. Glücklicherweise kam es hierbei nicht zu Personen- oder größeren Sachschäden. Auch hier befinden sich auf den Hochflächen oberhalb des betreffenden Gerinnes Felder, die Muldenförmig zum Hang hin verlaufen. Der Hang ist ebenfalls markant steil und bewaldet, jedoch nicht so stark vegetativ bewachsen wie der Hang bei Sankt Goar. In der Tiefenlinie befindet sich eine rund 5 – 6 m dicke Schicht aus

Hangschuttmaterial (HEBISCH 2014). Durch den Murgang wurde dieser teilweise bis zu 2 m tief ausgeräumt und Fließverlauf Levées gebildet.

Da es an dieser Stelle der Bahnstrecke in der Vergangenheit immer wieder zu murgangsähnlichen Ereignissen nach Unwettern kam, wurde der Hang oberhalb des Schadenbereiches bereits vor dem Ereignis von 2012 mit zahlreichen Fangnetzen gesichert (HEBISCH 2014). Das erste Fangnetz wurde 2005 nach einem Schadensfall durch ein Murgang-Ereignis am 30. Juni 2005 errichtet. Es handelte sich um ein Steinschlagnetz von 3 m Höhe und ca. 65 m Breite, das auf die Mauer über den Gleisen verankert wurde. Bereits einen Monat später, am 28. Juli 2005 kam es erneut zu einer größeren Mure, bei der die errichteten Schutzmaßnahmen kaum ausreichten und der Zaun stark verfüllt wurde (Abb. 46).



Abb. 46: Verfüllter Fangzaun bei Dörscheid in Folge eines konvektiven Starkregens (Foto: H.J. Matthesius 2005)

Um daraufhin einen höheren Schutz zu gewährleisten, wurden im Hang staffelartig weitere Zäune errichtet. Diese sind so konstruiert worden, dass sie theoretisch nach jedem Murgang-Ereignis geräumt werden können. Mittlerweile sind an diesem Gerinne im Mittelrheintal insgesamt sechs Murgangschutzzäune übereinander errichtet worden (Abb. 47). Zusätzlich sind Netze zur Böschungsstabilisierung auf dem Boden vor den Sperren gespannt worden, um die Lockergesteinsdecke direkt vor der Barriere vor Erosion zu schützen (HEBISCH 2014).

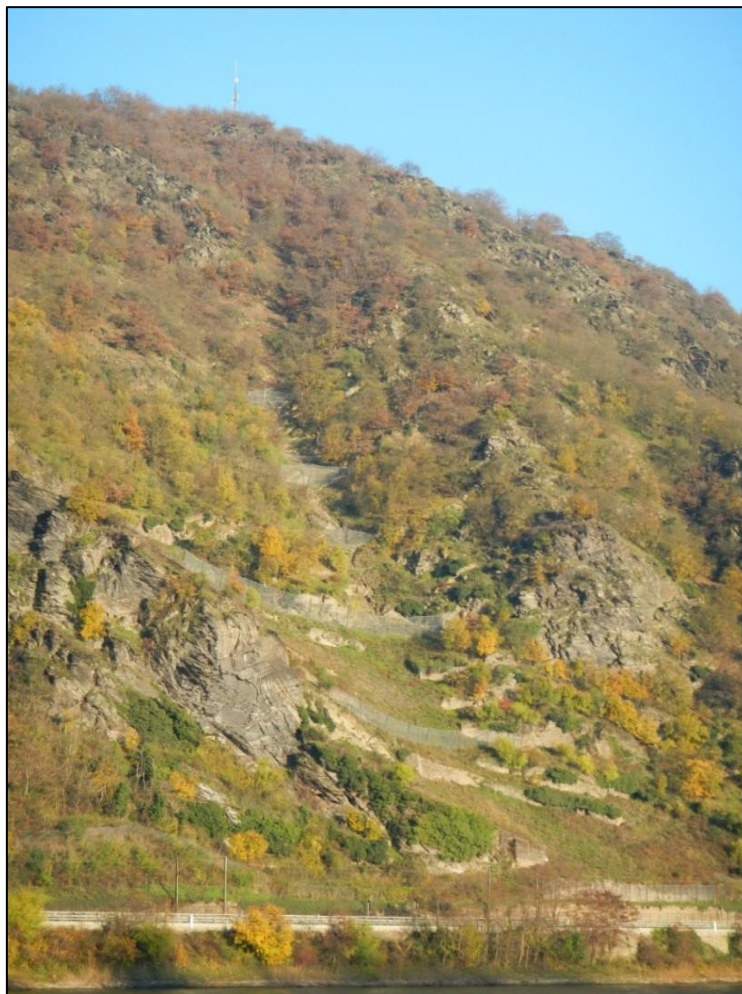


Abb. 47: Hang mit staffelartig errichteten Murgangschutzzäunen bei Dörschied (Foto: J. Hebisch 2013)

Bei dem betreffenden Ereignis 2012 konnte glücklicherweise ein Großteil des Materials von diesen Zäunen zurückgehalten werden, sodass nur ein kleiner Teil der

Geröllmassen auf den Streckengleisen akkumulierte. Das Schadensausmaß wäre mutmaßlich ohne die Sicherungsmaßnahmen noch deutlich höher gewesen.

Einer der schwersten Schadensfälle im Zusammenhang mit Murgängen im Mittelrhein- und Moseltal ereignete sich am 25.06.2016 zwischen Bacharach und Oberwesel. Auch hier kam es ähnlich der beiden zuvor beschriebenen Fälle zur Auslösung von zwei parallelen Muren infolge eines konvektiven Starkniederschlags. In der Folge kam es ähnlich zum Fall in St. Goar auch zu einer Zugentgleisung mit Personenschäden. Da dieser Fall im Rahmen dieser Promotion tiefergehend analysiert und als Vorabveröffentlichung beschrieben wurde, wird an dieser Stelle auf das Kapitel 6.2.1 verwiesen.

In vielen Tiefenlinien am Mittelrhein- und Moseltal, die direkt von der Höhenlage zum Fluss führen, dabei einen markanten Höhenunterschied überwinden und ein größeres Einzugsgebiet haben, finden sich Spuren von Murgangsablagerungen. Wie die Abbildungen 48 und 49 und die beschriebenen Ereignisse verdeutlichen, besteht hier entsprechend eine bisher durchaus unterschätzte Gefahr.

Die Auswertung der historischen Erfahrungen zeigt, wie groß die Wiederholungsgefahr von gravitativen Massenbewegungen unter bestimmten Gefahrenkonstellationen ist. Das bezieht sich sowohl auf die Bedeutung des Starkregeneffektes als auch auf die beschriebenen geologisch- /geomorphologischen Faktoren. Das verweist sowohl auf die Notwendigkeit einer präzisen Gefährdungszonierung als auch auf die Bedeutung dieser Aspekte bei der Erstellung von Modellierungsszenarien.

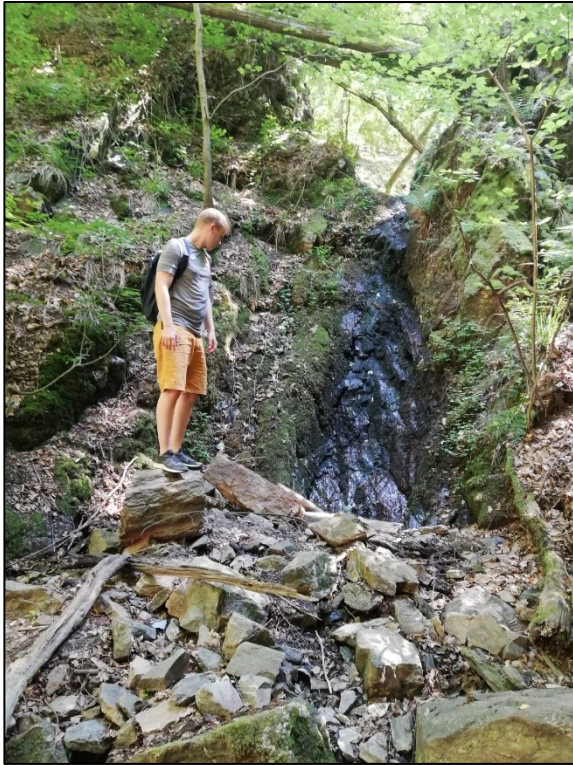


Abb. 48: Murgangsablagerung in der Kreuzbachklamm im Mittelrheintal (Foto: T. Hagge-Kubat 2020)



Abb. 49: Durch Murgang zerstörte Fußgängerbrücke in der Kreuzbachklamm (Foto: Hagge-Kubat 2020)

4 Methodik

In diesem Kapitel werden die Methoden, Datengrundlagen und Programme, die in dieser Arbeit Verwendung fanden, näher beschrieben. Dazu wird zunächst auf die verwendeten Eingangsdaten und deren Eigenschaften im Allgemeinen sowie anschließend auf die Methodik der speziellen Simulationsmodule der einzelnen Modellierungsschritte eingegangen.

4.1 Datengrundlage und Projektion

Für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten zu geogenen Naturgefahren sind belastbare Datengrundlagen essenziell. In der folgenden Tabelle 2 werden alle wesentlichen Datengrundlagen, die in diesem Projekt verwendet wurden, aufgelistet.

Abgeleitete und modellierte beziehungsweise simulierte Daten werden separat in entsprechenden Kapiteln aufgeführt. Eine tiefergehende Beschreibung der einzelnen Grundlagendaten erfolgt, wenn nötig, den folgenden Unterkapiteln.

Tab. 2: Liste der für die Modellierung verwendeten Datengrundlagen mit Informationen zum Typ, Ausdehnung, Quelle sowie Aktualitätsstand.

<i>Typ</i>	<i>Auflösung (Raster)</i>	<i>Quelle</i>	<i>Aktualitätsstand</i>
<i>Digitales Geländemodell</i>	1x1m	LvermGeo (LiDAR-Befliegung)	2014
<i>Vegetationsdaten</i>	1x1m	LvermGeo (LiDAR-Befliegung)	2014
<i>Rutschungsdatenbank</i>	Vektor	LGB RLP	2021
<i>OSM</i>	Vektor	OpenStreetMap Foundation	2021
<i>KOSTRA- Starkregentabellen</i>	25x25 km	DWD	2010R
<i>Schutzbauwerksdaten</i>	Vektor	LBM RLP/ DB	2020

Damit die Daten einheitlich bearbeitet werden können, müssen sie immer in das gleiche Bezugskoordinatensystem (KBS) überführt werden. Nur dadurch ist eine Überlagerung der Datensätze im Layerformat sowie eine Modellierung überhaupt möglich. Das Koordinatenbezugssystem aller räumlichen Daten dieser Arbeit ist das ETRS89-UTM32N auf Basis des WGS84 Ellipsoids (EPSG Code: 25832). Viele Datenquellen lagen im Vorhinein in anderen Bezugssystemen und Projektionen vor

wie beispielsweise: DHDN3, Gaus-Krüger und weitere. Diese Daten und Ableitungen wurden vor der Anwendung auf das beschriebene, in Deutschland am häufigsten verwendete KBS transformiert, damit diese mit der GIS- und Modellierungssoftware bearbeitbar und berechenbar wurden.

4.1.1 Software und Hardware

Alle Daten und Operationen dieser Promotion wurden im Wesentlichen mit Open Source Software prozessiert, modelliert und dargestellt. Dies hat den Hintergrund, dass mithilfe dieser Promotion und im gesamten MABEIS-Projekt ein Ansatz geschaffen werden soll, landesweite Gefahrenkarten für Rheinland-Pfalz zu entwickeln, pflegen und anzupassen. Dies soll unabhängig von kommerzieller Software und mit offenem Quellcode automatisiert durchführbar sein, um somit anschließend auch in den erweiterten Behördengebrauch beispielweise auf kommunaler Ebene übergehen zu können. Daher erscheint der Einsatz von Open Source Software im Sinne dieser Zielsetzung als die einzig sinnvolle Variante.

Entsprechend wurden die geographischen Informationssysteme (GIS): QGIS, SAGA-GIS, GRASS-GIS sowie verschiedene Datenbankformate wie PostgreSQL oder PostGIS verwendet, die im Folgenden näher beschrieben werden. Ein solches GIS-System besteht vereinfacht betrachtet hauptsächlich aus einer Computersoftware, einer Hardwarekomponente und räumlichen Daten. Dabei werden in der Regel zwei Arten von Daten in GIS-Systemen unterschieden. Entweder sind die Daten raster- oder vektorbasiert. Rasterdaten basieren auf einer Matrix von Zellen ähnlich einem Gitternetz, welches aus Pixeln beziehungsweise Zellen besteht und bei dem jedes dieser Pixel einem exakten Wert entspricht. Dies kann beispielsweise eine Höhenangabe sein, sodass Rasterkarten zumeist die Grundlage von digitalen Geländemodellen (DGM) darstellen. Vektordaten hingegen sind räumliche Objekte und bestehen zumeist aus Punkten, Linien und Polygonen. Diese können zum Beispiel

für die Darstellung von Straßen oder Häusern oder in diesem Fall einer abgegrenzten Landnutzung verwendet werden (KUMERICS & ENZMANN 2013). Alle für diese Promotion verwendete Software wurde auf WINDOWS Server 2016/2019 betrieben und parallelisiert.

4.1.2 Digitale Geländemodelle

Eine, wenn nicht die wesentlichste Datengrundlage bei Modellierungen von Massenbewegungen sind digitale Gelände- und Oberflächenmodelle (DGMs und DOMs) sowie deren Kombinationen. Als großräumige Übersichtsmodelle standen für diese Arbeit unter anderem die NASA-SRTM (Shuttle-Radar Topography Mission, VAN ZYL 2001) und die DGM10 Modelle des Bundesamtes für Geodäsie und Kartographie zur Verfügung. Diese dienen jedoch lediglich überschlägigen Berechnungen und Übersichtsvisualisierungen.

Als Grundlage der Geländeanalysen und Modellierungen dienten die aus LIDAR-Rohdaten des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVerGeo) abgeleiteten DGM/DOM sowie den sog. LmodDGM (modifizierte DGM) mit einer räumlichen Auflösung von 1m (DGM1) und 20cm (DGM02). Eine Beschreibung des LiDAR-Verfahrens, welches zur Erzeugung dieser Daten angewendet wird, findet sich beispielhaft in HÖFLE & RUTZINGER (2011) oder KRAUS & PFEIFER (2001) und wird hier nicht näher beschrieben. Reine DGMs stellen nur die Erdoberfläche (EO) dar. DOMs stellen die gesamte Oberfläche inklusive der Vegetation und Bebauung dar. Die im MABEIS-Projekt speziell errechneten und in dieser Arbeit verwendeten modDGMs sind eine Kombination aus DGM/DOM und enthalten die EO mit explizierter Bebauung (Gebäude) und ohne Vegetation. Diese Daten werden durch das LVerGeo zunächst als ASCII-x,y,z Dateien geliefert, kachelweise mit einer Kachelausdehnung von 1x1 km für die gesamte Fläche von Rheinland-Pfalz. X,Y sind UTM Koordinaten und Z die Höheinformation bezogen auf

das WGS84-Ellipsoid. Für die gesamte Fläche des Landes sind dabei insgesamt 21125 Kacheln jeweils als „grd“ (ground) und „vef“ (Oberflächen) Dateien und enthalten pro km² bis zu 70 Millionen Datenpunkte. Die hohe Punktdichte (im Durchschnitt etwa 6 Punkte/m²) erlaubt dabei für das MABEIS-Projekt die numerische Interpolation von 20 cm Raster-DGM als kontinuierliche Oberflächen und die Verwendung dieser bei Modellierungen.

Im Zuge der Arbeiten am MABEIS-Projekt wurde des Weiteren ein spezielles Verfahren für die Berechnung des als Standard genutzten DGM1 etabliert. Dabei wird kachelweise (1x1 km) ein Raster mit Auflösung von 1m erzeugt und für jede Rasterzelle die Ground-LIDAR-Messpunkte (grd, Geländeoberfläche) arithmetisch gemittelt und der Wert jeder Rasterzelle zugewiesen. Etwaig vorkommende Lücken im Raster, wenn innerhalb eines m² keine Messpunkte vorliegen, werden mittels bilinearer Interpolation iterativ aus den Nachbarzellen geschlossen, so dass eine stetige DGM-Oberfläche entsteht. Lücken sind in der Regel Wasserflächen, stark bewachsene Flächen, in denen kein Ground-Puls im LIDAR-Messverfahren reflektiert wird, oder Gebäudeflächen. Zusätzlich werden dabei die Varianz und Standardabweichung ausgegeben. Die einzelnen Kacheln werden dann gebietsweise zusammengefasst und bilden schließlich ein kontinuierlich geschlossenes Gebiet (ENZMANN & FEUERBACH 2016).

Neben der Erzeugung der DGM wurden Punktdichte-Raster errechnet (Einheit: Anzahl Punkte pro m²). Diese Daten erlauben eine Abschätzung der Genauigkeit der kontinuierlich errechneten Werteoberfläche und dienen zur Maskierung von Gebieten mit Interpolationsartefakten.

Mit dem gleichen Mittelungsverfahren werden die „nicht-ground“ (vef) LIDAR-Messpunkte gemittelt und jeder Rasterzelle zugewiesen. So entsteht ein reines DOM, ohne Erdoberfläche. Lücken im DOM werden dabei nicht geschlossen. Dieses DOM als Vorstufe enthält die Höhe der Vegetation und Gebäude. Ein essenzieller Schritt ist die Extraktion der Gebäudehöhen. Dazu werden die Vektordaten „Hausumringe“ des

LVerGeo RLP genutzt (Aktualität 02/2020). Dieser Datensatz enthält insgesamt 3.130.282 Gebäudeflächen als Polygone (aus dem ALKIS-System). Die DOM Vorstufe wird dann anschließend mit den Gebäude-Polygon Flächen extrahiert. Das Ergebnis enthält die NN-Höhen aller Gebäude als DOM1 Raster. Die „Lücken“ zwischen den Gebäuden werden in einem 2. Schritt durch das DGM1 aufgefüllt.

Das Ergebnis ist ein modDGM1, welches die Erdoberfläche ohne Vegetation aber mit den Gebäuden enthält. Diese Modelle werden automatisiert im MABEIS-Projekt für alle neu hinzukommenden LiDAR-Daten durchgeführt und stellen die Basis aller weiteren Modellierungsschritte dar.

4.1.3 Spezifischer Oberflächen Index (SIDX)

Die erfolgreiche Identifikation von Quellgebieten, aus denen sich Steinschläge und Felsstürze entwickeln können, stellt eine maßgebliche Voraussetzung für die erfolgreiche Modellierung und Gefährdungszonierung dar (ROSSI et al. 2021). Auf Basis eines hochaufgelösten DGMs in 1x1m Auflösung wurde im Rahmen des MABEIS-Projekts ein spezieller Index (vgl. Abbildung 50) entwickelt, der geologische Aufschlüsse wie Felswände oder herausgewitterte Felsvorsprünge mit hoher Präzision und Auflösung flächendeckend in Rheinland-Pfalz detektiert. Dieser Index wird aus den modDGM1/modDGM02 errechnet als Quotient der realen Oberfläche des Geländes (real surface) und der Hangneigung (slope) gemäß der Formel:

$$SIDX = \frac{\log(surface/cellszize^2)}{\log(slope)} \quad (1)$$

Dabei zeigen Werte >0 (dimensionslos) direkt Felsaufschlüsse oder geländestützende Mauerwerke an, Werte <0 lediglich steiles bodenbedecktes Gelände, aus dem sich eher keine Steinschläge entwickeln können. Anthropogene Gebäudeflächen, welche

anderenfalls ebenfalls Werte über 0 anzeigen, können in einem zweiten Schritt der Prozessierung durch Maskierung extrahiert werden.

Umfangreiche Geländekartierungen im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass die Trefferquote des Index bei ~95% und damit sehr hoch liegt. Die Darstellung des SIDX dient einerseits dazu, Aufschlüsse gezielt im Gelände aufsuchen und Lage- oder Trennflächenmessungen sowie Gesteinsbeschreibungen vornehmen zu können (WERNER et al. 2021, vgl. Abb. 50). Innerhalb dieser Studie wurde er jedoch hauptsächlich zur halbautomatisierten Identifikation von Quellgebieten für Steinschläge und Felsstürze genutzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Realität nicht alle anstehenden offenen Felsbereiche gleichermaßen absturzgefährdet sind und daher unterschiedlich exponiert gegenüber einem tatsächlichen Steinschlagrisiko sind. Dennoch geht von den allermeisten offenen Felsbereichen durch physikalische Verwitterungsprozesse früher oder später zumindest das Potenzial einer Steinschlagquelle aus, sodass diese Bereiche ebenso wie anthropogene alte Weinbergsmauern für eine umfassende Karte des theoretischen Steinschlagpotenzials ebenfalls zu berücksichtigen sind (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Eine präzisere flächendeckende Risikoanalyse einzelner Felsbereiche (Suzeptilität) ist innerhalb des MABEIS-Projektes in Bearbeitung und wird zu späterem Zeitpunkt publiziert (SÜßER et al. 2023).

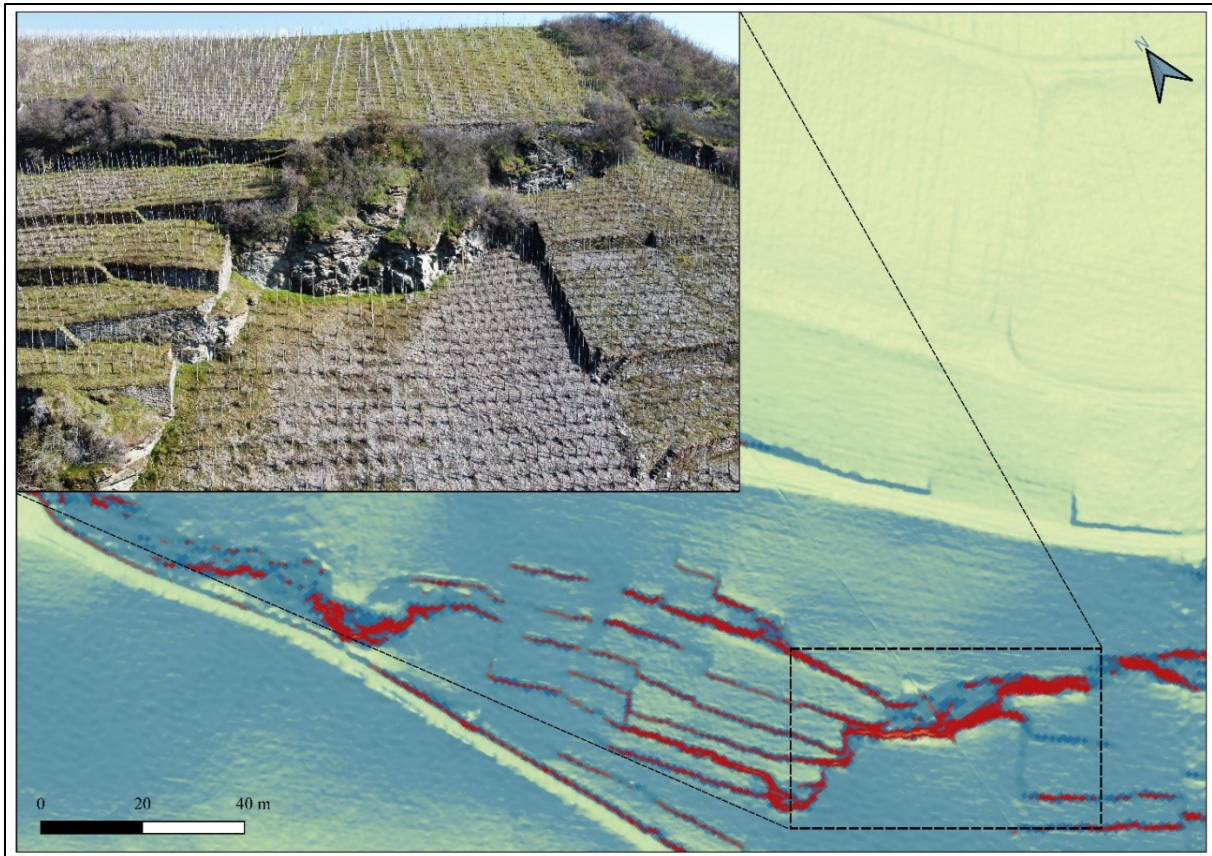


Abb. 50: SIDX-Darstellung eines Aufschlusses bei Mehring an der Mosel. Die Felsaufschlüsse sowie alte Weinbergsmauern sind rot dargestellt, lediglich steiles Gelände blau (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

4.1.4 Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz

Schadensfalldatenbanken können einen Schlüssel zur Validierung von Massenbewegungsmodellierungen darstellen (GUZZETTI et al. 2012). Ein genaues Verzeichnis von Massenbewegungen ist daher von entscheidender Bedeutung und eine wesentliche Eingangsgröße für die Untersuchung der Beziehung zwischen der räumlichen Verteilung von Massenbewegungen wie Steinschlägen und Felsstürzen und deren Einflussfaktoren (BOCK et al. 2013).

Die Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz ist ein gemeinsames Projekt der Forschungsstelle Rutschungen an der Universität Mainz und des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. Dabei handelt es sich um ein Verzeichnis der in Rheinland-Pfalz beobachteten Rutschungsereignisse, die auf der Erfassung von

Daten zu Massenbewegungen im Gelände beruhen. Das Älteste in der Datenbank erfasste Ereignis stammt aus dem Jahre 1655, wobei insgesamt bis heute 3284 Ereignisse registriert wurden (Stand 06/2023). Im Wesentlichen wurden diese Ereignisse durch das LGB und im Gelände erfasst, dokumentiert oder sie wurden aus einschlägigen Diplomarbeiten und Dissertationen zusammengetragen. Neben dieser Datenbank dokumentiert der Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz alle Ereignisse, die den Straßenverkehr beeinflussen und mit Massenbewegungen in Zusammenhang stehen.

Angelegt wurde die Datenbank in MS Office Access auf Oracle-Basis, wobei vielseitige, standardisierte Angaben zu den einzelnen Rutschungen festgelegt werden können. Zu diesen Angaben gehören unter anderem die Lokalität, die Geologie und Geomorphologie, der Zeitraum, der Prozess und das Stadium, die Ursachen, die Schäden beziehungsweise die Gefährdung sowie Sanierungsvorschläge. Zur Illustration der Daten wird die Datenbank mit GIS-Systemen verknüpft, so dass die einzelnen Rutschungen entsprechend ihrer Koordinaten als Symbole auf frei wählbaren Karten angezeigt werden. Bei den angezeigten Rutschungsereignissen erfolgt eine Einteilung in verschiedene Hauptbewegungsvorgänge, welche jeweils durch eine charakteristische Farbe, beziehungsweise ein charakteristisches Symbol, angezeigt werden (BOCK et al. 2013). Dabei wird prozessabhängig zwischen Rutschung, Steinschlag, Felssturz, Hangmure, Mure, Bergzerreißung, Erdfall und Tagesbruch unterschieden. Beispielfälle, die darstellen, wie einige dieser Bewegungsformen im Gelände und verglichen Dazu in der GIS-Darstellung aussehen können, sind in den Abbildungen 51 und 52 dargestellt.

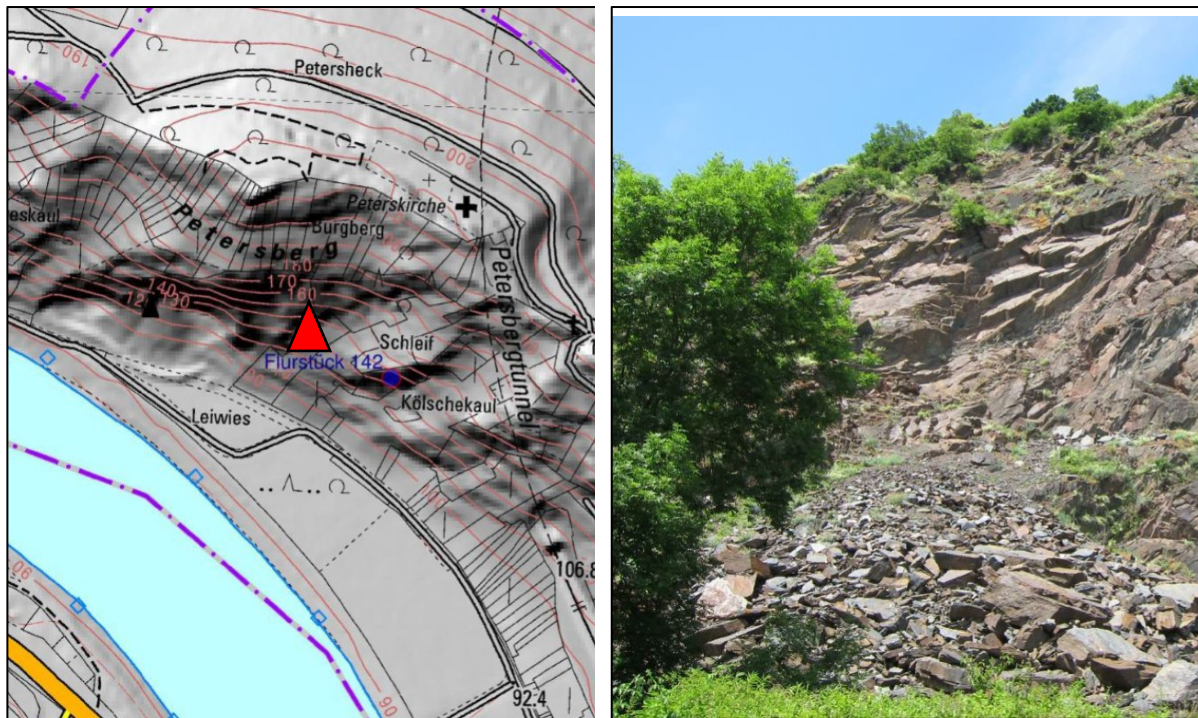


Abb. 51: Felssturz (rotes Dreieck) bei Neef an der Mosel aus dem Jahr 2012 (Foto: A. Wehinger 2012)



Abb. 52: Murgang (gelber Stern) bei Kordel an der Kyll aus dem Jahr 2021 (Foto: T. Hagge-Kubat 2021)

Alle weiteren erfassten Informationen, zusätzlich zu den Bewegungsvorgängen, sind in der Datenbank als Punkte abrufbar. Beispielhaft ist eine Karte mit eingezeichneten Steinschlägen und Felsstürzen ist in der Abbildung 53 zu erkennen. Diese Karte ist als Mapserver-Anwendung auf den Internetseiten der Forschungsstelle Rutschungen und des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz freigeschaltet. Hierbei ist anzumerken, dass aus Datenschutzgründen nicht die genauen Koordinaten angezeigt werden, sondern die Lokalität generalisiert wird.

Generell enthält die Rutschungsdatenbank nur registrierte Ereignisse, umfasst dabei jedoch bei weitem nicht alle in Rheinland-Pfalz stattgefundenen Massenbewegungen. Prozesse, bei denen kein Schaden für anthropogene Infrastruktur eintritt, werden meist nicht angezeigt und sind daher in der Datenbank zumeist nicht vertreten.

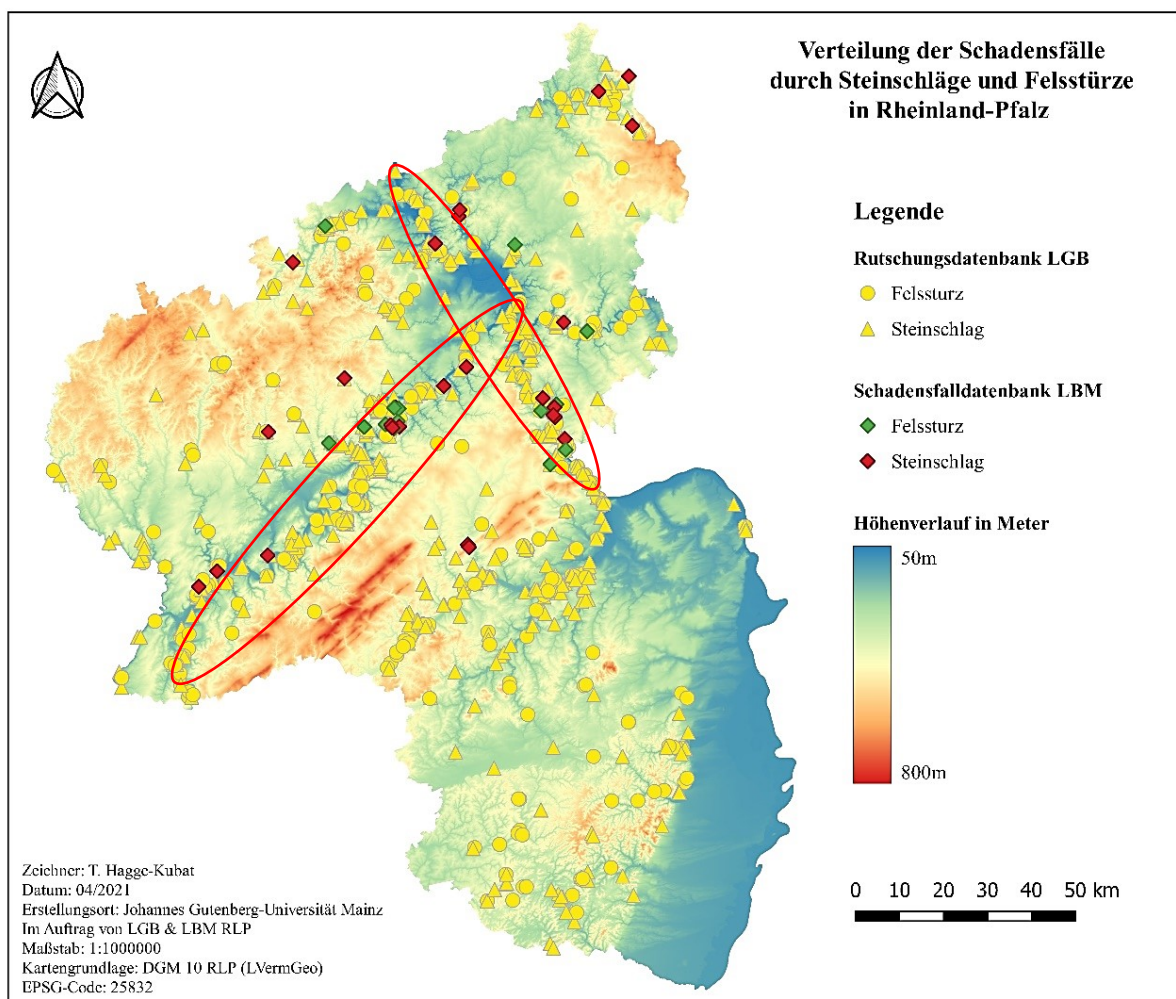


Abb. 53: Verteilung der Schadensfälle durch Steinschläge und Felsstürze in Rheinland-Pfalz mit eingezeichneten Verläufen der Flusstäler von Rhein und Mosel (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Um eine sinnvolle Auswertung der großen Datenmenge zu erreichen, ist es wichtig, dass die Daten umfassend und standardisiert dokumentiert werden. Dies ist die Grundvoraussetzung für die angestrebte Anwendung der Datenbank in verschiedenen Bereichen. Die Datenbank soll zum Beispiel bei der lokalen Gefahren- und Risikoabschätzung helfen, woraufhin Gefahrenhinweiskarten entwickelt werden können. Ein anderer Bereich ist die Ursachenforschung. Hierbei werden die Daten der einzelnen Rutschungen verglichen, um zu ergründen, ob bestimmte kausale Zusammenhänge bestehen, die Rutschungen begünstigen oder auslösen. Es wird also geprüft, inwieweit Rutschungen von verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel Schichtenfolge, Hangneigung, Exposition oder auch Jahreszeiten abhängen (BOCK et al. 2013).

Wie auf Abbildung 53 deutlich wird, befindet sich eine deutliche Aggregation der Einträge der Rutschungsdatenbanken mit der Kennung „Steinschlag“ oder „Felssturz“ entlang der rheinland-pfälzischen Flusstäler und dabei vor allem entlang des Rheins und der Mosel.

Dies lässt sich korrelierend zu den Erläuterungen in den Kapiteln 3.1 und 3.3 auf zwei wesentliche Gründe zurückführen:

1. Geologische Voraussetzungen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, bieten die Durchbruchstäler von Rhein und Mosel durch ihre steilen Hangflanken und die anstehenden zerklüfteten Tonstein- und Schieferfelsen gute Voraussetzungen zur erosiven Herauslösung von Festgesteinspartien.

2. Nähe zur Infrastruktur

Diese natürlichen Voraussetzungen treffen auf ein seit römischer Zeit massiv ausgebautes und stark frequentiertes Infrastruktursystem. Somit können bereits kleinere Steinschläge große wirtschaftliche Auswirkungen haben. Daher erscheint in

diesen beiden Flusstälern die Notwendigkeit für eine Gefährdungsanalyse am größten.

Insgesamt konnten durch die Rutschungsdatenbank so mehr als 350 Einzelereignisse zu den Prozesstypen Steinschlag/Felssturz sowie zu Murgängen für diese Arbeit in den Projektgebieten Mittelrhein und Moseltal zur Validierung der Modellierungen herangezogen werden (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

4.2 Niederschlagsgrenzwerte

Entsprechend der in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Faktoren für die Entstehung von Murgängen spielen Grenzniederschläge eine entscheidende Rolle. Erst ein Starkniederschlagsereignis, welches eine kritische Menge an oberflächlichem Abfluss hervorruft, ist neben der geologisch-morphologischen Grunddisposition in der Lage einen Murgang auszulösen (vgl. Kapitel 5.3.2). Da dieser Grenzniederschlag im Vorhinein zumeist nicht bekannt ist und sich auch für jedes einzelne Gerinne nur separat statistisch genähert werden kann, wurden in dieser Arbeit als Eingangsniederschläge für die Modellierung die KOSTRA-Werte des Deutschen Wetterdienstes als Annäherung an die repräsentative Eintrittswahrscheinlichkeit von Starkregen für verschiedene Jährlichkeiten verwendet.

Um Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten von Starkniederschlägen in Deutschland zu machen, wird von Seiten des Deutschen Wetterdienst (DWD) seit den 1980er Jahren regelmäßig eine mit den Bundesländern statistisch koordinierte Starkregenauswertung durchgeführt (KOSTRA = **Koordinierte Starkregenregionalisierung und -auswertung**). Dabei finden diese Daten vor allem bei der Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen wie zum Beispiel Talsperren, Kanalnetzen oder Deichanlagen Anwendung (JUNGHÄNEL et al. 2017). Eine erste Fortschreibung mit dem Namen KOSTRA-DWD-2000 erschien von Seiten des Deutschen Wetterdienstes im Jahr 2005. Sie basierte auf den statistischen

Niederschlagsdaten der Jahre 1951 – 2000. Eine weitere Veröffentlichung der Starkniederschlagsauswertung wurde im Jahr 2016 als KOSTRA-DWD-2010 veröffentlicht (DWD 2016). Sie beruhte auf den Daten der Jahre 1951 – 2010. Auf Anregung einzelner Landesbehörden wurde darüber hinaus im Jahr 2017 eine Revision dieses Datensatzes (KOSTRA-DWD-2010R) durchgeführt. Zwischen 2018 und 2022 wurde der Datensatz dann grundlegend überarbeitet und erneut fortgeschrieben (DWD 2022). Ab dem 01.01.2023 gilt nun dieser neue Datensatz KOSTRA-DWD-2020 mit dem Bezugszeitraum 1951 – 2020 (JUNGHÄNEL et al. 2022).

Die KOSTRA-Werte werden dabei flächendeckend für Deutschland in Tabellen und Rasterformat im Climate-Data-Center des DWD entgeltfrei im Rahmen des Geodatenzugangsgesetzes zur Verfügung gestellt. Die KOSTRA-Werte der Starkniederschlagsauswertung werden als Niederschlagshöhen (in mm) und Niederschlagsspenden (in l/(s*ha)) berechnet für genormte Rasterzellengrößen von je 25km², bei insgesamt 5405 Rasterfeldern, für ganz Deutschland bestimmt. Die Berechnung erfolgt dabei in Abhängigkeit von verschiedenen Dauerstufen beziehungsweise Jährlichkeiten. Die Dauerstufe D ist ein ausgewählter Zeitabschnitt mit Niederschlag (einschließlich ggf. Unterbrechungen), unabhängig von dem Beginn und Ende eines natürlichen Niederschlagsereignisses. Die Dauerstufe hat die Einheit Minuten (min) oder Stunden (h). KOSTRA-DWD-2020 bietet insgesamt 22 Standard-Dauerstufen: D = 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 9 h, 12 h, 18 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h, 120 h, 144 h, 168 h (JUNGHÄNEL et al. 2017).

Die Wiederkehrzeit T ist die statistisch mittlere Zeitspanne, in der das Auftreten eines Ereignisses einmal zu erwarten ist. Dabei handelt es sich um eine Häufigkeitsaussage. Der Zeitabstand des tatsächlichen Auftretens von Ereignissen bleibt jedoch ungewiss. Die Wiederkehrzeit hat die Einheit Jahre (a). KOSTRA-DWD macht Aussagen zu Wiederkehrzeiten im Wertebereich $1 \text{ a} \leq T \leq 100 \text{ a}$. KOSTRA-DWD-2020 bietet 9

Standard-Wiederkehrzeiten: $T = 1 \text{ a}, 2 \text{ a}, 3 \text{ a}, 5 \text{ a}, 10 \text{ a}, 20 \text{ a}, 30 \text{ a}, 50 \text{ a}, 100 \text{ a}$. Die Starkniederschlagshöhe h_N ist das Ergebnis der extremwertstatistischen Analyse der Niederschlagsmessreihen in Abhängigkeit von Dauerstufe und Wiederkehrzeit (JUNGHÄNEL et al. 2017).

Für das Projektgebiet am Mittelrhein- und Moseltal sind also aufgrund der Größe des Gebiets dutzende verschiedene KOSTRA-Tabellen verfügbar, die im Sinne einer angestrebten flächendeckenden Modellierung nur schwer für jedes KOSTRA-Rasterfeld einzeln modellierbar erscheinen. Für die Modellierung des Oberflächenabflusses wurde sich in dieser Arbeit entsprechend dazu entschieden standardisierte Starkregenereignisse auf Basis einer Annäherung von verschiedenen repräsentativen Jährlichkeiten aus den KOSTA-Tabellen durchzuführen. Da sich modellierungstechnisch (vgl. Kapitel 4.6) anbietet ein standardisiertes konvektives Starkregenereignis für die Dauerstufe von 60min zu modellieren (Einstellung eines wenig volatilen Abflussregimes nach x Minuten), wurden in dieser Studie ausschließlich KOSTRA-Werte dieser Dauerstufe in verschiedenen Jährlichkeiten als Bemessung herangezogen. Abbildung 54 zeigt beispielhaft die KOSTRA-Werte des Rasterfeldes um St. Goarshausen im Mittelrheintal der Dauerstufe $D=60\text{min}$.

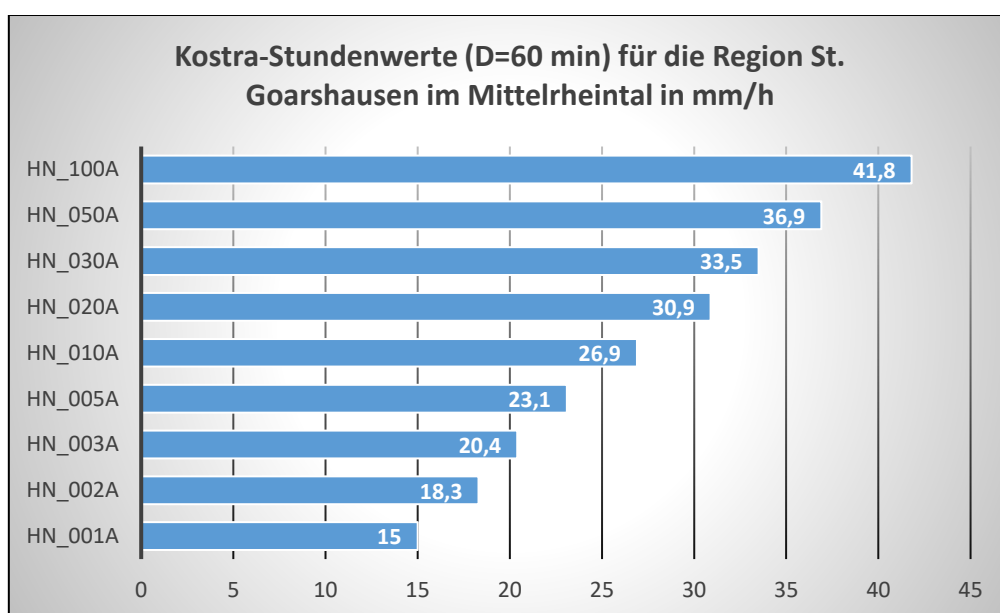


Abb. 54: Kostra-Starkniederschlagswerte für die Region St. Goarshausen (verändert nach DWD 2022)

Starkregenereignisse können natürlich auch mit höherer Niederschlagsintensität in einem kürzeren Zeitraum oder mit geringerer Intensität in einem längeren Zeitraum Murgangereignisse auslösen. Die tatsächlichen Niederschlagsgrenzwerte sind nur im Nachgang eines oder mehrerer Ereignisse zu erfassen, sodass mit der in dieser Arbeit verwendeten Methodik im Sinne eines heuristischen Ansatzes versucht werden soll, ein möglichst großes Spektrum an Niederschlagsintensität bei vorhandener Modellierungskapazität abzubilden.

Somit wurde sich für die in die Fläche gerechnete Modellierung der Großgebiete für vier initiale Niederschlagsinputs entschieden, die angelehnt an die KOSTRA-Werte die Dauerstufen 1a, 20a, 100a und ein fiktives sehr markantes Starkregenereignis, welches nicht in den KOSTRA-Werten vorhanden, aber dennoch in der Realität vorkommen kann, abbilden sollen. Somit wurden in dieser Studie für jedes Gebiet insgesamt vier separate Starkregenmodellierungen mit den repräsentativen und gleichzeitig linear ansteigenden Niederschlagsinputs von **15mm/h**, **30mm/h**, **45 mm/h** und **60mm/h** gerechnet. Eine Beschreibung des Vorgangs der in dieser Arbeit durchgeführten Starkregenmodellierung auf dieser Basis ist in Kapitel 5.3.1 beschrieben.

4.3 Schutzbauwerke im Untersuchungsgebiet

Wie in den Kapiteln 2.2.5 und 2.4.5 beschrieben, können Hangsicherungsmaßnahmen gegenüber Steinschlägen und Murgängen einen wichtigen Teilschutz vor dem Auftreten von Schadensfällen bieten. Entsprechend werden in Rheinland-Pfalz schon seit sehr langer Zeit Verbaumaßnahmen zum Schutz der Infrastruktur vor gravitativen Massenbewegungen getroffen (SCHNEIDER 1851, BRANDES 2013). Ein besonderes Ziel dieser Arbeit ist es Informationen und Verortungen dieser Schutzverbauungen in die

Modellierungsergebnisse zu integrieren und somit eine differenzierte Gefahrenaussage zu gesicherten und nicht gesicherten Bereichen treffen zu können.

Besonders seit dem Bau der Mittelrhein- und Moseltalbahnstrecken in den späten 1850iger Jahren sind diese Hangsicherungsmaßnahmen zusehends intensiviert worden. Heutzutage sind viele bekannte Gefährdungsbereiche in den Hauptflusstälern zum Schutz der Infrastruktur mit Fangzäunen, Vernetzungen, Spitzbetonblomben oder anderen Sicherungsbauwerken gesichert (GRUNERT & HESS 2010, vgl. Abb. 55). Dabei sind in diesem Gebiet in diesem Zusammenhang einige deutschlandweite Rekorde verbaut worden. So steht in einem Hangabschnitt südlich von Kaub im Mittelrheintal etwa eine Staffel von mehreren Steinschlagfangzäunen zum Schutz der Bahnstrecke und Bundesstraße, die maximale Energieaufnahmekapazitäten von 8000 kJ und damit schon im alpinen Maßstab zu der derzeit höchst baubaren Kategorie gehören. Daneben befinden sich auch in der verbauten Länge einige Zaunabschnitte, die sonst nur in Hochgebirgsregionen zu finden sind (mündliche Mitteilung Herr U. Schröder, LBM). Eine Beschreibung von verschiedenen Sicherungsmaßnahmen und einzelnen Lokalitäten am Mittelrhein und Moseltal sind erweitert auch in GRUNERT & HESS (2010), ALBERTI et al. (2013) oder ALBERTI (2007) beschrieben. Weitere Bilder von Steinschlag- und Murgangsverbauungen, die in den letzten Jahren im Untersuchungsgebiet errichtet wurden, finden sich zudem im Anhang D und E.



Abb. 55: Verfüllter Steinschlagfangzaun oberhalb des Rossteintunnels nach einem Felssturzereignis aus dem Jahr 2005 (Grunert & Hess 2010)

Viele dieser Bauwerke sind seit ihrer Errichtung jedoch immer mehr in Vergessenheit geraten und wurden im Laufe der Zeit mit Vegetation überdeckt oder von Hangschuttmaterial hinterfüllt. Solche älteren oder hinterfüllten Sicherungsmaßnahmen weisen nur noch eine eingeschränkte Schutzwirksamkeit auf und werden mit der Zeit zum Teil selbst zu möglichen Quellgebieten für Schadensfälle. Ein typisches Beispiel dafür sind beispielsweise alte Weinbergsmauern, die zur Stabilität von steilen Weinbergslagen seit Anbeginn der Bewirtschaftung der Hänge mit kubisch behauenen Bruchsteinen unvermörtelt übereinandergestapelt wurden. Diese Trockenmauern verformen sich bei bergseitiger Belastung und werden mit der Zeit instabil, sodass sie irgendwann brechen und selbst als Felssturz hangabwärts stürzen können. Aus diesem Grund wurden auch Trockenmauern, die als solche vom SIDX einfach zu erkennen sind, als mögliche Quellgebiete mit in die Modellierungen integriert.

Im Zuge einer immer intensiveren Nutzung der Flusstäler als Verkehrswege steigt auch die Anzahl und das finanzielle Volumen der durchgeführten und geplanten Sicherungsmaßnahmen. Nach einer parlamentarischen Anfrage an die Bahn aus dem Jahr 2019 sind so beispielsweise bis in das Jahr 2025 75 weitere Hangsicherungsprojekte (exklusive Sofortmaßnahmen) zur Sicherung der Mittelrheinbahnstrecke geplant, die allein für das Jahr 2019 ein Volumen von 22 Millionen Euro besitzen (Deutscher Bundestag 2019).

Die Hauptakteure, die für die Planung, Errichtung und Instandsetzung von Hangsicherungsbauwerken im Mittelrhein und Moseltal verantwortlich sind, sind die beiden Hauptträger der Verkehrsinfrastruktur, also die deutsche Bahn und der Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz. Weitere einzelne Maßnahmen können dabei auch erweiternd von Kommunen oder Verbandsgemeinden betrieben werden, sind aber in der absoluten Anzahl in der Minderheit. Zwischen diesen beiden Hauptakteuren besteht eine vertragliche Vereinbarung, nach der die Kostenverteilung und die Planung dieser Maßnahmen geregelt ist. So wird die verantwortliche Institution, welche den Verkehrsweg hangseitig näher zu der Gefahrenstelle betreut, mit der Planung, Instandsetzung und 2/3 der Kosten des Baus bemüht. Das andere 1/3 der Kosten wird entsprechend von der anderen Institution getragen. (mündliche Mitteilung von Herrn U. Schröder (LBM)). Somit sind die meisten der Schutzbauwerke im Mittelrhein und Moseltal defacto Gemeinschaftsbauwerke zwischen dem LBM und der Deutschen Bahn.

Im Rahmen des MABEIS-Projektes wurden vom Projektpartner Landesbetrieb Mobilität die Rohdaten zu den von ihnen gebauten und in ihrem System bestehenden Schutzbauwerken bereitgestellt. Diese Daten konnten in Form von Excel-Tabellen ausgewertet und in ein GIS-System übertragen werden. Die Daten enthalten unter anderem Informationen zu Start und Endpunkten der Lokalität, Baujahr, und Sicherungsform, aber auch zu Abschnitten, die von Seiten des LBM als gefährdet eingeschätzt werden aber nicht verbaut sind. Diese Daten stellen einen elementaren

Bestandteil für eine angepasste Gefährdungsaussage von Modellierungsergebnissen dar. Abbildung 56 stellt beispielhaft die digitalisierte Bearbeitung eines Rohdatenframes des Schutzbauwerksbestands des LBM und dessen spätere Verortung innerhalb eines GIS-Systems dar.

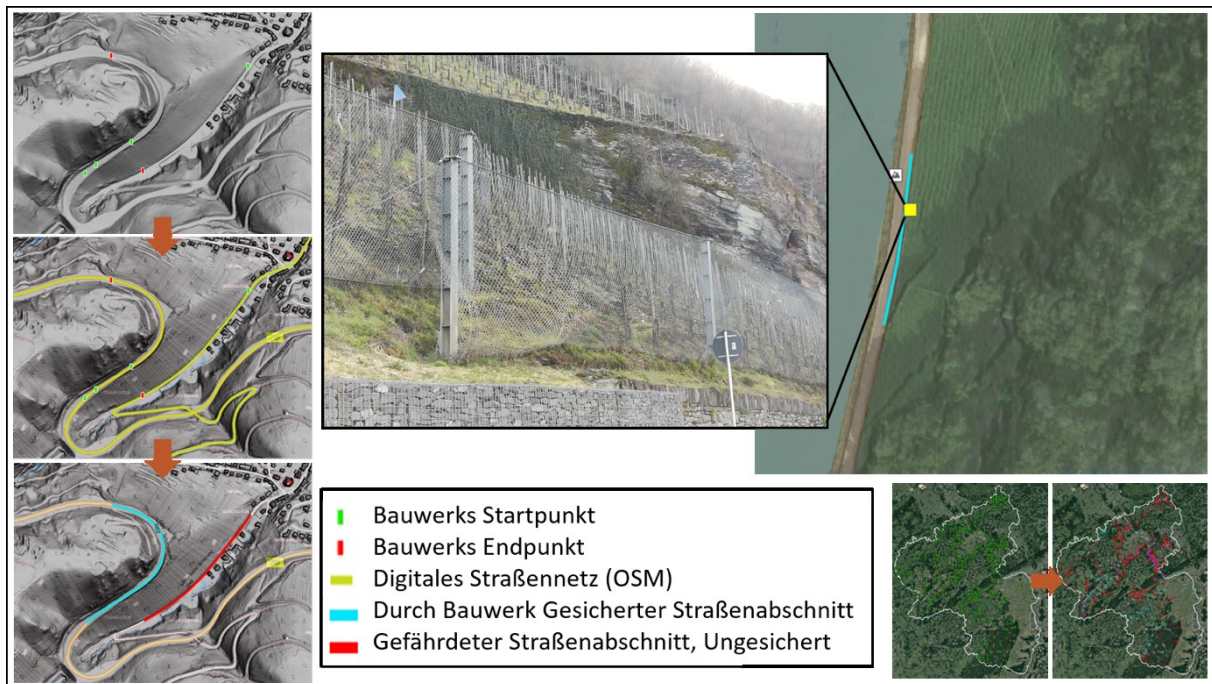


Abb. 56: Schematische Darstellung der Digitalisierung von Schutzbauwerken im MABEIS-Projekt

Die übermittelten Daten enthalten jedoch keine Einschätzung des Zustands der Bauwerke, sodass im Rahmen des Projektes mittels Geländebegehungen eine Vielzahl dieser Bauwerke im Untersuchungsgebiet angefahren und um eine Zustandseinschätzung ergänzt wurden. Insgesamt konnten somit von Seiten des LBM 771 Einzelverbauungen und 1585 gefährdete Bereiche, die aber nicht konstruktiv gesichert sind in gesamt Rheinland-Pfalz in die Modellierungen integriert werden. Von den konstruktiven Sicherungsmaßnahmen befinden sich 313 im Untersuchungsgebiet am Mittelrhein- und Moseltal

Darüber hinaus wurden dem MABEIS-Projekt über den LBM durch den beschriebenen Vertragsverbund auch entsprechende Geodaten zu Schutzbauwerken, die von der

Deutschen Bahn entlang des Mittelrhein- und Moseltals betrieben werden, zur Verfügung gestellt. Nach einer Präprozessierung und Koordinatentransformation der Daten innerhalb von QGIS, konnten diese Daten ebenfalls in die Modellierungen integriert und im Sinne dieser Arbeit nutzbar gemacht werden. Insgesamt wurden so weitere 395 Einzelsicherungen verschiedener Sicherungsarten im Untersuchungsgebiet in den Datenbestand integriert. In Kapitel 6.1.3 ist weitergehend das Vorgehen und die Verwendung dieser Daten für eine angepasste Gefahrenhinweiskarte innerhalb der verwendeten Modellierungsstruktur beschrieben.

4.4 Modellierungen

Um aus den Eingangsdaten und deren Ableitungen eine Gefährdungseinschätzung in Bezug auf einen potenziellen Steinschlag/Felssturz beziehungsweise Murgang zu berechnen, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene numerische Modellierungen durchgeführt. Im Folgenden werden die einzelnen konsekutiven Modellierungsmodule und deren Berechnungsweise um das zentrale Gravitational Process Path Model (GPP) beschrieben.

4.4.1 The Gravitational Process Path Model (GPP)

Das Gravitational Process Path Model v.1 (im Folgenden GPP genannt) ist ein vom Geomorphologen VOLKER WICHMANN (2017) entwickeltes und seit 2017 fest eingebundenes Modell in der Open Source GIS-Software SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses, CONRAD et al. 2015). Das GPP kann verwendet werden, um Gefährdungsbereiche und Trajektorienverläufe von gravitativen Hangbewegungen auf der Basis eines digitalen Geländemodells GIS-basiert zu simulieren. Das Modell basiert auf Komponenten, die verschiedene Teilbereiche von Massenbewegungen wie zum Beispiel die Initiierung, der Prozesspfadbestimmung

oder Materialablagerung beschreiben und verketteten. Für jede dieser Komponenten sind dabei mehrere etablierte Modellierungsansätze implementiert. Diese können vom Benutzer situativ gewählt und kombiniert werden. Dadurch ist das GPP-Modell für unterschiedliche Prozesse wie Steinschlag, Murgänge oder Lawinen konfigurierbar (WICHMANN 2017). Die Anwendungsbereiche für das GPP bilden somit die Erstellung von Gefährdungskarten für Naturkatastrophen von einzelnen Events bis in regionalen Maßstäben ab. Die Grundkomponenten des Modells sind in diversen Studien und Projekten bisher erfolgreich zur Anwendung gekommen (MARINELLI et al. 2022, HECKMANN et al. 2016, PROSKE & BAUER 2016).

Ein großer und für diese Arbeit sehr wichtiger Vorteil des GPP-Modells ist die geringe Anzahl der benötigten Eingangsparameter, um detaillierte Ergebnisse zu erzielen. Während komplexe rein physikalisch basierte dynamische Modelle für detaillierte Analysen einzelner Ereignisse verwendet werden können (z.B. IVERSON, 1997; LEINE et al. 2013, MATAS et al. 2017, SARRO et al. 2014), erfordert die regionale Gefahrenhinweiskartierung Modellierungsansätze mit deutlich geringeren Datenanforderungen (HORTON et al. 2013, WICHMANN 2017). Das liegt daran, dass die Eingangsparameter von komplexen rein physikalisch basierten Modellen oft unsicher und in die Fläche gerechnet kaum zu kalkulieren sind, weshalb in Regionalstudien zumeist vereinfachte konzeptionelle Modelle zur Abschätzung potenziell gefährdeter Gebiete verwendet werden (MERGILI et al. 2015).

Aus diesem Grund sowie aufgrund der einfachen Verfügbarkeit, Anpassbar- und Automatisierbarkeit wurde sich im Rahmen des MABEIS-Projektes dazu entschieden, die Ausbreitungsmodellierungen von schnellen Massenbewegungen wie Felsstürzen und Murgängen mithilfe des GPPs zu modellieren.

4.4.2 Aufbau des GPP

Den wichtigsten Bestandteil der Gefahrenzoneneinteilung bei Massenbewegungsmodellen stellt die Beschreibung von Prozesswegen (Process Paths) und Auslaufstrecken (Runout Areas) zur Lokalisierung von gefährdeten Bereichen oder Abschnitten von Infrastrukturverläufen dar (MERGILI et al. 2015, VOLKWEIN et al. 2011). Bei den meisten Modellen sowie auch beim GPP erfordert dies Kenntnisse über mögliche Freisetzungsbereiche (Release Areas), um diese als Ausgangspunkte für Prozesspfadmodelle zu verwenden (WICHMANN 2017). Potenzielle Release Areas können dabei methodisch durch verschiedene Ansätze abgeleitet werden. Die gängigsten sind klassische geomorphologische Feldkartierungen, die Kombination von verschiedenen Indexkarten, wie sie im Falle dieser Arbeit durch den beschriebenen SIDX (siehe Kap. 4.1.2) verwendet wird, statistischen deterministischen Ansätzen (z.B. Sicherheitsfaktor), probabilistischen Ansätze oder die Verwendung von neuronalen Netzen (ALEOTTI & CHOWDHURY 1999, LOYE et al. 2009, ROSSI et al. 2021). Ausgehend von den abgeleiteten Startzonen kann Material bzw. Massenpunkte über ein digitales Geländemodell geroutet und der hangabwärtsgerichtete Weg berechnet werden (WICHMANN 2017, vgl. Abb 57).

Dies erfolgt im GPP durch Single- oder Multiple-Flow-Direction-Algorithmen, die in der Lage sind, Fließwege und Sturzpfade für eine Bewegungseinschätzung zu bestimmen. Multiple-Flow-Direction-Algorithmen sind dabei in der Lage, auch die in der Natur üblichen lateralen Ausbreitungen über den Hang zu beschreiben. Um die finale Auslauflänge der Bewegung zu bestimmen, werden dann Bruchkriterien wie Schwellenwinkel basierend auf horizontalen und vertikalen Abständen, oder auf dem Massenflussmodell von VOELLMY (1955) basierende, vereinfachte physikalisch basierte Modelle verwendet (WICHMANN 2017, vgl. Kap. 2.2.4).

Die Berechnung von Massenbewegungen im GPP beginnt also mit den Release Areas als Startpunkten, aus denen die Bewegung initial berechnet wird. Dabei berechnet das Modell entsprechend der Monte-Carlo-Simulation (Random-Walk) mehrere

Modellrealisierungen für jede Startzelle. Die Anzahl dieser Modelliterationen wird vom Benutzer festgelegt. Die Überlagerung der Modellergebnisse aus allen Iterationen zeigt das endgültige Modellergebnis, d.h. den gesamten Prozessbereich. Einzelne Prozesspfade sind dabei nicht mehr dargestellt, da jede Iteration aufgrund der stochastischen Komponenten im Modell ein anderes Ergebnis und damit einen leicht anderen Bewegungspfad berechnet (WICHMANN 2017).

Demnach wird bei jeder Modelliteration ein Partikel unter Verwendung von Informationen aus seiner Startzelle initialisiert. In einem ersten Schritt wird eines der beschriebenen Prozesspfadmodelle verwendet, um den Partikelpfad zu aktualisieren. Falls es keine gültige Prozesspfadzelle gibt, d. h. der Pfad die Grenze des DGMs oder eine NoData-Zelle erreicht hat, wird der Weg des Partikels beendet und die nächste Iteration aus der Startzelle initialisiert.

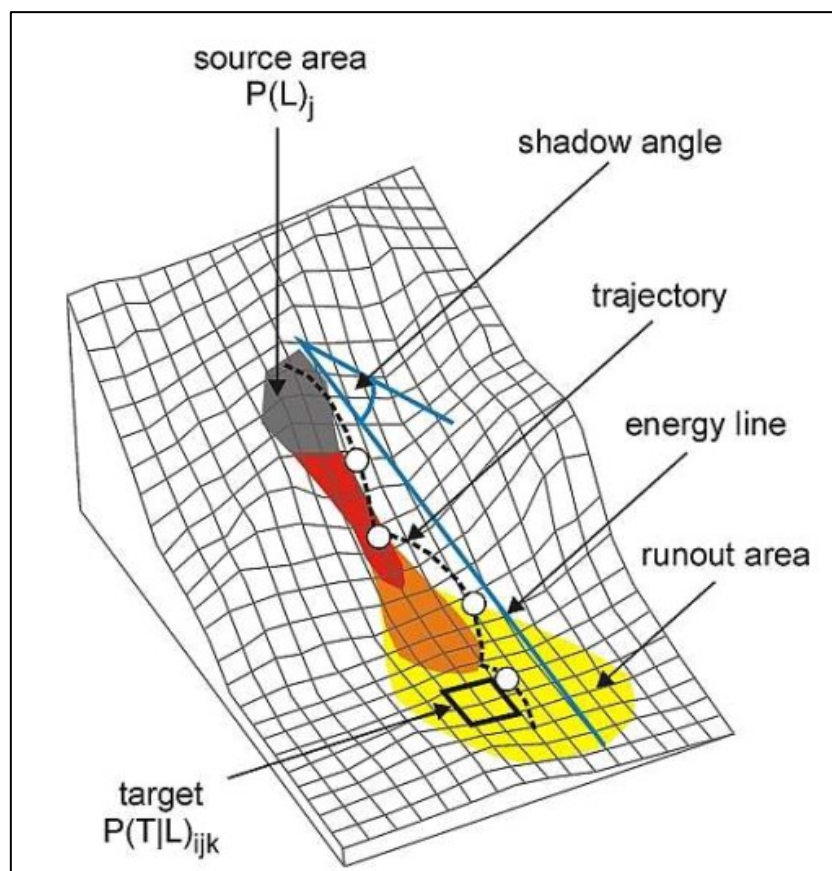


Abb. 57: Schematische Darstellung von verschiedenen im GPP wählbaren Runout-Modellen (nach VOLKWEIN et al. 2011)

Kann die nächste Zelle im Prozesspfad ermittelt werden, wird eines der Runout-Modelle zur Aktualisierung der Geschwindigkeit des Partikels berechnet oder bei einer Annäherung nach dem Energielinienprinzip das jeweilige Winkelkriterium überprüft (WICHMANN 2017, vgl. Abb. 57).

Neben den Komponenten zur Prozesspfad- und Rundlaufberechnung integriert das GPP-Modell Komponenten, die das DGM in jeder Modelliteration durch Materialablagerung modifizieren können. Das heißt es gibt eine Komponente, die natürliche oder künstliche Senken behandelt, und eine Komponente die beim Prozessstopp oder auch entlang des Prozesspfades zur Materialablagerung dient. So kann das Modell beispielsweise tatsächliche Murkegel modellieren oder aber auch Senken überwinden oder beispielsweise das Verklausen eines Kanals durch Holz und Geröll simulieren. Um diese Komponenten nutzen zu können, benötigt das GPP-Modell einen Eingangsdatensatz mit Materialhöhen pro Startzelle (WICHMANN 2017).

Falls der Partikel modellierungstechnisch gestoppt hat, da die Morphologie zu flach geworden ist oder er auf ein Hindernis gestoßen ist, ist sein Weg beendet. Andernfalls wird jeweils die nächste Zelle des Prozesspfades bestimmt. Für den Fall, dass der Prozessweg in einer morphologischen Senke gelandet ist, wird eine für den Partikel verfügbare Materialmenge überprüft. Diese optional anzugebende Materialmenge wird dann verwendet, um den Prozesspfad schrägaufwärts zu füllen, während eine abfallende Neigung beibehalten wird, sodass der Partikel der nächsten Iteration, sollte er auf seinem Weg wieder in dieselbe Senke modelliert werden, diese überwinden kann (*sink fill*, WICHMANN 2017).

Für den Fall, dass das verfügbare Material in einer Iteration nicht ausreicht oder die Senke größer ist, sind möglicherweise mehrere Modelliterationen erforderlich, um die Senke vollständig zu füllen (WICHMANN 2017). Dieser Vorgang ist schematisch in Abbildung 58 dargestellt.

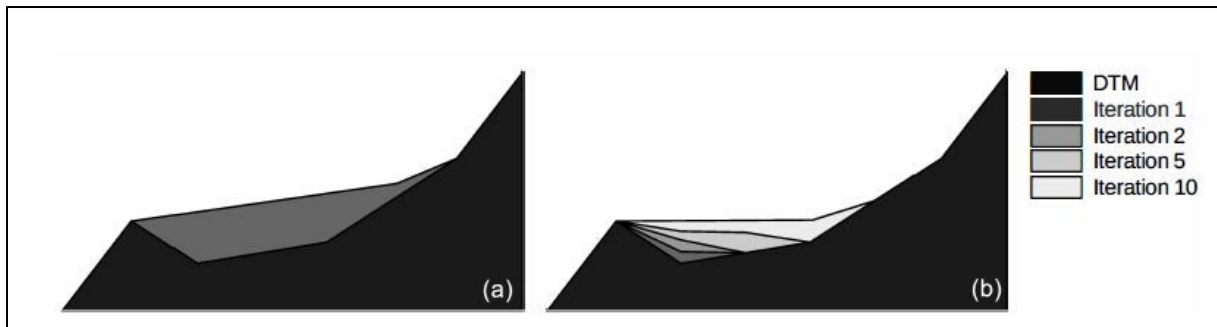


Abb. 58: Längsprofil zur Veranschaulichung des Ansatzes zum Füllen von Senken: (a) Einzelmodelliteration, (b) 10 Modelliterationen (WICHMANN 2017)

Abbildung 59 zeigt schematisch nun einen vollständigen Prozessaufbau des GPP-Modells, das normalerweise für die Szenariomodellierung eines einzelnen oder einer kleinen Anzahl von Ereignissen verwendet wird. In diesem Aufbau kann Material abgelagert werden, das „sink fill“ ist entsprechend aktiviert. Wenn ein Partikel stoppt, abhängig vom gewählten Ablagerungsmodell und davon, ob (noch) Material für den Partikel und das sink fill verfügbar ist, wird der nächste Partikel initialisiert. Für den Fall, dass der Partikel nicht gestoppt hat, hängt es wiederum vom gewählten Ablagerungsmodell und dem verfügbaren Material ab, ob entlang des Prozesspfads Material abgelagert wird oder nicht (WICHMANN 2017).

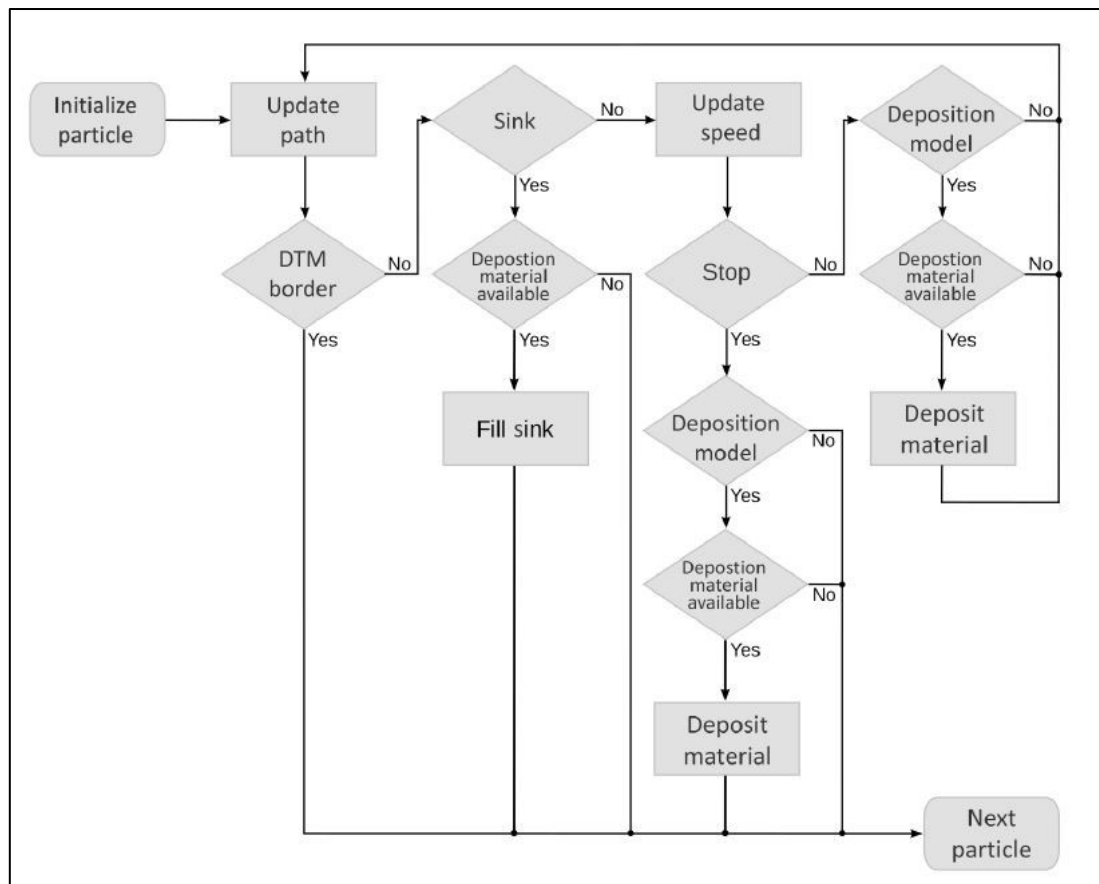


Abb. 59: Flowchart einer typischen GPP-Konfiguration für die Modellierung im regionalen Maßstab (WICHMANN 2017)

Die Initialisierung der Partikel kann in drei Ordnungen getrennt werden. Die erste Sequenzmöglichkeit ist die Berechnung der Startzellen für die einzelnen release areas. Die Startzellen werden in aufsteigender Reihenfolge nach ihrer Höhe verarbeitet. Dabei wird beginnend mit der ersten Release Area für jede Iteration eine neue Startzelle initiiert. Die zweite Möglichkeit ist die Berechnung nach einer einzelnen Modelliteration der Startzellen einer release area. Für jede einzelne Modelliteration wird die release area und die dazugehörigen Startzellen neu berechnet. In der dritten Sequenzmöglichkeit werden die Startzellen nach der Höhe und unabhängig von der release area in jeder Iteration parallel neu berechnet (WICHMANN 2017).

Die Reihenfolge, in der sowohl Freisetzungsbereiche als auch Partikel initialisiert werden, ist entscheidend, wenn eine Materialablagerung simuliert wird. Die

Modifikation des Geländes zwischen Modelliterationen kann Prozesspfade und Auslaufstrecken dabei erheblich beeinflussen (WICHMANN 2017).

4.4.3 Modelleinstellungen und Algorithmus

Um den hangabwärts gerichteten Prozesspfad eines Partikels von seinem Initiationsort zu seinem Ablagerungsort zu bestimmen, sind im GPP-Modell zwei unterschiedliche Ansätze wählbar. Einer ist ein Einzelflussrichtungsalgorithmus (single-flow-direction algorithm), der diejenige Nachbarzelle als nächste Flussfadzelle auswählt, zu der die steilste Abwärtsneigung beobachtet wird. Der andere, ist ein nach GAMMA (2000) auf dem Random Walk-Algorithmus basierender Ansatz, der mit mehreren Strömungsrichtungen arbeitet und deutlich empfindlicher auf die örtlichen Hangbedingungen reagiert. Die Einstellungen für die jeweiligen Prozesspfade sind dabei von zwei verschiedenen Berechnungsmethoden abhängig. Als Auswahlmöglichkeiten können im GPP Modell dafür der *Maximum slope*- oder der erwähnte *Random walk*-Algorithmus ausgewählt werden. Näher beschrieben sind diese beiden Algorithmen in FREEMAN (1991) und GAMMA (2000).

Der Maximum Slope-Algorithmus wurde nach WICHMANN (2017) hauptsächlich aus praktischen Gründen implementiert, um ein einfaches Mittel zum Berechnen des Prozesspfads entlang des lokalen Gravitationsgradienten bereitzustellen. Ein Partikel folgt entsprechend immer dem steilsten Gefälle des Hangs und orientiert sich hauptsächlich entlang der Erdbeschleunigung nach der Gleichung:

$$n = \max\{(z - z_i)/d_i\} \quad (2)$$

in der n die Nachbarzelle mit der größten Steigung, z die Höhe der aktuell berechneten Zelle, z_i die Höhe der Nachbarzelle i und d_i der horizontale Abstand zur Nachbarzelle

i ist. Wenn zwei oder mehr Nachbarzellen den identischen Höhenwert teilen, wird die nächste Zelle zufällig bestimmt. In flachen Gebieten werden alle Zellen als potenzielle Nachbarzellen ausgewählt, die in der laufenden Modelliteration noch nicht einbezogen waren. Aus dieser Menge wird zufällig eine Prozesspfadzelle ausgewählt. Dies führt eine probabilistische Komponente ein (WICHMANN 2017).

Der Maximum-Slope-Modellansatz ist ein entsprechend einfacher Ansatz und hat keine weiteren bewegungssteuernden Parameter. Somit sind die Anzahl der Modellwiederholungen und die Verarbeitungsreihenfolge die maßgebenden Parameter neben dem Input-DGM. Der Pseudo-Zufallszahlengenerator, der verwendet wird, um unter den vorher beschriebenen Bedingungen zufällig eine Nachbarzelle auszuwählen, kann entweder mit der aktuellen Zeit oder einem festen Startwert initialisiert werden. Letzteres wird immer die gleiche Folge von Werten für einen gegebenen Startwert erzeugen und wird somit die gleichen Ergebnisse für aufeinanderfolgende Modellierungsläufe liefern (WICHMANN 2017).

Die zweite, deutlich weiterverbreitete und in dieser Arbeit verwendete, Einstellung zur Berechnung des Prozesspfades ist der **Random Walk-Algorithmus** (GAMMA 2000). Er verwendet eine stochastische Wegfindung, die es ermöglicht die laterale Ausbreitung eines Prozesses zu modellieren, indem mehrere Iterationen von derselben Startposition aus berechnet werden. Neben den Parametern, die die Monte-Carlo-Simulation steuern, wie z. B. die Anzahl der Wiederholungen, hat der Random-Walk-Ansatz drei hauptsächliche Parameter, um die Bewegung der modellierten Masse zu kalibrieren.

- (i) ein Schwellenparameter (*threshold parameter*), der die minimale Geländeneigung definiert, unter der divergierender Fluss nach dem Random walk-Algorithmus erlaubt ist.
- (ii) Dieser Neigungswert wird von einem Exponenten für divergierenden Fluss (*exponent for divergent flow*) begleitet. Dieser Wert steuert maßgeblich den Grad der Divergenz.

- (iii) Abschließend ein Persistenzfaktor (*persistence factor*), der den Grad die Bewegungsrichtung während des Prozesslaufes zu erhalten steuert. Dabei wird die aktuelle Fließrichtung gewichtet und die Trägheit der fließenden Masse berücksichtigt, die vor allem bei Murgängen oder Nassschneelawinen beobachtet wird (TAKAHASHI et al. 1992).

Die Modellierung von Steinschlagereignissen kann entsprechend der unterschiedlichen Prozessabläufe (vgl. Kapitel 2) mit (fast) keiner Persistenz und einem höheren Grad an Divergenz modelliert werden (WICHMANN 2017).

Für die aktuell verarbeitete Gitterzelle wird somit ein Satz von mehreren verschiedenen potentiellen Fließwegzellen (rechnerisch N) aus allen unmittelbaren Nachbarzellen in einem 3-mal-3-Fenster bestimmt, die eine gleiche oder niedrigere Höhe als die zentrale aktuelle Zelle haben. Dies geschieht in mehreren Schritten. Zunächst wird für jede Nachbarzelle i ein Steigungswert γ_i basierend auf der Steigungsschwelle d β_{thres} berechnet (GAMMA 2000, WICHMANN 2017):

$$\gamma_i = \frac{\tan\beta_i}{\tan\beta_{thres}}, \dots \beta_i \geq 0, \dots i \in \{1, 2, \dots 8\} \quad (3)$$

wobei β_i die Steigung zur Nachbarzelle i ist. Der Maximalwert $\gamma_{max} = \max\{\gamma_i\}$ ist ein Maß dafür, wie nah die Steigung zum steilsten Nachbarn an der Steigungsschwelle liegt. Für den Fall, dass $\gamma_{max} > 1$ ist, besteht die Menge N potentieller Fließwegzellen nur aus dem steilsten Nachbarn. Ansonsten wird nach dem mfdk-Kriterium (multiple flow direction for debris flow; GAMMA, 2000) entschieden, welche Nachbarzellen zusätzlich in N aufgenommen werden:

$$\gamma_i \geq (\gamma_{max})^a \quad (0 < \gamma_{max} \leq 1, a \geq 1), \quad (4)$$

wobei a der Exponent ist, um die Menge des divergenten Flusses zu steuern ($a \geq 1$). Wenn γ_i größer oder gleich dem mdfd-Kriterium ist, dann ist der Nachbar i in N enthalten. Somit ist die Menge N gegeben durch (GAMMA, 2000):

$$N = \left\{ n_i \left| \begin{cases} \gamma_i \geq (\gamma_{max})^a & \text{if } 0 < \gamma_{max} \leq 1, \\ \gamma_i = \gamma_{max} & \text{if } \gamma_{max} > 1 \end{cases} \quad i \in \{1, 2, \dots, 8\}, \quad a \geq 1 \right. \right\} \quad (5)$$

Die einzelnen Komponenten der Gleichung 2 und 3 sind gegliedert in γ_{max} , β_i die Steigung zur Nachbarzelle i , β_{thres} dem Steigungsschwellenwert und dem Exponenten a , der einen Exponent der Menge des divergenten Stroms darstellt. Durch den Schwellenwert kann das Modell an jede Form von Relief angepasst werden und die flachen Segmente einer flacheren Nachbarzellen haben entsprechend einen höheren Anteil am Wert des divergenten Stroms (WICHMANN 2017). Die Wahrscheinlichkeit der Auswahl einer Zelle p_i aus N ist im Random Walk Algorithmus definiert durch:

$$p_i = \begin{cases} \frac{\tan \beta_i \cdot p}{\sum_j \tan \beta_j} & \text{if } i' \notin N \\ \frac{\tan \beta_i}{\sum_j \tan \beta_j} & \text{if } i' \in N \end{cases} \quad i, j \in N, \quad p \geq 1 \quad (6)$$

Dabei steht i' für die vorherige Flussrichtung und p den Beständigkeitsfaktor. Eine Tendenz in Richtung der größten Steigung ist durch die Wahrscheinlichkeitsgewichtung nach der lokalen Steigung gegeben (WICHMANN 2017). Falls die Flussrichtung i' Teil der Menge N ist, erhöht der Beständigkeitsfaktor die Auswahlwahrscheinlichkeit der Zelle. Durch diese Eigenschaft und die stochastische Anwendung der Markov Chain werden abrupte Richtungsänderungen

verhindert. Dennoch ist offensichtlich, dass durch die Verwendung des Random-Walk die Ausdehnung des Prozessbereichs durch die höhere laterale Ausbreitung deutlich zunimmt und damit deutlich näher an den in der Natur beobachteten Phänomenen ist. Die Wahrscheinlichkeit wird in einer Skala von 0-1 angegeben und über den pseudo-random generator ausgewählt. Im GPP-Modell wird dieser Ansatz noch erweitert, um auch flache Bereiche zu behandeln. Dies geschieht wie für den Maximum-Slope-Ansatz beschrieben mit der gleichen Einschränkung, dass eine potenzielle Nachfolgezelle in der aktuellen Modelliteration noch nicht durchlaufen worden sein darf, um Endlosschleifen zu vermeiden. Die Übergangsfrequenzen, d. h. wie häufig eine Rasterzelle insgesamt durchlaufen wurde, stellt dann das Produkt also die Runout Area dar (WICHMANN 2017).

Neben den Einstellungen, die die Art der Berechnung des Bewegungspfades an sich modellieren, muss zusätzlich die spezifische Art des Bewegungsablaufs und der Auslauflänge vom Verwender bestimmt werden. Dabei stehen im GPP verschiedene Varianten zur Verfügung, um unterschiedliche Arten von Massenbewegungen zu beschreiben. Diese sind in Tabelle 3 aufgeführt und werden im Folgenden beschrieben.

Tab. 3: Run-Out-Einstellungsmöglichkeiten im GPP-Modell (verändert nach Wichmann 2017)

<i>Run-out modeling Einstellungen</i>
Energy line
Geometric gradient
Fahrboeschung
Shadow Angle
1- parameter friction model
PCM Model

Die *Energy line* ist durch eine gerade Energielinie vom Startpunkt bis zum Ablagerungsbereich definiert. Nach HEIM 1932 und KÖRNER 1980 gelten folgende Gesetze:

$$\tan \alpha = \frac{dv}{dh} \quad (7)$$

und:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_v} \quad (8)$$

Dabei ist α der Winkel zur Horizontale, dv der horizontale Abstand und dh der vertikale Abstand von Startpunkt zur Endposition. Mithilfe der Energielinie kann über Gleichung 6 die Geschwindigkeit v_i der aktuellen Zelle in $[\frac{m}{s}]$ berechnet werden. Die Erdbeschleunigung g wird in $[\frac{m}{s^2}]$ angegeben und h_v als Höhendifferenz zwischen der Energielinie und der aktuellen Zelle i in [m]. Der Winkel α wird automatisch durch die Eingansgrasterdateninformationen berechnet (WICHMANN 2017).

Die Einstellung *Geometric gradient* nach HEIM 1932, benötigt nur den Reibungswinkel α als Input Parameter. Der vertikale Abstand zwischen Startpunkt und Ablagerungsbereich und die horizontale Strecke der beiden Punkte definiert den Gradienten. Das GPP Modell kann mit einheitlichem α oder individuellem α für jede Startzelle rechnen. Bei der Unterschreitung von α kommt es zum Ende der Ablagerung (WICHMANN 2017).

Der elementare Unterschied zu der nächsten Rounout-Einstellung *Fahrboeschung* liegt in der Messung der horizontalen Distanz. Als horizontaler Abstand wird hier die Länge der Projektion des process path angenommen (WICHMANN 2017).

Die dritte vom User wählbare Einstellung ist der Shadow Angle. Diese Einstellung ist spezieller auf die Berechnung von Steinschlägen ausgelegt. Dabei wird nach der Theorie von HUNGR (1988) der Energieverlust des ersten Aufpralls mit der Böschung

bei einem Steinschlag mit einbezogen und ersetzt den Startpunkt der oben genannten Fahrböschungseinstellung und der geometric gradient Kompositionen mit dem Kontaktpunkt des Aufpralls. Die Kontaktbereiche können als Rasterdaten angegeben werden oder mittels eines generalisierten Schwellenwerts für die Steigung manuell gesetzt werden, bei der bei Überschreitung dieses Winkels in den Modus Freier Fall gewechselt wird. Bei der Unterschreitung wird anstatt dessen der Shadow Angle an der betreffenden Lokation berechnet (WICHMANN 2017).

4.4.4 Felssturzmodellierung im GPP

Die vorletzte der aufgeführten Einstellungen in Tabelle 3 ist im Vergleich zu den bisher beschriebenen Runout-Modellen deutlich komplexer und benötigt entsprechend dazu größere Rechenleistungen. In der 1-parameter-friction-model Einstellung ist speziell der Prozess eines Steinschlags als Maßgabe zum Algorithmus herangezogen worden (WICHMANN 2017). Das Modell berechnet für jede Zelle des Durchlaufs nach der Startzelle die lokale Geschwindigkeit des bewegten Massepartikels mithilfe der Vorgängergeschwindigkeit, der lokalen Steigung und einem Reibungskoeffizienten der Nachbarzelle. Die Ablagerung erfolgt bei einer Geschwindigkeit von null. Sobald ein Gesteinsblock den Kontakt zur Oberfläche verliert, befindet er sich im freien Fall nach der Gleichung:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f} \quad (9)$$

Die Parameter sind bis auf die Höhendifferenz zwischen Startzelle und berechnender Zelle h_f dabei identisch zu Gleichung (6). Der Aufprall wird wie in der Shadow Angle-Berechnung angepasst. Allerdings kann der Energieverlust nun über zwei unterschiedliche Gleichungen berechnet werden (WICHMANN 2017 nach SCHEIDEGGER 1975):

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f \cdot K} \quad (10)$$

in der K den Betrag der unverbrauchten Energie in Prozent angibt oder:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_f \cdot \sin \beta_i} \quad (11)$$

wenn β_i den lokalen Steigungsgradient angibt. Dabei wird die Fallgeschwindigkeit parallel zur Steigung gespeichert. Die Berechnung nach dem Aufprall kann anschließend nach den zwei Bewegungsarten Gleiten und Rollen weitererfolgen. Die Formel:

$$v_i = \sqrt{v_{(i-1)}^2 + 2 \cdot g \cdot (h - \mu_s \cdot D)} \quad (12)$$

für das Gleiten bildet sich aus der Geschwindigkeit $v_{(i-1)}$ [$\frac{m}{s}$] der vorherigen Zellen des process paths, h gibt dabei die Höhendifferenz der angrenzenden Zellen in Meter an, D ist der horizontale Abstand (in Meter) der angrenzenden Zellen und μ_s den Gleitreibungskoeffizient. Gleichung 10 muss für die Berechnung von Rollbewegungen folgendermaßen modifiziert werden:

$$v_i = \sqrt{v_{(i-1)}^2 + \frac{10}{7} \cdot g \cdot (h - \mu_r \cdot D)} \quad (13)$$

Der Rollwiderstandskoeffizient μ_r ersetzt dabei den oben beschriebenen Gleitreibungskoeffizienten (WICHMANN 2017 nach KIRKBY UND STATHAM 1975).

4.4.5 Murgangsmodellierung im GPP

Die letzte Einstellungsmöglichkeit ist das PCM-Modell. Das Tool wurde zur Berechnung der Reichweite von Lawinen entwickelt und ist durch den Gleitreibungskoeffizienten μ und das Masse- zu Reibungsverhältnis (M/D) charakterisiert (WICHMANN 2017 nach PERLA et al. 1980). Die berechnete Geschwindigkeit des Massepartikels pro Zelle ist abhängig ähnlich dem 1- Parameter-Friction-Modell von der Geschwindigkeit der Vorgängerzelle, der Steigung, der Länge des Steigungsabschnittes und den zwei Reibungskoeffizienten:

$$v_i = \sqrt{\alpha_i \cdot (M/D)_i \cdot (1 - \exp^{\beta_i}) + (v_{(i-1)})^2 \cdot \exp^{\beta_i}} \quad (14)$$

und

$$\alpha_i = g(\sin \theta_i - \mu_i \cos \theta_i), \dots \beta_i = \frac{-2L_i}{(M/D)_i} \quad (15)$$

θ ist die lokale Steigung [°], L ist die Länge der Strecke mit bleibender Steigung zwischen benachbarten Zellen [m], und $\frac{M}{D}$ entspricht dem Masse- zu Reibungsverhältnis [m]. Für den Fall eines konkaven Übergangs in Steigungsrichtung wird die Geschwindigkeit $v_{(i-1)}$ nach der Formel:

$$v^*_{(i-1)} = \begin{cases} v_{(i-1)} \cos(\theta_{(i-1)} - \theta_i) & \text{if } \theta_{(i-1)} \geq \theta_i \\ v_{(i-1)} & \text{if } \theta_{(i-1)} < \theta_i \end{cases} \quad (16)$$

korrigiert. Die Korrektur geht von einem linearen Impuls aus und berechnet größere Geschwindigkeit für abrupte Übergänge. Die Ablagerungsbereiche und Endpunkte der Zellen werden nach:

$$s = \frac{(M/D)_i}{2} \ln \left(1 - \frac{(v_{i-1})^2}{\alpha_i (M/D)_i} \right) \quad (17)$$

berechnet. s stellt dabei die Länge des Sturzsegmentes der Zelle [m] dar. Die Berechnungen pro Iterationsdurchlauf stoppen, sobald das Ergebnis in Gleichung 12 undefiniert ist. Die Zellengröße des Eingabe-DGMs definiert dabei die Präzision des Endpunkts. Die Geschwindigkeitskorrektur ist im PCM-Modell direkt in Gleichung 12 eingesetzt:

$$v_i = \alpha_i \cdot (M/D)_{i_i} \cdot (1 - \exp^{\beta_i}) + (v_{(i-1)})^2 \cdot \exp^{\beta_i} \cdot \cos(\Delta \theta_i) \quad (18)$$

und

$$\Delta \theta_i = \begin{cases} \theta_{(i-1)} - \theta_i & \text{if } \theta_{(i-1)} > \theta_i \\ 0 & \text{if } \theta_{(i-1)} \leq \theta_i \end{cases} \quad (19)$$

Das PCM-Modell bietet darüber hinaus eine Anwendung zur Materialablagerung an, das sogenannte „deposition-modeling“. Zur Nutzung dieser Anwendung muss ein Rasterdatensatz implementiert werden, der die Höhe des Materials beinhaltet, die mit jeder Iteration neu aus der Startzelle berechnet wird. Das genutzte Material bleibt für weitere Wiederholungen vorhanden und das verlagerte Material modifiziert das neue DGM (vgl. Abb. 58). Auswählbare Kategorien im PCM-Modul dafür sind: sink filling, on-stop, slope / velocity based (WICHMANN 2017). Die sink filling Option basiert auf leicht veränderten Annahmen von GAMMA (2000) und ist an das PCM-Modell angepasst. Wenn die Zielrichtung und die Tiefe einer Senke erkannt wird, kann entweder die gesamte Senke mit Material während einer einzigen Iteration gefüllt werden und die Berechnung stoppt. Andernfalls wird die Senke so lange durch weitere Iterationen gefüllt, bis die vom Nutzer ausgewählte minimale Neigung nach Ablagerung erreicht worden ist und die Senke überströmt werden kann. Des Weiteren kann Material auch oberhalb der Senke abgelagert werden, um keine weitere Senke zu

bilden. Vorausgesetzt ist dabei, dass die minimale Neigung wird auch in diesem Fall eingehalten (WICHMANN 2017).

Über die On-Stop Einstellung kann mittels eines einstellbaren Parameters die Menge an abgelagertem Material auf den Endpunkten der Modellierung in Prozent reguliert werden. Im Anwendungsbereich einer Steinschlagsimulation kann dieser Parameter auf bis zu 100% gesetzt werden. Mit der On-Stop Funktion kann dabei auch die Geschwindigkeit oder Neigung verknüpft werden. Der Nutzer kann die maximale Menge der Ablagerung pro Iteration, den Mindestabstand der Ablagerung zum Startpunkt und einen Minimalwert für die Neigung und Geschwindigkeit definieren. Die Grenzwerte für Neigung und Geschwindigkeit können in einzelnen Einstellungen als auch in Kombination angewählt werden (WICHMANN 2017).

4.5 Verwendung des GPP für regionale Gefahrenkartenhinweiskarten

Innerhalb dieser Arbeit wird das GPP-Modul zur Modellierung von Felsstürzen und Steinschlägen hauptsächlich über die vorgestellte Modellkomponente des 1-parameter-friction-Modell und das PCM-Modell für Murgänge verwendet. Dabei liefert das Modell die gewünschten Outputs, die für eine Analyse der jeweiligen Gefahrenhinweiseinschätzung maßgeblich sind. So werden hierbei nicht nur der wahrscheinlichste Weg eines Sturz- oder Fließkörpers den Hang abwärts modelliert, sondern zudem deren Auslaufdistanz und die modellierten Endpunkte bei denen das Material zum Stehen kommt. Zusätzlich werden auch die maximale Fließbeziehungsweise Sturzgeschwindigkeiten, die diese Bewegungskörper in jeder Rasterzelle auf ihrem Weg erreichen können, berechnet. Aus diesen Informationen lassen sich weitere Schlussfolgerungen, die für eine Analyse der Vulnerabilität durch diese Prozesse entscheidend sind, ableiten. So lässt sich für Steinschläge beispielsweise aus einer angenommenen Masse und der Geschwindigkeit in Kombination mit der Kenntnis des wahrscheinlichsten Weges die kinetische Energie errechnen, die ein

Gesteinskörper bei Aufprall mit einem Hindernis erreichen würde. Dies kann dafür genutzt werden, um potenziell bereits vorhandene Schutzmaßnahmen wie etwa Fangzäune auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen oder bei der Planung neuer Sicherungsmaßnahmen Mindestanforderungen zu definieren. Darüber hinaus lassen sich weitere entscheidende Parameter in das Modell integrieren, um beispielsweise die dämpfende Wirkung von Vegetation oder verschiedener Untergründe zu berücksichtigen.

Dabei ist zu beachten, dass die derzeit im GPP-Modell implementierten Modellierungsansätze nicht auf vollständig physikalischen Prinzipien basieren, sondern zum Teil auf validierten empirischen und grundlegenden Prinzipien aufbauen, um die gewünschten typischen makroskopische Eigenschaften von Massenbewegungen nachzuahmen. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, sind heutzutage eine ganze Reihe von rein physikalisch basierten numerischen Simulationsmodellen verfügbar (z. B. IVERSON, 1997; PUDASAINI & HUTTER, 2007, RAMMS 2017, HORTON et al. 2013), die es ermöglichen, Prozesse noch realistischer und mit einer höheren Präzision der einzelnen Bewegungsformen zu simulieren. Diese Modelltypen erfordern jedoch eine Vielzahl an geotechnischen Parametern wie etwa rheologische Eigenschaften, Kohäsion und geomechanischer Substrateigenschaften. Diese erforderlichen detaillierten Informationen und die tatsächliche reale Heterogenität sowie die dafür benötigten Rechen- und Zeitaufwendungen beschränken die Anwendbarkeit dieser Modelle daher jedoch nur auf sehr kleine Gebiete beziehungsweise im Normalfall auf einzelne Ereignisse (z.B. Sassa et al. GUTHRIE et al. 2008, MERGELI et al. 2015). Da in dieser Arbeit jedoch der Versuch unternommen wird eine flächendeckende Analyse der Gefährdung stürzender und fließender Massen innerhalb der Flusstäler in Rheinland-Pfalz zu erstellen, sind diese Modelle in diesem Kontext nicht geeignet.

Obwohl die im GPP-Modell verwendeten Modellierungsansätze im 1-parameter-friction-Modell und im PCM-Modell auf relativ einfachen Konzepten basieren, ermöglicht ihre erprobte Anwendung auch die Modellierung von

Gravitationsprozessbereichen für größere Gebiete in zufriedenstellendem Maße (z.B. FARINA et al. 2020; GOETZ et al. 2021; HAGGE-KUBAT et al. 2021, MARINELLI et al. 2022). Angemessene Ergebnisse können mit einer deutlich kleineren Anzahl an Eingabedaten und Modellparametern erzielt werden, wobei das Framework insbesondere für die Suszeptibilitätskartierung auf regionaler Ebene seine Wirkung zeigt. So können durch verschiedene in dieser Arbeit entwickelte und in den Kapiteln 5 vorgestellte spezielle Anpassungen sogar mehrere Quadratkilometer große Gebiete in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen und hoher Auflösung gerechnet werden.

4.6 GRASS Modul r.sim.water

Für die Durchführung der Simulationen im GPP müssen zunächst die Murgangsauslösenden Startzellen auf Basis des oberflächenhaften Wasserabflusses von Starkniederschlägen für die Berechnung der Murgangsfahr modelliert werden (vgl. Kap. 5.3.2). Dafür wurde in dieser Arbeit mit dem Modul r.sim.water unter dem open Source GIS-System GrassGis gerechnet. Die für die Durchführung der Simulationen nötigen digitalisierenden Vorarbeiten erfolgten mithilfe des GIS-Systems QGIS.

Da das Relief und die Oberflächenbeschaffenheit wie in Kapitel 2.3 beschrieben ausschlaggebende Größen für die Berechnung von starkregeninduzierter Abflussbildung darstellen, ist eine umfassende Geländeanalyse mit Hilfe eines GIS vor Beginn einer Simulation unumgänglich. Die Hauptdatengrundlage stellt hierbei wie bei der späteren Murgangsmodellierung im GPP das digitale Geländemodell dar, bei dem zunächst die genaue Topographie identifiziert und daraus Abflusswege mittels der zugrundeliegenden Reliefenergie abgeleitet werden (HÖVEL 2017). GIS-basierte Programme bieten dabei aber nicht nur Möglichkeiten für diese Analyse des digitalen Geländemodells beispielsweise über die Berechnung der Neigung und der Exposition, sondern besitzen wie in Kapitel 2.3 beschrieben, auch Werkzeuge, mit denen der

Abfluss und die Wassertiefen mithilfe hydrologisch numerischer Simulationen berechnet werden können. Diese in der Folge näher beschriebenen Module zur Berechnung des Oberflächenabflusses finden sich jedoch in der open source Variante meist nur in GIS-Erweiterungen oder speziellen GIS-Systemen. Zwei bekannte Beispiele hierfür stellen in SAGA GIS das Modul „Overland Flow – Kinematic Wave D8“ oder das in dieser Arbeit verwendete Grass GIS Modul „SIMWE Oberflächenabflussmodellierung (r.sim.water)“ dar (MITASOVA et al. 2004).

Unterschiedliche Modelltypen basieren bei der Berechnung des Abflusses auf leicht unterschiedlichen mathematischen und physikalischen Ansätzen. So kommt beispielsweise der Ansatz der „kinematischen Welle“ von SAGA im Modul „Overland Flow – Kinematic Wave D8“ zum Einsatz. Hierbei erfolgt eine vereinfachte Beschreibung des Fließvorgangs, in welchem die St. Venant’schen Flachwassergleichungen als Ableitung der Navier-Stokes-Gleichung zu einem Gleichgewicht zwischen Reibung und Schwerkraft vereinfacht werden. Diese besteht zum einen aus der Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

wobei Q den Durchfluss, A den durchflossenen Fließquerschnitt, s die Weglänge und t die Zeiteinheit darstellen. Zum anderen aus der Energiegleichung:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial s} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial s} + g \cdot (J_s + J_v) = 0 \quad (21)$$

wobei ist v die Fließgeschwindigkeit, g die Erdbeschleunigung, h die Wasserhöhe, J_s das Sohlgefälle und J_v das Reibungsgefälle darstellen. Die Glieder $(\partial v/\partial t)$ und $v \cdot (\partial v/\partial s)$ beschreiben die lokale und die konvektive Beschleunigung

(Trägheitsglieder), der Term $g \cdot (\partial h / \partial s)$ das Druckglied (ERHARDT 2007). Bei dem SAGA Tool „Overland Flow – Kinematic Wave D8“ wird jedoch der zweite Teil der Energiegleichung also die lokalen und konvektiven Beschleunigungen sowie der Druckterm der Impulsgleichung vernachlässigt (JOHNSON et al. 1997).

Erweiternd dazu werden die Flachwassergleichungen zu der Berechnung der Abflussbahnen und Wassertiefen im Modul r.sim.water auf Grass GIS durch den Ansatz der diffusen Welle genähert. Das Modell r.sim.water, welches der Modulpalette der hydrologischen Modellierungen auf Grass Gis untergeordnet ist, beruht auf dem physikalisch basierten distributiven Modell SIMWE (SIMulated Water Erosion) von MITASOVA et al. (2004), welches mit dem Ziel entwickelt wurde, Erosionsprozesse durch Oberflächenabfluss zu modellieren (MITASOVA & MITAS et al. 2001). Der Abfluss wird dabei als dünner Wasserfilm auf Basis der oben beschriebenen Flachwassergleichungen nach Saint Venant berechnet. Hierbei kann im Gegensatz zur reinen kinematischen Welle der Druckterm der Impulsgleichung durch die Green's function Monte-Carlo Methode berücksichtigt und berechnet werden. Somit sind beispielsweise die Wellendämpfung und Rückstau von Oberflächenabfluss berechenbar (MITASOVA et al. 2004).

Daneben wird hier zur Differenzierung der Oberflächenrauigkeit und damit zur Differenzierung der Landnutzung, Boden- und Vegetationsparametern zur Ermittlung des Fließwiderstands die empirische Fließformel nach Manning-Strickler berücksichtigt. Die Beziehung zwischen Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit wird ebenfalls über die Manning-Beziehung hergestellt. Sie enthält den Manning-Koeffizienten n , der ein Maß für die Oberflächenrauigkeit darstellt und neben dem Gefälle maßgeblich die Fließgeschwindigkeit beeinflusst (TYRNA & HOCHSCHILD 2010):

$$v_m = \frac{1}{n} \cdot R_{\frac{2}{3}} \cdot I_{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Hierbei ist v_m die mittlere Fließgeschwindigkeit, n der Rauheitsbeiwert nach Manning für verschiedene Oberflächen, R der hydraulische Radius, der in diesem Fall aufgrund der relativ geringen Fließquerschnitte der Wassertiefe h entspricht und I dem Fließgefälle in Höhe pro Länge (m/m) (MITASOVA et al. 2004).

Ein Vergleich der beiden open source Module „r.sim.water“ und „Overland Flow – Kinematic Wave D8“ wurde bereits von HÖVEL (2017) in Bezug auf die Abflussvorhersage von Starkregenereignissen im urbanen Raum durchgeführt, der r.sim.water als deutlich genaueres und praktikableres Modell für diese Fragestellung ansieht. Entsprechend wurde dieses Modell auch in dieser Arbeit und den Vorabveröffentlichungen zu dieser Promotion verwendet (HAGGE-KUBAT et al. 2020, HAGGE-KUBAT et al. 2022).

Ein weiterer großer Vorteil von r.sim.water ist die Möglichkeit die Oberflächenrauheit nach Manning-Strickler in Form eines räumlich variablen Rasters anzugeben. Somit ist es unter Grass GIS möglich die Landnutzung differenziert und den realen Gegebenheiten wie beispielsweise ATKIS-Daten oder der Vegetationshöhe anzunähern. Entsprechend kann auch der Niederschlagsinput in Grass ebenfalls räumlich variabel erfolgen.

Für eine realitätsnahe Modellierung des Oberflächenabflusses ist die Datenqualität des verwendeten digitalen Geländemodells von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit wurde wie bei allen Modellierungen auch der bei der Abflussmodellierung das modDGM1 inklusive der Gebäude verwendet (siehe Kap. 4.1.2).

Neben der Infiltrationsrate, welche zur Abschätzung des Niederschlagsüberschusses verwendet wird, und dem Manning-Wert ist als weiterer Input eine Anzahl von sogenannten „walkers“ zu definieren, welche durch das Programm die Wassertiefe anhand der Dichte der Punkte im Raster berechnen. Empfohlen wird nach den Entwicklern MITASOVA et al. (2004) dabei ungefähr die doppelte Anzahl der Zellen des verwendeten digitalen Geländemodells. Die Simulationszeit, im Modell auch Iterationen genannt, die die Dauer des Niederschlagsereignisses definiert, wird in

Minuten angegeben. Die gewünschten Ausgabemaster z.B. Abfluss, Wassertiefe oder Walkers können bereits während der noch laufenden Simulation mit der Option „output_step [min]“ für verschiedene vorher definierte Zeitschritte gespeichert werden. Der eigentliche Simulationszeitschritt selbst wird jedoch von der Simulation intern kalkuliert und hängt zum Beispiel von der Komplexität der Eingangsdaten ab, so z.B. DGM-Auflösung oder der Größe und Verteilung der Rauigkeitswerte (HÖVEL 2017). In Abbildung 60 ist ein simplifizierter schematischer Aufbau der Eingangsparameter, welche für die Simulation des Oberflächenabflusses im Modul r.sim.water entscheidend sind, dargestellt.

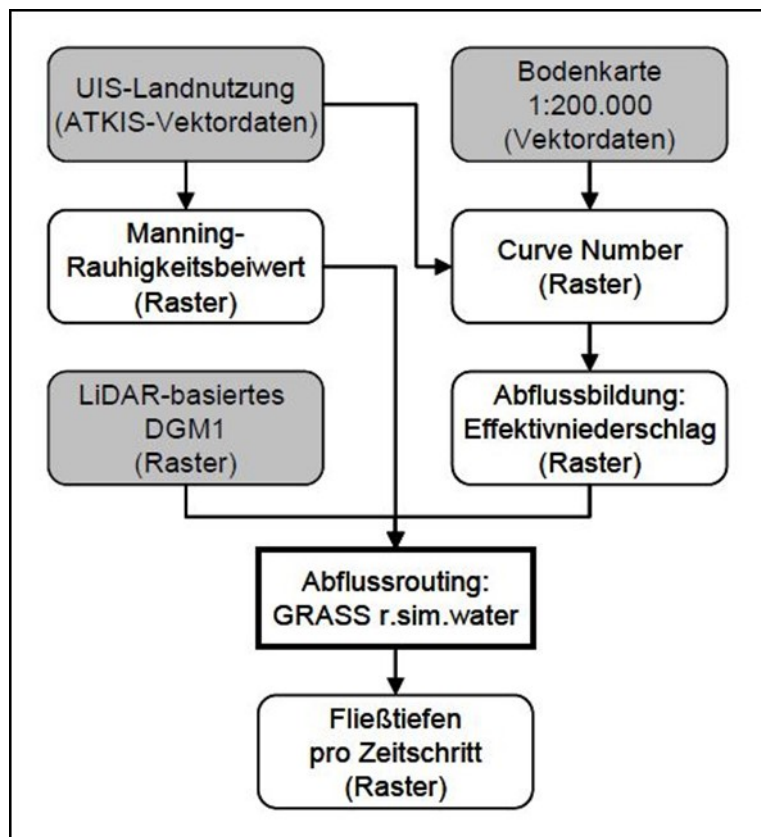


Abb. 60: Schematischer Ablauf einer Oberflächenabflussimulation mit dem Modul r.sim.water unter Grass Gis (verändert nach TYRNA & HOCHSCHILD 2010)

Nach Abschluss der Simulation erfolgt die Ausgabe der gewünschten Werte über Rasterkarten. Diese beinhalten für jede einzelne Zelle die maximale Wassertiefe, den

Abfluss und als Option ein Fehler-Raster, welches den Fehler der numerischen Simulation angibt. Dieser numerische Fehler kann dann gegebenenfalls durch Veränderung der Parameter wie etwa die Erhöhung des walker-Parameters unter Inkaufnahme einer längeren Simulationszeit reduziert werden. Die räumliche Verteilung der walker zu den definierten Zeitschritten kann optional ebenfalls in einer Vektor-Datei ausgegeben werden (HOFIERKA et al. 2002).

Für die Ermittlung der Landnutzungsdaten standen neben dem ATKIS-Datensatz Rheinland-Pfalz für diese Arbeit die LiDAR generierten Vegetationshöhen und hochgenaue von Landesamt für Vermessung und Geoinformationen bereitgestellte Digitale Orthofotos (DOP) zur Verfügung. Des Weiteren konnten Bodendaten aus der Bodenkundlichen Übersichtskarte 1:200.000 des Landesamtes für Geologie und Bergbau sowie Geländeuntersuchungen zur Abschätzung der Rauheitswerte nach Manning-Strickler sowie zur Infiltrationskapazität verwendet werden.

Jeder Landnutzungs- beziehungsweise Vegetationsart (vgl. Kap. 5.3.1) wurde daraufhin ein passender Rauheitswert nach Manning-Strickler mithilfe von Tabellen unter anderem aus HOFIERKA & KNUTOVA (2015), PHILLIPS & TADAYON (2006), AKKERMANN (2004) und MANIAK (2010) zugeordnet. Hier muss jedoch, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, angemerkt werden, dass eine solche Simulation immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit darstellen kann. Somit ist auch die Zuordnung der Rauheitswerte nach Manning-Strickler, welche auch von jahreszeitlichen Schwankungen der Vegetation oder der Bearbeitung von Ackerflächen abhängig ist, kein fest definierter Wert und kann sich im Jahresverlauf ändern. Somit können diese Werte im Rahmen dieser Arbeit nur als eine validierte Abschätzung zu verstehen sein (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

5 Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die konkreten Vorgehensweisen für die Gefahrhinweiskartenerstellung sowie systematisch die Modellierungsabläufe der beiden Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang/Hangmure beschrieben. Dazu werden zunächst die jeweilig notwendigen Eingangsdaten und deren Vorprozessierung aufgezeigt. Anschließend werden die, für die in die Fläche gerechnete Modellierung verwendenden Parameter im GPP für die beiden Prozessläufe beschrieben. Abschließend werden in diesem Kapitel die aus den Modellierungen resultierenden Produkte, deren Skalierung, Visualisierung sowie deren Weiterverarbeitung skizziert.

5.1 Erstellung von Gefahrenhinweiskarten

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für die kritischen Hangbereiche im Mittelrhein- und Moseltal in Bezug auf die schnellen Massenbewegungsprozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang/Schuttstrom. Diese Gefahrenhinweiskarten gliedern sich in verschiedene Einzelprodukte, die zusammengesetzt eine Gefährdungseinschätzung auf verschiedenen Ebenen liefern sollen. Im MABEIS-Projekt wurde sich für eine Dreigliedrigkeit der Gefahrenkartenerstellung entschieden:

Zunächst stellt eine weitgehend flächendeckende und hochaufgelöste **Potenzialkarte** für verschiedene Massenbewegungsprozesse innerhalb der natürlichen Gegebenheiten die Grundlage weiterer Einschätzungen dar. Die Berechnung dieser Potenzialkarte erfolgt dabei ohne Einbezug der in der Realität vorhandenen Sicherungsmaßnahmen. Diese Karte soll die einzelnen Massenbewegungsprozesse in ihrem Potenzial darstellen. Das heißt, dass diese Karte eine grundsätzliche Einschätzung der Möglichkeit des Auftretens eines Prozesses und dessen potenziellen

Prozessraum aufzeigen soll. In Bezug auf die schnellen Massenbewegungen (Steinschläge und Murgänge) können darüber hinaus, ausgehend aus errechneten Startpunkten über verschiedene Simulationen die Auslaufdistanz, Geschwindigkeiten und Endpunkte dieser Prozesse errechnet und dargestellt werden. Diese Potenzialkarten sind im Aufbau an die, in Kapitel 2.5. beschriebenen, Gefahrenhinweiskarten nach den Vorgaben der Staatlich Geologischen Dienste (2009) angelehnt und können eigenständig als solche verwendet werden.

Neben den Potenzialkarten sollen zur präzisieren Einschätzung der Gefährdungslage **Vulnerabilitätskarten**, mit Berücksichtigung der realen Sicherungsmaßnahmen, die abgeleitete Gefahrensituation für die Infrastruktur in den Untersuchungsgebieten darstellen. Dafür werden ausgehend von den errechneten Potenzialkarten Daten zu Sicherungsbauwerken, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben sind, mit den vorhandenen Infrastrukturverläufen verschnitten. Daraus lassen sich automatisiert potenziell gefährdete Bereiche von beispielsweise Straßen- oder Bahnstreckenverläufen unter der Berücksichtigung von Hangsicherungsmaßnahmen darstellen (vgl. Kapitel 6.1.3).

Als drittes Produkt wird im MABEIS-Projekt an der prozessorientierten Erstellung von **Suszeptibilitätskarten** gearbeitet, die die Empfindlichkeit eines Geländes gegenüber der Auslösung von verschiedenen Arten von Massenbewegungen definieren soll (SÜßER et al. 2023). Diese Karten sind an tatsächlichen Gefahrenkarten (vgl. Kap. 2.5) orientiert und stellen somit eine indirekte Art der Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Prozessen innerhalb von Gefahrenklassen dar. In einer einfachen Form ohne weitere Differenzierung stellt somit auch der in Kapitel 4.1.3 beschriebene SIDX eine Suszeptibilitätseinschätzung dar. In Kombination dieser Produkte soll sich somit in der Theorie die Gefahrenlage für jeden untersuchten Hangbereich einschätzen lassen. Eine schematische Darstellung, die den Prozessablauf einer solchen Gefahreneinschätzung beschreibt, ist in Abb. 61 zu erkennen.

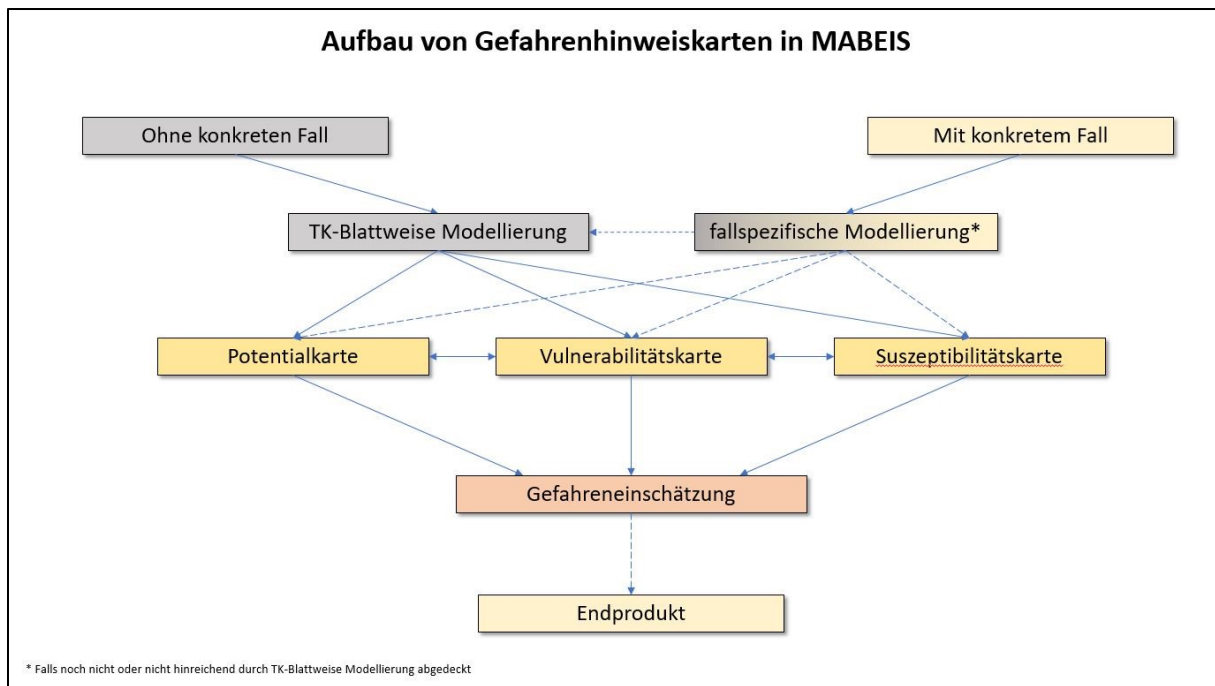


Abb. 61: Schematischer Aufbau von Gefahrenhinweiskarten bezogen auf konkrete Massenbewegungsprozesse im MABEIS-Projekt

Die vorliegende Arbeit beschreibt nun erstmals das Vorgehen, die Entwicklung und Erstellung von Potenzial- und Vulnerabilitätskarten für das Mittelrhein- und Moseltal als erstes flächendeckendes Fallbeispiel für die schnellen Massenbewegungsprozesse Steinschlag und Murgang. Die Erstellung von Suszeptibilitätskarten befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit im MABEIS-Projekt noch in der Entwicklung und wird zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht. Sie stellt damit keinen Teil dieser Arbeit dar.

Im MABEIS-Projekt, so auch in dieser Arbeit, wird die Erstellung dieser Kartenwerke ausgehend von zwei unterschiedlichen Herangehensweisen betrieben (vgl. Abb. 61). Einerseits sind die Systeme scriptbasiert, wie in den folgenden Kapiteln näher beschrieben, so aufgebaut, dass sie automatisiert auf einer TK 25-Blattweisen Berechnung Prozesse in großer Fläche effizient berechnen und die Ergebnisse voreingestellt in GIS-Systemen darstellen können. Dieser Fall stellt die Ausgangslage dieser Arbeit dar und ist zur Erstellung von in die Fläche gerechneten allgemeinen Gefahrenhinweiskarten entwickelt worden. Andererseits lassen sich auch kleinere

Gebiete mit einem speziellen Untersuchungsgegenstand durch verschiedene Modellierungskomponenten und Anpassungen einzeln modellieren, um beispielsweise einzelne konkrete Felssturzereignisse rekursiv nachzumodellieren oder geplante Schutzverbauungen auf deren Funktionalität hin zu überprüfen. Diese Herangehensweise wurde teilweise in den Kapiteln 6.1.1 und 6.2.1 beschriebenen Fallbeispielen verwendet und ist in zwei Vorabveröffentlichungen zu dieser Arbeit näher beschrieben (HAGGE-KUBAT et al. 2021, HAGGE-KUBAT et al. 2022). Allgemein wird in den folgenden Kapiteln jedoch der erstgenannte Ansatz der flächendeckenden Modellierung in seinen Einzelheiten getrennt für die Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang beschrieben. Dafür wird im MABEIS-Projekt bereits an einer Weiterentwicklung zu dem in dieser Studie vorgestellten Ansatzgearbeitet. Zukünftig könnte über ein Automatisierungstool, dem sogenannten MABEIS-Mapper, eine solche Suszeptibilitätsanalyse einen weiteren Beitrag dazu leisten die Steinschlaggefährdungseinschätzung weiter zu verfeinern (SÜBER et al. 2023)

5.2 Prozessablauf Steinschlag

Die flächige Modellierung von Sturzprozessen zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten gegenüber Steinschlägen und Felsstürzen wird in dieser Studie mittels eines mehrstufigen Prozesspfades realisiert. In Abbildung 62 ist dieser gesamte Modellierungs- und Validierungsvorgang (siehe auch Kapitel 6.1.2) als schematisches Flussdiagramm dargestellt.

Ausgehend von den LiDAR-Rohdaten des LVerMGeo Rheinland-Pfalz werden in einem ersten Schritt der Präprozessierung zunächst notwendige Dateninputs für die Modellierung im GPP aufbereitet. Dazu gehören neben dem essenziell notwendigen hochaufgelösten ModDGM1 (DGM mit 1x1m Auflösung inklusive der realen Gebäudeinfrastruktur, vgl. Kap. 4.1.2) vor allem die, aus der lokalen Topografie und abgeleiteten Gesteinsparametern erschlossene, Ermittlung der Startzellen. Diese

stellen in der Modellierung die potenziellen Auslösebereiche von Steinschlägen und Felsstürzen dar. Darüber hinaus werden Daten zur Vegetationsbedeckung und Landnutzung zur Abschätzung von Rauigkeitsparametern verwendet. In den folgenden Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 werden diese Dateninputs sowie deren Weiterverarbeitung für diesen Ansatz näher beschrieben.

Sind diese Dateninputs flächendeckend für einen Modellierungslauf aufbereitet, können diese scriptbasiert automatisiert per Rasterkarten in das GPP implementiert und die eigentliche physikalische Sturzmodellierung gestartet werden. Mithilfe der im GPP auswählbaren Kalibrierungsparameter (näher beschrieben in Kapitel 5.2.3) können die Prozessläufe im GPP angepasst und für die Mittelgebirgsregion optimiert werden.

Nach der Durchführung der Modellierung ergeben sich als Outputs Rasterdaten, die den Sturzbereich (Trajektorienmodell), also den wahrscheinlichsten Prozessweg, darstellen. Dieser ergibt sich aus der absoluten Anzahl an modellierten Trajektorendurchläufen pro Rasterzelle für die definierte Zahl an Modellierungsiterationen. Zusätzlich werden die maximale modellierte Geschwindigkeit und die Endpositionen der Sturzkörper darstellt. Daraus ergibt sich die Process Area die den Wirkungsbereich des Bewegungsvorgangs und damit die Reichweiten der Trajektorien der einzelnen Quellgebiete repräsentiert. Das Trajektorienmodell stellt nach einer Aufbereitung im GIS die Grundlage für die Steinschlagpotenzialkarte dar. Zur Überprüfung der Aussagekraft der Karte können anschließend Validierungsuntersuchungen über Geländegroundchecks und statistische Vergleiche mit den erfassten Schadensfällen in der Rutschungsdatenbank durchgeführt werden (siehe Kapitel 6.1.2).

Zur Ermittlung der infrastrukturellen Vulnerabilität, für die Erstellung einer Vulnerabilitätskarte, können die modellierten Trajektorienverläufe mittels des im MABEIS-Projekt entwickelten VulWay-Ansatzes mit den Infrastrukturverläufen verschnitten und so die existierenden Schutzbauwerke berücksichtigt werden. Eine

nähere Beschreibung dieses Ansatzes findet sich mit konkreten Fallbeispielen in Kapitel 6.1.3. Jeder dieser so erstellten Datensätze sollte abschließend per visueller Sichtprüfung kontrolliert um abschließend etwaige offensichtliche Modellierungs- oder Darstellungsfehler manuell beheben zu können. Daraus ergeben sich final die beiden Datensätze zu Potenzial und Vulnerabilität, die gemeinsam oder getrennt in einer GIS-technisch aufbereiteten und symbolisierten Darstellung verwendet werden können.

Mit dem Zusammenführen der einzelnen TK25-blattweisen Modellierungen kann darauffolgend ein einheitlicher Rasterdatensatz erzeugt werden. Dieser Datensatz bietet sich aufgrund seiner großen Ausdehnung und Detailschärfe im Rasterdatenformat hauptsächlich als spezifische GIS-Anwendung an, da die Sichtbarkeit anders als bei Vektordaten hier in größerem Maßstab nicht mitskaliert und daher für lokalere Betrachtungen optimiert ist. Daher kann in einem weiteren Schritt anschließend, auch um den Vorschlägen der staatlich geologischen Dienste zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten Rechnung zu tragen, dieser Datensatz abschließend vektorisiert und für einen Zielmaßstab 1:25000 generalisiert werden, sodass einzelne Trajektorienverläufe nicht mehr parzellenscharf zu erkennen sind und nur noch größere hinweise gebende Polygone verbleiben (SGD 2009). Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ist MABEIS-Projekt intern sowie bei den Projektpartnern jedoch noch keine finale Darstellungskonvention bezüglich der Vektorisierung und deren Kartendarstellung getroffen worden, sodass innerhalb der Beschreibung dieser Arbeit dieser Vorgang noch nicht angewendet wurde oder hier weiter diskutiert wird. Die Darstellungen dieser Arbeit beziehen sich entsprechend auf die hochaufgelöste Rasterdarstellung und können daher von später veröffentlichten Kartendarstellungen, die sich auf die modellierten Ursprungsdaten (oder deren Derivaten) dieser Arbeit beziehen, abweichen.

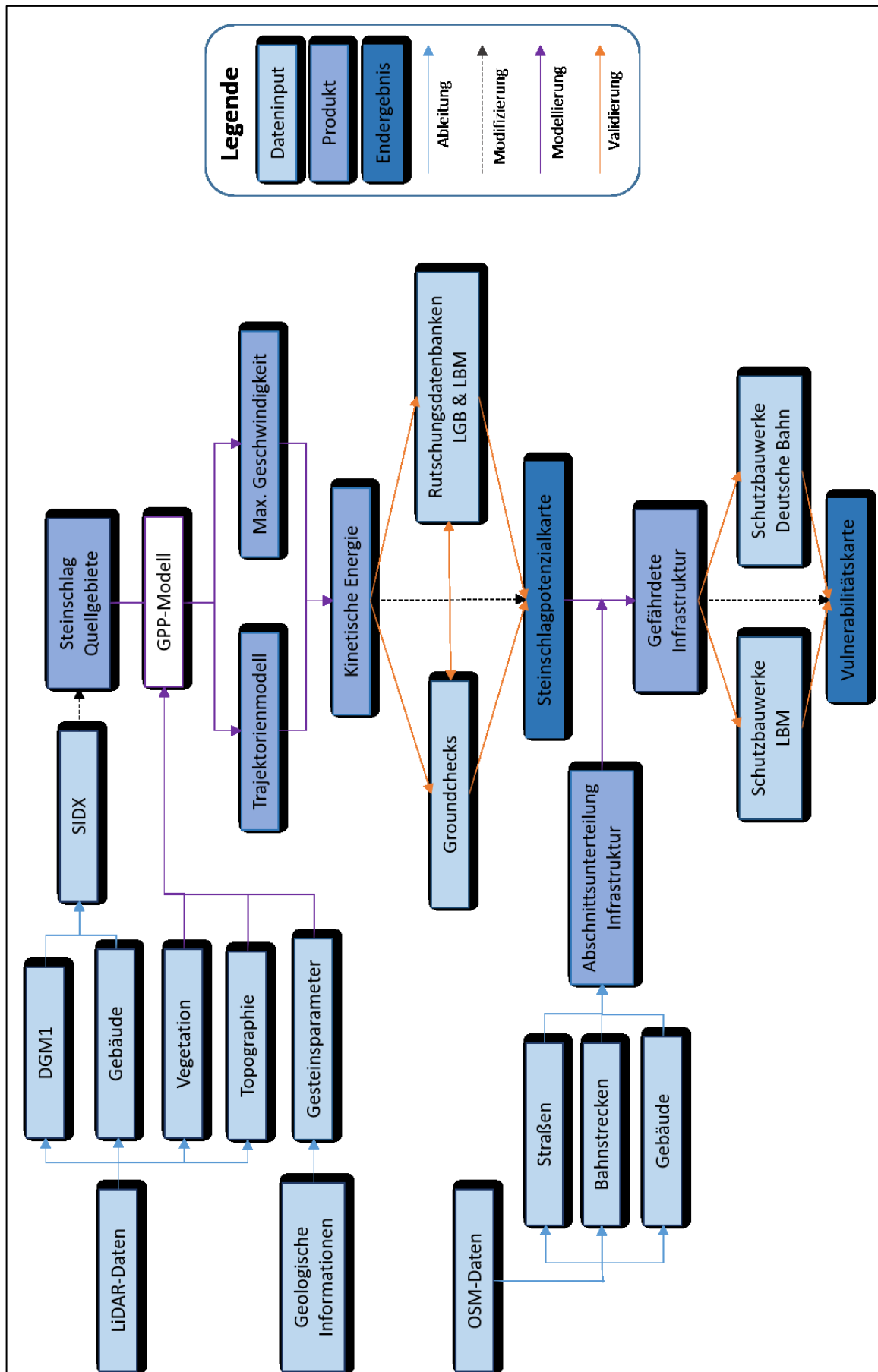


Abb. 62: Flowchart des verwendeten Modellierungsablaufs für den Prozess Steinschlag

5.2.1 Ableitung der Quellgebiete

Wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, wurden die initialen Startzellen für die Steinschlagmodellierung im GPP aus den flächendeckend verfügbaren SIDX-Daten der LiDAR-Befliegungsgeneration 2014 für das Mittelrhein- und Moseltal errechnet. Dafür wurden die SIDX Werte >0 als direkte Felsaufschlüsse oder potenziell einsturzgefährdete Bruchsteinmauerwerke angenommen, aus denen sich potenziell Steinschläge und Felsstürze entwickeln können. Abgeleitet wurden diese Daten aus dem ModDGM1, sodass auch die einzelnen SIDX-Kacheln entsprechend eine räumliche Ausdehnung von $1 \times 1 \text{m}$ haben. Jede Rasterzelle mit einem positiven SIDX-Wert stellt also einen Felsaufschluss von mindestens 1m^2 dar. Mehrere dieser Zellen zusammen fügen sich zu Gruppen, die im Gelände als herausstehende Felssporne oder ganze Steilwände angetroffen werden können. Dieses Verfahren hat sich bei den für diese Arbeit durchgeführten Groundchecks und auch in anderen bereits publizierten Studien schon als sehr überzeugend und mit geringer Fehlerquote erwiesen (WERNER et al. 2021, HAGGE-KUBAT et al. 2021, vgl. Abb. 50 & 63).

Die positiven SIDX-Werte können anschließend klassifiziert und alle negativen Werte separiert werden. Anthropogene Gebilde wie beispielsweise Häuserwände, Schwergewichtsmauern an Straßen oder Kaimauern an den Flussläufen, die ebenfalls Werte über 0 anzeigen und entsprechend modelltechnisch als Startzellen identifiziert werden würden, wurden anschließend durch Maskierung mit den verfügbaren Hausumringen (LVermGEO) extrahiert oder nach Sichtprüfung manuell entfernt. Somit ergibt sich ein Datensatz, in dem potenziell nur die tatsächlichen Felsbereiche bzw. Bruchsteinmauerwerke verbleiben. Eine beispielhafte Darstellung der so verbleibenden SIDX-Zellen für die Hangsituation um den Rossstein im zentralen Oberen Mittelrheintal ist in Abbildung 63 dargestellt.



Abb. 63: SIDX-Darstellung der anstehenden Felspartien am Rossstein

Deutlich zu erkennen sind die einzelnen Felssporne, die sich als offene Felsbereiche rippenförmig den Hang hinaufziehen und dem Rossstein strukturell seine markante Form geben.

Bei Geländeuntersuchungen am Rossstein vor Ort wurden beispielhaft einzelne dieser Felsbereiche erklettert und deren Position und Größe im Verhältnis zur dargestellten SIDX-Zellgruppe interpretiert (Abb. 64). Dadurch konnte bestätigt werden, dass sowohl die Lage als auch die Größe der SIDX-Zellen treffend mit den im Gelände gefundenen Felsbereichen übereinstimmen. Die im SIDX nicht positiv ausgewiesen Rasterzellen sind in der Realität tatsächlich in der Regel ebenfalls nur als steile, bodenbedeckte oder überwachsene Hangbereiche vorgefunden worden.



Abb. 64: Charakteristische Felspartien am Rossstein (Fotos: T. Hagge-Kubat 2021)

Dieser Ansatz hat somit den Vorteil, dass anderes als bei der klassischen Herangehensweise der Identifikation von flächendeckenden Startzellen, bei der die Startzellen gleichbedeutend mit einer Geländeneigung von 40 Grad und mehr ausgewiesen werden (LFU 2016, LOYE et al. 2009, FRATTINI et al. 2008), mit dem SIDX-Ansatz eine deutlich präzisere Identifikation erreicht wird. Bei einer Anwendung der klassischen Methode wäre für die Untersuchungsgebiete im Mittelrhein- und Moseltal aufgrund der tief eingeschnittenen Flusstäler mit der extremen Reliefenergie der Hänge praktisch die gesamten Hangbereiche als Startzellen ausgewiesen worden. Da jedoch beispielsweise sehr steile Weinberge oder steile dicht bewaldete Flächen, von denen keine Steinschlaggefahr ausgeht, dann ebenfalls missinterpretiert worden. Die aus dem SIDX-Ansatz resultierenden Modellierungsergebnisse daher deutlich näher an den realen Verhältnissen und einzelne Sturzereignisse können besser interpretiert werden. Entsprechend wurde sich innerhalb dieser Arbeit dazu entschieden die

Startzellen für die flächendeckende Steinschlagmodellierung mittels des SIDX-Ansatzes zu bestimmen.

Die klassifizierten SIDX-Werte wurden anschließend per Sichtprüfung untersucht, um mögliche Missinterpretationen von Quellgebieten zu vermeiden und offensichtlich fehlerhafte oder anthropogene Zellen zu extrahieren. Der finale Datensatz wurde dann auf TK 25 Maßstab als Input-Raster für die Startzellen im GPP verwendet.

5.2.2 Einfluss der Vegetation

Neben der Identifikation der Steinschlagquellgebiete über den SIDX-Ansatz, lassen sich aus den LiDAR-Rohbefliegungsdaten des LVerGeo noch weitere Parameter ableiten, die entscheidenden Einfluss auf eine Steinschlagmodellierung haben. So können aus den ersten Laserpulsen der jeweiligen Befliegung beispielsweise die Vegetationsdichte und -höhe über der Geländeoberfläche extrahiert werden. Diese hochaufgelösten Vegetationsdaten können dann anschließend aufbereitet, klassifiziert und in das Modell integriert werden. Beispielhaft ist ein solch aufbereiteter Vegetationsdatensatz für die Rosssteinregion in Abbildung 65 dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist die exakte Übereinstimmung der Vegetationsbedeckung (oberhalb von einem Meter Höhe) aus den Vegetationsdaten mit der realen Vegetationssituation, dargestellt mithilfe des Luftbildes aus dem Jahr 2014. So können Hangbereiche mit dichter und hoher Vegetationsbedeckung, wie beispielsweise Waldstücke, klar von solchen mit geringer oder flacher Vegetation beziehungsweise freiliegendem Fels oder Boden unterschieden werden.

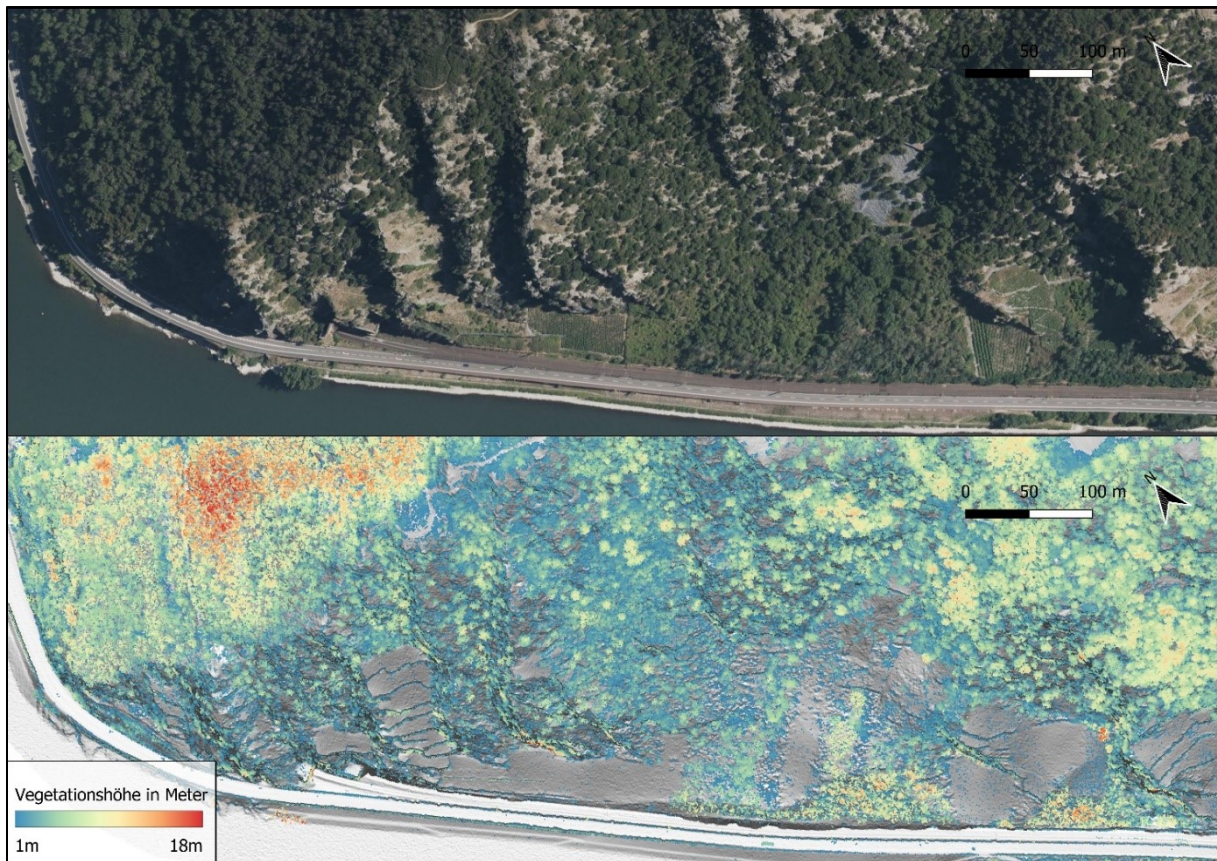


Abb. 65: Vegetationsverteilung extrahiert aus LiDAR-Daten am Rossstein (unten) im Vergleich mit der realen Situation aus Luftbilddaten (oben) (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Diese Informationen sind entscheidend, da Vegetation in der Transitzone von Sturzprozessen eine entscheidende Rolle spielt. Wie in Kapitel 2.2.2 und 2.2.5 beschrieben, können stürzende Blöcke in ihrem Bewegungstrajektor an Baumstämmen abprallen oder von Buschwerk gebremst werden, sodass theoretisch errechnete maximale Reichweiten und Geschwindigkeiten in der Realität unter Einfluss von Vegetationsbedeckung kaum erreicht werden (vgl. Abb. 66, KRUMMENACHER et al. 2005, LINGUA et al. 2020, MOOS et al. 2020).

Dabei sind der Abstand und die Dicke der Baumstämme sowie die Art der Vegetation für die bremsende Wirkung der Sturzprozesse entscheidend (DORREN et al. 2005). Die Vegetationsbedeckung und Schutzwälder spielen in der Steinschlag- und Felssturzprävention im alpinen Raum bereits eine dominante Rolle und müssen für

eine adäquate Modellierung modelltechnisch implementiert werden (MOOS et al. 2020).

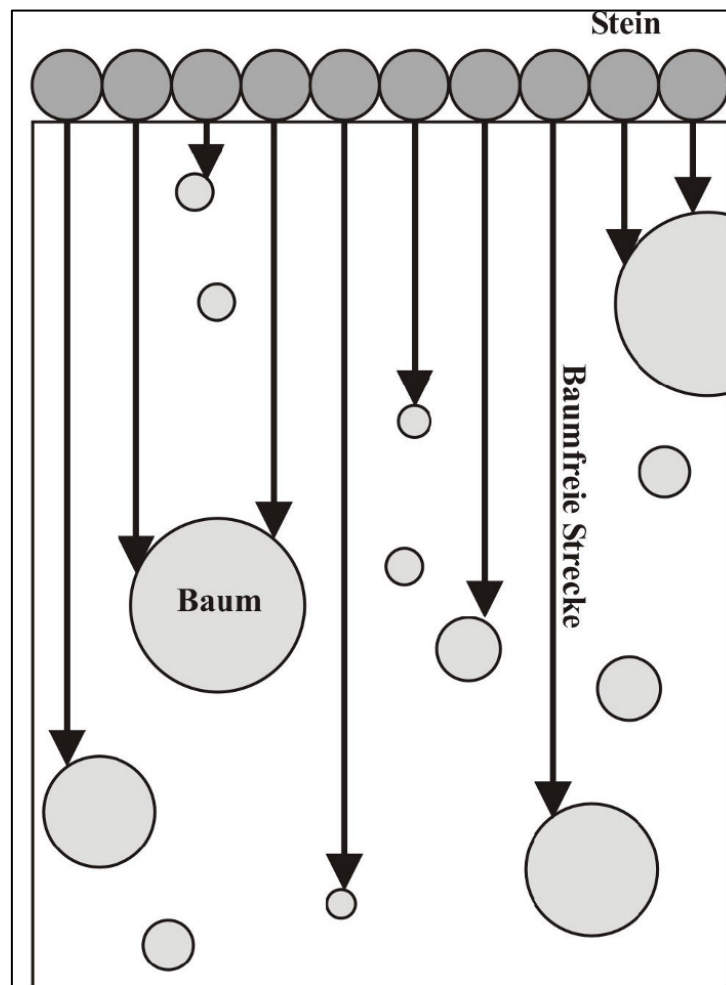


Abb. 66: Schematische Darstellung von Sturztrajektorien in bewaldeten Gebieten (KRUMMENACHER et al. 2005)

Auch an den Hängen im Mittelrhein- und Moseltal sind an vielen Stellen Zeugnisse solcher Vegetationsbeeinflussungen von stürzenden Blöcken an Baumstämmen zu finden (vgl. Abb. 67). Viele diese Kluftkörper hätten ohne die rückhaltende Wirkung des Bewuchses sonst mutmaßlich das Potenzial bis in infrastrukturell genutzte Tallagen vorzudringen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, für eine flächendeckende Modellierung und Gefährdungseinschätzung im Mittelrhein- und Moseltal auch diesen Aspekt zu berücksichtigen und möglichst realitätsgetreu im Modell zu implementieren.



Abb. 67: Beispiel der Schutzwirkung von Vegetation an einem bewaldeten Hang bei Bacharach, Oberes Mittelrheintal (Foto: T. Hagge-Kubat.2021)

Im GPP-Modell konnten dafür den LiDAR-Vegetationshöhen und -dichten entsprechende abgeschätzte Rauigkeitsparameter (friction μ) aus der Literatur und bisher verwendeten Studien zugewiesen werden (HAGGE-KUBAT et al. 2021, MASUYA et al. 2009, WICHMANN et al. 2017). So wurden für die in die Fläche gerechnete Modellierung dichter Vegetation mit höherem Bewuchs höhere Rauigkeit zugewiesen als entsprechend lichterem Bereichen. Tabelle 4 stellt die verwendeten Rauigkeitsbeiwerte für die verschiedenen Vegetationshöhen schematisch dar.

Tab. 4: Verwendete Rauigkeitsbeiwerte für die flächendeckende Modellierung von Sturzprozessen für verschiedene Vegetationshöhen

<i>Vegetationshöhe (m)</i>	<i>Friction Mu</i>
0.1 - 0.5	0.3
0.5 - 1.0	0.5
1.0 - 1.5	0.6
1.5 - 2.0	0.7
2.0 - 4.0	0.9
4.0 - 10.0	1.1
10.0 - 30.0	1.3
30.0 - 50.0	1.5
>50	1.6

In der modellertechnischen Praxis wirkt sich dies markant auf die Sturzgeschwindigkeit und die finale Transitdistanz der einzelnen Modellierungsiterationen aus. Demzufolge wird zum Beispiel eine bewaldete Hangpassage zum Teil von einem modellierten Block nicht mehr oder nur deutlich verlangsamt passiert (vgl. Anhang H).

Dieser Ansatz ist für die Modellierung von großen Gebieten konzipiert, sodass durch die Eingangsdaten Vegetationsgebiete gesamtheitlich generalisiert werden und einzelne Baumtreffer oder seitliche Ablenkungseffekte nicht erfasst werden können. Dennoch ist es so möglich im Sinne eines heuristischen Ansatzes den Vegetationseinfluss auf Sturzprozesse bei vorhandener Datenverfügbarkeit auch für große Gebiete anzunähern. Für detailliertere Modellierungen von Einzelereignissen

können darüber hinaus auch die abgeleiteten Einzelstämme als tatsächliche physikalische Barrieren in das Modell integriert werden (ENZMANN et al. 2022).

5.2.3 Modellierungsparameter im GPP

Damit im GPP-Modell Steinschläge und Felsstürze modelliert werden können, ist zunächst die passende Runout-Einstellung auszuwählen. Dabei bietet sich das auf den Bewegungstyp Steinschlag spezialisierte *1-parameter-friction* Sub-Model in Kombination mit dem Random-Walk Ansatz nach GAMMA (2000) an (WICHMANN 2017, siehe Kap. 4.4.4). Das hochaufgelöste modDGM1 sowie die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen abgeleiteten Daten für die Startzellen und den Reibungsbeiwert (*friction Mu*) bilden darauf aufbauend für eine flächendeckende Modellierung die maßgeblichen Eingangsdaten. Infolge von diversen Vorversuchen bezüglich der Anzahl an Modellierungsiterationen wurde in dem hier vorgestellten Ansatz für eine Anzahl von 800 Einzeliterationen pro Startzelle gewählt. Dies ist vor allem in der dafür notwendigen Rechenkapazität und -dauer begründet. Für die auf großem Maßstab zum Teil mehrern 100.000 Startzellen innerhalb der modellierten Flusstäler wären, bei noch höheren Anzahl an Iterationsdurchläufen andernfalls erheblich längere Rechenzeiten zu veranschlagen gewesen. Durch die Vorstudien hat sich darüber hinaus auch erwiesen, dass bereits bei einer Anzahl von 800 Iterationen die allermeist möglichen Trajektorienverlaufsmöglichkeiten abgebildet und eine statistisch signifikante Durchlaufanzahl, die den wahrscheinlichsten modellierten Weg darstellt, erreicht wird (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Die drei Kalibrierungsparameter (*threshold parameter*, *exponent for divergent flow & persistence factor*, vgl. Kap. 4.4.3) für den Random-Walk-Algorithmus sind für den hier vorgestellten Ansatz entsprechend der von WICHMANN (2017) vorgeschlagenen und in mehreren Studien verwendeten Werte für Sturzprozesse angepasst (MARINELLI et al. 2022, WICHMANN & BECHT 2006). So wurden für die standardisierte Modellierung

in großer Fläche, entsprechend Erfahrungswerten stattgefunderer Ereignisse, eine sehr geringe Persistenz und einem hohen Grad an Divergenz für die Sturzprozesse angenommen. Die verwendeten Werte für die Kalibrierungsparameter, als auch aller weiteren GPP-Parameter sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 5: Verwendete Modellierungsparameter für in die Fläche gerechnete Sturzprozesse im 1-parameter firction-Model

<i>Modellierungsparameter</i>	<i>Verwendete Einstellung</i>
<i>Topographie</i>	ModDGM1 (Raster)
<i>Startzellen</i>	klass. SIDX (Raster)
<i>Friction Mu</i>	klass. Vegetationshöhe (Raster)
<i>Iterationen</i>	800
<i>Processing Order</i>	Parallel mit den Iterationen
<i>Bewegungsart</i>	rollend
<i>Threshold parameter</i>	40°
<i>Exponent for divergent flow</i>	2.0
<i>Persistence factor</i>	1.5
<i>Schwellenwert für freien Fall</i>	60°
<i>Energieverlust bei Erstaufschlag</i>	75%
<i>Aufschlagsmethode</i>	Energy reduction (Schneidegger 1975)
<i>Ablagerungsmodell</i>	Velocity on Stop (Wichmann 2017)
<i>Ablagerung am Endpunkt</i>	50%
<i>Schwellenwert Geschwindigkeit Ablagerungbeginn</i>	12 m/s
<i>Minimale Trajektorienlänge</i>	15m
<i>Maximale Ablagerung bei 0 Geschwindigkeit oder Steigung</i>	50%

Als hangabwärts gerichtete Bewegungsform der Blöcke wurde in dieser Studie, neben dem ab 60° modelliertem freien Fall, die rollende Bewegungsform im Vergleich zu der weniger differenzierten und langsameren rutschenden Bewegungsform bevorzugt. Der Erstaufschlag auf den Talus ist mit 75% Energieverlust und einer weiteren Bewegung entsprechend dem Energy-reduction Ansatz nach SCHNEIDEGGER (1975) veranschlagt.

Als Ablagerungsmodell beziehungsweise Endpunktbestimmung wurde in dieser Studie der Velocity & on Stop Ansatz nach Wichmann (2017) verwendet. Dafür wurden entsprechend der Werte in der Tabelle 5 eine relativ geringe minimale Trajektorienlänge und geringer Geschwindigkeitsschwellenwert angenommen um den im Vergleich zum alpinen Raum deutlich geringeren Hanglängen und Steigungen Rechnung zu tragen und somit auf das Projektgebiet in der deutschen Mittelgebirgsregion anzupassen.

Die beschriebenen verwendenden Parameter sind bereits in einer publizierten Vorabveröffentlichung zu dieser Promotionsarbeit in diesem Gebiet sowie in ähnlicher Form in weiteren Studien zu regionaler Gefahrenhinweiskartenerstellung weltweit erfolgreich verwendet worden, sodass dies auch die in dieser Studie eine vielversprechende Parameterkombination für die Modellierung am Mittelrhein- und Moseltals darstellt (HAGGE-KUBAT et al. 2021, HECKMANN et al. 2016, MARINELLI et al. 2022).

5.2.4 Skalierung und Darstellung

Der Vorteil des vorgestellten Modellierungskonzeptes besteht unter anderem in der Skalierbarkeit der Dateneingabe und der Rechengeschwindigkeit. So ist es möglich auch größere Gebiete in dem beschriebenen teilautomatisierten Workflow innerhalb eines vertretbaren Zeitrahmens zu rechnen. Auf dieser Basis konnte in dieser Studie das gesamte Mittelrhein und Moseltal nacheinander abschnittsweise modelliert und

für die gesamte Projektgebietsfläche Steinschlagpotenzialkarten errechnet werden (vgl. Kap. 6.1.4).

Entsprechend des vorgestellten Prozesslaufs wurde anhand von Fallstudien zur Einzelereignissen oder bekannten lokalen Steinschlaggebieten die generelle Wirksamkeit und Aussagekraft dieses Ansatzes in kleinem Maßstab getestet (vgl. Kapitel 6.1.1), bevor nach erfolgter Validierung und kleineren Modellierungsanpassungen entlang der Flussläufe auf die große TK25 blattweise Modellierung gewechselt wurde. Für die Skalierung von Einzelstudien zu mehreren Quadratkilometer großen Gebieten sind neben der größeren Vorprozessierungsarbeit vorteilhafterweise keine weiteren modelltechnischen Anpassungen im GPP notwendig, sodass der Modellierungsablauf auf beschriebenen Wege entsprechend auch auf großer Ebene teilautomatisiert ablaufen kann. Eine softwareseitige Limitierung der Inputgröße liegt dabei nicht vor, sodass selbst das gesamte Untersuchungsgebiet am Mittelrein und Moseltal theoretisch auf einmal gerechnet werden könnte. Auch eine noch genauere und damit deutlich rechenintensivere Dateneingabe über das DGM02 (20 Zentimeter Rasterauflösung, ca. Verfünfachung der Größe) wäre dabei möglich. Dieses Vorgehen hätte jedoch eine markante Verlängerung der Rechendauer sowie eine massive Vergrößerung der Datenoutputs und entsprechend der Speichernutzung zu Folge, sodass dies in dieser Studie nicht angewandt wurde. Zusätzlich bietet der Ansatz über eine TK blattweise Modellierung den Vorteil, dass bei einer fehlerhaften Modellierung oder nachträglich nötigen Anpassung nicht der gesamte Datensatz erneut berechnet werden muss, sondern nur der korrumpierte Abschnitt. Somit ist es möglich, die Ergebnisse der abgeschlossenen Berechnungen schon während der Modellierung zu sichten und möglicherweise erneut zu starten.

Darüber hinaus ist entsprechend der Zielvorgaben Staatlich Geologischen Dienste (2009, vgl. Kap. 2.5) eine Darstellung von Gefahrenhinweiskarten im Maßstab 1:25000 erwünscht, sodass diese mit dem Ansatz der TK-25 blattweisen Modellierung nicht

nachträglich noch aus einem größeren Datensatz aufwendig zerteilt werden müssen. Der vorgestellte Ansatz ist skalierungstechnisch in der Lage bei entsprechend zu Verfügung stehender Hardware (siehe Kap. 4.1.1) das Gesamtgebiet am Mittelrhein und Moseltal abschnittsweise automatisiert innerhalb von etwa zwei bis drei Wochen vollständig durchzurechnen.

Für die finale Darstellung der Ergebnisse können die Rasteroutputs der Modellierungen GIS-technisch angepasst werden. Dafür wird das rasterbasierte Steinschlagtrajektorienmodell aus dem GPP zunächst in der Symbolisierung in Abschnitte unterteilt, sodass die Wertespektren, die die Anzahl an Trajektorien durchläufen pro Rasterzelle angeben, generalisiert und in entsprechende Klassen aufgeteilt werden. Für diese Arbeit wurden, unter der Maßgabe der Parametereinstellung von 800 Iterationen, für 7 abgestufte Klassen gewählt, die die Klassengrenzen: 1 (1 -250), 2 (251 – 500), 3 (501 – 1000) und 4 (1001- 2000) 5 (2001-5000) 6 (5001-10000) und 7 (>10000) besitzen. Für eine bessere Darstellung wurden die ersten beiden Klassen zusätzlich mit einer leichten Transparenz versehen, um die höheren Klassen deutlicher herauszuheben. Zusätzlich wurden die Klassengrenzen in der Symbolisierung in QGIS diskret und nicht linear dargestellt, um farblich sanftere Übergänge zu erzeugen. Die farbliche Darstellung dieser Klassen ist an die vorgeschlagene Visualisierung der Staatlich Geologischen Dienste (2009) angelehnt und stellt ein Farbspektrum von hellblau über grün und beige nach rot und dunkelrot dar. Tabelle 6 zeigt dieses Farbspektrum bezogen auf die Klasseneinteilung der Steinschlagtrajektorien mit einem äquivalent angegebenen Steinschlagpotenzialhinweis.

Tab. 6: Farbliche Darstellung der Steinschlagtrajektorien

<i>Frequenzklasse</i>	<i>Trajektorienanzahl</i>	<i>Farbe</i>	<i>Hinweis</i>
1	1-250	hellblau	kaum
2	251-500	blau	sehr gering
3	501-1000	grün	gering
4	1001-2000	beige	mäßig
5	2001- 5000	orange	moderat
6	5001-10000	rot	hoch
7	>10000	dunkelrot	sehr hoch

Diese Einteilung ist nicht mit einer tatsächlichen Gefahrenkarte zu verwechseln und stellt nur den statistischen Vergleich der modellierten Trajektorienfrequenz von Steinschlagereignissen innerhalb von Steinschlaggroßgebieten dar. Dadurch kann keine exakte Aussage über die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Auftretens von Steinschlagen oder Felsstürzen abgeleitet werden. Dadurch, dass es in den Gebieten einer hoher Klasse (dunklerer Einfärbung) jedoch eine größere Anzahl an potenziellen Auslösezellen und entsprechend an modellierten Sturzbahnen gibt, stellt die Einfärbung jedoch einen Hinweis über das allgemeine Steinschlagpotenzial in diesen Gebieten dar. Generell zeigt eine höhere Klasse beziehungsweise eine dunklere Farbe den wahrscheinlicheren Weg (Sturzbahnen) von Kluftkörpern aus den Auslösezellen an. Die Möglichkeiten und Grenzen der Aussagekraft der Darstellung werden darüber hinaus in Kapitel 7.2. und 7.3 diskutiert.

Somit liegt nach der erfolgreichen Modellierung von Sturzprozessen mit diesem Ansatz ein Kartenwerk vor, das hochaufgelöst das Steinschlagpotenzial über die

Trajektorienfrequenz als Rasterdarstellung mit 1x1m Auflösung darstellt. Dieses sollte wie zuvor beschrieben nur innerhalb einer GIS-Umgebung verwendet werden und ist aufgrund der Parzellenschärfe auch speziell für den Amtsgebrauch entwickelt worden. Die so erstellten Kartenwerke sind in Kapitel 6.1.4 anhand von Beispielen und für das Untersuchungsgebiet dargestellt.

5.3 Prozessablauf Murgang

Entsprechend der Modellierung von Sturzprozessen wird in dieser Arbeit auch für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten gegenüber Fließprozessen mittels eines mehrstufigen Modellierungsprozesspfades gearbeitet. Dies bietet den Vorteil einer scriptbasierten Automatisierung, sodass einzelne Prozesse separat sowie die gesamte Prozesskette auch für große Gebiete automatisch gerechnet werden können. In Abbildung 68 ist der gesamte Modellierungsvorgang als schematisches Flussdiagramm dargestellt.

Modellierungsmatrix starkregeninduzierte Murgänge

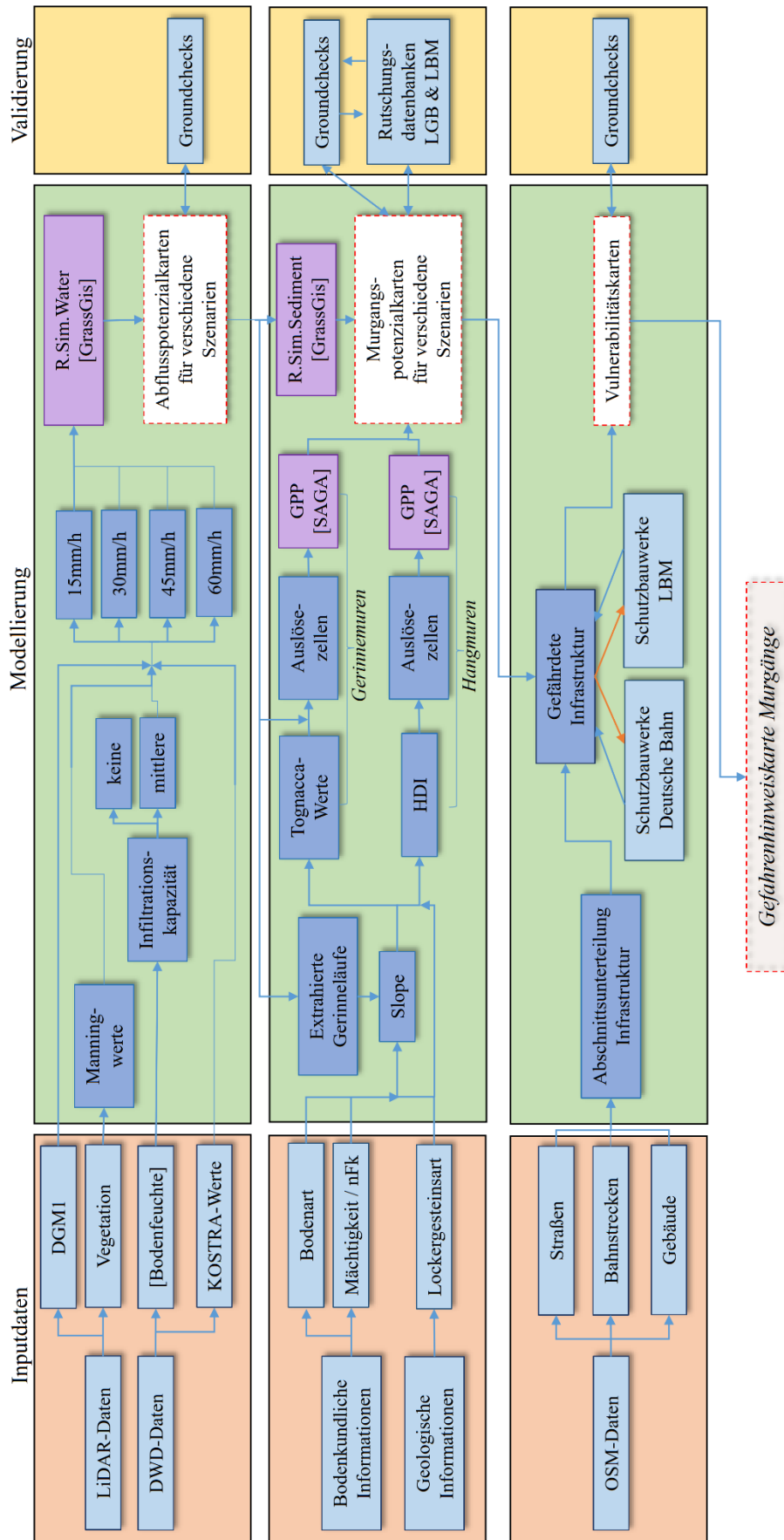


Abb. 68: Flowchart des verwendeten Modellierungsablaufs für den Prozess Murgang

Auch in dieser Prozesskette werden zunächst die notwendigen Dateninputs für die eigentliche Murgangsmodellierung im GPP in einem Präprozessierungsschritt aufbereitet. Einen entscheidenden Zwischenschritt vor der eigentlichen Murgangsmodellierung stellt die Ermittlung von potenziellen Auslösebereichen auf Basis einer geologisch/geomorphologischen Geländeanalyse sowie eine Starkregenabflussmodellierung dar. In diesem für den Open-Source Gebrauch entwickelten Ansatz wird dabei mithilfe des in Kapitel 4.6 beschriebenen GRASS-GIS-Moduls *r.sim.Water* (MITASOVA et al. 2004) für verschiedene Niederschlagsszenarien, angelehnt an die KOSTRA-Werte, modelliert (vgl. Kap. 4.2). In den folgenden Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 werden die dafür nötigen Modellierungsschritte sowie der gesamte Prozess der Gerinne bezogenen Ableitung von Auslösezellen nach dem Ansatz von TOGNACCA (1999) näher bestimmt.

Sind die Oberflächenabflussmodellierungen flächendeckend für einen Modellierungslauf durchgerechnet und die Auslösebereiche für verschiedene Niederschlagswerte definiert, können diese entsprechend der Steinschlagmodellierung per Rasterkarten in das GPP implementiert und die eigentliche Murgangsmodellierung gestartet werden. Mithilfe des im GPP für Fließprozessmodellierungen optimierte PCM-Modell nach PERLA (1980; Modellierungsparameter näher beschrieben in Kapitel 5.3.3) können auch in diesem Fall die Prozessläufe und Ablagerungsbedingungen im GPP angepasst und für die hier relevante Mittelgebirgsregion optimiert werden.

Die Outputs der Modellierung sind ähnlich der Steinschlagmodellierung (Process Area, max Velocity & Stopping Positions) mit dem Unterschied, dass bei der Murgangsmodellierung auch die Höhe der Murgangsablagerung als Raster ausgegeben wird. Die Ausbreitungsmodellierung stellt auch hier nach einer Aufbereitung im GIS die Grundlage für die Murgangspotenzialkarte dar. Im Gegensatz zur Steinschlagpotenzialkarte kann dabei jedoch durch die verschiedenen Starkregenabflussmodellierungen auch eine Einschätzung einer Gefahrenstufe

gegeben werden. So können Muren, die erst ab einem hohen Grenzniederschlag ausgelöst werden, anders klassifiziert werden als solche, die bereits nach einem geringeren Niederschlagsinput modelltechnisch ausgelöst werden. Die Beschreibung der Klassifizierung entsprechend der unterschiedlichen Grenzniederschläge findet sich in Kapitel 5.3.4 sowie in Kapitel 6.2.3.

Nach einer Ergebnisvalidierung (siehe Kap. 6.2.2) können auch mit den Ergebnissen der Murgangsmodellierung über den VulWay-Ansatz Vulnerabilitätskarten entsprechend der Steinschlagmodellierung erstellt werden. Auch für den Murgangsprozess wurden die so erstellten Datensätze abschließend per visueller Sichtprüfung kontrolliert und etwaige Modellierungs- oder Darstellungsfehler manuell behoben.

5.3.1 Abflussmodellierung

Der wichtigste Auslöser von Murgängen am Mittelrhein- und Moseltal ist zumeist der massiv ausgeprägte Oberflächenabfluss nach konvektiven Starkregenereignissen, der infolge von progressiver Sohlerosion in den steilen Gerinnebetten der Einzugsgebiete diese Prozesse initiieren kann (vgl. Kap. 2.4.2). Damit diese von kritischem Abfluss betroffenen Stellen in den Gerinnebetten lokalisiert werden können, ist ein entscheidender Schritt im Prozesslauf die Modellierung des Oberflächenabflusses in Folge von Starkregenereignissen. Diese ausgewiesenen Bereiche werden später im eigentlichen Murgangsausbreitungsmodell als Startzellen definiert und die Ausbreitungsmodellierung aus ihnen berechnet.

Um die in Kapitel 2.3 beschriebene Abflussbildung von Starkregenereignissen auf Basis des modDGMs berechnen zu können, wurde in dieser Studie das open Source Software-Modul *r.sim.water* unter GrassGis verwendet (MITASOVA et al. 2004). Dieses Modul ist vielfach in verschiedenen Studien zum Einsatz gekommen und wurde bereits für Starkregenmodellierungen im Mittelrheintal und an anderen Gebieten in

Rheinland-Pfalz mit Erfolg angewendet (HAGGE-KUBAT et al. 2020, HAGGE-KUBAT et al. 2022, ENZMANN et al. 2022, MAURI et al. 2022, HOFIERKA & KNUTOVA 2015). Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, bietet dieses Modul ein stabiles Modellierungsgerüst, um auch größere Gebiete realitätsnah und innerhalb eines vertretbaren Zeitrahmens mit der zur Verfügung stehenden Hardware und Datenkomposition zu modellieren.

Bei den Starkregenmodellierungen wurde der Prozessraum anders als bei der Steinschlagmodellierung, anhand der direkt in die Vorfluter Rhein und Mosel mündenden Wassereinzugsgebiete definiert. Dieser mehrere tausend Einzugsgebiete umfassende Datensatz wurde mittels hydrologischer Geländemodellierung auf Basis des modDGMS mit dem Einzugsgebiets-Modul unter SAGA-GIS berechnet (Tool: Watershed-Basin, SAGA 2023). Im Vorhinein wurde der Sink-Fill Algorithmus nach WANG & LIU (2006) auf dem DGM durchgeführt, um keine Fehler in der Ausweisung der Einzugsgebiete durch fehlerhafte künstliche Senken zu erzeugen. Die Flusstäler des Rheins und der Mosel wurden daraufhin aus Rechenkapazitätsgründen in fünf Großgebiete unterteilt, die nacheinander mit dem r.sim.water Modul modelliert wurden. Diese Großgebiete sind das Obere Mittelrheintal (OMi), das Untere Mittelrheintal (UMi), das Obere Moseltal (OMo), das Mittlere Moseltal (MMo) und das Untere Moseltal (UMo). Jedes dieser Großgebiete schneidet dabei jeweils mehrere reguläre TK25-Kartenblätter. Eine schematische Übersicht über den Vorgang der Segmentierung von lokalen Einzugsgebieten und modellierten Großgebieten ist in Abb. 69 dargestellt.

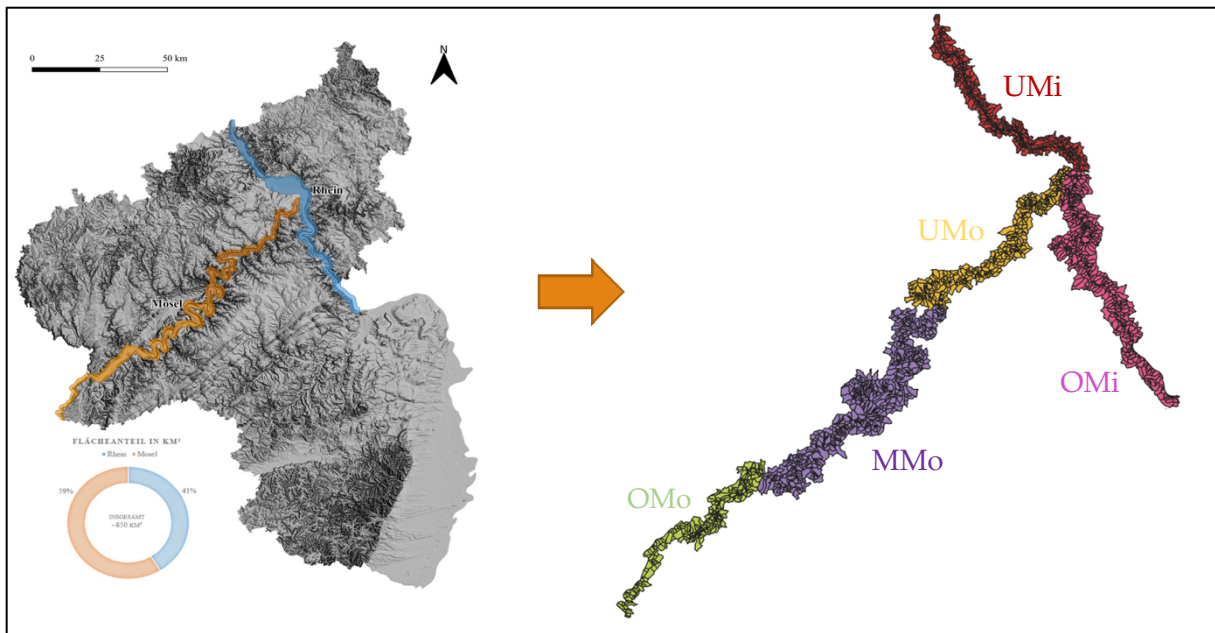


Abb. 69: Schematische Darstellung der Segmentierung der Einzugsgebiete sowie der Unterteilung in die fünf Großgebiete

Anschließend können die entsprechenden modDGMs der einzelnen TK-Blätter zusammengefügt und die räumlich umhüllende Fläche des Einzugsgebietsdatensatzes aus diesen herausgeschnitten werden. Auf dieser Basis wird ein zusammenhängendes DGM der jeweiligen Großgebiete als Modellierungsgrundlage erstellt. Eine schematische Darstellung dieses Vorgangs ist in Abb. 70 zu erkennen. Dieser Vorgang ist, wie der gesamte Modellierungsprozess für Murgänge inklusive der Oberflächenabflussmodellierung unter r.sim.water, im Laufe der Bearbeitung dieser Arbeit entsprechend des Steinschlagsprozesses scriptbasiert als Python-Code automatisiert worden.

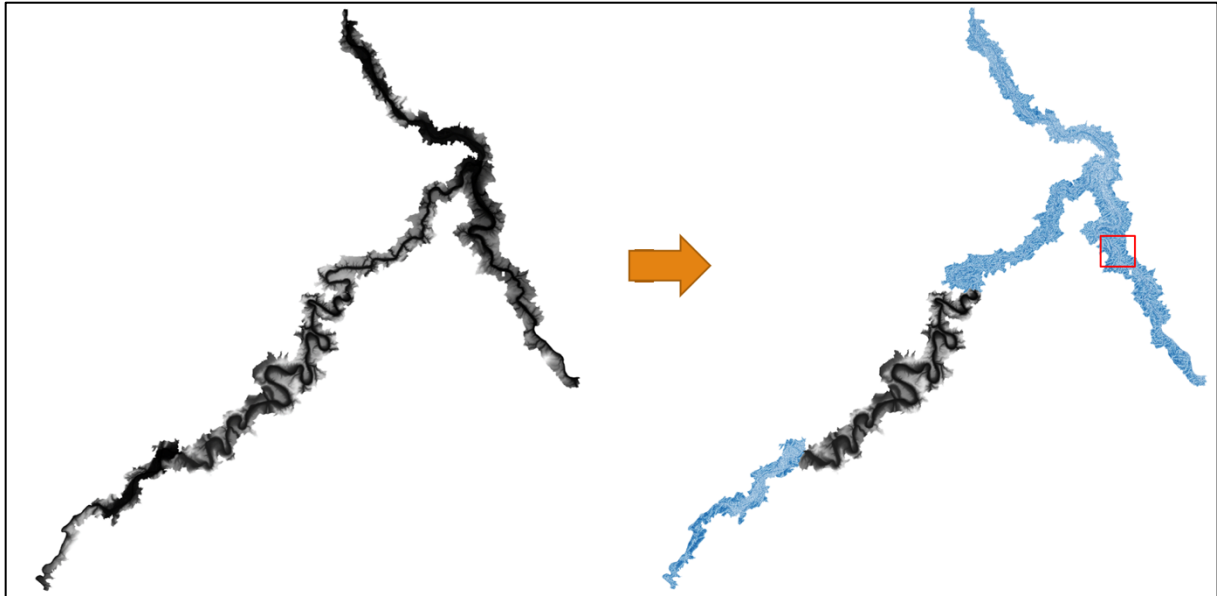


Abb. 70: Graphische Darstellung der Umwandlung der Einzugsgebiete in ein abgeleitetes DGM hin zu einer flächenhaften Abflussmodellierungen (quantile Darstellung aufgrund besserer Sichtbarkeit). Das rote Viereck markiert den Ausschnitt, der in Abbildung 73 dargestellt wird

Als entscheidende Inputs sind in der anschließend auszuführenden Abflussmodellierung neben dem betreffenden modDGM Ausschnitt, ein flächendeckender oder als Raster definierter Eingangsniederschlag (Niederschlagsüberschuss) zu bestimmen. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben wurde dieser Eingangsniederschlag entsprechend einer Annäherung an die KOSTRA-Werte für 60 Minuten ausgewählt. So kann jedes modellierte Teilstück der Flusstäler mit jeweils vier einzelnen Abflussmodellierungen entsprechend der Niederschlagswerte 15, 30, 45 & 60 l/m² berechnet werden. Zusätzlich dazu können beliebig viele Ausgabezeiträume für Rasterkarten definiert werden, sodass einzelne Modellierungszwischenstände das zum jeweiligen Zeitschritt modellierte Abflussgeschehen darstellen. In dieser Studie wurden die Ausgabezeiträume nach 15, nach 30 und nach 60 modellierten Minuten verwendet.

Im Oberflächenabflussmodell r.sim.water ist, wie in Kapitel 4.6 beschrieben, die Oberflächenrauigkeit zur Ermittlung des Fließwiderstands über die empirische Fließformel nach Manning-Strickler berücksichtigt. Sie enthält den Manning-Koeffizienten n , der ein Maß für die Oberflächenrauigkeit darstellt und der neben dem

Gefälle maßgeblich die Fließgeschwindigkeit bestimmt. Damit hat dieser Wert entscheidenden Anteil, ob modelltechnisch das Potenzial besteht, dass Muren in betreffenden Gerinnen ausgelöst werden können (vgl. Kapitel 5.3.2). Zur flächendeckenden Annäherung des Manning-Koeffizienten an die realen Landnutzungsverhältnisse wurden im MABEIS-Projekt in einer Vorabstudie verschiedene Parameterkonzepte für die strukturelle Ermittlung dieser Werte über Fernerkundungsdaten durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Konzepte getestet: So beispielsweise die Abschätzung der Manning-Werte über die frei verfügbaren Landnutzung-ATKIS-Daten des LVerMGeo, die strukturelle Ableitung über Orthophotos sowie über die LiDAR-Vegetationshöhen und -dichten. Am gebräuchlichsten für eine große Fläche konnte im Sinne dieser Arbeit dabei der Ansatz über die LiDAR-Vegetationsinformationen ermittelt werden. Den hochaufgelösten Vegetationsinformationen können dabei entsprechend der Literatur abgeschätzte Manning-Koeffizienten zugewiesen werden (MTAMBA et al. 2015, HOFIERKA & KNUTOVA 2015, PHILLIPS & TADAYON 2006 und MANIAK 2010). Auch mittels der anderen erwähnten Alternativen ist eine solche Zuweisung möglich (vgl. HAGGEKUBAT et al. 2020), ist aber für mehrere hundert Quadratkilometer große Gebiete aufgrund der dafür nötigen hohen Digitalisierungsvorarbeit beziehungsweise der zu ungenauen Flächenabgrenzungen über die ATKIS-Daten im Sinne eines flächendeckenden Ansatzes nach jetzigem Stand nicht sinnvoll einsetzbar.

So wurden für die in die Fläche gerechneten Modellierungen in dieser Studie vereinfachte Annahmen getroffen und dichtere Vegetation mit höherem Bewuchs höhere Manning-Werte zugewiesen und lichten und flachen Bereichen, die zumeist als landwirtschaftlich genutzte Felder klassifiziert werden können, entsprechend geringere. Die geringsten Werte, die über diesen Ansatz zugeordnet werden können, sind Straßenverläufe, bei denen auch in der Realität kaum Fließwiderstand im Abflussfall vorherrscht. Die Tabelle 7 stellt die verwendeten Manning-Koeffizienten entsprechend der aus den LiDAR-Rohdaten abgeleiteten Vegetationshöhen dar.

Tab. 7: Verwendete Raugkeitsbeiwerte für verschiedene Vegetationshöhen für die flächendeckende Modellierung von Abflussprozessen

<i>Vegetationshöhe (m)</i>	<i>Manning-Koeffizient n</i>
0 - 0.5	0.25
0.5 - 1	0.35
1 - 5	0.45
5 - 10	0.55
10 - 30	0.65
>30	0.7

Darüber hinaus wurde in einem weiteren Test der Einfluss der aus den LiDAR-Vegetationsdaten abgeleiteten Einzelstämme als tatsächliche physikalische Fließbarrieren in einem kleineren Testgebiet am Mittelrheintal mit gut bekannter Abflusssituation getestet. Dieses Gebiet umfasst die Einzugsgebiete um den Tonschiefersteinbruch „Grube Rhein“ zwischen Bacharach und Oberwesel, bei dem es im Jahr 2016 zu einer Zugentgleisung in Folge zweier Murgänge, ausgelöst durch ein konvektives Starkregenereignis, gekommen war. Die Abflusssituation bei dem betreffenden Ereignis wurde bereits in einer Vorabveröffentlichung aus dem Jahr 2020 genauer beschrieben und ist in Kapitel 6.2.1 dargestellt (HAGGE-KUBAT et al. 2020). Durch die gute Kenntnis der Abflusssituation in diesen Einzugsgebieten bei einem solchen Ereignis, ist der Einfluss der implementierten Baumstämme in die Modellierung daher gut vergleichbar. Die Modellierung mit Baumstämmen zeigt dabei einen erkennbaren Einfluss auf das Abflussgeschehen, welcher vor allem auf das Umfließen des Wassers um die Stämme zurückzuführen ist. Darüber hinaus zeigen sich weitere Kanalisierungseffekte zwischen einzelnen Stämmen zeigt. Dabei ist teilweise eine lokale Unterbrechung von regulären Fließpfaden oder das Auftreten

von lokalen Abflusshotspots in den bewaldeten Gebieten zu erkennen. In den für die Murgangsauslösung relevanten Hanggerinnen, in denen grundsätzlich kaum Bäume im direkten Bachbett stehen, ist der Einfluss deutlich geringer. Bei den im Testgebiet durchgeführten Modellierungen waren die modellierten Abflusswerte bei denselben Parametereinstellungen mit und ohne Stämme im Mittel in einem sehr ähnlichen Wertebereich. Die Abbildungen 71 und 72 stellt diesen Vergleich für die Gerinne im Testgebiet an der Grube Rhein graphisch dar.

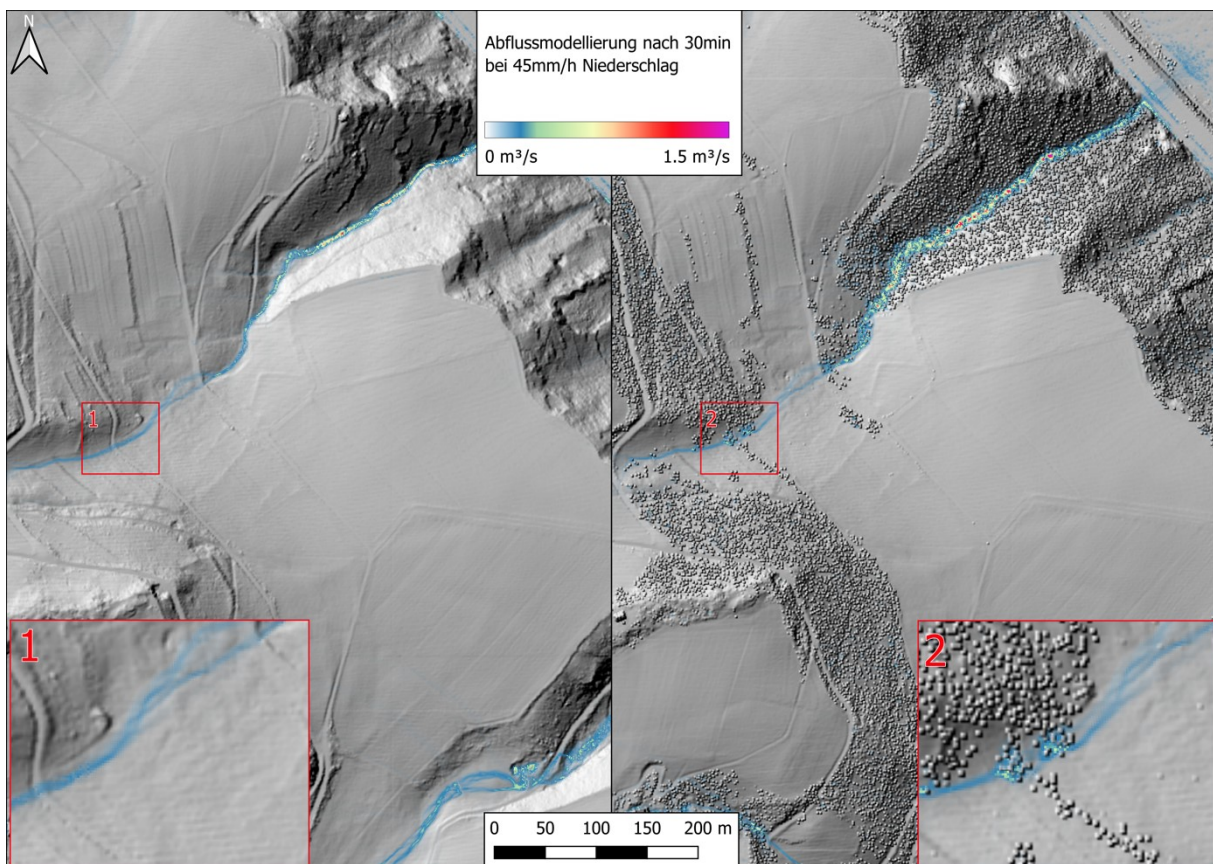


Abb. 71: Vergleich der Abflussmodellierung in r.sim.water ohne (links) und mit (rechts) Baumstämmen. Auf der Vergrößerung 2 ist im Vergleich ein deutlicher Strömungseinfluss an den Stämmen zu erkennen

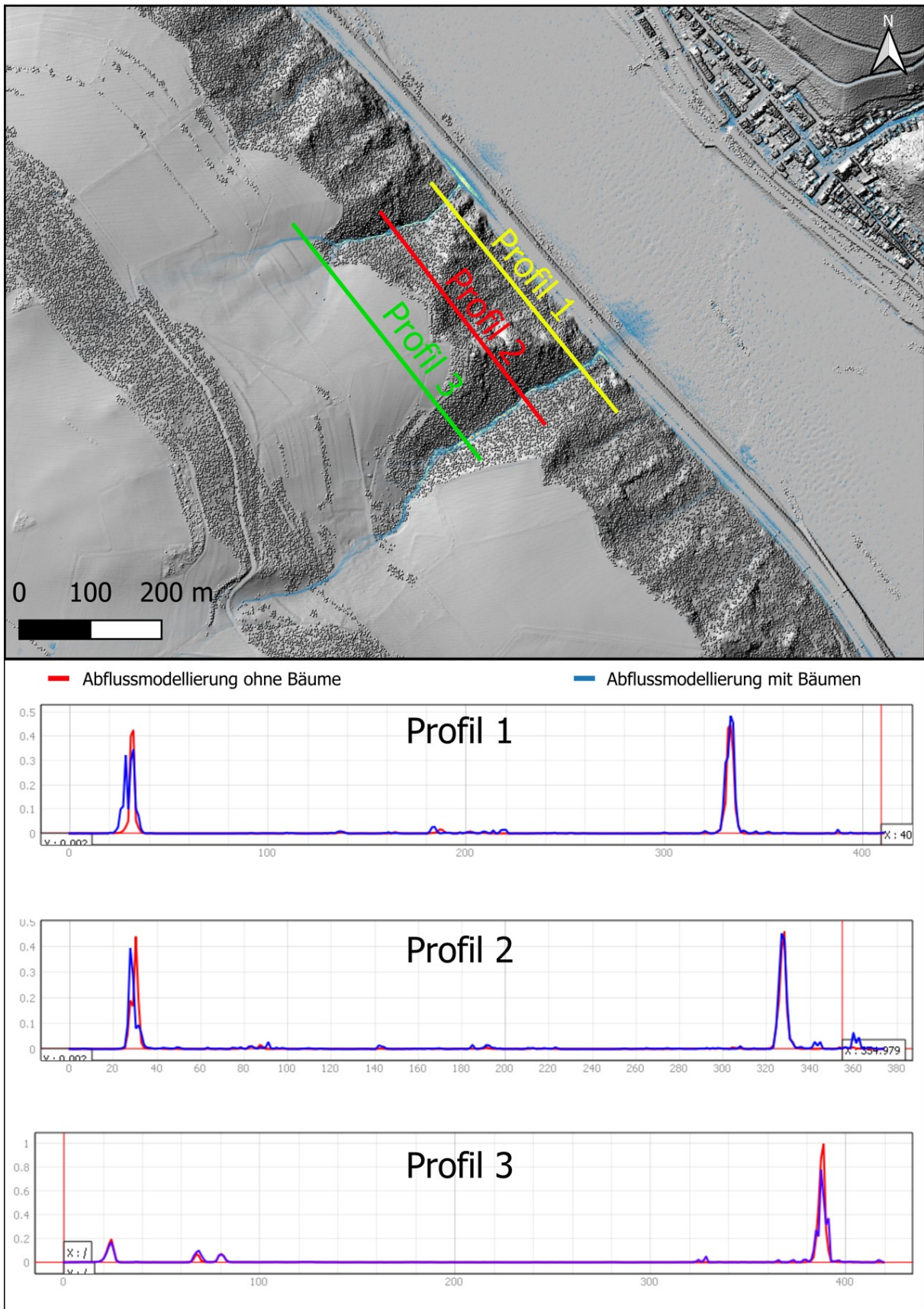


Abb. 72: Vergleich der errechneten Abflusswerte (m^3/s) zwischen der Abflussmodellierung mit und ohne implementierten Baumstämme

Da mit dem Ansatz dieser Arbeit die Modellierung von großen Gebieten angestrebt wurde und die Implementation der Stämme in das Modell nach bisheriger Kenntnis bei ähnlich modellierten Abflusswerten ein deutliches Mehr an zusätzlicher Rechenkapazität und Vorarbeit erfordert hätte, wurde sich für diese Dissertation dafür entschieden die Modellierungen ohne diese Vorarbeiten auszuführen. Inzwischen ist eine solche Implementation auch in einem vertretbaren Zeitrahmen für große Flächen rechenbar und stellt somit zukünftig eine möglicherweise sinnvolle Weiterentwicklung des vorgestellten Prozessansatzes dar (ENZMANN et al. 2022, siehe Kap. 7.2).

Grundsätzlich wird über den hier beschriebenen Ansatz der Vegetationseinfluss auf die Abflussbildung über die Manning-Werte bei der vorhandenen Daten- und Rechenverfügbarkeit auch für große Gebiete sinnvoll abgebildet. Entsprechend der Steinschlagmodellierung können für detailliertere Modellierungen von kleineren Einzelgerinnen in speziellen Fällen die abgeleiteten Einzelstämme als tatsächliche physikalische Barrieren auch schon mit Stand dieser Arbeit in das automatisierte Modell integriert werden.

Die weiteren Modellierungsparameter, die für Modellierung von Oberflächenabfluss im Modul `r.sim.water` angepasst werden können, wurden weitestgehend anhand von vergleichbaren Studien auch für die flächenhafte Modellierung übernommen (HAGGEKUBAT et al. 2020, MAURI et al. 2022, HOFIERKA & KNUTOVA 2015). Dabei ist zu beachten, dass dadurch eine bewusste Generalisierung eintritt, sodass einzelne speziell für lokale Einzugsgebiete und Niederschlagssituationen angepasste Modellierungen, zu deutlich genaueren Ergebnissen kommen können. Für eine flächenhafte Modellierung ist dies jedoch mit der zur Verfügung stehenden Rechen- und Datenkapazität nicht praktikabel darstellbar und wird daher im Sinne dieser Arbeit akzeptiert. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Modellierungsparameter der Starkregenmodellierung im `r.sim.water`-Modul.

Tab. 8: Verwendete Modellierungsparameter für in die Fläche gerechnete Fließprozesse im r.sim.Water Modul

<i>Modellierungsparameter</i>	<i>Verwendete Einstellung</i>
<i>Topographie</i>	ModDGM1 (Großgebiete)
<i>dx</i>	Erste Ableitung DGM (Großgebiete)
<i>dy</i>	Erste Ableitung DGM (Großgebiete)
<i>Zeitraum</i>	60min
<i>Niederschlagsüberschuss</i>	15, 30, 45, 60mm
<i>Manning-Koeffizient n</i>	Vegetationshöhen (Raster, Tab. 7)
<i>Abflussinfiltrationsrate</i>	2.0mm/h
<i>Walkeranzahl</i>	10.000.000
<i>Ausgabezeiträume</i>	15, 30, 60min
<i>Wasserdiffusionskoeffizient</i>	0.8
<i>Schwellenwert Wassertiefe</i>	0.4m
<i>Diffusionssteigerungsrate</i>	4.0
<i>Gewichtungsfaktor für den Geschwindigkeitsvektor des Wasserflusses</i>	0.5
<i>Verwendete CPU-Kerne für die parallele Prozessierung</i>	10

Nach der flächenhaften Durchführung der Starkregenmodellierung ergeben sich Rasterkarten, die, wie beispielhaft in Abb. 73 dargestellt, die modellierten Strömungsfäden, Abflussakkumulationen und Wassertiefen in den Gerinnen und Tiefenlinien darstellen. Jede Rasterzelle weist dementsprechend die Abflusswerte in m³/s für den aktuell ausgegebenen Zeitschritt aus. Dadurch lassen sich Phänomene wie die Füllung von abflusslosen Senken oder Aufstauereffekte hinter Barrieren erkennen. Das Ableiten von Wassermassen durch künstliche angelegte und überbaute Kanäle, der Kanalisation in Ortschaften oder Straßen und Bahndurchlässen ist bei der

Modellierung durch die topographischen Eigenschaften des DGMs nicht berücksichtigt. Für den Prozess der Murgangsauslösung in den steilen Kerbtälchen sind diese Effekte jedoch von nachgeordneter Bedeutung.



Abb. 73: Ausschnitt aus einer flächendeckenden Abflussmodellierung des Oberen Mittelrheintals bei Bad Salzig. Deutlich sichtbar sind die Strömungsfäden und Abflussakkumulationen, bei denen ein dunkleres Blau einen höheren Abflusswert darstellt

5.3.2 Ableitung der Murgangsauslösbereiche

Um aus den simulierten Abflusswerten eine Aussage darüber treffen zu können, inwieweit für einzelne Rasterzellen ein tatsächliches, berechenbares Potenzial für die Auslösung eines Murgangs besteht, wurde in dieser Arbeit ein speziell angepasster Ansatz erweitert nach einem Berechnungsvorgehen von TOGNACCA (1999) verwendet. Für die Beschreibung dieses Ansatzes wird im Folgenden zum besseren Verständnis zunächst ein Blick in die generelle Wirkungsweise von Murenvorhersagesystemen beschrieben:

Mit empirischen oder semi-empirischen Modellen haben eine Reihe von Forschern (u.a. KEEFER et al. 1987, KIRNBAUER 2002, GRAF et al. 2013) in der Vergangenheit bereits versucht, Korrelationen zwischen Niederschlagsintensität, dem entsprechenden Oberflächenabfluss einerseits sowie dem Auftreten von Murgängen andererseits aufzustellen. Ziel dieser Modelle war es vor allem, die Vorhersage von Murgängen für die Einrichtung von Warn- und Schutzsystemen zu verbessern. In einigen Ernstfällen kamen in alpinem Terrain solche Systeme schon mit Erfolg zum Einsatz (siehe z.B. STAFFLER et al. 2008). All diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie für den Einzelfall eine Murgangsgefährdung recht gut analysieren können, ihre Berechnungen jedoch nur kleinräumige lokale Gültigkeit besitzen. Das liegt daran, dass die kritischen Niederschläge und die topographischen Gegebenheiten, die für das Auftreten von Murgängen entscheidend gebietspezifische Größen sind, die nicht ohne weiteres auf andere Regionen übertragen werden können (TOGNACCA 1999). Solche regionalen Parameter müssen sogar für schon analysierte Bereiche mit der Zeit zum Teil neu definiert und an veränderte Bedingungen in den Auslösegebieten angepasst werden (TAKAHASHI 1991). Die Langzeitdisposition (beispielsweise die Sedimentverfügbarkeit) eines Auslösegebietes kann sich dabei sogar so stark ändern, dass sich auch die Schwellenwerte für das Auftreten von Murgängen mit der Zeit markant verändern (TOGNACCA 1999). Daher ist es sehr schwierig eine Murengefahr in einem noch nicht präzise geologisch und geomorphologisch analysierten Gebiet zu definieren beziehungsweise diese von einem Gebiet auf ein anderes hochzurechnen. Es bedarf für die Analyse der Kenntnis oder zumindest einer validierten Abschätzung von relevanten Parametern und Gegebenheiten, wie es in der vorliegenden Studie für das gesamte Mittelrhein- und Moseltal versucht wurde. Dadurch ist es möglich aus den analysierten räumlichen Gegebenheiten dem simulierten Abflussverhalten und angenommenen Gesteins- und Bodenparametern auch in die Fläche gerechnet Zellen zu definieren, die nach dem Ansatz von TOGNACCA (1999) rechnerisch für eine Murgangsauslösung in Frage kommen.

CHRISTIAN TOGNACCA fand im Rahmen seiner Dissertation an der ETH Zürich im Jahr 1999 bei Versuchen mit einem neigbaren Versuchskanal für idealisierte Muren unter anderem heraus, dass Murgänge (neben dem Brechen von Verkläunungserscheinungen) hauptsächlich infolge progressiver Erosion durch die Destabilisierung der Lockermaterialschicht durch einen starken Oberflächenabfluss entstehen (TOGNACCA 1999, siehe Kap. 2.4.2). Daher entwickelte er für die Festlegung eines Entstehungskriteriums für Murgänge den Ansatz von JÄGGI & WHITTAKER (1986) weiter, der für die Beschreibung der Stabilität von Deckschichten entwickelt wurde. Dieser Ansatz hat folgende allgemeine Formel:

$$q_{Dc} = q_{SW} - q_h = g^{0.5} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1^{0.5} \right) \cdot \frac{d_m^{1.5}}{\tan \Theta^{1.17}} \quad (23)$$

Dabei ist q_{Dc} der spezifische kritische Oberflächenabfluss (m^3/s), welcher für die Auslösung eines Murgangs minimal erforderlich ist. q_{SW} ist dieser spezifische Oberflächenabfluss, q_h die Infiltrationskapazität der obersten Lockermaterialschicht. g ist die Gravitationskonstante, ρ_s und ρ_w die Werte für die Dichte des Gesteins und des Wassers und $d_m^{1.5}$ ein charakteristischer Schuttdurchmesser, welcher im betreffenden Liefergebiet anzutreffen ist. $\tan \Theta$ stellt den Winkel des Gefälles in Grad dar (TOGNACCA 1999). Der nach dieser Formel zu berechnende Wert ist für jedes einzelne Gerinne beziehungsweise für jede einzelne Rasterzelle innerhalb eines Gerinnes zu berechnen.

Wenn also ein gegebener Oberflächenabfluss diesen berechneten Grenzwert q_{Dc} an der Lockergesteinsschicht überschreitet, dann ist es rechnerisch möglich, dass ein Murgang entstehen kann (TOGNACCA 1999). Wird der effektive kritische Oberflächenabfluss für die Murgangsentstehung hierbei unterschritten, wird aber gleichzeitig der kritische Abfluss für die Destabilisierung einer Deckschicht überschritten, dann kann nach TOGNACCA (1999) ein Geschiebetrieb auftreten. Ist

dagegen der Oberflächenabfluss zudem noch kleiner als der kritische Abfluss für die Destabilisierung des Deckwerkes, tritt keine Erosion, sondern ein Reinwasserabfluss auf. Die Gesamtbeschreibung der Formel sowie deren Entwicklung und Anwendung sind in TOGNACCA (1999) detailliert beschrieben. Diese Formel wurde mit Erfolg an verschiedenen, gut dokumentierten Murgängen validiert (STRICKLER 2010, TOGNACCA (1999). Entsprechend wird sie hier als Kontrollgröße für die Bestimmung der Murgangsauslösebereiche auf Rasterzellenebene genutzt (HAGGE-KUBAT et al. 2022).

Dieser Berechnungsansatz stellt also den Versuch dar, die simulierten Abflusswerte der verschiedenen Starkregenmodellierungen mit einer möglichen Murgangsauslösung, welche sich aus der Berechnung der Formel ergibt, zu verschneiden, um daraus für die jeweils betreffenden Gerinne ein Murganganfälligkeit bei einem gegebenen Starkregen abzuleiten. Grundsätzlich ist dies möglich, da beide Ansätze einen Abflusswert in der gleichen Maßeinheit m^3/s berechnen.

Es existieren noch weitere, in der Literatur beschriebene und in Studien erprobte Methoden sich statistisch oder modellertechnisch der Berechnung von Murgangsauslösezellen zu nähern (z.B. BERTI & SIMONI 2005, KANG et al. 2017, ZIMMERMANN et al. 1997, SCHEID 2011). Diese Methoden fußen zumeist auf Parametern wie der Einzugsgebietsgröße, dem TWI oder einfachen Gerinnesohlneigungsgrenzwerten. Diese Ansätze haben zumeist keinen direkten Bezug auf lokale modellierte oder gemessene Abflussphänomene und sind daher im Vergleich zu dem hier beschriebenen Ansatz deutlich ungenauer in der Aussage und können auch nur bedingt zu einer Niederschlagsgrenzwertanalyse oder Gefahrklassifizierung für große Gebiete herangezogen werden. Der hier vorgestellte Ansatz ist bereits in verschiedenen Studien und Abschlussarbeiten an Einzelgerinnen in Rheinland-Pfalz mit Erfolg verwendet worden und wird hier erstmals für eine flächendeckende Berechnung der Murgangsauslösebereiche beschrieben (HAGGE-KUBAT et al. 2020, HAGGE-KUBAT et al. 2022, BAUMGÄRTNER 2020)

Für die flächendeckende Berechnung der Tognacca-Werte werden zunächst aus den Abflussmodellierungen und der Neigung der Hänge die Gerinneneigungen extrahiert, sodass nur dort Tognacca-Werte berechnet werden, bei denen tatsächlich auch eine größere Menge an Abfluss zusammenkommen kann. Dafür kann ein Gerinnesohlneigungsgrenzwert verwendet werden, der angibt ab welcher minimalen Sohlneigung ein Murgang überhaupt entstehen kann. In dieser Arbeit wurde entsprechend der Literatur ein Grenzwert von 15 Grad angenommen (RICKENMANN, 2014 ZIMMERMANN et al. 1997, SCHEID 2011). Somit können die Zellen der Gerinneverläufe extrahiert werden, die eine geringere Neigung als der Grenzwert haben. Anschließend können alle verbliebenen Rasterzellen der Gerinneverläufe (oberhalb des Grenzwerts) mit der Tognacca-Formel durchgerechnet werden.

Da innerhalb dieser Studie nicht für jedes der tausenden Einzelgerinne im Mittelrhein- und Moseltal ein exakter Schuttdurchmesser der Gerinnesohle bestimmt werden kann, entschied man sich hier aus Felduntersuchungen und anderen Studien entnommene repräsentative Schuttdurchmesser innerhalb von verschiedenen Klassen anzunehmen (BAUMGÄRTNER 2020, HAGGE-KUBAT et al. 2020, TOGNACCA 1999). So wurde die Tognacca-Formel repräsentativ für drei Durchmesserklassen von 10, 20 und 30cm für jede einzelne Rasterzelle durchgerechnet. Diese Durchmesserklassen sind beispielhaft mit am Mittelrhein und Moseltal typisch vorkommenden Gerinneneigungen von 15°, 20° und 25° in den Steillagen sowie den daraus resultierenden Tognacca-Werten in Tabelle 9 dargestellt.

Tab. 9: Beispielhafte Tognacca qDc-Werte (m³/s) für die angenommenen Schuttdurchmesser und charakteristische Sohlneigungen

	15°	20°	25°
10cm	0.28	0.19	0.13
20cm	0.81	0.54	0.38
30cm	1.49	1.00	0.69

Die weiteren Eingangswerte wie die Gravitationskonstante oder die Dichte des vorherrschenden Gesteins, welche für die Berechnung der Formel von TOGNACCA (1999) ebenfalls entscheidend sind, wurden aus der Literatur (u.a TOGNACCA 1999, TAKAHASHI 1991) entnommen oder aufgrund der Feldbegehungen und Fotos vorhergehender Murgänge im Projektgebiet geschätzt (TOGNACCA 1999, HAGGEKUBAT et al. 2020). Eine Darstellung der zur Berechnung benötigten und verwendeten Werte sind im Anhang in Form einer Tabelle gegeben (vgl. Anhang F).

Die Berechnung erfolgt, wie der gesamte hier beschriebene Murgangsmodellierungsprozess per Python-Code über den Rasterrechner in SAGA-GIS automatisiert und ist in der Lage selbst mehrere Quadratkilometer große Gebiete in einem Durchgang innerhalb eines vertretbaren Zeitraums zu berechnen. Zusätzlich ist es möglich die einzelnen Berechnungen für verschiedene Niederschlagsinputs zu parallelisieren, sodass für die Gesamtberechnungsdauer eine weitere Zeitersparnis eintritt.

Nach der zellbasierten Berechnung ergibt sich eine Rasterkarte, die die berechneten qDc-Werte für jede einzelne Zelle und den verwendeten Schuttdurchmesser der Gerinneverläufe enthält. Eine beispielhafte Darstellung einer solchen Rasterdarstellung ist in Abb. 74 dargestellt.

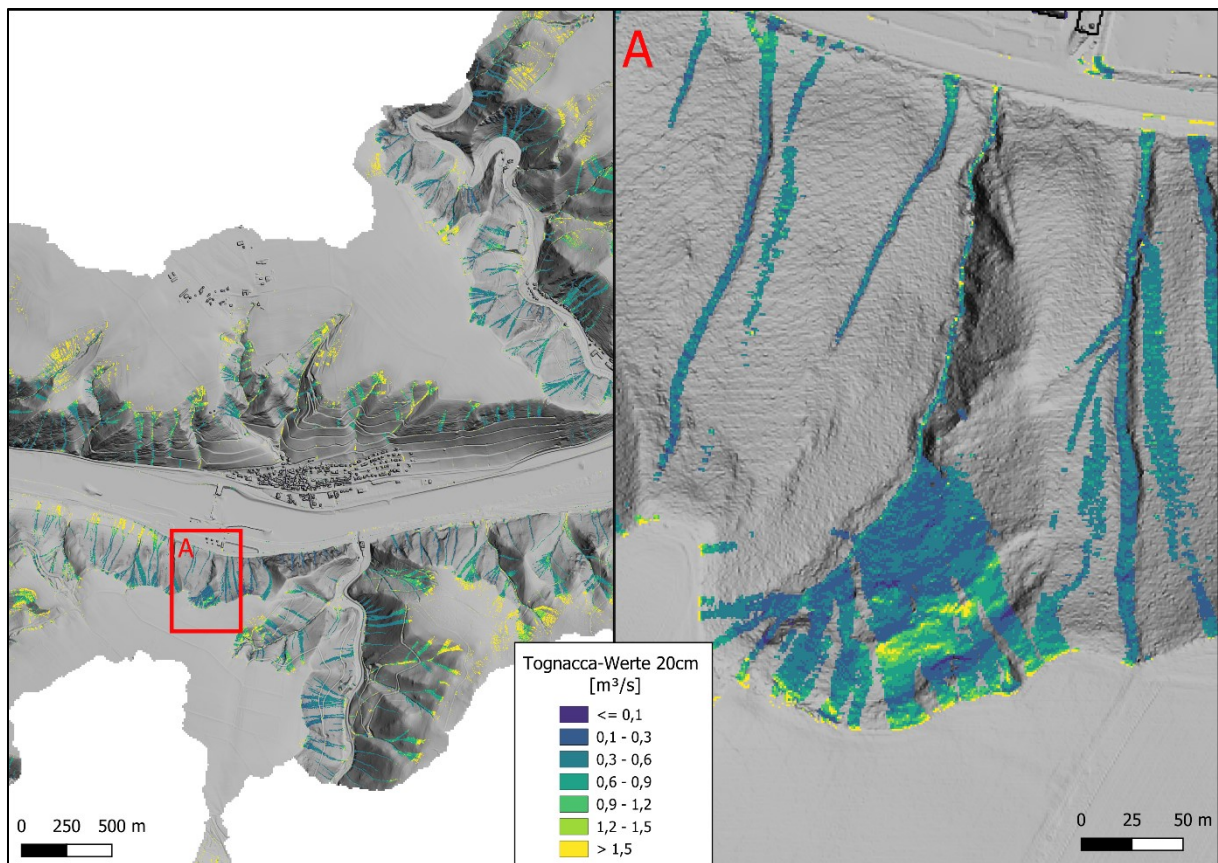


Abb. 74: Darstellung der automatisiert errechneten q_{Dc} -Tognacca-Werte (20cm Schuttdurchmesser) für einen Gerinnebeispiel bei Müden (Mosel)

Diese Rasterkarte kann anschließend in einem weiteren Berechnungsschritt mit den zuvor modellierten Starkregenabflüssen verglichen und über den Rasterrechner diejenigen Zellen bestimmt werden, bei denen der zellspezifisch modellierte Abflusswert über den berechneten q_{Dc} -Tognacca-Werten an der jeweiligen Zelle liegt. Diese Zellen stellen somit die für die aktuelle Berechnung des Niederschlagsinputs sowie des Schuttdurchmessers die finalen Murgangsauslösebereiche dar. Alle anderen Zellen werden daraufhin klassifiziert und exkludiert, sodass nur diese Auslösezellen verbleiben. Diese Bereiche können abschließend als eigenes Raster exportiert werden und anschließend im GPP als Startzellen definiert werden. Eine beispielhafte Darstellung dieses Vorgangs ist in Abb. 75 aufgezeigt.

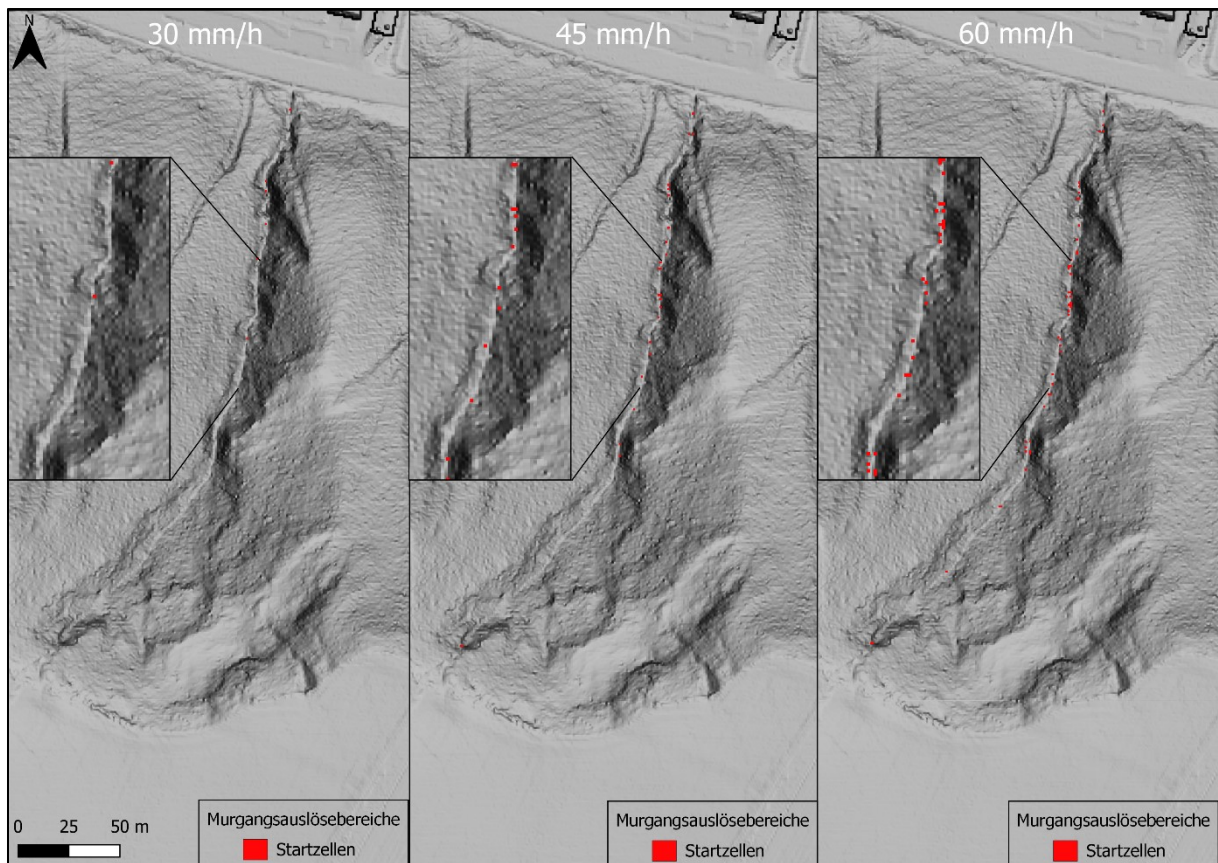


Abb. 75: Darstellung der aus den q_{Dc} -Tognacca-Werten und der Abflusssimulation bei 30/45/60mm/h errechneten Murgangs Startzellen in dem in Abb. 74 gezeigten Gerinne bei Müden (Mosel)

5.3.3 Modellierungsparameter im GPP

Damit nach der Berechnung der Murgangsauslösebereiche die eigentliche Murgangsausbreitung im GPP-Modell modelliert werden kann, ist zunächst entsprechend der Steinschlagmodellierung im GPP die passende Runout-Einstellung auszuwählen. Für Fließprozesse ist dafür das spezialisierte *PCM*-Sub-Model in Kombination mit dem Random-Walk Ansatz nach Gamma (2000) angelegt (WICHMANN 2017, siehe Kap. 4.4.5). Auch für die flächendeckende Modellierung von Murgängen ist in dieser Studie das modDGM1 sowie 800 Iterationen pro Prozessdurchlauf aus jeder Startzelle als Modellierungsrahmen definiert.

Die drei Kalibrierungsparameter (*threshold parameter*, *exponent for divergent flow* & *persistence factor*) für den Random-Walk-Algorithmus werden für den hier

vorgestellten Ansatz im Rahmen des von Wichmann (2017) vorgeschlagenen Werterasters für Murgänge und andere Fließprozesse wie etwa Neuschneelawinen, verwendet. So wurden für die standardisierte Modellierung von Murgängen für eine große Fläche und viele einzelne Gerinne wieder bestimmte Annahmen getroffen. So sind Fließprozesse mit einer höheren Persistenz im Unterschied zu Sturzprozessen bei einem ebenfalls einem hohen Grad an Divergenz angenommen. Dies ist damit begründet, dass Murgänge vor allem im flacheren Terrain oder bei einem Ausbruch aus dem bestehenden Gerinne sich durch den hohen Wasseranteil beweglicher fließend verhalten können als Sturzprozesse. Die einzelnen verwendeten Werte für die Kalibrierungsparameter, als auch aller weiteren GPP-Murgangparameter sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tab. 2: Verwendete Modellierungsparameter für in die Fläche gerechnete Fließprozesse im PCM- Modell

<i>Modellierungsparameter</i>	<i>Verwendete Einstellung</i>
<i>Topographie</i>	ModDGM1 (Raster)
<i>Startzellen</i>	Murgangsauslösbereiche (Raster)
<i>Bewegungsmodell</i>	PCM (Perla et al. 1980)
<i>Iterationen</i>	800
<i>Schuttmächtigkeit</i>	50cm
<i>Processing Order</i>	Parallel mit den Iterationen
<i>Threshold parameter</i>	40°
<i>Exponent for divergent flow</i>	2.0
<i>Persistence factor</i>	3.5
<i>Mass to Drag Ratio</i>	80
<i>Fließ-Boden-Grenzreibung</i>	0.12
<i>Initiale Geschwindigkeit</i>	2m/s
<i>Ablagerungsmodell</i>	Velocity on Stop (Wichmann 2017)
<i>Ablagerung am Endpunkt</i>	50%

<i>Neigungsschwellenwert</i>	10°
<i>Schwellenwert minimale Geschwindigkeit für einen Ablagerungsbeginn</i>	8 m/s
<i>Minimale Trajektorienlänge</i>	10m
<i>Maximale Ablagerung bei 0 Geschwindigkeit oder Steigung</i>	25%
<i>Minimale Neigung um Sinkfill zu starten</i>	2.5°

Die hauptsächlichen Parameter, die über die Geschwindigkeit und die Länge eines modellierten Murgangs entscheiden, sind die dimensionslose Mass-to-Drag-Ratio (Massereibungsverhältnis), die initiale Geschwindigkeit des Murstroms an seiner Auslösezelle sowie die Fließ-Boden Grenzreibung (Friction Parameter). Nach diversen Voruntersuchungen und Tests wurde in diesem Projekt eine Wertekombination (siehe Tab. 10) gewählt, die die bisher aufgetretenen, durch konvektive Starkregenereignisse ausgelösten, sehr flüssigen Murgänge mit hohem Maß an transportiertem Schieferschutt am ehesten nachbilden konnten. Da für diese Studie eine flächendeckende Berechnung angestrebt wurde, musste ohne die Kenntnis von einzelnen Gerinnesituationen modelliert werden. Entsprechend wurden die vorgestellten Werte für alle modellierten Murgänge standardisiert angenommen.

Um den für Fließprozesse entscheidenden Sinkfill-Ansatz (vgl. Kap. 4.4.1) in die Modellierung zu integrieren und so kleinere Senken durch mitgeführtes Material verfüllen zu lassen und ein Weiterfließen des Stroms zu ermöglichen, wurden die einzelnen Startzellen jeweils mit einer mobilisierbaren angenommenen Schuttmächtigkeit von einem halben Meter klassifiziert. Die Ergebnisse der Modellierung sind somit im Vergleich zu Modellierungen mit derselben Parameterkombination ohne SinkFill den real aufgetreten Ausbereitsungsgebieten von Murgängen deutlich ähnliche (siehe Kapitel 6.2). Sie sind somit deutlich realistischer in ihrer Gefahrenaussage.

Als hier gewähltes Ablagerungsmodell wurde für den Modellierungsprozess von Murgängen der Slope, Velocity & on Stop Ansatz nach WICHMANN (2017) verwendet. Dafür wurden entsprechend der Werte in der Tabelle 10 ein moderater Geschwindigkeitsschwellenwert, eine geringe Gerinneneigung und eine relativ geringe minimale Trajektorienlänge angenommen. Damit sollte die für den alpinen Raum konzipierte Modellierung auf die deutlich geringeren Hanglängen und Steigungen im deutschen Mittelgebirge angepasst werden.

Auch diese verwendenden Parameter sind bereits in einer publizierten Vorabveröffentlichung zu dieser Promotionsarbeit beschrieben sowie in ähnlicher Form in weiteren Studien zu regionaler Gefahrenhinweiserstellung weltweit erfolgreich verwendet worden (HAGGE-KUBAT et al. 2022, FARINA et al. 2020 GOETZ et al. 2021, MARINELLI et al. 2022).

5.3.4 Skalierung und Darstellung

Wie beim Prozessablauf von Steinschlägen (vgl. Kap 5.2) besteht auch beim Prozessablauf von Murgängen eine wesentliche Errungenschaft des hier vorgestellten Modellierungskonzeptes in der Skalierbarkeit und der hohen Rechengeschwindigkeit. So ist es möglich auch größere Gebiete in dem beschriebenen teilautomatisierten Workflow in einem schnellen Zeitrahmen zu rechnen. Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, kann auf Basis der Abflussmodellierung der Großgebiete dafür auch die anschließende automatisiert durchgeführte Murgangsmodellierung auf diesen Gebieten berechnet werden.

Dabei wurde dem Vorgehen des Steinschlagsprozesslaufes entsprechend, anhand von Fallstudien zur bekannten Einzelereignissen die generelle Wirksamkeit und Aussagekraft dieses Ansatzes in kleinem Maßstab getestet (vgl. Kapitel 6.2.1), bevor nach erfolgter Validierung entlang der Flussläufe die Modellierung auf die Großgebiete gewechselt wurde. Entsprechend der Steinschlagmodellierung im GPP

über das *1 parameter-friction model*, sind auch für die Skalierung bei der Murgangsmodellierung über das *PCM-Model* dafür keine größeren modellertechnischen Anpassungen im GPP notwendig. So kann der Modellierungsablauf auf beschriebenen Wege entsprechend auch auf großer Fläche ablaufen. Als Anpassung sind dabei die gerechneten Abflussmodellierungen unter GRASS-GIS zu konvertieren um für die Ausweisungen der Startzellen der Modellierungen im Tognacca-Ansatz dieselben Ausdehnungen und Projektionsdaten zu verwenden. Eine softwareseitige Limitierung der Inputgröße liegt dabei ebenfalls nicht vor, sodass diese Großgebiete (Oberes Mittelrheintal (OMi), das Untere Mittelrheintal (UMi), das Obere Moseltal (OMo), das Mittlere Moseltal (MMo) und das Untere Moseltal (UMo), vgl. Abb. 69) als Ganzes modelliert werden können. Dieser Ansatz ist bei der hier verwendeten Rechenkapazität (siehe Kap. 4.1.1) in der Lage, die fünf Großgebiete und damit das Gesamtgebiet am Mittelrhein und Moseltal inklusive der Abflussmodellierungen innerhalb von etwa 3-4 Wochen vollständig zu berechnen. Die Darstellung der Rasteroutputs der modellierten Großgebiete sind anschließend über einen separierten Zwischenschritt innerhalb eines GIS-Systems anzupassen. Dadurch, dass durch das verwendete Modellierungsschema (vgl. Kapitel 5.3) für jedes der Großgebiete 12 Murgangsmodellierungen entsprechend des Niederschlagsinputs und des Schuttdurchmessers berechnet wurden, sind für die Kartendarstellung auch farbliche Anpassungen entsprechend des Gefährdungshinweises zu geben. Anhand einer Kreuzreferenz kann diese Darstellung verdeutlicht werden. Die farbliche Darstellung entspricht dem von den staatlich geologischen Diensten (2009) vorgeschlagenen Farbspektrum von grün nach dunkelrot. Tabelle 11 zeigt dieses Farbspektrum bezogen auf die Murgangsauslösung bei entsprechendem Grenzniederschlag und Schuttdurchmessern.

Tab. 11: Kreuzreferenz der verwendeten farblichen Darstellung der Murgangsmodellierungsergebnisse mit den angewendeten Grenzniederschlägen und Schuttdurchmessern

	60mm/h	45mm/h	30mm/h	15mm/h
30cm				
20cm				
10cm				

Dabei lässt sich erkennen, dass diejenigen modellierten Murgangsgerinne farblich mit einem höheren Murgangspotenzial gekennzeichnet werden, bei denen es unter wahrscheinliche auftretenden Grundbedingungen zu einer Murgangsauslösung kommt. Dies heißt konkret, dass Gerinne, bei denen es bereits bei einem modellierten Niederschlagsereignis von 15 oder 30 mm/h und einem durchschnittlichen Schuttdurchmesser von 20 oder 30 Zentimeter zu einer modellierten Murgangsauslösung kommt, ein größeres Murgangspotenzial haben, als Gerinne, die erst bei einem sehr geringen Schuttdurchmesser und einem hohen Niederschlag anspringen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einem entsprechend starken Niederschlagsereignis und einer hinreichenden Schuttverfügbarkeit in nahezu allen Gerinnen in den Steillagen der Rheinland-Pfälzischen Mittelgebirge das theoretische Potenzial für eine murgangsähnliche Massenbewegung besteht. Dieses Phänomen wurde während des Niederschlagsereignisses vom 14. und 15. Juli 2021 eindrücklich bestätigt, bei dem es zur dutzendenfachen Auslösung von Murgängen in den Gerinnen des Ahrtals kam (WEHINGER et al. 2022, LGB 2022). Der Ansatz der Darstellung stellt somit im Sinne einer Gefahrenhinweiskarte abgestuft diejenigen Gerinne und Tiefenlinien dar, die das größte Potenzial für die Auslösung eines Murgangs bereits bei geringeren Niederschlagsmengen und Schuttdurchmessern haben.

Der modellierte Verlauf der jeweiligen Murgänge ist entsprechend der Auslösebereiche, der Transitzone und der Akkumulationzone unterschieden und wird ganzheitlich im Bezugsmaßstab 1:25000 dargestellt. Die so erstellten Kartenwerke sind in Kapitel 6.1.4 anhand von Beispielen für das Untersuchungsgebiet dargestellt.

6 Modellierungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen Modellierungen für Steinschläge, Felsstürze und Murgänge am Mittelrhein- und Moseltal aufgezeigt und zunächst anhand von Fallbeispielen erläutert. Diese Fallbeispiele sind teilweise schon in Vorabveröffentlichungen zu dieser Promotion in Fachzeitschriften publiziert worden. Sie stehen an dieser Stelle explizit auch repräsentativ für die in die Fläche gerechnete Modellierungen. Darauf aufbauend werden die Skalierungsmechanismen, die eine flächendeckende Modellierung ermöglichen und die Validierung der dieser Modellierungen beschrieben. Abschließend werden Ausschnitte aus den finalen Gefahrenhinweiskarten in dem Untersuchungsgebiet dargestellt. Der Übersicht halber sind die beiden Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang dabei nacheinander beschrieben.

6.1 Steinschlag und Felssturz

Im Rahmen der Untersuchungen für den Artikel: „Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein und Moseltal“ (HAGGE-KUBAT et al. 2021) als Vorabveröffentlichung für diese Promotionsarbeit wurde das Modellierungskonzept für Sturzprozesse tiefergehend beschrieben und anhand von Fallbeispielen in diesem Gebiet getestet. Im Folgenden werden drei repräsentative Modellierungsfallbeispiele von Steinschlag- und Felssturzereignissen aus dieser Studie kurz aufgezeigt. Diese

Beispiele finden sich sowohl an der Mosel als auch am Rhein und repräsentieren jeweils leicht unterschiedliche Ausprägungen und Entstehungsformen von Sturzereignissen im Untersuchungsgebiet. Dadurch wird die Variabilität der Modellierungen unterstrichen und die Anwendbarkeit für verschiedene Ausgangssituationen aufgezeigt. In dem Artikel wurden unterschiedliche Skalenebenen untersucht und die Sturzpotenziale einer flächendeckenden statistischen Validierung anhand der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz unterzogen. Weiterführend wurde ein Ansatz zur Ermittlung der infrastrukturellen Vulnerabilität durch diese Sturzprozesse eingeführt und die Aussagekraft anhand von Beispielen aufgezeigt. Die folgenden Kapitel 6.1.1 I-III, 6.1.2 und 6.1.3 basieren mit punktuell erweiterten Erkenntnissen auf dieser Studie. In Kapitel 6.1.4 wird anschließend exemplarisch eine, aus den flächendeckenden Modellierungsergebnissen generierte, Gefahrenhinweiskarte auf TK25-Blattmaßstab vorgestellt und beschrieben.

6.1.1 Fallbeispiele

I. Rosstein¹

Der Hangbereich des Rossteins gegenüber der Stadt Oberwesel ist als einer der bekanntesten Steinschlag- und Felssturzreviere im Mittelrheintal bekannt (GRUNERT & HESS 2010). Etliche stark erodierte und zerklüftete Felsrippen devonischen Tonsteins und -schiefers liegen hier markant steil aufragend oberhalb der rechtsrheinischen Bahnstrecke zwischen Rüdesheim um Koblenz. Diverse Schadensfälle durch Steinschlagereignisse sind in diesem Gebiet aus der Vergangenheit bekannt und in der Rutschungsdatenbank des LGB beschrieben (SCHMIDT 2009). Massive

¹ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜBER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220.

Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn schützen die direkt darunterliegende Bahnstrecke und zeugen darüber hinaus von der anhaltend hohen Steinschlaggefahr.

Abbildung 76 stellt das Ergebnis der mit den Parametern der in Kapitel 5.2 beschriebenen Steinschlagmodellierung für den Rossstein im Vergleich zur Verortung der realen Schadensfälle und der Sicherungsmaßnahmen in diesem Gebiet dar. Die modellierten Trajektorien werden hierbei in einem farblichen Schema von blau (geringe Trajektorienfrequenz pro Rasterzelle) nach rot (hohe Trajektorienfrequenz) dargestellt, die die wahrscheinlichsten Sturzbahnen für Steinschlagereignisse aus den jeweiligen Quellgebieten symbolisieren.

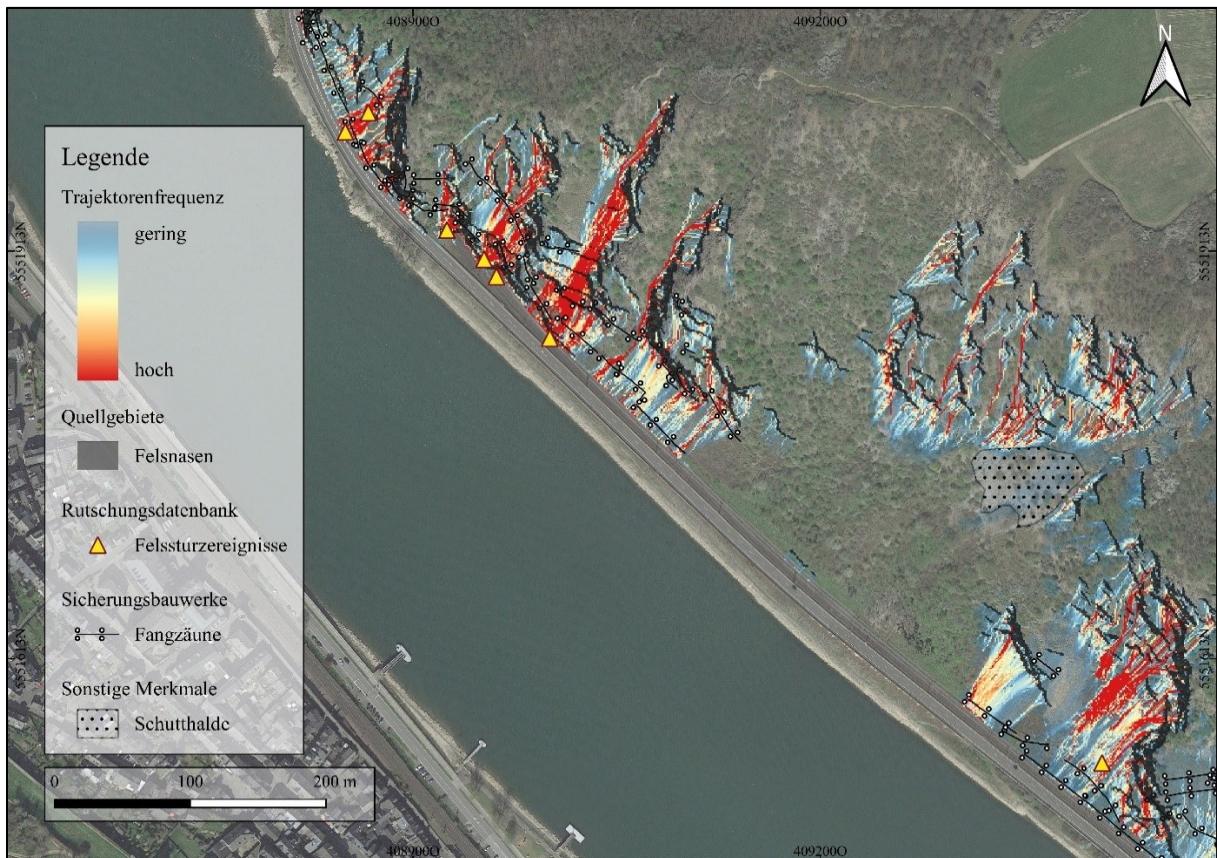


Abb. 76: Steinschlagmodellierung des Rosssteins mit eingezeichneten Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Es wird deutlich, dass die modellierten Trajektorien plausibel diejenigen Hangbereiche anzeigen, bei denen tatsächlich Sturzereignisse in den letzten Jahrzehnten stattgefunden haben (gelbe Dreiecke). Darüber hinaus passen die modellierten Sturzbahnen sehr genau zu den realen Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn in Form von Steinschlagschutzzäunen (schwarze Linien). Die Fangzäune enden dort, wo auch in der Modellierung keine Trajektorien mehr berechnet werden. Dies deutet darauf hin, dass die geotechnischen Untersuchungen vor dem Aufbau der Schutzmaßnahmen an diesen Stellen auch kein Potenzial für etwaige Sturzereignisse vorgefunden haben. Insgesamt erscheint, durch das Modell bestätigt, das Steinschlagpotenzial durch die rezenten Schutzmaßnahmen in zufriedenstellendem Maße gesichert zu sein. Vorhandene Quellgebiete, die außerhalb der Sicherungsmaßnahmen verortet sind, erreichen mit ihren Trajektorien im Modell den Hangfuß und somit die Bahnstrecke nicht, sondern werden durch die Topografie und die Vegetation vorher abgebremst bzw. aufgehalten. Zeugnis davon ist unter anderem eine größere Schutthalde im nordöstlichen Teil des Hanges (gepunktete Fläche). Auch hier enden die Trajektorien der hangaufwärts liegenden Quellgebiete direkt oberhalb der Schutthalde, sodass sich die modellierten Ablagerungsbereiche (Stopping Positions) direkt auf der realen Schutthalde befinden. Dies könnte im Umkehrschluss auch die Entstehung der Schutthalde erklären. Insgesamt zeigt sich eine deutliche Übereinstimmung der Modellierung mit den realen Verhältnissen am Rossstein, was die Wirksamkeit der Modellierung das Sturzpotenzial für reale Hangabschnitte zu modellieren unterstreicht (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Neben der Modellierung der Trajektorienfrequenz (Runout Area), ist das Steinschlagmodell auch in der Lage auch die maximalen Geschwindigkeiten zu modellieren, die ein Kluttkörper auf seiner Sturzbahn rechnerisch unter Berücksichtigung der angegebenen Parameter erreichen würde. In Abb. 77 sind diese Sturzgeschwindigkeiten für die Situation am Rossstein dargestellt. Hier zeigt sich eine deutliche Übereinstimmung mit der in Abb. 76 dargestellten Trajektorienfrequenz mit der maximal errechneten Geschwindigkeit. Je höher die Trajektorienfrequenz, also je

wahrscheinlicher die modellierten Sturzbahnen, desto höher sind in diesem Fall auch die modellierten Sturzgeschwindigkeiten angegeben. Das liegt im Fall des Rossteins vor allem daran, dass die Bereiche mit der wahrscheinlichsten Sturzbahn plausibel in den Tiefenlinien zwischen den aufragenden Felstrippen liegen, die, wie die durchgeführten Geländeuntersuchungen am Rosstein zeigten, durch massive Steinschlagaktivität bereits mit unzähligen stummen Zeugen belegt und kaum mit Vegetation bewachsen sind. Maximal werden hier Geschwindigkeiten von rund 35m/s modelliert, sodass ein Block mit einer Kubatur von 1m³ und einem Gewicht von 1500kg etwa 900kj Aufschlagenergie am Hangfuß erreichen könnte. Die Zäune zum Schutz der Bahnstrecke sollten rechnerisch also mindestens für eine Energieaufnahme von 1000kj dimensioniert sein um einen effektiven Schutz vor den modellierten Sturzkörpern darstellen zu können. Entsprechend der zur Verfügung stehenden Schutzbauwerksdokumentationen der Deutschen Bahn haben die Zäune tatsächlich hier auch eine Energieaufnahmekapazität von 1000kj, sodass es in den letzten Jahren nach Errichtung der Zäune dort zu keinen Schadensfällen durch Steinschläge oder Felssturze gekommen ist. Dies zeigt die Plausibilität der Modellierung und die Möglichkeit auf einfachem Wege an einer Einschätzung zur Planung und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen beizutragen. Dabei sind verschiedene energiebeeinflussende Effekte wie eine Zerkleinerung des Kluffkörpers in der Sturzphase, Abpralleffekte an Baumstämmen oder verschiedene Sprunghöhen nicht berücksichtigt. Für eine erste Einschätzung der Sturzgegebenheiten und der Positionierung und Dimensionierung von Schutzbauwerken können diese Modellierungen jedoch eine erste Einschätzungshilfe darstellen, auf deren Basis konkrete, gebietsspezifische Untersuchungen und weiterführende Modellierungen angestoßen werden können (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

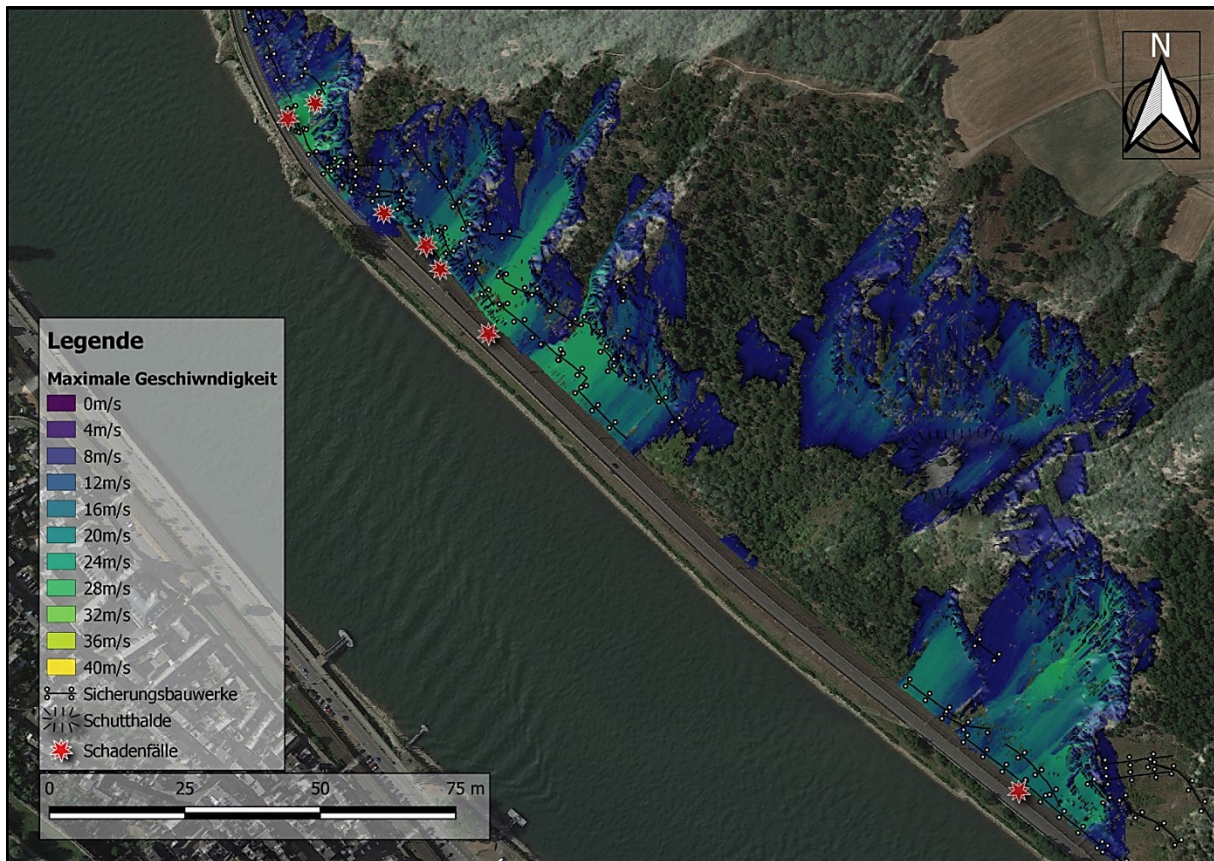


Abb. 77: Simulation der maximalen Sturzgeschwindigkeiten am Rosstein

II. Beilstein – Burg Metternich ²

Südlich von Beilstein an der Mosel befindet sich ein steil nach Westen zur Mosel hin abfallender Berghang oberhalb der Landstraße 98. Bekannt ist der Bergrücken durch die auf einem markanten Felssporn gelegene Ruine der Burg Metternich auf seiner Kuppe. In der Vergangenheit kam es laut den Schadensdokumentationen von LGB und LBM in den Jahren 1961, 1964 und 2010 zu mehreren Schadensfällen durch Steinschlag- und Felssturzereignisse im betreffenden Hangbereich unterhalb der Burgruine. Dabei sind zum Teil Blöcke bis auf die circa 60 Meter unterliegende Landstraße 98 gestürzt. Die hier vor allem direkt unterhalb des Burgsockels

² Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220.

anstehenden Ton- und Bändeschieferlagen fallen steil hangparallel ein und weisen starke Querklüfte und Störungen auf. Der weitere Hangbereich ist steil abfallend und wird vor allem weinbaulich genutzt, bevor am Hangfuß ein Parkplatz und direkt folgend die L98 anschließen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Anhand der Steinschlagmodellierung für den betreffenden Hangbereich (vgl. Abbildung 78) lässt sich erahnen, dass sich der Hauptwirkungsbereich für stürzende Massen in einem relativ schmalen Korridor von knapp 30 Metern Breite im zentralen Hangbereich unterhalb der Burgruine befindet. Dabei sind in der Modellierung Trajektorien, entsprechend den Schadensfalldokumentationen aus der Rutschungsdatenbank des LGB, auch bis hin zur L98 und sogar bis zu Mosel berechnet.

Die zur Ergebnisvalidierung herangezogenen Lokalitäten der realen Schadensfälle befinden sich wie schon im Fallbeispiel des Rossteins genau innerhalb des modellierten Hauptsturzpotenzialgebietes (erwähnter Sturzkorridor), wobei hierbei durch das Alter der Schadensfälle auf eine möglicherweise leichte Abweichung durch Verortungsungenauigkeiten der lokalisierten Schadensfälle hingewiesen werden muss.

Darüber hinaus befindet sich exakt im modellierten Hauptsturzgebiet auf halber Hanghöhe ein relativ neuer, circa 2,5 Meter hoher Steinschlagfangzaun (Abbildung 79) zur Sicherung des Parkplatzes und der Landesstraße. Wie auf Abbildung 80 zu erkennen ist, wurde das von der Modellierung ausgewiesene Steinschlagpotenzial überdies von rezenten Abbrüchen aus der Felswand unterhalb der Burgruine und vorgefundenen stummen Zeugen bestätigt.



Abb. 78: Steinschlagmodellierung des Burgbergs bei Beilstein (Mosel) mit eingezeichneten Schadensfällen (HAGGE-KUBAT et al. 2021)



Abb. 79: Drohnenaufnahme des Westhangs des Burgbergs mit hervorgehobenem Steinschlagfangzaun auf halber Hanghöhe (HAGGE-KUBAT et al. 2021)



Abb. 80: Drohnenaufnahme der offenen Felspartie unterhalb der Burg Metternich mit hervorgehobenen stummen Zeugen (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Die Modellierung kann auch in diesem Fall als plausibel bewertet werden und darauf aufbauend weitere Rückschlüsse gezogen werden. Dadurch, dass die Landesstraße 98 sowie der Parkplatz an dieser Stelle in Form des präzise positionierten, modernen Fangzauns gesichert sind, lässt sich eine Gefahr durch Steinschlagaktivität für parkenden Autos oder den Verkehr als deutlich verringert beschreiben. Dennoch geht vor allem bei größeren Abbrüchen aus der Steilwand von diesem Hangbereich ein Restrisiko aus (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

III. Rheinsteig bei Wellmich³

Im Jahr 2018 ereignete sich auf dem europäischen Fernwanderweg E3 (Rheinsteig) bei Wellmich – St. Goarshausen ein kleineres Felssturzereignis infolge des Kollabierens einer alten Weinbergs- bzw. Stützmauer. Die Mauer, die zur Stabilisierung einer Serpentinenspitzkehre des Wanderwegs diente, wurde vermutlich durch Auflast und einer sukzessiv anhaltenden Durchfeuchtung mit der Zeit instabil und kollabierte dann am 10.04.2018. Dabei rollten die kubisch behauenen Bruchsteine die steile Böschung hinab und hinterließen einen Schuttfächer auf dem darunterliegenden Teil des Serpentinweges (vgl. Abb. 81). Teile der oberliegenden Serpentine wurden dabei mitgerissen, sodass der Wanderweg zwischenzeitlich gesperrt werden musste.

Die Thematik von Teilausbrüchen instabiler Weinbergsmauern ist in Rheinland-Pfalz allgemein bekannt und könnte in Zukunft noch häufiger zu Schadensfällen an Rhein und Mosel führen. Daher wurde im Rahmen des hier vorgestellten Modellierungsansatzes explizit auch alte Weinbergs- und Stützmauern als potenzielle Steinschlagquellgebiete definiert und in die Modellierung mit einbezogen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

³ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220.

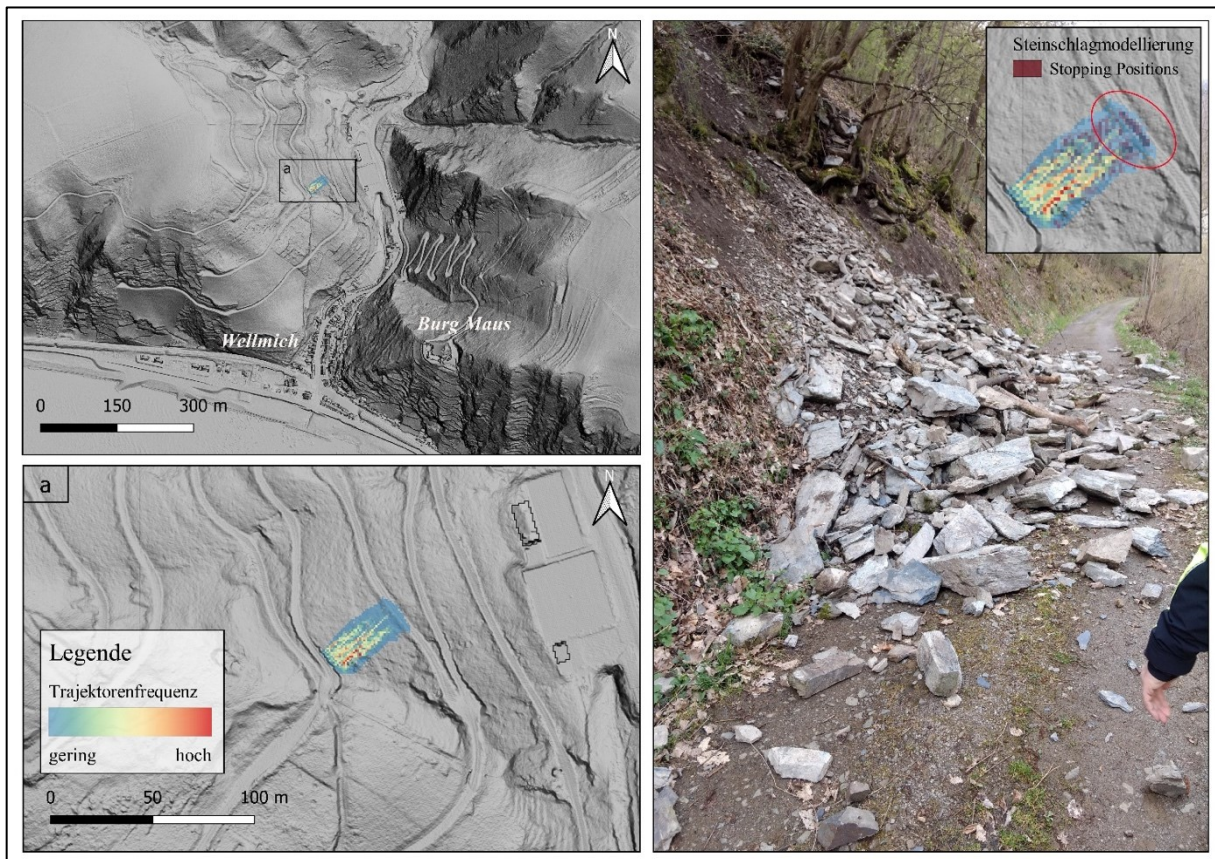


Abb. 81: Steinschlagmodellierung und Geländeaufnahme des Felsturzereignisses bei Wellmich vom 10.04.2018 (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Für diesen Fall in Wellmich zeigt die Modellierung ihr Potenzial als Werkzeug für eine konkrete Einzelfallbetrachtung. Es wird deutlich, dass das Modell den realen Sturzverlauf der kollabierten Mauer sehr präzise errechnet und sich die Endpositionen (Stopping Positions) der modellierten Trajektorien mit dem realen Ablagerungsbereich übereinstimmen (vgl. Abbildung 81). Dabei wurde entgegen der Erwartung keine modellseitige Überschätzung des Ablagerungsbereiches errechnet, sodass sich die Endpositionen der Trajektorien ausschließlich auf den unteren Wegverlauf beschränken und nicht noch in den dahinter anschließenden Steilhang übergehen. Der tatsächlich vorgefundene Ablagerungsbereich ist somit äußerst präzise modelliert worden. Bei der Geländebegehung wurden zudem in den Hangbereichen, in denen die Modellierung die höchste Trajektorienfrequenz

ermittelte, die meisten Steinschlagmarken, wie etwa Baumtreffer, Stumme Zeugen oder Bodenriefen vorgefunden wurden.

Die Modellierung kann entsprechend auch in diesem Fall als präzise beschrieben werden. Auch hier ist das Wissen um das konkrete Quellgebiet entscheidend für die erfolgreiche Modellierung. Damit zeigt sich darüber hinaus auch das Potenzial der beschriebenen Modellierungskomposition unter Umständen auch konkrete Einzelereignisse modellieren zu können. Dies kann beispielsweise dazu beitragen die Entstehung und den Verlauf von bestimmten Ereignissen besser fassen und Gefährdungsbereiche für vorhandene Infrastrukturen noch besser klassifizieren zu können (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

6.1.2 Validierung

Zur Validierung des modellierten Steinschlagpotenzials wurden für die flächendeckenden Modellierungen am Mittelrhein- und Moseltal, wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben, vorrangig die Einträge der Rutschungsdatenbank des LGB, Schadensfallbeschreibungen des LBM sowie zahlreich durchgeführte Geländebegehungen genutzt⁴. In der Rutschungsdatenbank wurden hierbei zunächst die Fälle nach dem Prozesstyp „Steinschlag“ und „Felssturz“ klassifiziert. Insgesamt konnten so 371 Einzelereignisse in den Datenbanken im betreffenden Untersuchungsgebiet an Rhein und Mosel mit den Modellierungsergebnissen verglichen werden. Entscheidendes Kriterium ist hierbei die Verortungsgenauigkeit der Punkte sowie eine mögliche Beschreibung des Ereignisvorgangs (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

⁴ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220.

Dabei ist generell darauf hinzuweisen, dass Prozesse wie Steinschläge oder Felsstürze, die in ihrem Sturzverlauf vom Quell- bis zum Ablagerungsgebiet zum Teil dutzende Meter umfassen, nicht vollständig über Einzelpunkte beschrieben werden können. Diese Punkte können daher nur eine Tendenz des tatsächlichen Prozessareals wiedergeben. Auch ist die Verortungsgenauigkeit der Punkte innerhalb der Datenbanken zum Teil unterschiedlich ausgeprägt. In den Metadaten der LGB-Datenbank sind Qualitätsangaben der Verortungsgenauigkeit einzelner Punkte verfügbar, bei denen Abweichungen zur realen Lokation durch stellenweise sehr alte Schadensdokumentationen, eine ungenau beschriebene Sachlage oder einer Verortung vor der Verfügbarkeit moderner Techniken wie digitaler Geländemodelle zustande kommen können. In der Regel sind die Punkte jedoch, gerade von neueren Ereignissen, sehr genau verortet und lassen sich dementsprechend gut mit den Modellierungsergebnissen in Relation setzen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Da aufgrund der beschriebenen Datenlage in dieser Arbeit Ausbreitungsmodellierungen mit Einzelpunkten verglichen werden mussten, wurde die Validierung der Modellierungsergebnisse wie in den zuvor beschriebenen Fallbeispielen qualitativ durch eine einfache visuelle Überlagerung durchgeführt. Konfusionsmatrizen wie Grenzwertoptimierungskurven (ROC-Kurven), die die herkömmlichen Methoden zur Validierung der Modellierungsgüte von Rutschungsanfälligkeitskarten, basierend auf der Variabilität und Klassifizierung der beeinflussenden Faktoren darstellen (vgl. z.B. WERNER 2023, MALKA 2021), konnten in diesem Fall daher nicht sinnvoll angewendet werden.

Generell lässt sich sagen, dass die Modellierungsergebnisse und die Punkte der Rutschungsdatenbanken durchaus sehr gut vergleichbar sind. Wie auf Abbildung 82 dargestellt, zeigt sich, dass knapp 90% der lokalisierten Schadensfälle der Datenbanken im Projektgebiet sehr nah an (bis 35 Meter) oder überwiegend sogar direkt auf den modellierten Trajektorien liegen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

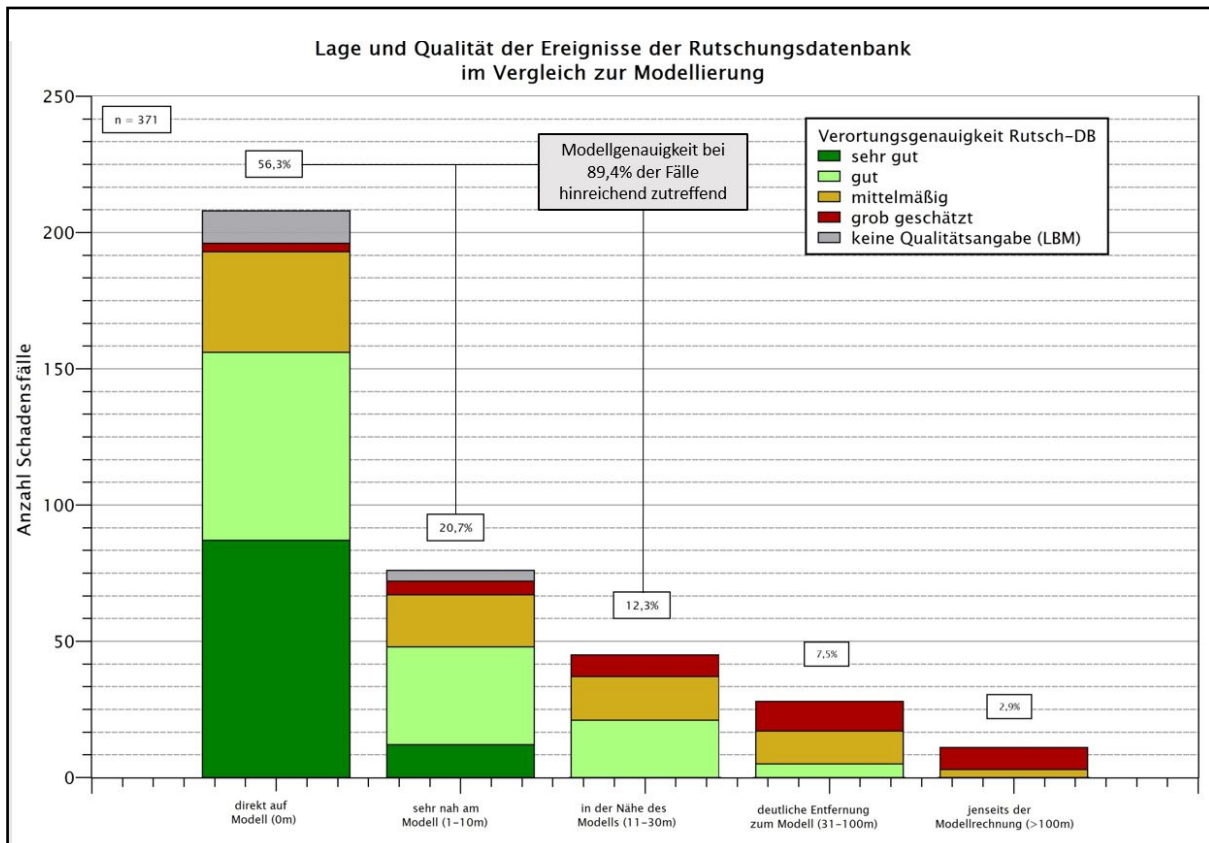


Abb. 82: Statistischer Vergleich der Lage und Qualität der Einträge der Rutschungsdatenbanken mit den Modellierungsergebnissen (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Dabei sind die beschriebenen Bewegungsabläufe durch die Modellierung in den meisten untersuchten Fällen treffend rekonstruierbar. Die vorgestellten Fälle aus Kapitel 6.1.1 stehen dafür beispielhaft und lassen sich äquivalent auf Duzende weitere Fälle im Untersuchungsgebiet am Mittelrhein- und Moseltal übertragen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Auffällig ist darüber hinaus, dass sich innerhalb der knapp 10 % der Fälle, welche nicht direkt den Modellierungsergebnissen zugeordnet werden können, die meisten Fälle mit einer geringeren Verortungsgenauigkeit befinden und daher möglicherweise fehlerhaft lokalisiert wurden. Hier besteht das Potential durch die Modellierungen eine nachträgliche genauere Verortung der Lokalitäten zu erreichen.

Positiv sind darüber hinaus auch die durchgeführten Geländebegehungen zu bewerten. Beim dutzendfach gezielten Anfahren von modellierten Quellgebieten und Trajektorienverläufen wurden in der Regel adäquate Hinweise auf eine mögliche oder bereits stattgefundenene Steinschlagaktivität gefunden. So wurden, wie die Abbildungen 83 und 84 belegen, vielfach Ausbrüche aus Felswänden, Vegetationseinschläge, Stumme Zeugen oder rezente Sicherungsmaßnahmen vorgefunden (HAGGE-KUBAT et al. 2021).



Abb. 83: Stummer Zeuge, eingeschlagen auf einem Wanderweg bei Valwig an der Mosel (Foto: T. Hagge-Kubat, 15.10.2020)



Abb. 84: Zerklüftete Felswand bei Cochem an der Mosel mit Anzeichen von rezente Ausbrüchen (Foto: T. Hagge-Kubat, 14.10.2020)

6.1.3 Ermittlung der infrastrukturellen Vulnerabilität

Nachdem in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt werden konnte, dass sich die Modellierung des Steinschlagpotenzials am Mittelrhein und Moseltal plausibel mit realen Ereignissen und Geländebefunden vergleichen lässt, wurde in einem weiteren Schritt des automatisierten Modellierungsablaufes versucht auf dieser Basis die

Vulnerabilität der Verkehrs- und Gebäudeinfrastruktur im Projektgebiet zu ermitteln⁵. Dafür wurden zunächst aus den frei verfügbaren OSM (Open Street Map)-Daten die vektorisierten Straßen- und Bahnstreckenverläufe extrahiert. Die Verkehrswege wurden anschließend in einem SAGA-basierten automatisierten Workaround mittels der Tools: *Lines to Points*, *Split Lines at Points*, *Add Grid Values to Shapes & Lines Polygons Intersect* (SAGA 2023), jeweils in Teilstücke mit einer Länge von 5 Metern segmentiert und diesen Abschnitten bei gegebener Überschneidung mittels der *Add Grid Values to Shapes* Funktion die Rasterwerte der Steinschlagmodellierung zugewiesen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

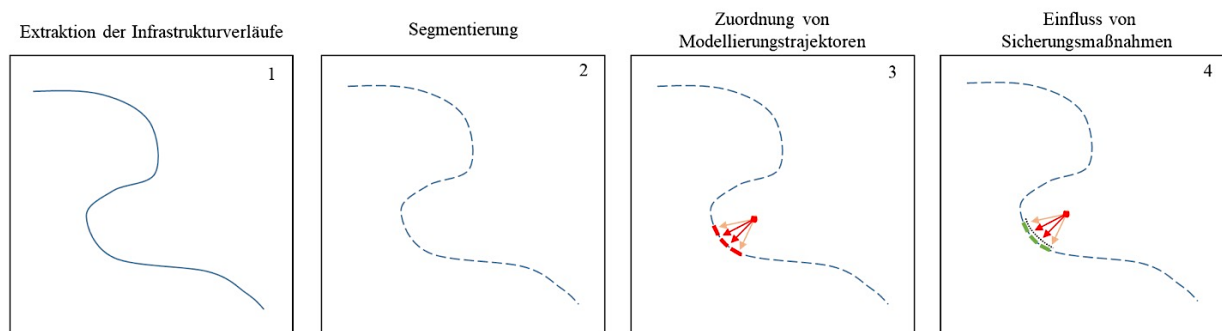


Abb. 85: Schematische Darstellung der Identifikation von steinschlaggefährdeten Streckenabschnitten mittels des VulWay-Prinzips (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Somit ergeben sich Segmente mit vorhandenen Werten, bei denen rechnerisch von einer möglichen Steinschlaggefahr auszugehen ist und welche, die modelltechnisch von keinem Einfluss betroffen sind. Dieser Prozess wurde skriptbasiert automatisiert und im MABEIS-Projekt als „VulWay“-Prinzip (vulnerability of infrastructural ways) benannt. Abbildung 85 stellt diesen Vorgang schematisch dar.

Da in der Realität einzelne Streckenabschnitte teilweise jedoch von Hangsicherungsmaßnahmen wie Fangzäunen oder Vernetzungen gesichert sind, wurden innerhalb dieses Ansatzes auch die in Kapitel 4.3 aufgezeigten Daten von

⁵ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 197-220.

Schutzbauwerken des LBM und der deutschen Bahn implementiert. Die Lage, Größe und Art eines jeden bestehenden Schutzbauwerks konnten auf diesem Weg als Vektorinformationen mit den Modellierungsergebnissen verschnitten werden. Somit können Straßen und Bahnabschnitte welche modellierungstechnisch ursprünglich als „gefährdet“ (von Sturztrajektorien betroffen) klassifiziert wurden, nun als „gesichert“ bestimmt werden. Die für die Validierung durchgeführten Geländebegehungen haben auch in diesem Fall dabei eine sehr hohe Übereinstimmung von Modellierungsergebnissen und Gefährdungs- und Sicherungsbereichen nachweisen können (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

Abbildung 86 stellt als Beispiel die beschriebene Vulnerabilitätsbestimmung mittels des VulWay-Prinzips auf einem Ausschnitt des Kartenblattes TK 25 5711 bei Filsen am Rhein dar. Dieser Bereich des Oberen Mittelrheintals weist grundsätzlich eine hohe Exposition gegenüber stürzender Massenbewegungen auf, da hier hangseitig markant viele offene und stark zerklüftete Felswände und verwitterte Felsvorsprünge anstehen. Davon zeugen auch diverse Vernetzungen zur Sicherung der rechtsrheinischen Bahnstrecke sowie einige Schadensfälle in der Rutschungsdatenbank. Wie auf der Abbildung zu erkennen ist, decken sich ein Großteil der modellierten Hauptsturzpotenzialbereiche mit den vorhandenen Sicherungsmaßnahmen der deutschen Bahn, sodass nach Auswertungen der Modellierung die Bahnstrecke an diesen Bereichen hinreichend gesichert scheint. Darüber hinaus sind allerdings einige Segmente ausgewiesen, bei denen nach der Modellierung, von einer hohen modelltechnischen Vulnerabilität der Bahnstrecke bei gleichzeitig fehlender realer Sicherung auszugehen ist (Abb. 86, Vergrößerung A). An diesen Stellen wäre möglicherweise eine fachkundige Überprüfung von Seiten der zuständigen Infrastrukturbetreiber langfristig anzuraten (HAGGE -KUBAT et al. 2021).

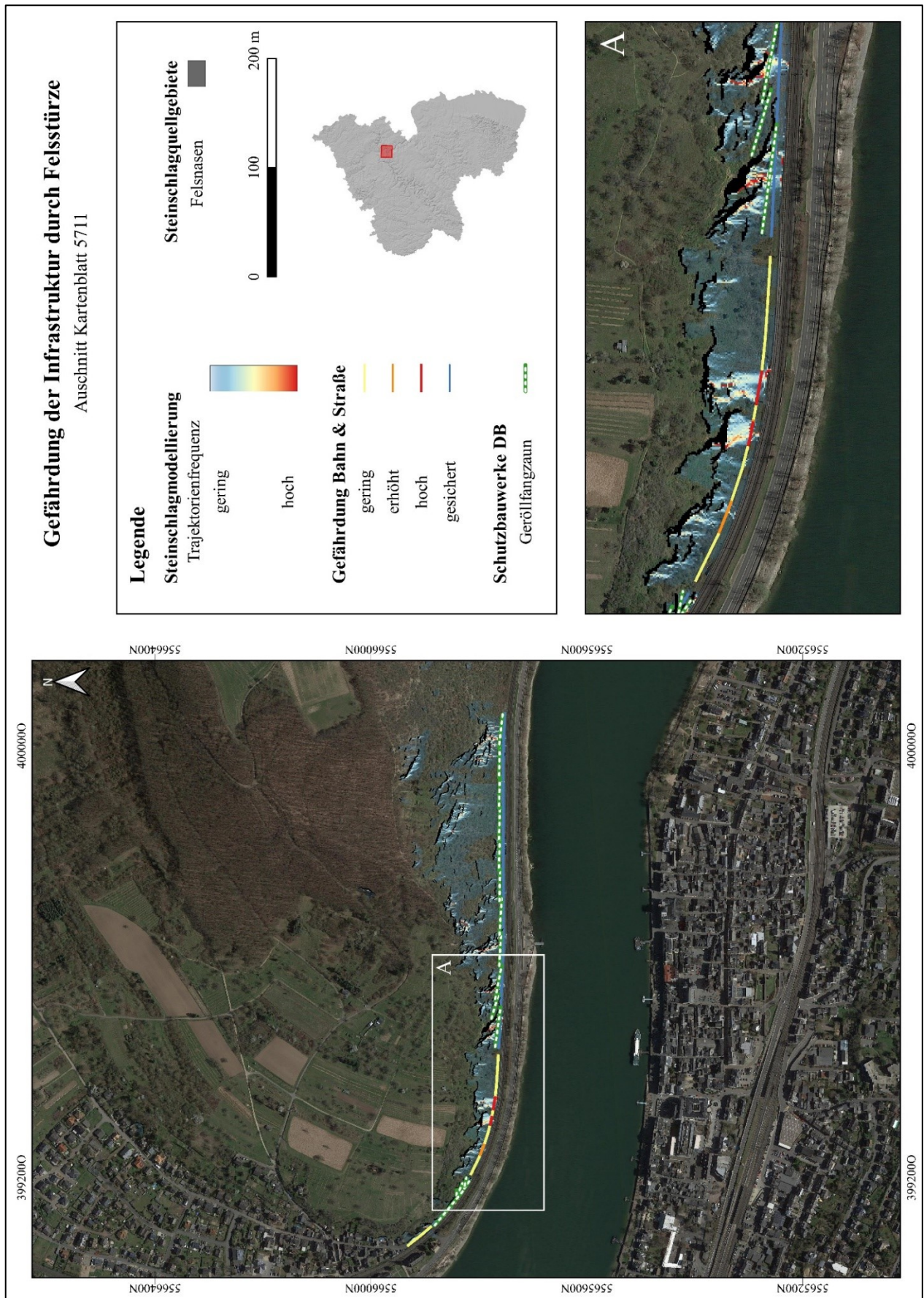


Abb. 86: Vulnerabilitätsberechnung der Infrastruktur auf Basis der Steinschlagmodellierung bei Filsen im Oberen Mittelrheintal (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

Für die in die Fläche gerechnete Modellierung des Steinschlagpotenzials ist entsprechend des hier vorgestellten Ansatzes für jedes modellierte Teilstück der Infrastruktur des Untersuchungsgebiets eine solche Vulnerabilitätseinschätzung berechnet worden. Die Darstellung kann dabei grundsätzlich wie im Folgenden Kapitel 6.1.4 aufgezeigt, gemeinsam oder einzeln als Kartenwerk ausgeführt erfolgen. Dabei wurde sich aufgrund der bisher noch nicht abschließend getroffenen Übereinkunft der Projektpartner des MABEIS-Projektes bezüglich der Symbolisierung und maßstabsbezogenen Sichtbarkeit dieser Vulnerabilitätssegmente dazu entschieden diese noch nicht in der flächendeckenden, mit dieser Arbeit veröffentlichten, vorläufigen Gefahrenhinweisdarstellungen für Sturzprozesse in diesen Gebieten zu integrieren (näher ausgeführt im folgenden Kap. 6.1.4).

Es ist an dieser Stelle grundsätzlich darauf hinzuweisen, dass die vorgestellten Modellierungen, Ableitungen und Kartenwerke generell lediglich eine vereinfachte Abbildung der natürlichen Prozesse darstellen und daher Aussagen, Abschätzungen und keine Handlungsempfehlungen sind. Es ist in jedem Fall nötig etwaige Rückschlüsse vor Ort fachkundig fundiert zu überprüfen und die Modellierungsergebnisse lediglich als eine Möglichkeit einer Identifikationszonierung anzusehen (vgl. Kap. 7.2, HAGGE-KUBAT et al. 2021).

6.1.4 Gefahrenhinweiskarte Prozesstyp Steinschlag und Felssturz

In diesem Kapitel wird nun beispielhaft eine flächenhaft modellierte Gefahrenhinweiskarte gegenüber der Prozesse Steinschlag und Felssturz vorgestellt und beschrieben (Abb. 87). Als repräsentatives Beispiel für eine solche Karte wurde für diese Arbeit das TK-Blatt 5809 – Treis-Karden an der Mosel ausgewählt.

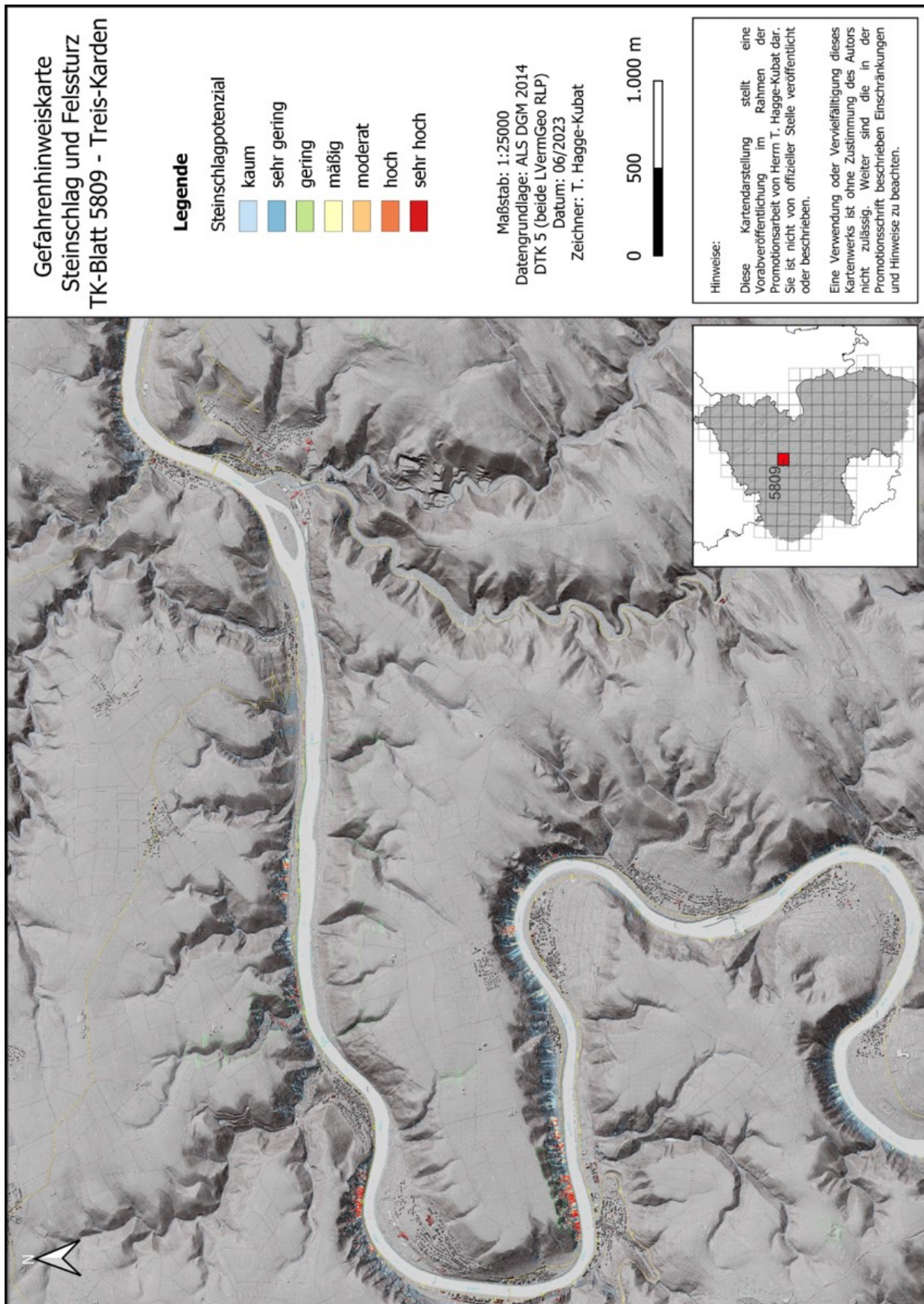


Abb. 87: Gefahrenhinweiskarte Steinschlag und Felssturz auf dem TK-Blatt 5809 Treis-Karden an der Mosel

Auf dem Gebiet dieses Kartenblattes befinden sich einerseits einige bekannte Steinschlaggroßgebiete, als auch langgestreckte flachere und bewaldete Hangbereiche und Siedlungen, bei denen von keinem größeren Steinschlagpotenzial auszugehen ist. Insgesamt ist in diesem Gebiet die Topografie durch die tief eingeschnittene Mosel und die zahlreichen abgehenden Nebentäler sowie einige markant herausgewitterte Felsvorsprünge als ausgeprägt zu beschreiben. Die Situation stellt hier also eine differenzierte Gemengelage dar, bei der die Modellierung und die Kartendarstellung auf großem Maßstab ihre Wirksamkeit zeigen kann.

Auf der Gefahrenhinweiskartendarstellung in Abbildung 87 sind die modellierten Steinschlaggebiete deutlich an ihrer roten Einfärbung also einem hohen Steinschlagpotenzial zu erkennen. Beispielsweise sind hier treffend die bekannten Steinschlaggebiete an der Brauselay, der Rabenlay, dem Kasteschekopp oder dem Valvigberg in der Nähe der Stadt Cochem ausgewiesen bei denen auch markant gehäufte Ereigniseinträge in der Rutschungsdatenbank des LGB verzeichnet sind. Neben diesen Großgebieten sind jedoch auch die zu erwartenden Flächen ohne Steinschlagpotenzial an den flacheren Hangabschnitten ohne Felsaufschlüsse, auf den Hochflächen und Siedlungen plausibel errechnet und zutreffend nicht ausgewiesen worden.

Kleinräumigere Steinschlaggebiete, die sich nur auf einzelne kleinere Felsaufschlüsse beziehen, sind aufgrund des großen Ansichtsmaßstabs (1:25000) und der hochaufgelösten Rasterdarstellung in dieser Karte noch nicht besonders gut zu erkennen. Wie die Kartenwerke des Kapitels 6.1.1 jedoch gezeigt haben, ist es in einem GIS-System auch mit dieser flächendeckenden Karte möglich bis auf einen sehr kleinen Maßstab hereinzuzoomen und so eine deutlich präzisere Aussagegenauigkeit zu erzielen. Die hier gezeigte Gefahrenhinweiskarte ist entsprechend in der Lage sowohl die Steinschlaggroßgebiete treffend in einer großräumigen Ansichtsdarstellung zu visualisieren und zudem gleichzeitig auch für spezielle

Fragestellungen oder für deutlich kleinräumige, lokale Hangabschnitte genauere Informationen zu liefern.

Da in dieser Dissertation die Entwicklung und Beschreibung des Modellierungsvorgangs im Vordergrund steht, sollen im Nachgang zu dieser Arbeit die weiteren erstellten Ergebnisse und Kartenwerke des Untersuchungsgebietes am Mittelrhein- und Moseltal gebündelt und angepasst von offizieller Seite veröffentlicht werden. Entsprechend werden die Ergebnisse der weiteren modellierten Kartenblätter im Rahmen dieser Promotionsschrift noch nicht vorabveröffentlicht. Daher gelten die hier beispielhaft gezeigten Darstellungen der flächenhaften Modellierungen als vorläufig und dürfen nicht ohne Zustimmung der Projektpartner des MABEIS-Projektes weiterverwendet werden. Es ist zu beachten, dass es sich bei der hier gezeigten Karte (vgl. Abb. 87) um eine Darstellungsform handelt, die sich im Aussehen von späteren Kartenwerken und Veröffentlichungen abweichen kann.

Aufgrund der bisher noch nicht abschließend getroffenen Übereinkunft der Projektpartner des MABEIS-Projektes bezüglich der Symbolisierung und maßstabsbezogenen Sichtbarkeit der Kartenwerke wurden in dieser Darstellung des Steinschlagpotenzials die automatisiert errechneten Vulnerabilitätssegmente der Verkehrswege noch nicht integriert. Die in dieser Arbeit in Ausschnitten gezeigten Darstellung der VulWay-Ergebnisse (z.B. Abb. 86 & 88) sind daher als Visualisierungen des Berechnungsprinzips und der Aussagegenauigkeit angedacht und sollten entsprechend den vorherigen Aussagen gegenüber der flächendeckenden Gefahrenhinweiskarten ebenfalls noch nicht eigenständig weiterverwendet werden.

Dass diese Daten bereits mit dem hier vorgestellten Ansatz flächendeckend durch die Modellierung des Steinschlagpotenzials am Mittelrhein- und Moseltal berechnet wurden, ist generalisiert in Abbildung 88 dargestellt. Dabei sind deutlich die, durch die Vektordarstellung auf dem Übersichtsmaßstab übergroß wirkenden, potenziell gefährdeten Infrastruktursegmente angezeigt, die markant die Flussverläufe vom Rhein und der Mosel nachbilden. Dabei ist wie der kleineren Kartenausschnitt auf der

Abbildung 88 verdeutlicht, eine solche großräumige Darstellung im Maßstab 1:2.500.000 nicht zielführend, da zum Teil kleine Segmente übertrieben vergrößert und gestreckt werden und somit in ihrer Aussage verfälscht werden. Grundsätzlich wird gerade auf dem kleinen Ausschnitt dabei jedoch deutlich, dass auch die automatisierte Segmentierung ausgehend aus den modellierten Sturztrajektorien bereits sehr präzise funktioniert und sich auf kleinem Maßstab so Infrastrukturbereiche differenziert ausgewiesen werden können.



Abb. 88: Flächendeckende Modellierung der VulWay-Segmente am Mittelrhein und Moseltal im Maßstab 1:2500000 mit typischem Beispiel für die lokale automatisierte Ermittlung eines gefährdeten Straßenabschnittes an der Mosel

6.2 Murgang

Äquivalent zur Ergebnispräsentation der Modellierungen der Steinschläge und Felsstürze werden die auch die Ergebnisse der Murgangsmodellierungen und deren Übertragbarkeit auf die Wirklichkeit zunächst mittels bekannten Fallbeispielen dargestellt. Da die Thematik der starkregeninduzierten Murgänge an den Flusstälern

in Rheinland-Pfalz ein wissenschaftlich bisher eher unbeachtetes Forschungsfeld und Ereignisfälle früher häufig fälschlicherweise zu anderen Massenbewegungsarten gezählt, sind bei weitem nicht so viele Ereignisfälle wie beispielsweise zu Steinschlägen bekannt oder beschrieben. Dies erfordert für die Validierung der Ergebnisse ein anderes Vorgehen als das in Kapitel 6.1.2 beschriebene Vorgehen für Sturzereignisse, sodass die Ergebnisse der Murgangsimodellierungen hauptsächlich an gut bekannten Beispielen aus den letzten Jahren geeicht werden konnten.

Im Rahmen der Untersuchungen für den Artikel: „Abfluss und Sedimenttransportsimulation von Starkregenereignissen am Oberen Mittelrheintal“ (HAGGE-KUBAT et al. 2020) als Vorabveröffentlichung für diese Promotionsarbeit wurden für ein Hangabschnitt am Oberen Mittelrheintal bei Henschhausen, bei dem es im Jahr 2016 zur Auslösung eines Doppelmurgangereignisses mit folgender Zugentgleisung gekommen war, als typisches Beispiel für ein solches Ereignis tiefergehend untersucht. Dabei wurden auf Basis von hochaufgelösten Modellierungen Starkregenereignisse sowie deren Abflussbildung in dem Untersuchungsgebiet beschrieben. Aufbauen auf verschiedenen Parameterstudien konnte so die Wirksamkeit der Robustheit der Modellierungen überprüft werden. Durch die Ergebnisse dieses Artikels und die gesammelten Erfahrungen konnte das in Kapitel 5.3.1 beschriebene Modellierungskonzept zur Ermittlung von Startzellen für Murgänge an den Hängen im Mittelrhein- und Moseltal entwickelt werden. Dieser Artikel basiert in veränderter Text- und Abbildungsform auf den Ergebnissen der gleichnamigen Masterarbeit des Autors. Das folgende Kapitel 6.2.1 - I beschreibt mit weiteren Ergänzungen die Ergebnisse dieser Studie.

Im Rahmen der Untersuchungen für den Artikel: „Multi-Methodological Investigation of the Biersdorf Hillslope Debris Flow (Rheinland-Pfalz, Germany) Associated to the Torrential Rainfall Event of 14 July 2021“ (HAGGE-KUBAT et al. 2022) als weitere Vorabveröffentlichung für diese Promotionsarbeit wurde durch einen interdisziplinären Ansatz eine aufgetretene Hangmure bei Biersdorf in der Eifel

betrachtet. Bei dem massiven Starkregenereignis vom 14/15.07.2021, dass in der Folge zur Ahrtalflut und der schwerwiegendsten Naturkatastrophe in der Geschichte des Bundeslandes Rheinland-Pfalz geführt hat, sind auch eine Vielzahl von Murgängen abgegangen, sodass in der Rutschungsdatenbank des LGB nun auch deutlich mehr Ereignisse dieses Typs verzeichnet sind (WEHINGER et al. 2022). Aufgrund des starken Fokus auf diese Ereignisse im Nachgang dieses katastrophalen Events wurde auch im MABEIS-Projekt einzelne der aufgetretenen Murgänge prioritär untersucht. Diese Murgänge sind sowohl im Prozessablauf als auch in den Auswirkungen aufgrund der vergleichbaren geologischen und morphologischen Situationen den aufgetretenen Murgängen an der Mosel und am Rhein sehr ähnlich und werden daher hier in diesem repräsentativen und umfassend untersuchten Fallbeispiel beschrieben. Die Ergebnisse aus diesem in englischer Sprache publizierten Artikel werden in Kapitel 6.2.1 - II wiedergegeben. Ausgehend von den Erfahrungen von diesen Fallbeispielen, wurden die Modellierungsergebnisse der in die Fläche gerechneten Modellierungen eingeschätzt und auf ihre Plausibilität geprüft

In Kapitel 6.2.3 wird anschließend exemplarisch eine Validierung der Ergebnisse der flächendeckenden Modellierung auf Basis von weiteren bekannten Fallbeispielen vollzogen. Das Kapitel 6.2.3 beschreibt dann abschließend ein Beispiel für eine Gefahrenhinweiskarte auf TK25-Blattmaßstab im Untersuchungsgebiet.

6.2.1 Fallbeispiele

I. Doppelmurgangereignis bei Henschhausen vom 25.06.2016⁶

Wie in Kapitel 3.5.3 angedeutet, ereigneten sich zwischen Oberwesel und Bacharach am Mittelrheintal in Folge einer in kurzen Abständen auftretenden Gewitterfolge am

⁶ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2020): Simulation von Abfluss und Sedimenttransport bei Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal. In: Mainzer geowiss. Mitt. 48: 7-32.

25.06.2016 zwei Murgänge in zwei kleineren Gerinnen in der Steillage. Infolge der Murgänge kam es zu einer Zugentgleisung mit Personenschaden auf der linksrheinischen Mittelrheinbahnstrecke. Dieses spezielle Doppelmurgangsereignis stellt eines der schwerwiegendsten Massenbewegungsereignisse der letzten Jahre in Rheinland-Pfalz dar. Im Rahmen einer Vorabveröffentlichung zu dieser Promotion wurden die Abflussbedingungen und murgangsauslösenden Faktoren zu diesem Ereignis untersucht und modelliert (HAGGE-KUBAT et al. 2020). Im Folgenden werden die daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt.

Das untersuchte Gebiet zwischen den Ortschaften Oberwesel im Norden und Bacharach im Süden gegenüber der Stadt Kaub auf der linksrheinischen Seite umfasst eine Fläche von knapp 4 km² und zieht sich circa 2 km direkt am Rhein entlang. An dieser Stelle existiert nur eine schmale Verebnung, auf der die Bahnstrecke und Bundesstraße 9 zwischen dem Ufer des Rheins und der aufragenden Felswand geführt werden. Das Projektgebiet des Artikels wurde um die Täler der Ereignisse nahe des Ortes Henschhausen festgelegt. Dabei wurden insgesamt vier größere Tiefenlinien und deren Wassereinzugsgebiete analysiert (Abb. 89, HAGGE-KUBAT et al. 2020).

In den beiden Tälern (1) und (2) ereigneten sich während des Niederschlagsereignisses die beiden Murgänge. Im Tal (3) befindet sich der Steinbruch „Grube Rhein“. Im Süden des Projektgebietes schließt sich das Tal (4) als Referenztal an, bei dem es beim betreffenden Niederschlagsereignis nicht zu einer Murgangsauslösung kam.

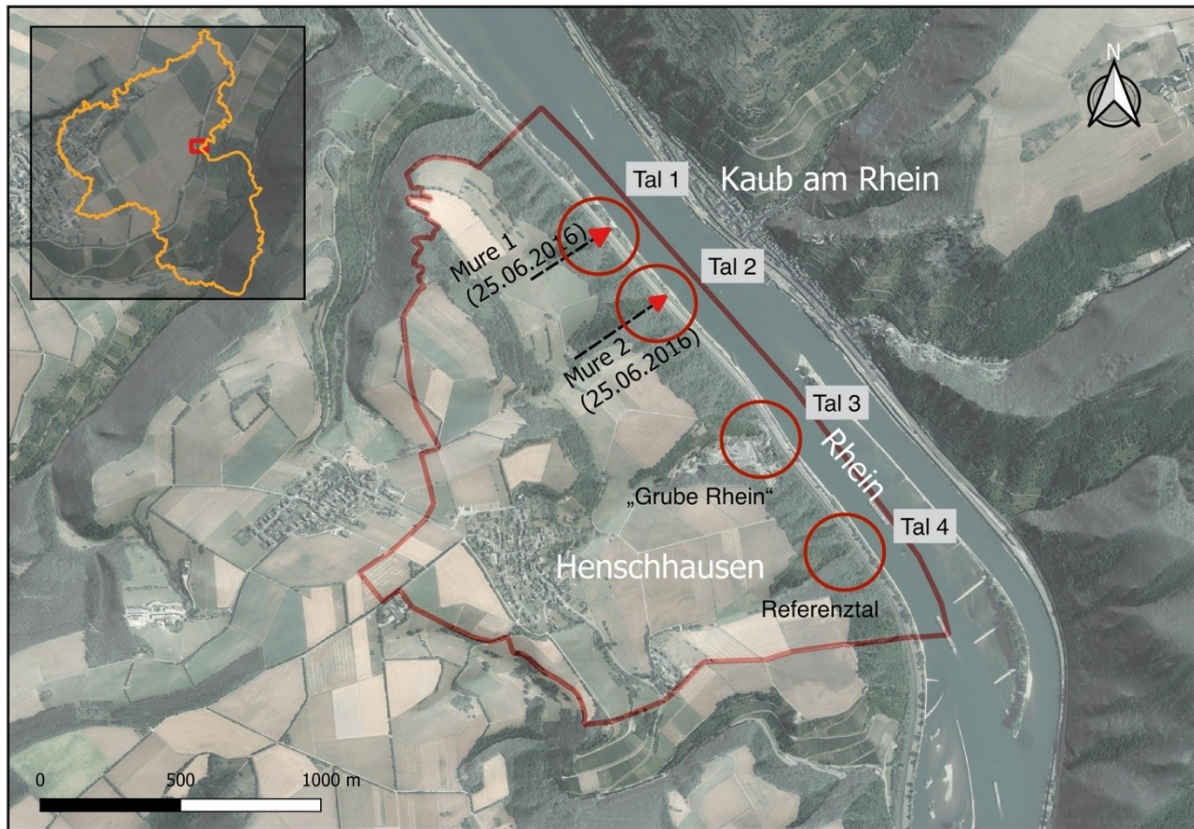


Abb. 89: Übersichtskarte über das Projektgebiet bei Henschhausen im Oberen Mittelrheintal. Die Karte zeigt die beiden Seitentäler des Rheins (1) und (2), in denen am 25.06.2016 jeweils ein Murgang eingetreten ist, sowie die Lage des Tälchens (3) mit der Grube Rhein und das Referenztal 4 (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Bei einer Analyse der Gebietsmorphologie (Abb. 90) lässt sich deutlich erkennen, dass vom Rhein aufsteigend die Steillage auf Höhe von ca. 220 Metern unvermittelt in eine flachere Plateaulage übergeht. Diese höher liegende Terrassenfläche mit einer Neigung von 0 - 20 Grad ist deutlich fruchtbarer als der eigentliche Hangbereich. Hier sind Braunerden auf Löss-Substrat verbreitet, weshalb diese Bereiche landwirtschaftlich intensiv genutzt werden. Nach einer weiteren kleinen und deutlich weniger ausgeprägten Steillage schließt sich wiederum eine ebenere, landwirtschaftlich genutzte Fläche im Norden sowie der Ort Henschhausen im Süden an. Dieses Dorf ist der höchste Punkt im Projektgebiet auf einer Höhe von ca. 360 Metern. Das Projektgebiet endet in südwestlicher Richtung hinter dem Dorf. Die hier beschriebene Topographische Situation ist typisch für die Steilen Einzugsgebiete am

Mittelrhein und lässt sich auf viele ähnliche Hanglagen adaptieren (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

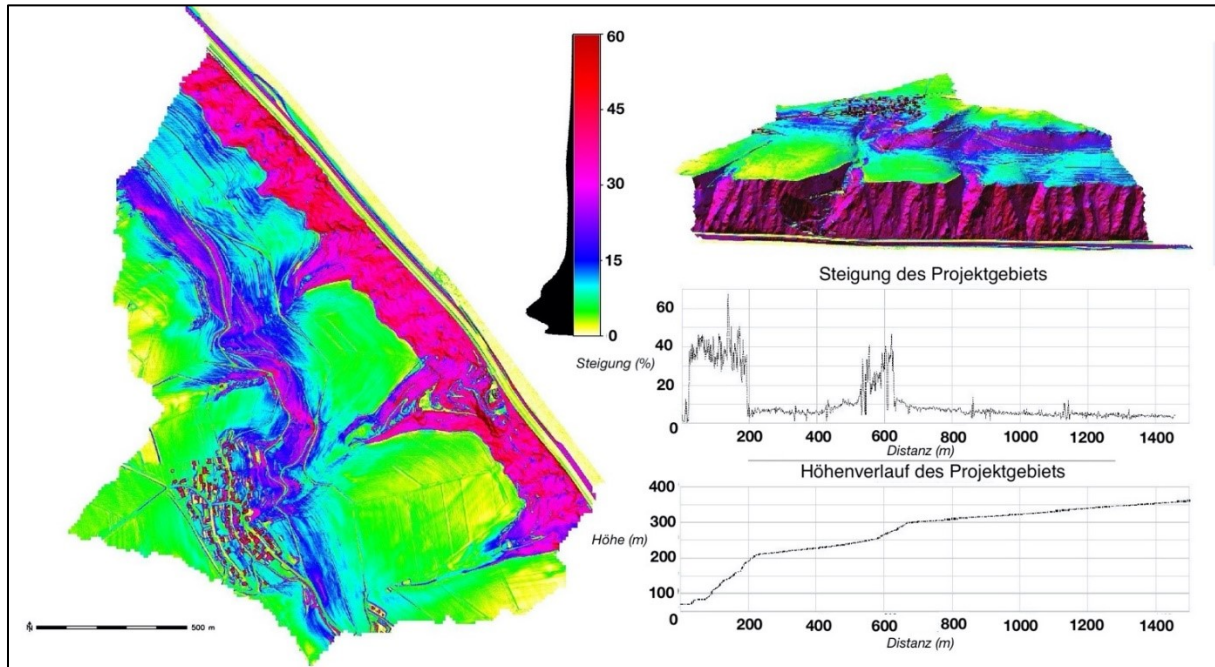


Abb. 90: Steigung und Höhenverlauf des Projektgebiets bei Henschhausen (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Die Wetterlage stellt an diesem Tag insofern eine Besonderheit dar, als dass über mehrere Stunden verteilt vier markante konvektive Gewitterzellen mit erheblichen Niederschlagsmengen über das Gebiet hinwegzogen. Aus den RADOLAN-Daten des DWD (5 Minuten-Daten) ist dabei zu entnehmen, dass die dritte Gewitterzelle den mit Abstand stärksten Niederschlag mit insgesamt ca. 55 mm/h mit sich brachte. Es ist davon auszugehen, dass in Kombination mit dem durch die beiden vorherigen Niederschlagsereignisse gesättigten Boden kaum noch Wasser auf der Hochfläche infiltriert werden konnte, sodass vermutlich nahezu das gesamte Niederschlagswasser als Oberflächenabfluss durch die Tiefenlinien abgeführt wurde. Die anströmenden Wassermassen rissen daraufhin große Mengen von Lockergestein mit und lagerten sie als Schuttkegel auf den unterhalb der Täler liegenden Bahngleisen und der Bundesstraße 9 ab. Dieser Schieferschutt ist als Erosionsmaterial in den Steillagen und

vor allem den Gerinnen im Projektgebiet in großen Mengen vorhanden. In Folge dieser Murgänge kam es am Morgen des 25. Juni 2016 zur Entgleisung eines fahrenden Zuges beim Tal (1) (Abb. 91; vgl. Anhang G) HAGGE-KUBAT et al. 2020).



Abb. 91: Entgleister Zug in Folge eines Starkregen induzierten Murgangs am 25.06.2016 bei Bacharach (Foto: R. Kirchhoff, 25.06.2016).

In der vorgestellten Studie wurden verschiedene Simulationen des Starkregenereignisses mit dem in Kapitel 4.5.2 vorgestellten GRASS-GIS Modell r.sim.water mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und Parameterkombinationen durchgeführt. Dabei wurden Simulationen für den tatsächlich aufgetretenen Starkregen allein auf Basis der meteorologischen Daten und der Topographie (digitales Geländemodell), sowie Simulation zusätzlich mit Implementation von Landnutzungs- und Bodendaten und entsprechend angepassten Manning-Stricker-Werten im Projektgebiet durchgeführt. Weiter wurde ein differenzierter Niederschlagsüberschuss berücksichtigt, der aus den DWD-

Wetterdaten und den abgeschätzten Bodenverhältnissen der betreffenden Stunden abgeleitet wurde. Die Simulation des Oberflächenabflusses erfolgte dabei für einen Starkniederschlag von 60 Minuten Dauer. Für die betrachteten Täler ergeben sich folgende Ergebnisse (Abb. 92, HAGGE-KUBAT et al. 2020):

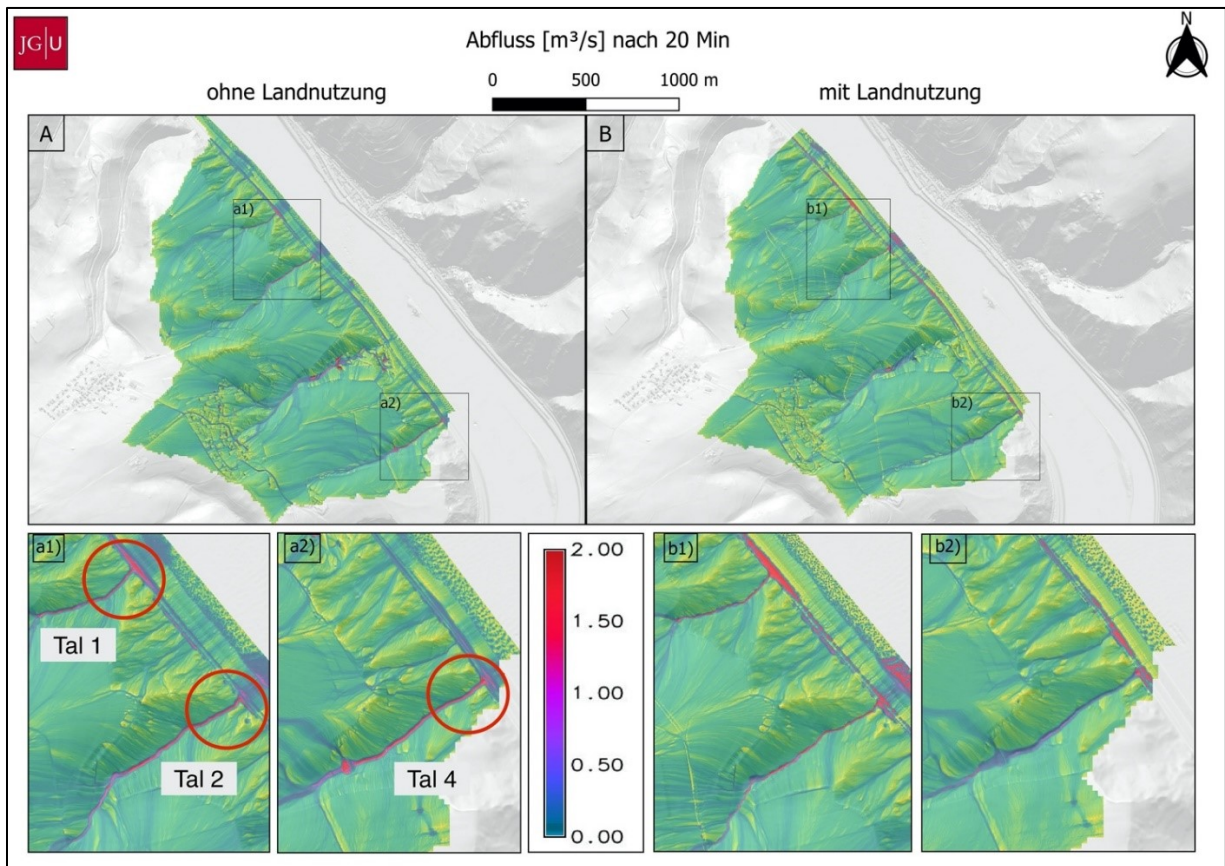


Abb. 92: Vergleich der Abflusssimulation in $[m^3/s]$ (farbige Skala) nach 20 Minuten ohne Land- und Bodennutzung (Bild A) und mit Land- und Bodennutzung (Bild B) mit Vergrößerung der verschiedenen Talsysteme: Täler (1) und (2): Diese sind in den Bildern a1) und b1) vergrößert dargestellt und zeigen in den rot eingefärbten Bereichen den höheren Abfluss ohne Berücksichtigung der Landnutzung. Tal (4) ist in den Vergrößerungen a) und b2) dargestellt. Im Unterschied zu den Tälern (1) und (2) ergibt sich beim Tal (4) mit Berücksichtigung der Landnutzung ein geringerer Abfluss (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Tal (1) und (2): Im Falle der beiden Täler, in denen tatsächlich Murgänge aufgetreten sind, ergibt sich bei Berücksichtigung der Landnutzung ein markant höherer Abfluss.

Tal (3): Für das Tal (3) der „Grube Rhein“ ist die Ausbreitung des Wassers in der Simulation mit implementierter Land- und Bodennutzung durch die Kenntnis und Berücksichtigung eines vorhandenen Drainagesystems in großem Maße

zurückgegangen, sodass innerhalb des Tagebaugeländes im Vergleich zur Simulation ohne Landnutzung keine Stellen mit erhöhtem Abfluss identifiziert werden können. Das entspricht der realen Situation am Ereignistag, an dem sich keine nennenswerteren Schäden im Bereich des Tals (3) feststellen ließen.

Tal (4): Beim Referenztal (4) verringert sich der Abfluss bei Berücksichtigung der Landnutzung. Tatsächlich ist hier kein Murgang aufgetreten.

Die Variante der Simulation des Oberflächenwasserabflusses mit Berücksichtigung angepasster Manning-Strickler Werte kommt im Vergleich zu den Berechnungen ohne diesen Einfluss entsprechend also zu deutlich realitätsnäheren und präziseren Berechnungen. Somit konnten die Abflussbedingungen des Starkregenereignisses vom 25.06.2016 plausibel simuliert werden. Die Abbildung 93 zeigt das Projektgebiet mit den Angepassten Modellierungen in der 3D-Perspektive mit Sicht aus Norden.

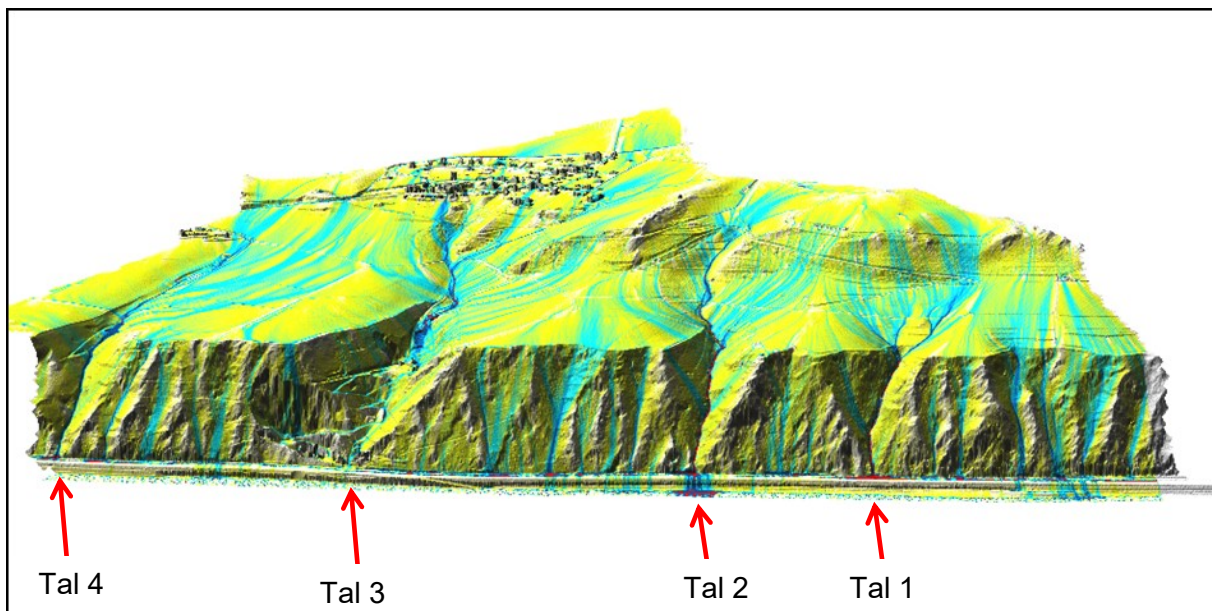


Abb. 93: 3D-Ansicht des modellierten Oberflächenabflusses aus nördlicher Perspektive nach 20 Minuten mit integrierter Vegetations- und Bodennutzung (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Um zu überprüfen, ob die Anwendung der in Kapitel 5.3.2 von TOGNACCA (1999) aufgestellten Formel zu vergleichbaren Ergebnissen wie die in dieser Studie erarbeiteten Simulationsergebnisse führt, wurden alle hier relevanten Täler entsprechend der in Kapitel 5.3.2 vorgestellten Formel generalisiert durchgerechnet.

Die Eingangswerte wie der durchschnittliche Schuttdurchmesser oder die Dichte des vorherrschenden Gesteins, welche für die Berechnung der Formel von TOGNACCA (1999) benötigt werden, wurden dabei aus der Literatur (vgl. Kap. 5.3.2) entnommen oder aufgrund der Feldbegehungen und Fotos der Murgänge geschätzt. Als simulierter Abflusswert für das einzelne Gerinne wurde für jedes betreffende Tal in der Studie ein Durchschnittswert für den Abfluss aus den Rasterkarten der Simulationen nach 60 simulierten Minuten verwendet. Dieser Wert wurde mit dem berechneten minimal kritischen Wert für die Entstehung eines Murgangs durch progressive Erosion für das betreffende Gerinne verglichen (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

Abbildung 94 stellt diesen Vergleich graphisch dar. Dabei stellt die orange Linie den Durchschnitt des minimalen Oberflächenzufluss dar, der für die Entstehung eines Murgangs in den betreffenden Tälern rechnerisch nötig ist. Dabei ist zu erwähnen, dass dies anders als in der im Folgenden vorgestellten flächendeckenden Modellierung keine rasterzellenscharfe Auswertung darstellt. Die in dieser Studie angewendete Methode stellt also eine Generalisierung dar, die aufbauend auf den Ergebnissen dieser lokalen Studie im weiteren Verlauf weiterentwickelt wurde.

Es zeigt sich eine erkennbare Übereinstimmung zwischen den Modellierungsergebnissen mit den im Gelände vorgefundenen Ausprägungen. Die Werte, welche gebietspezifisch berechnet wurden, liegen im Vergleich zu den simulierten Werten der „realitätsnäheren“ Simulation mit Landnutzung, in einem annähernd passenden Verhältnis. So werden für die Täler (1) und (2) die nach TOGNACCA (1999) berechneten minimalen Abflusswerte für die Entstehung von Murgängen in diesen Simulationen übertroffen, während im Referenztal (4) diese unterschritten werden. Dies spiegelt die tatsächliche Situation während der Ereignisse

am 25.06.2016 wider und bestätigt die Anwendbarkeit der hier durchgeführten Simulation (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

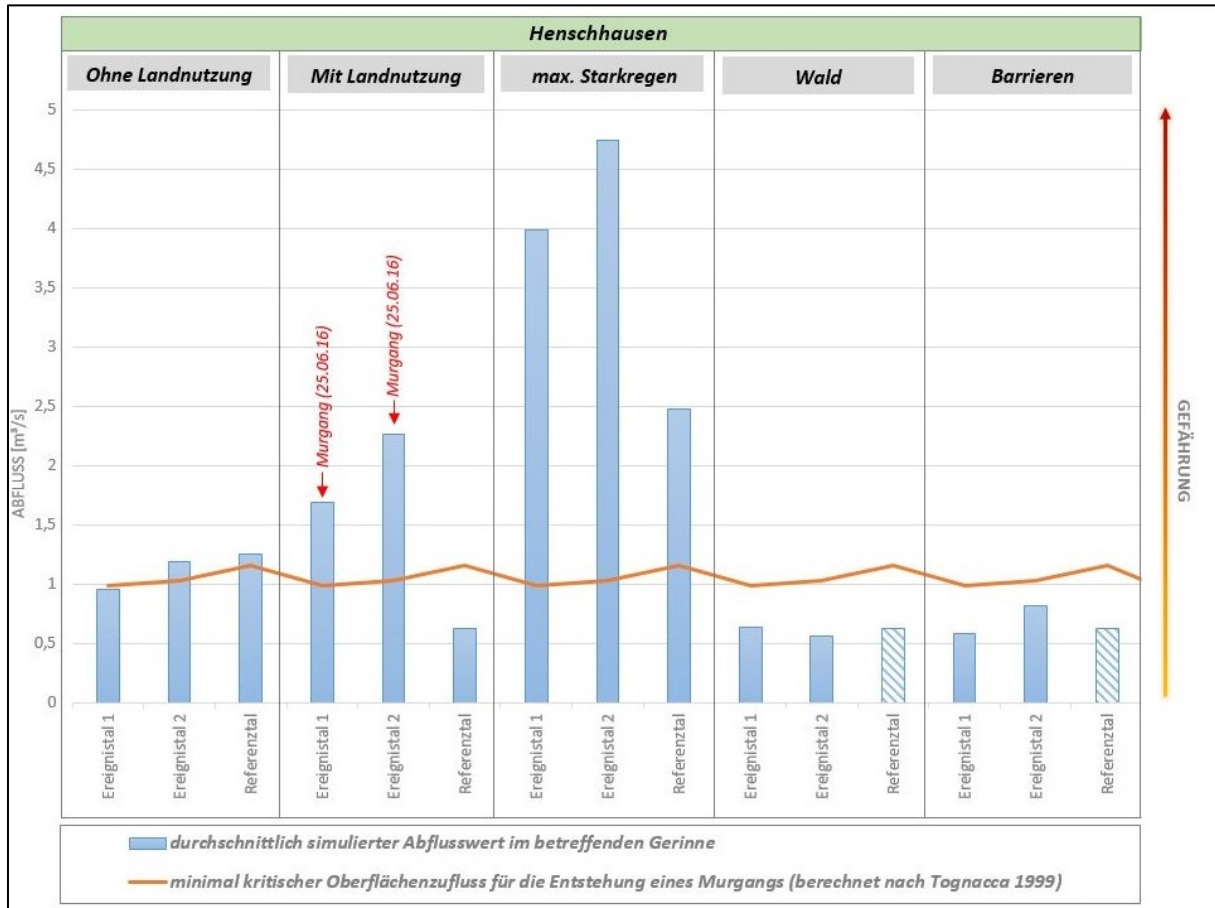


Abb. 94: Vergleich der verschiedenen Abflusssimulationen mit dem minimal kritischen Oberflächenzufluss (q_{De}) nach Tognacca (1999) für die Entstehung eines Murgangs (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Demgegenüber ergibt die Simulation ohne differenzierte Rauigkeitswerte im Vergleich zu den berechneten Werten nach der Formel von TOGNACCA (1999) andere Ergebnisse. Hierbei werden die Gerinne nicht den realen Auswirkungen entsprechend modelliert, sodass beispielsweise im Referenztal (4) der kritische Wert überschritten und im Ereignistal (1) unterschritten wird. Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass einige Parameter bei der Simulation nur valide geschätzt werden konnten, so dass die Ergebnisse unvermeidbare Unschärfen enthalten. Dies muss grundsätzlich bei allen

weiteren Analysen, die auf den beschriebenen Analysen aufbauen, berücksichtigt werden.

Nachdem die im Jahr 2016 aufgetretenen Murgänge bei Henschhausen plausibel simuliert wurden, wurden in der Studie weiter die Auswirkungen bei Veränderung einzelner Parameter auf das Modell und somit auf das angenommene Abflussgeschehen und auf die Gefahr der Entstehung von Murgängen geprüft. Motivation hierfür ist es, für durch Murgänge gefährdete Flächen, mögliche Vorsorgemaßnahmen zu prüfen bzw. zu entwickeln. Für die Vorwärtssimulation wurden dabei jeweils ein Parameter verändert, während die anderen Werte konstant blieben, um so die Effekte der einzelnen Veränderungen genau zuordnen zu können. Konkret wurden die Werte für die Niederschlagsmenge, für die Landnutzung sowie die Geländetopographie als Eingriffe variiert (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

Variation der Niederschlagsmenge

Für den Parameter Niederschlagsmenge wurde ein Extremwert für eine Starkregenereignis, der bei einem Starkregenereignis im Jahr 2014 in Münster gemessen wurde und der zusätzlich auf eine Stunde skaliert wurde, in Ansatz gebracht (vgl. Heuer 2014). Hierbei zeigte die Simulationsrechnung, dass bei einem deutlich erhöhten Eingangsniederschlag, also einer markanten Verstärkung des Starkregens, auch Gebiete im Projektgebiet von sehr starkem Abfluss betroffen sind, die in den vorherigen Simulationen noch nicht in dem Maße betroffen waren. Es würden entsprechend der Simulation alle vier Haupttäler und weitere kleinere Täler im Projektgebiet von massivem Abfluss betroffen sein und dementsprechend würde es auch in allen vier Tälern zu massiver Bachbetterosion und zu einer theoretischen Murgangsmobilisierung kommen (vgl. Abb. 95, HAGGE-KUBAT et al. 2020).

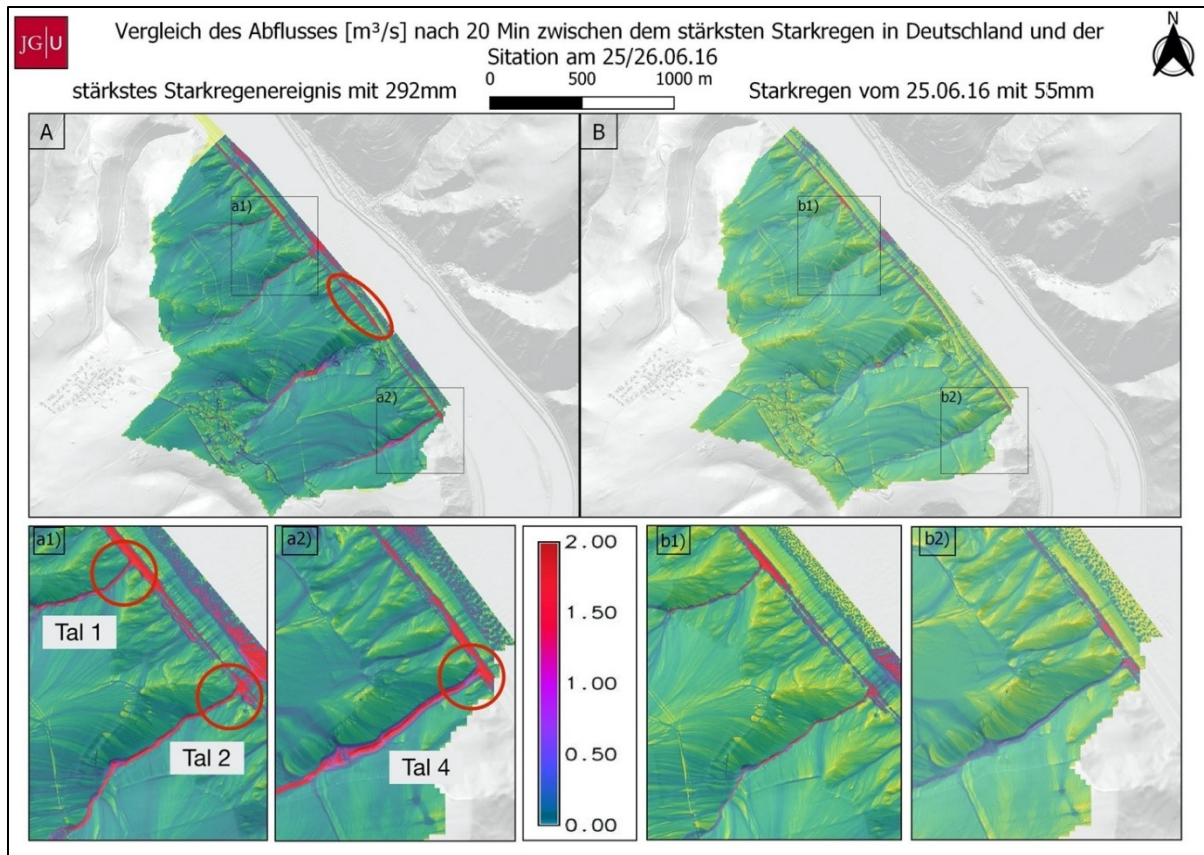


Abb. 95: Vergleich des Abflusses [m^3/s] zwischen der Ereignissituation vom 25.06.2016 und dem Starkregen von Münster 2014 (HAGGE-KUBAT et al. 2020)

Variation der Landnutzung

Zur Prüfung des Einflusses von Änderungen der Landnutzung bzw. der Vegetationsbedeckung auf den Oberflächenwasserabfluss wurde auf der Hochfläche oberhalb der Tiefenlinien das Vorhandensein eines Waldes angenommen und modelltechnisch implementiert. Waldflächen weisen im Vergleich zu Wiesenflächen eine deutlich höhere Oberflächenrauigkeit und Strömungswiderstand auf. Durch die Implementation von dieser Waldfläche vor den Einläufen in die Täler der Steillage wurde in der Simulation eine deutliche Verringerung des Abflusses pro Zeitschritt in den Ereignistälern erreicht. Einhergehend mit dieser Abflussreduzierung ist auch die Verringerung der Gefahr für das Auftreten von Murenereignissen in diesen Tälern zu sehen (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

Der Versuch, diese Ergebnisse auch bei einer Verringerung und Aufteilung der Waldfläche in kleinere unabhängig voneinander angeordnete Gebiete zu erzielen, wurde jedoch nicht von der Simulation bestätigt. Es muss also davon ausgegangen werden, dass für eine effektive Reduktion des Abflusses die Menge und räumliche Verteilung einer solchen Waldfläche entscheidend ist. Eine generelle Empfehlung der Landnutzungsänderung hin zu Waldbepflanzung in den oberen Teilen der Einzugsgebiete lässt sich an dieser Stelle jedoch noch nicht ableiten. Dies müsste den lokalen Gegebenheiten entsprechend genauer analysiert und an weiteren Gebieten validiert werden.

Variation des digitalen Geländemodells

Die dritte Form der Variation der Eingangsparameter des Modells wurde in Form der lokalen Veränderung des digitalen Geländemodells vollzogen. Hierbei wurden mittels der Höhenanpassung von kleineren Bereichen auf der Hochfläche künstliche Barrieren und Kanäle erschaffen, die in der Simulation die Abflussrichtung des Wassers beeinflussen und somit einen Teil des Wassers aus den Ereignistälern herausleiten sollten (vgl. Anhang I). Diese Bearbeitung ist im Vergleich zu den vorhergehenden Variationen deutlich komplexer, sodass dies im Rahmen dieser Studie nur in Ansätzen geleistet werden konnte. So liegen die Abflussbahnen auch auf der Hochfläche bereits in morphologischen Tiefenlinien, sodass es schwierig ist, das Wasser entgegen dem Gefälle durch eine weitere Vertiefung aus diesen herauszuleiten. Es wurde eine Konstruktion aus einem Meter hohen Mauern und ebenso tiefen Kanälen gewählt. Diese Abflussumleitung hatte in der Simulation zum Teil den gewünschten Effekt. In den beiden Ereignistälern kann es daraufhin zu deutlich verringerten Abflusswerten im Vergleich zur Ausgangssituation (Abb. 96, HAGGE-KUBAT et al. 2020).

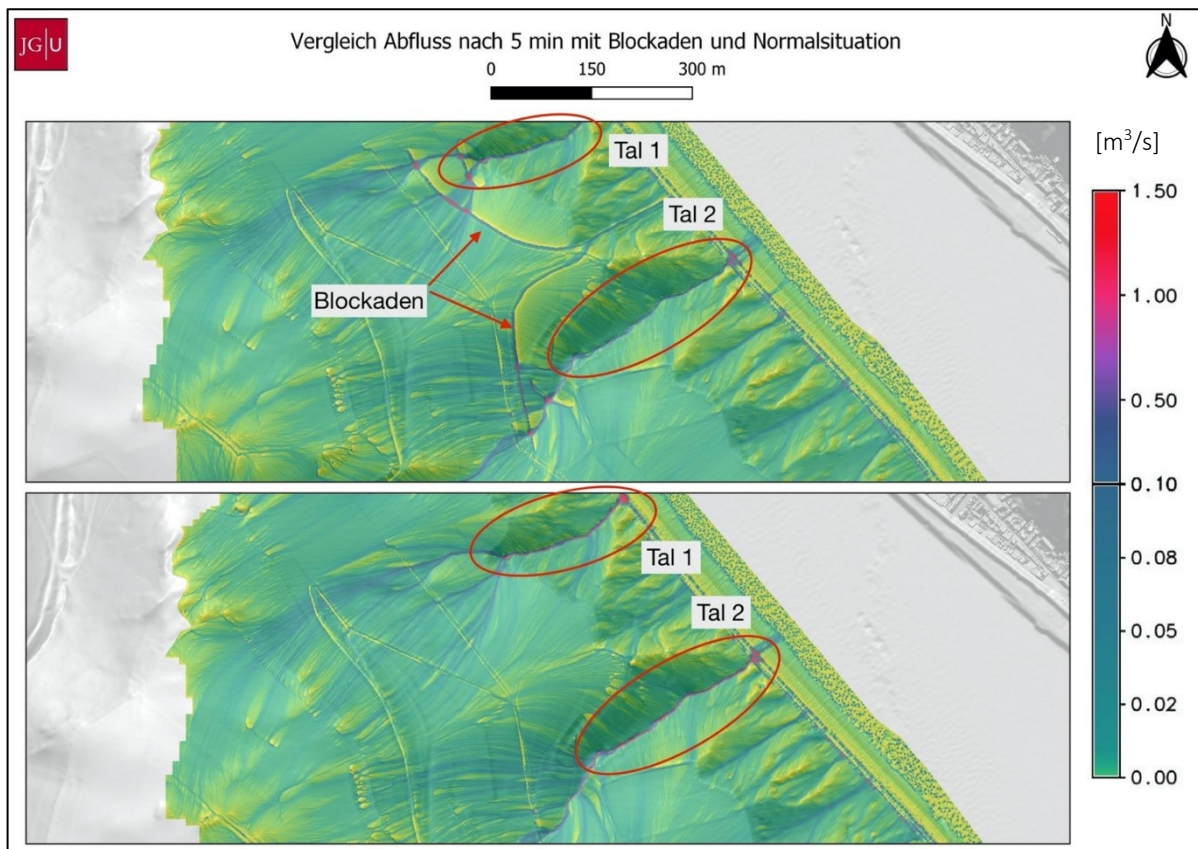


Abb. 96: Vergleich der Simulation des Oberflächenabflusses bei Änderung des Geländemodells: Das Bild oben zeigt das veränderte Modell mit Implementierung von zwei sichelförmigen Blockaden (Kanäle und Mauern). Aus dem veränderten Abfluss (oben) resultieren im Vergleich zum vorhandenen Gelände (unten) geringere Abflüsse in die Täler (1) und (2).

Es ist unbedingt zu berücksichtigen, dass bei einer effektiven Reduzierung des Wassers aus den beiden Ereignistälern ein Oberflächenabfluss in andere Bereiche resultiert. Je nach Geländesituation kann hierdurch nicht in jedem Fall die Gefahr einer Mure gebannt werden, da sich der Abfluss nur örtlich verlagert. Allerdings ist dieser Ansatz dennoch weiter zu verfolgen, da das Risiko bzw. die Vulnerabilität auch von der Geländenutzung (Bebauung, Infrastruktur) abhängt. Das heißt, dass die Folgen eines Murgangs mit zu berücksichtigen sind und daher eine „Umleitung“ der Wassermassen in Bereiche mit weniger kritischer Nutzung im Einzelfall sinnvoll sein kann (HAGGE-KUBAT et al. 2020).

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie wurde der Ansatz wie im Kapitel 5.3 beschrieben, auf eine rasterzellenscharfe Auswertung bei gleichzeitiger Skalierbarkeit

auf große Gebiete erweitert. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind für das Gebiet um Henschhausen im Folgenden beschrieben.

Wie Abbildung 97 zeigt, werden die beiden betroffenen Murgangstälchen von der flächendeckenden Modellierung als Kombination aus Abfluss und Murgangsmodellierung klar und treffend erkannt. Die Abbildung stellt hier die Situation bei einem Starkregen von 45mm/h und einem Schuttdurchmesser von 20cm dar. Diese Werte sind gut mit den zuvor beschrieben tatsächlich aufgetretenen Verhältnissen vergleichbar und untermauern dadurch die Modellierungsergebnisse. Entsprechend der in Tabelle 11 aufgezeigten Symbolisierung sind diese beiden Tiefenlinien vom Modell in Bezug auf die Murgangsauslösung als hochgefährdet ausgewiesen. Dabei ist positiv anzusehen, dass sowohl das Referenztal als auch die Tiefenlinie der Grube Rhein, bei der es im Juni 2016 nicht zu Auslösung eines Murgangs gekommen ist, treffend auch in der flächendeckenden Modellierung nicht „anspringen“ und es keinen Hinweis auf eine potenzielle Murgangsauslösung in dieser Parameterkombination gibt. Entsprechend positiv sind diese Ergebnisse in Bezug auf die Aussagegenauigkeit der flächendeckenden Murgangsmodellierung anzusehen. Durch das Modell ist es gelungen, ohne genauere Vorkenntnisse oder speziell auf die hier aufgetretenen Ereignisse, die beiden korrekten Täler zu identifizieren und auch im Vergleich zu den umliegenden Gerinnen gefahrentechnisch einzuschätzen. Grundsätzlich auffällig ist, darüber hinaus, dass in dem in Abbildung 97 dargestellten Gebiet kein weiteres Tal im Bezug auf die Murgangsauslösung hoch gefährdet klassifiziert wurde. Entsprechend der Ereignissdokumentation ist dies treffend mit der Rutschungsdatenbank des LGB in Verbindung zu bringen, die in diesem Gebiet keine weiteren Einträge mit dem Prozesstyp Murgang ausweist.

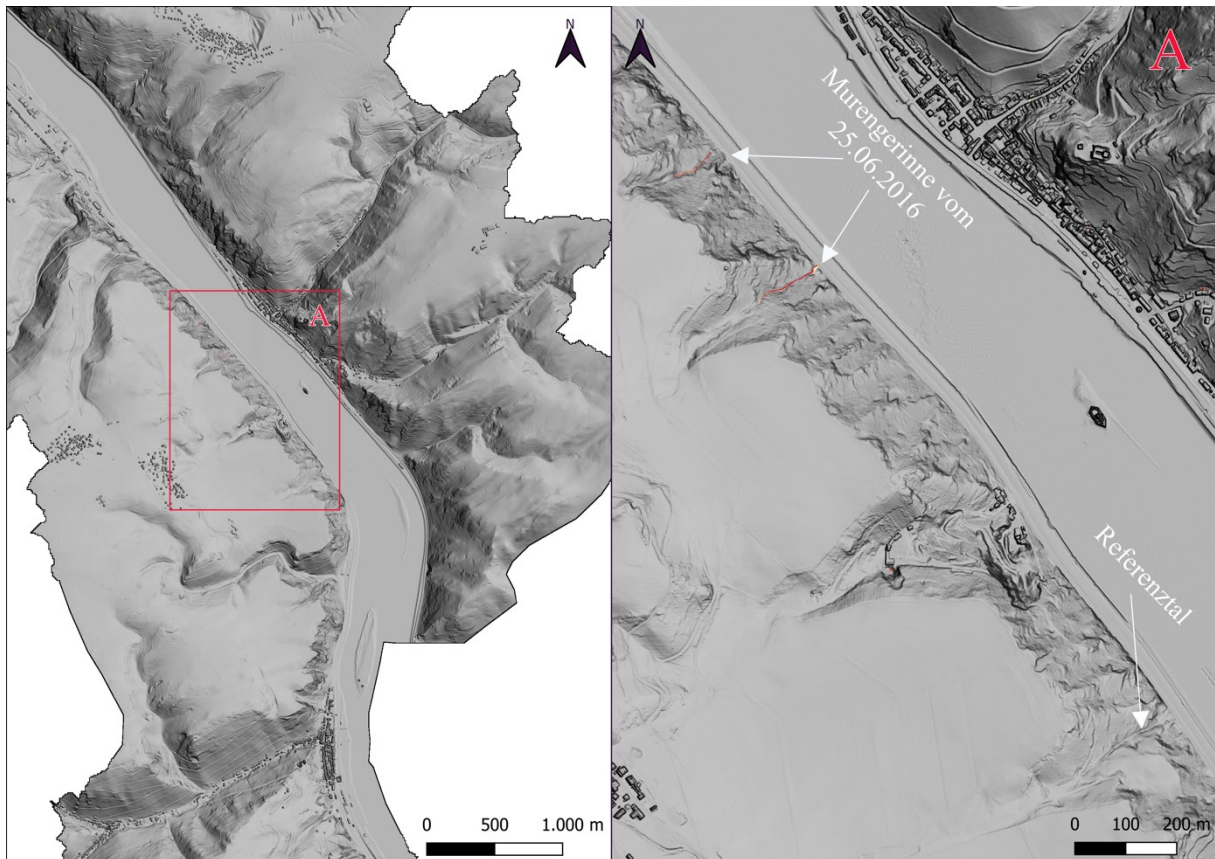


Abb. 97: Automatisierte Murgangsmodellierung der Murgangsgerinne bei Henschhausen

II. Hangmure in Biersdorf am See (Eifel)⁷

Das verheerende Starkregenereignis vom 14. und 15. Juli 2021 über dem westlichen Mitteleuropa, das unter anderem zu der Hochwasserkatastrophe im Ahrtal führte, löste auch in der umliegenden Eifel diverse hangbedingte Massenbewegungen aus (DIETZE & OZTURK 2021, WEHINGER 2022, DIETZE et al. 2022). In der hier beschriebenen Fallstudie wurde eine bei dem Niederschlagsereignis ausgelöste Hangmure in Biersdorf am See mit einem umfassenden geomorphologisch-geophysikalischen

⁷ Dieses Kapitel basiert auf dem Artikel: 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. In: Geoscience: 12: 245-263.

Ansatz tiefergehend erforscht und die Potenziale des vorgestellten Modellierungsansatzes am konkreten Beispiel validiert. Dabei stellt diese Hangmure ein exemplarisches Beispiel dar, welches in ähnlicher Form und Ausmaß dutzendfach an diesem Tag in der Eifel aufgetreten ist (WEHINGER et al. 2022). Auch im Projektgebiet am Mittelrhein- und Moseltal ist diese Form von Ereignissen bei heftigen Starkregen zu erwarten und in der Form schon häufiger aufgetreten. Im Rahmen einer Vorabveröffentlichung zu dieser Promotion wurden die Abflussbedingungen und murgangsauslösenden Faktoren zu diesem Ereignis untersucht und modelliert (HAGGE-KUBAT et al. 2022). Dabei wurden in der Studie kombinierte Feldstudien mittels elektrischer Widerstandstomographie (ERT), Direct Push Hydraulic Profiling (HPT) und Sedimentkernbohrungen zu Erkundung des oberflächennahen Untergrundes mit UAV-generierter Photogrammetrie gekreuzt, um die Eingangsparmeter für die Murgangmodellierung zu definieren und am Beispiel hochgenau zu simulieren. Im Folgenden werden die daraus resultierenden Untersuchungen und Ergebnisse als Fallbeispiel detailliert wiedergegeben.

Situation

In den Abendstunden vom 14. auf den 15. Juli 2021 verursachten mehrere Stunden starken Regens im kleinen Ort Biersdorf am See eine Hangmure mit einem initialen Hangabriss von ca. 6 m Tiefe und 15 m Breite. Der anschließend verflüssigte schlammige Murgang bewegte sich 150 Meter hangabwärts in ein kleines Tal und überschwemmte dabei ein glücklicherweise verlassenes Haus und die lokale Dorfstraße mit bis zu 3 m mächtigen Lockersedimenten (Abbildung 98, HAGGE-KUABT et al. 2022). Im Transit- Ablagerungsbereich und ist es dabei zu den typischen großen Korngrößenunterschieden, die von feinkörnigem Bodenmaterial bis hin zu großen mobilisierten Blöcken reichen, und keiner erkennbaren Sortierung der Ablagerung gekommen. Aufgrund dieser Feldspuren und Ablagerungsmerkmale konnte das untersuchte Ereignis als Hangmure nach HUNGR et al. 2014 klassifiziert werden. Die

Spuren des Ereignisses sind noch immer deutlich im Gelände sichtbar und weisen auf nachhaltige Auswirkungen auf die Hangmorphologie hin. Obwohl zum Zeitpunkt des Ereignisses glücklicherweise unbewohnt, war das Haus zum Zeitpunkt der Studie einsturzgefährdet und langfristig unbewohnbar. Die unterliegende Kreisstraße musste als Sofortmaßnahme mittels einer 2 Meter hohen Gabionenwand gegen weiteres nachrutschendes Material gesichert werden (HAGGE-KUBAT et al. 2022).



Abb. 98: Luftbild des Hangmure in Biersdorf am See vom 14.07.2021 (Aufnahme vom 02.02.2022). A Blick in den Abrissbereich. B Blick bergab auf die Auslaufstrecke. C Murgangsablagerungen auf der Gemeindestraße (Fotos: A. Weiler, aufgenommen am 15. Juli 2021, HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Das kleine Dorf Biersdorf liegt in der westlichen Eifel in der Nähe der Kreisstadt Bitburg. Das Gebiet um Biersdorf besteht aus mäßig steilen, landwirtschaftlich genutzten Hügeln und steilen und tief eingeschnittenen Tälern. Die geomorphologische Situation ist typisch für diese Region, die durch Taleintiefungen

im gesamten Quartär gekennzeichnet ist (Hagge-Kubat et al. 2022 nach MAYER & STETS 2007). Der Hangmurgang ereignete sich an einem steilen (28 % Neigung im Mittel), extensiv genutzten, nach Süden exponierten Hang, der direkt hinter einigen Häusern in der Nähe des Kannenbachs liegt (Abb. 99, E). Das Untersuchungsgebiet der Studie umfasste dabei den Hangabschnitt mit dem dazugehörigen Einzugsgebiet hangaufwärts. Bemerkenswerte sind zusätzlich drei Pfade, die den Hang in seinem oberen Drittel parallel kreuzen und einen anthropogenen Einfluss auf die Hangmorphologie markieren (Abb. 99, E). Direkt unterhalb des mittleren Wegs befindet sich die obere Abrisskante der Hangmure (HAGGE-KUBAT et al. 2022).

Die Geologie um Biersdorf wird von niedertriassischen Ton- und Sandsteinen sowie Kalksteinen dominiert, die nach Südosten sanft abfallend sind (DITTRICH 2011). Der Hangmurgang selbst liegt an der stratigraphischen Grenze zwischen dem Oberen Buntsandstein (upB) – bestehend hauptsächlich aus stark verwitterten feinkörnigen roten Ton- und Sandsteinen im Westen – und dem Unteren Muschelkalk (lowM) – bestehend aus hellgrauen Tonen, Mergel und Kalksteine im Osten (Abbildung 99, D). Südlich von Biersdorf schließen sich der Mittlere und der Obere Muschelkalk (midM, upM) konkordant an. Die geologische Karte zeigt um Biersdorf auch eine Reihe von in Nord-Süd-Richtung streichenden Störungen an (DITTRICH 2011). Unmittelbar unter dem untersuchten Hangmurgang (Abbildung 99, D) befindet sich eine dieser nach Osten abfallenden Aufschiebungen, die hier die Grenze zwischen Oberem Buntsandstein und Unterem Muschelkalk markiert. Die Grenze ist auch durch deutliche Farbänderungen im Gelände im Hangabriss sichtbar (Abb. 98, A).

Wetterlage am 14. Juli 2021

Niedriger Luftdruck beherrschte die Wetterlage an den Tagen vom 12. bis 14. Juli 2021 über Mitteleuropa (Tief „Bernd“). In Verbindung mit einem sich langsam aus Frankreich nähernden Tiefdruckgebiet gewaltigen Ausmaßes wurde die troposphärische Situation mit zunehmender Instabilität geschichtet. Warme und sehr

feuchte Luftmassen gelangten aus dem Mittelmeerraum in einer Drehbewegung um das ausgeprägte Tiefdruckgebiet nach Westdeutschland. In den westlichen Mittelgebirgen des Rheinischen Schiefergebirges (z. B. Sauerland, Westerwald, Eifel, Ardennen) kam es aufgrund erzwungener Hebung (dynamisch orographisch) und Staueffekte zunächst regional und später großflächig zu anhaltenden Starkniederschlägen (JUNGHÄNDL et al. 2021)

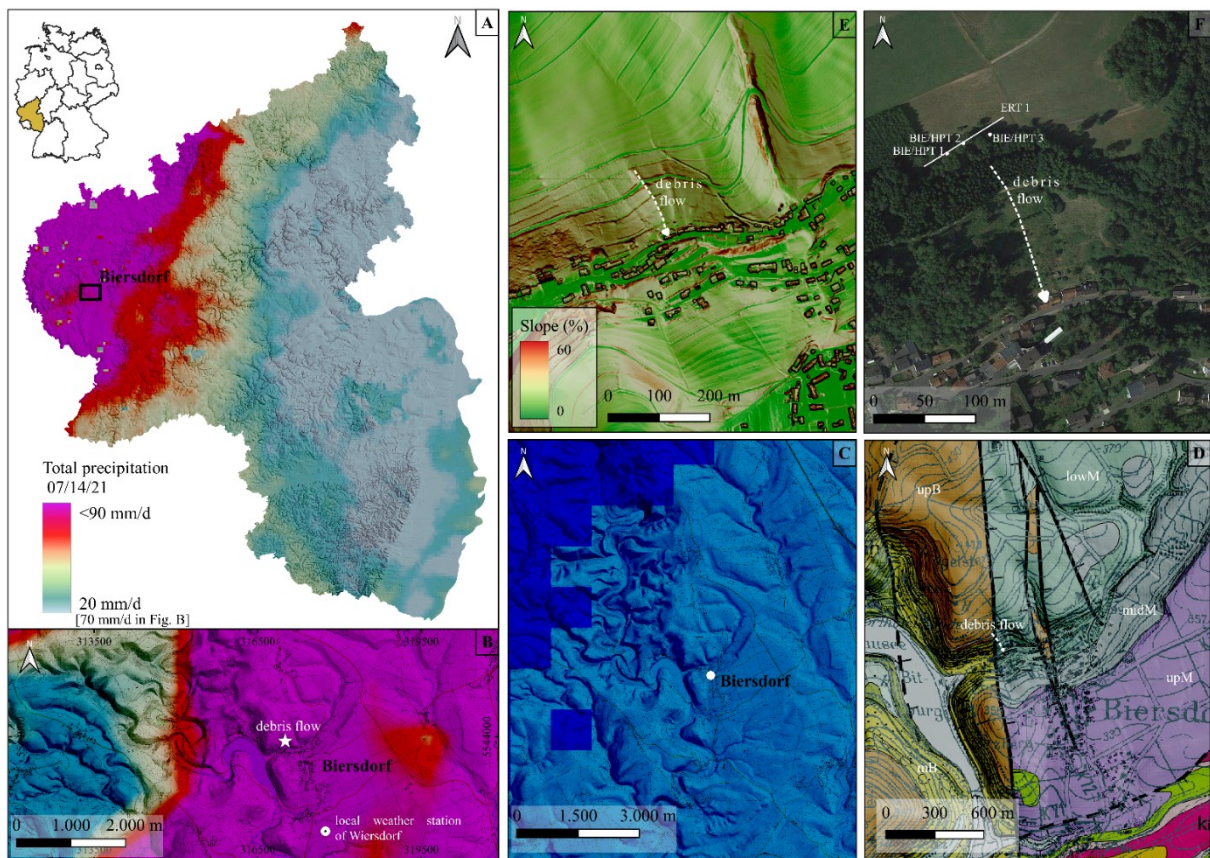


Abb. 99: A Niederschlagsverteilung in Rheinland-Pfalz vom 14.07.2021. Abgeleitet aus den RADOLAN-Wetterdaten des DWD. B Ausschnitt der Niederschlagsverteilung um Biersdorf mit geänderter Maßeinheit zur Visualisierung. C DWD-Bodensättigungsmodell um Biersdorf vom 13.07.2021 mit folgenden Einheiten: dunkelblau = übersättigt ($\geq 100\%$ nutzbare Feldkapazität), blau = gesättigt, bei beginnender Übersättigung (80 bis $< 100\%$; DWD 2022) D Geologische Struktur und lithologische Verteilung im Untersuchungsgebiet (upB = Oberer Buntsandstein, lowM = Unterer Muschelkalk, midM = Mittlerer Muschelkalk, upM = Oberer Muschelkalk). E Neigung des Untersuchungsgebietes inkl. eingezeichneter Gefällestrücke des Murganges. F Luftaufnahme des Untersuchungsgebietes mit den durchgeführten geomorphologischen Prospektionen (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Am 14. Juli erstreckte sich der Starkregenschwerpunkt in einem Gebiet vom südlichen Nordrhein-Westfalen bis in die Südeifel (Abb. 99, A) mit mehr als 100 l/m^2

Niederschlag in 24 Stunden. Regional wurden in diesem Zeitraum sogar mehr als 150 l/m² gemessen. Die örtliche Wetterstation in Wiersdorf (ca. 4 km südwestlich von Biersdorf) verzeichnete an diesem Tag mit 90 l/m² den mit Abstand höchsten Jahreswert und den höchsten Tagesniederschlagswert in der 20-jährigen Geschichte der Station (Wetterstation Wiersdorf 2021). Abbildung 100 zeigt die stündliche Niederschlagsverteilung für den 14. Juli 2021 an dieser Station.

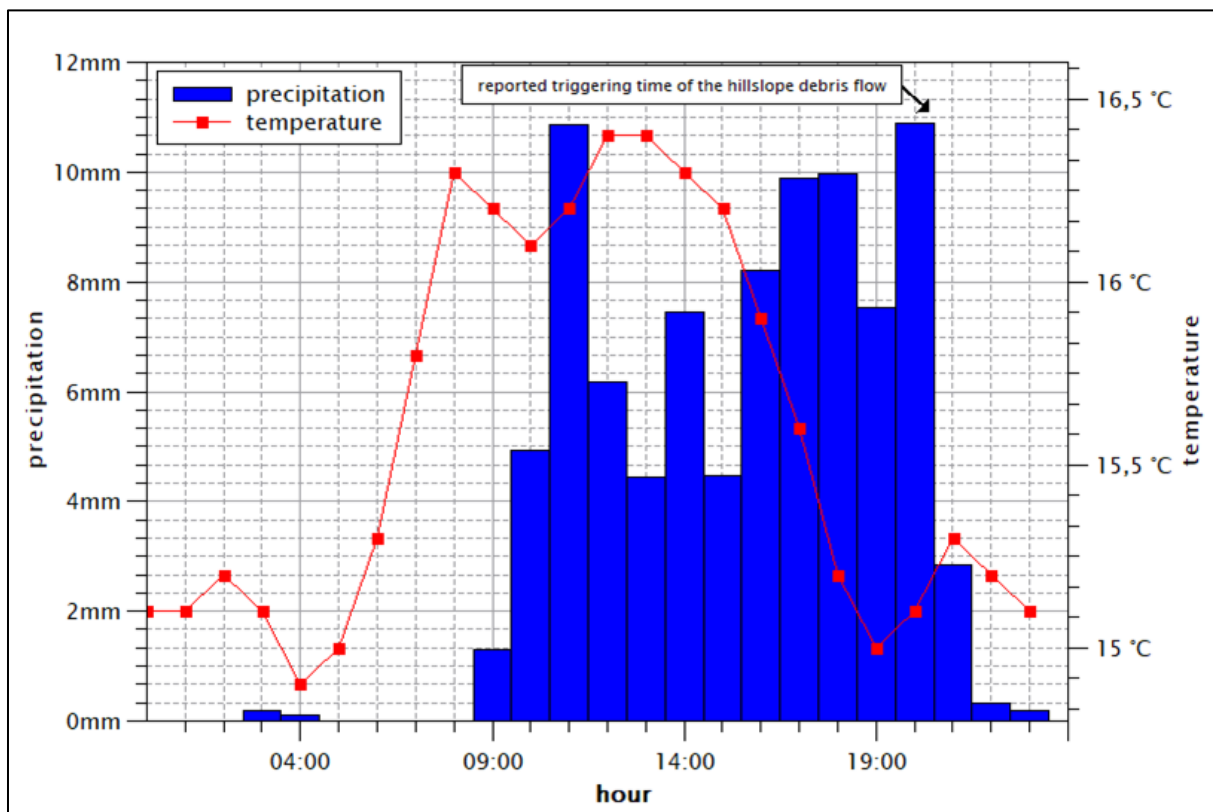


Abb. 100: Stündliche Niederschlagsverteilung für das Starkregenereignis vom 14.07.2021 abgeleitet von der Wetterstation Wiersdorf mit dem ungefähr gemeldeten Auslösezeitpunkt des Hangmurgangs (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Massenbilanz

Durch eine Vielzahl aufgenommener und per GNSS eingemessener Drohnenfotos wurde der Hangmurgang hochgenau im Feld aufgenommen. Das daraus photogrammetrisch berechnete Modell des Hangmurgangs ist in Abb. 101 dargestellt. Das Modell erlaubt die genaue Messung des Auslaufs und der verdrängten Massen

(Abb. 101 B). Da photogrammetrisch erstellte DGMS nicht effektiv nach Vegetation gefiltert werden können, wurden dicht bewachsene Bereiche nicht verwendet, und ausschließlich reale Bodenpunkte zu vergleichen (Abb. 101 A; Vegetation grau markiert). Sicherungsmaßnahmen und Aufräumarbeiten wurden im Vergleich zu den unmittelbar nach dem Murgang aufgenommenen In-situ-Fotos an verschiedenen Stellen durchgeführt. Dennoch blieben Risse, Ausläufe und Ablagerungen größtenteils unverändert und sind im Modell deutlich erkennbar, was eine nachhaltige Auswirkung auf die Hangmorphologie belegt (HAGGE-KUBAT et al. 2022).

Die Gesamtlänge des Hangmurgangs von der Einleitungsstelle bis zur äußersten Ablagerungsschicht wurde auf 184 bemessen. Der resultierende Abriss im Startbereich der Hangmure ist dabei durchschnittlich 15 Meter breit und weist eine maximale Tiefe von 6 Metern auf. Dies übersteigt bei weitem die angenommene Tiefe für unverfestigtes Lockergesteinsmaterial an dieser Stelle. Ein solches Unterschätzen der Lockergesteinsbedeckungen ist ein typisches Merkmal, das im Zusammenhang mit zahlreichen Massenbewegungen beobachtet wurde, die durch das Starkregenereignis vom 14. Juli 2021 in der Eifel ausgelöst wurden (WEHINGER et al. 2022).

Basierend auf einem Vergleich mit dem Airborne-LiDAR Befliegung von 2018 zeigt sich, dass sich vom Abriss ausgehend ca. 1350 m³ Material mit dem Murstrom hangabwärts bewegten. Zur Stabilisierung des Waldweges wurde am Ende des Abrisses ein Erdwall mit einer Höhe von 2,50 Meter teilweise aus bestehenden Murgangsmaterial errichtet. Unterhalb des Weges wurde auf einer Fläche von 87 m² Material in die Erosionsrinne zurückgekippt. Die Auslaufstrecke ist etwa 130 Meter lang mit einem maximalen Einschnitt von 1,5 m Tiefe (Abb. 101 C; vgl. Abb. 98, B). Für in Ereignis dieser Größenordnung ist dieser Einschnitt in der gesamten Transitstrecke relativ gering und wurde auf eine moderate Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt. Die Depositionsfläche hinter dem betroffenen Haus ist 238 m² groß. Im Zuge von Verbauarbeiten wurde sie bis auf 2 m über der ursprünglichen Geländeoberfläche eingeebnet. Insgesamt deutet die Massenbilanz des

Hangmurgangauslaufs darauf hin, dass, einschließlich der anthropogenen Maßnahmen nach dem Ereignis, während des Ereignisses 1090 m³ Material umgelagert wurden (Hagge-Kubat et al. 2022).

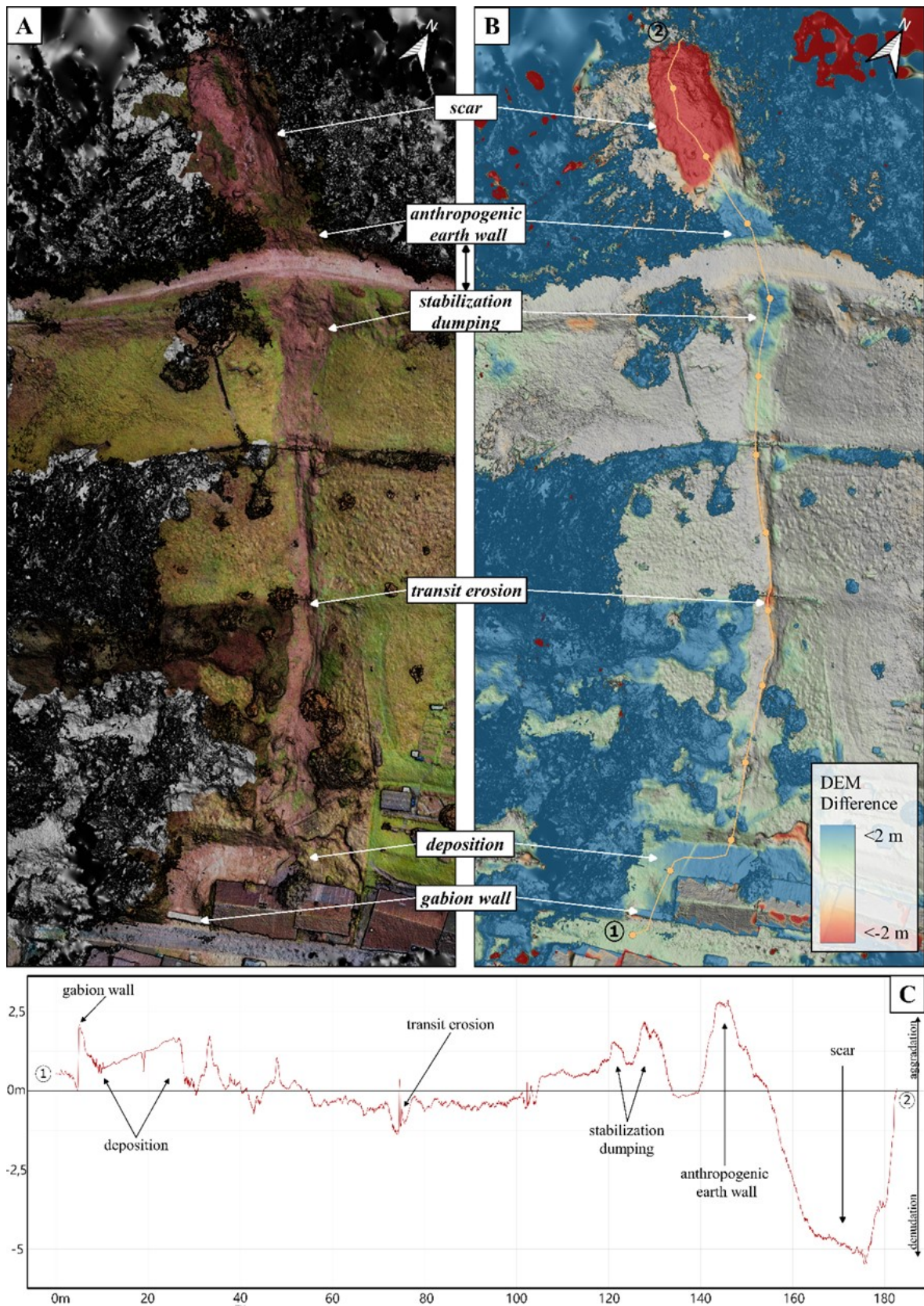


Abb. 101: A Photogrammetrisch berechnetes Modell des Hangmurgangs mit überlagertem Echtfarbeninformationen; dicht bewachsene Bereiche sind grau markiert. B Höhenunterschied zwischen dem photogrammetrisch generierten DEM vom 2. Februar 2022 und einem ALS-generierten DEM von 2018. C Höhenänderung des gezeichneten Transekts (gelbe Linie in B) mit deutlichen morphologischen Markern, dargestellt als 2D-Grafik (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Ergebnisse der kombinierten ERT-, DP-HPT- und Sedimentkernbohrungen

Um detaillierte Informationen über die stratigraphische Zusammensetzung des flachen Untergrunds zu erhalten und daraus Rückschlüsse auf die Murgangsentstehung-Modellierungsparameter zu erhalten, wurden in dieser Studie zusätzlich ERT-Messungen (Elektrische Widerstandsmessungen) durchgeführt, auf deren Basis DP-HPT-Logs (Direct-Push) aufgezeichnet wurden (vgl. WUNDERLICH et al. 2018). Um die geophysikalischen ERT und DP-Ergebnisse abschließend zu kalibrieren und stratigraphische Sequenzen zu erhalten, wurden zusätzlich Sedimentkerne an den DP-Positionen entnommen. Der ERT-Transekt BIE ERT 1 (Abb. 102) wurde 25 m oberhalb des Abrisses des Hangmurgangs auf einer Gesamtlänge von 94 m in Südwest-Nordost-Richtung durchgeführt. Insgesamt reichen die scheinbaren Widerstandswerte von 18 bis 364 Ohm.m. Das Inversionsmodell zeigt eine dreigliedrige Struktur. Der erste Teil reicht von 0 bis ca. 40 m mit hohen Widerständen an der Spitze, gefolgt von allgemein niedrigeren Werten und auf einer weiteren Einheit mit hohem spezifischen Widerstand unterhalb der Log-Position BIE HPT 1. Ein zweiter Teil ist bis 64 m sichtbar, gekennzeichnet durch höhere Werte, die die größte Mächtigkeit an der DP-Site BIE HPT 2 erreichen, interagiert von einer Einheit mit deutlich niedrigerem spezifischem Widerstand, die in Richtung Nordosten nach oben hin auftaucht. Der dritte Teil von 64 m bis zum Ende des Transekts ist durch hohe Widerstände an der Spitze gefolgt von niedrigen Werten zur Basis hin gekennzeichnet.

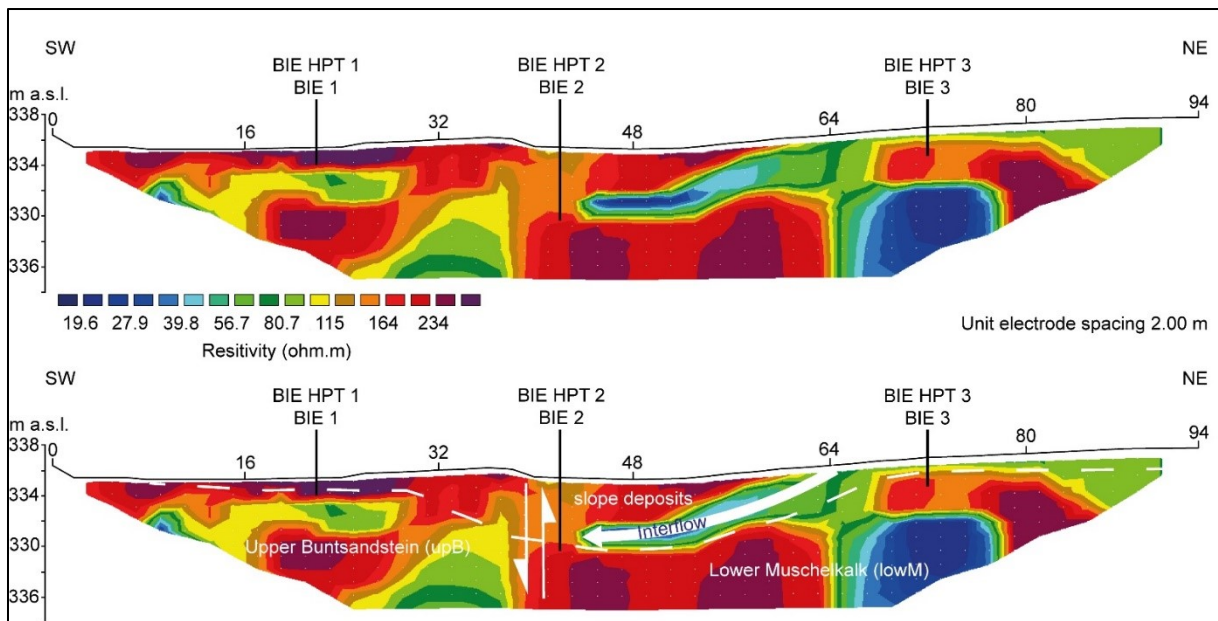


Abb. 102: Oben: Tiefenschnitt des ERT-Transekts BIE ERT 1 (Iteration 6, absoluter Fehler 1,4 %) mit Position von DP-HPT- und Bohrpunkten, die direkt auf dem Profil entnommen wurden (vgl. Abb. 99). Unten: Tiefenschnitt mit Interpretation gemäß Feldbeobachtung und geologischen Daten (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Alle DP-HPT-Protokolle und Sedimentkerne wurden so tief wie möglich gebohrt (Abb. 103 und 104). Insgesamt wurden 10 Sedimenteinheiten (SU) beschrieben (Tabelle 12). Alle Bohrkern zeigen kolluviale und/oder periglaziale Hangablagerungen unterschiedlicher Beschaffenheit unterhalb des Mutterbodens und oberhalb stark verwitterten Festgesteinsmaterials. Während BIE 1 und BIE 2 aufgearbeitete und verwitterte Ton- und Sandsteine dominieren, enthält BIE 3 aufgearbeitetes und verwittertes Kalksteinmaterial.

DP log BIE HPT 1 zeichnet sich durch sehr niedrige EC-Werte in SU Ia und II aus, die in Richtung SU III leicht ansteigen. Das verwitterte Grundgestein von SU Iva, konnte mit der HPT-Sonde nicht durchdrungen werden. Die HPT-Werte zeigen einen deutlichen Anstieg von SU II zu SU III. In BIE HPT 2 und BIE 2 wurde mit 5,58 m bzw. 5,00 m die größte Tiefe erreicht. Sowohl EC- als auch HPT-Daten zeigen gröbere oder porösere Schichten in der Sedimentsequenz durch niedrige EC- und niedrige HPT-Werte.

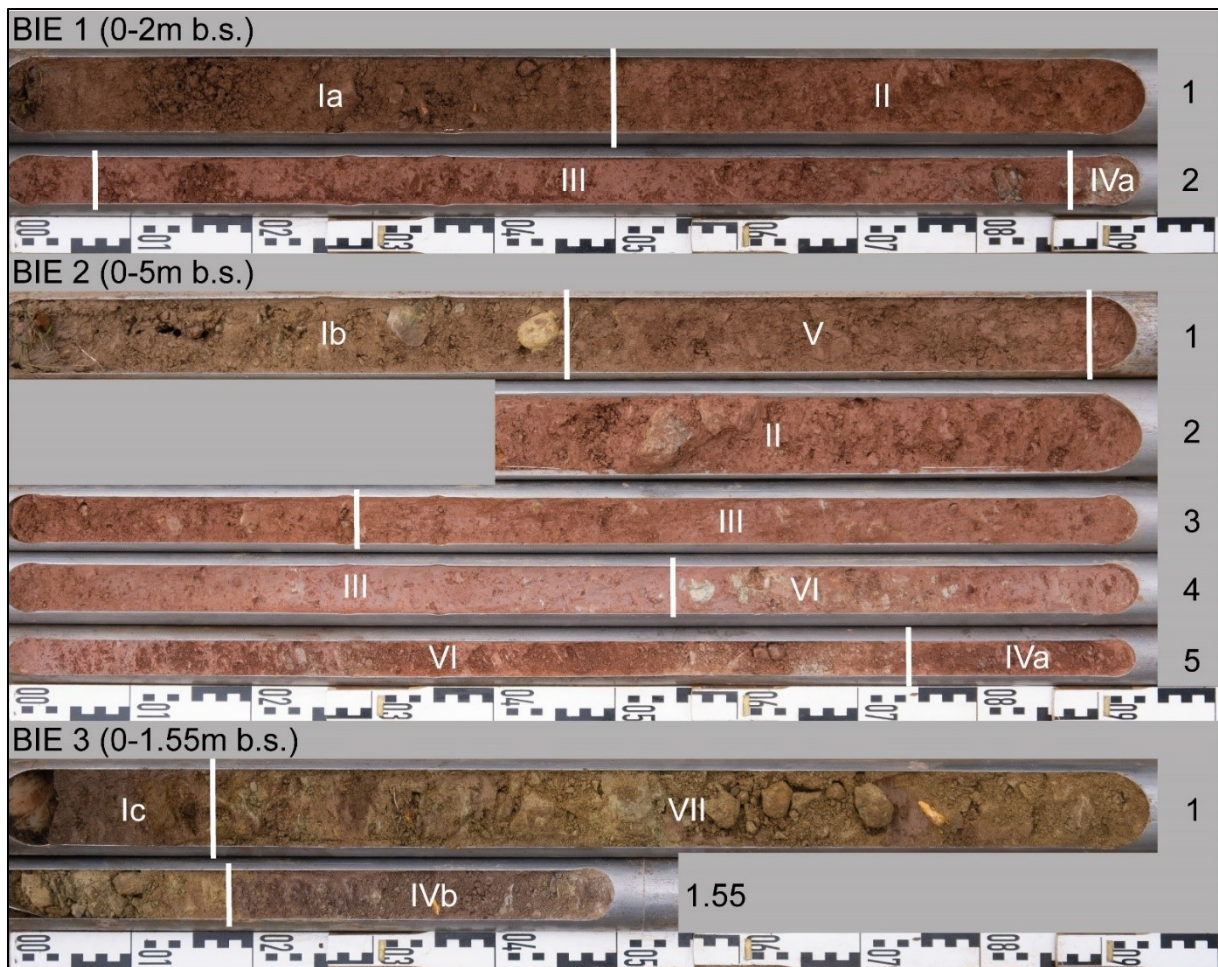


Abb. 103: Foto der Sedimentkerne BIE 1 (oben), BIE 2 (Mitte) und BIE 3 (unten). Bodenfläche oben links, Endtäufe unten rechts von jedem Kern. Die Sedimenteinheiten sind in Tabelle 12 beschrieben (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Die deutlichste EC-Abnahme tritt bei SU VI auf, was von den niedrigsten HPT-Werten aller drei DP-HPT-Protokolle begleitet wird. Im Sedimentkern BIE 2 ist SU VI durch eine Dominanz von Ton- und Sandsteintrümmern in einer schluffigen Matrix gekennzeichnet. Zur Basis hin steigen EC und HPT wieder an. Im Vergleich zu BIE HPT 1 und BIE HPT 2 weist BIE HPT 3 deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf. EC-Werte zeigen starke Schwankungen zwischen 0 und 30 mS/min; Die HPT-Werte sind abgesehen von einigen tonigen Schichten in SU VII konstant niedrig.

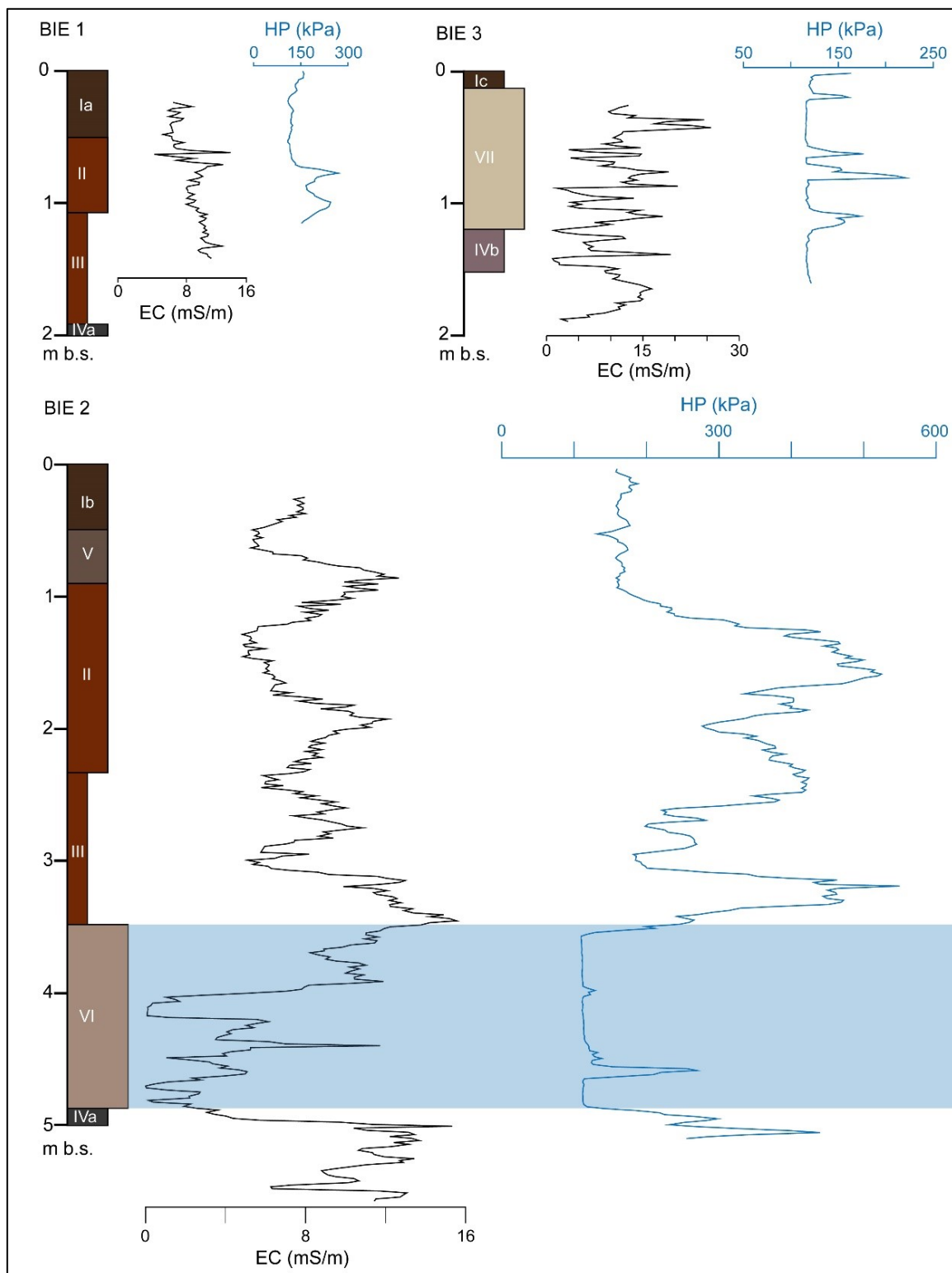


Abb. 104: Sedimentkerne BIE 1 bis 3 mit DP HPT-Daten (Elektrische Leitfähigkeit, EC und hydraulischer Druck (HP)). Sedimenteinheiten Ia-VII siehe Beschreibung in Tabelle 12 (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Tab. 12: Sedimenteinheiten der Bohrkere mit deren geotechnischer Beschreibung

Sedimenteinheit	Beschreibung
Ia	Oberboden, toniger Schluff, dunkelbrauner, weicher, nicht kalkhaltiger, humoser Boden, Holzkohle- und Wurzelfragmente, Sand- und Tonsteinschutt
Ib	Oberboden, toniger Schluff, graubraun, weich, nicht kalkhaltig, schwach humos, Holzkohle und Wurzelfragmente, Sand- und Kalksteinschutt
Ic	Oberboden, lehmiger Schluff, dunkelgraubraun, weich, nicht kalkhaltig, humos, Wurzelfragmente
II	periglaziale Hangablagerungen, toniger Schluff bis schluffiger Ton, rotbraun, leicht hart, nicht kalkhaltig, reich an Sandsteinschutt
III	periglaziale Hangablagerungen, toniger Schluff bis schluffiger Ton, rotbraun, hart (dicht), nicht kalkhaltig, darunter kleine Sandsteintrümmer
Iva	Verwittertes anstehendes Gestein, Ton, rotbraun, extrem hart, nicht kalkhaltig
Ivb	verwittertes anstehendes Gestein, Ton, purpurgrau, extrem hart, leicht kalkhaltig, an der Basis fester Kalkstein
V	Kolluviale Ablagerungen, toniger Schluff, rötlich-graubraun, weich, nicht kalkhaltig, schwach humos, darunter kleine Sandsteintrümmer, Holzkohle und Wurzelfragmente
VI	periglaziale Hangablagerungen, toniger bis schluffiger Sand, rotgrau, locker bis leicht hart (porös), nicht kalkhaltig, Sandsteinschutt
VII	periglaziale Hangablagerungen, Kalkschutt (gelblich-grau) und eingelagerte, dünne tonige Schluffschichten (braun), locker (porös) bis leicht hart (tonige Schluffschichten), leicht kalkhaltig

Simulationsergebnisse und Validierung

Das modellierte Abfluss- und Ablagerungsverhalten des Hangmurgangs ist in Abb. 105 dargestellt. Es wurden Fotos, die von Anwohnern unmittelbar nach dem Ereignis aufgenommen wurden, und die durchgeführten Geländeaufnahmen als Referenz verwendet, um die Simulationsergebnisse mit realen Bedingungen zu vergleichen. Die durch den Hangmuren-Dispositionsindex ermittelten initialen Quellgebiete weisen in der Hanglage plausible Orte mit nahezu identischen Abmessungen im Vergleich zur tatsächlichen Abrissfurche dar. Zwei weitere berechnete Triggerbereiche in Mittelhanglage sind durch verstärkte Tiefenerosion gekennzeichnet. Für den Modellierungsrahmen wurde das Masse-Widerstands-Verhältnis (m/d) basierend auf

einer Kombination von Feldbeobachtungen geschätzt. Daher wurde die relativ große mobilisierte Masse ($\sim 1350 \text{ m}^3$), die durch die Massenbilanz der DEM-Differenz berechnet wurde, mit der hohen Menge an feinem Material, wie sie in dem Abriss beobachtet wurde, basierend auf stratigraphischen Beweisen aus Sedimentkernbohrungen als relativ niedrig angenommen Schnittstärke in der Auslaufspur in Kombination mit der gemessenen Fließlänge als Hinweis auf eine mäßige Fließgeschwindigkeit berücksichtigt. Der Gleitreibungskoeffizient μ ist stark von der Bodenbedeckung abhängig und wurde daher räumlich verteilt basierend auf dem Bodenbedeckungstyp mit vergleichbaren Literaturwerten verglichen [WYSS & STRICKLER 2020, WICHMANN et al. 2017, HAAS et al. 2012, GOETZ et al. 2021]. Die aus diesen Eingangsparametern berechnete Murgangssimulation (vgl. Tabelle 10) stimmt weitgehend mit dem realen Auslaufverhalten überein (Abb. 105).

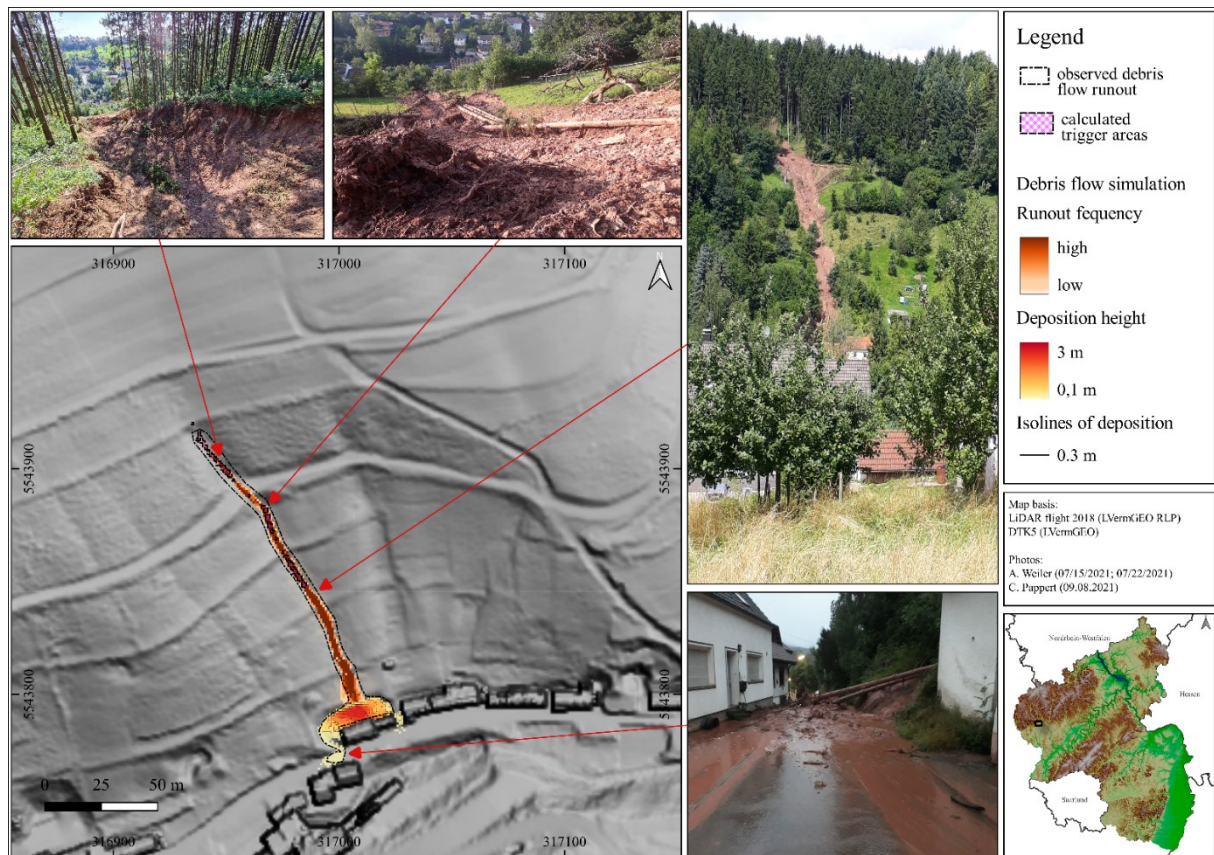


Abb. 105: Modelliertes Auslauf- und Ablagerungsverhalten der Hangmure in Biersdorf mit berechneten Auslöseflächen und fotografischem Vergleich zur In-situ-Situation (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Die Übereinstimmung zwischen dem generierten Modell und dem beobachteten Murgangsauslauf beträgt etwa 97 % in der Fläche. In Übereinstimmung mit dem realen Ereignis zeigt das Modell eine moderate Erosion entlang des Hangs und hohe Ablagerungsraten (bis zu 3 m, anthropogen nach dem Ereignis eingeebnet) am Hangfuß, wo das Haus als Barriere fungiert. Außerdem stimmt die Materialanhäufung auf der Straße mit dem dokumentierten realen Ereignis überein.

Hangmuren-Auslösemechanismus

Die ERT-Messungen in Kombination mit DP-HPT-Logs und den Rammbohrkernsondierungen haben detaillierte Einblicke in die oberflächennahen unterirdischen Strukturen oberhalb der Risszone geliefert. Man kann davon ausgehen, dass die detektierte Interflowlinse in 3 m Tiefe unter der Oberfläche, die sich durch signifikant niedrige Widerstandswerte auszeichnet (Abbildung 100, unten), eine entscheidende Rolle für den Auslösemechanismus des Hangmurenereignisses spielt. In einer vergleichbaren Tiefe zeigt DP log BIE HPT 2 die niedrigsten HPT-Werte aller Logs, was auf eine hohe Durchlässigkeit im sanddominierten SU VI (blaue Schattierung in Abb. 100) hinweist, eingerahmt von dichten, tonigen (undurchlässigen) periglazialen Hangablagerungen (Basis von SU III). bzw. verwittertes Grundgestein (SU IVa). Zudem erreichen die Hangablagerungen innerhalb des untersuchten Transekts ihre größte Mächtigkeit von 4,9 m. Im Vergleich zu DP log BIE HPT 1, wo die Permeabilität in 0,8 m b.s. deutlich abnimmt, zeigt DP log BIE HPT 3 eine insgesamt höhere Permeabilität im Zusammenhang mit losen Kalksteintrümmern in SU VII. Diese Beobachtungen stimmen mit Berichten von Anwohnern vom späten Abend des 14. Juli überein, die verschwindende Wassermassen im Feld bergaufwärts nordöstlich des Abrisses und eine Konzentration von Oberflächenabfluss in der Tiefenlinie an der Stelle von HPT 2/BIE 2 beobachteten. Darüber hinaus wurden während der Sedimentkernbohrung im Februar 2022 ein

kontinuierlicher Interflow- Wasserabfluss innerhalb des Abrisses in einer Tiefe, die der Position der angenommenen Zwischenströmung entspricht aufgefunden.

Die beschriebenen Phänomene der unterschiedlichen Durchlässigkeit und des Oberflächenabflusses stehen in direktem Zusammenhang mit der geologischen Aufschiebung, die den Unteren Muschelkalk im Osten vom Oberen Buntsandstein im Westen trennt, was auch im ERT-Transekt BIE ERT 1 angedeutet ist (vgl. Abb. 102). Der Hangmurgang wurde genau an der Stelle der Normalstörung ausgelöst. Man kann durch die Untersuchungsergebnisse annehmen, dass das Material in dieser tektonischen Lage bereits durch weniger Stabilität gekennzeichnet war.

Insgesamt wird mit dieser Studie die Hypothese aufgestellt, dass der stark erhöhte Porenwasserdruck und die verstärkte Zwischenströmung während des gewaltigen Niederschlagsereignisses zu einem starken Kohäsionsverlust und schließlich zu einer plötzlichen Bewegung des Substrats als anfängliche Erdrutschbewegung mit der Gleitfläche unterhalb der Zwischenströmungsschicht führten. Darüber hinaus hat der starke Oberflächenabfluss mit der damit verbundenen Strömungskraft die anfängliche Erdrutschmasse weiter verflüssigt und mobilisiert, wodurch die Abwärtsbewegung beschleunigt wurde. Der mit r.sim.water modellierte Oberflächenabfluss des Starkregeneereignisses der letzten Stunde vor dem überlieferten Trigger der Hangmure ist in Abb. 104 dargestellt. Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass sich die größte Abflussmenge in der Tiefenlinie der Massenbewegung konzentrierte. Zusammenfassend bestätigen alle beschriebenen Faktoren die These, dass es zu einer Entwicklung von einer initialen Translationsrutschung hin zum hochenergetischen und großflächigen Hangmuren durch Verflüssigung der abgerutschten Masse gekommen ist.

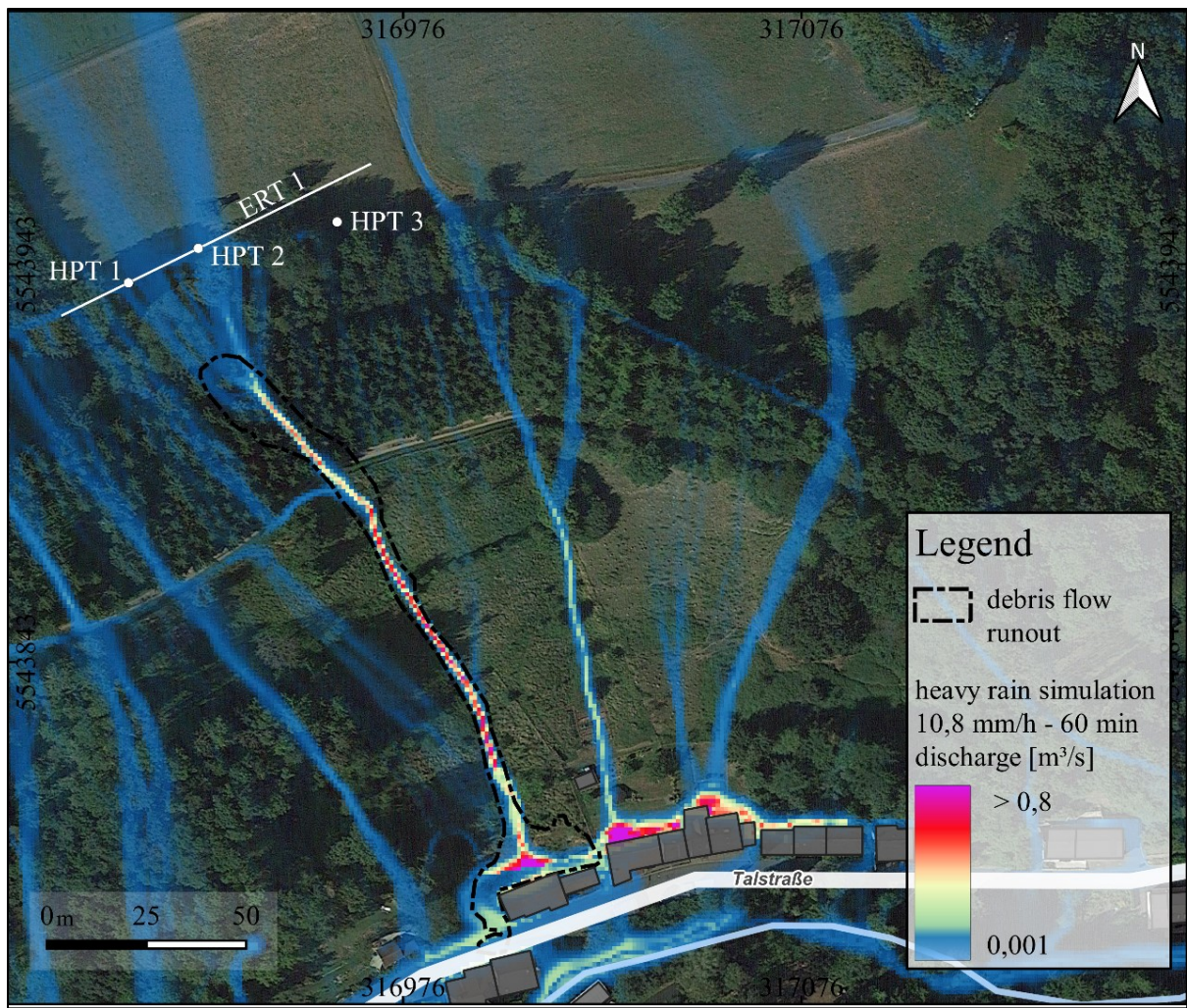


Abb. 106: Vergleich des beobachteten Murgangabflusses mit den Ergebnissen der Oberflächenabflussmodellierung für das Untersuchungsgebiet in Biersdorf am See. Die Starkregensimulation basiert auf Wetterdaten der Station Wiersdorf in der Stunde vor der Massenbewegung. Der Zeitpunkt der Auslösung wurde durch Anwohnermeldungen vermutet (HAGGE-KUBAT et al. 2022)

Neben den beschriebenen potentiellen Auslösemechanismen muss davon ausgegangen werden, dass auch der Waldweg bergaufwärts des Abrisses eine wichtige Rolle gespielt hat (Abb. 99, E). Die Verdichtung im Zuge solcher Infrastrukturmaßnahmen reduziert die Versickerungskapazitäten deutlich. Zudem führt der morphologische Wechsel zwischen Weg und Hang zur Ausbildung einer künstlichen konvexen Böschung in Hangabwärtsrichtung. Nach RICKLI et al. (2008) steigt die Gefahr von Hangmuren, wenn sich starker Oberflächenabfluss auf diese künstlichen Böschungen konzentriert.

6.2.2 Validierung

Zur Validierung der flächendeckenden Modellierungen des Murgangspotenzials wurden ebenso wie bei der Analyse des Steinschlagpotenzials vor allem bekannte Fallbeispiele, die Rutschungsdatenbank des LGB sowie Geländebegehungen genutzt. Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, ist das Thema der starkregeninduzierten Murgänge in den Mittelgebirgsregionen in Deutschland wissenschaftlich und behördlich ein bisher eher unbeachtetes und junges Betrachtungs- und Forschungsfeld. Entsprechend sind stattgefundenen Murgangseignisse an den Flusstälern in Rheinland-Pfalz früher zum Teil fälschlicherweise zu anderen Massenbewegungsarten gezählt worden. So sind Ereignisse, die heutzutage als Murgang, Hangmure oder murähnlich klassifiziert würden, eher als Hangrutsche oder Überflutungen klassifiziert worden. Häufig ist so eine Abgrenzung von eigentlichen Rutschereignissen in den Datenbanken nachträglich auch aufgrund der unzureichend beschriebenen Witterungssituation und Verortungen nicht mehr möglich. Daher kann für die Validierung der Modellierungen dieser Studie nicht auf das Maß an Einträgen in der Rutschungsdatenbank zurückgegriffen werden, wie es für die in Kapitel 6.1.2 beschriebene Validierung der Steinschläge möglich war. Die Datenlage der Einträge im Untersuchungsgebiet beschränkt sich insgesamt auf 18 Einträge, die allein für eine aussagekräftige statistische Auswertung nicht ausreichend sind. Eine generelle Auseinandersetzung mit der statistischen verwendbaren Datenlage wird weiterführend in Kapitel 7.2 diskutiert.

Daher erfordert die Validierung des in die Fläche modellierten Murgangspotenzials ein anderes Vorgehen. Die Validierung erfolgte in diesem Fall hauptsächlich an bekannten und gut dokumentierten Beispielfällen aus der jüngeren Vergangenheit. Dabei sind entsprechend der verwendeten Parametereinstellungen (vgl. Kapitel 5.5.3) die modellierten Murgangsauslöse- und -potenzialbereiche hauptsächlich in den steilen Hanggerinnen mit großen Einzugsgebieten auf der Hochfläche berechnet worden. Diese Bereiche sind auch in der Realität die Bereiche, in denen die meisten

bekanntem Murgänge im Untersuchungsgebiet aufgetreten sind. Neben den zuvor in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Fallbeispielen in Henschhausen und Biersdorf, die eine große Übereinstimmung der Modellierung mit den in der Realität vorgefundenen Spuren der Ereignisse aufweisen, können auf ähnliche Weise weitere Beispiele mit den Ergebnissen der Modellierungen verglichen werden. So können insbesondere die in Kapitel 3.5.3 beschriebenen Murgänge bei St. Goar-Werlau und bei Dörschied sowie drei weitere gut bekannte Murgangserinne im Mittelrheintal bei Bad Salzig genauer betrachtet werden.

Der Murgang bei St. Goar-Werlau vom 11.09.2011, bei dem es in der Folge zu einer Zugentgleisung mit Personenschaden kam, ist ein typisches Beispiel für einen starkregen induzierten Murgang im Untersuchungsgebiet und steht somit exemplarisch für weitere ähnliche Prozessabläufe. Infolge eines mittäglichen Starkregenereignisses wurden in der Nähe des Ortes Werlau Geröll- und Schlammmassen aus dem Steilhang als Murgang mobilisiert und schlagartig auf die darunterliegenden Gleise gespült. Ein vollbesetzter Intercity-Zug der deutschen Bahn konnte gegen 14 Uhr nicht mehr rechtzeitig bremsen und fuhr in diese Murenablagerungen hinein. In der Folge entgleiste der Zug, mehrere Menschen wurden zum Teil schwer verletzt und sämtliche Passagiere mussten aus dem Zug evakuiert werden. Es kam zu tagelangen Sperrungen der linksrheinischen Bahnstrecke und zu einem Schaden von mehreren Millionen Euro (WEHINGER et al. 2013). In der Masterarbeit des Autors mit dem Titel: „Abfluss- und Sedimenttransportsimulation von Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal“ (HAGGE-KUBAT 2019) wurde dieser Murgang und seine hydrologischen Auslösebedingungen genauer untersucht, sodass die Ergebnisse der flächendeckenden Murgangsmodellierung hier gut verglichen und Rückschlüsse auf ähnliche Ereignisse gezogen werden können. Die Tiefenlinie im Steilhang, bei der es zur Auslösung des Murgangs kam, wird hier durch ein markant großes Einzugsgebiet auf der Hochfläche gespeist. Dieses Einzugsgebiet auf der Hochfläche läuft zusätzlich in einer langgestreckten Muldenform auf das Gerinne in der Steillage zu, sodass oberflächlich abfließendes Wasser bereits auf der

Hochfläche markant beschleunigt wird und dann konzentriert in den Hang einfließt (HAGGE-KUBAT 2019). Im gesamten Hangbereich um Werlau ist diese Tiefenlinie die einzige, welche über ein nennenswert großes Einzugsgebiet mit einer solchen Situation verfügt, sodass die in die Fläche gerechnete Modellierung des Murgangspotenzials an diesem linksrheinischen Hang auch nur an dieser Rinne anschlagen und eine Murgangsauslösung modellieren sollte. Wie auf Abbildung 107 zu erkennen ist, ist dies in diesem Fall auch treffend berechnet worden, sodass in der Modellierung dieses Gerinnes als einziges „anspringt“ und ein Potenzial zu Murauslösung berechnet. In diesem Fall ist die Modellierung also als plausibel zu bewerten.

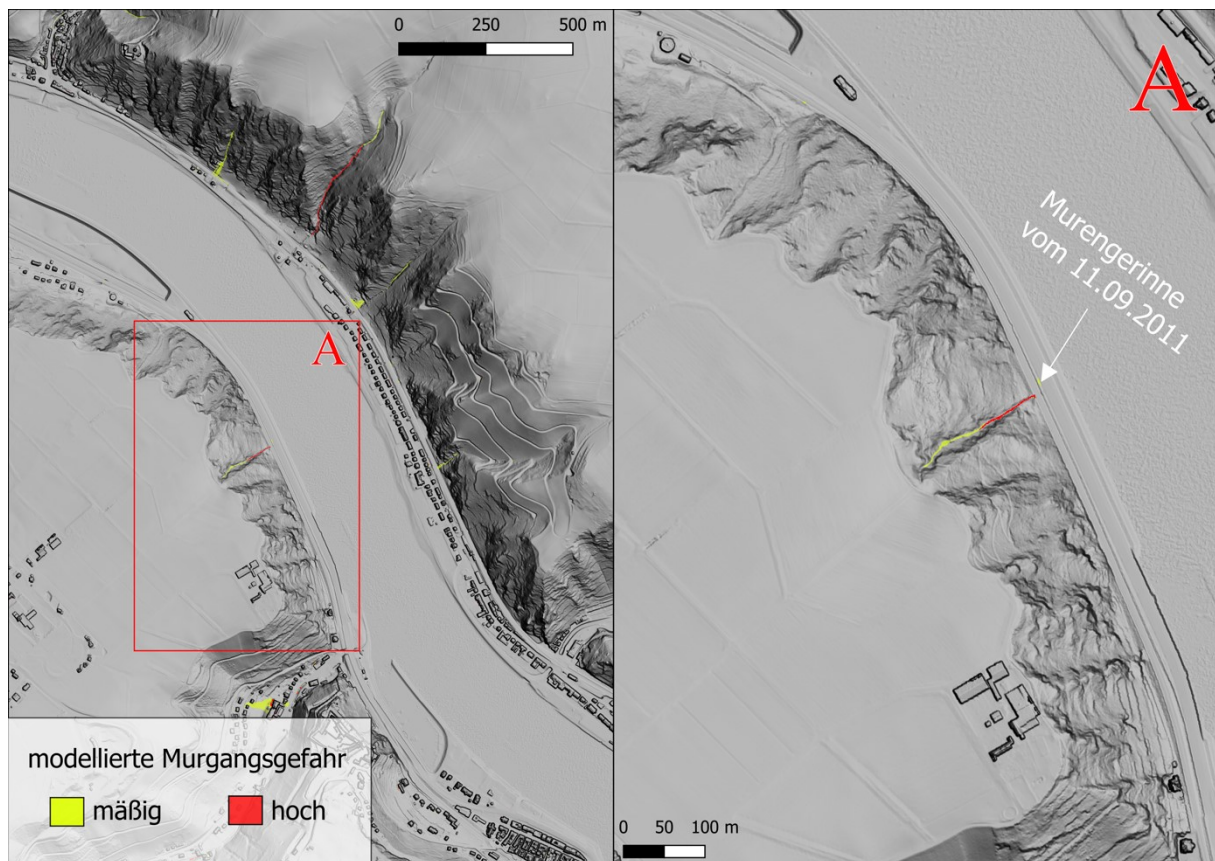


Abb. 107: Automatisierte Murgangsmodellierung des Murgangsgerinnes bei Werlau im Oberen Mittelrheintal

Darüber hinaus ist bei der Modellierung für dieses Gerinne ein hohes Murgangspotenzial (rote Einfärbung) berechnet worden, bei dem es zu einer

Auslösung eines Murgangs rechnerisch bereits ab 30mm/h Niederschlag und 20cm Schuttdurchmesser kommen kann. Dies entspricht im Wesentlichen auch den Dokumentationen der Feldbegehungen zu diesem Ereignis, bei denen von einem größeren Schuttdurchmesser in der Rinne sowie von einem eher durchschnittlichen Starkniederschlag berichtet wird. Die exakte Niederschlagsmenge ist dabei nicht bekannt, der KOSTRA-Wert wird jedoch auf eine 30-jährige Wiederkehrdauer geschätzt. Auch in den Dokumentationen wird nur von diesem einen ausgelösten Murgang in der Umgebung beim betreffenden Starkregen berichtet (HAGGE-KUBAT 2019 nach REISCHL 2017). Entsprechend ist die in die Fläche gerechnete Modellierung ohne spezifisch für diesen Fall angelegt worden zu sein, als sehr treffend zu bewerten. Der automatisierten Modellierung gelingt es, den Murgang in seiner Verortung, seinen Auslösungsbedingungen sowie in seiner Ausbreitung bis zur Bahnstrecke am Hangfuß treffend zu modellieren. Gleichzeitig springen andere Tiefenlinien in der Umgebung, bei denen es beim betreffenden Niederschlagsereignis von 2011 nicht zu einer Murgangsauslösung gekommen ist, in der Modellierung korrekterweise ebenfalls nicht an.

Auch die Tiefenlinie bei Dörschied mit den beschriebenen mehrfach aufgetretenen Murgangsereignissen in der Vergangenheit (vgl. Kap. 3.5.3) wird durch die flächendeckende Modellierung des Großgebiets *Oberes Mittelrheintal* korrekterweise erkannt (vgl. Abb. 108). Dabei ist eine deutliche Übereinstimmung des aufgetretenen Schadensbildes mit dem automatisiert modellierten Verlauf der Murausbreitung erkennbar. Dieses Gerinne wird in der Modellierung jedoch nur mit einem geringen Auslösepotenzial berechnet, sodass für die Auslösung dieses Murgangs eine sehr hohe Niederschlagsmenge oder sehr viel Schutt mit einem kleinen Durchmesser vorhanden sein muss. Vergleicht man dies mit den Fotos, die im Nachgang der Ereignisse an dieser Tiefenlinie gemacht wurden, so ist auffällig, dass offenbar der Anteil des mobilisierten Feinmaterials mit einem geringen Durchmesser gegenüber größeren Fragmenten hier dominierte. Es scheint vom Schadensbild eher einem Schlamm- denn einem Schuttstrom zu ähneln (vgl. Abb. 46). In dieser Hinsicht sind die geologischen

Verhältnisse der Lockergesteinshangaufgabe offenbar entscheidend für das Anspringen dieser Rinne. Bei größerem Material mit einem größeren Schuttdurchmesser ist entsprechend der Modellierung nur bedingt mit einem murähnlichem Abgang bei moderateren Niederschlagsmengen zu rechnen. Durch das tatsächliche Vorhandensein einer großen Menge mobilisierbaren feinkörnigen Lockermaterials ist dieses Hanggerinne jedoch auch ohne sehr großes Einzugsgebiet auf der Hochfläche in der Lage ein murähnliches Ereignis auszulösen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer weiteren Validierung und Eingrenzung vor allem der Schuttverteilung und -differenzierung für weitere Arbeiten in diese Richtung. Grundsätzlich ist für die Fragestellung dieses Ansatzes jedoch das generelle Erkennen und treffende Modellieren einer Murbewegung in diesem Gerinne im Sinne einer Validierung als positiv zu bewerten.



Abb. 108: Vergleich zwischen der automatisierten Murgangmodellierung und Fotoaufnahmen kurz nach einem Ereignis in der Tiefenlinie bei Dörschied im Oberen Mittelrheintal (Fotos: B. Bock 07.07.2012)

Als weitere betrachtete Gerinnegruppe mit bereits aufgetretenen Murgangereignissen und bekanntem Murgangverbau durch die deutsche Bahn kann für die Validierung der Modellierungsergebnisse dieser Arbeit die Hangsituation gegenüber von Bad Salzig näher betrachtet werden. Bei diesen Gerinnen kam es in der Vergangenheit mehrfach zu Murgängen, die bis auf die am Hangfuß verlaufende Bahnstrecke reichten und dort zum Teil große Murkegel hinterließen (REISCHL 2017). Im Zuge von Sicherungsarbeiten wurden von der deutschen Bahn staffelartig jeweils mehrere Murgangszäune in die Gerinne verbaut. Durch die im MABEIS-Projekt erhaltenen Datensätzen zu Schutzbauwerken der deutschen Bahn im Untersuchungsgebiet (vgl. 4.3) sind diese Bauwerke genau lokalisierbar und stellen somit eine zusätzliche Art der Validierung dar. Wie in Abbildung 109 zu erkennen ist, wird in jedem der drei bekannten Gerinne ein hohes Potenzial zur Auslösung von Murgängen sogar entsprechend der realen Beobachtungen mit flächiger Ausbreitung am Hangfuß berechnet. Durch die verbauten Murgangssperren in den Gerinnen ist dieses Murgangspotenzial in der Realität jedoch stark minimiert, sodass die durch den VulWay-Ansatz automatisiert erkannten Gefahrenabschnitte der Bahnstrecke als gesichert bestimmt werden konnten. Dieser Fall stellt ein Beispiel dar, bei dem automatisiert die richtigen Gerinne von der flächendeckenden Modellierung erkannt und die Streckenabschnitte durch den Murgangverbau treffend als gesichert eingeordnet wurden.

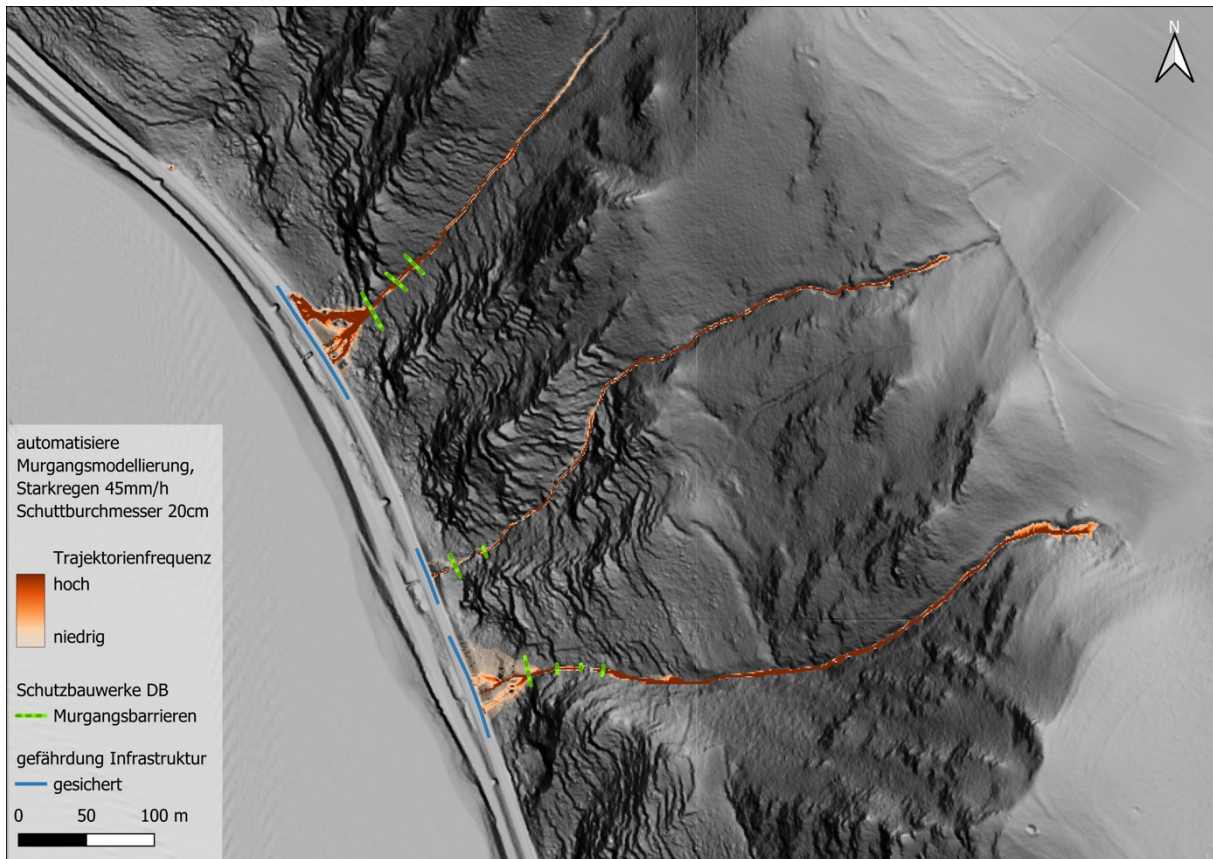


Abb. 109: Vergleich der in die Fläche gerechneten Murgangsmodellierung mit den tatsächlichen Murgangsbarrieren bei Bad Salzbig im Mittelrheintal

Dass grundsätzlich nur eine vergleichsweise geringe Anzahl an Tiefenlinien mit einem hohen Murgangspotenzial durch die Modellierungen berechnet wurden und diese Gerinne tatsächlich vielfach auch diejenigen darstellen, bei denen bekannte Ereignisse aufgetreten sind, spricht ebenfalls für die Treffsicherheit Modellierungsergebnisse. Zusätzlich zu den vorgestellten bekannten Murgangsgerinnen aus dem Oberen Mittelrheintal sind auch die in einer Vielzahl aufgetretenen und kartierten Murgängen aus der Ahrtalregion im Ergebnis des Niederschlagsereignisses vom 14/15.07.2021 als wichtige Vergleich- und damit Validierungsobjekte einzustufen. Die dort aufgetretenen Murgänge sind sowohl im Prozessablauf als auch in den Auswirkungen aufgrund der vergleichbaren geologischen und morphologischen Situationen den Murgängen an der Mosel und am Rhein sehr ähnlich. Sie können daher gut als Referenz für die Einschätzung der Plausibilität der Ergebnisse herangezogen werden.

Dabei sind die beschriebenen Bewegungsabläufe durch die Modellierung zumeist treffend rekonstruierbar. Die vorgestellten Fälle aus Kapitel 6.2.1 stehen dafür beispielhaft für ein treffendes Erkennen der Gerinne und korrekte Ausbreitungsmodellierung und lassen sich äquivalent auf Duzende weitere Fälle anwenden (WEHINGER et al. 2022).

Ebenso positiv sind auch die eigenen Geländebegehungen zu bewerten. Beim gezielten Anfahren von modellierten Rinnen und Hochflächenarealen wurden in der Regel auch in den anderen modellierten Großgebieten adäquate Hinweise auf eine mögliche oder bereits stattgefundene Muraktivitäten gefunden. Entsprechend ist durch die ähnlichen morphologischen und geologischen Bedingungen auch bei diesen technisch deutlich schlechten dokumentierten Gebieten theoretisch auch mit einer vergleichbar hohen Trefferquote der Modellierung zu rechnen. Dies kann jedoch nur eine Abschätzung darstellen. In zukünftigen Groundchecks sollten auch weiterhin die anderen ausgewiesenen Bereiche kritisch überprüft und entsprechend die Modellierungsergebnisse fortlaufend validiert werden.

Entsprechend der Steinschlagmodellierung ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die vorgestellten Modellierungen und Kartenwerke generell lediglich eine vereinfachte Abbildung der natürlichen Prozesse darstellen und daher Aussagen, Abschätzungen und keine Handlungsempfehlungen sind. Es ist in jedem Fall nötig etwaige Rückschlüsse vor Ort fachkundig fundiert zu überprüfen und die Modellierungsergebnisse lediglich als eine Möglichkeit einer Identifikationszonierung anzusehen (vgl. Kap. 7.2).

6.2.3 Gefahrenhinweiskarte Prozesstyp Murgang

Entsprechend des Vorgehens in Kapitel 6.1.4 wird folgend beispielhaft eine flächenhaft modellierte Gefahrenhinweiskarte gegenüber dem Prozess der Starkregen induzierten Gerinnemurgänge vorgestellt (Abb. 110). Die äquivalent erstellten

weiteren Kartenwerke des Untersuchungsgebietes am Mittelrhein- und Moseltal werden wie in Kap. 6.1.4 beschrieben aufgrund der später von offizieller Seite gewünschten gebündelten Veröffentlichung hier noch nicht dargestellt.

Als repräsentatives Beispiel für eine solche Gefahrenhinweiskarte wurde in diesem Fall ein Bereich am Oberen Mittelrheintal, konkret der nordöstliche Teil des Kartenblattes 5711 – Boppard ausgewählt.

Genau wie bei der, in Abbildung 87 vorgestellten, Gefahrenhinweiskarte Steinschlag und Felssturz, wurde hier zur großräumigen Sichtbarkeit der Ergebnisse ein Maßstab des Kartenausschnittes von 1:25.000 angelegt. Da bei der Modellierung der Starkregen induzierten Murgängen auf einem gleichgroßen Gebiet in den Flusstälern im Verhältnis zur Modellierung der Steinschläge deutlich weniger Quellgebiete und entsprechend weniger Trajektorien simuliert werden, ist dennoch so eine gute Visualisierungsmöglichkeit gegeben.

Auf dem gewählten Ausschnitt dieses Kartenblattes befinden sich neben dem, hier in einer markanten Pallhangsituation befindlichen, Mittelrheinhaupttal einerseits tief eingeschnittene Nebentäler als auch sehr steile Hanggerinne mit unterschiedlichen großen Einzugsgebieten auf der Hochfläche (vgl. Abb. 110). Zudem sind hier zum Teil flachere und unterschiedlich bewirtschaftete Hangbereiche sowie langgestreckte Siedlungen vorhanden, sodass dieses Gebiet entsprechend als repräsentativ für viele weitere Bereiche der betrachteten Täler an Rhein und Mosel angesehen werden kann.

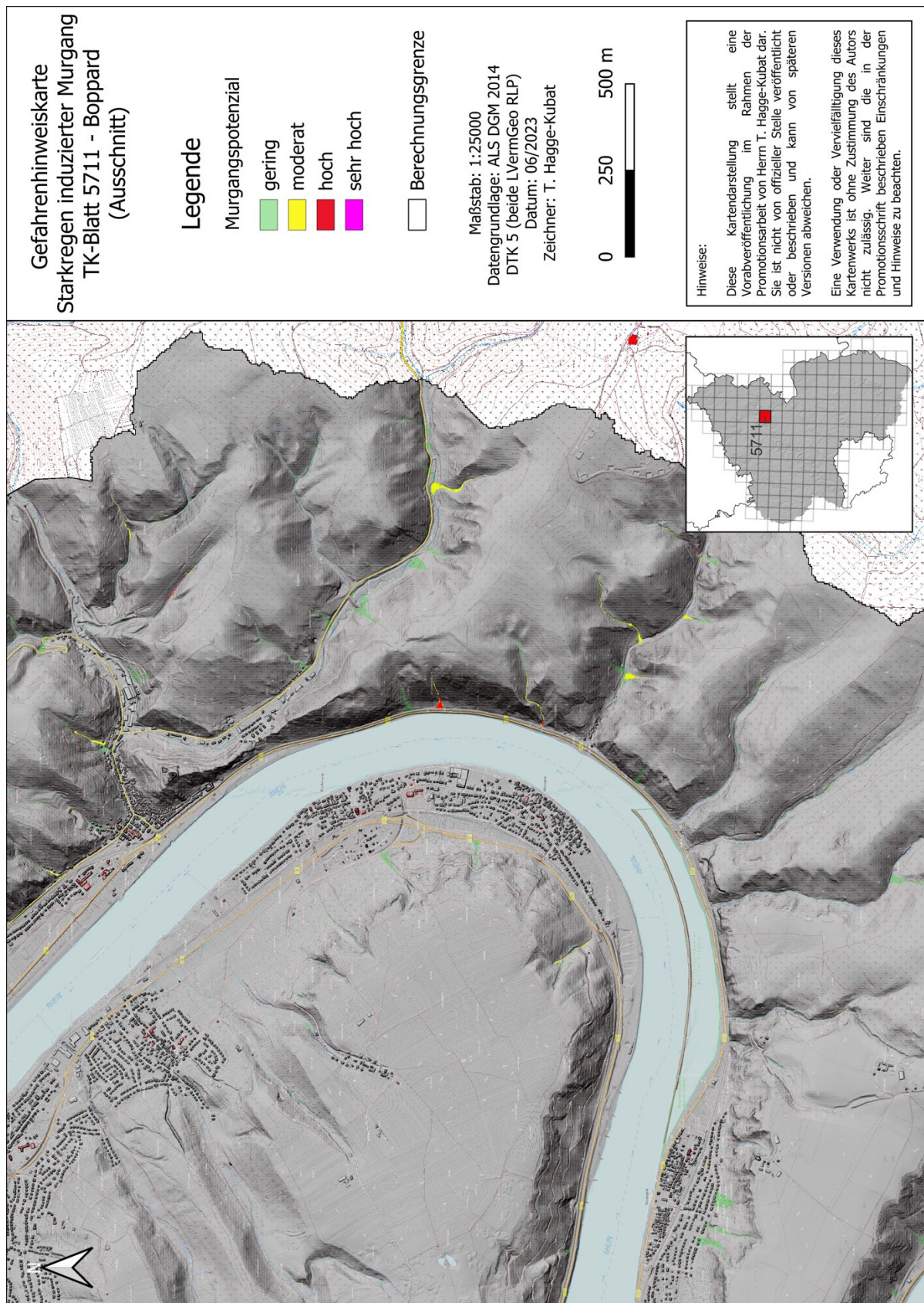


Abb. 110: Gefahrenhinweiskarte Starkregen induzierter Murgang auf dem nordöstlichen Ausschnitt des TK-Blattes 5711 Boppard im Oberen Mittelrheintal

Auf der Gefahrenhinweiskartendarstellung in Abbildung 110 sind die unterschiedlichen Gerinne entsprechend ihres modellierten Murgangspotenzials verschieden eingefärbt. Hierbei ist auf die in Kapitel 5.3.4 beschriebene Festlegung der Visualisierung entsprechend der Wahrscheinlichkeit der Auslösung hingewiesen. Gut zu erkennen ist, dass in diesem Gebiet viele Gerinne kein oder nur ein geringes Potenzial zur Auslösung eines Murgangs durch progressive Erosion der Gerinnesohle nach Starkregenereignissen haben. Dabei sind vor allem die Gerinne plausibel mit einem erhöhten Murgangspotenzial modelliert, die ein großes Einzugsgebiet auf der Hochfläche in Kombination mit einem abrupten Abfallen in einen sehr steilen Hangabschnitt in Richtung Vorfluter besitzen.

Sehr auffällig ist, dass im gesamten Kartenausschnitt nur zwei Gerinne mit einem hohen und keines mit einem sehr hohen Murgangspotenzial modelliert ist. Diese Gerinne am Scheitelpunkt des Prallhangs sind deutlich an der roten Einfärbung der Ausbreitungsmodellierung zu erkennen (vgl. Abb. 110). Dieses Phänomen ist durch die flächendeckenden Modellierungen auch an vielen weiteren Bereichen am Mittelrhein- und Moseltal zu beobachten. Ein hohes Murgangspotenzial also eine potenzielle Auslösung durch ein verhältnismäßig moderates Starkregenereignis ist nur an wenigen Gerinnen entlang der Flußläufe errechnet worden. Am gesamten Oberen Mittelrheintal sind von den abgezählten 688 Gerinnen und Tiefenlinien (vgl. Tab. 13) so beispielweise 48 Gerinne mit einem hohen Murgangspotenzial modelliert. Mit einem sehr hohen Murgangspotenzial sind hingegen nur 6 Gerinne klassifiziert, zu denen die beiden in Abbildung 97 dargestellten Gerinne bei Henschhausen zählen. Wie in Kapitel 6.2.2 beschrieben, sind diese Gerinne mit einem hohen modellierten Potenzial diejenigen, in denen vornehmlich bereits bekannten stattgefundenen Ereignisse zu verzeichnen waren. Die Modellierungen und gewählte Visualisierung sind somit als eine Möglichkeit einer Identifikationszonierung anzusehen und können entsprechend einer Gefahrenhinweiskartendarstellung als grundsätzlich plausibel und zielführend beschrieben werden.

An deutlich mehr Gerinnen ist ein geringes oder moderates Murgangspotenzial durch die Modellierungen errechnet worden, die auf ein grundsätzliches Potenzial zur Murauslösung hindeuten, jedoch erst bei deutlich stärkerem Starkregenereignissen oder ungünstigeren Schuttverteilungen modelltechnisch anspringen. In diesen Fällen können durch weitere Felduntersuchungen und tiefergehende Modellierungen im Einzelfall ein konkretes Risiko für einen Murgang ermittelt werden und gegebenenfalls die Notwendigkeit eines Schutzverbaus in Betracht gezogen werden.

In Tabelle 13 ist zusammenfassend eine Gesamtübersicht über die modellierten Murgangspotenziale an allen Gerinnen und Tiefenlinien im Untersuchungsgebiet aufgestellt. Dabei wurden die Gerinne ab einer Einzugsgebietsgröße von 25.000 m² (2,5 ha) in die Statistik aufgenommen.

Tab. 13: Gesamtübersicht über die Murgangspotenziale der Gerinne im Untersuchungsgebiet am Mittelrhein- und Moseltal. In Rot sind die verzeichneten Fälle der Rutschungsdatenbank RLP dargestellt.

Gerinneinformation		Murgangspotenzial			
Gebiet	Anzahl Gerinne	gering	moderat	hoch	sehr hoch
Rheintal gesamt	1195	310 (25,9%)	92 (7,6%)	57 (4,7%)	6 (0,5%)
Oberes Mittelrheintal	688	247 (35,9%)	69 (1) (10%)	48 (4) (6,9%)	5 (4) (0,7%)
Unteres Mittelrheintal	507	63 (12,4%)	23 (4,5%)	9 (2) (1,7%)	1 (0,2%)
Moseltal gesamt	1702	556 (32,6%)	136 (7,9%)	74 (4,3%)	12 (0,7%)
Oberes Moseltal	573	219 (38,2%)	53 (9,2%)	21 (1) (3,6%)	2 (1) (0,3%)
Mittleres Moseltal	767	256 (33,3%)	72 (1) (9,3%)	47 (6,1%)	10 (2) (1,3%)
Unteres Moseltal	362	81 (22,3%)	11 (3,4%)	6 (2) (1,6%)	0

An der Aufstellung ist gut zu erkennen, dass die einzelnen modellierten Großgebiete eine unterschiedliche Wichtung an der absoluten Menge an ausgewiesenen Murgangspotenzialen der Gesamttäler besitzen. So sind durch die flächendeckenden Modellierungen vor allem am Oberen Mittelrhein- sowie am Oberen und Mittlerem Moseltal viele Gerinne mit einem Murgangspotenzial durch die Modellierungen bestimmt worden. Gerade hier erscheint durch die steilen schuttbedeckten Hänge und Tiefenlinien sowie großen Einzugsgebieten auf der Hochfläche eine Murgangsauslösung durch konvektive Starkregenereignisse grundsätzlich realistisch. Dies sind auch die Gebiete, an denen die meisten der bisher wenigen verzeichneten Ereignisse katalogisiert wurden. Ein Vergleich mit den bisher insgesamt 18 verzeichneten Murgangsereignissen in der Rutschungsdatenbank zeigt, dass sich die Verortungen der Fälle zumeist in den Gerinnen befinden, die modelltechnisch mit einem hohen oder sehr hohen Murgangspotenzial klassifizierten sind (vgl. Tab. 13; sowie Modell-Ereignisvergleiche in Kap. 6.2.2). Kein einziger der verzeichneten Fälle wurde dabei in einem Gerinne oder Hangbereich verortet, welcher in der Modellierung nicht angesprochen ist. Dabei ist, zu berücksichtigen, dass Murgänge als Prozesstyp erst seit dem Jahr 2021 in der Rutschungsdatenbank separat ausgewiesen werden und somit manche der hier aufgeführten Ereignisse nachträglich relokalisiert und angepasst wurden (vgl. Kap. 6.2 & 6.2.2).

In der statistischen Auswertung ist weiter auch der Einfluss der angenommenen Grenzsohlneigung von 15° zu erkennen, ab der modelltechnisch eine Murgangsauslösezelle erst grundsätzlich ausgewiesen wird (vgl. Kap. 5.3.2). Alle flacheren Gerinne werden von vorneherein durch den Modellierungsprozess ausgeschlossen, sodass die Anzahl selbst an geringen Murgangspotenzialen in allen Gebieten plausibelerweise deutlich unter 50% der Gesamtanzahl der Gerinne bleibt. Davon sind vor allem auch die Bereiche mit flacherer Morphologie und unterschiedlichen geologischen Bedingungen betroffen. Am unteren Mittelrhein- sowie am unteren Moseltal sind daher in Verhältnis deutlich weniger Gerinne

betroffen. Das liegt vermutlich vor allem an den großen Talaufweitungen und städtischen Gebieten in diesen Großregionen. Während am unteren Mittelrheintal durch das flache Neuwieder Becken und den Agglomerationsraum um Koblenz sehr wenige Gerinne und Tiefenlinien mit einem Murgangspotenzial ausgewiesen werden, ist die verhältnismäßig geringe Anzahl an potenziellen Murgangsgewässern am unteren Moseltal in der markanten Talaufweitung mit flacheren Hängen und den wechselnden geologischen Bedingungen in der Trierer Bucht begründet.

7 Interpretation der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die oben vorgestellten Ergebnisse der verschiedenen Modellierungen sowie die daraus resultierenden Kartendarstellungen aufgegriffen und anhand der Grundfragestellungen dieser Arbeit interpretiert. Dabei wird zunächst der Frage nachgegangen, ob es im Untersuchungsgebiet sinnvoll möglich ist, eine Skalierung der Modellierung von Sturz- und Fließprozessen von Einzelfällen zu einer flächenhaften Darstellung zu erzielen. Dabei ist zu erläutern, wieweit diese automatisiert erstellten Modellierungen für eine realistische Beurteilung des bestehenden Muren- und Steinschlagpotenzials in diesem Gebiet geeignet erscheinen.

Daneben werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Modellierungen hinsichtlich ihrer möglichen Nutzung vor allem im behördlichen Kontext diskutiert. Dabei wird aufgezeigt, inwiefern die aus dieser Dissertation beschriebenen Ansätze und Kartenwerke für eine zukünftig angepasste Bauleitplanung und Schutzverbauung in diesen Gebieten genutzt werden könnte. Weiterführend werden auch die Grenzen der Aussagekraft der Modellierungen und Darstellungen diskutiert beziehungsweise auch rekursiv die möglichen Ansätze für Weiterentwicklungen aufgezeigt.

7.1 Qualitäten und Skalierung

Das in dieser Dissertation vorgestellte Konzept für die Ausweisung von Gefahrenzonen von Steinschlägen und Murgängen basierend auf Quellzonenidentifikation und Runout-Berechnung ist von seinen Grundlagen her ein wissenschaftlich etablierter und verbreiteter Ansatz zur Vorhersage der Gefährdungen durch Massenbewegungsprozesse (z.B. MERGILI et al. 2015, VOLKWEIN et al. 2011). In vielen alpinen Regionen der Erde wird dieses für einzelne Ereignisse oder auch für größere Gebietsregionen mittels verschiedener Simulationswerkzeuge angewendet und ist teilweise schon in Kartenwerken erfolgreich verarbeitet. In der Schweiz beispielsweise sind diese schon heute in die kommunale Bauleit- und Schutzplanung integriert (BAFU 2021, vgl. Kap. 2.5). Rheinland-Pfalz als deutsches Mittelgebirgsbundesland mit speziellen morphologischen und geologischen Verhältnissen, in dem es durch Sturz- und Fließprozesse jährlich zu mehreren zum Teil erheblichen Schadensfällen kommt, verfügt allerdings noch über kein einheitliches oder flächendeckendes Kartenwerk bezüglich Sturz- oder Fließprozessen, welche eine solche langfristig angestrebte kommunalplanerische Nutzung möglich machen würde.

Der in dieser Arbeit vorgestellte automatisierte Open-Source-Ansatz liefert dazu vielversprechende Ergebnisse. Dabei wird über die Identifikation von Quellgebieten für Steinschläge und Felsstürze mittels des SIDX-Ansatz (vgl. Kap. 4.1.3) und der Ableitung der Auslösebereiche für Murgänge über die Abflussmodellierung von Starkregenereignissen und die spezifischen TOGNACCA-Werte (vgl. Kap. 5.3) mit anschließender Ausbreitungsmodellierung der Bewegungsformen im GPP, eine schnelle Ausweisung von potenziellen Gefahrenbereichen ermöglicht. Durch den in sich aufeinander aufbauenden Modellierungsablauf (vgl. Kapitel 5), war es möglich den Prozess von lokalen Fallstudien hin zu einer flächendeckenden Modellierung zu automatisieren. Generell ist die Übertragbarkeit von Gefährdungsmodellen von lokalen auf regionale räumliche Skalen von großer Bedeutung und wird in der

Forschung intensiv verfolgt (z.B. GOETZ et al. 2021, VOLKWEIN et al. 2011, ROSSI et al. 2021). Mithilfe des vorgestellten Ansatzes ist dies in Rheinland-Pfalz erstmals für Sturz- und Fließprozesse automatisiert für ein größeres Gebiet durchgeführt worden. Die Prozessabläufe können dabei so koordiniert hintereinander ausgeführt und zeitsparend berechnet werden, dass es damit möglich war für das gesamte etwa 850 km² große Untersuchungsgebiet am Mittelrhein- und Moseltal Gefahrenhinweiskarten für die Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang zu erstellen.

Die zuvor genannten, eigens dafür im MABEIS-Projekt entwickelten oder aus etablierten Methoden weiterentwickelten und für die Gegebenheiten im Mittelgebirge angepassten Ansätze sind sowohl auf lokaler, einzelfallbezogener Ebene als auch flächendeckend für das gesamte Untersuchungsgebiet als treffend zu beschreiben (vgl. Kap. 6.1.1, 6.1.2, 6.2.1, 6.2.2). Die durchgeführten mehrschichtigen Validierungen der Modellierungsergebnisse ergeben einen sehr hohen Grad an Übereinstimmung zwischen den in der Realität aufgetreten Schadensfällen und den Modellierungsergebnissen.

Für die Modellierung von Steinschlägen und Felsstürze zeigt ein Vergleich zwischen den Einträgen in der Rutschungsdatenbank des LGB, durchgeführten Geländegroundchecks sowie den Modellierungen, dass knapp 90% der lokalisierten Schadensfälle der Datenbank im Projektgebiet sehr nah an (wenige Meter) oder überwiegend sogar direkt auf den modellierten Trajektorien liegen. Dabei ist eine potenzielle Verortungsungenauigkeit der Einträge, die zum Teil sehr alt sind und ohne technische Hilfsmittel wie GPS oder digitale Geländemodelle verortet wurden, noch gar nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 6.1.2).

Positiv sind auch die durchgeführten Geländegroundchecks zu bewerten. Beim dutzendenfach gezielten Anfahren von modellierten Quellgebieten und Trajektorienverläufen wurden in der Regel adäquate Hinweise auf eine mögliche oder bereits stattgefundene Steinschlagaktivität oder Sicherungsbauerwerke gefunden.

Auch die Validierungen der Murgangsmo­dellierungen zeigen ein ähnliches Bild. Der Vergleich zwischen den bekannten und gut dokumentierten Murgängen im Untersuchungsgebiet mit den Ergebnissen der Modellierungen zeigt eindeutige Übereinstimmungen. Alle bekannten Murgangserinne am Oberen Mittelrheintal wurden durch das automatisierte Modell treffend erkannt und in ihrer Gefährdung klar von den umgebenden Gerinnen, bei denen es in der Realität nicht zur einer Murauslösung gekommen ist, unterschieden (vgl. Kap. 6.2.2). Die Ursache für die Präzision der Berechnungen liegt nach Ansicht des Autors vermutlich an der Genauigkeit der Oberflächenabflusssimulationen und der entsprechenden Identifikation der anfänglichen Murgangsauslösebereiche. Die direkte Kombination dieser beiden Ansätze stellt gerade für den Mittelgebirgsraum eine Weiterentwicklung der Analysegenauigkeit dar. Durch das abgestufte System der Auslösemodellierung und Darstellung ist es so möglich eine Priorisierung der Gefährdung vorzunehmen, die über die Darstellung des einfachen Murgangspotenzials hinausgeht (vgl. Abb. 110).

Diese automatisiert erstellten Modellierungen sind also nach den für diese Arbeit durchgeführten Validierungen in der flächenhaften Darstellung für eine realistische Beurteilung des bestehenden Muren- und Steinschlagpotenzials in diesem Gebiet grundsätzlich geeignet. Mögliche Schwachpunkte in der Validierung und die Grenzen der Aussagekraft der Modellierungen werden weiterführend in Kapitel 7.2 diskutiert.

Die erforderlichen Eingabeparameter für alle Modellierungen wurden unter Verwendung frei verfügbarer Quellen in Kombination mit dem hochaufgelösten ALS LiDAR-Daten des Landesvermessungsamtes Rheinland-Pfalz ermittelt. Durch diesen als Open Source Prozess entwickelten Ansatz lassen sich so technische Weiterentwicklungen und neuere Daten auch für andere Fragestellungen und Behörden anderer Bundesländer anpassen und es besteht keine kommerzielle Barriere bei der Verwendung. Auch die Handhabung erscheint in den Programmumgebungen stets intuitiv, sodass die Nutzung auch ohne große spezialisierte Fachkenntnisse

bewältigbar erscheint. Da die Module in SAGA und GRASS-GIS als offen zugängliche Programmangebote stets erweitert und verbessert werden, werden zusätzlich laufend Anpassungen implementiert. Ein weiterer Vorteil sind die überschaubaren Vorarbeiten zur Differenzierung der Datengrundlagen und deren Implementierung in das digitale Geländemodell. Dieses bildet die Basis für eine realitätsgerechte Simulation und kann damit als der wichtigste Modellinput bezeichnet werden. Je besser die Auflösung und Präzision dieses digitalen Geländemodells, desto genauer werden auch die daraus resultierenden Kartenwerke.

Das in dieser Studie beschriebene heuristische System konnte also in Bezug auf die Detektion von Gefährdungsgebieten von Muren und Steinschlägen in Folge von Starkregenereignissen oder natürlichen Verwitterungsprozessen erste plausible Ergebnisse liefern. Dabei werden durch das GPP zudem physikalische Ausbreitungssimulationen durchgeführt, in der die Massenbewegungen eines Anrisspunktes zum Ablagerungsort simuliert werden. Dadurch bieten sich in der Auswertung der Output-Daten noch weitere Möglichkeiten. Beispielsweise in der Auswertung der modellierten maximalen Fließ- beziehungsweise Sturzeschwindigkeiten. Aus diesen Informationen lassen sich weitere Schlussfolgerungen, die für eine Analyse beispielsweise der Vulnerabilität von Straßenabschnitten und möglichen Sicherungsmaßnahmen wichtig sind, ableiten. So lässt sich für Steinschläge beispielsweise aus einer angenommenen Masse und der Geschwindigkeit in Kombination mit der Kenntnis des wahrscheinlichsten Weges die kinetische Energie abschätzen, die ein Gesteinskörper bei Aufprall auf ein Hindernis erreichen würde. Dies kann dazu genutzt werden, um potenziell bereits vorhandene Schutzmaßnahmen wie etwa Fangzäune auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen oder bei der Planung neuer Sicherungsmaßnahmen Mindestanforderungen zu definieren.

Dementsprechend ist im Sinne der Grundfragestellung dieser Arbeit eine Realisierung des Anspruches, eine flächendeckende und in ihrer Aussage präzise Karte der prozessorientierten Gefahrenhinweise durch Steinschläge und Murgänge am

Mittelrhein und Moseltal zu erzeugen als gelungen anzusehen. Gerade am Mittelrhein- und Moseltal, in dem sich sowohl eine hohe Exposition gegenüber diesen Prozessen als auch gebündelt mehrere Trassen der kritischen Infrastruktur befinden, ist die Ausweisung von Gefahrenzonen daher sehr relevant und ein gutes Testgebiet für eine zukünftige landesweite Ausweitung nach diesem Konzept.

7.2 Grenzen der Modelle

Nachdem gezeigt werden konnte, dass die Modelle grundsätzlich wirksam sind und eine Erstellung von Gefahrenhinweiskarten über die Ermittlung des Sturz- bzw. Fließpotenzials von Einzelfällen wie auch für große Gebiete sinnvoll erscheint, werden im Folgenden die Grenzen der Modelle beziehungsweise ihrer Aussagekraft diskutiert.

Zunächst muss bei allen gezeigten Modellierungen beachtet werden, dass sich die modellstützenden Eingangsdaten zwar jeweils aus verschiedensten Parametern und hochaufgelösten Daten zusammensetzten, die resultierenden Ableitungen daraus jedoch zum Teil geschätzt beziehungsweise entsprechend der Literatur ausgewählt werden mussten. Gerade in der angestrebten flächenhaften Modellierung müssen Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden, die zum Teil die tatsächlichen Gegebenheiten oft nur ungenau oder angenähert darstellen können.

Beispielhaft dafür stehen die angenommenen Reibungswerte (friction μ) der Steinschlagsimulationen im GPP aus den LiDAR-Vegetationsdaten (vgl. Kap. 5.2.2). Obwohl die Modellierungen mit diesen Parametereinstellungen plausible Ergebnisse darstellen und bekannte Schadensfälle zum Teil exakt nachmodelliert werden (z.B. Abb. 78), stellen diese notwendige Vereinfachung eine Quelle für potenziell markantes Über- oder Unterschätzen von Trajektorienlängen oder Sturzgeschwindigkeiten dar. Auch sind dabei weitere in der Realität relevante Parameter der Reichweitenentwicklung von Sturzereignissen wie etwa die Bestimmung exakter

Gesteinseigenschaften des stürzenden Materials sowie dessen Kubatur, das Trennflächengefüge, Substrateigenschaften des Bodens oder rheologische Parameter nicht oder nur zu einem kleinen Teil berücksichtigt. Entsprechend müssen bei der Analyse der Ergebnisse immer eine gewisse Ungenauigkeit und Modellierungsfehler bedacht werden. An ist dieser Stelle daher darauf hinzuweisen, dass die vorgestellten Modellierungen und Kartenwerke generell lediglich eine vereinfachte Abbildung der natürlichen Prozesse darstellen und daher Aussagen lediglich Abschätzungen sein können und keine unmittelbaren Handlungsempfehlungen sind.

Dies trifft nicht nur auf die Reibungswerte der Steinschlagmodellierung zu, sondern ist durch den gewollten flächendeckenden Ansatz praktisch bei allen Modellierungsschritten zu beachten. So sind auch für die Abflussmodellierungen von Starkregenereignissen Annahmen und Abschätzungen über die Landnutzung und die Manning-Strickler Werte getroffen worden, die im weiteren Prozessierungsverlauf starken Einfluss auf das mögliche „Anspringen“ eines Gerinnes für einen Murgang haben können. Bei einer potenziell dann folgenden eigentlichen Murgangssimulation sind beispielsweise die Mass-to-Drag Ratio anhand von Erfahrungswerten aufgetretener und analysierter Murgänge abgeschätzt und entsprechend generalisiert worden (vgl. Kap. 5.3.3). Somit bilden diese Modellierungen sicherlich nicht jeden einzelnen möglichen Murgang mit seinen spezifischen Charakteristiken genau ab.

Darüber hinaus ist für die flächendeckende Murgangmodellierung eine generelle Schuttverfügbarkeit aller möglichen Gerinne angenommen worden. Dies musste so geschehen, da nur für die wenigsten Gerinne im Untersuchungsgebiet überhaupt Daten zur Schuttverfügbarkeit und -mächtigkeit zur Verfügung standen (BAUMGÄRTNER 2020). Daher sind auch die Einteilung der Schuttdurchmesserklassen über Erfahrungswerte einzelner Geländegroundchecks angenommen und selbst über lithologische Grenzen im Untersuchungsgebiet generalisiert. Dies stellt sicherlich eine gewisse Unschärfe der Aussage dar, die jedoch für einen flächendeckenden Ansatz in einem mehrere hundert Quadratkilometer großen Gebiet mit zum Teil markant

wechselnder Geologie in Kauf genommen werden musste. Es besteht durch diese Einteilung das Risiko, dass die Modellierung der Murgangsauslösung einzelner Gerinne potenziell durch eine falsche Einschätzung der Schuttverfügbarkeit über- oder unterschätzt werden und das aktuell vorhandene tatsächliche Murgangspotenzial nicht adäquat widerspiegelt. Hat beispielsweise in einem Gerinne gerade erst eine Ausräumung der Lockergesteinssohle stattgefunden, muss sich zumeist erst einmal wieder mobilisierbarer Schutt in signifikanter Menge ansammeln, das System sich also wieder „aufladen“, damit ein Murgang stattfinden kann. Entsprechend kann in der Realität dann eine solche Tiefenlinie trotz vermeintlich ausreichendem Niederschlag und grundsätzlich treffender Modellierung möglicherweise nicht anspringen. Im umgekehrten Fall, ist das Gerinne mit deutlich mehr Schutt größeren Durchmessers belegen und ein Niederschlagsereignis, welches potenziell für die Auslösung eines Murgangs mit geringerem Schuttdurchmesser ausreichen würde, reicht dennoch nicht, sodass das Gerinne ebenfalls nicht anspringt. Auch besteht die dritte Möglichkeit, dass, wie das Beispiel bei Dörschied gezeigt hat (vgl. Kap. 6.2.2, Abb. 108), eine deutlich geringe Schuttdurchmesserklasse in der Realität bereits zur Auslösung eines Ereignisses führt, welches modelltechnisch jedoch nicht als hoch gefährdet eingestuft ist.

Daher ist grundsätzlich darauf hinzuweisen, dass die hier vorgestellte flächendeckende Modellierung das Murgangspotenzials der einzelnen Einzugsgebiete und Gerinne nur die Situation bei den vorgegeben (modellierten) Durchmesserklassen und Niederschlagsmengen widerspiegelt. In einem variablen System, in dem sich die mobilisierbare Schuttmenge in den Gerinnen größtenteils unbekannt ist und sich zudem ständig ändert kann dies entsprechend nur eine Abschätzung einer Gefahreinschätzung sein. Dies muss bei der Analyse der Ergebnisse beachtet werden und im Einzelfall für Gerinne in einer tiefergehenden Analyse der Schuttverfügbarkeit und Verteilung untersucht werden.

Zusätzlich ist bei den Modellierungen im Open Source Modul GPP grundsätzlich zu beachten, dass die implementierten Modellierungsansätze nicht auf vollständig physikalischen Prinzipien basieren, sondern zum Teil auf validierten empirischen und grundlegenden mechanischen Prinzipien aufbauen, um die typischen Bewegungsformen von Massenbewegungen nachzuahmen. Daher ist dabei generell keine völlig exakte oder geeichte Modellierungs- und Aussagequalität zu erwarten, wie das beispielsweise bei kommerzieller Software der Fall sein sollte.

Die Ergebnisse der Modellierungen geben also im Sinne der Fragestellung also lediglich einen Hinweis auf mögliche Auslösung und eine potenzielle Ausbreitung der beiden untersuchten Prozesstypen. Sie stellen damit aber keine einklagbaren Garantien für ein tatsächliches Eintreten dar. Entsprechend sind diese Gefahrenhinweise nur in Kombination mit tiefergehenden Untersuchungen verwendbar. Es ist in jedem Fall nötig etwaige Rückschlüsse vor Ort fachkundig fundiert zu überprüfen oder weiterführend angepasst zu modellieren. Die Ergebnisse der in die Fläche gerechneten Modellierung sind somit als eine Möglichkeit einer Identifikationszonierung anzusehen.

Auch muss im Sinne der Auswahl der verwendeten Parameter zudem von einer softwareseitigen Limitierung und zum Teil subjektiven Betrachtung gesprochen werden. Andere vermutlich ebenfalls einflusswirksame Parameter auf die Prozesse, wie etwa bei der Abflussentwicklung jahreszeitliche Veränderungen der Landnutzung, die Evapotranspiration und Interzeption oder der Grundwasserabfluss; bei der Murgangsausbreitung und -auslösung, die Auslösung durch Verklausung, die Leveebildung oder das Entrainment; oder beim Steinschlagverlaufs, Baumtreffer und deren Ablenkung, modellierte Sprunghöhen oder das Zerkleinern des Kluftkörpers auf der Sturzbahn, sind durch die Module bisher nicht abgedeckt und somit in den Modellierungen auch nicht berücksichtigt worden. All diese und weitere Faktoren sollten bei einer weiterführenden Analyse der tatsächlichen Gefahrensituation und bei der Planung und Ausführung von Schutzmaßnahmen mit einbezogen werden.

Grundsätzlich ermöglichen die Simulationen des Auslauf- und Ablagerungsverhaltens durch das GPP Modul eine einfache und schnelle Modellierung für unterschiedliche Szenarien. Die konsistenten Modellierungsergebnisse hängen dabei aber stark mit der hohen Auflösung des Eingabe-DGMs zusammen. Entsprechend ist es für die weiterführende Anwendung auch für ähnliche Fragestellungen in anderen geologischen und morphologischen Kontexten ratsam, ein möglichst hochaufgelöstes DGM zu verwenden. Darüber hinaus hängt der Erfolg der Ausbreitungs- und Ablagerungsmodellierung und des SinkFill sehr stark auch von der geeigneten Bestimmung der Mächtigkeit des in die Massenbewegungsmodellierung eingebrachten Materials ab. Dieses wurde in dem hier vorgestellten flächendeckenden Ansatz generalisiert auf 0,5m gesetzt, wobei auch hier eine situationsbezogene Anpassung zu vermutlich noch einmal deutlich genaueren Ergebnissen führt.

Insgesamt sind, wie zuvor beschrieben, die Validierungen der Modellierungen für Steinschläge und Murgänge als sehr positiv zu bewerten. Da für die Murgänge aus den in den Kapiteln 6.2 und 6.2.2 beschriebenen Gründen keine ausreichende Anzahl an Einträgen in der Rutschungsdatenbank des LGB vorhanden war mussten die flächenhaften Modellierungen der Murgänge ausschließlich über gut bekannte stattgefundenere Ereignisse vollzogen werden. Dabei ist eine statistische Auswertung wie sie für die Steinschläge durchgeführt worden ist, nur eingeschränkt möglich gewesen (vgl. Tab. 13). Entsprechend kann die Validierung der Ergebnisse der Murgänge nur eine Abschätzung der tatsächlichen Wirksamkeit darstellen. Wie beschrieben, sollten zukünftige Ereignisse und Groundchecks auch weiterhin mit den Modellierungsergebnissen verglichen werden und so eine fortlaufende Validierung der Ergebnisse stattfinden. Gleiches gilt für die Validierung der Steinschlagmodellierung, die zwar auf eine relevante Anzahl an Ereignissen im

Untersuchungsgebiet zurückgreifen konnte, jedoch hinsichtlich einer exakten Verortung der Schadensfälle ihre Wirksamkeit weiter unter Beweis stellen muss.

Abschließend stellen auch die Darstellungen der Kartenwerke einen Quell möglicher Missinterpretationen dar, die bei einer Auswertung der Modellierungsergebnisse und der Kartenwerke beachtet werden müssen. Die, in den Kapiteln 5.2.4 und 5.3.4 aufgezeigte Symbolisierung der Rasteroutputs der Modellierungen stellt in der Farbauswahl eine Darstellung angelehnt an die Maßgabe der Staatlich Geologischen Dienste (2009) für Gefahrenhinweiskarten dar. Dabei ist zu beachten, dass die dort beschriebenen Farbgebungen und Gefahrenhinweise sich auf großmaßstäbige Hinweispolygone und Gefahrenklassen von „gering“ bis „sehr hoch beziehen“. Die hier modellierten Rasterkarten des Steinschlagpotenzials mit einer sehr hohen Auflösung von 1x1m stellen dahingegen die Trajektorienfrequenz als den wahrscheinlichsten Weg eines modellierten Sturzkörpers auf seinem hangabwärtigen Weg dar. Entsprechend sind diese beiden Ansätze nur bedingt direkt miteinander zu vergleichen. Zwar lassen sich, wie Tabelle 5 zeigt, die eingeteilten Klassen der modellierten Trajektorien pro Rasterzelle prinzipiell in solche Gefahrenhinweise übersetzen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine geringe Trajektorienfrequenz auch auf eine geringe Möglichkeit der Steinschlagauslösung hindeutet. Tatsächlich kann durch die Modellierung des Steinschlagpotenzials nach dem hier vorgestellten Ansatz keine exakte Aussage über die Wahrscheinlichkeit des tatsächlichen Auftretens von Steinschlägen oder Felsstürzen abgeleitet werden. Auch ein einzelner Felsausbiss mit einer Ausdehnung von lediglich wenigen Metern kann in der Realität aufgrund z.B. seiner lithologischen Eigenschaften, eines hohen Verwitterungsgrades, ungünstigen Trennflächengefüges oder Überhängens häufiger Steinschläge bedingen als einen standfesten hunderte Meter hohe Felsrippe anderen Gesteins. Die hier gewählte Darstellung stellt also eine Generalisierung aufgrund der absoluten Modellierungsdurchläufe pro Rasterzelle an und unterscheidet dabei nicht innerhalb von ingenieurgeologischer- oder felsmechanischer Klassen.

Dadurch, dass es in den Gebieten einer hohen Trajektorienklasse (dunklerer Einfärbung, starker Gefahrenhinweis) jedoch eine größere Anzahl an potenziellen Auslösezellen und entsprechend an modellierten Sturzbahnen gibt, stellt die Einfärbung jedoch einen statistischen Hinweis über das allgemeine Steinschlagpotenzial in diesen Gebieten dar. Daher ist zu beachten, dass auch Bereiche, die nur einen schwächeren Gefahrenhinweis repräsentieren, potenziell nicht unbedingt weniger gefährdet sind. Die hier generierte Gefahrenhinweiskarte für Steinschläge und Felsstürze stellt also explizit keine Gefahren- oder Suszeptibilitätskarte dar und darf auch nicht als solche verwendet werden.

Anders ist dies bei der Darstellung der Murgänge zu bewerten. Durch den Ansatz der Ermittlung der expliziten Auslösung über Niederschlagsgrenzwerte und die TOGNACCA-Werte (vgl. Kap. 5.3), stellen die Modellierungsergebnisse hier grundsätzlich eine tatsächliche Einschätzung über die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens dar. Dabei ist zu beachten, dass wie beschrieben die Grenzwerte sowohl in der Niederschlagsverteilung (15, 30, 45, 60 mm/h) als auch im Schuttdurchmesser (10, 20, 30 cm) für diese Arbeit standardisiert abgeschätzt wurden. Eine mögliche Anpassung mit schärferen und angepassten Grenzen bietet dabei sicherlich die Möglichkeit für eine weitere Verbesserung der Aussageergebnisse (vgl. Kap. 7.4). Für eine erste Aussage im Sinne eines heuristischen Ansatzes sowie um die generelle Wirksamkeit der Methode zu ermitteln, stellen diese Grenzwerte jedoch eine wissenschaftlich nachvollziehbare und linear ansteigende Einteilung dar.

Somit lässt sich insgesamt festhalten, dass der vorgestellte Ansatz zwar keine Komplettlösung sowohl in der Darstellung als auch in der Modellierung darstellt und generell noch einige Anpassungen und weitere Schritte der Validierung notwendig sind, dass mit der angewandten Methodik im Sinne der Fragstellung die Ziele jedoch weitgehend erreicht wurden und dieses Konzept grundsätzlich als plausibel und wirksam einzuschätzen ist.

7.3 Möglichkeiten der Nutzung

Als erstmals flächendeckend erstellte Gefahrenhinweiskarten für die Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang am Mittelrhein- und Moseltal lassen sich die Ergebnisse und Kartenwerke dieser Arbeit auf vielfältiger Weise nutzen. Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Einschränkungen können die erstellten Modellierungen gerade in Kombination mit dem VulWay-Ansatz (vgl. Kap. 6.1.3) einen Beitrag leisten, sicherheitsrelevante Bereiche der Infrastruktur zu ermitteln und in ihrem Gefährdungspotenzial einzuschätzen. Dabei kann durch die hohe Auflösung der Modellierungen und der verwendeten Eingangsdaten eine Optimierung der Schutzverbauung angestrebt werden, bei der Lücken in der bestehenden Verbauung erkannt und neue Maßnahmen richtig dimensioniert werden. Da die Modellierungen flächendeckend mit denselben verwendeten Parametereinstellungen durchgeführt wurden, sind die einzelnen Situationen dabei gut vergleichbar und es können zusätzlich Priorisierungen von Streckenabschnitten vorgenommen werden. Diese Bereiche können vom Modell explizit zur anschließenden Überprüfung im Gelände ausgegeben werden, so dass hier gezielt eine Überprüfung und ggfs. Sicherung durch den LBM oder die Deutsche Bahn erfolgen kann. Durch die Automatisierung der Rechenabläufe kann und soll dies bei Erfolg dann auch iterativ auf die gesamte Landesfläche ausgeweitet werden.

Dabei können die in dieser Dissertation entwickelten Kartenwerke sowie das MABEIS-Projekt generell dabei für eine größere Sensibilisierung gegenüber Sturz- und Fließprozessen sorgen. So kann es zu einer Stärkung der Zusammenarbeit verschiedener relevanter Akteure, die sich um eine vorrausschauende Politik der Schadensvermeidung in diesem Gebiet bemühen, beitragen.

Gerade in Bezug auf Murgänge ist dies ein wichtiger Schritt, dem zukünftig auch in der breiteren Öffentlichkeit mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Gerade im Zuge des Klimawandels ist hier möglicherweise mit einer Zunahme an Ereignissen auch in den deutschen Mittelgebirgsregionen zu rechnen (vgl. Kap. 2.6), sodass

frühzeitig eingeleitete Maßnahmen und präventive Aufklärung über Abläufe und Schadensausmaße sinnvoll erscheinen. Gerade eine angestrebte Veröffentlichung dieser Karten im Rahmen der ingenieurgeologischen Kartenwerke des LGB kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Dabei ist zu beachten, dass eine Verwendung der Kartenwerke in einem solchen Kontext nur unter der Maßgabe der zuvor beschriebenen Einschränkungen und notwendigen Hintergrundinformationen erfolgen kann. Grundsätzlich sollten diese Kartenwerke daher auch nicht oder nur eingeschränkt von fachfremden Personen interpretiert und zur weiteren Verwendung ohne entsprechende Hinweise genutzt werden können.

Langfristig kann es durch Gefahrenhinweiskarten zu diesen Prozessen möglich sein, dass die kommunale Bauleitplanung angepasst und mögliche gefährdete Bereiche nicht mehr bebaut beziehungsweise vor einer Bebauung tiefergehend untersucht werden. Wie beschrieben ist dies u.a. in der Schweiz bereits heutzutage gängige Praxis und kann damit beispielhaft auch für eine ähnliche Verwendung hierzulande stehen. Dadurch kann es möglich sein, potenzielle Schadensfälle präventiv zu verhindern oder Einzelfall bezogene angepasste Schutzmaßnahmen zu entwickeln. Wie in der Masterarbeit des Autors (HAGGE-KUBAT 2019) beschrieben ist, können dabei selbst kleinere Landnutzungsänderungen eine entscheidende Rolle spielen. Auch dahingehend ist ein solches Kartenwerk wertvoll, um beispielsweise Landwirte in den großen Einzugsgebieten auf den Hochflächen zu sensibilisieren und dadurch beispielsweise ein Pflügeverhalten der Felderbewirtschaftung zu etablieren, dass keine zusätzliche Konzentration von abfließendem Wasser in die steilen Hanglagen begünstigt (vgl. STRAUSS et al. 2020, AKKERMANN 2004).

Eine generelle Empfehlung der Landnutzungsänderung beispielsweise hin zu einer abflussminimierenden Waldbepflanzung in den oberen Teilen der Einzugsgebiete gefährdeter Gerinne lässt sich an dieser Stelle jedoch nicht ableiten. Dies müsste den lokalen Gegebenheiten entsprechend genauer analysiert werden. Es sind bei solchen landschaftlichen Eingriffen grundsätzlich die ökonomischen-, aber auch

gefährdungstechnischen Folgen zu berücksichtigen. Beispielsweise kann durch eine Umleitung eine effektive Reduzierung des einfließenden Wassers in ein gefährdetes Gerinne erfolgen und die Murgangsgefahr dort minimiert werden (vgl. Kap. 6.1.1, Abb. 96). Dies minimiert oder verzögert jedoch nicht die absolute Menge an abfließendem Wasser und erzeugt eine potenzielle Gefahrensituation für andere Bereiche.

Darüber hinaus kann eine langfristige Nutzung der Kartenwerke auch in der Kombination mit neuen Technologien liegen. Gerade in Kombination mit Warnsoftware wie NINA oder KatWarn besteht die Möglichkeit, dass im Starkregenfall vor bestimmten Bereichen im Unterlauf von Hanggerinnen gewarnt wird. Beispielsweise wäre es denkbar, dass gefährdete Gerinne ohne eine bestehende Schutzverbauung, in einem solchen Fall vom unterliegenden Verkehr nur bremsbereit mit einer reduzierten Geschwindigkeit passiert werden sollen. Diese langfristigen Maßnahmen und Überlegungen sind zukünftig im Einzelnen zu evaluieren und die Möglichkeiten der Umsetzung kritisch zu prüfen.

Auch jetzt schon finden die ersten Ergebnisse der Modellierungen regelmäßig im behördlicher Kontext Verwendung, vor allem in ingenieurgeologischen Stellungnahmen des LGB. Dies kann und soll zukünftig noch ausgebaut und zu einem standardisierten Verfahren etabliert werden, sodass Mitarbeiter die Modellierungen als einfaches Werkzeug der Unterstützung, wie bereits heute das digitale Geländemodell, nutzen können.

Somit bieten sich für die Anwendung der Kartenwerke vielfältige Möglichkeiten, die im Nachgang zu dieser Dissertation im MABEIS-Projekt weiterverfolgt und angepasst werden sollten. Zusätzlich dazu bietet der Ansatz und die Modellierungen an sich noch verschiedene weitere Entwicklungsmöglichkeiten, die im Folgenden weiter beschrieben werden.

7.4 Potenzielle Weiterentwicklungen

Der in dieser Arbeit vorgestellte Modellansatz bietet bereits ein robustes Modellierungskonzept mit dem erstmals eine Gefahrenhinweiskarte für die Prozesse Steinschlag/Felssturz und Murgang am Mittelrhein- und Moseltal errechnet werden konnte. Dennoch gibt es an diesem Ansatz weitere Entwicklungsmöglichkeiten, die im Rahmen dieser Dissertation nicht mehr ausgeleuchtet werden konnten. Diese könnten potenziell einen positiven Effekt auf die Ergebnisse haben und sollten daher in diesem Kapitel weiter diskutiert werden. Da der Ansatz für die Berechnung einer großen Fläche ausgelegt ist, müssen wie beschrieben, zwangsläufig gewisse Annahmen getroffen werden und Abstriche in der Genauigkeit der Aussage auf lokaler Ebene in Kauf genommen werden. Durch die vorgestellten Ergebnisse (Kap. 6) sind jedoch potenzielle Verbesserungsmöglichkeiten und Grenzen des Modells sichtbar geworden, die in folgenden Studien angepasst und verbessert werden könnten. Mögliche Weiterentwicklungen der Nutzung oder Darstellung basierend auf den Ergebnissen der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungen sind in den Kapiteln 7.2 und 7.3 beschrieben und werden hier nicht weiter aufgegriffen.

Eine wesentliche Schärfung der Aussagequalität könnten bei den Murgangmodellierungen real angepasste Schuttdurchmesser und Schuttverfügbarkeiten der Gerinne bedeuten. Wie in Kapitel 7.2 beschrieben, sind die standardisierten Durchschnittswerte von 10, 20, 30cm eine sinnvolle Annäherung und die Modellierungsergebnisse spiegeln bei den bekannten Ereignissen im Oberen Mittelrheintal plausible Ergebnisse. Für andere geologische Verhältnisse kann diese Einteilung jedoch möglicherweise zu grob gefasst sein. Generell würden bei einer feineren Einteilung auch die Aussagegenauigkeiten bezogen auf die Auslösung und die entsprechende Gefährdungslage deutlich präziser. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll anhand von Feldstudien generell die Lockergesteinsverteilung in den Tiefenlinien in Rheinland-Pfalz genauer zu analysieren und anhand von statistischen Untersuchungen Regelmäßigkeiten zu erkennen. Erste Studien dazu liefern REISCHL

(2017), JOHNEN (2017), HAGGE-KUBAT (2019) und BAUMGÄRTNER (2020) deren Ergebnisse der Felduntersuchungen auch in die Entwicklung des hier vorgestellten Ansatzes eingeflossen sind. Diese stellen jedoch nur Stichproben in einzelnen Tiefenlinien dar und sollten für eine genauere Abschätzung der mobilisierbaren Lockergesteinsverfügbarkeit ausgeweitet und auch in anderen geologischen Verhältnissen als dem Rheinischen Schiefergebirge untersucht werden. Im Rahmen von weiteren stichprobenartigen Geländebegehungen für diese Promotionsarbeit wurden zum Teil markante Heterogenitäten in der Schuttmenge, -verteilung und -durchmesser in benachbarten Gerinnen und selbst in einzelnen Tiefenlinien vorgefunden (vgl. Anhang J). Mögliche Ergebnisse solcher weiterführenden Studien können dann in den offenen Ansatz der Modellierung integriert werden.

Auch sind die für diese Studie festgelegten Niederschlagsgrenzwerte mit den modellierten Größen 15, 30, 45, und 60mm/h als möglicher Bereich einer Weiterentwicklung anzusehen. Zunächst basieren die in dieser Arbeit verwendeten Werte auf der nicht mehr aktuellen KOSTRA-DWD-2010R Tabelle und sollten als Anpassung auf die Anfang 2023 erschienene KOSTRA-DWD-2020 aktualisiert werden (vgl. Kap. 4.2). Zusätzlich dazu spiegeln die verwendeten Werte eine sehr große Bandbreite an möglichem Starkregenszenarien ab. Dabei werden beispielhaft an dem KOSTRA Datensatz von St. Goarshausen im Oberen Mittelrheintal (vgl. Abb. 54) diese Werte von einer einjährigen Wiederkehrdauer (15 mm/h) bis hin zu einer weit über hundertjährigen Wiederkehrdauer (60mm/h) modelliert. Für die Fragestellung dieser Arbeit und als Test für die Wirksamkeit des Ansatzes ist diese Einteilung zunächst als nachvollziehbar und nötig anzusehen, ist für eine engere Gefährdungszonierung jedoch möglicherweise zu grob gewählt und könnte für zukünftige Studien verringert werden. So werden die meisten der mit der Darstellung dieser Studie (vgl. Kap. 5.3.4) als hoch gefährdet eingeschätzten Gerinne zwischen den Niederschlagswerten 30 bis 45mm/h ausgelöst. Für eine genauere Abschätzung des Auslöserisikos würde eine

Anpassung auf beispielsweise 5er Schritte in diesem Bereich eine präzisere Aussage erlauben.

Darüber hinaus könnten sowohl bei der Abflussmodellierung in GRASS-GIS als auch in der Ausbreitungsmodellierung für Sturz- und Fließprozesse im GPP die physikalischen Stämme extrahiert aus den LiDAR-Vegetationsdaten zukünftig als feste DGM-Barrieren hinzugefügt werden. Dieser in Kapitel 5.3.1 kurz angesprochene Ansatz kann als weiterer hochaufgelöster Input die Modellierungen integriert und vermutlich für eine für noch realitätsnähere Modellierung sorgen. Erste Tests dafür wurden bereits im Zuge des MABEIS-Projektes durchgeführt und dabei vielversprechende Ergebnisse erzielt. Eine solche Implementation ist mit Stand dieser Dissertation noch nicht in einem vertretbaren Zeitrahmen für große Flächen möglich und stellt somit eine sinnvolle Weiterentwicklung des vorgestellten Prozessansatzes dar.

Grundsätzlich liefert diese Qualitätsverbesserung der Modellierungen auch eine höhere Auflösung des Eingangs-DGMs. Das in dieser Arbeit verwendete 1x1m DGM ist bereits mit einer sehr hohen Auflösung für eine großräumige Regionalstudie ausgestattet, sodass weitere Tests, beispielsweise mit einem 0,5 oder 0,2m DGM signifikant bessere Ergebnisse erzielen müssten, die eine deutliche Zunahme der Rechenleistung, Speicherverfügbarkeit und Modellierungsdauer rechtfertigen zu können. Viele Studien der internationalen Literatur sind im Vergleich mit deutlich geringer aufgelösten DGMs berechnet (BREGOLI et al. 2015, GOETZ et al. 2021, TIRANTI et al. 2023).

Des Weiteren könnten eine Verbesserung und Implementierung der tatsächlichen Kubaturen und genauere Definition von Auslösebereichen weitere deutliche Präzisierung der Aussagen durch die Modelle erlauben. In der Steinschlagsmodellierung werden immer der Rasterauflösung entsprechende, gleichgroße Partikel aus den über den SIDX generierten Startzellen modelliert, welche keine direkte Aussage über eine Wahrscheinlichkeit der Auslösung oder über die

kinetischen Energieentwicklungen zulassen. So werden beispielsweise in größeren Felswänden keine Differenzierung einzelner Bereiche vorgenommen, sondern die gesamte Felswand mit dem gleichen Partikel jeweils ausgehend aus einem 1x1m großen Raster berechnet. So kann im Sinne dieser Arbeit ein generelles Steinschlagpotenzial der Wand errechnet werden, welches zusätzlich auch den wahrscheinlichsten Weg der potenziell stürzenden Kluftkörper darstellt, aber keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit (Suszeptibilität) des Auftretens oder der Größe beziehungsweise des Volumens reeller Sturzkörper berücksichtigt werden. Dafür wird im MABEIS-Projekt bereits an einer Weiterentwicklung zu dem in dieser Studie vorgestellten Ansatz gearbeitet. Zukünftig könnte über ein Automatisierungstool, dem sogenannten MABEIS-Mapper, eine solche Suszeptibilitätsanalyse einen weiteren Beitrag dazu leisten die Einschätzung der Steinschlaggefährdung weiter zu verfeinern (SÜßER et al. 2023). Eine solche Analyse fußt auf verschiedenen Inputparametern, welche gewichtet eine Beurteilung über eine differenzierte Wahrscheinlichkeit der Auslösung bedeuten könnte. Abbildung 111 stellt einen Überblick über verschiedene dabei verwendete Inputparameter dar. Dabei sind die Hauptkomponenten wie klimatische, gesteinsmechanische sowie anthropogene Einflüsse zu berücksichtigen und auf eine gegebene Felspartie mit hohem Steinschlagpotenzial, ermittelt aus dem Ansatz dieser Arbeit, anzuwenden (HAGGE-KUBAT et al. 2021). Der dabei am höchsten gewichteten Parameter stellt das Trennflächengefüge von betrachteten Felsaufschlüssen dar, welches über statistische Auswertungen aus den LiDAR-Rohdaten sowie hochaufgelösten Drohnen (UAV)-Befliegungen extrahiert werden kann (SÜßER et al. 2023). Eine Veröffentlichung dieses Ansatzes ist in der, zu dieser Arbeit, konsekutiv aufbauenden Promotionsschrift von Herrn Philip Süßer vorgesehen.

Bei einer erfolgreichen Durchführung und Validierung dieses Systems könnten die Ergebnisse in Kombination mit den in dieser Arbeit vorgestellten Potenzialanalysen zu einer weiteren Annäherung einer flächendeckenden Gefahrenkarte für das Mittelrhein- und Moseltal führen. Dadurch ließe sich möglicherweise durch die

Vermeidung oder Minderung von Schadensfällen von einer deutlichen wirtschaftlichen Kosteneinsparung durch gravitative Sturzprozesse rechnen (HAGGE-KUBAT et al. 2021).

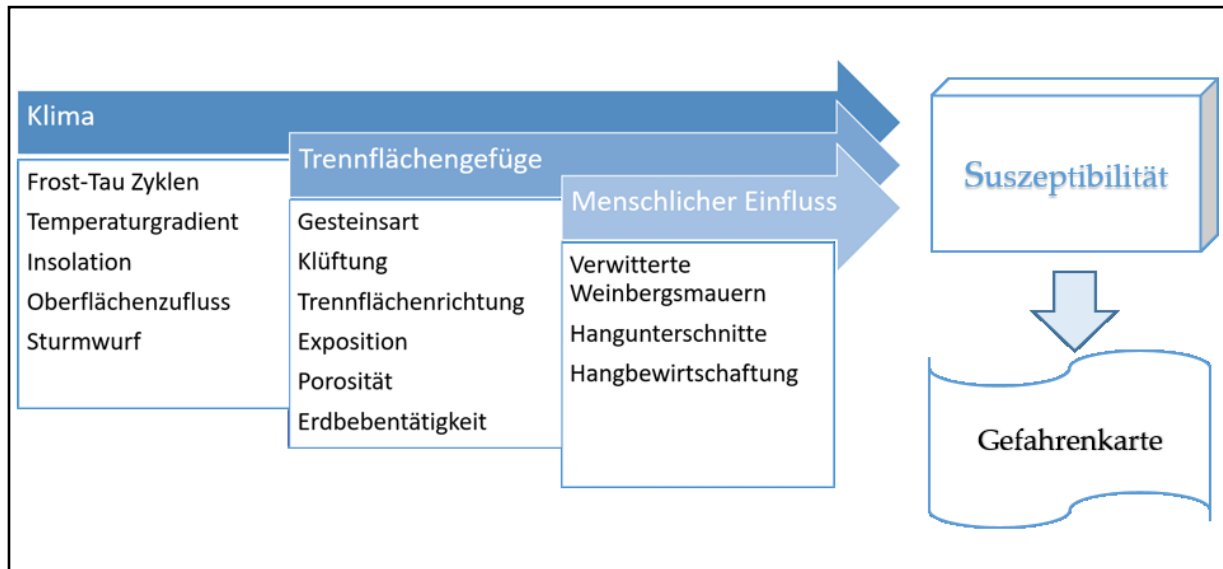


Abb. 111: Schematische Darstellung einer möglichen Suszeptibilitätsanalyse von Hangbereichen in Rheinland-Pfalz (HAGGE-KUBAT et al. 2021)

In diversen Studien zu Murgangs- und Steinschlagsgefahrenerkennung wurden darüber hinaus in den letzten Jahren vermehrt Ansätze mittels künstlicher Intelligenz (KI) getestet und weiterentwickelt (z.B. FARMAKIS et al. 2023, GAO et al. 2021, ZHANG et al. 2019). Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Ansätze und Ergebnisse könnten zukünftig als Basis oder auch Trainingsobjekte für eine KI basierte Fortschreibung der Modellierungsprozesskette dienen. Gerade im Bereich der differenzierten Schutt- und Niederschlagsvariabilität sowie der Ausweisung von Startzellen könnten dabei KI-Ansätze eine erhebliche Verbesserung des bestehenden Modells bedeuten.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine flächendeckende Kartierung der Steinschlag-, Felssturz- und Murgangsgefährdung an den exponierten Hängen der rheinland-pfälzischen Flusstäler ist bislang nicht verfügbar. Die zahlreichen Schadensfälle und kostenintensiven Sicherungsmaßnahmen, welche zum Schutz der kritischen Infrastruktur in diesem Gebiet errichtet wurden und werden belegen, dass ein solches Kartenwerk die Präventionsbemühungen der Verwaltungen und kommunalen Entscheidungsträger in entscheidendem Maße verbessern könnte. Daher wurde nun im Rahmen des MABEIS-Projektes und in dieser Promotionsarbeit versucht, mittels geographischer Informationssysteme ein halbautomatisiertes System zu entwickeln, welches potenzielle Steinschlag und Murgangsquellgebiete hochaufgelöst definiert und deren Sturz- und Fließpotential modelliert. Das entwickelte System, bestehend aus Open Source Komponenten von QGIS, SAGA-GIS sowie GRASS-GIS und hochaufgelösten LiDAR-Daten wurde entsprechend darauf ausgelegt, die Modellierungen in die Fläche zu rechnen. Dadurch konnte eine Karte der theoretischen Potenziale dieser Massenbewegungsprozesse für das gesamte Mittelrhein- sowie Moseltal gerechnet werden.

Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die präzise Ausweisung der Steinschlag und Murgangsquellgebiete sowie weiterer Inputdaten zu Vegetation und Geologie sowohl konkrete Ereignisse plausibel nachgestellt- als auch bislang nicht bekannte potenzielle Gefährdungsgebiete detektiert werden konnten. Die verwendeten Komponenten im GPP-Modell stellen dabei einen erfolgversprechenden Ansatz dar, das gewünschte Ergebnis einer großflächigen Gefahrenanalyse innerhalb der rheinland-pfälzischen Flusstäler in einem vertretbaren Zeit- und Datenrahmen mit zufriedenstellender Qualität zu modellieren.

Durch die Validierung mittels der Rutschungsdatenbanken von LGB und LBM sowie zahlreiche Geländebegehungen konnten die Modellierungsergebnisse bestätigt und Verbesserungen eingepflegt werden. Somit war es unter anderem möglich auch

Schutzmaßnahmen wie Fangzäune oder Vernetzungen in das Modell zu integrieren und deren Schutzwirkung zu berücksichtigen.

Durch die Nutzung von Infrastruktur- sowie und Schutzbauwerksdaten konnten flächendeckende Vulnerabilitätsberechnungen durchgeführt werden, welche eine Gefährdungsabschätzung konkreter Streckenabschnitte von Bahnstecken und Straßen ermöglicht. Diese decken sich mit den tatsächlichen Schadensfällen und Sicherungsmaßnahmen und können daher als durchaus plausibel eingeschätzt werden. Insgesamt können die Ergebnisse dieser Arbeit einen Hinweis darauf geben, welchen Bereichen möglicherweise zukünftig besondere planungstechnische Aufmerksamkeit zukommen sollten, und in welchem Maße potenzielle Schutzmaßnahmen durchzuführen wären.

Das in dieser Dissertation vorgestellte Modellierungssystem lässt sich daher als plausibles Instrument für eine regionale Steinschlag- und Murgangspotenzialsanalyse der rheinland-pfälzischen Flusstäler beschreiben. Wie gezeigt werden konnte, sind die hier vorgestellten Ergebnisse und Ansätze gleichwohl weiterzuentwickeln und an zukünftigen Ereignissen zu validieren. In einem weiteren Schritt kann das System dann auch auf weitere Gebiete und letztlich die gesamte Landesfläche von Rheinland-Pfalz angewendet werden. Weiterführend können die Ergebnisse über die Webanwendungen der Landesbehörden angepasst auch der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden und zukünftig einen Beitrag zur kommunalen Bauleitplanung leisten.

Dabei ist die Suszeptibilität, also die Risikoeinschätzung für das Eintreten solcher Fälle in der Potenzialanalyse noch nicht berücksichtigt. Zukünftig könnte eine solche Suszeptibilitätsanalyse einen weiteren Beitrag dazu leisten die Gefährdung durch Steinschlag oder Murgänge weiter zu verfeinern.

Abschließend sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass Simulationsrechnungen zur Abschätzung von Prozessen in der Natur zwar eine große und oft nicht ersetzbare Bedeutung haben, dass sie aber lediglich eine vereinfachte

Abbildung dieser natürlichen Prozesse ermöglichen. Eine konkrete Betrachtung der realen lokalen Verhältnisse durch Untersuchungen und Kartierungen im Gelände sowie die präzise Beschreibung von Schadensereignissen ist deshalb unerlässlich.

Literaturverzeichnis

- ABELE, G. (1974): Bergstürze in den Alpen, ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. In: Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, 25: 1-230. München.
- AGLIARDI, F., CROSTA, G. B. & FRATTINI, P. (2009): Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 9: 1059-1073.
- Agrarmeteo-RLP (2022): Daten der Wetterstation Bacharach. Internet: <https://www.wetter.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/cc619a07ed6c4634c1257800003dca56/3fb652adc0ab0ca1c1257171002e8a6a?OpenDocument> (Zugriff: 08.06.2023)
- AHMED BAZAI, N., JIANG, H., SHUNYU, Y., JINBO, T., HU, J., SHUJIAN, Y., QIANG, Z., AHMED, T. & JIAN, G. (2022): Dynamic Process of a Typical Slope Debris Flow: A Case Study of the Wujia Gully, Zengda, Sichuan Province, China. In: Nat. Hazards, 112: 565–586.
- AKKERMANN, M. (2004): Beurteilung des Einflusses einer angepassten Ackernutzung auf den Hochwasserabfluss. Doktorarbeit an der Universität Hannover. Hannover.
- ALBABA, A., SCHWARZ, M., WENDELER, C., LOUP, B. & DORREN, L. (2019): Numerical Modeling Using an Elastoplastic-Adhesive Discrete Element Code for Simulating Hillslope Debris Flows and Calibration against Field Experiments. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19: 2339–2358.
- ALBERTI, M. (2007): Felssicherungsarbeiten an der Bundesstraße B 9 zwischen Bingerbrück und Trechtingshausen. In: Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen, 35: 33-50.
- ALBERTI, M., WEHINGER, A. & KRAUTER, E. (2013): Hang und Felssicherungsmaßnahmen in der Welterberegion Oberes Mittelrheintal. Geländeexkursion am 13.06.2013. In: Forschungsstelle Rutschungen, 13. Weiterbildungsseminar Rutschungen: 39-42.
- ALEOTTI, P. & CHOWDHURY, R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. In: Bulletin of Engineering Geology and the environment, 58: 21-44.
- ALLEN, S., & HUGGEL, C. (2013): Extremely warm temperatures as a potential cause of recent high mountain rockfall. In: Global and Planetary Change, 107: 59-69.
- ANDERLE, H.-J. (1976): Der Südrand des Rhenohertzynikums im Taunus – Vorläufige Mitteilung der Ergebnisse tektonischer Untersuchungen.– In: Geol. Jb. Hessen, 104: 279-284.

- BAFU (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren—Vollzugshilfe Für Das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag Und Hangmuren. Bern.
- BAFU (2021): Gefahrenkarten, Intensitätskarten und Gefahrenhinweiskarten. Internet: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahregrundlagen/gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html> (Zugriff: 12.06.2023)
- BALZER, D., DOMMASCHK, P., EHRET, D., FUCHS, M., GLASER, S., HENSCHIED, S., KUHN, D., STRAUß, R., TORIZIN, J. & WIEDENMANN, J. (2020): Massenbewegungen in Deutschland (MBiD) – Beiträge zur Modellierung der Hangrutschungsempfindlichkeit. Hannover.
- BALLENSIEFEN, W. (1957): Die Agrarlandschaft der Wittlicher Senke und ihrer Nachbargebiete. Geographisches Institut der Universität Bonn. Bonn.
- BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H. J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie, Bd. 1 Allgemeine Hydrologie. Berlin.
- BAUMGÄRTNER (2020): Ermittlung des Risikos eines Murgangs im Winzbachtal am Mittelrheintal. Masterarbeit an der Universität Bonn. Bonn (unveröffentlicht).
- BECKER, P., BECKER, A., DALELANE, C., DEUTSCHLÄNDER, T., JUNGHÄNEL, T., & WALTER, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland–Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Offenbach am Main.
- BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. Essen.
- BERG, V., LAUFER, O., & SCHNORBACH, M. (2012): 4 Bodenbearbeitungsversuche der Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz. Mainz.
- BERGMEISTER, K. (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung. Berlin.
- BERTI, M., & SIMONI, A. (2005): Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff. In: Landslides, 2: 171-182.
- BEST, C. (2020): Das Mittelrheintal. Internet: <https://wander-heimat.de/mittelrheintal/> (Zugriff: 07.01.2023)

- BETTEL, S. (2022): Klimawandel führt in den Alpen zu mehr Muren und Steinschlägen. DerStandard.Internet:<https://www.derstandard.de/story/2000138303050/klimawandel-fuehrt-in-den-alpen-zu-mehr-muren-und-steinschlaegen> (Zugriff 06.06.2023)
- BEVEN, K. (1989): Interflow. In: *Unsaturated flow in hydrologic modelling. Theory and practice*: 191-219.
- BEYER, R. (2016): Starkregen und Sturzfluten. Landsberg am Lech.
- BOCHTER, R. (2023): Wenn der Wildbach wild wird: Die Kunsteisbahn-Katastrophe am Königssee/Berchtesgadener Alpen. In: *Geographie heute*, 362: 26-29.
- BOCK, B., WEHINGER, A. & KRAUTER, E. (2012): Hangstabilitäten in Rheinland-Pfalz – Ergebnisse der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz. In: *Mainzer Geowiss. Mitt.*, 40: 147-180.
- BOCK, B., WEHINGER, A., & KRAUTER, E. (2013): Hanginstabilitäten in Rheinland-Pfalz– Auswertung der Rutschungsdatenbank Rheinland-Pfalz für die Testgebiete Wißberg, Lauterecken und Mittelmosel. In: *Mainzer Geowiss Mitt*, 41: 103-122.
- BOESSENKOOL, B., BURGER, G. & HEISTERMANN, M. (2016): Effects of sample size on estimation of rainfall extremes at high temperatures. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 17: 1623-1629.
- BOTT, W. (2002): Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten. Dissertation an der Universität Mainz. Mainz.
- BOVIS, M. J. & DAGG, B. R. (1988): A model for debris accumulation and mobilization in steep mountain streams. In: *Hydrological Sciences Journal*, 33: 589-604.
- BRANDES, D. (2013): Mauern als Lebensraum für Pflanzen. Naturstein in der Kulturlandschaft. Halle an der Saale.
- BRANDL, H. (2018): Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen. In: *Grundbau-Taschenbuch: Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*: 1019-1185.
- BRASSEUR, G. P., JACOB, D., & SCHUCK-ZÖLLER, S. (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Heidelberg.
- BRAUN, A. (2022): Klimawandel macht Bergsteigen im Hochgebirge gefährlicher. In: BR 2022. Internet: <https://www.br.de/nachrichten/bayern/klimawandel-macht-bergsteigen-im-hochgebirge-gefaehrlicher>,TAFPPHN (Zugriff: 06.06.2023).

- BREGOLI, F., MEDINA, V., CHEVALIER, G., HÜRLIMANN, M., & BATEMAN, A. (2015): Debris-flow susceptibility assessment at regional scale: Validation on an alpine environment. In: *Landslides*, 12: 437-454.
- BROILIE, L. (1973): In situ tests for the study of rockfall. In: *Geologia Applicata e Idrologia*, 8: 105–111.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & WENDI, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016: Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 1: Meteorologische und Hydrologische Analysen. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61: 150-162.
- BUNZA, G. (1982): *Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde*. München.
- BUNZA, G., PLONER, A. & SÖNSER, T. (2004): Die Modellierung des Abfluss- und Feststofftransportes in Wildbächen für die Beurteilung und Planung von Schutzmaßnahmen dargestellt am Beispiel des Lainbach bei Benedikterbeuern, Bayern. In: *Internationales Symposium INTERPRAVENT 2004*: 271-282.
- BUSCH, N., MEISSNER, D., WERNER, G. & HERMANN, O. (2007): Betrieb der Stauanlagen an der Mosel und ihr Einfluss auf Hochwasser. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*: 17-21.
- BUTER, A., HECKMANN, T., FILISETTI, L., SAVI, S., MAO, L., GEMS, B., & COMITI, F. (2022): Effects of catchment characteristics and hydro-meteorological scenarios on sediment connectivity in glacierised catchments. In: *Geomorphology*, 402: 108128.
- CAINE, N. (1980): The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. In: *Geografiska annaler: series A, physical geography*, 62: 23-27.
- CAMPBELL, R. H. (1975): *Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California*. Washington.
- CAREY, J.M.; COSGROVE, B.; NORTON, K.; MASSEY, C.I.; PETLEY, D.N.; LYNDSSELL, B. (2021): Debris Flow-Slide Initiation Mechanisms in Fill Slopes, Wellington, New Zealand. In: *Landslides*, 18: 2061–2072.
- CASPER, M. C., HERBST, M., GRUNDMANN, J., BUCHHOLZ, O., & BLIEFERNICHT, J. (2009): Einfluss der Niederschlagsvariabilität auf die Simulation extremer Abflüsse in kleinen Einzugsgebieten. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53: 134-139.

- CAVIEZEL, A., LU, G., DEMMEL, S. E., RINGENBACH, A., BÜHLER, Y., CHRISTEN, M., & BARTELT, P. (2019): RAMMS: ROCKFALL. A modern 3-dimensional simulation tool calibrated on real world data. In: 53rd US rock mechanics/geomechanics symposium. New York.
- CESCA, M., & D'AGOSTINO, V. (2008): Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. In: WIT Transactions on Engineering Sciences, 60: 197-206.
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., AND BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. In: Geosci. Model Dev., 8: 1991-2007.
- CRONSHEY, R. (1986): Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington.
- CROSTA, G. B., & FRATTINI, P. (2001): Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: Proceeding of 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms, Siena, 1: 463-487.
- CRUDEN D. M. & VARNES, D.J. (1996): Landslide types and processes. In: Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council, 247: 36-75.
- Deutscher Bundestag (2019): Sicherung von Zugfahrten entlang der Mittelrheinbahn. Antwort auf die kleine Anfrage der FDP-Fraktion. Drucksache 19/10781.
- Deutscher Städtetag (2015): Starkregen und Sturzfluten in Städten. Berlin.
- Deutscher Wetterdienst (2016): Starkniederschläge in Deutschland. Offenbach am Main.
- Deutscher Wetterdienst (2017): Datensatzbeschreibung – Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe (GIS-lesbar). Offenbach am Main.
- DIETRICH, A., & KRAUTBLATTER, M. (2017): Evidence for enhanced debris-flow activity in the Northern Calcareous Alps since the 1980s (Plansee, Austria). In: Geomorphology, 287: 144-158.
- DIKAU, R., EIBISCH, K., EICHEL, J., MEßENZEHL, K. & SCHLUMMER-HELD, M. (2019): Gravitative Massenbewegungen und Reliefformung. In: Geomorphologie: 189-225.
- DITTRICH, D. (2011): Geologische Karte Der Trierer Bucht. Landesamt Für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. Mainz.

- DORREN, L. (2012): Rockyfor3D (v5.1) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. Genf.
- DORREN, L. (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches. In: *Progress in Physical Geography*, 27: 69–87.
- DORREN, L., BERGER, F., FREHNER, M., HUBER, M., KÜHNE, K., MÉTRAL, R., SANDRI, A., SCHWITTER, R., THORMANN, J.J. & WASSER, B. (2015). Das neue NAIS-Anforderungsprofil Steinschlag. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166: 16-23.
- DORREN, L.K.A., BERGER, F., LE HIR, C., MERMIN, E. A & TARDIF, P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. In: *Forest Ecology and Management*, 215: 183–195.
- DOWLING, C. A., & SANTI, P. M. (2014): Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. In: *Natural hazards*, 71: 203-227.
- DU, J.; FAN, Z.; XU, W.; DONG, L. (2021): Research Progress of Initial Mechanism on Debris Flow and Related Discrimination Methods: A Review. In: *Front. Earth Sci.*, 9: 629567.
- ENZMANN, F. & FEUERBACH, J. (2016): Hochauflösende Geländeanalysen mittels LiDAR-Daten. Fachtagung Rutschungen, 16. Weiterbildungsseminar der FSR: 14-18. Mainz
- ENZMANN, F., HAGGE-KUBAT, T., SÜßER, P. KERSTEN, M. & WEHINGER, A. (2022): GIS-gestützte Modellierungsansätze zu Auslöseprozessen von Massenbewegungen nach der Flut im Ahrtal. Fachtagung Rutschungen, 20. Weiterbildungsseminar der FSR: 20-25. Mainz.
- ERHARDT, G. (2007): Numerische Lösung der Flachwassergleichung mit Hilfe der Methode der Finiten Massen. Dissertation an der Universität München. München.
- ETH Zürich (2017): Hydrology – Erosion and sediment transport. Zürich.
- FARINA, P., CATANI, F., ROSI, A., SETIAWAN, I., JUNAIDI, A., AFRIZAL, K., & WIJAYANTO, A. (2020): Development of an early warning system for shallow landslide hazard in the Grasberg area, Indonesia. In: *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*: 1425-1438.
- FARMAKIS, I., HUTCHINSON, D. J., VLACHOPOULOS, N., WESTOBY, M., & LIM, M. (2023): Slope-Scale Rockfall Susceptibility Modeling as a 3D Computer Vision Problem. In: *Remote Sensing*, 15: 2712.

- FLEIGE, H. & HORN, R. (2000): Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. In: *Advances in Geocology*, 32: 258-268.
- FRATTINI, P., CROSTA, G., CARRARA, A., & AGLIARDI, F. (2008): Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. In: *Geomorphology*, 94: 419-437.
- FRAYSSINES, M., & HANTZ, D. (2006): Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). In: *Engineering Geology*, 86: 256-270.
- FREEMAN, T. G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. In: *Computer Geoscience*, 17: 413-422.
- FULLER, I. C., & MARDEN, M. (2010): Rapid channel response to variability in sediment supply: Cutting and filling of the Tarndale Fan, Waipaoa catchment, New Zealand. In: *Marine Geology*, 270: 45-54.
- GAMMA, P. (1996): Großräumige Modellierung von Gebirgsgefahren mittels rasterbasiertem Random Walk. In: *Modellierung und Simulation räumlicher Systeme mit Geographischen Informationssystemen*. In: *Proceedings-Reihe der Informatik* 96: 93-105.
- GAMMA, P. (2000): dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Dissertation an der Universität Bern. Bern.
- GAO, R. Y., WANG, C. M., & LIANG, Z. (2021): Comparison of different sampling strategies for debris flow susceptibility mapping: A case study using the centroids of the scarp area, flowing area and accumulation area of debris flow watersheds. In: *Journal of Mountain Science*, 18: 1476-1488.
- GAO, Y.; YIN, Y.; LI, B.; WEI, T.; LI, Z.; GAO, H. (2022): The Role of Fluid Drag Force in the Dynamic Process of Two-Phase Flow-like Landslides. In: *Landslides*, 19: 1791-1805.
- GARIANO, S. L., & GUZZETTI, F. (2016): Landslides in a changing climate. In: *Earth-Science Reviews*, 162: 227-252.
- GARIANO, S. L., & GUZZETTI, F. (2016): Landslides in a changing climate. In: *Earth-Science Reviews*, 162: 227-252.
- Geologischer Dienst NRW (2017): *Geologie im Rheinischen Schiefergebirge. Teil 3: Sauer- und Siegerland*. Krefeld.

- GERBER, W. (2019): Naturgefahr Steinschlag – Erfahrungen und Erkenntnisse. In: WSL Berichte, 74: 149- 167.
- GeoForschungsZentrum Potsdam (2020): Gravitative Massenbewegungen. Helmholtz Institut. Internet: <https://www.eskp.de/grundlagen/naturgefahren/gravitative-massenbewegungen-935627/> (Zugriff: 10.06.2023).
- GILLES, K. J. (1999): Bacchus und Sucellus: 2000 Jahre römische Weinkultur an Mosel und Rhein. Zell an der Mosel.
- GLADE, T. & DIKAU, R. (2001): Gravitative Massenbewegungen-vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. Petermanns Geographische Mitteilungen, 145(6), 42-55. Bonn.
- GLADE, T., HOFFMANN, P. & THORNICKE, K. (2016): Dürren, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In: BRASSEUR, G. P., JACOB, D., & SCHUCK-ZÖLLER, S.: Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven: 189-225. Heidelberg.
- GNOR (o.J.): Das Mittelrheintal. Von der Natur – zur Kulturlandschaft. Internet: <https://gnor.de/projekte/halbwilde-haltung/forderer/> (Zugriff: 07.06.2023).
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014): 21st century climate change in the European Alps—A review. In: Science of the total environment, 493: 1138-1151.
- Goetz, J., Kohrs, R., Parra Hormazábal, E., Bustos Morales, M., Aráneda Riquelme, M. B., Henríquez, C., & Brenning, A. (2021): Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 21: 2543-2562.
- GORMSEN, E. (1997): Der Mittelrhein zwischen Urlaubsromantik und Schnellverkehr. In: Forschungsmagazin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz 13: 4-19.
- Gostner, W., Bezzola, G. R., Schatzmann, M., & Minor, H. E. (2008): Water-Related Natural Disasters: Strategies to Deal With Debris Flows: The Case of Tschengls, Italy. In: Mountains: sources of water, sources of knowledge: 221-241.
- Graf, C., Deubelbeiss, Y., Bühler, Y., Meier, L., McArdeell, B., Christen, M., & Bartelt, P. (2013): Gefahrenkartierung Mattertal: Grundlagenbeschaffung und numerische Modellierung von Murgängen. Mattertal—ein Tal in Bewegung. In: Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, St. Niklaus, 29: 85-112.

- GRÄNITZ, F., & GRUNDMANN, L. (2003): Das Mittelrheinische Becken: eine landeskundliche Bestandsaufnahme im Raum Andernach, Bendorf, Koblenz, Mayen, Mendig, Münstermaifeld und Neuwied. Köln.
- GRUNERT, J., & HESS, S. (2010): The upper middle Rhine valley as a risk area. In: *Natural hazards* 55: 577-597.
- GUTHRIE, R. H., DEADMAN, P. J., CABRERA, A. R. & EVANS, S. G. (2008): Exploring the magnitude–frequency distribution: a cellular automata model for landslides. In: *Landslides*, 5, 151–159.
- GUZZETTI, F., MONDINI, A. C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M., & CHANG, K. T. (2012): Landslide inventory maps: New tools for an old problem. In: *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66.
- HAAN, C., BARFIELD, B. & HAYES, J. (1994): *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. New York.
- HAEBERLI, W., RICKENMANN, D., RÖSLI, U. & ZIMMERMANN, M. (1991): *Murgänge - Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Ergebnisse der Untersuchungen*. Bern.
- HAGGE-KUBAT, T. (2019): *Abfluss- und Sedimenttransportsimulation von Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal*. Masterarbeit an der Universität Mainz. Mainz (unveröffentlicht).
- HAGGE-KUBAT, T., SÜBER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2020): Simulation von Abfluss und Sedimenttransport bei Starkregenereignissen im Oberen Mittelrheintal. In: *Mainzer geowiss. Mitt.* 48: 7-32.
- HAGGE-KUBAT, T., SÜBER, P., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2021): Modellierung der Felssturzgefährdung am Mittelrhein- und Moseltal. In: *Mainzer geowiss. Mitt.* 49: 197-220.
- HAGGE-KUBAT, T., FISCHER, P., SÜBER, 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. In: *Geoscience*: 12: 245-263.
- HANTZ, D., COROMINAS, J., CROSTA, G. B. & JABOYEDOFF, M. (2021): Definitions and concepts for quantitative rockfall hazard and risk analysis. *Geosciences*: 11,158.
- HAUSER, D. (2011): *Interaktion Murgang–Wald: Rekonstruktion von Ereignissen mit Hilfe von RAMMS*. Masterarbeit an ETH Zürich. Zürich.

- HÄUSLER, M., GISCHIG, V., THÖNY, R., GLUEER, F. & DONAT, F. (2022): Monitoring the changing seismic site response of a fast-moving rockslide (Brienz/Brinzauls, Switzerland). In: *Geophysical Journal International*, 229: 299-310.
- HEBISCH, J. (2014): Gis-basierte Modellierung von Muren im Oberen Mittelrheintal. Bachelorarbeit an der Universität Mainz. Mainz.
- HECKMANN, T., & BECHT, M. (2009): Investigating the transferability of statistical disposition models for slope-type debris flows. In: *Erdkunde*, 63: 19-33.
- HECKMANN, T., GEGG, K., GEGG, A. & BECHT, M. (2014): Sample size matters: investigating the effect of sample size on a logistic regression susceptibility model for debris flows. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14: 259-278.
- HECKMANN, T., HILGER, L., VEHLING, L., & BECHT, M. (2016): Integrating field measurements, a geomorphological map and stochastic modelling to estimate the spatially distributed rockfall sediment budget of the Upper Kaunertal, Austrian Central Alps. In: *Geomorphology*, 260: 16-31.
- HEGG, C. (2005): Die Bedeutung von Gefahrenkarten für den vorbeugenden Hochwasserschutz und ihre Anwendung in der Schweiz. In: *Hochwasser-Gefahrenkarten. Teil 1*: 11-22.
- HEIM, A. (1932): *Bergsturz und Menschenleben*. Zürich.
- HEUER, W. (2014): Bericht zum Unwetter in Münster am 28.07.2014. Münster.
- HIRSCHBERG, J., FATICHI, S., BENNETT, G. L., MCARDELL, B. W., PELEG, N., LANE, S. N. & MOLNAR, P. (2021): Climate change impacts on sediment yield and debris-flow activity in an alpine catchment. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126: 1-34.
- HIRSCHBERG, J., MCARDELL, B. W., BADOUX, A., & MOLNAR, P. (2019). Analysis of rainfall and runoff for debris flows at the Illgraben catchment, Switzerland. In: *Association of Environmental and Engineering Geologists*. 28: 1-8.
- HIRSCHBERG, J.; BADOUX, A.; MCARDELL, B.W.; LEONARDUZZI, E.; MOLNAR, P. (2021): Limitations of Rainfall Thresholds for Debris-Flow Prediction in an Alpine Catchment. In: *Natural Hazards Earth System Science*: 1–26.
- HOFIERKA, J., & KNUTOVÁ, M. (2015): Simulating spatial aspects of a flash flood using the Monte Carlo method and GRASS GIS: a case study of the Malá Svinka Basin (Slovakia). In: *Open Geosciences* 7: 118-125.

- HOFIERKA, J., MITASOVA, H., & MITAS, L. (2002): GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields. In: Proceedings of the Open Source GIS-GRASS users conference: 11-13.
- HÖFLE, B., & RUTZINGER, M. (2011): Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. In: Zeitschrift für Geomorphologie-Supplementband, 55: 1-29.
- HOHENRAINER, J. (2009): Nachrechnung des Hochwasserereignisses vom Juni 2008 an der Starzel mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 28: 113-124.
- HORTON, R. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. New York.
- HÖVEL, A. (2017): GIS-Basierte Starkregensimulation am Beispiel Rosenheims. Bachelorarbeit TU München. München.
- HÜBEL, J., BUNZA, G., HAFNER, K. & KLAUS, W. (2003): ETAlp-Erosion, Transport in Alpinen Systemen. Wien.
- HUGGEL, C., ALLEN, S., CLAGUE, J. J., FISCHER, L., KORUP, O. & SCHNEIDER, D. (2013): Detecting potential climate signals in large slope failures in cold mountain regions. In: Landslide Science and Practice, 4: 361-367.
- HÜMANN, M. (2012): Abflussgeschehen unter Wald-Validierung und Weiterentwicklung eines GIS-basierten Tools zur Erstellung von Abflussprozesskarten auf forstlich genutzten Standorten. Dissertation an der Universität Trier. Trier.
- HUMER, G., REITHOFER, A., KLAR, R. & ACHLEITNER, S. (2015): Erweiterung eines 2D-Strömungsmodelles zur Berechnung von Sturzfluten. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 8: 164-171.
- HUNGR, O. & EVANS, S. G. (1988): Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides 1988: 685-690. Lausanne.
- HUNGR, O., & MCDUGALL, S. (2009): Two numerical models for landslide dynamic analysis. In: Computers & geosciences, 35: 978-992.
- HUNGR, O., LEROUÉIL, S. & PICARELLI, L. (2014): The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. In: Landslides, 11: 167-194.

- HÜRLIMANN, M., RICKENMANN, D., & GRAF, C. (2003): Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. In: Canadian geotechnical journal, 40: 161-175.
- HÜRLIMANN, M., RICKENMANN, D., MEDINA, V., & BATEMAN, A. (2008): Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. In: Engineering Geology, 102: 152-163.
- HÜRLIMANN, M., MCARDELL, B.W. & RICKLI, C. (2015): Field and Laboratory Analysis of the Runout Characteristics of Hillslope Debris Flows in Switzerland. In: Geomorphology, 232: 20–32.
- Hydrotec, FH Aachen & Deutscher Wetterdienst (2008): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS)“. Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX). Aachen.
- ILLGEN, M. (2017): Starkregen und urbane Sturzfluten–Handlungsempfehlungen zur kommunalen Überflutungsvorsorge. In: PORTH, M. & SCHÜTTRUMPF, H. (2017): Wasser, Energie und Umwelt: 20-30. Wiesbaden.
- IVERSON, R. M. (1997): The physics of debris flows. In: Reviews of geophysics, 35: 245-296.
- IVERSON, R.M. & VALLANCE, J.W. (2001): New views of granular mass flows. In: Geology, 29: 115-118.
- IVERSON, R. M., REID, M. E., LOGAN, M., LAHUSEN, R. G., GODT, J. W. & GRISWOLD, J. P. (2011): Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. In: Nature Geoscience, 4: 116-121.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., & YIOU, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In: Regional environmental change, 14: 563-578.
- JAKOB, M., HUNGR, O., & PIERSON, T. C. (2005): Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. In: Debris-flow hazards and related phenomena: 159-202.
- JAKOB, M., HUNGR, O., HUNGR, O., MCDUGALL, S. & BOVIS, M. (2005): Entrainment of material by debris flows. In: Debris-flow hazards and related phenomena: 135-158.
- JOHNEN, P. (2017): Murgangspotential im Einzugsgebiet St. Goarshausen, Oberes Mittelrheintal. Masterarbeit RWTH Aachen. Aachen.

- JOHNSON, D. L. & MILLER, A. C. (1997): A spatially distributed Hydrologic Model utilizing Raster Data Structures. In: *Computers & Geosciences*, 23: 267-272.
- JOHST, M. (2009): Überblick über Prozessuntersuchungen zur Abflussbildung bei Hochwasser. In: UNI TRIER (2009): 2. Trierer Workshop zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Abflüsse aus externen Niederschlägen. Trier.
- JULIEN, P. Y., & SIMONS, D. B. (1985): Sediment transport capacity of overland flow. In: *Transactions of the ASAE*, 28: 755-762.
- JUNGHÄNEL, T., DEUTSCHLÄNDER, T., HABERLANDT, U., OSTERMÖLLER, J., SHEHU, B. & WILLEMS, W. (2022): KOSTRA-DWD-2020 – Die neue Starkregenstatistik für Deutschland, DACH2022. Leipzig.
- JUNGHÄNEL, T., ERTEL, H., & DEUTSCHLÄNDER, T. (2017): KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Offenbach am Main.
- KANG, S., LEE, S. R., VASU, N. N., PARK, J. Y., & LEE, D. H. (2017): Development of an initiation criterion for debris flows based on local topographic properties and applicability assessment at a regional scale. In: *Engineering Geology*, 230: 64-76.
- Kanton Bern (2021): Integrales Risikomanagement Naturgefahren. Internet: <https://www.bvd.be.ch/de/start/dienstleistungen/newsletter-tba-update/tba-update-juni-2021.html> (Zugriff: 06.06.2023).
- Kanton Graubünden (2021): Schutzbauten in Graubünden – für mehr Sicherheit vor Naturgefahren. Davos.
- Kanton Luzern (2023): Gefahrenhinweiskarte Murgangprozesse des Kanton Luzern. Internet: https://daten.geo.lu.ch/produkt/ghkxxxxx_col_v1 (Zugriff: 07.01.2023).
- KEEFER, D. K., WILSON, R. C., MARK, R. K., BRABB, E. E., BROWN, W., ELLEN, S., HARP, E., WIECZOREK, G., ALGER, C. & ZATKIN, R. S. (1987): Real-time landslide warning during heavy rainfall. In: *Science* 238: 921-925.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G. K., AVIAN, M., & CARRIVICK, J. (2012): Climate change and rock fall events in high mountain areas: Numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. In: *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94: 59-78.

- KERZAN, K. (1986): Massenbewegungen an Felsböschungen und Felshängen im Rheinischen Schiefergebirge, ihre Ursachen und Auswirkungen. Unpublizierte Doktorarbeit an der Universität Mainz. Mainz.
- KIRKBY, M. J. & STATHAM, I. (1975): Surface stone movement and scree formation, In: *Journal of Geology*, 83: 349–362.
- KIRNBAUER, R. (2002): Niederschlag-Abfluss-Simulation für Gefahrenzonenpläne-Fallstudie Schesatobel bei Bludenz. In: *Wiener Mitteilungen* 164: 19-30.
- Kliwa (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Bayern und Baden-Württemberg. *KLIWA-Berichte*. o. O.
- KLOSE, M., AUERBACH, M. HERRMANN, C., KUMERICS, C. & GRATZI, A. (2017): Landslide Hazards and Climate Change Adaption of Transport Infrastructures in Germany. In: *4th World Landslide Forum Booklet 1*: 535-541.
- Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und den Weinbau in Rheinland-Pfalz. Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 3, Modul Landwirtschaft. Trippstadt.
- Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz (2020): Themenheft Klimawandel – Entwicklungen in der Zukunft. *KfK-Berichte*. Trippstadt.
- KÖRNER, H. J. (1980): The energy-line method in the mechanics of avalanches. In: *Journal of Glaciology*, 26: 501–505.
- KÖTT, A. & ROGALL, M. (2016): Massenbewegungen im südwestlichen Taunus – Einfluss von Tektonik und Trennflächengefüge. In: *16th Symposium Tectonics-Structural Geology-Crystalline Geology*. Bonn.
- KRAUS, K., & PFEIFER, N. (2001): Advanced DTM generation from LIDAR data. In: *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34: 23-30.
- KRAUTBLATTER, M., FUNK, D. & GÜNZEL, F. K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock–ice-mechanical model in time and space. In: *Earth Surface Processes and Landforms*, 38: 876-887.
- KRAUTER, E. (1973): Bewegungen an Felshängen im Rheinischen Schiefergebirge (BRD), (Rheinland-Pfalz).- *Veröff. d. Univ. Innsbruck*, 86: 217-236. Innsbruck.

- KRAUTER, E., HÄFNER, F., DILLMANN, W. & FENCHEL, W. (1978): Der Felssturz bei Linz/Rhein am 2. Dezember 1978. – Ber. 2. Nat. Tag. Ing.-Geol.: 175-182. Fellbach.
- KRAUTER, E. (1996): Ingenieurgeologisch-geotechnisches Gutachten „Rutschung Reil-Pünderich“. Mainz. unveröffentlicht.
- KRAUTER, E. & SCHOLZ, W. (1996): Langzeitverhalten von Schutznetzverhängungen gegen Steinschlag. – Geotechnik 19: 76-81. Essen.
- KRAUTER, E. (2001): Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihre Massenbewegungen. In: SMOLTCZYK, U. (2001) Grundbau-Taschenbuch, 4 (1): 613- 662.
- KRAUTER, E., KUMERICS, C., FEUERBACH, J. & LAUTERBACH, M. (2012): Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau: 1-59.
- KRUMMENACHER, B., TOBLER, D., KEUSEN, H. R., LINIGER, M. & ZINGGELER, A. (2005): Modellierung von Stein- und Blockschlag Berechnung der Trajektorien auf Profilen und im 3-D Raum unter Berücksichtigung von Waldbestand und Hindernissen. Zollikofen.
- KUMERICS, C. & F. ENZMANN (2013): Methodik zur Abschätzung des künftigen Gefährdungspotenzials durch Massenschwerebewegungen an Verkehrswegen mittels Geoinformationssystem. In: Fachtagung Rutschungen. 13. Weiterbildungsseminar der FSR: 14-17.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2005): Geologie von Rheinland-Pfalz. Stuttgart.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2021): Der Felssturz von Kestert vom 15.03.2021. Projektbericht. Internet: <https://www.lgb-rlp.de/fachthemen/projekte/projektliste/felssturz-bei-kestert.html> (Zugriff: 16.06.2023).
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2022): Ingenieurgeologen im Einsatz an der Ahr. Jahresheft des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2021. Mainz.
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (2016): Starkregen und Hochwasser in Rheinland-Pfalz im Mai/Juni 2016. Mainz.

- Landesbetrieb Mobilität (2021): B49 – Koblenz: Steinschlag zwischen Moselweiß & Lay. Internet: <https://lbm.rlp.de/de/aktuelles/detail/news/News/detail/b-49-koblenz-steinschlag-zwischen-moselweiss-und-lay/> (Zugriff: 09.06.2023).
- Landesgemeinschaft Wasser (LAWA) (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Erfurt.
- LATELTIN, O. (1997): Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bern,
- LEINE, R. I., SCHWEIZER, A., CHRISTEN, M., GLOVER, J., BARTELT, P., & GERBER, W. (2014): Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. In: *Multibody System Dynamics*, 32: 241-271.
- Landesamt für Umwelt Bayern (2017): Gefahrenhinweiskarte Jura. Steinschlag, Rutschung, Subrosion. Augsburg.
- Landesamt für Umwelt Bayern (2017): Geogefahren erkennen. Steinschlag, Felssturz, Rutschung, Erdfall. Augsburg.
- Landesamt für Umwelt Bayern (2020): Gefahrenhinweiskarte Alpen und Alpenvorland. Landkreis Garmisch-Partenkirchen. Steinschlag, Felssturz, Rutschung, Hanganbruch, Erdfall. Augsburg.
- LINGUA, E., BETTELLA, F., PIVIDORI, M., MARZANO, R., GARBARINO, M., PIRAS, M., KOBAL, M. & BERGER, F. (2020): The protective role of forests to reduce rockfall risks and impacts in the Alps under a climate change perspective. In: *Climate Change, Hazards and Adaptation Options*: 333-347.
- LOTTER, M., & HABERLER, A. (2013). Geogene Naturgefahren–gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 100 1-17.
- LOUP, B., EGLI, T., STUCKI, M., BARTELT, P., MCARDELL, B.W., BAUMANN, R. (2012): Impact Pressures of Hillslope Debris Flows. In: *Proceedings of the 12th Congress INTERPRAEVENT*: 225–236.
- LOYE, A., JABOYEDOFF, M. & PEDRAZZINI, A. (2009): Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1643-1653.
- LU, G., CAVIEZEL, A., CHRISTEN, M., BÜHLER, Y., & BARTELT, P. (2018): Modelling rockfall dynamics using (convex) non-smooth mechanics. In: *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX*: 575-583.

- LÜERS, J. (2005): Agrarklimatologische und phänologische Auswertungen für das Mittlere Moseltal. Auswirkungen des Klimawandels auf die Weinrebe im Moselraum. Dissertation an der Universität Trier. Trier.
- MAŁKA, A. (2021): Landslide susceptibility mapping of Gdynia using geographic information system-based statistical models. In: *Natural Hazards*, 107: 639-674.
- MANIAK, U. (2010): Einführung Hydrologie und Wasserwirtschaft. In: MANIAK, U. (2010): *Hydrologie und Wasserwirtschaft*: 1-16. Heidelberg.
- MARINELLI, A., MEDICI, C., ROSI, A., TOFANI, V., BIANCHINI, S. & CASAGLI, N. (2022): Shallow landslides and rockfalls velocity assessment at regional scale: a methodology based on a morphometric approach. In: *Geosciences*: 12,177.
- MASUYA, H., AMANUMA, K., NISHIKAWA, Y. & TSUJI, T. (2009): Basic rockfall simulation with consideration of vegetation and application to protection measure. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 1835-1843.
- MATAS, G., LANTADA, N., COROMINAS, J., GILL, J. A., RUIZ-CARULLA, R. & PRADES, A. (2017): RockGIS: A GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. In: *Landslides*, 14:, 1565-1578.
- MAURI, L., STRAFFELINI, E., & TAROLLI, P. (2022): Multi-temporal modeling of road-induced overland flow alterations in a terraced landscape characterized by shallow landslides. In: *International Soil and Water Conservation Research*, 10: 240-253.
- MCARDELL, B. & BADOUX, A. (2007): Analysis of debris flows triggering rainfall events in the Illgraben, Valais, Switzerland. Präsentation anlässlich der EGU 2007. WSL. Wien.
- MEDINA, V., HÜRLIMANN, M., & BATEMAN, A. (2008): Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. In: *Landslides*, 5: 127-142.
- MELZNER, S. (2012). Simulation of rockfall trajectories using process-based models. Vortrag und Abstract beim "Yosemite Forum" des United States Department of the Interior, National Park Service 2012 in Kalifornien.
- MELZNER, S., & PREH, A. (2012): Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis. In: *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions-und Steinschlagschutz*, 169: 1-18.
- MEON, G., STEIN, K., FÖRSTER, K. & RIEDEL, G. (2009): Abschlussbericht zum Forschungsbericht. Untersuchung Starkregengefährdeter Gebiete. Braunschweig.

- MERGILI, M., KRENN, J. & CHU, H. J. (2015): r. randomwalk v1, a multi-functional conceptual tool for mass movement routing. In: *Geoscientific Model Development*, 8: 4027-4043.
- MESCHEDE, M. (2018): Deutschland im späten Paläozoikum. In: *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*: 61-101. Berlin.
- MEYER, W., & STETS, J. (1996): *Das Rheintal zwischen Bingen und Bonn*. Berlin.
- MICHOUD, C., DERRON, M. H., HORTON, P., JABOYEDOFF, M., BAILLIFARD, F. J., LOYE, A., NICOLET, P., PEDRAZZINI, A. & QUEYREL, A. (2012): Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 615-629.
- MITASOVA, H. & HOFIERKA, J. (2003): Centennial Campus: Environmental Modeling with GRASS. Internet: <http://fatra.cnr.ncsu.edu/~hmitaso/wrriwork/cenntenial/centhome.html> (11.09.2019).
- MITASOVA, H. & MITAS, L. (2001): Multiscale soil erosion simulations for land use management. In: HARMON, S. & DOELL, W. (2009): *Landscape Erosion and Evolution Modeling*: 321-347. Boston.
- MITASOVA, H., BARTON, M., ULLAH, I., HOFIERKA, J. & HARMON, R. S. (2013): GIS-based soil erosion modeling. In: *Treatise on geomorphology*, 3: 228-258.
- MITASOVA, H., THAXTON, C., HOFIERKA, J., MCLAUGHLIN, R., MOORE, A. & MITAS, L. (2004): Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. In: *Developments in Water Science*, 55: 1479-1490.
- MONNEY, J., HERZOG, B., WENGER, M., WENDELER, C. & ROTH, A. (2007): Einsatz von multiplen Stahlnetzbarrieren als Murgangrückhalt. In: *WasserEnergieLuft*: 255- 259.
- MOOS, C., GUIBAN, A., CHRISTOPHE, R., & HEIKE, L. (2021): Climate change will impact the protective effect of forests against rockfall. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*: 210-246.
- MOOS, C., KHELIDJ, N., GUIBAN, A., LISCHKE, H., & RANDIN, C. F. (2021): A quantitative assessment of rockfall influence on forest structure in the Swiss Alps. In: *European Journal of Forest Research*, 140: 91-104.
- MORDZIOL, C. (1908): Beitrag zur Gliederung und zur Kenntnis der Entstehungsweise des tertiärs im Rheinischen Schiefergebirge. In: *deutsche Geologische Gesellschaft*, 60: 270-284.

- MTAMBA, J., VANDER VELDE, R., NDOMBA, P., ZOLTÁN, V., & MTALO, F. (2015): Use of Radarsat-2 and Landsat TM images for spatial parameterization of Manning's roughness coefficient in hydraulic modeling. In: *Remote sensing*, 7: 836-864.
- MULLER, E. & PFISTER, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. In: *Journal of Hydrology*, 411: 266-278.
- NAEF, F. (2004): *Der Einfluss der Abflussbildung und der Vorlandretention auf die Grösse extremer Hochwasser*. Zürich.
- NESBOR, H. D. (2019): Alpinotype Deckentektonik im Rheinischen Schiefergebirge (Exkursion I am 26. April 2019). In: *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*: 197-226.
- OZTURK, U., WENDI, D., CRISOLOGO, I., RIEMER, A., AGARWAL, A., VOGEL, K. & KORUP, O. (2018). Rare flash floods and debris flows in southern Germany. In: *Science of the total environment*, 626: 941-952.
- PERLA, R., CHENG, T. & MCCLUNG, D. M. (1980): A two-parameter model of snow-avalanche motion. In: *Journal of Glaciology*, 26: 197-207.
- PETERSEIM, S., SCHLENKHOFF, A. & OERTEL, M. (2013): Hydrodynamische Simulation von Sturzflutereignissen im urbanen Raum. In: *Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz. Bauwerke, Anforderungen, Modelle*, 48: 241-250.
- PHILLIPS, J. V., & TADAYON, S. (2006): Selection of Manning's roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated channels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in Central Arizona. US Department of the Interior, US Geological Survey. Reston, Virginia.
- PIERSON, T. C. (1986): Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: *Hillslope processes*: 269-296. Routledge.
- PIPER, D., KUNZ, M., EHMELE, F., MOHR, S., MUHR, B., KRON, A. & DANIELL, J. (2016): Exceptional sequence of severe thunderstorms and related flash floods in May and June 2016 in Germany. Part I: Meteorological background. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 2835-2850.
- PITEAU, D. & CLAYTON, R. (1976): Computer rockfall Model. In: *Meeting in Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness*, 90: 123-125. Bergamo.

- POISEL, P. (2018): Felsstürze – Ablösemechanismen. In: Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 125: 49 – 59. Wien.
- POMAROLI, G., BELL, R., GLADE, T., HEISS, G., LEOPOLD, P., PETSCHKO, PROSKE, H. & SCHWEIGL, J. (2011): Darstellung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen im Bundesland Niederösterreich als Grundlage der Raumplanung. In: Wildbach und Lawinenverbau, 166: 198-212.
- PREH, A. (2018). Felsstürze - Sturzprozess. IN POISEL, R., PREH, A. & KOLENPRAT, B. (2018): Tagungsband: Gefahren durch Steinfall und Felssturz. Berichte der Geologischen Bundesanstalt: 59–65. Wien.
- PREH, A., MÖLK, M., & ILLEDITSCH, M. (2020): Steinschlag und Felssturz. In: ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Wien.
- PREUß, J. (2017): Neue Ergebnisse zu den Terrassen im Mittelrheintal. In: Mainzer naturwissenschaftliches Archiv, 54: 37-46. Mainz.
- PRINZ, H. & STRAUß, R. (2011): Ingenieurgeologie. Springer-Verlag. Heidelberg.
- PROSKE, D., KAITNA, R., SUDA, J. & J. HÜBL (2008): Abschätzung einer Anprallkraft für murenexponierte Massivbauwerke. In: Bautechnik, 85: 803-811.
- PROSKE, H. & BAUER (2016): Rockfall Susceptibility Maps in Styria considering the protective effect of forest. In: Conference Proceedings INTERPRAEVENT 2016: 592–600.
- PUDASAINI, S. P. (2012): A general two-phase debris flow model. In: Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117: 1-28.
- QUITZOW, H. W. (1982): Die Hochflächenlandschaft derzen tralen Eifel und der angrenzenden Teile des Rhein-Troges und Neuwieder Beckens. In: Mainzer geowiss. Mitt., 11: 173 – 206.
- RAVANEL, L. & DELINE, P. (2011): Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'. In: The Holocene, 21: 357-365.
- REISCHL, C. (2017): Charakterisierung der Einzugsgebiete von Murgängen im Oberen Mittelrheintal. Masterarbeit RWTH Aachen. Aachen.
- RIBBERT, K.-H. (2010): Geologie im Rheinischen Schiefergebirge. Teil 1: Nordeifel. Geologischer Dienst NRW. Krefeld.

- RICHIE, A. (1963): Evaluation of rockfall and its control. Highway research record 17. In: Highway Research Board NRC: 13–28. Washington DC
- RICKENMANN, D. (2001): Murgänge in den Alpen und Methoden zur Gefahrenbeurteilung. In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 124: 51-77.
- RICKENMANN, D. (2002): Über Murgänge in den Alpen. In: Wasser und Boden, 54: 23-26.
- RICKENMANN, D., WEBER, D. & STEPHANOV, B. (2003): Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In: RICKENMANN, D. & CHEN, C. L. (2003): Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: 883–894. Rotterdam.
- RICKENMANN, D. (2014). Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Birmesdorf.
- ROSSI, M., SARRO, R., REICHENBACH, P., & MATEOS, R. M. (2021): Probabilistic identification of rockfall source areas at regional scale in El Hierro (Canary Islands, Spain). In: *Geomorphology*, 381: 107661.
- RUHLAND, M. (2021): Kippen die Alpen? In: National Geographic 2021. Internet: <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2021/09/kippen-die-alpen> (Zugriff: 06.06.2022).
- SAGA (2023): Library Dokumentation. Internet: https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/9.0.0/ta_channels_1.html (Zugriff: 10.06.2023).
- SAMBALE, C. (1998): Experimentelle und modellgestützte Wasserhaushaltsuntersuchungen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Dissertation an der universität München. München.
- SARDI, M., VOLKWEIN, A. & GEILHAUSEN, M. (2019): Connections between climate change and rockfall. In: *Geophysical Research Abstracts*, 21: 1 – 1.
- SARRO, R., MATEOS, R. M., GARCÍA-MORENO, I., HERRERA, G., REICHENBACH, P., LAÍN, L. & PAREDES, C. (2014): The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation. In: *Landslides*, 11: 493-503.
- SASS, O. & OBERLECHNER, M. (2012): Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? In: *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 12: 3209-3216.

- SASS, O., KRENN, P., LUTZMANN, S., & RASCHER, E. (2019): Auswirkung des Klimawandels auf Hang- und Gerinneprozesse in alpinen Wildbächen der Steiermark. In: Forschungsstelle Rutschungen. 19. Weiterbildungsseminar der FSR: 24-29.
- SASSA K (1988): Geotechnical model for the motion of landslides. In: Proc. 5th International Symposium on Landslides: 37–56. Rotterdam.
- SCHEID, T. (2011): Untersuchung der naturräumlichen Rahmenbedingungen der Entstehung von Talmuren Grundlage einer Modellierung zur Gefahrenabschätzung. Dissertation an der Universität München. München.
- SCHEIDEGGER, A. E. (1975): Physical Aspects of Natural Catastrophes. Amsterdam.
- SCHERRER, S. (1996): Abflussbildung bei Starkniederschlägen: Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Dissertation an der Universität Zürich. Zürich.
- SCHERRER, S. & N. DEMUTH (2007): Die Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen als Grundlage für die Beurteilung von extremen Abflüssen. Basel.
- SCHIRMER, W. (1990). Der känozoische Werdegang des Exkursionsgebietes. Rheingeschichte zwischen Mosel und Maas. Deutsche Quartärvereinigung (DEUQUA)-Führer: 9-32.
- SCHMIDT, H. (2009): Gravitative Massenbewegungen im Oberen Mittelrheintal. Diplomarbeit an der Universität Mainz. Mainz. (unveröffentlicht).
- SCHNEIDER, J. (1851): Die römische Militärstrasse auf der linken Moselseite, von Trier nach Metz. In: Bonner Jahrbücher, 17: 53-60. Bonn.
- SCHÖNBERGER, M. (2010): Steinland-Pfalz: Geologie und Erdgeschichte von Rheinland-Pfalz. Stuttgart.
- SEMMEL, A. (1999): Landschaftsentwicklung am Oberen Mittelrhein. In: HOPPE, A. (Hrsg.): Exkursionen zu Geotopen in Hessen und Rheinland-Pfalz: 127–149. Frankfurt am Main.
- SIMONI, A., BERNARD, M., BERTI, M., BOREGGIO, M., LANZONI, S., STANCANELLI, L. M. & GREGORETTI, C. (2020): Runoff-generated debris flows: Observation of initiation conditions and erosion–deposition dynamics along the channel at Cancia (eastern Italian Alps). In: Earth Surface Processes and Landforms, 45: 3556-3571.

- SKUBLICS, D., SEIBERT, S. P. & EHRET, U. (2014): Abbildung der Hochwasserretention durch hydrologische und hydrodynamische Modelle unter unterschiedlichen Randbedingungen. In: Hydrologische Wasserbewirtschaftung, 52: 178-189.
- SMART, G. M., & JAEGGI, M. N. R. (1983). Sediment transport on steep slopes. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 64: 91-191.
- SOLAK, Y. (2019): Quantitativer statistischer Zusammenhang zwischen Niederschlagsdargebot aus DWD-Radolan-Daten und Massenbewegungen. Masterarbeit an der Universität Mainz. Mainz.
- SOMMER, C., MALZ, P., SEEHAUS, T. C., LIPPL, S., ZEMP, M. & BRAUN, M. H. (2020): Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. In: Nature communications, 11,3209.
- SPANG, R. M. (1994): Geologisch-Geotechnische Grundlagen des Steinschlagschutzes. Chur.
- Staatlich Geologische Dienste (2008): Geogene Naturgefahren in Deutschland. Empfehlungen der Staatlichen Geologischen Dienste zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten. Freiburg.
- Stadt Kaub (o.J.): Kaub-Geschichten: Bergrutsch am 10.03.1876. Internet: <https://web.archive.org/web/20190103093841/http://webdesign-kaub.de/kaub-geschichten-der-bergrutsch-am-10-3-1876/> (Zugriff: 08.06.2023).
- STAFFLER, H., POLLINGER, R. & ZISCHG, A. (2008): Priorisierung des Handlungsbedarfs bei der Sicherung des Lebensraumes vor Wassergefahren auf regionaler Maßstabebene in der autonomen Provinz Bozen Süd-Tirol. In: Interpraevent, 2: 323-334.
- STETS, J. (2021): Geologie des Hundsrücks. Stuttgart.
- STOFFEL, M., MENDLIK, T., SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER, M. & GOBIET, A. (2014): Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. In: Climatic Change, 122: 141-155.
- STRAUSS, P., BRUNNER, T., ZEISER, A. & SCHMALTZ, E. (2020): Die Wege des Wassers in der Landwirtschaft-Herausforderungen für die Ermittlung realitätsnaher Fließwege vom Acker in den Bach. In: 7. Umweltökologisches Symposium 2020: 33 – 38. Raumberg-Gumpenstein.
- STRELE, G. (1934): Grundriss der Wildbachverbauung. Wien.

- STRICKER, B. (2010). Murgänge im Torrente Riascio (TI): Ereignisanalyse, Auslösefaktoren und Simulation von Ereignissen mit RAMMS. Masterarbeit an der Universität Zürich. Zürich.
- STUMMER, R. (2009): Räumliche und zeitliche Variabilität von Murereignissen. Dissertation an der Universität Wien. Wien.
- SÜßER, P., HAGGE-KUBAT, T., ENZMANN, F. & WEHINGER, A. (2023): GIS-Based Rockfall modelling and risk-assessment in the low mountain ranges of Rhineland Palatinate, Germany. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, 23,3349.
- TAKAHASHI, T. (1981): Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: Soft countermeasures for a disaster. In: Natural disaster science, 3: 57-89.
- TAKAHASHI, T., & DAS, D. K. (2014). Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. Boca Renton.
- TAKAHASHI, T., NAKAGAWA, H., HARADA, T., & YAMASHIKI, Y. (1992): Routing debris flows with particle segregation. In: Journal of Hydraulic Engineering, 118: 1490–1507.
- TIRANTI, D., MALLIN, L. & NICOLÒ, G. (2023): Rockfall hazard estimation and related applications for a preliminary risk assessment at regional scale: an example from northwestern Italian Alps. In: Landslides: 1-14.
- TOGNACCA, C. (1999): Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Dissertation an der Universität Zürich. Zürich.
- TREILING, T. (2009): Mensch/Natur-Interaktion im Oberen Mittelrheintal. Komplextheoretische Ansätze am Beispiel des Weinbaus. Dissertation an der Universität Mainz. Mainz.
- TURNBULL, B., BOWMAN, E. T., & MCELWAINE, J. N. (2015): Debris flows: experiments and modelling. In: Comptes Rendus Physique, 16: 86-96.
- TYRNA, B. G., & HOCHSCHILD, V. (2010): Modellierung von lokalen Überschwemmungen nach Starkniederschlägen. In: Agit-Journal für Angewandte Geoinformatik: 325-334.
- UHLINBROOK, S. & LEIBUNDGUT, C. (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. In: Wasser & Boden 49: 13-21.
- VALAGUSSA, A., FRATTINI, P., & CROSTA, G. B. (2014): Earthquake-induced rockfall hazard zoning. In: Engineering Geology, 182: 213-225.

- VAN ZYL, J. J. (2001): The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. In: *Acta astronautica*, 48: 559-565.
- VARNES D.J. (1978): Slope movement types and processes. In: *Landslides, analysis and control, special report 176*: 11–33. Washington DC.
- VOELLMY, A. (1955): Über die Zerstörungskraft von Lawinen. In: *Bauzeitung*, 73: 159-165.
- VOGEL, K., ÖZTÜRK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T., WENDI, D., AGARWAL, A., RÖZER, V., KORUP, O. & THIEKEN, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016–Entstehung, Ablauf und Schäden eines “Jahrhundertereignisses”, Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse In: *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61: 163-175.
- VOLKWEIN, A., SCHELLENBERG, K., LABIOUSE, V., AGLIARDI, F., BERGER, F., BOURRIER, F. & JABOYEDOFF, M. (2011): Rockfall characterisation and structural protection—a review. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 2617-2651.
- VOLKWEIN, A., GERBER, W., KLETTE, J. & SPESCHA, G. (2019): Review of approval of flexible rockfall protection systems according to ETAG 027. In: *Geosciences*, 9,49.
- VOLKWEIN, A., FULDE, M., & KRIEGER HAUSSON, I. (2021): Trustworthiness of Flexible Rockfall Protection Systems. In: *Geosciences*, 11,197.
- WAGENPLAST (2005): *Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg*. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Freiburg.
- WALTER, G. (2022): *Wirkweise von Schutzsystemen in alpinen Einzugsgebieten*. Innsbruck
- WANG, W., CHEN, G., HAN, Z., ZHOU, S., ZHANG, H., & JING, P. (2016): 3D numerical simulation of debris-flow motion using SPH method incorporating non-Newtonian fluid behavior. In: *Natural Hazards*, 81: 1981-1998.
- WEHINGER, A. & KATTLER, R. (2014): Massenbewegungen im Mittelrheintal – Untersuchungen zum möglichen Einfluss von bahnbedingten Erschütterungen auf die Hangstabilität. In: *Mainzer geowiss. Mitt.* 42: 143-166.
- WEHINGER, A., ENZMANN, F., HOFMANN J.P. (2022): Massenbewegungen und die Flut im Ahrtal. In: *Wasser und Abfall*, 11: 24-27.
- WEHINGER, A., ROGALL, M. & ENZMANN, F. (2022): Massenbewegungen im Ahrtal als Folge des Starkregens und der Flut: eine erste Bestandsaufnahme.- Fachtagung Rutschungen, 20. Weiterbildungsseminar der FSR: 10-18. Mainz.

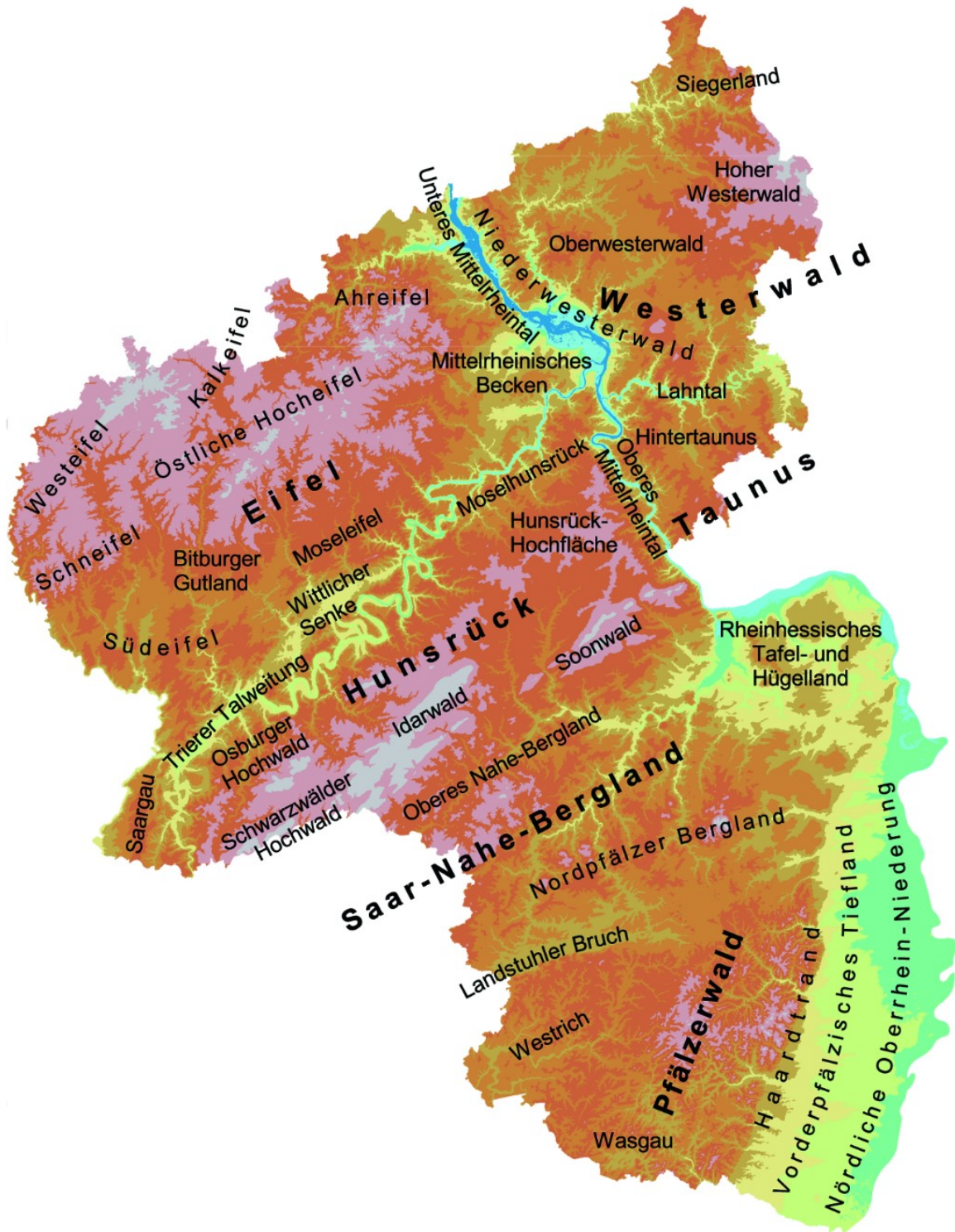
- WENDELER C. (2008): Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren, Dissertation an der Universität Zürich. Zürich.
- WERNER, A. (2018): Simulation von Muren im Oberen Mittelrheintal. Mittels Flow-R. Masterarbeit an der Universität Mainz. Mainz.
- WERNER, A. (2023): GIS-gestützte Kartierung von Rutschungen und Modellierung der Rutschungssuszeptibilität im Saar-Nahe Gebiet und Mainzer Becken. Doktorarbeit an der Universität Mainz. Mainz.
- WERNER, A., SÜßER, P., SCHÜRMAN, T., WEHINGER, A. & ENZMANN, F. (2021): Analyse des Einflusses der Lagerungsverhältnisse auf die Rutschungssuszeptibilität unter Verwendung eines erweiterten TOBIA-Modells. In: Mainzer geowiss. Mitt. 49: 81-105.
- WICHMANN, V. (2017): The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) - A GIS-based simulation framework for gravitational processes. In: Geoscientific Model Development, 10: 3309– 3327.
- WICHMANN, V. & BECHT, M. (2006): Rockfall modelling: methods and model application in an alpine basin (Reintal, Germany). In: Geographische Abhandlungen, 115: 105–116.
- WIECZOREK, G. F. & GLADE, T. (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena: 325-362
- WIESMAIR, J. (2022): Disaster Risk Management aus integrativer Perspektive- Herausforderungen für Österreich im Kontext von INSPIRE und Sendai. Masterarbeit an der Universität Graz. Graz.
- WIETEK, B. (2017): Böschungen und Baugruben: Sicherung und Wirtschaftlichkeit. Wiesbaden.
- WILHELM, C., FEUERSTEIN, G.C., HUWILER, A. & KÜHNE, R. (2019): Bergsturz Cengalo und Murgänge Bondo: Erfahrungen der kantonalen Fachstelle. In: BRÜNDL, M., SCHWEIZER, J. (eds.): (2019): Lernen aus Extremereignissen. WSL Berichte, 78: 53–66.
- WILSON, R. C., & WIECZOREK, G. F. (1995): Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. In: Environmental & Engineering Geoscience: 11-27.
- WINTER, M. (2006): Der Calmont - Im steilsten Weinberg Europas werden Winzer zu Alpinisten. Region Calmont. Internet: <http://www.calmont-region.de/index.php/der-calmont-im-steilsten-weinberg-europas-werden-winzer-zu-alpinisten> (Zugriff: 07.06.2023).

- WUNDERLICH, T., FISCHER, P., WILKEN, D., HADLER, H., ERKUL, E., MECKING, R., GÜNTHER, T., HEINZELMANN, M., VÖTT, A. & RABELL, W. (2018): Constraining Electric Resistivity Tomography by Direct Push Electric Conductivity Logs and Vibrocores: An Exemplary Study of the Fiume Morto Silted Riverbed (Ostia Antica, Western Italy). In: *Geophysics*, 83: 87-103.
- WYLLIE, D. C., & MAH, C. (2004): *Rock slope engineering*. New York.
- ZEPP, H. (2017): *Geomorphologie. Eine Einführung*. Paderborn.
- ZHANG, Y., GE, T., TIAN, W., & LIU, Y. A. (2019): Debris flow susceptibility mapping using machine-learning techniques in Shigatse area, China. In: *Remote Sensing*, 11, 2801.
- ZIMMERMANN, F., MANI, P., GAMMA, P., GSTEIGER, P., HEINIGER, O. & G. HUNZIKER (1997): *Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz*. Projektschlussbericht NFP 31. Zürich.
- ZIMMERMANN, F.; MCARDELL, B.W.; RICKLI, C.; SCHEIDL, C. (2020): 2D Runout Modelling of Hillslope Debris Flows, Based on Well-Documented Events in Switzerland. In: *Geosciences*, 10, 70.

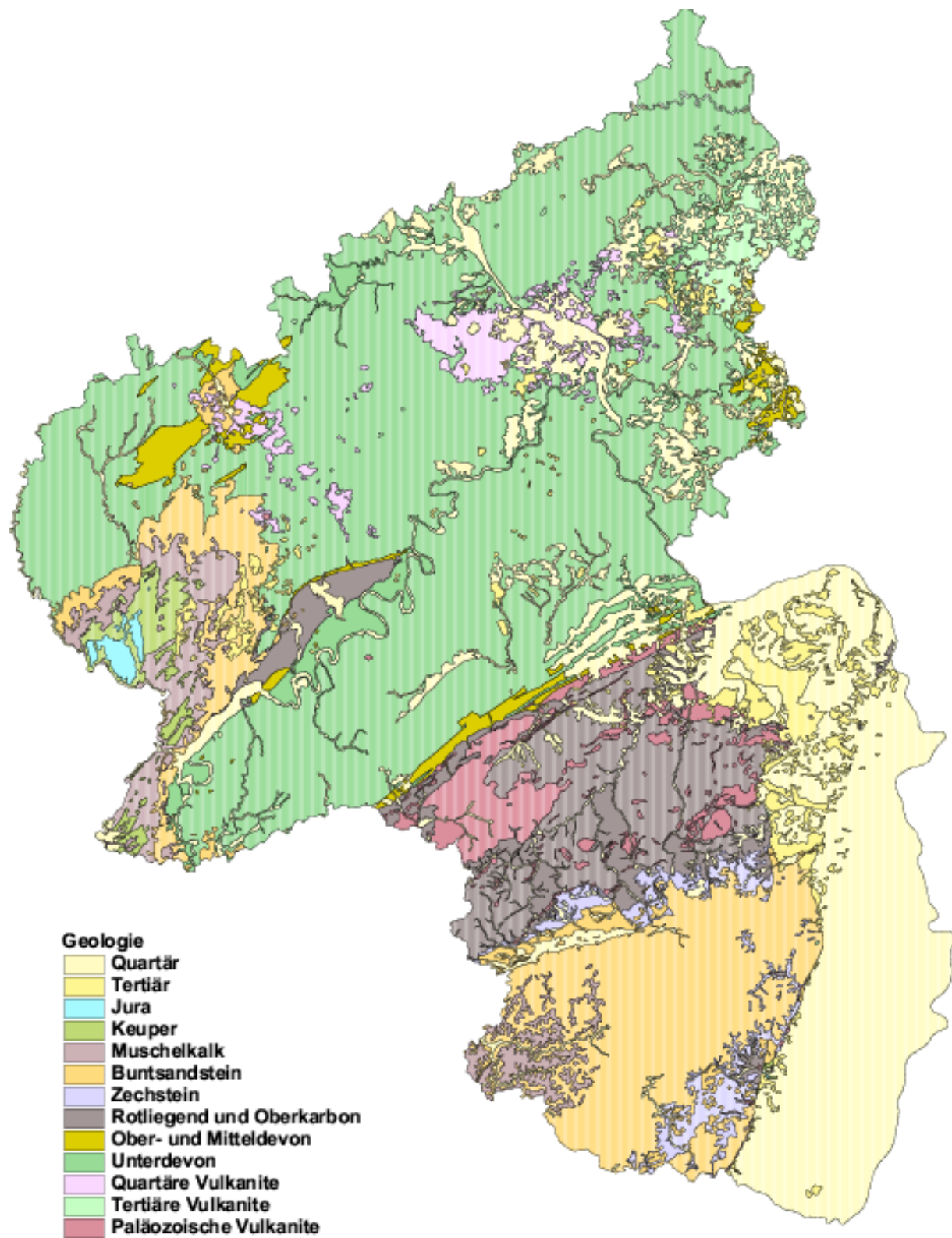


Anhang

Anhang: A: Naturräumliche Gliederung von Rheinland-Pfalz (LGB 2005)



Anhang: B: Generalisierte Geologische Karte von Rheinland-Pfalz im Maßstab 1:300.000 (LGB 2005)



Anhang: C: Zerstörte Weinreben durch den Felssturz am Trierer Augenscheiener vom 25.01.2023 (Blickrichtung Süden; Foto: T. Hagge-Kubat 2023)



Anhang: D: Errichtung eines Steinschlagfangzauns bei Kamp-Bornhofen im Mittelrheintal (Foto: A. Wehinger 2021)



Anhang: E: Beispiel für einen Murgangsverbau bei Hönningen im Ahrtal (Foto: T. Hagge-Kubat 2023)



Anhang: F: Verwendete Parameter der Berechnung des minimalkritischen Abflusswertes q_{Dc} für die Entstehung eines Murgangs nach der Formel von TOGNACCA (1999)

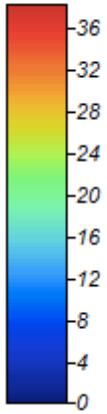
Parameter	Formelzeichen	Einheit	Wertebereich
Gravitationskonstante	g	m/s	9,81
Dichte des Wassers	ρ_w	kg/m ³	998,7
Feststoffdichte	ρ_s	kg/m ³	2350-2850
Schuttdurchmesser	d_m	m	0,1-0,3
Sohlneigung	Θ	°	15-90

Anhang: G: Blick auf die Gleise der linksrheinischen Bahnstrecke kurz nach dem Murgang vom 25.06.2016 bei Henschhausen. Das Murental ist noch von starkem Abfluss betroffen. Der abgelagerte Schieferschutt des Murgangs liegt noch auf den Gleisen und wird von schwerem Gerät beräumt (Foto: H.-J. Matthesius 2016)

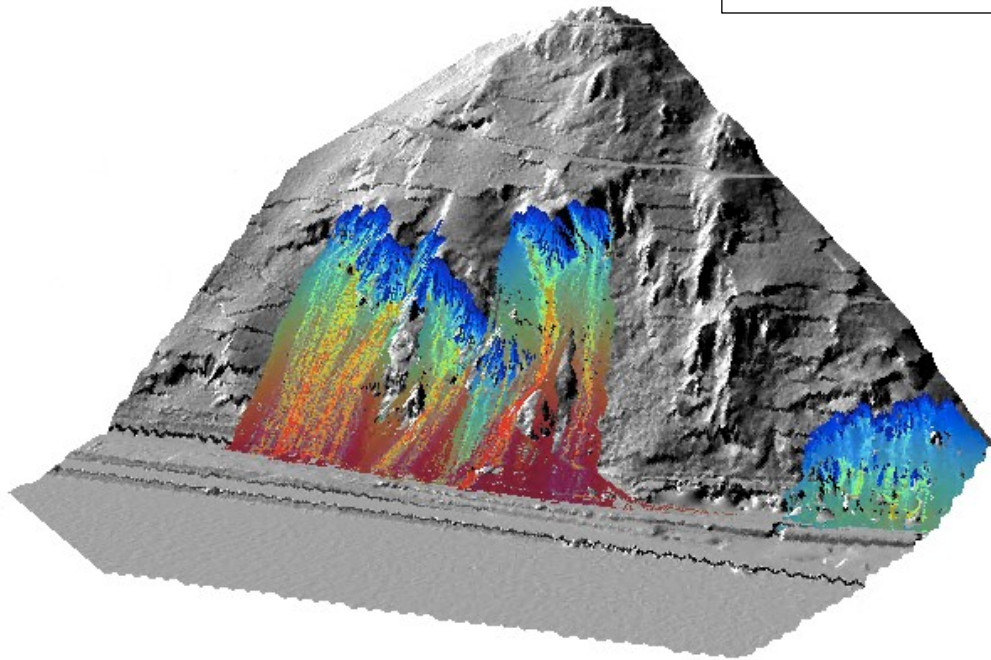


Anhang: H: Effekt von hoher und dichter Vegetation oder Barrieren (hoher lokaler Friction Mu-Wert) auf die Sturztrajektorien im GPP.

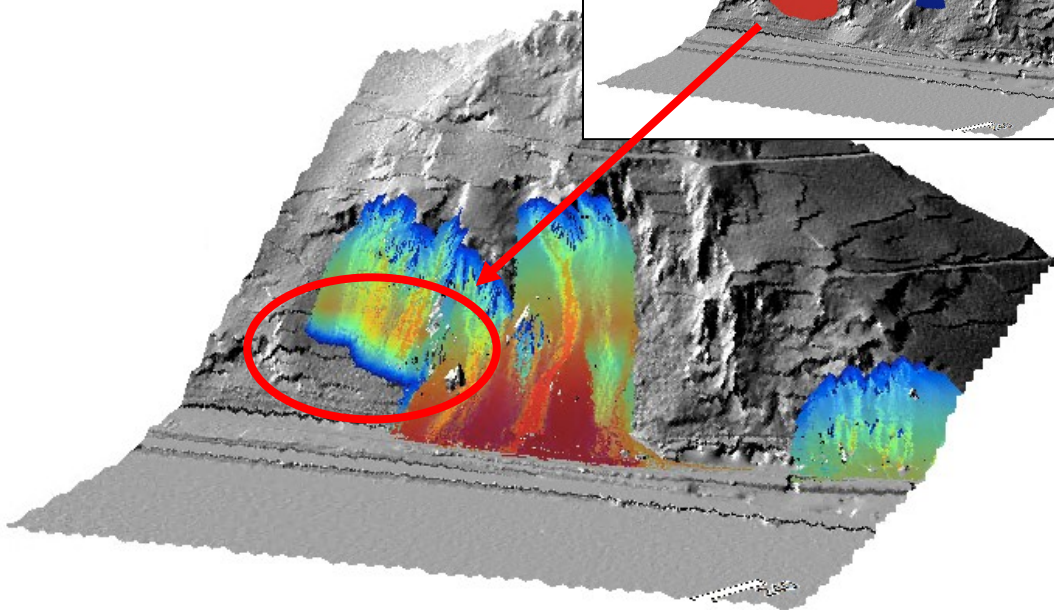
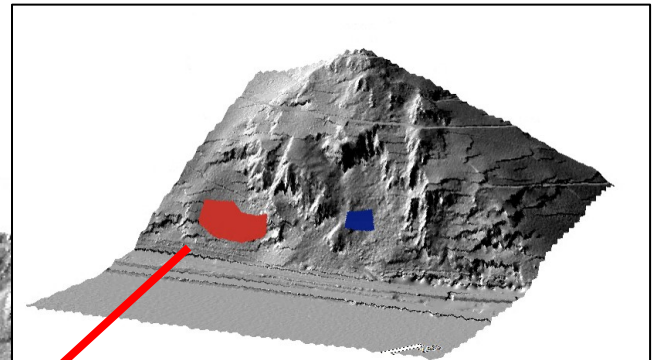
Maximum Velocity



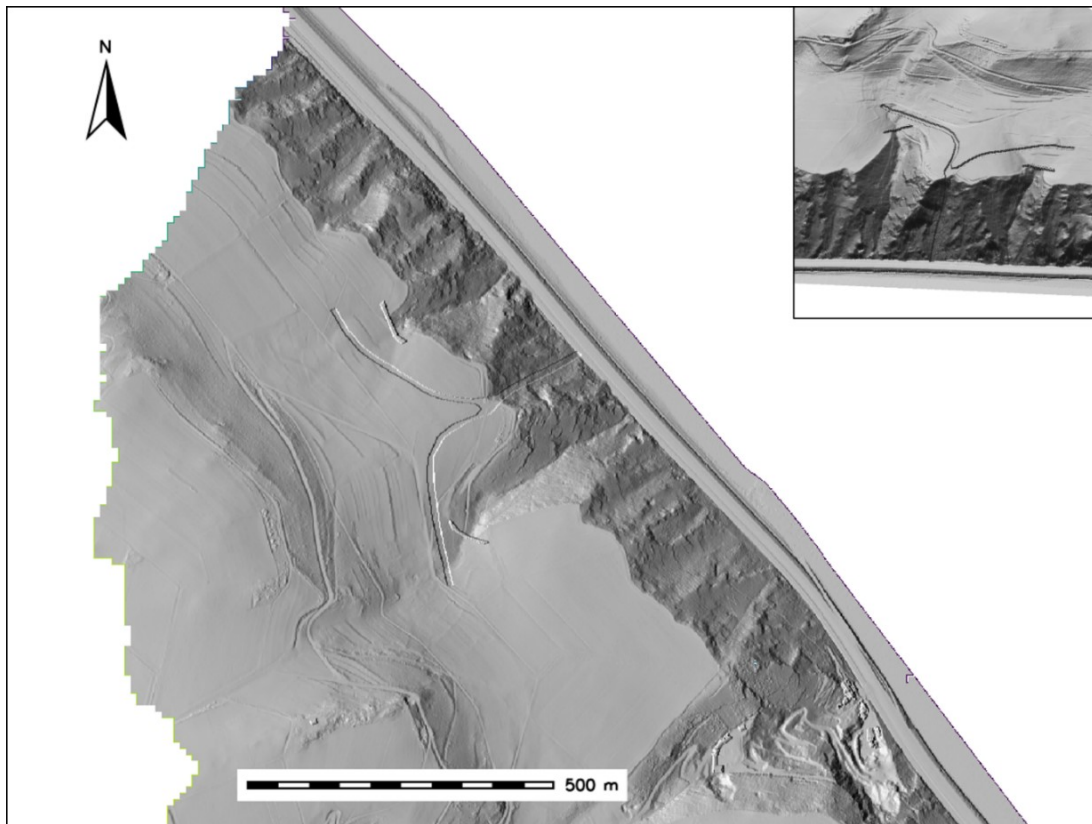
generalisierter Mu-Wert = 0,2



generalisierter Mu-Wert = 0,2
hoher lokaler Mu-Wert = 1,5
(roters Poygon)



Anhang: I: Veränderungen des digitalen Geländemodells zur Reduktion des Abflusses in den Ereignistälern im Untersuchungsgebiet bei Henschhausen (HAGGE-KUBAT et al. 2020)



Anhang: J: Heterogenität der Schuttmenge und -durchmessers in benachbarten Gerrinnen bei Bingen im Oberen Mittelrheintal

