

**Lokale und regionale Gefahren- und Risikoanalyse  
gravitativer Massenbewegungen an der  
Schwäbischen Alb**

**Dissertation**

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Rainer Bell

aus

Andernach

Bonn 2007

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Referent: Prof. Dr. Thomas Glade
2. Referent: Prof. Dr. Richard Dikau

Tag der Promotion: 04. Juli 2007

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn  
*[http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss\\_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online)* elektronisch publiziert.

*„Jede Erkenntnis weckt ja stets neue Fragen, und jede Untersuchung ist unvollständig und begrenzt, die Wahrheit ist aber unendlich, weil Alles in Zusammenhang steht.“*

(Heim, A. 1883, zitiert in von Poschinger 1997, S. 45)

## Vorwort

Unglaublich viele Menschen und Institutionen haben dazu beigetragen, dass ich die vorliegende Arbeit in dieser Form fertig stellen konnte. Ihnen allen bin ich äusserst dankbar für die Unterstützung, die ich in so vielen Bereichen erfahren durfte.

Mein ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Thomas Glade, der mich schon seit einigen Jahren treu auf meinem wissenschaftlichen Weg begleitet. Ich danke Dir, Thomas, für die tolle Zeit und die Unterstützung bei allen Fragen und Problemen, die sich so im Laufe der Jahre ansammelten! Und vor allem danke ich für die Geduld, die Du in den letzten Wochen der Fertigstellung dieser Arbeit mit mir hattest!

Als nächstes möchte ich Prof. Dr. Richard Dikau von ganzem Herzen danken. Vielfältige Gedanken in dieser Arbeit gehen ursprünglich auf seine Inspirationen zurück. Vor allem trägt er auch einen großen Anteil daran, dass ich eine Offenheit für neue Fragestellungen entwickeln konnte, die mir in dem intradisziplinären Projekt *InterRISK*, in das diese Arbeit eingebunden ist, sehr zugute kam.

Nun, da das Projekt erwähnt ist, möchte ich mich bei allen Kollegen des Forschungsprojekts ganz herzlich bedanken. Es hat enorm viel Spass gemacht, mit Euch/Ihnen zusammenzuarbeiten. Ganz besonders möchte ich mich bei den Projektmitarbeitern Matthias Röhrs, Marco Danscheid, Alexander Blöchl und Horst Meyenfeldt für die vielen spannenden Diskussionen und gemeinsamen Erlebnisse nicht nur in der Schwäbischen Alb bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch all meinen Kollegen von der Arbeitsgruppe Dikau, für Ihre zahlreichen Hilfen und lebhaften Diskussionen.

Die Bearbeitung des Themas war nur möglich durch enorme Unterstützung von zahlreichen Freunden im Gelände, im Labor und im Büro. Herzlichen Dank Christoph, Raphael, Jan-Erik, Maria, Nele, Ruth, Thomas, Mihai, Horst, Christina, Nicole, Jean-Christophe, Tanja, Sarah und Alejandro. Für die Unterstützung bei den Laboranalysen danke ich auch Ihnen, Frau Mainz und Frau Schäfermeier, ganz herzlich. Für die gemeinsamen Geländearbeiten danke ich zudem Oliver Sass, Wolfgang Schauerte und Karsten Föhre.

Ebenso möchte ich meinen Kollegen Oliver Sass, Fausto Guzzetti, Michel Jaboyedoff, Alexander Brenning, Chang-Jo Chung, Joachim Rohn, Birgit Terhorst und Mirco Galli für Ihre vielfältige Unterstützung und die kreativen Diskussionen von ganzem Herzen danken.

Folgenden Personen aus der Schwäbischen Alb bin ich zu besonderem Dank verpflichtet: Herrn Borngraeber, Herrn Saum, Herrn Siegler, Frau Schall-Straub, Herrn Straub, Herrn Schönwälder, Herrn und Frau Stumpp sowie Frau Müller.

Mein ganzer Dank gehört auch dem Umweltministerium Baden-Württemberg und der Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), da nur durch ihre Kooperationsbereitschaft der Zugang zu fast unerschöpflichen Datenquellen möglich wurde, ohne die, die Arbeit in dieser Form hätte nicht erstellt werden können.

Des Weiteren möchte ich Herrn Aldinger und Herrn Wiebel von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg ganz herzlich für die Datenbereitstellung und die Diskussionen danken.

Ich möchte der Stadt Mössingen und der Gemeinde Lichtenstein herzlich für die Unterstützung dieser Arbeit danken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich ganz herzlich für die Förderung des Forschungsprojekts *InterRISK*. Ohne diese Förderung hätte die vorliegende Arbeit nicht angefertigt werden können. In dem Zusammenhang möchte ich auch den anonymen Gutachtern danken, die durch die Ablehnung eines ersten Antrags für eine andere Region, den Weg ebneten, dieses Projekt in der so spannenden Schwäbischen Alb durchführen zu können. Viele wunderbare Stunden konnten so bei Geländearbeiten mit Sonne, Regen und Schnee in einer wunderschönen Landschaft verbracht werden. Für das Korrekturlesen der Arbeit danke ich Euch, Kirsten, Thomas H., Jan, Nele, Marco, Holger und Sandra von ganzem Herzen.

Im Sinne einer hoffentlich nachhaltigen Katastrophenvorsorge danke ich allen, die ich weiter oben nicht persönlich erwähnt habe für ihre Hilfe.

Meinen Eltern danke ich ganz herzlich für die Unterstützung, die ich all die Jahre erfahren durfte.

Liebe Sandra, nun möchte ich auch Dir von ganzem Herzen danken, für die Liebe, die Unterstützung und die Geduld, die Du die ganze Zeit mit mir hattest!

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Gravitative Massenbewegungen: Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Definitionen und Klassifikation.....	5
2.2 Hanginstabilität und deren Ursachen.....	8
2.3 Systemtheoretische Aspekte von gravitativen Massenbewegungen .....	10
2.4 Untergrunderkundung bei gravitativen Massenbewegungen .....	17
2.5 Bewegungsmonitoring von gravitativen Massenbewegungen .....	19
2.6 Vorhersagemöglichkeiten von gravitativen Massenbewegungen .....	22
2.7 Volumen- und Reichweitenbestimmung von gravitativen Massenbewegungen.....	23
2.8 Datierung von gravitativen Massenbewegungen.....	27
2.9 Frequenz-Magnitude-Beziehungen gravitativer Massenbewegungen.....	36
2.10 Holozäne Aktivität gravitativer Massenbewegungen in Europa .....	38
<b>3 Gravitative Massenbewegungen: Ereignis, Gefahr, Risiko .....</b>	<b>43</b>
3.1 Verschiedene Sichtweisen und Definitionen.....	43
3.2 Risk Governance und gravitative Massenbewegungen .....	45
3.2.1 Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen .....	47
3.2.1.1 Gefährdungsanalyse.....	48
3.2.1.2 Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit .....	51
3.2.1.3 Qualitative und quantitative Gefahrenanalysen.....	52
3.2.1.4 Validierung.....	55
3.2.2 Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen.....	57
3.2.2.1 Vulnerabilitätsanalyse.....	58
3.2.2.2 Schadenpotenzialanalyse.....	59
3.2.3 Risikobewertung.....	60
3.2.4 Risikomanagement gravitativer Massenbewegungen .....	62
<b>4 Daten.....</b>	<b>65</b>
<b>5 Methoden.....</b>	<b>71</b>
5.1 Regionale Gefahrenanalyse .....	71
5.1.1 Inventare gravitativer Massenbewegungen .....	71
5.1.2 Altersbestimmung .....	73
5.1.2.1 Auswertung historischer Daten .....	73
5.1.2.2 Relative Datierungen mittels DGM-Analysen .....	73
5.1.3 Wiederkehrwahrscheinlichkeit.....	73
5.1.3.1 Historische Daten.....	73

5.1.3.2 Frequenz-Magnitude-Analysen .....	73
5.1.4 Gefährdungsmodellierung .....	75
5.1.5 Regionale Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL).....	78
5.1.6 Gefahrenberechnung .....	80
5.1.6.1 Qualitativ.....	80
5.1.6.2 Quantitativ.....	80
5.2 Lokale Gefahrenanalyse .....	82
5.2.1 Kartierungen.....	82
5.2.2 Bohrungen .....	82
5.2.3 Laboranalysen .....	82
5.2.4 Inklinometermessungen.....	82
5.2.5 Nivellements.....	83
5.2.6 Geoelektrisches Bodenfeuchtemonitoring.....	84
5.2.7 Lokale Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL).....	87
5.2.8 Heuristische Gefahrenabschätzung .....	88
5.3 Regionale Risikoanalyse.....	88
5.3.1 Vulnerabilitätsanalyse .....	88
5.3.2 Schadenpotenzialanalyse.....	88
5.3.3 Risikoberechnung.....	89
5.3.3.1 Qualitativ.....	89
5.3.3.1 Quantitativ.....	89
5.4 Lokale Risikoanalyse.....	90
5.5 Nutzenanalyse.....	90
<b>6 Untersuchungsgebiete .....</b>	<b>92</b>
6.1 Schwäbische Alb .....	92
6.1.1 Geologie .....	93
6.1.2 Klima.....	96
6.1.3 Hydrologie.....	101
6.1.4 Geomorphologie.....	102
6.1.5 Gravitative Massenbewegungen.....	103
6.1.6 Landnutzung.....	110
6.1.7 Siedlungen.....	111
6.2 Oberes Filstal.....	112
6.3 Mössingen-Öschingen .....	114
6.4 Lichtenstein-Unterhausen.....	118
<b>7 Gefahrenanalyse .....</b>	<b>121</b>

7.1 Gefahrenanalyse Schwäbische Alb .....	121
7.1.1 Räumliche Inventare gravitativer Massenbewegungen .....	121
7.1.2 Altersbestimmung .....	134
7.1.2.1 Auswertung historischer Daten .....	134
7.1.2.2 Relative Datierung mittels DGM-Analysen .....	140
7.1.3 Wiederkehrwahrscheinlichkeit .....	152
7.1.4 Gefährdungsmodellierung .....	155
7.1.5 Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL) .....	162
7.1.6 Gefahrenberechnung .....	162
7.1.6.1 Qualitativ .....	162
7.1.6.2 Quantitativ .....	164
7.1.7 Diskussion .....	164
7.2 Gefahrenanalyse Oberes Filstal .....	166
7.2.1 Gefährdungsmodellierung .....	166
7.2.2 Gefahrenberechnung .....	175
7.2.3 Diskussion .....	175
7.3 Gefahrenanalyse Mössingen-Öschingen .....	178
7.3.1 Geomorphologische Kartierung .....	178
7.3.2 Bohrungen und Laboranalysen .....	182
7.3.3 Inklinometermessungen .....	183
7.3.4 Nivellementmessungen .....	185
7.3.5 Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL) .....	186
7.3.6 Externe Ergebnisse .....	191
7.3.7 Heuristische Gefahrenabschätzung .....	194
7.3.8 Diskussion .....	195
7.4 Gefahrenanalyse Lichtenstein-Unterhausen .....	197
7.4.1 Geomorphologische Kartierung .....	197
7.4.2 Bohrungen und Laboranalysen .....	199
7.4.3 Inklinometermessungen .....	200
7.4.4 Nivellementmessungen .....	202
7.4.5 Geoelektrisches Bodenfeuchtemonitoring .....	203
7.4.6 Heuristische Gefahrenabschätzung .....	207
7.4.7 Diskussion .....	208
<b>8 Risikoanalyse .....</b>	<b>211</b>
8.1 Risikoanalyse Schwäbische Alb .....	211
8.1.1 Schadenpotenzialanalyse .....	211
8.1.2 Risikoberechnung .....	212



---

8.1.3 Diskussion .....	215
8.2 Risikoanalyse Oberes Filstal .....	216
8.2.1 Schadenpotenzialanalyse.....	216
8.2.2 Risikoberechnung.....	217
8.2.3 Diskussion .....	220
8.3 Risikoanalyse Mössingen-Öschingen.....	222
8.3.1 Heuristische Risikoabschätzung.....	222
8.3.2 Diskussion .....	224
8.4 Risikoanalyse Lichtenstein-Unterhausen .....	226
8.4.1 Heuristische Risikoabschätzung.....	226
8.4.2 Diskussion .....	227
<b>9 Nutzenanalyse .....</b>	<b>230</b>
<b>10 Ideenskizze zum kooperativen Frühwarnsystem.....</b>	<b>233</b>
<b>11 Diskussion.....</b>	<b>236</b>
<b>12 Perspektiven.....</b>	<b>243</b>
<b>13 Zusammenfassung.....</b>	<b>245</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>249</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>271</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Einfache (single), mehrfache (multiple) und aufeinander folgende (successive) Rotationsrutschung(en) (aus Buma und van Asch 1996) .....	8
Abb. 2.2: Kaskadensystem zur pleistozänen und holozänen Entwicklung der Hänge in der Schwäbischen Alb (basierend auf Chorley und Kennedy 1971) .....	12
Abb. 2.3 Auswirkungen einer externen Störung auf ein geomorphologisches System (nach Dikau 2006a, basierend auf Bull 1991) .....	13
Abb. 2.4: Externe und interne Schwellenwert und ihre Auswirkung auf die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen (verändert nach Schumm 1979) .....	14
Abb. 2.5: Konzept der „Hierarchy of landslide activity and landform response“ (nach Crozier 1989) 16	
Abb. 2.6: Einsatzbereiche von verschiedenen absoluten Datierungsmethoden (nach Lang et al. 1999, Erläuterungen im Text) .....	30
Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Interaktion von periglazialen Deckschichten und gravitativen Massenbewegungen (a) Rutschung ohne Deckschichten, b) Rutschung älter als Deckschichten, Rutschung jünger als Deckschichten, weitere Erläuterungen im Text) .....	33
Abb. 2.8 Geomorphologische Veränderungen einer idealisierten gravitativen Massenbewegung über die Zeit (nach McCalpin (1984) in Keaton und DeGraff (1996); Anmerkung: A = active, reactivated, suspended or dormant-historic; B = dormant-young; C = dormant-mature; D = dormant-old (vgl. auch Tab. 2.8)) .....	36
Abb. 2.9: Frequenz-Magnitude-Beziehung für folgende drei Datensätze: 11.111 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst vom Northridge Erdbeben 1994 (USA); 4233 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst von starker Schneeschmelze 1997 in Umbria (Italien); 9594 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst durch Starkniederschläge während Hurricane Mitch in Guatemala 1998 (nach Malamud et al. 2004). .....	37
Abb. 2.10: Holozäne Aktivität von gravitativen Massenbewegungen in ausgewählten Regionen Europas (verändert nach Berrisford und Matthews 1997; in Klammern ist die Anzahl der untersuchten gravitativen Massenbewegungen (l) bzw. die Anzahl der durchgeführten Datierungen (d) angegeben; bei Nr. 9 sind zusätzlich 242 Ereignisse aufgeführt, die 1976 durch ein Erdbeben ausgelöst worden sind; bei Nr. 17 sind zusätzlich >420 Ereignisse aufgeführt, die ab 1790 aufgetreten sind; Datenquellen: 1) Starkel 1985; 2) Starkel 1997; 3) Alexandrowicz 1997; 4) Sorriso-Valvo 1997; 5, 6, 10, 11, 15-18) Brunnsden und Ibsen 1997; 7) Rodolfi 1997; 8) Panizza et al. 1997; 9) Mantovani 1997; 12) Grunert und Hardenbicker 1997; 13) Jorda 1983; 14) Abele 1997 .....	39
Abb. 2.11: Abweichung der Temperatur und des Niederschlags vom langfristigen Mittel in Mitteleuropa von 1000 bis 2000 (Anmerkung: blaue Linien = 31-jähriges gleitendes Mittel, rote Linien = langfristige Veränderung)(Glaser 2001) .....	41

Abb. 2.12: Veränderung des jährlichen und saisonalen Niederschlags in Mitteleuropa von 1500-2000 (Glaser 2001).....	42
Abb. 3.1: Stufenmodell des Risikomanagements zur Bewältigung von natürlichen Gefahren (nach Renn et al. 2006) .....	46
Abb. 3.2: Konzept des Risk Governance für gravitative Massenbewegungen (basierend auf Kienholz 1993, Hollenstein 1997, Australian Geomechanics Society 2000, Renn 2005, Ammann 2006, Renn et al. 2006) .....	47
Abb. 3.3: Vergleich dreier, unabhängig voneinander erstellter Inventare von gravitativen Massenbewegungen im Siedlungsbereich (nach Ardizzone et al. 2002). Die Inventare (1-3) wurden von drei unterschiedlichen Geomorphologengruppen erstellt.....	49
Abb. 3.4: Der Risikozyklus (nach Dikau und Weichselgartner 2005) .....	63
Abb. 5.1: Methodisches Konzept (kursiv gedruckte Arbeitsschritte wurden zumindest teilweise von anderen Bearbeitern durchgeführt und dieser Arbeit zur Verfügung gestellt) .....	72
Abb. 5.2: Konzept des Sloping Local Base Level (SLBL). In A sind das iterative Vorgehen des Algorithmus, sowie dessen Endprodukte mit und ohne eingesetzten Wölbungsparameter dargestellt. In B wird die Bedeutung der Fixpunkte für die Berechnung des SLBL veranschaulicht. Durch die Fixpunkte wird nur das Volumen für den begrenzten Körper berechnet, welches ansatzweise durch die grau hinterlegte Fläche und den neuen Verlauf der Höhenlinien (in rot) angezeigt wird (nach Jaboyedoff et al. 2004).....	79
Abb. 5.3: Prinzip des Streckennivellements (nach Petrahn 1999) .....	84
Abb. 6.1: Lage der Untersuchungsgebiete .....	92
Abb. 6.2: Geologische Haupteinheiten und Hauptstörungslinien des Untersuchungsgebietes (auf Basis der Geologischen Übersichtskarte 1:350.000 Baden-Württemberg; Detailinformationen zu den einzelnen Einheiten finden sich in Tab. 6.1) .....	94
Abb. 6.3: Schematisches geologisches Profil durch das Süddeutsche Schichtstufenland, u.a. mit Kennzeichnung der zu Rutschungen und Quellenbildung neigenden Gesteinsschichten (aus Wagenplast 2004a).....	96
Abb. 6.4: Durchschnittliche Tagesmitteltemperatur in der Schwäbischen Alb sowie die Veränderung zwischen den beiden Referenzperioden .....	98
Abb. 6.5: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtniederschlag in der Schwäbischen Alb sowie die Veränderung zwischen den beiden Referenzperioden.....	99
Abb. 6.6: Jährlicher Niederschlag zweier ausgewählter Klimastationen der Schwäbischen Alb (Nehren befindet sich im Albvorland und Sonnenbühl-Genkingen auf der Albhochfläche in der Nähe des Albtraufs) .....	100
Abb. 6.9: Klassifizierte Landnutzung 2003 der Schwäbischen Alb auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (DLM25) .....	111

Abb. 6.10: Verteilung und Alter der Siedlungen in der Schwäbischen Alb (Klassifizierung nach Grees 1993, Siedlungsflächen auf Basis des DLM25 mit Stand von 2003).....	112
Abb. 6.11: Geologie des Untersuchungsgebietes Oberes Filstal (auf Basis der Geologischen Karte 1:25.000) .....	113
Abb. 6.12: Aktuelle Landnutzung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal (auf Basis des DLM25, Stand 2003) .....	114
Abb. 6.13: Blick auf das Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen mit eingezeichneter Abrisskante der alten Rotationsrutschung (Foto: M. Danscheid).....	115
Abb. 6.14: Geologie und Hangrutschungsgrenzen des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen (auf Basis der GK25).....	116
Abb. 6.15: Historische Entwicklung der Siedlungsfläche in Mössingen-Öschingen .....	117
Abb. 6.16: Zerstörtes Haus im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen .....	117
Abb. 6.17: Blick auf das Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen mit eingezeichneten Abrisskanten der alten Rotationsrutschungen .....	118
Abb. 6.18: Geologie des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen und Ausmaße der alten Rotationsrutschungen (auf Basis der GK50).....	119
Abb. 6.19: Siedlungsentwicklung im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen .....	120
Abb. 6.20: Rissbildung am Haus von Familie Siegler im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen.....	120
Abb. 7.2: Lageungenauigkeiten im Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen (A = Mössinger Bergrutsch, B = Lage von Hangrutschungspunkten auf der Albhochfläche, C = Rutschung im Greut bei Hausen. Die roten Punkte zeigen die Lage der Hangrutschungen unter Verwendung der Gauß-Krüger Koordinaten aus der Datenbank. Die eingetragenen Pfeile verdeutlichen den Fehler zur tatsächlichen Lage) 123	
Abb. 7.3: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen (E. Bibus, B. Terhorst, Stand 2003) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Raum Mössingen bis Lichtenstein (A) und Oberes Filstal (B)) ...	124
Abb. 7.4: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsinformationen aus der Forstlichen Standortkartierung (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Stand 2006) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Irrenberg (A) und Oberes Filstal (B)).....	127
Abb. 7.5: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis des Archivs der Baustoff- und Bodenprüfstelle Ludwigsburg (Kohn 2007).....	128
Abb. 7.6: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Geomorphologischen Kartierung 1:100.000 (Dongus 1977) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Raum Mössingen bis Lichtenstein (A) und Oberes Filstal (B)) .....	130

Abb. 7.7: Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Obere Filstal auf Basis von DGM-Analysen und Luftbildinterpretationen für das Obere Filstal (Brennecke 2006) .....	131
Abb. 7.8: Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Umfeld des Filstales auf Basis der digitalen GK25 (Stand 2001 bis 2004) (Der vergrößerte Ausschnitt zeigt unter anderem die Rutschung im Greut von 1805 sowie die Hausener Wand).....	133
Abb. 7.9: Unterschiede zwischen verschiedenen Inventaren gravitativer Massenbewegungen.....	134
Abb. 7.10: Gravitative Massenbewegungen aus den Aichelen Forstkarten 1816-1819 (A = Detailansicht kleinerer Rutschungen, B = Große Rutschung bei Neidlingen, C Große Rutschung bei Weilheim an der Teck) .....	135
Abb. 7.11: Anzahl an gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet pro 20-jähriges Intervall von 1416 – 2005 (Die Abbildung täuscht eine höhere Aktivität um 1800 und ab 1950 vor, die im Wesentlichen auf Lücken in der Dokumentation älterer Ereignisse bzw. in der Datenerhebung zurück zu führen ist.) .....	139
Abb. 7.12: Anzahl an gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet pro Jahr von 1744 bis 2005 (Die Abbildung täuscht eine höhere Aktivität vor allem ab 1950 vor, die im Wesentlichen auf Lücken in der Dokumentation älterer Ereignisse bzw. in der Datenerhebung zurück zu führen ist.).....	139
Abb. 7.13: Mössinger Bergrutsch 1983 und Rutschungen am Farrenberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen) .....	141
Abb. 7.14: Rutschungen am Irrenberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen sowie Wasserversorgungseinrichtungen) .....	142
Abb. 7.15: Rutschung im Greut 1805 (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen) .....	144
Abb. 7.16: Rutschung am Gräbelesberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1 mit kartierter Rutschscholle aus der GK25, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen und historischen Schutzwällen).....	145
Abb. 7.17: Rutschung am Hangenden Stein (Die rote Linie stellt die Grenze der kartierten Rutschung dar) .....	146
Abb. 7.18: Unterschiedliche Aktivitäten gravitativer Massenbewegungen bei Albstadt (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit Prozessbereichen gravitativer Massenbewegungen und Siedlungen) .....	148
Abb. 7.19: Rutschungsaktivitäten im Schlichemtal .....	149
Abb. 7.20: Frequenz-Manitude-Analyse des Inventars gravitativer Massenbewegungen von Brennecke (2006) .....	152

Abb. 7.21: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells Do50_SWA1 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	158
Abb. 7.22: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25_SWA_1 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	159
Abb. 7.23: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25_SWA_2 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	160
Abb. 7.24: Gefahrenkarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	163
Abb. 7.25: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GK25 .....	169
Abb. 7.26: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GÜK200_2 .....	170
Abb. 7.27: Ausschnitt der Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25_SWA_2 .....	171
Abb. 7.28: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen .....	180
Abb. 7.29: Szenarien zur Entwicklung zukünftiger gravitativer Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (A = nur flachgründige Bewegungen unterhalb der großen Rutschscholle, B – D = Reaktivierung einzelner Rutschschollen, E – G = durch Reaktivierung einzelner Rutschschollen Reaktivierung der anderen Rutschschollen (in unterschiedlicher Reihenfolge), H = Rutschung des gesamten Sporns) .....	181
Abb. 7.30: Lage der Bohrungen bzw. Inklinometer und Vermessungspunkte im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen .....	183
Abb. 7.31: Maximale Bewegungsraten der Inklinometer Oes01, Oes04 und Oes06, kumuliertes verfügbares Wasser, sowie Wasseräquivalent in der Schneedecke (Verfügbares Wasser = Niederschlag - Verdunstung – Wasseräquivalent in der Schneedecke). .....	184
Abb. 7.32: Höhenveränderung der Inklinometer Oes01 und Oes04 sowie des Vermessungspunktes 108 (Anmerkung: Bei FP3 handelt es sich um einen Festpunkt auf der Straße) .....	186
Abb. 7.33: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung der untersten Rutschscholle .....	188
Abb. 7.34: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung der Spornfront .....	189
Abb. 7.35: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung des gesamten Sporns .....	190

Abb. 7.36: Geoelektrisches Längsprofil im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (aus Kruse 2006). (Die Bereiche mit höheren spezifischen Widerstandes ( $> 100 \text{ Ohm m}$ ) geben kalksteinreiche Schichten wieder, Bereiche mit geringeren spezifischen Widerständen sind ein Anzeichen für Mergel- und Tonsteine, sowie deren Verwitterungsprodukte). .....	192
Abb. 7.37: Ergebnisse der ersten tachymetrischen Wiederholungsmessung im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (Die Lage der Vermessungspunkte ist in Abb. 7.29 dargestellt. Die roten Ellipsen zeigen den Fehlerbereich jeder einzelnen Messung an.) (aus Schauerte et al. 2006) ...	194
Abb. 7.38: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen .....	198
Abb. 7.39: Lage der Bohrungen bzw. Inklinometer und der Geoelektrikprofile im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen.....	199
Abb. 7.40: Verlauf der Bewegungen im Inklinometer Lic02 aus den zwei Tiefen mit den stärksten Bewegungen .....	201
Abb. 7.41: Ergebnisse der Bewegungsmessungen mittels Inklinometer Lic02 sowie Verteilung des Niederschlags und des Wasseräquivalents im Schnee. ....	201
Abb. 7.42: Skizze des Nivellementmessnetzes in Lichtenstein-Unterhausen (FP1 bis FP3 = Festpunkte am Straßenrand, N1 bis N4 = Messbolzen am geschädigten Haus).....	202
Abb. 7.43: Ergebnisse der Nivellementmessungen in Lichtenstein-Unterhausen (N1 und N2 sind Messbolzen am Altbau, N3 und N4 befinden sich am Neubau) .....	203
Abb. 7.44: Niederschlagsverteilung an der Station Reutlingen für das Jahr 2006 (Quelle: LUBW)..	204
Abb. 7.45: Invertiertes geoelektrisches Längsprofil in Lichtenstein-Unterhausen. (Die hohen spezifischen Widerstände ( $> 100 \text{ Ohm m}$ ) zeigen v.a. kalksteinreiche Schichten an, die niedrigen spezifischen Widerstände weisen auf tonreiches und schluffiges Material an) .....	205
Abb. 7.46: Bodenfeuchtemonitoring mittels Geoelektrik entlang des Längsprofils in Lichtenstein-Unterhausen. Dargestellt wird die Veränderung des spezifischen Widerstands (in %) von verschiedenen Messungen zum Referenzprofil vom 31.01.2006 und zur vorherigen Messung. Deutlich zu erkennen sind die Veränderungen im Bereich der Schutthalde, wohingegen im bewaldeten Bereich nur der Einfluss der Vegetation (Wasserverbrauch) ersichtlich wird. ....	206
Abb. 8.1: Qualitatives Schadenpotenzial in der Schwäbischen Alb auf Basis des DLM25 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	213
Abb. 8.2: Qualitatives Risiko durch gravitative Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten) .....	214
Abb. 8.3: Schadenpotenzial im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des DLM25 .....	217
Abb. 8.4: Risiko durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GÜK200_2 und des DLM25 .....	218
Abb. 8.5: Risiko durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells DoFva25_SWA_2 und des DLM25 .....	219

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Unterschiedliche Prozesstypen gravitativer Massenbewegungen und deren Definition (nach Dikau und Glade 2002) .....	5
Tab. 2.2: Klassifikation der Geschwindigkeit von gravitativen Massenbewegungen und Abschätzung des möglichen Schadensausmaßes (nach Cruden und Varnes 1996) .....	6
Tab. 2.3: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen (nach Dikau et al. 1996 und Cruden und Varnes 1996) .....	7
Tab. 2.4: Aktivitätsgrade von gravitativen Massenbewegungen (nach Cruden und Varnes 1996).....	7
Tab. 2.5: Auswahl von vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren (nach Dikau und Glade 2002). .....	9
Tab. 2.6: Klassifikation von geomorphologischen Systemtypen mit Beispielen und potenziellen Untersuchungsmethoden (nach Chorley und Kennedy 1971, Slaymaker 1991 und Dikau 2005). 11	
Tab. 2.7: Einsatzbereiche verschiedener geophysikalischer Methoden hinsichtlich gravitativer Massenbewegungen und damit verbundener Aspekte (nach Bell et al. 2006b, Bouillon 2005 und Hack 2000). .....	19
Tab. 2.8: Kriterien zur Abschätzung des Alters von gravitativen Massenbewegungen in den Rocky Mountains (nach McCalpin (1984) in Keaton und DeGraff (1996)).....	35
Tabelle 3.1: Empfehlungen zur skalenangepassten Verwendung von unterschiedlichen Methoden zur Gefährdungsanalyse (nach Glade und Crozier 2005b, basierend auf Soeters und van Westen 1996).....	51
Tab. 3.2: Variierende Klassengrenzen und Gütekriterien bei der Gefährdungsmodellierung mittels logistischer Regression.....	56
Tab. 4.2: Systemeinstellung für die Laserscan-Befliegung Baden-Württembergs (Schleyer 2001) .....	65
Tab. 4.1: Übersicht über die verwendeten Daten .....	66
Tab. 5.1: Klassifikation des Skalierungsfaktors für das Volumen der gravitativen Massenbewegungen .....	81
Tab. 5.2: Charakteristische spezifische Widerstandswerte für unterschiedliche Materialien .....	85
Tab. 5.3: Durchschnittliche Sachwerte nach unterschiedlichen Nutzungstypen, sowie daraus abgeleitete Schadenpotenzialklassen (Blöchl in Vorbereitung) .....	89
Tab. 5.4: Risikomatrix.....	89
Tab. 6.1: Detailübersicht über die Juragesteine im Bereich des Untersuchungsgebietes (nach Geyer und Gwinner 1997 und Wagenplast 2005).....	95
Tab. 6.2: Historische Rutschungen an der Schwäbischen Alb (nach Kallinich 1999).....	106
Tab. 6.3: Charakteristische Typen gravitativer Massenbewegungen in Abhängigkeit von der Lithologie (nach Terhorst 1997) .....	109
Tab. 7.1: Die größten historischen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet der Schwäbischen Alb.....	151



Tab. 7.2: Wiederkehrintervall und Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude in den Untersuchungsgebieten Oberes Filstal und Schwäbische Alb .....	153
Tab. 7.3: Anzahl historischer gravitativer Massenbewegungen bestimmter Magnitude und daraus berechneter Wiederkehrintervalle (auf Basis der Ereignisse in Tab. 7.1) .....	154
Tab. 7.4 Übersicht über die Gefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb mittels logistischer Regression inklusive der Gütemaße .....	157
Tab. 7.5: Alter und Anzahl gravitativer Massenbewegungen in einem Untersuchungsgebiet im Mössinger Raum auf Basis der multitemporalen Luftbildinterpretation in Kombination mit DGM1-Analysen (Galli 2007, Persönliche Mitteilung) .....	165
Tab. 7.6: Übersicht über die Gefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal mittels logistischer Regression inklusive der Gütemaße .....	168
Tab. 8.1: Schadenpotenzialkategorien und deren Verbreitung im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb .....	212
Tab. 8.2: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb .....	215
Tab. 8.3: Schadenpotenzialkategorien und deren Verbreitung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal .....	216
Tab. 8.4: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Gefahrenmodells LsDGM10GÜK200_2 (vgl. Abb. 7.23) .....	220
Tab. 8.5: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des für die Schwäbische Alb berechneten Gefahrenmodells DoFva25_SWA_2 (vgl. Abb. 7.24) .....	220

## 1 Einleitung

„Landslides present a threat to life and livelihood throughout the world, ranging from minor disruption to social and economic catastrophe“ (Crozier und Glade 2005, S. 2). Insgesamt haben die Schäden durch Naturgefahren (z.B. gravitative Massenbewegungen, Hochwasser, Stürme, Erdbeben und Tsunamis) in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen. Für das vergangene Jahr beläuft sich der Gesamtschaden auf 50 Mrd. US\$, wovon 15% auf Temperaturextreme und Massenbewegungen entfallen. Im selben Zeitraum kamen 20.000 Menschen durch Naturgefahren ums Leben, 21% davon durch Temperaturextreme und Massenbewegungen (Münchener Rückversicherung 2007). Wie hoch die Anteile durch die gravitativen Massenbewegungen genau sind, geht aus der Statistik nicht hervor.

Die Anzahl aktueller gravitativer Massenbewegungen, die gravierende Konsequenzen nach sich gezogen haben, ist groß. Ein Beispiel stellt der Felssturz an der Gotthard Autobahn vom 31.05.2006 dar, als früh morgens große Felsblöcke auf die Autobahn stürzten und zwei Todesopfer forderten. Die Autobahn, eine der Hauptverkehrsachsen Europas, musste mehrere Wochen komplett gesperrt werden, um die entsprechenden Hangbereiche im Detail zu untersuchen und zu sichern (Swissinfo 2006a, 2006b). Dadurch entstanden enorme direkte und indirekte ökonomische Schäden.

Auf den Philippinen ereignete sich am 17.02.2006 eine sehr schnelle, komplexe gravitative Massenbewegung, die durch intensive Niederschläge und starke Erdbeben ausgelöst wurde und zu 139 Todesopfern und 980 vermissten Personen führte (Catane et al. im Druck).

Auch ein etwas länger zurück liegendes Ereignis vom Dezember 1999, bei dem 30.000 Menschen durch Murgänge in Venezuela getötet wurden (Larsen et al. 2001), zeigt, welche katastrophalen Folgen gravitative Massenbewegungen haben können.

Die drei Beispiele deuten bereits das typische Phänomen an, dass in den Entwicklungs- und Schwellenländern oftmals eine große Anzahl an Toten bei gravitativen Massenbewegungen zu verzeichnen ist, während in den Industrieländern vor allem große direkte oder indirekte ökonomische Schäden die Folge sind. Für Deutschland schätzt Krauter (1992) die jährlichen ökonomischen Schäden auf 150 Mio. US\$.

Aus dem Bereich der Schwäbischen Alb sind ebenfalls rezente Großereignisse wie der Mössinger Berggrutsch von 1983 bekannt. Bei diesem Ereignis wurden sechs Millionen Kubikmeter Material bewegt, die weite Bereiche des Forstes und der Forststraßen zerstörten und dadurch einen Schaden von 1,5 Mio. € verursachten (Fundinger 1985). Wäre dieser Berggrutsch in einem besiedelten Gebiet aufgetreten, so wären sicherlich zahlreiche Todesopfer zu beklagen gewesen.

Neben solchen Großrutschungen treten regelmäßig kleinere gravitative Massenbewegungen auf, die unter anderem zu hohen Unterhaltungskosten von Straßen und Eisenbahnstrecken führen. Bisher ist nur ein einziges Ereignis in der Schwäbischen Alb bekannt, welches Todesopfer forderte, und zwar die Rutschung an der Bronner Mühle 1960 mit drei Toten (German 1961 und Schädel und Stober 1988). Trotz dieser Beispiele werden die Gefahren und Risiken in deutschen Mittelgebirgen oft unterschätzt.

Daher besteht ein großer Forschungsbedarf, um die Gefahren- und Risiken in den deutschen Mittelgebirgen und so auch in der Schwäbischen Alb zu untersuchen und im Rahmen von Gefahren- und Risikokarten einer breiteren Öffentlichkeit bekannt zu machen, so dass entsprechende Vorsorgemaßnahmen getroffen werden können, bevor ein Großereignis in einer Siedlung zu einer Katastrophe führt. Zwar wurden zahlreiche Arbeiten zu gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb durchgeführt, doch beschäftigen sich nur sehr wenige mit dem Aspekt der Naturgefahr. Bisher existieren nur für Teilbereiche der Schwäbischen Alb Gefährdungskarten (z.B. Wiegand 1996, Thein 2000 und Neuhäuser und Terhorst 2006), Gefahren- und Risikokarten fehlen jedoch noch vollkommen.

Da eine rein naturwissenschaftliche Bearbeitung des Themas nicht ausreicht, um Konzepte zu erarbeiten, die zu einer optimalen Katastrophenvorsorge führen, wurde das intradisziplinäre Forschungsprojekt *InterRISK* (Integrative Risikoanalyse und -bewertung rezenter Hangrutschungsgebiete der Schwäbischen Alb) initiiert, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) von 2003 bis 2006 bzw. in einzelnen Teilprojekten bis 2007 gefördert wurde. Das Forscherteam setzt sich aus Physischen Geographen (Teilprojekt Analysis), Sozialgeographen (Teilprojekt Perception), Historischen Geographen (Teilprojekt History) und Wirtschaftsgeographen (Teilprojekt Assess) zusammen und zeigt damit das große Potenzial auf, welches innerhalb der Fachdisziplin Geographie vorhanden ist.

Im Rahmen des Teilprojektes *InterRISK* Analysis, in das auch die vorliegende Arbeit eingebettet ist, wurde der Prozess der gravitativen Massenbewegung sowohl auf lokaler, als auch auf regionaler Skale untersucht, sowie die resultierenden Gefahren und Risiken abgeschätzt. Die Wahrnehmung von gravitativen Massenbewegungen und der Umgang der Bevölkerung mit diesem natürlichen Phänomen war Forschungsgegenstand von *InterRISK* Perception. In *InterRISK* History wurden zahlreiche historische Archive hinsichtlich noch unbekannter historischer gravitativer Massenbewegungen untersucht und zudem der Umgang früherer Gesellschaften mit diesen Ereignissen analysiert. Das Teilprojekt *InterRISK* Assess setzte sich mit der Erhebung und Analyse der durch gravitative Massenbewegungen gefährdeten ökonomischen Werte (Schadenpotenziale) auseinander.

Die Arbeiten zu naturwissenschaftlichen Analysen von Gefahren und Risiken durch gravitative Massenbewegungen haben in den letzten Jahren sehr stark zugenommen, so dass bestehende Ansätze kontinuierlich weiter entwickelt wurden und neue hinzugekommen sind (z.B. Catani et al. 2005a, Chung 2006 und Guzzetti et al. 2006a). Dennoch bestehen nach wie vor viele offene Forschungsfragen, insbesondere hinsichtlich der Quantifizierung von Gefahren und Risiken (van Westen et al. 2006). Daher wird in der vorliegenden Arbeit angestrebt, neben einem einfachen qualitativen Ansatz einen neuen quantitativen Ansatz auf regionaler Skale auszuarbeiten und diesen auf seine Anwendbarkeit in der Schwäbischen Alb zu überprüfen. Insbesondere soll die Berücksichtigung der potenziellen zukünftigen Fläche und des Volumens der gravitativen Massenbewegungen zu wesentlichen Verbesserungen in der Gefahren- und Risikoanalyse führen.

Im Rahmen der Gefahrenanalyse werden Wiederkehrwahrscheinlichkeiten für unterschiedlich große gravitative Massenbewegungen benötigt. Daher ist die Bestimmung des Alters vergangener Ereignisse von zentraler Bedeutung. Überwiegend wird für die zahlreichen Großrutschungen in der Schwäbischen Alb ein pleistozänes Alter angenommen (z.B. Bleich 1960, Terhorst 1997 und Bibus 1999), so dass diese Annahme auf Basis historischer Daten, sowie mittels Analysen eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells (DGM) kritisch hinterfragt wird. Des Weiteren soll in dieser Arbeit ein neuer regionaler Ansatz zur Berechnung von Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von gravitativen Massenbewegungen entwickelt werden.

Auf der lokalen Skala werden in zwei Untersuchungsgebieten größere Hangrutschungskomplexe im Detail untersucht und die damit verbundenen Gefahren und Risiken analysiert. Dabei kommen neben traditionellen Methoden wie geomorphologischen Kartierungen, Bohrungen, Laboranalysen und Inklinometermessungen auch ein Nivellement zur Bestimmung der Quellungs- und Schrumpfdynamik von tonreichen Böden sowie ein geoelektrisches Bodenfeuchtemonitoring zum Einsatz. Die lokalen Untersuchungen dienen weiterhin einem besseren Verständnis des Prozesses der gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb, was für die regionalen Modellierungen von großer Bedeutung ist.

Im Folgenden werden fünf zentrale Arbeitshypothesen formuliert, aus denen die jeweiligen Ziele für diese Arbeit abgeleitet werden:

- 1) Gravitative Massenbewegungen treten häufig und weitverbreitet in der Schwäbischen Alb auf  
Ziel: Ermittlung und Darstellung verfügbarer Informationen zu gravitativen Massenbewegungen in entsprechenden Inventaren
- 2) Die Aktivität der bzw. die Gefahr durch gravitative Massenbewegungen wird unterschätzt  
Ziel: Analyse der Kinematik lokaler gravitativer Massenbewegungen, regionale Gefährdungsmodellierungen mittels logistischer Regression, qualitative Gefahrenanalyse, DGM-Analysen zur relativen Datierung von gravitativen Massenbewegungen, Aufbau von Ereignisinventaren
- 3) Die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude ist abschätzbar  
Ziel: Ermittlung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit auf Basis von historischen Daten (bereitgestellt durch InterRISK History) und Frequenz-Magnitude-Analysen

- 4) Das Volumen zukünftiger gravitativer Massenbewegungen kann sowohl auf lokaler, als auch auf regionaler Skale zuverlässig abgeschätzt werden  
Ziel: Berechnung des Volumens unter Verwendung eines GIS-basierten geometrischen Ansatzes (Sloping Local Base Level (SLBL))
- 5) Die Integration des Volumens zukünftiger gravitativer Massenbewegungen in die regionale Gefahren- und Risikoanalyse führt zu einer enormen Verbesserung bestehender Ansätze zur Quantifizierung der Gefahren und Risiken  
Ziel: Kombination der Flächen- und Volumenberechnung mit den Ergebnissen der logistischen Regression und den berechneten Wiederkehrwahrscheinlichkeiten, Ausweitung der Gefahrenanalyse zur Risikoanalyse unter Einbindung der Schadenpotenziale (in Zusammenarbeit mit InterRISK Assess)

Im Folgenden wird kurz der Aufbau der Arbeit erläutert: In Kap. 2 werden die theoretischen Grundlagen zum Thema gravitative Massenbewegungen gelegt, auf die die Einbindung dieser Arbeit in die internationale Naturrisikoforschung folgt (Kap. 3). Der Schwerpunkt in Kap. 3 liegt dabei auf der Gefahren- und Risikoanalyse, so dass dort unter anderem die Schwachstellen in bestehenden Ansätzen herausgearbeitet werden. Nach einer kurzen Darstellung, welche Daten in dieser Arbeit genutzt werden (Kap. 4), werden die erkannten Schwachstellen aus den Theoriekapiteln aufgegriffen und die eigenen Forschungsansätze entwickelt (Kap. 5). In Kap. 6 werden die zwei regionalen Untersuchungsgebiete Schwäbische Alb und Oberes Filstal sowie die zwei lokalen Untersuchungsgebiete Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen beschrieben, wobei ausführlich auf den Stand der Forschung bezüglich gravitativer Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb eingegangen wird. Anschließend werden die Ergebnisse der Gefahrenanalyse (Kap. 7) und der Risikoanalyse (Kap. 8) jeweils für alle Untersuchungsgebiete präsentiert. Auf Grund der Vielzahl unterschiedlichster Ergebnisse erfolgt eine Diskussion der Detailergebnisse bereits am Ende jedes Unterkapitels. Danach wird in Kap. 9 der Nutzen der in dieser Arbeit erstellten Produkte der Gefahren- und Risikoanalyse für die ingenieurgeologische Praxis ausgewertet. Nachfolgend werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erste Ideen für ein kooperatives Frühwarnsystem entwickelt (Kap. 10). Abschließend werden alle Ergebnisse noch einmal zusammenfassend diskutiert (Kap. 11), bevor die Arbeit mit einigen Perspektiven für zukünftige Forschungstätigkeiten (Kap. 12) und einer Zusammenfassung (Kap. 13) endet.

## 2 Gravitative Massenbewegungen: Grundlagen

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung zu einzelnen Aspekten der gravitativen Massenbewegungen diskutiert, die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

### 2.1 Definitionen und Klassifikation

„Gravitative Massenbewegungen sind bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft“ (Dikau und Glade 2002, S.38). Häufig werden sie auch allgemein als „Hangrutschungen“ bezeichnet. International sind „mass movements“ und v.a. „landslides“ als Oberbegriffe gebräuchlich (Dikau und Glade 2002). Gravitative Massenbewegungen können in Abhängigkeit vom involvierten Material und Prozesstyp sehr unterschiedlich sein. Sie weisen sehr variable Magnituden (von wenigen m<sup>2</sup> bis einigen km<sup>2</sup>) und sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten (von einigen m/s bis wenigen mm/Jahr) auf.

Es werden die folgenden Prozesstypen unterschieden: Fallen, Kippen, Gleiten, Driften, Fließen sowie komplexe Prozesse, die sich aus mindestens zwei unterschiedlichen, nacheinander ablaufenden Prozessen zusammensetzen. Definitionen der jeweiligen Prozesse sind nach Dikau und Glade (2002) in Tab. 2.1 zusammengestellt. In früheren Klassifikationen war auch der Prozess des Kriechens noch enthalten (z.B. in Hutchinson 1988). Da dieser Prozesstyp nicht einheitlich gebraucht wurde, schlagen Cruden und Varnes (1996) vor, diesen Begriff durch die Kombination eines klar definierten Prozesstypes (z.B. Fließen oder Gleiten) mit der entsprechenden Geschwindigkeitsklasse „sehr langsam“ oder „extrem langsam“ (siehe Tab. 2.2) zu ersetzen. In der deutschen Ingenieurgeologie ist der Begriff des Kriechens allerdings noch weit verbreitet (siehe z.B. Prinz 1997, Krauter 2001).

Tab. 2.1: Unterschiedliche Prozesstypen gravitativer Massenbewegungen und deren Definition (nach Dikau und Glade 2002)

Prozess	Definition
Fallen	Fels- oder Lockergestein stürzt größtenteils frei fallend, springend oder rollend ab. Die Ablösung des Materials erfolgt entlang von Flächen, an der geringe oder keine Scherbewegungen auftreten.
Kippen	Vorwärtsrotation von Fest- und Lockergestein eines Hanges um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunkts.
Gleiten a) rotationsförmig b) translationsförmig	Hangabwärts gerichtete Bewegung von Fels- und Lockergestein auf Gleitflächen oder dünnen Zonen intensiver Scherverformung a) mit Drehung oder b) hangparallel.
Fließen	Kontinuierliche, irreversible Deformation von Fest- und Lockergesteinen, bei der die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse der einer viskosen Flüssigkeit gleicht.
Driften	Laterale Bewegung von Fest- und Lockergesteinen mit einem Einsinken in die liegenden, weniger kompetenten Schichten ohne intensive Scherung auf Gleitflächen.
Komplex	Kombination von mindestens zwei der genannten Prozesse, wobei sich der anfängliche Prozesstyp während der Hangabwärtsbewegung verändert.

Tab. 2.2: Klassifikation der Geschwindigkeit von gravitativen Massenbewegungen und Abschätzung des möglichen Schadensausmaßes (nach Cruden und Varnes 1996)

Geschwindigkeitsklasse	Beschreibung	Geschwindigkeit (mm/sec)	typische Geschwindigkeit	mögliches Schadensausmaß
7	extrem schnell			Katastrophencharakter; Zerstörung von Bauwerken; viele Tote; Fluchtmöglichkeit unwahrscheinlich
6	sehr schnell	$5 \times 10^3$	5m/sec	Einige Tote; Geschwindigkeit zu groß, um allen Personen die Flucht zu ermöglichen
5	schnell	$5 \times 10^1$	3m/min	Flucht und Evakuierung möglich; Struktur der Gebäude und Einrichtung zerstört
4	mäßig schnell	$5 \times 10^{-1}$	1,8m/Stunde	Unempfindliche Bauwerke können befristet erhalten werden.
3	langsam	$5 \times 10^{-3}$	13m/Monat	Sicherungsmaßnahmen sind während der Bewegung durchführbar; unempfindliche Strukturen können mit häufigen Sanierungsarbeiten erhalten werden, falls die Gesamtbewegung während einer Beschleunigungsphase nicht zu groß wird
2	sehr langsam	$5 \times 10^{-5}$	1,6m/Jahr	Einige Bauwerke können den Bewegungen widerstehen
1	extrem langsam	$5 \times 10^{-7}$	16mm/Jahr	Bewegungen sind ohne Messgeräte nicht wahrnehmbar; Baumaßnahmen sind mit Auflagen möglich

International akzeptierte Klassifikationen wurden von Cruden und Varnes (1996) und Dikau et al. (1996) in Abhängigkeit von Prozesstyp und involviertem Material vorgelegt (Tab. 2.3), die auf Arbeiten der WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory) (1993) basieren.

Für die Klassifikation des Aktivitätsgrads schlagen Cruden und Varnes (1996) folgende Begriffe vor: aktiv (*active*), latent (*suspended*), reaktiviert (*reactivated*), inaktiv (*inactive*), ruhend (*dormant*), abgeschlossen (*abandoned*), stabilisiert (*stabilized*) und relict (*relict*) (Tab. 2.4).

Beim Aktivitätstyp können einfache (*single*), mehrfache (*multiple*) und aufeinander folgende (*successive*) Bewegungen unterschieden werden (Abb. 2.1). Bei letzteren handelt es sich auch um das Auftreten von mehreren Bewegungen, doch im Gegensatz zu den mehrfachen gravitativen Massenbewegungen sind die einzelnen Bewegungen hinsichtlich Material und Gleitflächen voneinander entkoppelt (Cruden und Varnes 1996).

Tab. 2.3: Klassifikation gravitativer Massenbewegungen (nach Dikau et al. 1996 und Cruden und Varnes 1996)

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

Tab. 2.4: Aktivitätsgrade von gravitativen Massenbewegungen (nach Cruden und Varnes 1996)

Aktivitätsstatus	Definition	
aktiv	aktiv	aktuell in Bewegung
	reaktiviert	Reaktivierung (von Teilen) einer früheren gravitativen Massenbewegung, aktuell in Bewegung
	latent	Gravitative Massenbewegung, die innerhalb der letzten 12 Monate in Bewegung war, aktuell aber nicht
inaktiv	ruhend	Gravitative Massenbewegung, die innerhalb der letzten 12 Monate nicht in Bewegung war, aber deren Ursachen noch zu erkennen sind (z.B. ein Fluss, der den Hang unterschritten hat)
	abgeschlossen	Gravitative Massenbewegung, die innerhalb der letzten 12 Monate nicht in Bewegung war, und deren Ursachen beseitigt sind (z.B. der Fluss, der den Hang unterschritten hat, hat seinen Lauf verändert)
	stabilisiert	Gravitative Massenbewegung, die innerhalb der letzten 12 Monate nicht in Bewegung war, und die durch natürliche Prozesse (z.B. Akkumulation von fluvialen Sedimenten im Auslaufbereich) oder anthropogene Maßnahmen stabilisiert wurde
	relikt	Gravitative Massenbewegung, die eindeutig unter anderen geomorphologischen oder klimatischen Bedingungen stattgefunden hat



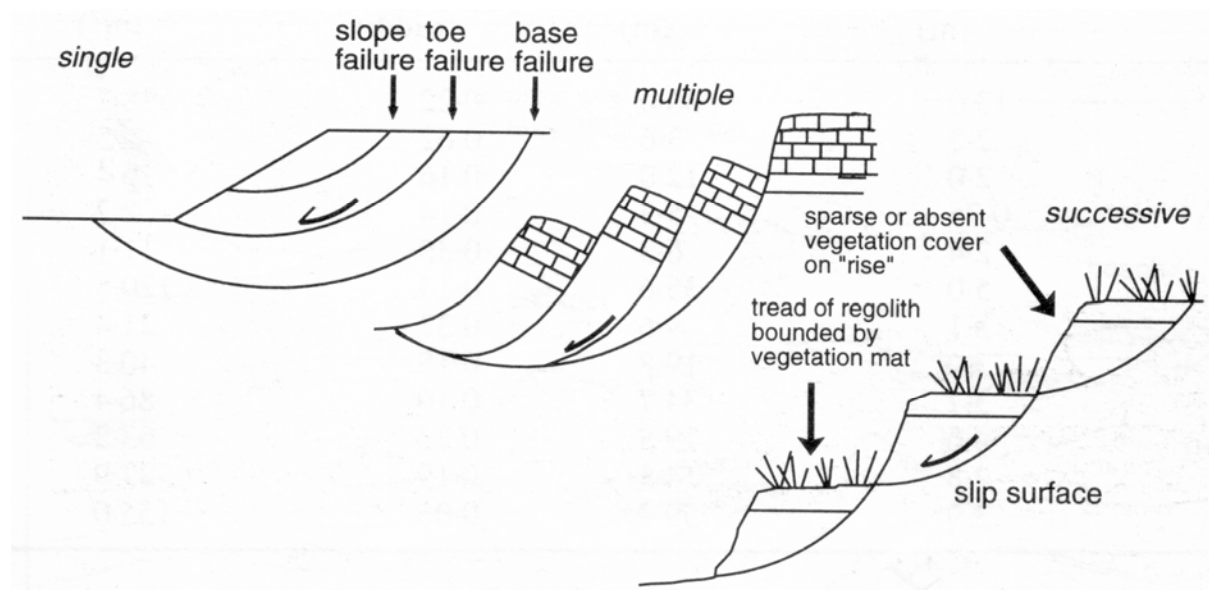


Abb. 2.1: Einfache (single), mehrfache (multiple) und aufeinander folgende (successive) Rotationsrutschung(en) (aus Buma und van Asch 1996)

Weitere Aspekte zur Beschreibung von gravitativen Massenbewegungen sind in Cruden und Varnes (1996) und Dikau et al. (1996) zu finden.

## 2.2 Hanginstabilität und deren Ursachen

Alle Hänge weisen Kräfte auf, die versuchen, eine hangabwärts gerichtete Bewegung zu initiieren (Scherkraft). Demgegenüber existieren Kräfte, die versuchen, dieser Bewegung zu widerstehen (Scherwiderstand) (Glade und Crozier 2005a). Aus dem Quotienten von Scherwiderstand und Scherkraft kann der sogenannte Sicherheitsfaktor (*factor of safety (FoS)*) berechnet werden, der theoretische Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit macht. Überwiegt der Scherwiderstand, ist der  $FoS > 1$  und theoretisch stabil, überwiegt die Scherkraft, so ist der  $FoS < 1$  und der Hang ist instabil. Aber: „*There is no such a thing as absolute stability, only an increasing probability of stability as the value of F[oS] becomes larger*” (Selby 1993, S. 268). Gewisse Bestätigung erfährt diese Aussage durch Petley et al. (2005b), die herausgefunden haben, dass der Hang vor dem totalen Versagen schon Bewegungen aufweist, wenn der FoS noch größer als 1 ist. Sie führen dies auf die Entwicklung von Mikrorissen zurück, die sich später zu einer Gleitfläche ausweiten.

Auf Grund der Unsicherheiten dieses Ansatzes, basieren Stabilitätsaussagen in der Praxis eher auf konservativen Schätzungen (Jäger 1997).

Um die Ursachen von gravitativen Massenbewegungen besser verstehen zu können, hat Crozier (1989) vorgeschlagen, von drei theoretischen Stabilitätsstadien (*stabil*, *marginal stabil* und *aktiv instabil*) auszugehen. Das Wirken von vorbereitenden Faktoren (z.B. Verwitterung) kann den Hang von einem stabilen in einen marginal instabilen Zustand überführen. In diesem Zustand ist es dann

möglich, dass durch das Einsetzen von auslösenden Faktoren (z.B. Niederschlag) die gravitative Massenbewegung initiiert wird. Wie sich diese Bewegung fortsetzt, wird durch die kontrollierenden Faktoren (z.B. Hangneigung) gesteuert. Ist der Hang in einem stabilen Zustand, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewegung eintritt, gering und die Sicherheitsspanne groß. In Richtung des aktiv instabilen Zustandes wird diese Sicherheitsspanne immer kleiner, bis sie letztendlich Null erreicht und das Versagen des Hanges äußerst wahrscheinlich ist. Dass aber auch in diesem Zustand ein Versagen nicht zwangsweise eintreten muss, zeigt ein Versuch an der Universität Karlsruhe: In einem Versuchskanal sollte ein Deich zum Versagen gebracht werden. Obwohl rein rechnerisch der Deich hätte versagen müssen, ist er stabil geblieben (Hauck 2006, Persönliche Mitteilung).

Das vorgestellte Konzept wird ausführlich in Glade und Crozier (2005a) diskutiert. Eine Auswahl von vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren ist in Tab. 2.5 dargestellt (nach Dikau und Glade 2002).

Tab. 2.5: Auswahl von vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren (nach Dikau und Glade 2002).

Ursache	Vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	kontrollierende Faktoren
Geologie	Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. Streichen/Fallen, tektonische Störungen) Verwitterung Isostasie	Erdbeben Vulkanausbrüche	Gesteinstypen Diskontinuität <sup>1</sup> (Schichtung, Schieferung, etc.) Strukturelle Diskontinuität <sup>1</sup> (z.B. Streichen, Fallen, tektonische Störungen)
Klima	Lang anhaltender Vorregen Schneesmelze Frost-Tau Zyklen	Niederschlag <sup>1</sup> (Intensität, Menge) Schnelle Schneesmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)
Boden	Verwitterung Geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen Subterrane Erosion (z.B. Tunelerosion)	Nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
Vegetation	Natürliche Vegetationsänderung <sup>1</sup> (z.B. Waldbrand, Trockenheit)	Nicht zutreffend	Vegetation
Hydrologie	Schmelzender Permafrost	Schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauhigkeit Weitertransport bewegter Massen
Topographie	Hangexposition <sup>1</sup> Hanghöhe <sup>1</sup>	Nicht zutreffend	Hangneigung <sup>1</sup> Hangwölbung <sup>1</sup> Tiefenlinien <sup>1</sup>
Anthropogen	Entwaldung Staudammbau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhanges Bewässerung Bergbau Künstliche Bewegung (z.B. Sprengung) Undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte <sup>1</sup> Hangunterschneidung <sup>1</sup> Auflast <sup>1</sup>	Künstliche Verbauungen Dämme Gerinnebegradigung, -verkleinerung, -vergrößerung

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

Weltweit werden die meisten gravitativen Massenbewegungen auf Grund von hydrologischen Ursachen (Niederschläge und Schneeschmelze) ausgelöst. Demnach befassen sich auch die meisten Arbeiten mit diesen Ursachen. Überblicksartikel zum Einfluss von Niederschlägen und Schneeschmelze auf gravitative Massenbewegungen bieten Wiczorek und Glade (2005) und Polemio und Petrucci (2000). Mit der Rolle von Erdbeben befassen sich z.B. Keefer (1984 und 2002), Becker und Davenport (2003), Meyenfeld (2004), Nicoletti (2005) und Trandafir und Sassa (2005), sowie mit der Tektonik z.B. Rybár (1971), Aringoli et al. (1996) und Roering et al. (2005).

Im Folgenden soll kurz der Einfluss der Vegetation diskutiert werden, da die Frage der Landnutzung oft eine zentrale Rolle im Zusammenhang mit gravitativen Massenbewegungen spielt. Generell überwiegt die Ansicht, dass sich insbesondere eine Waldvegetation positiv auf die Verhinderung der Auslösung gravitativer Massenbewegungen auswirkt (z.B. Böll und Graf 2001, Roering et al. 2003). Eine Übersicht über den aktuellen Forschungsstand bieten Rickli et al. (2002). In Greenway (1987) werden die potenziellen Wirkungen der Vegetation auf die Hangstabilität im Detail diskutiert.

Durch Landnutzungsänderungen (z.B. Rodung der Wälder zwecks Weide- oder Ackerflächengewinnung) besteht die Möglichkeit, in sensitiven Gebieten die Auftretenswahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen zu erhöhen (z.B. Glade 2003a). Doch zeigen einige Arbeiten, dass zum einen der stabilisierende Einfluss des Waldes abhängig ist von der Hangneigung (Rickli et al. 2002) und zum anderen, dass der Wald zwar das Auftreten kleinerer und vor allem flachgründiger gravitativer Massenbewegungen reduzieren kann, aber gleichzeitig die Magnitude der auftretenden gravitativen Massenbewegungen unter Wald größer wird. Insgesamt kann so, insbesondere über einen längeren Zeitraum hinweg, die von gravitative Massenbewegungen betroffene Fläche sowie das Volumen des verlagerten Materials unter Wald genauso groß oder gar größer sein als bei anderen Landnutzungsformen (z.B. Moser 1980, Moser und Schoger 1989, Crozier 1989, Rickli et al. 2002).

### ***2.3 Systemtheoretische Aspekte von gravitativen Massenbewegungen***

Gravitative Massenbewegungen sind das Resultat komplexer Wechselbeziehungen innerhalb der natürlichen Umwelt. Sie stehen aber auch in zusätzlicher Wechselwirkung mit dem Eingriff des Menschen, wodurch der Grad der Komplexität erhöht wird. Um sich der komplexen Realität zu nähern, übertrugen Chorley und Kennedy (1971) die allgemeine Systemtheorie auf die Physische Geographie. Auf Basis der Systemtheorie ist es möglich, einerseits Form, Material, Prozess und deren jeweiligen Wechselwirkungen, andererseits variable Raum- und Zeitskalen der Systementwicklung, sowie externe Einflüsse und nichtlineare Systemreaktionen zu analysieren (Dikau 2005). Nach Chorley und Kennedy (1971) und Slaymaker (1991) können folgende fünf Systemtypen unterschieden

werden: Formsystem oder statisches System (*morphological system*), geomorphogenetisches System (*morphologic evolutionary system*), Prozess- oder Kaskadensystem (*cascading system*), Prozess-Reaktions- oder Form-Prozesssystem (*process-response system*) und geomorphologisches Kontrollsystem (*control systems*) (Übersetzung nach Dikau 2005, siehe auch Tab. 2.6).

Geomorphogenetische Systeme sind nach Glade (1997) geeignet, um die Wechselwirkungen von rutschungsanfälligen Regionen und potenziell rutschungsauslösenden Niederschlägen und ihre Veränderungen in der Zeit zu untersuchen. Will man jedoch die Wechselwirkungen von periglazialen Deckschichten und gravitativen Massenbewegungen analysieren, wie sie in der Schwäbischen Alb zu beobachten sind, sollte der Fokus auf dem Kaskadensystem liegen, auch wenn dabei die Problematik besteht, dass sich die einzelnen Komponenten der Kaskaden räumlich überlagern können. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, sind in Abb. 2.2 die wichtigsten Teilsysteme vereinfacht dargestellt. In der Realität beeinflussen sich alle holozänen Prozesse gegenseitig, so dass im Gelände eine große Anzahl gemischter Speicher vorzufinden ist. Auch in der vereinfachten Darstellung erkennt man, dass eine Unterscheidung der pleistozänen bzw. holozänen Entstehung insbesondere des Schollenreliefs mit seinen teils gut erhaltenen und teils mosaikartigen Deckschichten schwierig ist.

Um die Einflussfaktoren zu untersuchen, die die gravitative Massenbewegung steuern, bietet sich besonders das Prozess-Reaktionssystem an; wenn klar ist, dass der Mensch in das System eingegriffen hat, das geomorphologische Kontrollsystem.

Weitere Beispiele und geeignete Untersuchungsmethoden sind in Tab. 2.6 dargestellt.

Tab. 2.6: Klassifikation von geomorphologischen Systemtypen mit Beispielen und potenziellen Untersuchungsmethoden (nach Chorley und Kennedy 1971, Slaymaker 1991 und Dikau 2005).

Systemtyp	Beispiele	Auswahl von Methoden
Formsystem (statisches System)	toposequentielles Hangsystem, hydrologisches Einzugsgebiet Hochgebirge	2-dimensionale Geomorphometrie, Reliefklassifikation, statistische Korrelation statischer Variablen
Geomorpho- genetisches System	Mesoskaliges, glazigenes (pleistozänes) Talsystem mit mikroskaliger, gravitativer (holozäner) Überprägung	Multiskalige Reliefformenanalyse ("Reliefgeneration"), stratigraphische und chronometrische Modelle, abduktiver Schluss von Form und Material auf den Prozess
Prozesssystem (Kaskadensystem)	Hangsystem (Kopplung Felswand- Sturzhalde), fluviales System mit Kopplung der Hänge (Quellen) mit kolluvialen, alluvialen und marinen Speichern (Senken)	Prozessmodelle, 3-dimensionale Volumenmodelle, Sedimentkaskadenmodelle, Sedimenthaushaltsmodelle, Ableitung von Sedimentflüssen aus Proxydaten der Geoarchive
Prozess- Reaktionssystem (Form- Prozesssystem)	Hangsystem (freie Felswand und Schuttkegel) mit negativer Rückkopplung zwischen Form und Prozess	Prozessmodellierung mit zeitlicher Formenvarianz
Geomorphologisches Kontrollsystem	Bodenschutz zur Verminderung von Bodenerosion, Gerinneverbau zur Verhinderung von Ufererosion	Prozessmodellierung, ingenieur-technische Maßnahmen für die Risikoverminderung, heuristische Gefahrbewertung

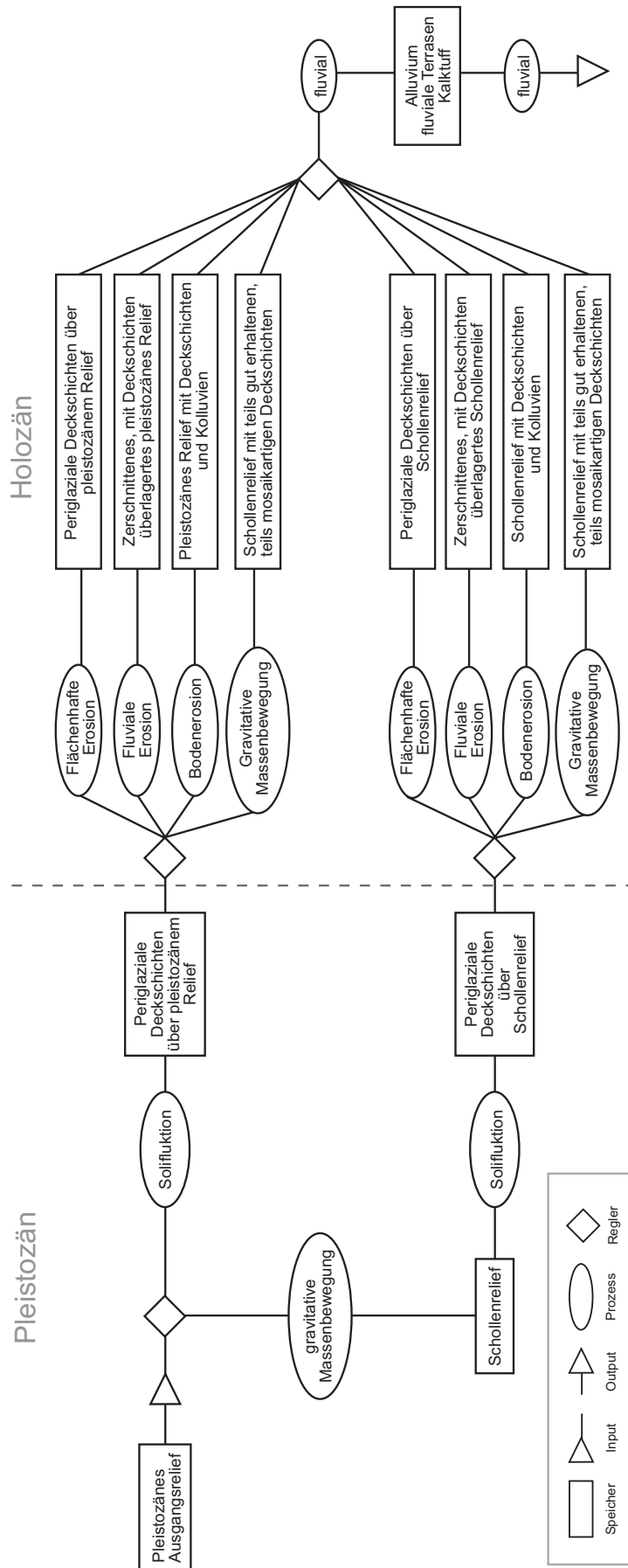


Abb. 2.2: Kaskadensystem zur pleistozänen und holozänen Entwicklung der Hänge in der Schwäbischen Alb (basierend auf Chorley und Kennedy 1971)

Trotz der Fähigkeit des systemtheoretischen Ansatzes, zumindest Teilaspekte nichtlinearen Systemverhaltens (z.B. Speichereffekte, Rückkopplungen und Schwellenwerte) abzubilden, basiert die Theorie auf den Konzepten des thermodynamischen Gleichgewichts. Diese besagen, dass „in einem System nach einer Veränderung der Randbedingungen oder einer systemexternen Störung durch die stabile Gleichgewichtsdynamik ein neues stationäres Gleichgewicht durch die Wirkung negativer Rückkopplungen erreicht wird“ (Dikau 2006a, S. 132). Die einzelnen Phasen nach dem Eintritt einer Störung sind in Abb. 2.3 am Beispiel der Höhe der Talaue dargestellt.

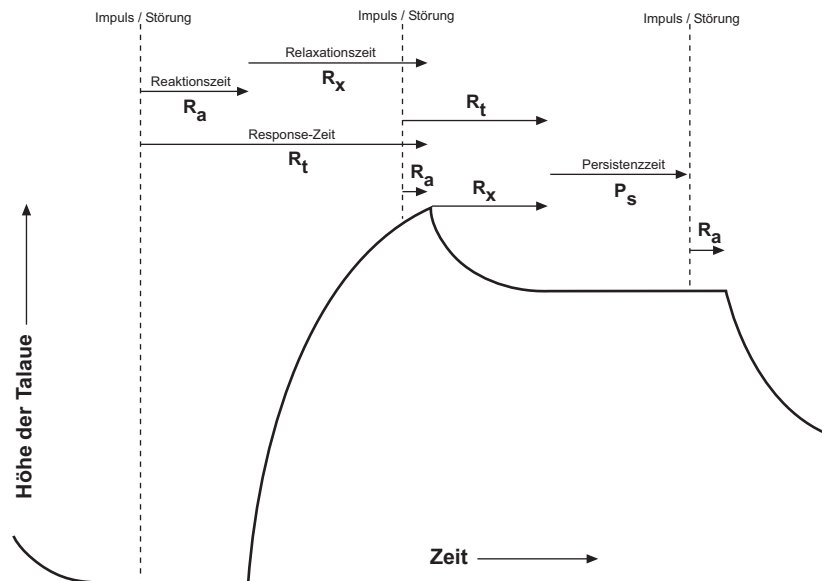


Abb. 2.3 Auswirkungen einer externen Störung auf ein geomorphologisches System (nach Dikau 2006a, basierend auf Bull 1991)

Für die Untersuchung von gravitativen Massenbewegungen ist die Reaktionszeit (*reaction time*) von sehr großer Bedeutung, d.h. wie lange ein Hang unter welchen Bedingungen braucht, um auf eine Störung (z.B. Niederschlag, Schneeschmelze, Erdbeben oder eine Kombination dieser Faktoren) zu reagieren. Die Relaxationszeit (*relaxation time*) gibt Auskunft darüber, wie schnell der einsetzende Prozess abläuft: Kommt es eher zu einer langsamen Gleitbewegung bis die Energien aufgebraucht sind oder zu einem plötzlichen Versagen des Hanges. Die Reaktionszeit und die Relaxationszeit werden zusammen auch als Response-Zeit (*response time*) bezeichnet. Innerhalb der Persistenzzeit (*persistence time*) ist der Hang stabil und es treten keine Bewegungen auf.

In der Geomorphologie dominierte lange Zeit die Frage nach linearen Ursache-Wirkungszusammenhängen. In den letzten Jahren nehmen aber Arbeiten zur Untersuchung von Nichtlinearitäten und Komplexität in geomorphologischen Systemen zu. Die Entwicklung der neuen Forschungsrichtung wird zusammenfassend in Dikau (2006a) diskutiert. Erste nichtlineare Ansätze gehen nach Dikau (2006a) auf Schumm (1979) zurück, der sich explizit mit dem Wirken von externen und internen Schwellenwerten bei fluvialen Systemen beschäftigt hat. Übertragen auf gravitative

Massenbewegungen können bestimmte Niederschlagsmengen externe Schwellenwerte darstellen, eine durch Verwitterung reduzierte Hangstabilität einen internen Schwellenwert. So kann es vorkommen, dass ein Hang z.B. bei einem großen Niederschlag nicht reagiert, aber Jahre später bei einem kleineren, da in der Zwischenzeit der interne Schwellenwert auf Grund von Verwitterung herabgesetzt wurde (siehe Abb. 2.4).

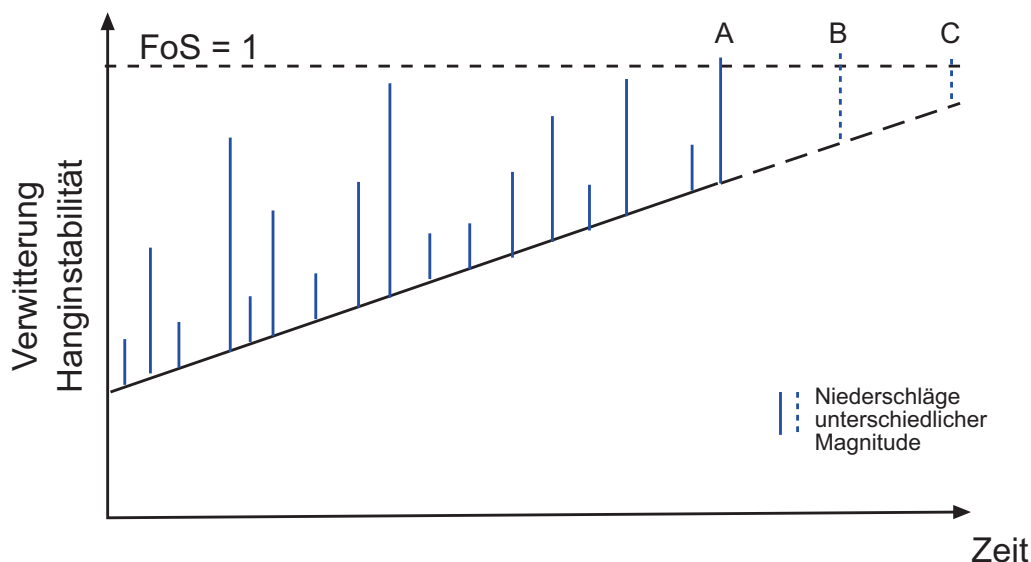


Abb. 2.4: Externe und interne Schwellenwert und ihre Auswirkung auf die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen (verändert nach Schumm 1979)

Phillips (2003) schlägt einen umfassenden Ansatz der „Complex Nonlinear Dynamic (CND)“ vor und weist in diesem Zusammenhang folgende phänomenologische Ursachen für nichtlineares, komplexes Systemverhalten aus (Übersetzung nach Dikau 2006a):

- Schwellenwerte (threshold)
- Masse- und Energiespeicher (storage effects)
- Sättigung und Entleerung (saturation and depletion)
- Selbstverstärkung durch positive Rückkopplung (self-reinforcing positive feedback)
- Abschwächung durch negative Rückkopplung (self-limitation)
- Konkurrierende Wechselwirkungen (competitive relationships)
- Multiple Formen der Anpassung (multiple modes of adjustment)
- Selbstorganisation (self-organisation)
- Hysterese (hysteresis)

Im Folgenden soll kurz auf den Aspekt der Selbstorganisation eingegangen werden. Bak et al. (1988) untersuchten modellhaft das Verhalten von Sandpyramiden um herauszufinden, was passiert, wenn man konstant immer ein neues Sandkorn auf die Pyramide rieseln lässt. Sie stellten fest, dass das

System sich zu einem bestimmten Zeitpunkt selbst in einen kritischen Zustand (selbstorganisierte Kritizität, self-organised criticality (SOC)) bringt, bei dem nicht vorhergesagt werden kann, ob beim nächsten Sandkorn eine kleine, mittlere oder große Rutschung eintreten wird. Sie fanden eine Potenzgesetzverteilung für die Frequenz-Magnituden-Beziehung der eingetretenen Rutschungen. Sollten gravitative Massenbewegungen tatsächlich selbstorganisierte Systeme sein, so hätte das enorme negative Auswirkungen auf die Vorhersagbarkeit von solchen Ereignissen (siehe auch Kapitel 2.6 und 2.9).

Ein weiterer Hinweis darauf, dass sich Aspekte des SOC bei gravitativen Massenbewegungen finden lassen, ist bei Petley et al. (2005b) enthalten. In ihrem Konzept zum „Progressiven Versagen von Hängen“ machen sie die Aussage, dass ab einem gewissen Moment der Porenwasserdruck im Boden keine Rolle mehr spielt. Vielmehr entwickelt der Hang eine Eigendynamik, bei der sich zuvor gebildete Mikrorisse zu einer Scherfläche zusammenfügen und die Bewegung auslösen.

Ähnliches könnte auch bei der Vaiont Rutschung 1963 in Italien eine Rolle gespielt haben. Die Diskussionen über die Ursachen halten nach wie vor an (siehe z.B. Semenza und Ghirotti 2000 und Petley und Petley 2006). Nachdem festgestellt wurde, dass sich beim Aufstauen des Sees der Hang in Bewegung setzte, wollte man die Rutschmasse kontrolliert in den See abgleiten lassen. Anfänglich ließ sich die Rutschmasse über das Anheben und Absenken des Seespiegels beschleunigen bzw. verlangsamen. Doch irgendwann schlugen diese Versuche fehl und die Masse glitt ab und rutschte in den See. Die resultierende Flutwelle forderte ca. 2500 Tote. Eine Hypothese ist nun, dass sich der Hang von selbst in einen kritischen Zustand brachte, in dem er nicht mehr zu kontrollieren war und das Abrutschen über ein Senken des Seespiegels nicht mehr zu verhindern war.

Unter Umständen wäre das Verhalten des Hanges auch über Aspekte des deterministischen Chaos zu erklären, bei dem kleine Veränderungen in den Ausgangsbedingungen zu komplett anderen Resultaten führen können (z.B. Phillips 2003 und 2006). Diese Beispiele zeigen, dass die nichtlineare Dynamik eine große Bedeutung innerhalb der Erforschung gravitativer Massenbewegungen in Zukunft spielen sollte. Die CND bietet die Möglichkeit, „*bisher lediglich kausal mit externen Faktoren korrelierte und inkonsistente Feldbefunde besser verstehen zu können*“ (Dearing 2004 in Dikau 2005, S. 100).

Die geomorphologische Systemanalyse wird des Weiteren erschwert, da sich das Georelief aus verschachtelten, hierarchisch organisierten Formen aufbaut, die Ausdruck unterschiedlich alter Formungsprozesse sind (Dikau 2005). Die räumlichen Verschachtelungen werden von Büdel (1981) als Reliefgenerationen, von Chorley et al. (1984) als Palimpsest bezeichnet. In diesem Zusammenhang spielt die Persistenzdauer verschiedener Formen, die v.a. von der Größe der Form abhängt, eine entscheidende Rolle (z.B. Brunsdon 1993 und Dikau 2006b). Je größer z.B. eine gravitative Massenbewegung, desto länger bleibt sie im Georelief erhalten, kleinere werden hingegen relativ schnell wieder erodiert, so dass sie nicht mehr erkennbar sind (siehe auch Kapitel 2.8). Für die Gefahrenanalyse, aber auch für Fragen des Sedimenthaushalts und der Landschaftsentwicklung ist die



Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse und vor allem ihre zeitliche Einordnung von großer Bedeutung.

Abschließend soll auf eine systemtheoretische Betrachtung anderer Art eingegangen werden: Das Konzept der „Hierarchy of landslide activity and landform response“ nach Crozier (1989). Es hilft, Veränderungen in der Zeit und deren Auswirkungen besser zu verstehen. Diesem Ansatz zur Folge gibt es gewisse Zyklen (*cycles*), Epizyklen (*epicycles*), Phasen (*phases*) und Ereignisse (*events*), die auf unterschiedlichen Zeitskalen operieren (siehe Abb. 2.5).

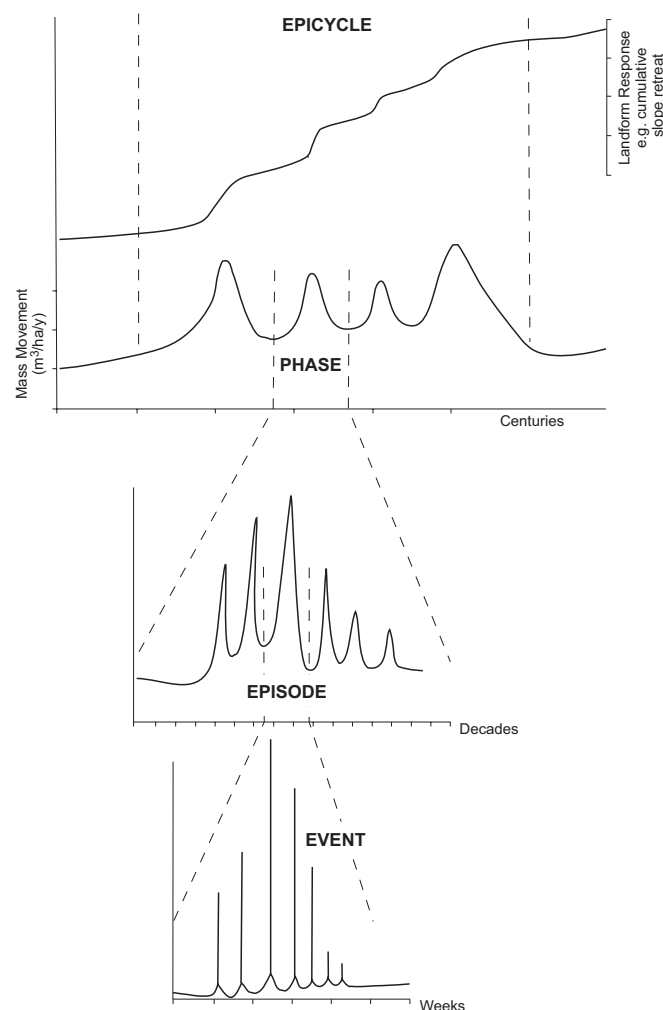


Abb. 2.5: Konzept der „Hierarchy of landslide activity and landform response“ (nach Crozier 1989)

Ein Zyklus kann Millionen von Jahren dauern und wird beispielsweise von einer Orogenese verursacht. Der Zyklus besteht aus mehreren Epizyklen, innerhalb derer das geomorphologische System der Hangrückverlagerung infolge zahlreicher gravitativer Massenbewegungen reagiert. Diese Ereignisse können auf mehrere Phasen verteilt auftreten. Während die Epizyklen Jahrhunderte bis Jahrtausende andauern können und insbesondere durch Klimaveränderungen oder großflächige Vegetationsänderungen hervorgerufen werden, bestehen die Phasen nur über Dekaden bis

Jahrhunderte und können u.U. auf Variationen in der Intensität der Klimaveränderung oder auf Entwaldung zurückgeführt werden. Episoden liegen im Bereich von Jahren bis Dekaden und können durch regionale Klimaschwankungen (z.B. erhöhte Starkniederschlagsfrequenz) oder durch Erdbebenschwärme ausgelöst werden. Ereignisse hingegen dauern Wochen bis Tage und werden durch saisonale Niederschlagsschwankungen, Witterungsänderungen oder Erdbeben hervorgerufen (Crozier 1989 und Glade 1997). Die Gefahr einer solchen Betrachtung besteht darin, dass sie suggerieren könnte, dass Ereignisse ausschließlich an Episoden, Phasen oder Epizyklen gebunden sind. Der lokale Charakter von gravitativen Massenbewegungen in Kombination mit lokalen Starkniederschlagsereignissen (z.B. bei Gewitterzellen) und kurzen Reaktionszeiten können jedoch auch zu Ereignissen in ansonsten „ruhigen“ Zeiten führen. Ebenso können sehr lange Reaktionszeiten (z.B. Bergsturz als Folge des Rückschmelzens der Gletscher) Ereignisse in weniger aktiven Episoden und Phasen hervorrufen.

## **2.4 Untergrunderkundung bei gravitativen Massenbewegungen**

Um die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen auf lokaler Skala verlässlich einschätzen zu können, werden u.a. Informationen über das Ausmaß, die Struktur, die Lage der Gleitfläche und den Bodenwasserhaushalt benötigt.

Traditionell kommen dafür v.a. Rammsondierungen, Rammkernsondierungen, Bohrungen, Inklinometer- und Piezometermessungen in Betracht. Diese Methoden sind z.B. in Turner und Schuster (1996), Smolczyk (2001), und Ortigao und Sayao (2004) ausführlich beschrieben. In diesem Kapitel soll kurz der Nutzen von geophysikalischen Untersuchungen zur Untergrunderkundung gravitativer Massenbewegungen dargelegt werden.

Während die traditionellen Methoden relativ kostenintensiv und sehr aufwändig sind und darüber hinaus lediglich Punktinformationen liefern, bieten geophysikalische Methoden den Vorteil, relativ schnell und günstig 2D- oder gar 3D-Informationen über den Untergrund zu liefern (Bell et al. 2006b). Eine Übersicht über den Einsatzbereich geophysikalischer Methoden im Umweltbereich und für geotechnische Fragen wird in Pellerin (2002) gegeben, der Nutzen für die Geomorphologie in Schrott et al. (2003) dargestellt.

Im Bereich von gravitativen Massenbewegungen werden geophysikalische Untersuchungen schon seit mehr als 40 Jahren erfolgreich eingesetzt. Bereits Takada (1968, S. 57) forderte: „[...] whenever any landslide study is to be pursued, the electrical resistivity survey should by all means be conducted prior to all other kinds of surveys or researches, excepting topographical and geological surveys.“ Dennoch kann erst in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme der Verwendung geophysikalischer Methoden zur Untersuchung gravitativer Massenbewegungen festgestellt werden.

Die Bandbreite der eingesetzten geophysikalischen Methoden umschließt seismische (z.B. Denness et al. 1975, Bogoslovsky und Ogilvy 1977, Palmer und Weisgarber 1988, Havenith et al. 2000, Brückl

2001, Hecht 2003, Bichler et al. 2004, Glade et al. 2005b), elektrische (z.B. Denness et al. 1975, Bogoslovsky und Ogilvy 1977, Palmer und Weisgarber 1988, Havenith et al. 2000, Schmutz et al. 2000, Suzuki und Higashi 2001, Bichler et al. 2004, Donnelly et al. 2005, Lapenna et al. 2005, Sass et al. im Druck, Bell et al. 2006b), elektromagnetische (z.B. Bichler et al. 2004, Roch et al. 2005, Kruse 2006, Seijmonsbergen und de Graaff 2006, Sass et al. im Druck) und magnetische Methoden (Del Gaudio et al. 2000).

Überblicksarbeiten zum Einsatz von Geophysik in Studien zu gravitativen Massenbewegungen bieten Hutchinson (1983), McCann und Forster (1990), McGuffey et al. (1996), Hack (2000), und Bouillon (2005).

Da die jeweiligen Methoden unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich der Untersuchung des Untergrunds aufweisen, ist die Kombination mehrerer Methoden ratsam, um so die Aussagen gegenseitig zu validieren bzw. neue Erkenntnisse zu erzielen. Dies wird auch durch folgende Aussage bestätigt: „[...] *different methods may confirm even a vague feature that may be missed if only one method is applied*“ (Hack 2000, S. 445ff). Der Einsatz mehrerer Methoden wurde u.a. von den folgenden Autoren umgesetzt: Bruno und Martillier (2000), Bichler et al. (2004), Cutlac und Maillol (2004), Kruse (2006) und Sass et al. (im Druck). Doch trotz aller Fortschritte im Bereich der Anwendung geophysikalischer Methoden ist es nach wie vor sehr wichtig, die geophysikalischen Ergebnisse durch Bohrdaten, sowie geologische und geomorphologische Informationen zu ergänzen bzw. zu validieren (Sass et al. im Druck).

Eine Besonderheit von einigen geophysikalischen Methoden (z.B. Geoelektrik, Eigenpotenzial und Georadar) ist, dass die Ergebnisse vom Bodenwasserhaushalt abhängig sind. Auch wenn dies, auf Grund von großen Überlappungsbereichen charakteristischer Messwerte, Probleme bei der Interpretation bereiten kann, ist dies ein großer Vorteil für die Untersuchung gravitativer Massenbewegungen, da diese oft durch erhöhte Bodenwassergehalte ausgelöst werden. Schon in den 1970er Jahren wurden geophysikalische Methoden in der Erkundung der Veränderungen von Bodenwassergehalten in Rutschgebieten eingesetzt (z.B. Denness et al. (1975) und Bogoslovsky und Ogilvy (1977)), doch führte dies nicht zu einer weit verbreiteten Anwendung. In den letzten Jahren nimmt die Anzahl der Arbeiten aber zu (z.B. mittels Geoelektrik (z.B. Yokota et al. 1998, Suzuki und Higashi 2001, Pellerin 2002, Sass 2004 und Lapenna et al. 2005), Selbstpotenzial (z.B. Lapenna et al. 2005 und Rozycki et al. 2006) und Georadar (z.B. Hubbard et al. 1997, Pellerin 2002, Grote et al. 2005 und Hanafy und al Hagrey 2006).

In Tab. 2.7 sind die Einsatzbereiche der verschiedenen Methoden hinsichtlich der Untersuchung von gravitativen Massenbewegungen dargestellt.

Tab. 2.7: Einsatzbereiche verschiedener geophysikalischer Methoden hinsichtlich gravitativer Massenbewegungen und damit verbundener Aspekte (nach Bell et al. 2006b, Bouillon 2005 und Hack 2000).

Methods	Rock slides	Soil slides	Quick clay landslides	Rock falls	Property determination for geotechnical purposes	e.g. artefacts, pipes, foundations	Ground water/soil moisture	
Seismic methods	Refraction/Reflection	+	+	+	?	+	-(+)	+/-
	Tomography	+	+	-	-	+	(+)	-
	Passive seismic	+	+	-	+	-		-
	Surface waves	?	?	+	-	+		-
Electro-magnetic methods (EM)	Low frequency	+	+	-	-	-	+	+
	Ground-penetrating radar (GPR)	+	(depends on clay content)	-	+	-	+	+
Resistivity measurements	+	+	+	?	-	(+)	+	
Self-potential (SP)	+	+	-	-	-	-	+	
Induced polarisation (IP)	-	-	+	-	-	-	+	
Gravity	?	?	-	+	+	-	-	
Magnetism	?	?	-	-	-	-	-	

+ = suitable, (+) = partially suitable, - = not suitable, ? = depends on the site or needs further analysis

## 2.5 Bewegungsmonitoring von gravitativen Massenbewegungen

Nach Krauter (2001) kann man davon ausgehen, dass jeder Hang hangabwärtsgerichtete Bewegungen in der Größenordnung von Zehntel- bis Millimeter pro Jahr ausführt. *„Die Frage der Hangstabilität hängt also vom Zeitfaktor ab und davon, welche Bewegungsbeträge akzeptiert werden. Die Fragestellung müsste daher lauten „Wie schnell bewegt sich ein Hang?“ und nicht „Wie hoch ist seine Standsicherheit?““* (Krauter 2001, S. 622). Darüber hinaus ist v.a. die Frage *„Bis in welche Tiefe bewegt sich der Hang?“* von großer Bedeutung. Die Bewegungen eines Hanges können mittels verschiedener Monitoringsysteme untersucht werden.

Zur Erfassung von Bewegungen an der Oberfläche können sowohl manuelle als auch vollautomatische Tachymeter- oder GPS-Systeme eingesetzt werden (z.B. Malet et al. 2002, Demoulin und Glade 2004, Chadwick et al. 2005, Corsini et al. 2005 und Schauerte et al. 2006). Auch wenn die Genauigkeit differentieller GPS-Systeme (DGPS) immer weiter zugenommen hat, so reichen sie noch nicht an die Genauigkeit tachymetrischer Systeme heran. Die Wahl der einzusetzenden Methode hängt sehr stark von den Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet und v.a. von der (erwarteten) Geschwindigkeit der zu untersuchenden gravitativen Massenbewegung ab.

Durch photogrammetrische Auswertung von multitemporalen Luftbildern können digitale Geländemodelle unterschiedlicher Zeitscheiben erstellt werden, die insbesondere bei langsameren

Prozessen Informationen über die Bewegungsabläufe liefern. Der Vorteil ist, dass man je nach Verfügbarkeit der Luftbilder die Veränderungen der letzten Jahrzehnte untersuchen kann (z.B. Chadwick et al. 2005 und Dewitte und Demoulin 2005).

Zu diesen Ansätzen ist in den letzten Jahren die SAR-Interferometrie (SAR = Synthetic Aperture Radar) hinzugekommen, mittels derer entweder terrestrisch (z.B. Canuti et al. 2002 und Casagli et al. 2006) oder per Satellit (z.B. Catani et al. 2005b, Froese et al. 2005 und Singhroy et al. 2005) Bewegungen an der Oberfläche gemessen werden können. Für den erfolgreichen Einsatz dieser Methode müssen die Objekte bzw. deren Reflektionseigenschaften im Untersuchungsgebiet über den Messzeitraum kohärent sein (Singhroy et al. 2005), so dass z.B. Veränderungen durch Pflanzenwachstum oder durch Wind verursachte Bewegungen der Vegetation ausgeschlossen werden können (v.a. bei terrestrischen Systemen von Bedeutung, siehe Canuti et al. 2002). Somit eignet sich die Methode nicht für den Einsatz in vegetationsbedeckten Gebieten. In solchen Fällen und in Fällen in denen eine größtmögliche Sicherheit der Ergebnisse erforderlich ist, hilft nur die zusätzliche Installation von größeren Reflektoren, um einzelne Objekte genau überwachen zu können (wie bei der Aknes Felsrutschung in Norwegen (Blikra et al. 2006)). Der Vorteil der satellitengestützten Interferometrie liegt darin, dass größere Gebiete gleichzeitig überwacht werden können und auch eine Analyse vergangener Zustände möglich ist, wenn entsprechende Satellitenbildszenen verfügbar sind.

Eine relativ neue Methode stellt der Einsatz von luftgestützten oder terrestrischen Laserscansystemen dar (LIDAR, Light Detection and Ranging). Mittels Wiederholungsmessungen können gravitative Massenbewegungen analysiert, quantifiziert und überwacht werden (z.B. Bitelli et al. 2004, Slob und Hack 2004 und Rosser et al. 2005).

Darüber hinaus werden seismische Überwachungsmethoden eingesetzt, bei denen Geophone die Erschütterungen aufzeichnen, die durch entsprechende Bewegungen verursacht werden. Diese Methode wird u.a. bei Felsrutschungen (z.B. Roth et al. 2005), aber v.a. bei Murgängen eingesetzt (z.B. Arattano 2003). Teilweise kommen auch Videokameras zur Überwachung zum Einsatz (z.B. Angeli et al. 2000 und Chang 2003).

Das Monitoring von Oberflächenbewegungen liefert aber keine Informationen über die Tiefe der Gleitfläche bzw. der Mächtigkeit der bewegten Masse. Daher sollten diese Systeme durch das Monitoring der Bewegungen im Untergrund ergänzt werden. Hier bieten sich beispielsweise Inklinometer, Extensiometer und Tiltmeter an.

Bohrlochinklinometersysteme bestehen aus speziellen Inklinometermesssonden und einem im Bohrloch installierten Rillenrohr, das immer die potenzielle Gleitfläche durchteufen sollte. Durch Wiederholungsmessungen sind über die Neigungsänderungen des Rohres die Lage der Gleitfläche zu bestimmen, sowie entsprechende Bewegungsraten. Neben einer mobilen Inklinometersonde zur periodischen manuellen Messung (z.B. Angeli et al. 2000, Barton und McCosker 2000, Corsini et al. 2005 und Schauerte et al. 2006), stehen auch permanent zu installierende Ketteninklinometer sowie

automatische Inklinometeranlagen (z.B. Lollino et al. 2002) zur Verfügung. Bei Ketteninklinometern werden mehrere Inklinometermessonden in unterschiedlichen Tiefen fest installiert und können dann kontinuierlich Messdaten liefern (Mikkelsen 1996). Bei der automatischen Inklinometeranlage wird eine Inklinometermessonde in regelmäßigen Abständen automatisch im Bohrloch herunter- und hochgefahren. Da die Sonde aber hin und wieder hängen bleiben kann und durch das Hoch- und Herunterfahren die Ungenauigkeiten zunehmen können, werden für eine kontinuierliche Messdatenerfassung die Ketteninklinometer empfohlen (Glötzl 2006, Persönliche Mitteilung).

Ist die Bewegungsrate zu groß und die Scherfläche relativ dünn, scheren die Inklinometer sehr schnell ab (nach max. 2 bis 5cm Versatz) und müssen z.B. durch Extensiometer (u.a. Corsini et al. 2005) ersetzt werden (Mikkelsen 1996).

Bei den Tiltmetern können Plattformtiltmeter und Bohrlochtiltmeter unterschieden werden (z.B. Garcia Azuero 2005). Nur letztere können Informationen über Bewegungen im Untergrund liefern. Da die Tiltmeter aber einen eingeschränkten Messbereich aufweisen, müssen sie von Zeit zu Zeit nachjustiert werden, so dass die maximale Einbautiefe meist auf ca. 3m begrenzt ist. Eine Verbesserung stellen die sich selbst automatisch justierenden Tiltmeter dar. Auf Grund der höheren Genauigkeit können sie insbesondere bei sehr langsamen Bewegungen eine sinnvolle Ergänzung zu Inklinometern darstellen.

Eine ganz neue Methode, die bezüglich des Bewegungsmonitoring von gravitativen Massenbewegungen noch in der Entwicklung steckt, sind TDR Kabel, die in einem Bohrloch installiert werden und entsprechend Bewegungen im Untergrund erfassen können (z.B. Pasuto et al. 2000 und Corsini et al. 2005).

Chadwick et al. (2005) empfehlen die Kombination mehrerer Methoden, da so die Dynamik von gravitativen Massenbewegung viel tiefgreifender untersucht werden kann, als bei der separaten Anwendung jeder einzelnen Methode.

Einen Überblick über verschiedene Systeme zum Bewegungsmonitoring bieten z.B. Mikkelsen (1996), Linkwitz und Schwarz (2001) und Thut (2001). Eine Abschätzung der Genauigkeit der jeweiligen Systeme ist in Malet et al. (2002) enthalten.

Die Systeme zum Bewegungsmonitoring an der Oberfläche oder im Untergrund werden im allgemeinen mit Monitoringsystemen kombiniert, die Informationen zur Bodenfeuchte (z.B. TDR-Sonden), Porenwasserdruck (Piezometer) und klimatischen Parametern erfassen. Mit dieser Kombination wird versucht, weitere Erkenntnisse über die Ursache-Wirkungsbeziehungen bei gravitativen Massenbewegungen zu gewinnen.

## 2.6 Vorhersagemöglichkeiten von gravitativen Massenbewegungen

Die Ansätze zur Vorhersage von gravitativen Massenbewegungen können in zwei Gruppen unterschieden werden. Zum einen gibt es Ansätze die versuchen, dass totale Versagen eines Einzelhanges vorherzusagen und zum anderen wird versucht, das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen innerhalb einer Region vorherzusagen ohne konkrete Aussage, welcher Hang betroffen sein wird.

Nach Hungr et al. (2005) können in der ersten Gruppe folgende Ansätze unterschieden werden: a) ein Expertenansatz, der auf dem Erfahrungswissen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit verschiedener Typen von gravitativen Massenbewegungen beruht, b) ein empirischer Ansatz, der auf den beobachteten Bewegungsraten basiert und c) ein numerischer Ansatz. Eine ausführliche Diskussion der einzelnen Ansätze ist in Hungr et al. (2005) dargestellt. Im Folgenden soll der empirische Ansatz vorgestellt werden.

Der empirische Ansatz basiert rein auf der Analyse der Bewegungsraten, die oft mittels eines aufwendigen Monitoringnetzwerkes auf dem betroffenen Hang erhoben werden. Die Schwierigkeit der Vorhersage besteht darin abzuschätzen, wann (oft nach mehrfachem Wechsel von beschleunigenden und verlangsamenden Phasen) der Hang endgültig versagt und es zu einer „katastrophalen“ Bewegung kommt. Die Problematik kommt auch in folgendem Zitat von Hungr et al. (2005, S. 103) zum Ausdruck: *„The complexity of the measured displacement pattern, and thus the subjectivity and ambiguity involved in its subsequent interpretation, makes defining critical thresholds extremely difficult with respect to forward prediction“*. So liefern sie auch einige Beispiele, bei denen eine Vorhersage nicht funktioniert hat und sagen zugleich, dass die Beispiele erfolgreicher Vorhersagen sehr gering sind.

Einen durchaus viel versprechenden Ansatz stellt die Analyse der inversen Geschwindigkeit über die Zeit dar, der auf Saito (1965) zurückgeht und von Voight (1989) und Fukuzono (1990) weiterentwickelt wurde. Sie kommen zu dem Schluss, dass bei einer linearen Zunahme der Beschleunigung der Schnittpunkt mit der Abszisse den Zeitpunkt des katastrophalen Versagens darstellt. In neuerer Zeit erlangt dieser Ansatz wieder eine größere Beachtung (z.B. Crosta und Agliardi 2003, Kilburn und Petley 2003 und Petley et al. 2005c). In einer rückwärtsgerichteten Analyse der Felsrutschung von Vaiont (1963) konnten Kilburn und Petley (2003) und Petley und Petley (2006) feststellen, dass mittels solcher Analysen der Zeitpunkt des Eintretens des Ereignisses 30-60 Tage im Voraus vorherzusagen gewesen wäre. Hungr et al. (2005) zitieren Arbeiten, in denen dieser Ansatz genutzt wurde, um kritische Schwellenwerte der Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung für einzelne Hänge vorzuschlagen. In weiteren Untersuchungen vergangener Ereignisse kommen Petley et al. (2002) zu dem Schluss, dass der lineare Trend nur bei erstmaligen Rutschungen oder bei einem spröden Bruch auftritt. Bei Reaktivierungen oder duktilem Versagen kommt es zu einem asymptotischen Trend. Diese Aussagen werden mittlerweile auch durch Labortests bestätigt (Petley et

al. 2005b). Weitere Untersuchungen insbesondere zum Potenzial dieses Ansatzes für die Prognose und nicht nur für die rückwärtige Analyse scheinen erstrebenswert. Dennoch könnte die Auswertung weiterer vergangener Ereignisse mit dieser Methode neue Erkenntnisse zur Anwendbarkeit dieses Ansatzes liefern.

Die zweite Gruppe der Ansätze zur Vorhersage von gravitativen Massenbewegung im Raum basiert im Wesentlichen auf der Schwellenwertanalyse der Auslösefaktoren (v.a. Niederschlagsschwellenwerte). Crozier (1989) unterscheidet Minimum- und Maximum-Schwellenwerte. Demnach kommt es unterhalb eines Minimum-Schwellenwertes nicht zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen, bei Überschreitung dieses Wertes kann es unter bestimmten Bedingungen zur Auslösung kommen. Bei der Überschreitung des Maximum-Schwellenwertes kommt es immer zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen. Diese Schwellenwerte können entweder an der Niederschlagsmenge unterschiedlicher Zeitspannen orientiert sein (z.B. Caine 1980, Wilson und Wieczorek 1995, Glade 1997, Glade 1998, Corominas und Moya 1999, Glade et al. 2000 und Zêzere 2000) oder die vorherige Bodenfeuchte mit einbeziehen (z.B. Glade 1997 und Crozier 1999b).

Eine ausführliche Diskussion bieten Crozier (1989), Polemio und Petrucci (2000) und Wieczorek und Glade (2005).

## **2.7 Volumen- und Reichweitenbestimmung von gravitativen Massenbewegungen**

Die Bestimmung des Volumens vergangener gravitativer Massenbewegungen ist von großer Bedeutung für das Verständnis der abgelaufenen und ablaufenden Prozesse im jeweiligen Untersuchungsgebiet.

In vielen Arbeiten wird zwar das Volumen von Ereignissen genannt, oft wird aber nicht auf die genutzte Methode zur Berechnung des Volumens eingegangen. Da aber unterschiedliche Methoden zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können, ist es für den Außenstehenden schwierig, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einzuschätzen.

Wird das Volumen des Ereignisses über die abgelagerte Masse berechnet, so ist zu berücksichtigen, dass auf Grund der Lockerung der Rutschmasse sowie durch die Aufnahme von weiterem Material während der Bewegung das Volumen 30-67% größer sein kann als die Berechnung des Volumens auf Basis des Quellgebietes (Corominas 1996 und Cruden und Varnes 1996). Hin und wieder mag auch das Problem der genauen Abgrenzung des Ereignisses hinzukommen. Weitere Quellen für Unsicherheiten werden in Corominas (1996) diskutiert. Die Kombination der verschiedenen Aspekte kann dazu führen, dass die Volumenangaben für das gleiche Ereignis beträchtlich variieren, so z.B. für



den Nevado Huascarán Rock Avalanche von 1970 zwischen 2 Mio. m<sup>3</sup> und 50-100 Mio. m<sup>3</sup> (Corominas 1996).

Die verschiedenen Methoden zur Abschätzung des Volumens gravitativer Massenbewegungen umfassen geometrische bzw. geomorphometrische, empirische und geophysikalische Ansätze.

Einen einfachen geometrischen Ansatz für Rotationsrutschungen bieten Cruden und Varnes (1996). Nach ihnen kann das Volumen annäherungsweise mit dem Volumen eines halben Ellipsoid beschrieben werden:

$$V = \frac{1}{6} \pi D_r \times W_r \times L_r \quad (1)$$

mit

$D_r$  = Tiefe der Scherfläche

$W_r$  = Maximale Breite der Scherfläche

$L_r$  = Länge der Scherfläche

$V$  = Volumen der Rutschung

Sie merken allerdings an, dass die jeweiligen Faktoren gegen die Mächtigkeit, der Länge und der Breite der Rutschmasse ausgetauscht werden sollten, wenn man das Volumen nach der Rutschung berechnen möchte. Derart wird der oben beschriebene Aspekt der Volumenzunahme bei der Bewegung berücksichtigt.

Für Fels- und Bergstürze hat Evans (2003 in Guthrie und Evans 2006) folgende empirische Formel in Abhängigkeit von der Fläche des jeweiligen Ereignisses bestimmen können:

$$A = 30,3 \times V^{0,6377} \quad (2)$$

mit

$A$  = Fläche des Sturzes und  $V$  = Volumen des Sturzes

Löst man die Formel zum Volumen hin auf ergibt sich:

$$V = \left( \frac{A}{30,3} \right)^{\frac{1}{0,6377}} \quad (3)$$

Hovius et al. (1997) kartierten 7691 rezente gravitative Massenbewegungen, deren Größe zwischen 100m<sup>2</sup> und 1km<sup>2</sup> variierten, auf Basis von multi-temporalen Luftbildinterpretationen und

Geländearbeiten in Neuseeland. Weitere Analysen eines Teildatensatzes von 4984 Ereignissen ergaben folgende empirische Beziehung (siehe auch Malamud et al. 2004):

$$V = \varepsilon A^{1,50} \quad (4)$$

mit

$$\varepsilon = 0,05 \pm 0,02$$

Simonett 1967 (in Malamud et al. 2004) bestimmte die Fläche und das Volumen von 201 gravitativen Massenbewegungen in Neu Guinea im Gelände und errechnete folgende empirische Formel:

$$V = 0,024 \times A^{1,368} \quad (5)$$

In der statistischen Auswertung dreier umfassender Datensätze zu gravitativen Massenbewegungen kommen Malamud et al. (2004) zu dem Ergebnis, dass die Anwendung von Gleichungen 4 und 5 zu vernachlässigbaren kleinen Unterschieden führen, jedoch im Einzelfall die erfolgreiche Anwendung vom Typ und der Größe der gravitativen Massenbewegung abhängt.

Ein wesentlich aufwändigeres Verfahren stellt die Ermittlung des Volumens mittels geophysikalischer Untersuchungen dar. Hierbei legt man mehrere parallele Profile längs und quer über den Rutschkörper und ermittelt über die Auswertungen die Lage der Gleitfläche im Raum. Je nach Untersuchungsgebiet ist es aber zwingend erforderlich, mehrere geophysikalische Methoden miteinander zu kombinieren, um die genaue Lage der Gleitfläche zu erfassen und darauf basierend das Volumen genau abschätzen zu können (z.B. Bichler et al. 2004).

Bichler et al. (2004) haben für die Quesnel Forks Hangrutschung in Kanada drei Methoden zur Volumenbestimmung miteinander verglichen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die Ermittlung des Volumens mittels Geophysik am genauesten ist, gefolgt von dem geometrischen Ansatz nach Cruden und Varnes (1996). Allerdings beträgt bei diesem Ansatz das Volumen nur noch die Hälfte von dem, welches mittels Geophysik ermittelt wird. Der dritte Ansatz, der nur ein Drittel des (Geophysik-) Volumens liefert, basiert auf der Idee der Volumenberechnung mittels der Differenz zwischen einem digitalen Geländemodell vor der Rutschung und einem nach der Rutschung. Diesem Ansatz liegt aber oft ein Gedankenfehler zu Grunde und zwar würde die exakte Berechnung des Volumens einer gravitativen Massenbewegung voraussetzen, dass das Quellgebiet und das Akkumulationsgebiet komplett entkoppelt sind, d.h. sich keine Rutschmassen mehr im Bereich des Quellgebietes befinden. Davon kann aber insbesondere bei Rotationsrutschungen nicht ausgegangen werden, so dass dieser Ansatz für diesen Typ ungeeignet ist. Wird das Kriterium der Entkoppelung weitestgehend erfüllt (u.U. bei Fels- und Bergstürzen, Kippungen oder Fließungen), kann er aber sehr zuverlässige Daten liefern.

Einen neuen Ansatz, der auf dem letztgenannten aufbaut, ist der so genannte „Sloping Local Base Level Approach“ (Jaboyedoff et al. 2004). Dabei handelt es sich um einen geomorphometrischen Ansatz, der mittels eines iterativen Algorithmus versucht, die potenzielle Lage der Gleitfläche im Raum auf Basis eines Digitalen Geländemodells (DGM) zu modellieren und darauf aufbauend das Volumen zu berechnen. Eine detaillierte Beschreibung dazu findet sich in den Kap. 5.1.5 und 5.2.7.

Nachdem das Volumen von gravitativen Massenbewegung bestimmt ist, kann die Reichweite abgeschätzt werden, um Auskünfte über die potenziell betroffenen Gebiete zu erhalten. Zur Ermittlung der Reichweite existieren entweder deterministische (z.B. Hungr 1995) oder empirische Modelle. Auf letztere soll kurz näher eingegangen werden.

Die empirischen Ansätze basieren entweder auf dem geometrischen Gefälle (*angle of reach* oder *travel angle*), der Fahrböschung oder dem Schattenwinkel (*shadow angle*). Die zwei ersten wurden bereits von Heim (1932) eingeführt, der bei seinen Analysen feststellte, dass der horizontale und vertikale Versatz bei Bergstürzen einem bestimmten Verhältnis folgt. Das geometrische Gefälle gibt den Winkel der kürzesten Verbindung von oberster Anrisskante und tiefsten Punkt der Ablagerung wider. Bei der Fahrböschung werden die Ablenkungen im Gerinne mitberücksichtigt, so dass die Verbindungslinie länger wird. Zur Berechnung des entsprechenden Winkels von oberster Anrisskante zum tiefsten Ablagerungspunkt muss diese Linie gestreckt werden. In der englischsprachigen Literatur wird fälschlicherweise der *angle of reach* auch als Fahrböschung bezeichnet (z.B. Hungr et al. 2005). Das Konzept des Schattenwinkels wurde von Evans und Hungr (1988) eingeführt (Meißl 1998). Er ist mit dem geometrischen Gefälle vergleichbar, jedoch wird der Winkel nicht von der obersten Anrisskante, sondern von der Oberkante des Ablagerungsgebietes berechnet. Eine ausführlichere Diskussion der Unterschiede findet sich in Meißl (1998) und Evans und Hungr (1993).

Umfassende Reichweitenanalysen für verschiedene Typen gravitativer Massenbewegungen hat Corominas (1996) an einem Datensatz von 204 Fels- und Bergstürzen, Translationsrutschungen, Murgängen und Erdfließungen durchgeführt. Neben einzelnen Formeln für jeden Prozessstyp hat er für den kompletten Datensatz folgende empirische Formel für das geometrische Gefälle ableiten können:

$$\log (H/L) = -0,085 \log V_L - 0,047 \quad (6)$$

mit

H = zurückgelegter Höhenunterschied

L = zurückgelegter horizontaler Versatz

$V_L$  = Volumen der gravitativen Massenbewegung

Weitere empirische Formeln finden sich z.B. in Crozier (1996a und 1996b), Hungr et al. (2005) oder Rickenmann (2005).

Eine umfassende Diskussion der verschiedenen Ansätze zur Abschätzung der Reichweite von gravitativen Massenbewegungen liefern z.B. Hungr et al. (2005) oder Rickenmann (2005).

## **2.8 Datierung von gravitativen Massenbewegungen**

Die Datierung von gravitativen Massenbewegungen ist für viele Fragestellungen der Geomorphologie von essentieller Bedeutung. So ist z.B. die Rekonstruktion von vergangenen Prozessabläufen für die Landschaftsgeschichte bzw. der Entwicklung der Landschaftsformen ohne Datierungen nur eingeschränkt möglich. Genauso wichtig sind die Datierungen auch für Fragestellungen der Angewandten Geomorphologie, hier insbesondere der Naturgefahrenforschung. Je genauer mittels Datierungen Frequenz-Magnitude-Beziehungen von gravitativen Massenbewegungen eines Untersuchungsgebietes erstellt werden können, desto besser und verlässlicher können Aussagen über die zukünftige Auftretenswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse gemacht werden. Von großer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die Frage, mit welcher maximalen Magnitude von gravitativen Massenbewegung unter heutigen bzw. zukünftigen Umweltbedingungen zu rechnen ist. Daher ist v.a. die Datierung der größten gravitativen Massenbewegungen in einem Untersuchungsgebiet essentiell, um abschätzen zu können, ob diese Ereignisse relikte Prozesse sind oder auch noch heutzutage auftreten können.

Die beste Möglichkeit, gravitative Massenbewegungen zu datieren, ist, sie sofort nach Auftreten im Gelände zu erfassen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sollten standardisierte Aufnahmeprotokolle verwendet werden, wie sie z.B. im Rahmen vom DOMODIS-Projekt (Documentation of Mountain Disasters) entwickelt worden sind (Hübl et al. 2002). Die Aufnahme aktueller Ereignisse sollte durch die Analyse historischer Ereignisse ergänzt werden.

Zur Erhebung von historischen Ereignissen lassen sich historische Archivalien (Karten und gedruckte sowie handgeschriebene Texte) auswerten. Nach Lang et al. (1999) stellt die historische Recherche die verlässlichste Form der Datierung vergangener Ereignisse dar. Doch auch diese Quellen unterliegen Unsicherheiten und geben nicht immer einen kompletten Überblick über die vergangenen Ereignisse. Insbesondere wurden oft nur die Ereignisse aufgenommen, die Schäden verursacht haben. Des Weiteren sind historische Quellen oft lückenhaft, v.a. je weiter sie in die Zeit zurück reichen. Ein anderes Problem ist die Lesbarkeit alter handschriftlicher Quellen, die oft den Zugang zu diesen Quellen verschließt. Eine Diskussion über die Möglichkeiten und Limitierungen der Nutzung von historischen Quellen findet sich u.a. bei Ibsen und Brunsden (1996), Calcaterra und Parise (2001), Glade (2001), Barnikel (2004) und Guzzetti und Tonelli (2004).

Die generelle Reichweite historischer Primärquellen für gravitative Massenbewegungen geben Baum und Schmidt (2001) mit dem 18 Jhdt. an. Sollten Informationen weiter zurückreichen, so würde es sich nur um Sekundärquellen handeln. Kallinich (1999) stimmt dem zu und behauptet, dass sich historische Überlieferungen von Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb auf etwa 200 Jahre beschränken.

Die neuesten Untersuchungsergebnisse aus „*InterRISK History*“ zeigen allerdings, dass in der Schwäbischen Alb auch Primärquellen viel weiter zurückreichen. Die älteste Erwähnung eines Rutschereignisses in einer Primärquelle wird auf 1416 datiert. Die Arbeit mit solch alten historischen Quellen kann im Bereich der Erforschung gravitativer Massenbewegungen zu neuen Problemen führen, da in früheren Jahren oft keine allgemein übliche Bezeichnung für das Phänomen vorlag. Mittlerweile wurde eine Liste mit über 80 verschiedenen Bezeichnungen für die Schwäbische Alb zusammengestellt, aus der der Begriff „natürliche Revolution“ herausragt (Röhrs 2006, Persönliche Mitteilung).

Die Datierung von Ereignissen der letzten 60-70 Jahre kann über die Auswertung von multi-temporalen Luftbildern erfolgen. Hier ist man aber zum einen an die Verfügbarkeit von Luftbildern und vor allem an das Intervall von Wiederholungsbefliegungen gebunden. Unter Umständen stimmen zum anderen Ereignis und Aufnahme zeitlich nicht überein, so dass ein Ereignis knapp verpasst wird und im schlimmsten Fall bis zur nächsten Befliegung erodiert oder überprägt wurde. Des Weiteren kann eine üppige Vegetation (v.a. dichter Wald) das Erkennen von kleineren gravitativen Massenbewegungen verhindern. Dennoch sind Luftbildinterpretationen ein außerordentlich gutes Hilfsmittel zur Datierung von gravitativen Massenbewegungen (z.B. Guzzetti et al. 2004a, Guzzetti 2005, Brennecke 2006). Herausforderungen bei der Erstellung von Inventaren gravitativer Massenbewegungen u.a. auf Basis von Luftbildern sind in Soeters und van Westen (1996), Malamud et al. (2004) und Guzzetti (2005) zusammenfassend dargestellt.

In Ergänzung zu den Luftbildern bieten hochaufgelöste Digitale Geländemodelle (HA DGM) eine neue hervorragende Quelle zur Inventarisierung von gravitativen Massenbewegungen. Schulz (2007) konnte z.B. viermal mehr gravitative Massenbewegungen unter Verwendung von HA DGM kartieren, als zuvor mittels Luftbildanalysen kartiert worden sind. Die Vorteile liegen v.a. in der Kartierung von gravitativen Massenbewegungen in bewaldeten Gebieten. Zudem sind auch kleinere Ereignisse erkennbar. Bezüglich der Datierung von gravitativen Massenbewegungen besteht jedoch das Problem, dass oft nur relative Altersinformationen ableitbar sind (z.B. Brennecke 2006). Datierungen mittels HA DGM-Analysen sind allerdings bei wiederholter Erstellung von HA DGM des Untersuchungsgebietes möglich. Da die Prozessierung der Daten bei sehr großen Untersuchungsgebieten jedoch noch sehr aufwendig und zudem mit hohen Kosten verbunden ist, wird es wahrscheinlich in naher Zukunft keine großflächige multi-temporale Erstellung von HA DGM geben. Für kleinere Regionen scheint dies aber machbar und äußerst erstrebenswert (v.a. wenn in der Region ein Ereignis mit zahlreichen gravitativen Massenbewegungen aufgetreten ist).

Geht man auf der Zeitskala noch weiter zurück, so muss auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Generell können absolute und relative Altersdatierungen unterschieden werden. Klassische absolute Altersdatierungen umfassen u.a. Radiokarbondatierung (z.B. Heuberger 1966, Alexandrowicz

1997, Moya et al. 1997, Panizza et al. 1997 und von Poschinger und Haas 1997), Dendrochronologie (z.B. Fantucci und McCord 1995, Gers et al. 2001, Santilli und Pelfini 2002, Gärtner et al. 2003, Stefanini 2004 und Stoffel und Perret 2006), Lichenometrie (z.B. Bull et al. 1994, Winchester und Chaujar 2002 und Decaulne 2004), Pollenanalyse (z.B. Knipping 1999, Link 1999, Bibus et al. 2001 und Dapples et al. 2002) und Untersuchungen der Makroflora und -fauna (z.B. Alexandrowicz 1997). Als neue Methoden der absoluten Altersdatierung stehen nach Lang et al. (1999) die Accelerator Mass Spectrometry (AMS) zur Datierung kosmogener Nuklide (z.B. Ballantyne und Stone 2004, Cockburn und Summerfield 2004, Hermanns et al. 2004 und Matmon et al. 2005), die Thermal Ionisation Mass Spectrometry (TIMS) zur Datierung von Uranium-Reihen, optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) (z.B. Matmon et al. 2005), die Laser Fusion zur Datierung von Argon-Reihen oder die Alpha-Recoil-Track (ART) Datierung zur Verfügung. Die letzten beiden eignen sich nur zur Datierung vulkanischer Aschen, die auf oder in der Rutschmasse vorhanden sein müssen, um die Bewegung zu datieren.

Lang et al. (1999) unterscheiden direkte, indirekte und relative absolute Datierungen. Direkte Datierungen sind direkt mit der gravitativen Massenbewegung verknüpft (z.B. Datierung von durch die Bewegung gekippten Bäumen). Bei indirekten Datierungen können nur Aussagen über ein Minimum- oder Maximumalter ermittelt werden (z.B. ein OSL-datiertes Kolluvium, welches sich über einer Rutschmasse gebildet hat). Ist der Zusammenhang zwischen dem datierfähigen Material und der Rutschmasse geringer und liegt außerhalb des Fehlerbereichs der eingesetzten Datierungsmethode, so handelt es sich um eine relative Datierung (z.B. das Alter einer marinen Terrasse, auf die sich eine Rutschmasse geschoben hat) (Lang et al. 1999).

In Abb. 2.6 sind die Einsatzbereiche der verschiedenen absoluten Methoden dargestellt. Durch die Einwirkung der gravitativen Massenbewegung gekippte, gekappte oder in situ verschüttete Bäume erlauben eine direkte Datierung (siehe Abb. 2.6 a, d + h), ebenso wie die Datierung von Anrissbereichen von Felsstürzen mittels kosmogener Nuklide, die Datierung der Felssturzablagerungen mittels Lichenometrie oder die  $^{14}\text{C}$ -Datierung von verschütteten Böden (Abb. 2.6 d und e). Minimumalter werden durch die Datierung von verfüllten Hohlformen auf Rutschmassen angegeben (Abb. 2.6 a, c und i). Lang et al. (1999, S.34) warnen allerdings vor einer falschen Anwendung von Datierungen: „*The interpretation of chronometric data demands a thorough understanding of the principles, possibilities and limitations of the dating method, as well as proper consideration of the stratigraphic context*“. So kann z.B. die Verfüllung einer Hohlform und die Bildung eines Moors durchaus mehrere hundert oder über tausend Jahre andauern und so ein zu junges Alter vortäuschen. Neben den in Abb. 2.6 aufgeführten Einsatzbereichen können aber auch noch Seesedimente datiert werden, welche sich in Folge eines durch eine Rutschung verursachten Sees absetzten, um somit ebenfalls ein Minimumalter für die Rutschung zu erhalten (z.B. Alexandrowicz 1997).

Eine ausführliche Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Methoden findet sich in Lang et al. (1999) und Baum und Schmidt (2001).

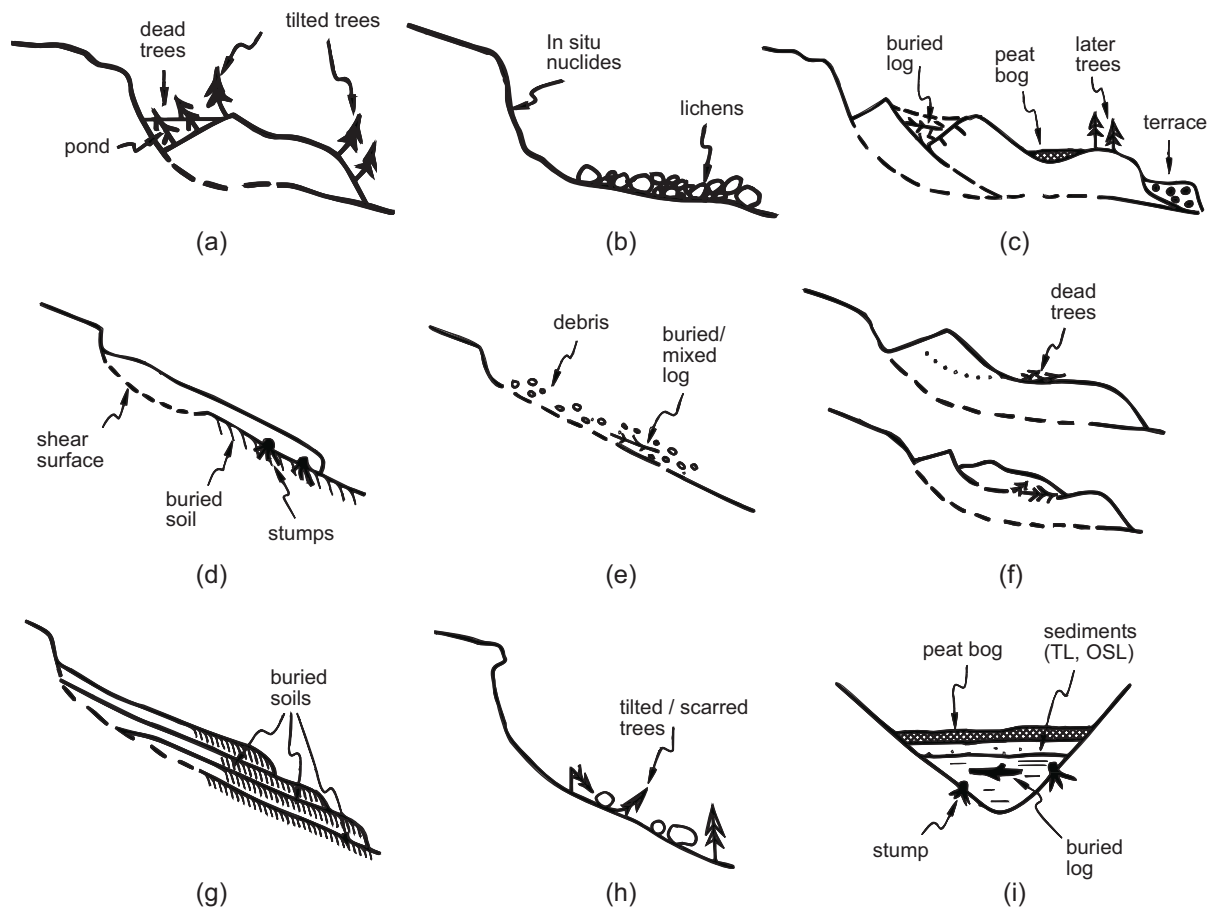


Abb. 2.6: Einsatzbereiche von verschiedenen absoluten Datierungsmethoden (nach Lang et al. 1999, Erläuterungen im Text)

Zur relativen Datierung von gravitativen Massenbewegungen stehen pedologische, stratigraphische und geomorphologische Datiermethoden zur Verfügung. So kann z.B. die Verbreitung der Böden und deren jeweiliger Entwicklungsstand (Grad der Verwitterung und Entkalkungstiefe) herangezogen werden, um Aussagen über das Alter einer Rutschung zu machen (Bibus et al. 2001). Die Interpretation der Ergebnisse ist abhängig vom Ausgangsgestein. Finden sich z.B. tief entkalkte Böden auf kalkreichem Ausgangsgestein in dem Rutschgelände, so ist auf Grund des sehr langsam ablaufenden Entkalkungsprozesses ein pleistozänes Alter anzunehmen (Bibus et al. 2001). Allerdings haben Bibus et al. (2001) auch die Erfahrung in einer rezenten Rutschung in der Schwäbischen Alb (Mössinger Bergrutsch von 1983) gemacht, dass sich alte Böden mosaikartig in der Rutschung erhalten können und unter Umständen ein zu hohes Alter vortäuschen.

Bei einer stratigraphischen Datiermethode werden vor allem Sedimente genutzt, die durch andere Prozesse in den Bereich der gravitativen Massenbewegung transportiert wurden (z.B. Moränenmaterial oder periglaziale Deckschichten). Ist die gravitative Massenbewegung mit diesen Sedimenten „zugedeckt“, geht man davon aus, dass die gravitative Massenbewegung älter ist als die Prozesse, die zur Ablagerung der Sedimente geführt haben. Sind diese Sedimente in die gravitative

Massenbewegung eingearbeitet worden, so kann man von einem jüngeren Alter ausgehen. Während man schon früh Moränenmaterial zur Datierung von Bergstürzen genutzt hat (z.B. Vidal 1953 in Abele 1997), wurde die Datierung von gravitativen Massenbewegungen mittels periglazialer Deckschichten in der Schwäbischen Alb zum ersten Mal von Terhorst (1997) und Bibus et al. (2001) eingesetzt. Auf Grund der räumlichen Überschneidung dieser Arbeiten mit der vorliegenden Arbeit soll dieser Ansatz hier näher ausgeführt werden.

Periglaziale Deckschichten lassen sich nach Semmel (1968) in Mitteleuropa generell in Basisschutt, Mittelschutt und Deckschutt unterteilen. Aktuelle Bezeichnungen sind nach Völkel et al. (2002) Basislage, Mittellage und Hauptlage. Die Besonderheit der Hauptlage ist, dass sie Minerale der Laacher See Tephra enthält (Bibus et al. 2001). Da der Ausbruch des Laacher See Vulkans auf  $12.900 \pm 560$  cal BP ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -sanidin age, Wörner 1998 in Bibus et al. 2001) datiert ist, eignet sich die Hauptlage somit, um pleistozäne Formen und Prozesse von holozänen abzugrenzen (Bibus et al. 2001). Die Untersuchung der periglazialen Deckschichten erfolgt nach Bibus et al. (2001) in der Regel über Schwermineralanalysen, mittels derer auch die Minerale der Laacher See Tephra eindeutig zu bestimmen sind. Nach Bibus et al. (2001) besteht jedoch auch die Möglichkeit, die periglazialen Deckschichten auf Basis einer makroskopischen Betrachtung zu erkennen und darauf basierend gravitative Massenbewegungen ins Pleistozän zu datieren. Besonders gut zum Datieren eignen sich die periglazialen Deckschichten im Bereich der Abrissnische und auf Fließungen. Selbst ein Fehlen der periglazialen Deckschichten ist nicht zwangsweise ein Nachweis für ein holozänes Alter der gravitativen Massenbewegung, da die Deckschichten entweder durch anthropogenen Einfluss oder holozäne Erosion abgetragen sein können (Bibus et al. 2001).

In der Vergangenheit sind bei den Kombinationen von absoluten und relativen Datierverfahren Schwächen der stratigraphischen Datiermethoden zu Tage getreten, bei denen zu hohe Alter ermittelt wurden. Dies soll anhand der Datierung von Bergstürzen mittels Moränenmaterial verdeutlicht werden: Durch Auffinden von Moränenmaterial auf Bergstürzen hat man in früherer Zeit vielen Bergstürze ein pleistozänes Alter zugewiesen. Mit dem Verfügbarwerden von absoluten Datierungsmethoden konnte aber in einigen Fällen nachgewiesen werden, dass die Bergstürze viel jünger sind, und dass das Moränenmaterial beim Sturz mittransportiert wurde (z.B. beim Köfels Bergsturz, der von Heuberger (1966) mittels  $^{14}\text{C}$  auf  $8710 \pm 150$  BP und von Ivy-Ochs et al. (1998) auf  $9800 \pm 100$  cal BP (kalibriertes  $^{14}\text{C}$ -Alter) bzw.  $9820 \pm 370$  (mittleres  $^{10}\text{Be}$ - und  $^{26}\text{Al}$ -Alter) datiert wurde, oder beim Flimser Bergsturz ( $8300$  BP mittels  $^{14}\text{C}$  von Poschinger und Haas 1997). Beide Ereignisse liegen somit am Übergang vom Pleistozän zum Holozän vor ungefähr 10.000 Jahren und sind nicht mehr von Gletschern überfahren worden. Da von letzterem lange Zeit ausgegangen wurde, datierten einige Autoren z.B. den Flimser Bergsturz auf vorwürmzeitlich oder ins mittlere Würm (eine vollständige Diskussion der verschiedenen Theorien und Datierungen zum Flimser Bergsturz findet sich in von Poschinger et al. 2006). Gravierende Abweichung von der ursprünglichen Annahme pleistozäner Alter sind z.B. beim Tschirgant Bergsturz ( $2885 \pm 20$  BP) oder Hintersee Bergsturz ( $3520$



± 85 BP) festzustellen (Jerz 1999). Dies verdeutlicht die Probleme stratigraphischer Datierungsverfahren.

Ähnliche Schwierigkeiten sind durchaus auch in der Datierung mittels periglazialer Deckschichten zu erwarten. In Abb. 2.7 sind die Möglichkeiten, aber auch die Limitierungen an Beispielen dargestellt. Die Skizzen A1 bis A3 dienen der Veranschaulichung der Auslösung einer Rutschscholle, die im weiteren zeitlichen Verlauf nochmals reaktiviert und um etliche Meter weiter nach unten versetzt wird. In den Skizzen B1 bis B3 sind zudem die periglazialen Deckschichten aufgeführt. Wird B1 heutzutage genauso vorgefunden, kann man relativ sicher sein, dass seit der Ablagerung der Deckschichten bis heute kaum etwas passiert ist. Bei B2 und B3 zeugen die periglazialen Deckschichten von einem pleistozänen Alter der Rutschscholle, da sie ungestört über der Rutschmasse liegen. Im Gelände ist nicht auszumachen, ob es sich bei der Rutschscholle um eine Reaktivierung handelt, oder ob sie gleich bei der ersten Bewegung so tief gerutscht ist. C1 stellt noch einmal das in periglaziale Deckschichten gehüllte Ausgangsrelief dar. In Analogie zu den oben erwähnten Beispielen kann es beim Einsetzen der Rutschung (C2) passieren, dass insbesondere die Deckschichten im ebenen Bereich der Rutschscholle auf Grund der für Rotationsrutschungen charakteristischen geringen internen Deformation (Buma und van Asch 1996) voll erhalten bleiben, während das restliche Material zumindest teilweise in die Rutschmasse eingearbeitet wird. Setzt nun bei C3 eine Reaktivierung der Scholle ein, die um weitere Meter nach unten versetzt wird, können unter Umständen immer noch Teile der periglazialen Deckschichten an der Oberfläche erhalten bleiben, andere werden tiefer eingearbeitet. Genauso ist denkbar, dass Deckschichten, die bei C2 in den Untergrund eingearbeitet wurden, nun wieder an die Oberfläche gelangen. In C2 und C3 ist zudem das bekannte Problem der Repräsentativität der Punkterhebungen für die Gesamtfläche dargestellt. Es wird nicht möglich sein, die Rutschung so eng zu beproben, dass absolut verlässliche Daten gewonnen werden können. In C2 und C3 sind nun zwei Extreme dargestellt: Während in C2 bei jeder Bohrung die mosaikartigen periglazialen Deckschichten angetroffen werden, ist dies in C3 innerhalb der Rutschmasse nicht der Fall. Da aber die tatsächliche Situation nicht bekannt ist, besteht die Gefahr, die Ergebnisse falsch zu interpretieren, so dass es empfehlenswert ist, die Ergebnisse der Datierung basierend auf periglazialen Deckschichten mittels absoluter Datierungen zu ergänzen und zu validieren.

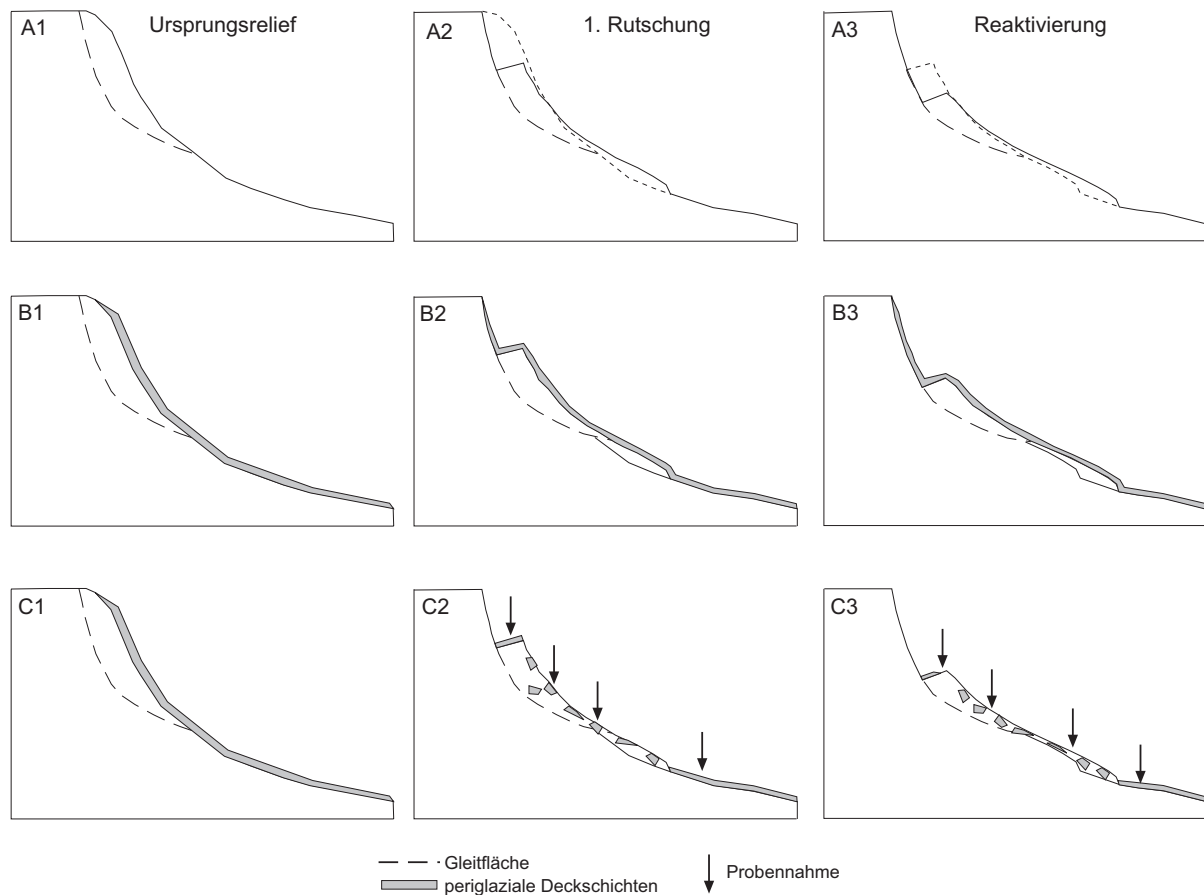


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Interaktion von periglazialen Deckschichten und gravitativen Massenbewegungen (a) Rutschung ohne Deckschichten, b) Rutschung älter als Deckschichten, Rutschung jünger als Deckschichten, weitere Erläuterungen im Text)

Die Aussage von Bibus et al. (2001), dass sich Abrissnischen und Fließungen zur Datierung sehr gut eignen, ist kritisch zu sehen, da zum einen das Alter von Deckschichten in der Abrissnische nicht unbedingt eine Auskunft über das Alter der Rutschung geben muss. Zum anderen ist die Durchmischung bei Fließungen viel stärker als bei Rotationsrutschungen, so dass nicht klar wird, warum sich gerade Fließungen besser eignen sollen als Rotationsrutschungen. Das Argument, dass das Fehlen von periglazialen Deckschichten in Rutscharealen auf erosive oder anthropogene Tätigkeiten zurückgeführt werden kann, könnte auch umgekehrt interpretiert werden: Finden sich in Rutschgebieten periglaziale Deckschichten an der Oberfläche, so besteht die Möglichkeit, dass diese zuvor in die Rutschmasse eingearbeitet waren und erst durch Erosion oder anthropogene Tätigkeiten wieder an die Oberfläche gelangen konnten. Welche der Hypothesen im Sinne der Abduktion (z.B. Inkpen 2005) eine größere Wahrscheinlichkeit besitzt, der Realität zu entsprechen, ist im Zweifelsfall wohl ohne weitere absolute Datierungen nicht zu entscheiden.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Datierung mittels periglazialer Deckschichten zwar auf Grund der aufgeführten Aspekte nicht unproblematisch erscheint, in einigen Bereichen aber sicherlich zuverlässig anwendbar ist. Aus dem Studium der entsprechenden Arbeiten ergibt sich aber die

Notwendigkeit, die Potenziale und Limitationen der Datierungsmethode nochmals detaillierter zu untersuchen (z.B. Auswirkungen bekannter rezenter Großrutschungen auf die Verteilung der periglazialen Deckschichten bzw. der Laacher See Tephra an der Oberfläche sowie in der Tiefe; Nutzen der Schwermineralanalyse für die Datierung holozäner Ereignisse).

Als letzte relative Datierungsmethode soll nun die geomorphologische Datierung vorgestellt werden. Diese basiert vor allem auf der Interpretation des Zustands der geomorphologischen Formen, die durch die gravitative Massenbewegung geschaffen und von nachfolgenden Prozessen verändert wurden.

Je jünger und aktiver eine gravitative Massenbewegung ist, desto deutlicher sind die von ihr hervorgerufenen Formen im Gelände zu erkennen. Mit der Zeit werden die Formen durch Erosion oder auch anthropogenen Einfluss überprägt, so dass immer weniger von der ursprünglichen gravitativen Massenbewegung zu sehen ist, bis sie letztendlich ganz verschwindet. Brunsden (1993) hat dies in einem weiteren Zusammenhang als Persistenz (Lebensdauer) der Reliefformen bezeichnet. Die Lebensdauer der Formen hängt nicht nur, wie bereits ausgeführt, von der Größe, sondern auch von den Umweltbedingungen, der geomorphologischen Aktivität sowie dem anthropogenen Einfluss ab. In der Praxis der Erstellung multi-temporaler Inventare gravitativer Massenbewegungen zeigt sich, dass insbesondere Ereignisse, die im Bereich von Agrarflächen auftreten, relativ schnell (von einem Luftbilddatum zum nächsten) durch anthropogene Tätigkeiten unkenntlich gemacht werden (Galli 2006, Persönliche Mitteilung). Zur Abschätzung des Alters bieten sich auch der Zustand der Vegetation oder die Beeinflussung anderer geomorphologischer Systeme an (z.B. fluviales System).

In Tabelle 2.8 sind Kriterien zusammengestellt, mittels derer McCalpin (1984 in Keaton und DeGraff 1996) das grobe Alter von gravitativen Massenbewegungen in den Rocky Mountains abschätzt. Nach Keaton und DeGraff (1996) sind ähnliche Veränderungsdaten aus anderen klimatischen Regionen noch nicht dokumentiert worden. Auch wenn die absoluten Raten in anderen klimatischen Regionen von denen der Rocky Mountains abweichen, so gehen Keaton und DeGraff (1996) davon aus, dass die generelle Abfolge der Veränderung dennoch ähnlich sein wird. Eine graphische Umsetzung der Modifizierung einer gravitativen Massenbewegung über die Zeit ist in Abb. 2.8 ohne Berücksichtigung der Vegetation dargestellt.

Tab. 2.8: Kriterien zur Abschätzung des Alters von gravitativen Massenbewegungen in den Rocky Mountains (nach McCalpin (1984) in Keaton und DeGraff (1996))

Activity state	Main scarp	Lateral flanks	Internal morphology	Vegetation	Toe relationships	Estimated age (years)
Active, reactivated, or suspended; dormant-historic (A)	Sharp; unvegetated	Sharp; unvegetated; streams at edge	Undrained depressions; hummocky topography; angular blocks separated by scarps	Absent or sparse on lateral and internal scarps; trees tilted and/or bent	Main valley stream pushed by landslide; floodplain covered by debris; lake may be present	<100 (historic)
Dormant-young (B)	Sharp; partly vegetated	Sharp; partly vegetated; small tributaries to lateral streams	Undrained and drained depressions; hummocky topography; internal cracks vegetated	Younger or different type or density than adjacent terrain; older tree trunks may be bent	Same as for active class but toe may be modified by modern stream	100 to 5000 (Late Holocene)
Dormant-mature (C)	Smooth; vegetated	Smooth; vegetated; tributaries extend onto body of slide	Smooth, rolling topography; disturbed internal drainage network	Different type or density than adjacent terrain but same age	Terraces covered by slide debris; modern stream not constricted but wider upstream floodplain	5000 to 10000 (Early Holocene)
Dormant-old or relict (D)	Dissected; vegetated	Vague lateral margins; no lateral drainage	Smooth, undulating topography; normal stream pattern	Same age, type and density as adjacent terrain	Terraces cut into slide debris; uniform modern floodplain	>10000 (Late Pleistocene)

Note: Activity states dormant-stabilized and dormant-abandoned may have features of any age classification; the stabilized and abandoned states must be interpreted from other conditions

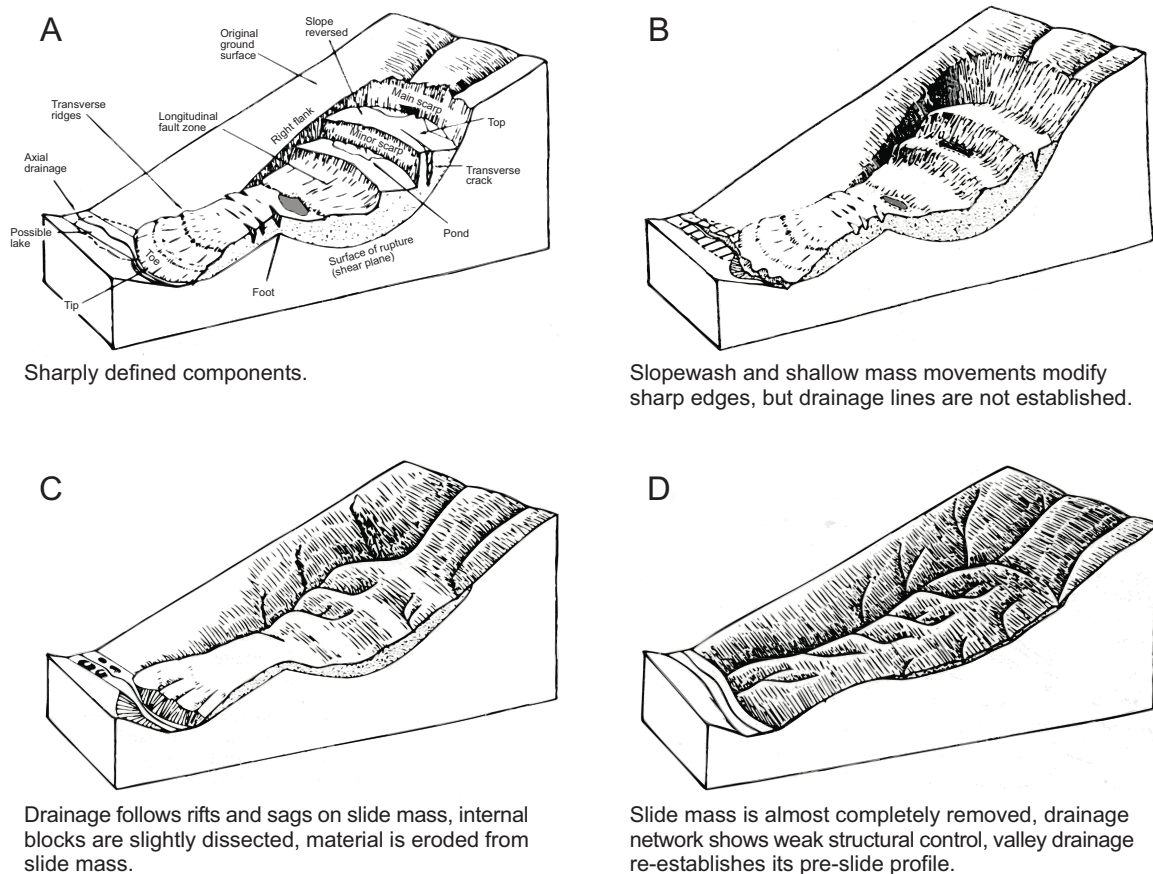


Abb. 2.8 Geomorphologische Veränderungen einer idealisierten gravitativen Massenbewegung über die Zeit (nach McCalpin (1984) in Keaton und DeGraff (1996); Anmerkung: A = active, reactivated, suspended or dormant-historic; B = dormant-young; C = dormant-mature; D = dormant-old (vgl. auch Tab. 2.8))

## 2.9 Frequenz-Magnitude-Beziehungen gravitativer Massenbewegungen

Das Frequenz-Magnituden-Konzept geht auf die Arbeit von Wolman und Miller (1960) zurück, die für fluviale Systeme untersucht haben, welche Abflussereignisse einer bestimmten Frequenz und Magnitude die meiste geomorphologische Arbeit leisten. Die Frage nach der geomorphologischen Arbeit wurde ganz aktuell von Guthrie und Evans (2006) auf gravitative Massenbewegungen übertragen. Im Folgenden soll der Fokus nicht auf der geomorphologischen Arbeit liegen, sondern auf der generellen Frequenz-Magnituden-Beziehung gravitativer Massenbewegungen und deren Potenzial für die Gefahrenanalyse.

Auch wenn es einige frühere Arbeiten gibt, die bei Analysen von gravitativen Massenbewegungen feststellten, dass die Frequenz-Magnituden Beziehung durch ein Potenzgesetz beschrieben werden kann, so waren es v.a. die Arbeiten von Hovius et al. (1997) und Pelletier et al. (1997), die das aktuelle Interesse an solchen Analysen und der Erstellung von Frequenz-Magnituden-Beziehungen für

verschiedene Untersuchungsgebiete auslösten (Evans et al. 2006). Beide Arbeiten kommen zu dem Ergebnis, dass für größere Ereignisse ein linearer Trend zu verzeichnen ist, der durch ein Potenzgesetz beschrieben werden kann, wenn man die Frequenz und Magnitude der Ereignisse in einem doppelt logarithmischen Diagramm darstellt. Bei kleineren Ereignissen kommt es zu einem sogenannten „Rollover“-Effekt, d.h. einem Abknicken der Linie, die eine geringere Anzahl ganz kleiner Ereignisse darstellt. Auf Grund der Potenzgesetzverteilung kommen Hovius et al. (1997, S. 233) zu folgendem Schluss: „[...] it seems, that scale invariance is a general property of landslides [...]“.

Ähnliche Analysen und Ergebnisse sind mittlerweile u.a. von Guzzetti et al. (2002), Guthrie und Evans (2004), Malamud et al. (2004) und Korup (2005) für verschiedene Regionen und unterschiedliche Auslösefaktoren gefunden worden. Wurde in den ersten Jahren der „Rollover“-Effekt noch als ein Artefakt der Datenbank (Annahme: nicht alle kleinen Ereignisse konnten kartiert werden) gedeutet, so ist er heute als eine reale Erscheinung anerkannt.

Ein beeindruckendes Ergebnis liefern Malamud et al. (2004), die drei unterschiedliche Datensätze aus drei unterschiedlichen Regionen mit jeweils unterschiedlichen Auslösefaktoren (Niederschlag, Schneeschmelze und Erdbeben) untersuchten und für alle die gleiche Frequenz-Magnitude Beziehung fanden (siehe Abb. 2.9).

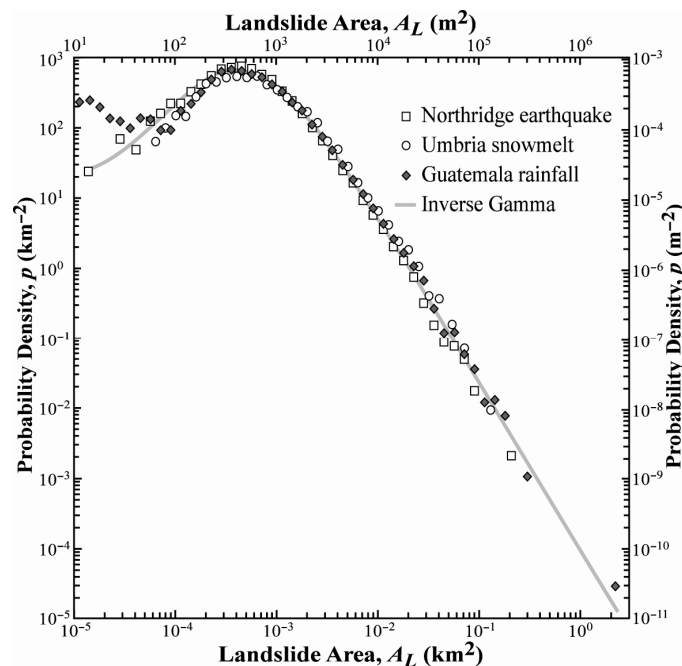


Abb. 2.9: Frequenz-Magnitude-Beziehung für folgende drei Datensätze: 11.111 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst vom Northridge Erdbeben 1994 (USA); 4233 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst von starker Schneeschmelze 1997 in Umbria (Italien); 9594 gravitative Massenbewegungen, ausgelöst durch Starkniederschläge während Hurricane Mitch in Guatemala 1998 (nach Malamud et al. 2004).

Nach Evans et al. (2006) ermöglicht es die Potenzgesetzverteilung, unter der Annahme das die kleineren Ereignisse vollständig erfasst wurden, die Frequenz auch großer gravitativer

Massenbewegungen vorherzusagen, für die evtl. kein historisches Ereignis vorhanden ist. Hier ist jedoch Vorsicht geboten, wird doch die Analyse vor allem bei den größten Ereignissen oft unsicherer (Guzzetti 2006, Persönliche Mitteilung).

Zustimmen kann man jedoch folgender Aussage von Evans et al. (2006, S. 34), die das Potenzial für die Gefahrenanalyse sehr gut zusammenfasst: „*These apparently universal characteristics of landslide m/f [magnitude/frequency] relations result in their extreme usefulness for landslide hazard assessment; they form a type of hazard model which may be used in the quantification of landslide hazard which can serve as input into a quantitative risk calculation. Once a magnitude and frequency relation has been established for a region or a site, it may be used to estimate the probability of occurrence of a landslide of a certain magnitude providing the length of the record is known.*”

Crozier (1999a) weist allerdings auf zwei wichtige Aspekte bezüglich der Interpretation von Frequenz-Magnitude Beziehungen hin: Zum einen ist die Frequenz eines Ereignisses einer bestimmten Magnitude von der Größe des Untersuchungsgebietes abhängig. Je größer das Untersuchungsgebiet, desto häufiger ist mit dem Auftreten eines entsprechenden Ereignisses zu rechnen. Zum anderen kann eine solche statistische Analyse dazu führen, dass man übersieht, dass gravitative Massenbewegungen häufig in Cluster auftreten, was wiederum einen wichtigen Punkt für die Abschätzung der Gefahren und Risiken eines Gebietes darstellt.

Eine spannende Frage resultiert aus einem Vergleich von Frequenz und Magnitude bei Waldbränden. Dabei wurde festgestellt, dass auf längerer Zeitskala die Anzahl großer katastrophaler Waldbrände zunimmt, wenn man versucht kleinere Waldbrände zu verhindern. Die Folge dieser Erkenntnis war, dass man in der USA nicht mehr versuchte, kleine und mittlere Brände zu löschen (Buchanan 2001). Die Frage ist nun, ob ein ähnliches Phänomen auch bei gravitativen Massenbewegungen beobachtet werden kann. Eine solche Feststellung könnte durchaus große Folgen für das Naturrisikomanagement haben. Dieser Aspekt wird allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.

## **2.10 Holozäne Aktivität gravitativer Massenbewegungen in Europa**

Um das heutige Gefährdungspotenzial durch gravitative Massenbewegungen besser einschätzen zu können, sind neben den Frequenz-Magnitude Beziehungen detaillierte Analysen insbesondere über das Holozän notwendig. Im Hinblick auf die Gefahrenanalyse ist insbesondere die Frage nach der heutzutage größtmöglichen Magnitude gravitativer Massenbewegungen von großer Bedeutung.

Im Folgenden soll der Kenntnisstand zur holozänen Aktivität gravitativer Massenbewegungen dargestellt werden. Insgesamt gibt es viele einzelne Arbeiten, in denen Datierungen von gravitativen Massenbewegungen vorgenommen wurden, jedoch existieren nur wenige Arbeiten, die versuchen, die Ergebnisse zusammen zu bringen. In dem Zusammenhang sind die Ergebnisse aus den zwei großen EU Forschungsprojekten „European Palaeoclimate and Man since the Last Glaciation“ (EPC, bis

1993) und „Temporal Occurrence and forecasting of landslides in the European Community“ (EPOCH, bis 1993) noch die aktuellsten.

Die Ergebnisse sind in Abb. 2.10 zusammengefasst. Soweit rekonstruierbar, ist die Anzahl der Ereignisse angegeben, die zur Erstellung der Aktivitätsphasen in den einzelnen Regionen genutzt wurden. Geht man davon aus, dass viele Tausend gravitative Massenbewegungen während des Holozäns aufgetreten sind, so wird allein daraus ersichtlich, dass eine Ableitung verschiedener Aktivitätsphasen äußerst schwierig ist. Das kommt auch in dem Zitat von Brunsten und Ibsen (1997, S. 407) zum Ausdruck: „*There is no indication at any scale other than historic-recent, that there has been any change in variability. The date are, in the end, just too few.*“

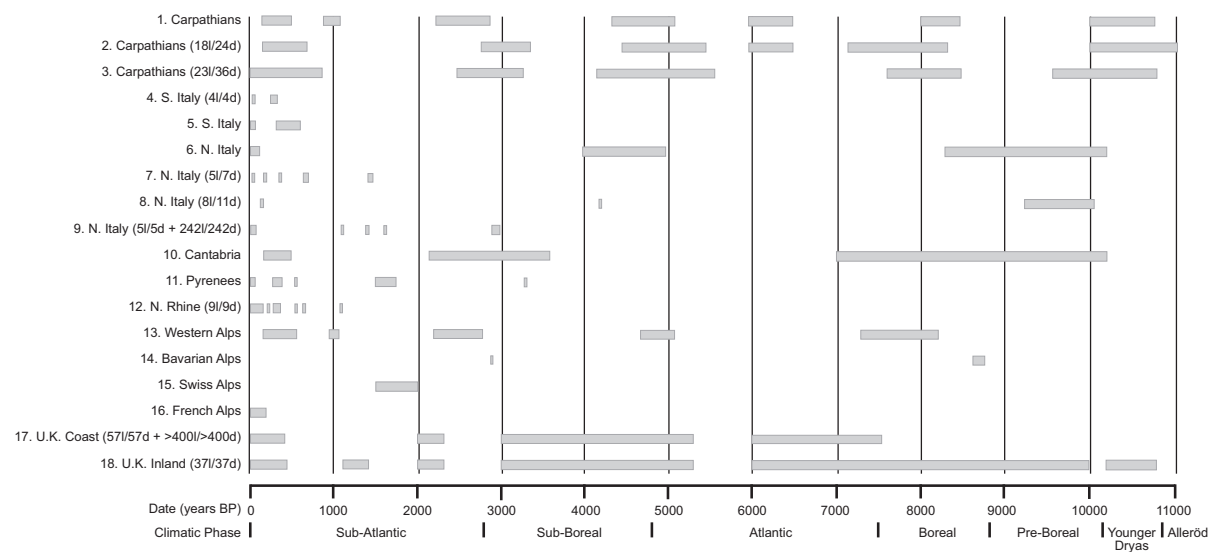


Abb. 2.10: Holozäne Aktivität von gravitativen Massenbewegungen in ausgewählten Regionen Europas (verändert nach Berrisford und Matthews 1997; in Klammern ist die Anzahl der untersuchten gravitativen Massenbewegungen (l) bzw. die Anzahl der durchgeführten Datierungen (d) angegeben; bei Nr. 9 sind zusätzlich 242 Ereignisse aufgeführt, die 1976 durch ein Erdbeben ausgelöst worden sind; bei Nr. 17 sind zusätzlich >420 Ereignisse aufgeführt, die ab 1790 aufgetreten sind; Datenquellen: 1) Starkel 1985; 2) Starkel 1997; 3) Alexandrowicz 1997; 4) Sorriso-Valvo 1997; 5, 6, 10, 11, 15-18) Brunsten und Ibsen 1997; 7) Rodolfi 1997; 8) Panizza et al. 1997; 9) Mantovani 1997; 12) Grunert und Hardenbicker 1997; 13) Jorda 1983; 14) Abele 1997

Darüber hinaus weist die Tabelle noch einige weitere Probleme auf: Generell wird schon von Aktivitätsphasen gesprochen, wenn nur ein Ereignis gefunden wurde. Es wird somit mit anderen Zeiträumen gleichgestellt, in denen mehrere Ereignisse mehr oder weniger gleichzeitig aufgetreten sind. Zur Ausweisung von Aktivitätsphasen sollte aber die Anzahl von Ereignissen innerhalb eines gewissen Zeitraums berücksichtigt werden. Ein weiteres Problem ist die Datierung an sich, da die dargestellte Aktivitätsphase umso länger ist, je größer der Fehler ist. Des Weiteren wurden bei Geländearbeiten zahlreiche Ereignisse gefunden, die nicht datiert werden konnten. Gibt es kontinuierliche Bewegungen über lange Zeiträume bzw. ganz offensichtliche Reaktivierungen, die aber nicht datiert werden können, so gehen diese in der Diskussion oft unter (z.B. Panizza et al. 1997). Bei der Aggregation zu Aktivitätsphasen werden einige Ereignisse somit u.U. nicht berücksichtigt (z.B. Alexandrowicz 1997 und Panizza et al. 1997).



Um die Aktivitätsphasen zu begründen, werden sehr oft generelle klimatische Charakteristika der klimatischen Perioden angeführt. Schaut man sich Temperatur- und Niederschlagszeitreihen von historischen Klimadaten der letzten 1000 Jahre von Glaser (2001, Abb. 2.11) an, so wird deutlich, dass es auch in warmen Perioden (z.B. Mittelalterliches Wärmeoptimum oder Modernes Klimaoptimum) kältere Phasen als während kalter Perioden (z.B. Kleine Eiszeit) gab und umgekehrt. Ähnlich verhält es sich mit dem Niederschlag. So sind in feuchteren Perioden durchaus trockenere Phasen zu finden als in trockeneren Perioden und umgekehrt. Letzteres wird besonders deutlich, wenn man noch höher aufgelöste jährliche und saisonale Daten betrachtet (Abb. 2.12). Zum einen ist eine noch viel höhere jährliche Variabilität der Niederschläge zu erkennen, so dass auch in eigentlich sehr trockenen Phasen einzelne extrem feuchte Jahre zu finden sind. Darüber hinaus finden sich selbst in sehr trockenen Jahren einzelne sehr feuchte Jahreszeiten.

Oft reichen einzelne Starkniederschläge schon aus, um gravitative Massenbewegungen auszulösen. Selbst bei größeren Ereignissen sind häufig nur ein oder zwei überdurchschnittliche feuchte Jahre kombiniert mit einem Extremereignis notwendig, um eine gravitative Massenbewegungen auszulösen. Die Abb. 2.11 und 2.12 verdeutlichen, dass diese Bedingungen auch in eigentlich sehr trockenen Phasen und Perioden erfüllt werden können, so dass eine Ausweisung von Phasen erhöhter Hangrutschungsaktivitäten auf Basis der generellen Charakteristika einzelner klimatischer Perioden so lange als problematisch erscheint, wie nicht eine absolute Häufung in einer solchen Phase berücksichtigt wird, sondern bereits einzelne datierte Ereignisse schon für die Ausweisung herangezogen werden.

Obwohl in den letzten Jahren keine wesentlichen Arbeiten hinzu gekommen sind, überrascht die folgende Aussage von Borgatti und Soldati (2002, S. 112): „*Indeed, the link between landslides and climate seems to be strong enough to justify its use in reconstructing past climate conditions.*“ Wenn überhaupt, so gilt diese Aussage nur für kleine, sehr gut untersuchte und klar abgegrenzte Gebiete und sollte nicht verallgemeinert werden.

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass die Datierung von gravitativen Massenbewegungen oft fehlerhaft war (siehe Kapitel 2.8), was wiederum Konsequenzen für die Einschätzung der holozänen Aktivität hat. Es bleibt zu vermuten, dass im Zweifelsfall die Aktivität nach wie vor oft unterschätzt wird. Sollte diese Vermutung zutreffen, so hätte dies eine große Bedeutung für die Gefahren und Risiken, die von gravitativen Massenbewegungen in der zu untersuchenden Region ausgehen. Besonders der Frage nach der heutzutage maximalen Magnitude von gravitativen Massenbewegungen kommt eine sehr große Bedeutung zu, die eng mit der Frage der holozänen Aktivität verbunden ist. Abschließend kann daher nur Brunsden und Ibsen 1997(1997, S. 403) zugestimmt werden: “[...] *there is a major need for fundamental research to systematically collect temporal data.*”

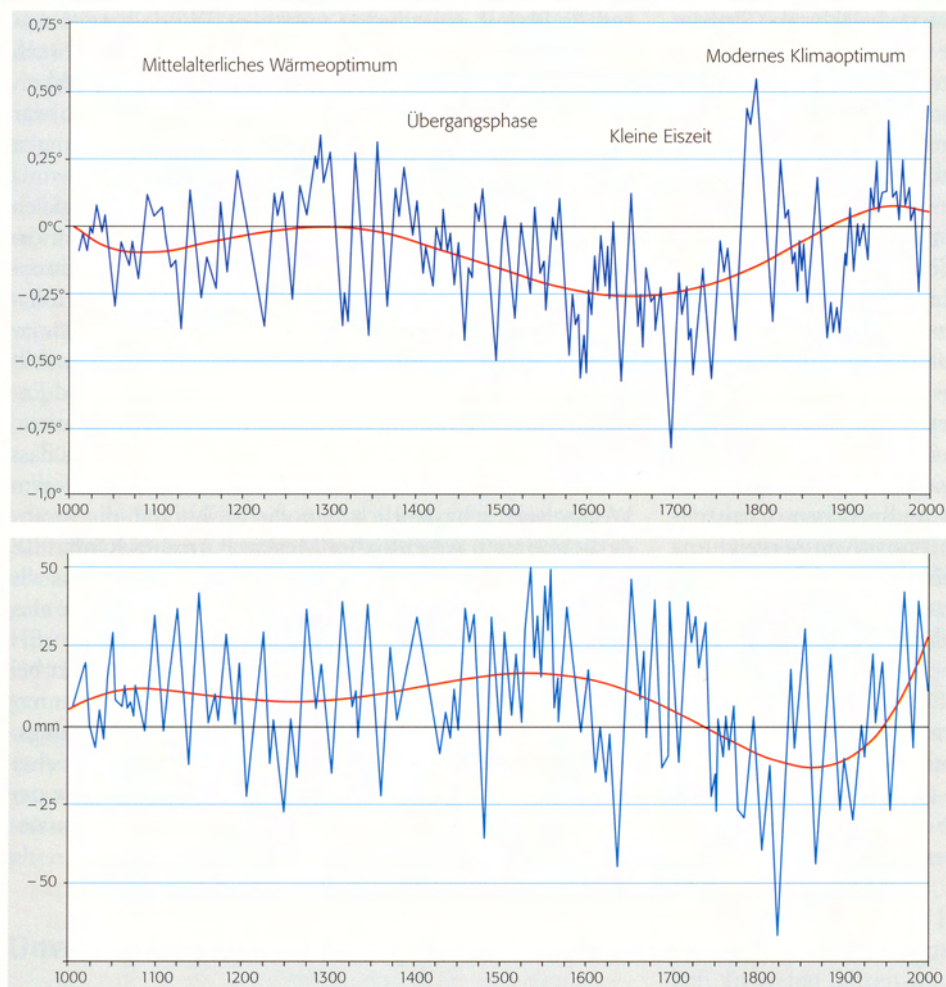


Abb. 2.11: Abweichung der Temperatur und des Niederschlags vom langfristigen Mittel in Mitteleuropa von 1000 bis 2000 (Anmerkung: blaue Linien = 31-jähriges gleitendes Mittel, rote Linien = langfristige Veränderung)(Glaser 2001)

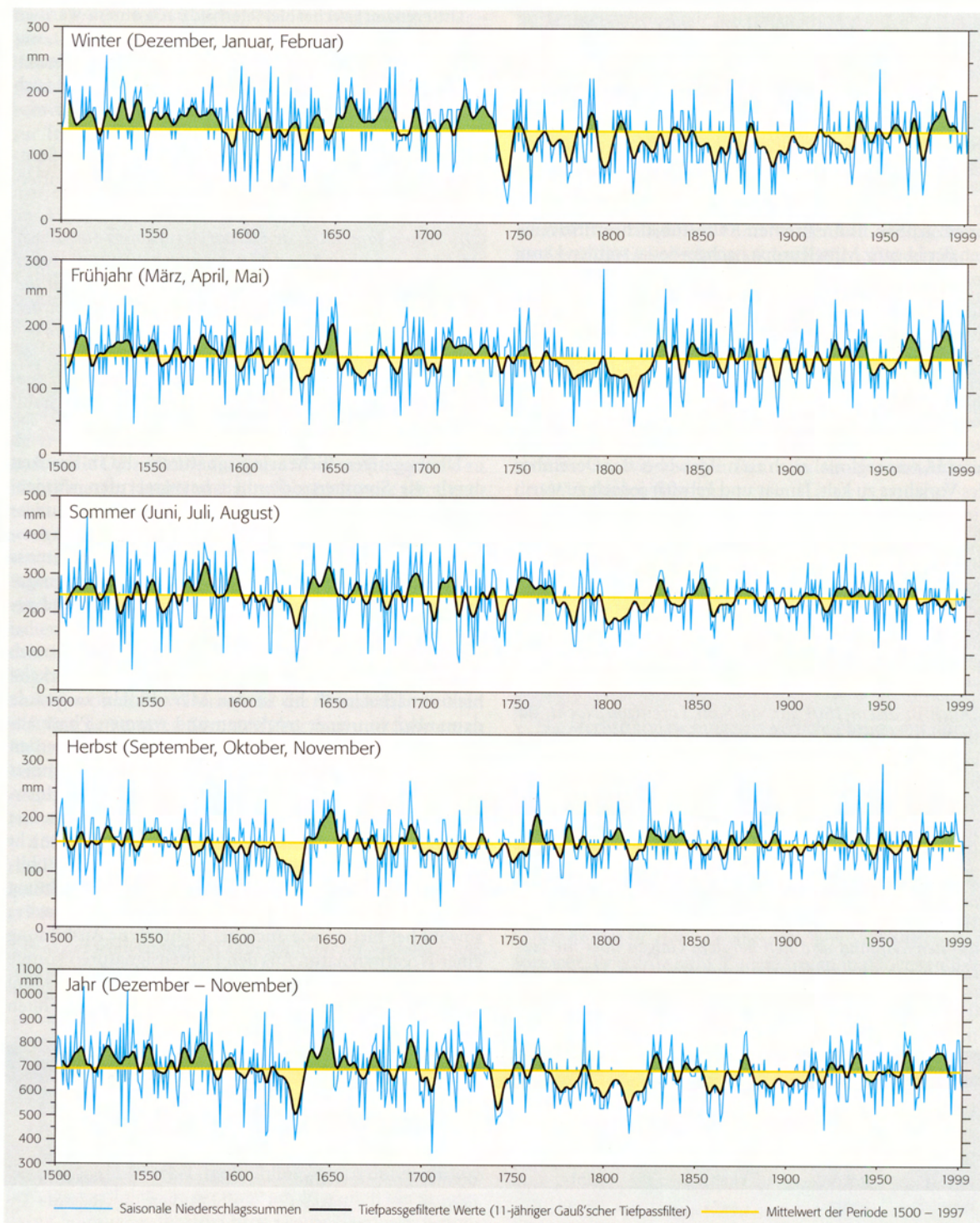


Abb. 2.12: Veränderung des jährlichen und saisonalen Niederschlags in Mitteleuropa von 1500-2000 (Glaser 2001)

### 3 Gravitative Massenbewegungen: Ereignis, Gefahr, Risiko

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Sichtweisen und die zentralen Begriffe der Risikoforschung definiert, sowie der Stand der Forschung zur Gefahren- und Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen diskutiert und in das holistische Konzept der „Risk Governance“ eingebunden.

#### 3.1 Verschiedene Sichtweisen und Definitionen

Naturkatastrophen sind immer das Resultat komplexer Interaktionen der natürlichen Umwelt mit verschiedensten Aspekten der Gesellschaft. In der Risikoforschung treffen daher eine Vielzahl unterschiedlichster Sichtweisen aufeinander, die generell in die zwei großen Bereiche der Naturwissenschaften und Sozialwissenschaften einzuordnen sind.

Übergreifend werden natürliche Prozesse, wie gravitative Massenbewegungen, als Naturereignisse betrachtet, solange sie nicht den Menschen oder dessen Eigentum bedrohen. Bei der Definition von Gefahr und Risiko divergieren die Ansichten.

Innerhalb des naturwissenschaftlichen Ansatzes wird die Gefahr (H) als die Eintretenswahrscheinlichkeit eines potenziell schadenbringenden Ereignisses einer bestimmten Magnitude, in einer bestimmten Zeit und in einem abgegrenzten Raum definiert (nach Varnes 1984, erweitert durch Guzzetti et al. 1999). Das Risiko (R) ist eine Funktion der Gefahr (H) und der möglichen Konsequenzen (C) daraus. Die Konsequenzen setzen sich dabei aus dem Schadenpotenzial der betroffenen Risikoelemente (z.B. maximaler ökonomischer Wert) sowie deren Vulnerabilität zusammen (von der Magnitude des Ereignisses abhängige Wahrscheinlichkeit, dass das Risikoelement komplett zerstört wird, ausgedrückt auf einer Skala von 0 (kein Schaden) bis 1 (komplette Zerstörung)). Die einfachste und gebräuchlichste Form der Berechnung des Risikos ist das Produkt der einzelnen Komponenten:  $R = H \times C$ . Das daraus resultierende Risiko wird entweder in Todesfallwahrscheinlichkeit pro Jahr oder Euro pro Jahr ausgedrückt. *„Die traditionelle naturwissenschaftliche Sicht auf das Naturgefahrenphänomen beinhaltet, dass dem natürlichen Ereignis oder Prozess die Verantwortung für die aufgetretenen Todesopfer und Sachschäden gegeben wird“* (Dikau und Weichselgartner 2005, S.21). Daher wurden lange Zeit nur technische Lösungen in Betracht gezogen, um potenzielle Katastrophen zu verhindern.

In den Sozialwissenschaften existiert zwar keine einheitliche Terminologie hinsichtlich Gefahr und Risiko, doch verdeutlichen die folgenden Definitionen den ganz anderen Zugang zu diesen Phänomenen. Nach Pohl (1998) und Pohl und Geipel (2002) wird ein Naturereignis in dem Moment zu einer Gefahr, wenn Menschen oder ihr Eigentum bedroht sind. Wenn darüber hinaus die betroffenen Personen oder Akteure Möglichkeiten haben, Entscheidung darüber zu treffen, ob sie die Gefahr eingehen wollen oder nicht, wird die Gefahr zum Risiko. Das Risiko ist demnach wesentlich mehr als nur ein mathematisches Produkt. *„Die Gefahr oder das Gefahrenpotenzial ist also da, aber*

*erst der Mensch produziert die Risiken!*“ (Pohl 1998, S. 156). Die Sozialwissenschaften beschäftigen sich insbesondere mit Fragestellungen nach der Wahrnehmung von Risiken, der Kommunikation über Risiken, der Akzeptanz von Risiken und v.a. der Vulnerabilität von Personen und Gesellschaften. Unter letzterer verstehen Blaikie et al. (1994) die Fähigkeiten einer Person oder Gruppe, Gefahren im Vorfeld zu erkennen, sich vorzubereiten, damit umzugehen und sich von einem eingetretenen Ereignis zu erholen. In den sozialwissenschaftlichen Sichtweisen wird deutlich, dass nicht nur das schadenbringende Ereignis selbst eine Katastrophe hervorruft, sondern erst durch die gesellschaftliche Inwertsetzung eine Katastrophe zu einer solchen wird.

Eine Naturkatastrophe ist nach UNDRP (1991) ein in Raum und Zeit konzentriertes Ereignis, bei dem eine Gesellschaft von einem Naturereignis massiv getroffen wird und derartige Verluste an Menschenleben oder materielle Schäden entstehen, dass die gesellschaftliche Struktur versagt und alle oder wesentliche Funktionen der Gesellschaft nicht mehr erfüllt werden können.

Mittlerweile *„gehört es [...] fast schon zum Allgemeinwissen, dass „Naturkatastrophen“ nicht nur etwas mit „Natur“ zu tun haben, sondern auch mit „Gesellschaft“. Doch so trivial die Erkenntnis von der gesellschaftlichen Bedingtheit von Katastrophen und Risiken auch erscheinen mag, sie hat erstaunlich lange gebraucht, um sich durchzusetzen“* (Müller-Mahn 2005, S.69). So war selbst die Internationale Dekade zur Reduzierung von Naturkatastrophen (IDNDR, 1990-1999) in den ersten Jahren noch stark von rein naturwissenschaftlichen Ansätzen geprägt. Erst auf der Konferenz in Yokohama (1994) wurde das Konzept der IDNDR verstärkt um gesellschaftliche Fragestellungen erweitert (Plate 1998). Aufgrund der nach wie vor aktuellen Problematik, die sich in zunehmenden Todesopfern und ökonomischen Schäden ausdrückt, werden die Aktivitäten der IDNDR im Rahmen der Internationalen Strategie für die Reduzierung von Katastrophen (ISDR) fortgesetzt.

Im folgenden Zitat von Albert Heim aus dem Jahre 1932 über Bergsturzopfer in den Alpen klingt bereits die Bedeutung der Risikowahrnehmung, der Vulnerabilität der betroffenen Bevölkerung, sowie die Notwendigkeit, Risikoanalysen durchzuführen und Frühwarnsysteme zu etablieren, an. Somit ist dieses Zitat von durchaus überraschender Aktualität: *„Überall, wenn wir die Geschehnisse sorgfältig nachprüfen, stellt sich heraus, dass dies sich so ereignet hat aus Mangel an Voraussicht, an Verständnis und aus stumpfsinniger Fahrlässigkeit, und dass es nicht so zu sein brauchte! Bergstürze erscheinen niemals plötzlich, eine Menge Vorboten kündigen sie an. Die Menschen haben diese Vorboten bemerkt, aber nicht gewürdigt, und sind nach eigenem Verstand und Unverstand dem Tode in die Arme gelaufen. Über 95% derselben hätten reichlich Zeit gehabt, zu fliehen schon Wochen vorher, Tage vorher, schliesslich Minuten vorher“* (A. Heim 1932, S.209f.).

*„Die Konzeption wirksamer und an physische und kulturelle Gegebenheiten angepasste Katastrophenvorsorgestrategien bedarf einer engen Zusammenarbeit zwischen natur- und sozialwissenschaftlicher Prozessforschung und planerisch-operativen Risikomanagement“* (Dikau und Weichselgartner 2005, S. 19). Die holistischen Konzepte, die dieses ermöglichen sollen, werden im folgenden Kapitel diskutiert.

### **3.2 Risk Governance und gravitative Massenbewegungen**

Umfassende Sicherheitskonzepte wurden zuerst im Bereich der technischen Risiken (v.a. im Zusammenhang mit Kernenergie und chemischen Anlagen) ab den 1960er Jahren entwickelt (Hollenstein 1997). Im Rahmen der Sicherheitsplanung wurde versucht, diese Konzepte auch auf Naturrisiken zu übertragen (z.B. Schneider 1980, Kienholz 1993). Diese bestanden aus den Teilsystemen Risikoanalyse und Risikobewertung sowie Maßnahmenplanung. Hollenstein (1997) entwickelte das Konzept weiter und führte das Risikomanagement anstelle der Maßnahmenplanung ein.

Während die Risikoanalyse der Frage „Was kann passieren?“ nachgeht und versucht, qualitative oder quantitative Aussagen hinsichtlich der Möglichkeit des Eintretens gefährlicher Prozesse und daraus resultierender Konsequenzen zu machen, beschäftigt sich die Risikobewertung mit der Frage „Was darf passieren?“. In dem Zusammenhang stellen die subjektive Risikowahrnehmung und die Risikoakzeptanz der betroffenen Bevölkerung die Untersuchungsobjekte dar. Innerhalb des Risikomanagements wird versucht, die Ergebnisse aus beiden Teilsystemen miteinander zu kombinieren und die geeignetsten sowie nachhaltigen Optionen zur Risikominimierung zu ergreifen. Dieser holistische Ansatz ist in der Zwischenzeit in ähnlicher Form weit verbreitet und wird auch im Bereich der gravitativen Massenbewegungen so vorgeschlagen (z.B. Einstein 1988, Leroi 1996, Einstein 1997, Fell und Hartford 1997, Australian Geomechanics Society 2000 und Fell et al. 2005). Der aktuelle Ansatz in der Schweiz wird als „Integrales Risikomanagement“ bezeichnet und besteht aus dem sogenannten Risikokzept (bestehend aus Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung), welches in eine „Strategische Risikokontrolle“ und in den „Risikodialog“ eingebunden ist. Der Ansatz wird weitestgehend gleichgestellt mit dem Ansatz des Risk Governance (Ammann 2006).

Risk Governance ist die neueste Weiterentwicklung des ganzheitlichen Risikoansatzes und wurde vom International Risk Governance Council (IGRC) entwickelt. „*Risk governance includes the totality of actors, rules, conventions, processes, and mechanisms concerned with how relevant risk information is collected, analysed and communicated and management decisions are taken*“ (Renn 2005, S. 22). Das Konzept ist multidisziplinär, multisektoral und multiregional. Es ist bewusst so angelegt, dass damit sowohl technische und soziale, als auch Naturrisiken lokal, regional und global bearbeitet werden können. Über die aktive Einbindung aller Akteure und der betroffenen Bevölkerung in den Entscheidungsfindungsprozess soll mehr Transparenz geschaffen und ein demokratischeres Vorgehen gewährleistet werden, das letztendlich zu einem Konsens und damit zu einer größeren Akzeptanz gegenüber den zu treffenden Maßnahmen führen soll (Renn 2005). Die Risikokommunikation stellt das zentrale Bindeglied zwischen allen Teilaspekten des Ansatzes dar.

Mit welcher Tiefe das Konzept umgesetzt werden kann, ist nach Renn (2005) abhängig von den drei wesentlichen Komponenten und Problembereichen im Umgang mit Risiken: Komplexität,

Unsicherheit und Ambiguität. Unter Komplexität wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass Kausalzusammenhänge infolge zahlreicher Einflussfaktoren oder langer Reaktionszeiten nur schwer identifizierbar und quantifizierbar sind. Unsicherheit bezieht sich darauf, dass gleiche oder ähnliche Einflüsse oft zu höchst unterschiedlichen Reaktionen führen. Sie umfasst daher Messfehler (z.B. durch Extrapolation von Untersuchungsergebnissen von einem Rutschkörper auf einen anderen), variable Systemreaktionen oder schlicht Unbestimmtheit und Nicht-Wissen, da aufwändige Untersuchungen zur Ermittlung aller Einflussfaktoren nicht möglich sind. Mit Ambiguität ist gemeint, dass die Ergebnisse der Risikoanalyse und der Risikobewertung unterschiedlich interpretiert werden können.

In Abb. 3.1 ist nach Renn et al. (2006) ein Stufenmodell des Risikomanagements zur Bewältigung von natürlichen Gefahren dargestellt. Es werden die vier Risikotypen einfach, komplex, unsicher und ambivalent ausgewiesen, denen bestimmte Naturgefahren zugeordnet werden.

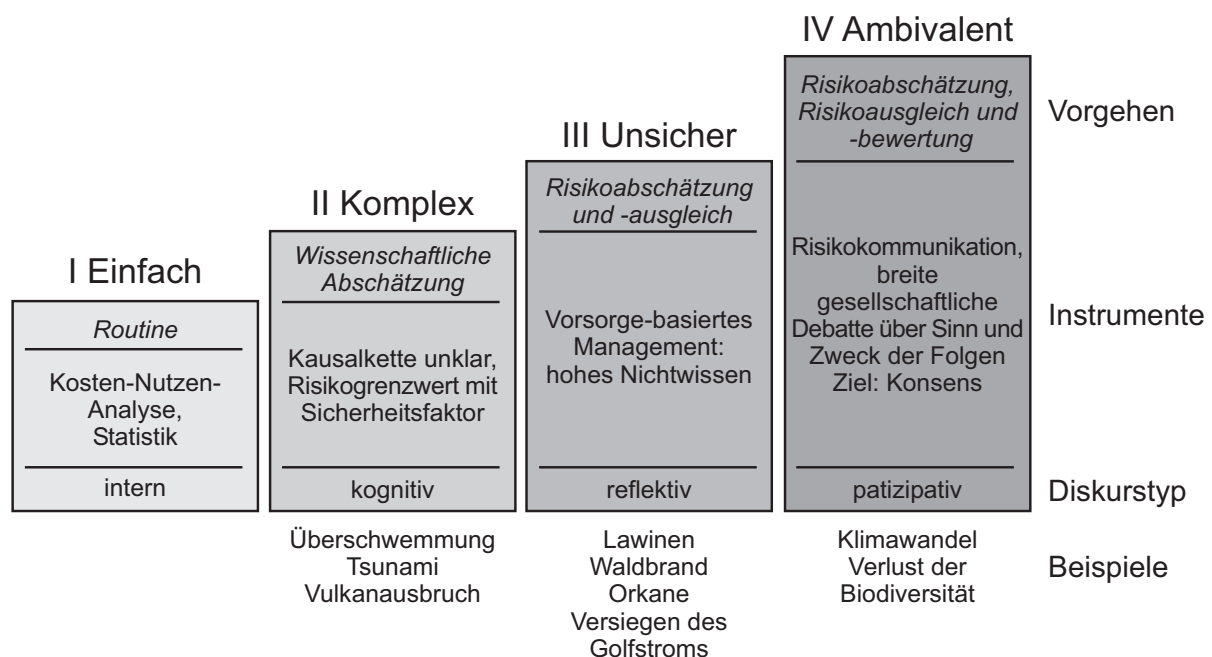


Abb. 3.1: Stufenmodell des Risikomanagements zur Bewältigung von natürlichen Gefahren (nach Renn et al. 2006)

Bezüglich dieser Zuordnung besteht sicherlich noch einiger Diskussionsbedarf, da ohne weiteres alle angeführten Beispiele auch dem Risikotyp „Ambivalent“ zugeordnet werden könnten. Gravitative Massenbewegungen sind komplex, enthalten teilweise ein hohes Maß an Unsicherheit und die Ergebnisse der Risikoanalyse sowie der Risikobewertung können unterschiedlich interpretiert werden. Somit erfüllen gravitative Massenbewegungen durchaus alle Risikotypenkriterien. Um den Risiken zu begegnen, wird nur eine umfassende Bearbeitung aller Teilaspekte (Risikoanalyse, Risikobewertung und Risikomanagement) unter Einbindung der lokal und regional betroffenen Bevölkerung zu einem für alle Seiten akzeptablen und nachhaltigen Risikomanagement führen. Trotz des bestehenden Forschungsbedarfes hinsichtlich der Optimierung des Ansatzes für Naturgefahren eignet sich das Risk Governance-Konzept, um die erwähnten Aspekte im Detail für gravitative Massenbewegungen zu

untersuchen. Unter Berücksichtigung der Vorgängerkonzepte ist in Abb. 3.2 eine modifizierte Form des Risk Governance-Konzeptes dargestellt.

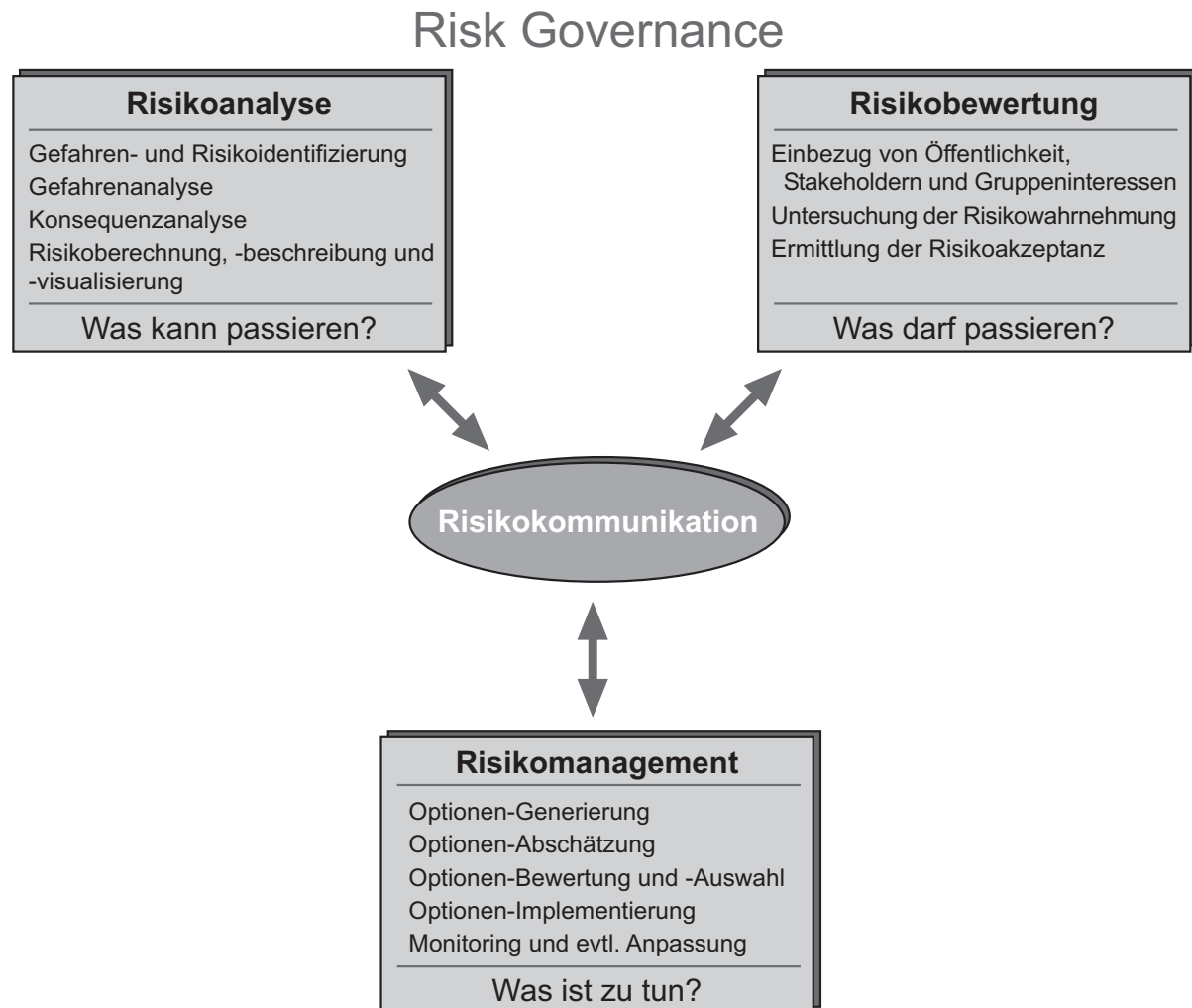


Abb. 3.2: Konzept des Risk Governance für gravitative Massenbewegungen (basierend auf Kienholz 1993, Hollenstein 1997, Australian Geomechanics Society 2000, Renn 2005, Ammann 2006, Renn et al. 2006)

Im Folgenden wird auf die einzelnen Teilbereiche mit Fokus auf gravitative Massenbewegungen näher eingegangen. Obwohl die Gefahrenanalyse ein Teilaspekt der Risikoanalyse ist, wird sie auf Grund der zentralen Bedeutung für diese Arbeit in einem eigenem Kapitel behandelt.

### 3.2.1 Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen

Die Gefahrenanalyse gravitativer Massenbewegungen (*landslide hazard analysis*) setzt sich zusammen aus der Analyse der Anfälligkeit oder Gefährdung (*susceptibility*) und der Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen einer bestimmten Magnitude. Gefahren- und Gefährdungsanalyse werden in der Literatur oft verwechselt oder synonym verwendet. Die Gefährdungsanalyse gibt Auskunft über die „[...] *probability of spatial occurrence of slope failures, given a set of geo-environmental conditions*“ (Guzzetti 2005, S. 113). Sie beantwortet somit die Frage



„Wo kann was auftreten?“. Die Gefahrenanalyse geht einen Schritt weiter und versucht die Frage „Wann oder wie häufig wird ein Ereignis einer bestimmten Magnitude wo auftreten?“.

### **3.2.1.1 Gefährdungsanalyse**

Um die Frage „Wo?“ beantworten zu können, stehen verschiedene Methoden zur Auswahl. Qualitative Methoden umfassen die Erstellung von Inventaren und die heuristische Analyse. Statistische Analysen und prozessbasierte oder numerische Analysen stellen quantitative Methoden dar.

Der Erstellung von Inventaren gravitativer Massenbewegungen kommt eine zentrale Bedeutung zu, da sie in den meisten Fällen die Basis für alle fortgeschrittenen Methoden darstellt (Soeters und van Westen 1996). Inventarkarten geben Auskunft über die räumliche Verteilung kartierter gravitativer Massenbewegungen (z.B. Guzzetti et al. 2000, Brennecke 2006). Wird eine Unterscheidung zwischen inaktiven und aktiven gravitativen Massenbewegungen getroffen (z.B. Carrara et al. 2003), so stellt die Karte eine einfache Form einer qualitativen Gefahrenkarte dar. Die Analyse der Dichte der gravitativen Massenbewegungen kann eine Auskunft über die Frequenz der Ereignisse geben (Guzzetti 2005) und somit ebenfalls als eine Form der Gefahrenanalyse betrachtet werden (z.B. Guzzetti et al. 2000, Ardizzone et al. 2002, Chau et al. 2003, Baum et al. 2005). Aber „[...] *due to uncertainties and errors associated with landslide inventories and to the complexity of landslide phenomena, estimates of the probability of spatial occurrence of slope failures based solely on landslide density may be misleading or incorrect*“ (Guzzetti 2005, S. 120). Diese Aussage wird durch das folgende Beispiel von Ardizzone et al. (2002) gestützt: In einem Untersuchungsgebiet in Italien wurden drei voneinander unabhängige Inventare gravitativer Massenbewegungen durch drei Geomorphologengruppen erstellt. Das Ergebnis war, dass bei einem Vergleich von jeweils zwei Inventaren die räumlichen Diskrepanzen 55-65% betragen, bei einem Vergleich von allen Inventaren gleichzeitig sogar 80%. In Abb. 3.3 sind die Unterschiede für einen kleinen Ausschnitt dargestellt. Müssten allein auf Basis dieser Inventare Maßnahmen zur Reduzierung der Risiken getroffen werden, so könnte das insbesondere für die Ortschaft B zu folgenschweren Fehlentscheidungen führen. Durch die Erstellung von Dichtekarten für die jeweiligen Inventare konnten die Unstimmigkeiten auf 21-25% reduziert werden. Eine Diskriminanzanalyse für zwei der Inventare reduzierte die Unstimmigkeiten auf 15%.

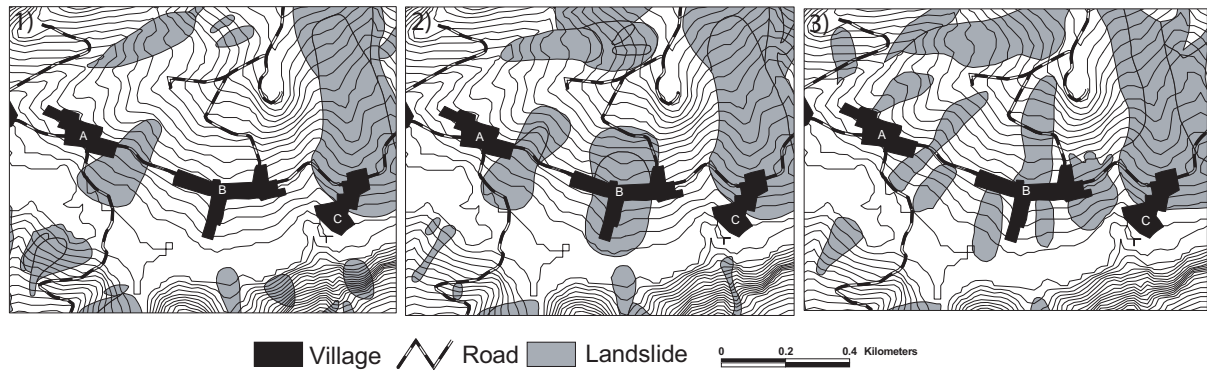


Abb. 3.3: Vergleich dreier, unabhängig voneinander erstellter Inventare von gravitativen Massenbewegungen im Siedlungsbereich (nach Ardizzone et al. 2002). Die Inventare (1-3) wurden von drei unterschiedlichen Geomorphologengruppen erstellt.

Die heuristische Analyse basiert auf Expertenwissen über die Ursachen von gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet (Carrara et al. 1992). Unter Nutzung der Erfahrungen und des Wissens über gravitative Massenbewegungen, kombiniert mit der Kartierung von Ereignissen in ihrem geomorphologischen Umfeld, schätzt der Experte die Gefährdungen einer Region ein. Nach Soeters und van Westen (1996) können die geomorphologische Analyse (z.B. Kienholz et al. 1984, Cardinali et al. 2002 und Reichenbach et al. 2005) und die Verschneidung qualitativer Karten (z.B. Pachauri et al. 1998, Nagarajan et al. 2000, Dikau und Glade 2003, Moreiras 2005, Petley et al. 2005a und Fourniadis et al. 2006) unterschieden werden. Bei letzterer werden die Faktoren, die zur Instabilität führen können, klassifiziert und (gewichtet) miteinander kombiniert. Der Nachteil der heuristischen Analyse ist der hohe Grad an Subjektivität, so dass die endgültigen Ergebnisse teilweise schwer nachvollziehbar sind. Die Qualität der Ergebnisse hängt sehr stark von der Erfahrung des Bearbeiters und von der Kenntnis des Untersuchungsgebietes mitsamt der darin stattfindenden geomorphologischen Prozesse ab (Guzzetti 2005). Ein großes Potenzial der Methode besteht darin, dass über die Einschätzung des Experten komplexe Zusammenhänge u.U. erfasst und dargestellt werden können, bei denen andere Verfahren versagen, da die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten solche Aspekte nicht abbilden können.

Die am häufigsten eingesetzte Methode zur Gefährdungsmodellierung ist die statistische Analyse. Es werden Faktoren genutzt, die in der Vergangenheit zu gravitativen Massenbewegungen geführt haben, um statistische Beziehungen zwischen ihnen und dem Auftreten von gravitativen Massenbewegungen abzuleiten. Unter der Annahme, dass in Zukunft die gravitativen Massenbewegungen unter ähnlichen Faktorenkonstellationen auftreten, werden die statistischen Beziehungen anschließend in den Raum extrapoliert, um entsprechend gefährdete Bereiche auszuweisen. Es handelt sich um einen quantitativen Ansatz, dessen Ergebnisse sich als Basis für qualitative und quantitative Gefahrenkarten eignen. Die Bandbreite unterschiedlicher statistischer Verfahren, die im Bereich gravitativer Massenbewegungen eingesetzt werden ist groß und umfasst u.a. folgende:

- a) bivariate Analyse (z.B. Ayalew et al. 2004 und Sützen und Doyuran 2004),

- b) multiple Regressionsanalyse (z.B. Carrara 1983 und Chung et al. 1995),
- c) Diskriminanzanalyse (z.B. Carrara 1983, Carrara et al. 1992, Carrara et al. 1995, Dhakal et al. 1999, Baeza und Corominas 2001, Ardizzone et al. 2002, Carrara et al. 2003, Guzzetti 2005 und Guzzetti et al. 2006b),
- d) logistische Regression (z.B. Jäger und Wieczorek 1994, Jäger 1997, Atkinson und Massari 1998, Thein 2000, Lee und Min 2001, Dai und Lee 2002, Ohlmacher und Davis 2003, Dai et al. 2004, Lee 2004, Süzen und Doyuran 2004, Ayalew und Yamagishi 2005, Brenning 2005, Chau und Chan 2005 und Van Den Eeckhaut et al. 2006),
- e) Neuronale Netzwerke (z.B. Fernández-Steege et al. 2002, Lee et al. 2003 und Catani et al. 2005a),
- f) Support Vector Machines (z.B. Brenning 2005),
- g) Bayes'sche Statistik (z.B. Chung und Fabbri 1999, Lee et al. 2002, Neuhäuser 2005 und Neuhäuser und Terhorst 2006),
- h) Fuzzy Logic (z.B. Chung et al. 2003, Tangestani 2003, Chung et al. 2006 und Dewitte et al. 2006, Lee 2006),
- i) Likelihood Ratio (z.B. Lee 2004, Amlang 2005, Chung und Fabbri 2005, Hohlweck 2005, Chung 2006 und Demoulin und Chung 2007).

Die Kritik gegenüber der gängigen Praxis in der statistischen Gefährdungsmodellierung wird in folgendem Zitat sehr gut zusammengefasst: „... *many investigators are interested chiefly in applying different statistical methods, and much less concerned in: (i) collecting detailed, high quality information related to slope failures, (ii) identifying new environmental parameters useful to the assessment of landslide susceptibility, (iii) validating quantitatively the model results, (iv) explaining the geomorphological aspects of terrain zoning for landslide susceptibility models. This is rather unfortunate because it leads investigators to focus on the tool (a classification technique) rather than on the target (an optimal landslide susceptibility assessment). Also disappointing is the fact that [...] very few attempts to quantitatively compare susceptibility models prepared by different methods, critically evaluating their advantages and limitations, are available*” (Guzzetti 2005, S. 127).

Prozessbasierte und numerische Analysen basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Modellen, die die Hangstabilität berechnen. Das Ergebnis sind quantitative Aussagen zur Hangstabilität, meist ausgedrückt mit dem Sicherheitsfaktor (FoS). Der Vorteil dieser Analysen ist, dass dadurch wichtige Erkenntnisse über die Ursachen von gravitativen Massenbewegungen gewonnen werden können (Carrara et al. 1992). Aber je komplexer die Modelle sind, desto mehr Eingangsdaten benötigen sie, die sehr oft und v.a. für große Untersuchungsgebiete nicht zu erheben sind. Des Weiteren gilt: *“Deterministic methods are applicable only when the geomorphic and geologic conditions are fairly homogenous over the entire study area and landslide types are simple”* (Soeters und van Westen 1996, S.135). Für einen großräumigen Einsatz steht derzeit für Rutschungen nur das Infinite Slope Modell zur Verfügung, welches nur Aussagen über die Stabilität von

flachgründigen Translationsrutschungen machen kann. Der Komplexitätsgrad der Modelle variiert, insbesondere in Abhängigkeit des verwendeten hydrologischen Ansatzes (z.B. Montgomery und Dietrich 1994, Pack et al. 1998, Gritzner et al. 2001, Möller et al. 2001, van Beek 2002, Casadei et al. 2003, van Beek und van Asch 2004, Baum et al. 2005, Claessens et al. 2005, Acharya et al. 2006, Meisina und Scarabelli 2006, Thiebes 2006).

Abschließend ist zu erwähnen, dass die entsprechenden Ansätze zur Gefährdungsmodellierung nur in Abhängigkeit von der jeweiligen Skale sinnvoll eingesetzt werden können. Empfehlungen dazu sind in Tab. 3.1 dargestellt. Eine umfassende Übersicht über verschiedenste Arbeiten zur Gefährdungsanalyse in unterschiedlichen Regionen der Welt geben Glade und Crozier (2005b).

Tabelle 3.1: Empfehlungen zur skalenangepassten Verwendung von unterschiedlichen Methoden zur Gefährdungsanalyse (nach Glade und Crozier 2005b, basierend auf Soeters und van Westen 1996)

Maßstab	Qualitative Methoden		Quantitative Methoden	
	Inventar	Heuristische Analyse	Statistische Analyse	Prozessbasierte und numerische Analysen
<1:10.000	Ja	Ja	Ja	Ja
1:15.000 - 1:100.000	Ja	Ja	Ja	Ja
1:125.000 - 1:500.000	Ja	Ja	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
>1:750.000	Ja	Ja	Nein	Nein

### 3.2.1.2 Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit

Die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit gestaltet sich für gravitative Massenbewegungen nicht nur auf Grund ihres lokalen Auftretens viel schwieriger als z.B. für Hochwasser, sondern auch wegen der Frage der Materialverfügbarkeit. Während bei Hochwasser und Schneelawinen immer wieder neues „Material“ in Form von Niederschlägen bereit gestellt werden, muss bei gravitativen Massenbewegungen zusätzlich zu den auslösenden Niederschlägen Material in Form von Locker- oder Festgestein zur Verfügung stehen. Gerade letzteres führt dazu, dass es große Unterschiede in der Abschätzbarkeit der Wiederkehrintervalle zwischen den verschiedenen Typen von gravitativen Massenbewegungen gibt.

So ist es z.B. für Muren, in deren Einzugsgebiet ausreichend Sediment verfügbar ist, durchaus möglich, die Eintrittswahrscheinlichkeit über die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von potenziell Murgang auslösenden Niederschläge zu ermitteln. Schwieriger gestaltet es sich, wenn ein Murgang die verfügbaren Sedimente aus seinem Einzugsgebiet ausräumt und in naher Zukunft die verfügbaren Sedimentspeicher somit weitestgehend leer bleiben. In so einem Fall wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein nachfolgendes Ereignis erheblich verringert, da diese zusätzlich von

der Auffüllrate der Sedimentspeicher durch Solifluktion und/oder Hangrückverwitterung abhängig ist (Glade 2005). Auf eine ähnliche Problematik im Zusammenhang mit anderen Prozesstypen weisen Crozier und Preston (1999) und Hungr (2004) hin.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen kann durch folgende Ansätze abgeschätzt werden (basierend auf IUGS Working Group on Landslides - Committee on Risk Assessment 1997, Lee und Jones 2004 und Fell et al. 2005):

- a) auf Basis historischer Zeitreihen (z.B. Ibsen und Brunsden 1996, Cruden 1997, Cardinali et al. 2002 und Guzzetti 2005),
- b) durch Experteneinschätzung (u.a. unter Verwendung geomorphologischer oder geotechnischer Indikatoren; z.B. Crozier 1984, Moon et al. 1992, Morgan et al. 1992, Bell 2002 und Bell und Glade 2004a),
- c) über die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von Faktoren, die gravitative Massenbewegungen auslösen (z.B. Finlay et al. 1997, Glade 1998, Crozier 1999b, Glade et al. 2000, Bell 2002 und Bell und Glade 2004a),
- d) durch Hangstabilitätsmodellierungen (z.B. Moon et al. 1996),
- e) mittels Frequenz-Magnitude-Analysen (z.B. Hungr et al. 1999, Guzzetti et al. 2003 und Guthrie und Evans 2005).

Eine ausführliche Diskussion der unterschiedlichen Ansätze findet sich in Mostyn und Fell (1997), Lee und Jones (2004) und Picarelli et al. (2005). Die besondere Herausforderung besteht darin, die Eintrittswahrscheinlichkeit den einzelnen potenziellen Rutschkörpern zuzuweisen, was v.a. in räumlichen Analysen große Schwierigkeiten bereitet. „*Even if extensive investigation is carried out, assessing the probability of landsliding (particularly for an unfailed natural slope) is difficult and involves much uncertainty and judgement*“ (Australian Geomechanics Society 2000, S. 58).

### **3.2.1.3 Qualitative und quantitative Gefahrenanalysen**

Die einfachste Methode zur Erstellung qualitativer Gefahrenkarten aus statistischen Analysen ist die Einteilung der Ergebnisse der Gefährdungsanalyse in mehrere Gefahrenklassen. Dem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass die Bereiche, die die höchste Gefährdung aufweisen, auch die Bereiche sind, in denen am ehesten mit gravitativen Massenbewegungen zu rechnen ist. Somit ist darin eine Zeitkomponente impliziert. Einen empirischen Beweis für die Plausibilität dieser Annahme stellt die Arbeit von Petley et al. (2005a) dar. Insbesondere bei rasterbasierten Ansätzen bleibt allerdings die Magnitude des potenziellen Ereignisses außen vor. Bei diesem Ansatz kommt der Festlegung der Grenzwerte der jeweiligen Klassen, die letztendlich subjektiv zu treffen ist, eine große Bedeutung zu. Eine qualitative Gefahrenkarte findet sich z.B. bei Davertzhofen (2001), Glade et al. (in Vorbereitung) und Chau et al. (2004). Unter ähnlichen Annahmen können auch qualitative Gefährdungskarten, die mittels anderer Verfahren (z.B. heuristische Methoden) erstellt wurden, in qualitative Gefahrenkarten überführt werden. Die Unterschiede zwischen qualitativen Gefährdungs- und Gefahrenkarten liegen demnach im Wesentlichen in den jeweils zu Grunde liegenden Annahmen bzw. in der jeweiligen

Interpretation der Ergebnisse. In der Tatsache, dass die entsprechenden Annahmen bzw. Interpretationen in der Literatur oft nicht deutlich herausgearbeitet werden, liegt wahrscheinlich der Hauptgrund für die Begriffsverwirrungen.

In der Schweiz werden qualitative Gefahrenkarten für gravitative Massenbewegungen mittels einer Intensitäts-Wahrscheinlichkeits-Matrix erstellt. Auf Basis von geomorphologischen Kartierungen und Prozessmodellierungen werden unter Nutzung festgelegter Kriterien sowohl Intensität als auch Wahrscheinlichkeit prozessspezifisch abgeschätzt und über die Matrix einer von vier Gefahrenklassen zugeordnet. Die qualitativen Gefahrenkarten sind als sogenannte Gefahrenzonenpläne gesetzlich verankert. Die einzelnen Zonen (bzw. Gefahrenklassen) unterliegen bestimmten Nutzungsvorschriften (siehe BUWAL/BWW/BRP 1997, Petrascheck und Kienholz 2003 und Lateltin et al. 2005).

Cardinali et al. (2002) und Reichenbach et al. (2005) nutzen die geomorphologische Analyse, um auf Basis eines multi-temporalen Inventars gravitativer Massenbewegungen den einzelnen Objekten quantitative Gefahrenindices zuzuweisen, die sich aus Frequenz (abgeleitet aus dem multi-temporalen Inventar) und Intensität (qualitativ abgeschätzt aus Volumen und Geschwindigkeit der Einzelobjekte) zusammensetzen. Eine Einschränkung der Karte ist, dass sie nur Gefahreninformationen für bereits bekannte gravitative Massenbewegungen enthält. Ein ähnlicher Ansatz wird von Sorriso-Valvo (2005) verfolgt.

Zur Erstellung quantitativer Gefahrenkarten nutzen Bell und Glade (2004a) und Bell und Glade (2004b) ein empirisches Murgangmodell bzw. ein deterministisches Steinschlagmodell zur Ausweisung von magnitude-abhängigen Reichweitenzonen, für die sie entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Prozesse bestimmen. Für Murgänge nutzen sie die Wiederkehrwahrscheinlichkeit potenziell Murgang auslösender Niederschläge. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Steinschlägen wird auf Basis geomorphologischer Indikatoren geschätzt.

Fabbri et al. (2004), Chung und Fabbri (2005) und Chung (2006) schlagen zur Erstellung quantitativer Gefahrenkarten folgendes Vorgehen vor: Zuerst sollte eine Gefährdungskarte mittels statistischer Analysen erstellt werden, die in 200 oder 1000 Klassen eingeteilt werden kann. Anschließend wird der Anteil der vergangenen gravitativen Massenbewegungen in jeder einzelnen Gefährdungsklasse berechnet. Dazu ist es notwendig, den Datensatz zeitlich zu separieren und die erste Hälfte für die Generierung der Gefährdungskarte zu nutzen und die zweite zur Validierung. Auf Basis des Zeitraums zwischen den geteilten Datensätzen sowie der Anzahl der in diesem Zeitraum stattgefundenen Ereignisse wird die Anzahl zukünftiger Ereignisse für einen gleichgroßen Zeitraum abgeschätzt. Über diese Informationen wird die Anzahl der zukünftig von gravitativen Massenbewegungen betroffenen Pixel berechnet und unter Annahme, dass sich die Pixel genauso wieder auf die Gefahrenklassen verteilen, die Wiederkehrwahrscheinlichkeit berechnet. Abgesehen davon, dass diese schwerwiegende Annahme aus geomorphologischer Sicht sehr kritisch zu sehen ist, kann dieser Ansatz dazu führen, dass zum einen geringer gefährdeten Klassen höhere Wahrscheinlichkeiten zugewiesen werden oder

einzelnen höher gefährdeten Klassen eine Nullwahrscheinlichkeit zugewiesen wird, da bei der Analyse kein Ereignis dieser Klasse zugewiesen wurde (siehe Beispiel in Chung 2006). Um diese Probleme zu umgehen, schlagen die Autoren die Alternative vor, eine an die Häufigkeitsverteilung angepasste Funktion zu verwenden, um die Lücken zu schließen und die Ausreißer zu kappen. Jedoch ist hier kritisch anzumerken, dass gerade der empirische Befund die Verwendung einer solchen Funktion schon in Frage stellt. Des Weiteren wird in diesem Ansatz die Eintrittswahrscheinlichkeit nicht an die Magnitude von Einzelereignissen gekoppelt. Unter Magnitude wird in dem Ansatz nur die Anzahl der im Raum verteilten, von gravitativen Massenbewegungen betroffenen Pixel verstanden.

Catani et al. (2005a) erstellen quantitative Gefahrenkarten für gravitative Massenbewegungen auf Basis einer Gefährdungsmodellierung mittels Neuronaler Netzwerke. Anstelle eines rasterbasierten Ansatzes verwenden sie „Unique Condition Units“. Die Wiederkehrsperioden (fünf Klassen) berechnen sie auf Basis von Geländeuntersuchungen und weisen diese entweder den kartierten Rutschungen direkt oder ansonsten den ermittelten Gefährdungsklassen zu. Wie letzteres konkret umgesetzt wird, bleibt unklar. Zudem integrieren sie die Intensität der gravitativen Massenbewegungen, indem sie das Volumen für die kartierten Rutschungen auf Basis des Ansatzes des halben Ellipsoiden (siehe Gleichung 1, Kap. 2.7) berechnen. Für die restlichen Bereiche wählen sie einen statistischen Ansatz, dessen Umsetzung ebenfalls unklar bleibt. Inwieweit die Wiederkehrsperiode an die Intensität gekoppelt ist, welches per Definition erforderlich wäre, wird nicht gesagt. Gerade diese unklaren Bereiche sind jene, die für eine Beurteilung des Ansatzes sehr wichtig wären. Eine Validierung erfolgt aus Gründen der Datenverfügbarkeit nur für die Gefährdungsmodellierung.

Ein neuer, umfassender Ansatz stammt von Guzzetti et al. (2005) und Guzzetti et al. (2006a). Unter der Verwendung von einheitlichen „Terrain Units“ berechnen sie die Gefahr von gravitativen Massenbewegungen als Produkt aus Gefährdung, Magnitude und Wiederkehrsperiode unter der Annahme, dass alle drei Faktoren unabhängig voneinander sind. Die Gefährdung berechnen sie mittels einer Diskriminanzanalyse. Die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Ereignismagnitude leiten sie aus einer Frequenz-Magnituden Analyse bisheriger Ereignisse ab. Die Wiederkehrsperiode wird für jede einzelne „terrain unit“ über ein umfangreiches multi-temporales Inventar gravitativer Massenbewegungen berechnet. Validierungsansätze liefern sie sowohl für die Gefährdungsanalyse als auch für die Wiederkehrsperiode. Des Weiteren liefern sie verschiedene Gefahrenszenarien für unterschiedliche Zeiträume. Die Hauptkritik an dem Ansatz ist in der zentralen Annahme der Unabhängigkeit der einzelnen Variablen zu sehen, die sie selbst kritisch diskutieren. Insbesondere die Trennung von Magnitude und Wiederkehrsperiode ist sehr problematisch zu sehen, da sie entgegen der eigentlichen Definition von Gefahr steht. Der Ansatz zeigt, dass die einheitlichen Geländeeinheiten viele Vorteile zur Berechnung der Gefahr bringen. Gleichzeitig stellt dies aber auch ein Nachteil dar, da letztendlich nicht gesagt werden kann, in welchem Bereich dieser Einheit eine gravitative Massenbewegung auftreten wird.

### **3.2.1.4 Validierung**

Die Validierungsmöglichkeiten sind sehr unterschiedlich, je nachdem ob die Gefährdungsanalyse oder die Gefahrenanalyse zu validieren ist. Die besten Möglichkeiten bestehen noch bei der Gefährdungsanalyse. Doch auch hier wurde eine echte Validierung lange Zeit vernachlässigt. Im Folgenden soll kurz auf die teils heute noch gängige Praxis im Bereich der statistischen Ansätze eingegangen werden.

Zur Abschätzung der Güte einer statistischen Gefährdungskarte wurden und werden sehr oft die Anteile der vergangenen gravitativen Massenbewegungen in den höchsten Gefährdungsklassen berechnet. Dies führt dazu, dass in der Literatur überwiegend mindestens 70-80% der vergangenen Ereignisse erklärbar sind und den Modellen eine hohe Verlässlichkeit zugesprochen wird. In vielen Fällen werden aber die gravitativen Massenbewegungen, die zur Erstellung des Modells genutzt wurden, gleichzeitig dazu verwendet, die Güte des Modells zu bestimmen, d.h. es erfolgt keine Trennung in Trainings- und Testdatensatz. Dies führt unweigerlich zu überhöhten Werten und einer Überschätzung der Verlässlichkeit des Modells. Ein anderes großes Problem stellt die Festlegung der Grenzwerte für die jeweiligen Gefährdungskarten dar. Selbst bei der Verwendung einer einheitlichen Methode finden sich stark variierende Grenzwerte. In Tab. 3.2 sind, beispielhaft für die logistische Regression, die jeweils verwendeten Grenzwerte der Gefährdungsklassen, die Kriterien zu deren Auswahl und Informationen zum Trainingsdatensatz sowie zur Modellgüte anhand aktueller Arbeiten aufgeführt. Eine etwas andere Übersicht mit Fokus auf den Gütekriterien findet sich in Brenning (2005).



Tab. 3.2: Variierende Klassengrenzen und Gütekriterien bei der Gefährdungsmodellierung mittels logistischer Regression

Gefährdungsklassen	Ayalew und Yamagishi (2005)	Dai und Lee (2002)	Dai et al. (2004)	Ohlmacher und Davis (2003)	Chau und Chan (2005)	Lee und Min (2001)	Lee und Sambath (2006)	Süzen und Doyuran (2004)
extrem gering	0 - 0,02	-	-	-	-	0	-	-
sehr gering	0,03 - 0,09	0 - 0,2	0 - 0,25	<0,001	0 - 0,2	0,01 - 0,03	0 - 0,000013	0 - 0,25
gering	0,1 - 0,16	0,2 - 0,35	0,25 - 0,5	0,001 - 0,01	0,201 - 0,35	0,04 - 0,07	0,000014 - 0,000028	0,25 - 0,5
mittel	0,17 - 0,23	0,35 - 0,5	0,5 - 0,75	0,01 - 0,1	0,351 - 0,5	0,08 - 0,11	0,000029 - 0,000048	0,5 - 0,75
hoch	0,24 - 0,89	>0,5	>0,75	>0,1	>0,5	0,12 - 0,18	0,000049 - 0,010706	0,75 - 1
sehr hoch	-	-	-	-	-	0,19 - 0,994	-	-
Anzahl GM/keine GM (in Pixel) im Trainingsdatensatz	???: gesamt: 1.054.768; sehr ungleiche Verteilung	2.135/2.135	1.465/1.465	???: gesamt: 2.022.861; sehr ungleiche Verteilung	1.834/1.834; 1.115/1.115; 719/719	11.735/658.790	89/6.560.383	4.430/4.430; GM-Pixel aus ungestörter Pufferzone um Anrissgebiete von 49 GM
Güte	AUROC: 0,8358; kein unabhängiger Testdatensatz	85,2% (bei $p > 0,5$ ); kein unabhängiger Testdatensatz	81% (bei $p > 0,5$ ); kein unabhängiger Testdatensatz	Gut (visueller Vergleich); kein unabhängiger Testdatensatz	74,4%; 73,7%; 79,3% (bei $p > 0,5$ ); Kreuzvalidierung	? (ungleiche Klassengrenzen in Karte und Gütetabelle)	86,37%; AUROC: 0,8637; kein unabhängiger Testdatensatz	77,3%; 3 teilweise unabhängige Testdatensätze (nur Nicht-GM-Pixel ausgewechselt)
Kriterium für Klassengrenzen	Vielfache der Standardabweichung; andere getestet und verworfen (u.a. gleiche Pixelanzahl pro Klasse)	Experten-einschätzung, basierend auf Histogramm	Experten-einschätzung	exponentielle Klasseneinteilung	?	gleiche Pixelanzahl pro Klasse	gleiche Pixelanzahl pro Klasse	?

GM = gravitative Massenbewegung; AUROC = Area under ROC-Curve (siehe Kap. 5.1.4)

Auf die Bedeutung der Validierung innerhalb der räumlichen Gefahrenanalyse wurde v.a. von Chung und Fabbri (1999, 2003, 2005) hingewiesen. „*In prediction modelling, the most important and the absolutely essential component is to carry out a validation of the prediction results. Without some kind of validation, the prediction model and image are totally useless and have hardly any scientific significance*“ (Chung und Fabbri 2003, S. 460). Sie schlagen insbesondere drei Verfahren vor, die zur Validierung genutzt werden können: zufällige, räumliche und zeitliche Kreuzvalidierung. Wichtig bei allen Verfahren ist, dass Trainings- und Testdatensätze voneinander unabhängig sind.

Bei der zufälligen Kreuzvalidierung wird das Inventar gravitativer Massenbewegungen zufällig in einen Trainings- und einen Testdatensatz aufgeteilt. Bei der räumlichen Kreuzvalidierung wird das Untersuchungsgebiet in zwei oder mehr Teilbereiche aufgeteilt. Ein Teilbereich wird für die Erstellung eines Gefährdungsmodells genutzt, welches auf die anderen Teilbereiche übertragen wird. Der Vergleich der Gefährdungskarten mit den gravitativen Massenbewegungen der anderen Teilbereiche, die nicht in die Modellerstellung eingegangen sind, liefert dann ein Maß der Güte. Bei der zeitlichen Validierung wird der Datensatz so getrennt, dass man z.B. alle Ereignisse vor 1970 nutzt, um die Gefährdungskarte zu erstellen und alle nach 1970 aufgetretenen Ereignisse für die Validierung.

Insbesondere die Arbeiten von Chung und Fabbri haben dazu geführt, dass die Anzahl der Arbeiten zunehmen, die eine echte Validierung ihrer Ergebnisse durchführen (z.B. Brenning 2005, Chau und Chan 2005 und Guzzetti et al. 2006b). Doch auch der Validierung sind ihre Grenzen gesetzt. So zeigt die Arbeit von Hohlweck (2005) aus Rheinhessen, dass die räumliche Kreuzvalidierung keinen großen Nutzen bringt, wenn die Untersuchungsgebiete zu homogen sind, da die Parameter, die zu der Ausweisung von gefährdeten Gebieten führt, überall ähnlich sind. Dies wird durch die oft nur in grober Auflösung zur Verfügung stehenden Daten verschärft, da diese eine Homogenität gegebenenfalls nur vortäuschen. Sind die Gebiete zu heterogen bzw. gibt es z.B. keine oder nur kaum

Übereinstimmung zwischen den geologischen Einheiten, kann keine räumliche Kreuzvalidierung sinnvoll durchgeführt werden. Sie resultiert dann unter Umständen in sehr schlechten Validierungsergebnissen, was aber nicht zwangsweise auf eine schlechte Gefährdungskarte, die auf dem Gesamtdatensatz beruht, schließen lässt. Die zeitliche Validierung stößt vor allem in jenen Gebieten an ihre Grenzen, in denen überwiegend Reaktivierungen auftreten, da es in diesen Fällen durchaus passieren kann, dass trotz zeitlicher Trennung der Datensätze räumliche Überlagerungen der Ereignisse vorhanden sind und somit die statistischen Ausgangsbedingungen der Trennung von Trainings- und Testdatensätze nicht mehr gegeben ist. Weitere kritische Anmerkungen zur Validierungsproblematik finden sich in Brenning (2005) und Guzzetti (2005). Diese Problematik sollte bei der Interpretation der Validierungsergebnisse berücksichtigt werden.

Eine Validierung der Gefahrenkarten ist wesentlich schwieriger, da hier zusätzlich zu der modellierten Anfälligkeit auch die Eintrittswahrscheinlichkeit validiert werden muss. Meistens ist jedoch die Datenlage zur Ableitung der Eintrittswahrscheinlichkeit schon recht gering, so dass diese Datensätze nicht in Trainings- und Testdatensätze aufgesplittet werden können. Dies kommt v.a. bei sehr seltenen Ereignissen zum Tragen. Ein anderes Problem ist, dass oft die Eintrittswahrscheinlichkeit nur für einen bestimmten Raum und nicht für einen Einzelhang abgeschätzt werden kann, so dass auch eine Validierung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Einzelhanges nicht möglich ist. In aktiveren Gebieten, in den regelmäßig Ereignisse auftreten, kann eine Validierung wesentlich einfacher sein.

### 3.2.2 Risikoanalyse gravitativer Massenbewegungen

Gemäß der Risikodefinition kann in der einfachsten Variante das Risiko als Funktion von Gefahr und Konsequenzen (Vulnerabilität und Schadenpotenzial) berechnet werden. Dies kann qualitativ (z.B. Flentje und Chowdhury 2000, Davertzhofen 2001, Cardinali et al. 2002, Reichenbach et al. 2005, Sorriso-Valvo 2005 und Glade et al. in Vorbereitung) oder quantitativ (z.B. Michael-Leiba et al. 2000, Bell 2002, Bell und Glade 2004a, Bell und Glade 2004b, Guzzetti et al. 2004b, Catani et al. 2005a, Chung und Fabbri 2005, Corominas et al. 2005, Remondo et al. 2005 und Chung 2006) durchgeführt werden. Eine Sonderform der quantitativen Risikoberechnung ist die Zuweisung von quantitativen Risikoindizes, die in der Literatur oft auch als semiquantitative Risiken bezeichnet werden (z.B. Borter 1999a und Australian Geomechanics Society 2000).

Ausführliche Richtlinien zur Risikoanalyse gravitativer Naturgefahren in drei Detaillierungsgraden wurden in der Schweiz erarbeitet (Borter 1999b). Allerdings setzen diese Richtlinien voraus, dass detaillierte Gefahrenkarten schon vorliegen. Der Fokus dieser Richtlinien liegt in der Zusammenführung von einzelnen lokal untersuchten und modellierten Gefahren und darauf basierender Risikoberechnung, so dass keine Lösung für regional modellierte Gefährdungs- bzw. Gefahrenanalysen zu finden ist.

Auf Basis der weiter oben beschriebenen quantitativen Gefahrenkarte berechnen Fabbri et al. (2004) quantitative Risikokarten, indem sie die Gefahr mit der Vulnerabilität und dem Schadenpotenzial multiplizieren. In den angeführten Beispielen werden nur teilweise die geschätzten

Vulnerabilitätswerte und Schadenpotenziale angegeben, ohne deren Erhebung zu diskutieren. Die Vulnerabilität ist unabhängig von der Magnitude der Ereignisse festgelegt worden. Das Risiko wird entweder als US \$ oder als Todesfallwahrscheinlichkeit pro Pixel angegeben. Da ein Ereignis von 1998 nachmodelliert wurde, dient der Vergleich mit den aufgetretenen Schäden als Validierungsansatz.

Nachdem Catani et al. (2005a) die quantitative Gefahrenkarte über die „Unique Condition Units“ erstellt haben (siehe oben), berechnen sie die ökonomischen Risiken mittels eines rasterbasierten Ansatzes. Sie kombinieren dazu intensitätsabhängige Vulnerabilitätswerte mit dem Schadenspotenzial und der Gefahr.

Bell (2002), Bell und Glade (2004a) und Bell und Glade (2004b) verwenden einen rasterbasierten Ansatz, um auf den oben beschriebenen Gefahrenkarten individuelle und objektbasierte Todesfallrisiken sowie ökonomische Risiken zu berechnen. Neben der Eintrittswahrscheinlichkeit gehen auch die Wahrscheinlichkeiten des räumlichen und zeitlichen Impacts sowie Vulnerabilität und Schadenpotenzial in die Berechnung ein. Die Ergebnisse werden kritisch diskutiert und die enthaltenen Unsicherheiten qualitativ abgeschätzt, eine echte Validierung findet nicht statt.

Wie stark die Risikowerte innerhalb von Risikoanalysen in Abhängigkeit von der gewählten Methode schwanken können und welche weiteren Aspekte insbesondere hinsichtlich der Zusammenführung der Ergebnisse mit der Risikobewertung zu beachten sind, wird ausführlich in Bell et al. (2005) und Bell et al. (2006a) diskutiert.

Im Folgenden wird auf den Stand der Forschung bezüglich der Vulnerabilitätsanalyse und Schadenpotenzialanalyse eingegangen.

### **3.2.2.1 Vulnerabilitätsanalyse**

Die Bestimmung der naturwissenschaftlichen Vulnerabilität von Risikoelementen gegenüber gravitativen Massenbewegungen ist sehr komplex. Während bei Hochwasser die Vulnerabilität von Häusern relativ einfach als eine Funktion von Überflutungshöhe und Fließgeschwindigkeit bestimmt werden kann, ist die Vulnerabilität gegenüber gravitativen Massenbewegungen abhängig vom Prozesstyp, von der Geschwindigkeit, der Magnitude und der Dauer des Ereignisses, sowie z.B. von der Lage des Hauses zur sich bewegenden Masse. So kann beispielsweise ein Haus im zentralen Bereich einer langsamen und tiefgründigen Rotationsrutschung den einwirkenden Kräften unter Umständen widerstehen, während ein Haus, welches sich am Rand der bewegenden Masse befindet, langsam auseinandergerissen wird. Des Weiteren bestehen große Unterschiede zwischen den verschiedenen Risikoelementen: Während ein Haus gegenüber langsamen und schnellen gravitativen Massenbewegungen eine ähnliche Vulnerabilität besitzt, ist die Vulnerabilität für Personen in diesem Haus gegenüber langsamen Prozessen gering (sie können aus dem Weg gehen) und bei schnellen hoch (Flucht ist nicht möglich, wenn die Geschwindigkeit des Prozesses schneller als die Laufgeschwindigkeit der Personen ist) (Fell 1994). Weitere Beispiele, die die Komplexität der

Vulnerabilität gegenüber gravitativen Massenbewegungen verdeutlichen, finden sich in Fell (1994), Glade (2003b) und Crozier und Glade 2005 (Crozier und Glade 2005).

Der einfachste Ansatz, die Vulnerabilität in der Risikoanalyse zu berücksichtigen, ist, von einem „Worst Case“-Szenario auszugehen, d.h. dass das Risikoelement komplett zerstört wird, wenn es von einer gravitativen Massenbewegung getroffen wird (Vulnerabilität = 1, z.B. in Davertzhofen 2001 und Glade et al. in Vorbereitung). Qualitative Abschätzungen der Vulnerabilität finden sich in Cardinali et al. (2002), Reichenbach et al. (2005) und Sorriso-Valvo (2005). Quantitative Richtwerte basieren in den wenigsten Fällen auf empirisch erhobenen Daten und stellen subjektive Schätzwerte dar (z.B. Leone et al. 1996, Borter 1999b, Borter 1999a, Michael-Leiba et al. 2000, Ragozin und Tikhvinsky 2000, Bell und Glade 2004a und Bell und Glade 2004b). Einen Überblick über die vorgeschlagenen Richtwerte geben Bell (2002) und Glade (2003b). Einen zukunftsweisenden Weg stellt die Arbeit von Kraus et al. (2005) dar. Sie haben auf Basis der Analyse von 14 vergangenen Ereignissen die Vulnerabilität betroffener Gebäude berechnet, die teilweise stark von den vorgeschlagenen Richtwerten abweichen. Sie kommen zu folgendem Schluss: „[...] *there is a need to more accurately determine vulnerability values as a function of process type, intensity of impact and type of building structure [...]*“ (Kraus et al. 2005, S. 190). Um diesen Bedarf zu decken, scheinen derzeit im Wesentlichen nur zwei Vorgehensweisen denkbar: a) weitere empirische Analysen vergangener Ereignisse und b) Berechnung der Vulnerabilität der Gebäude auf Basis der Modellierung der Impactenergien. Letzteres sollte insbesondere in Zusammenarbeit mit den Bauingenieurwissenschaften erfolgen.

### **3.2.2.2 Schadenpotenzialanalyse**

Die Erhebung des Schadenpotenzials ist abhängig von der Festlegung des Ziels und Umfangs der Risikoanalyse und somit auch von der Auswahl der Risikoelemente. Dabei sind v.a. Personen und Sachwerte zu unterscheiden, welche in Raum und Zeit variabel sind. Des Weiteren ist auch zwischen direktem und indirektem Schadenpotenzial zu unterscheiden. Auf Grund der Komplexität der Ermittlung des indirekten Schadenpotenzials fokussieren die meisten Arbeiten auf das direkte Schadenpotenzial.

Je nach Untersuchungsgebietesgröße und Detaillierungsgrad (qualitativ, quantitativ) kann der Aufwand zur Erhebung des Schadenpotenzials beträchtlich variieren. Die Bandbreite reicht von der detaillierten Erfassung der Personenanzahl sowie des Sachwerts einzelner Gebäude, bis hin zu Durchschnittswerten einzelner Landnutzungseinheiten, Gemeinden, Landkreise oder noch größerer Bezugseinheiten. Hinsichtlich der Sachwerte liegen z.B. bei den Versicherungsunternehmen umfassende Daten vor, diese sind aber meistens nicht zugänglich, ebenso wenig wie die Informationen, wie viele Personen in einzelnen Gebäuden wohnen. Ausnahmen gibt es gelegentlich, wie die Arbeiten von Bell (2002) und Bell und Glade (2004b) zeigen. Stehen solche Datensätze nicht zur Verfügung, müssen alternative Verfahren entwickelt werden, wie z.B. im Teilprojekt *InterRISK Assess* (Blöchl und Braun 2005 und Blöchl in Vorbereitung) oder in Borter (1999b), Keiler (2004a),

Kleist et al. (2006) und Thieken et al. (2006). Generelle Informationen zur Ermittlung von Schadenpotenzialen finden sich z.B. in Heinemann et al. (1998) und Pflügner (2005). In jüngster Zeit nehmen die Arbeiten zu, die sich insbesondere mit der zeitlichen Variabilität des Schadenpotenzials befassen (Fuchs et al. 2004, Keiler 2004b und Fuchs et al. 2006). Auf dieser Basis sind dann Untersuchungen zur Entwicklung des Risiko über die Zeit möglich (z.B. Hufschmidt et al. 2005 und Fuchs et al. 2006).

Abschließend soll kurz auf die Frage eingegangen werden, ob qualitative oder quantitative Risikoanalysen bevorzugt werden sollten. In manchen Publikationen wird nachhaltig dazu aufgerufen, auf jeden Fall die quantitative Risikoanalyse anzustreben, da nur sie die Akteure und Entscheidungsträger in die Lage versetzen würde, adäquate Lösungen zu finden (z.B. Ammann 2006 und Chung 2006). So sei es auch nur auf diesem Wege denkbar, dem teilweise geforderten „*uniform safety level accepted by the public*“ (Ammann et al. 2006, S. IX) nachzukommen. Doch: „*Whether qualitative or quantitative assessments are more suitable depends on both the desired accuracy of the outcome and the nature of the problem, and should be compatible with the quality and quantity of available data*“ (Dai et al. 2002, S.58). Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass noch viele Forschungsfragen offen sind, insbesondere hinsichtlich der quantitativen Risikoanalyse, wie auch in den folgenden Zitaten noch einmal deutlich wird: „*What is urgently required is improved techniques of landslide frequency analysis, better and more quantitative understanding of rapid failure initiation mechanisms and better calibration of runout models. Without these elements, quantitative hazard and risk analyses will remain largely subjective*“ (Hungry 2004, S. 8). Diesem Zitat ist noch hinzuzufügen, dass ähnliche Anstrengungen auch bei der Vulnerabilitätsanalyse zu unternehmen sind. Nach einem kritischen Review aktueller Ansätze in der Gefahren- und Risikoanalyse kommen van Westen et al. (2006) zu folgendem Schluss: „*Considering all the difficulties [...], it will be appreciated that a risk assessment at a medium scale only could be qualitative, or at best a semiquantitative one*“ (S. 14) und an anderer Stelle „*[...] the generation of quantitative risk zonation maps for regulatory and development planning by local authorities still seems a step too far, especially at medium scales (1:10,000 - 1:50,000)*“ (S. 1).

### 3.2.3 Risikobewertung

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, wird die Forderung nach einem allgemein akzeptierten Risikolevel im Bereich des Managements von Naturrisiken lauter. Solche Risikolevels würden es erlauben, im Vergleich mit quantifizierten Risiken Entscheidungen darüber zu treffen, ob risikoreduzierende Maßnahmen zu ergreifen sind oder nicht. Während bei ökonomischen Risiken die Grenzwerte im Wesentlichen Auskunft darüber geben, wie viel Geld die Gesellschaft bereit ist für entsprechende Sicherungsmaßnahmen auszugeben, ist die Sachlage bei Todesfallrisiken wesentlich komplizierter. Es wird zwischen akzeptiertem Individualrisiko bzw. gesellschaftlichem Risiko unterschieden. Während das akzeptierte Individualrisiko Auskunft über die akzeptierte

Todesfallwahrscheinlichkeit eines Individuums gibt, wird beim akzeptierten gesellschaftlichen Risiko versucht, Grenzwerte dafür zu finden, wie viele Tote in Abhängigkeit von dem Wiederkehrintervall eines Ereignisses einer bestimmten Magnitude akzeptiert werden. Die verwendeten Ansätze zur Ermittlung von akzeptierten Risikolevels stammen aus dem Bereich der technischen Risiken (z.B. Merz et al. 1995). Eine Diskussion dieser Kriterien mit Bezug zu gravitativen Massenbewegungen findet sich u.a. in Australian Geomechanics Society (2000), Lee und Jones (2004) und Fell et al. (2005). Ein Kritikpunkt bei diesem Vorgehen ist, dass die Risikolevels von Experten definiert werden, ohne die Risikowahrnehmung der Betroffenen und deren Sichtweise zur Akzeptanz der Risiken zu hinterfragen. Von Experten definierte akzeptierte Risikolevel sind bereits in Island und Hong Kong umgesetzt (siehe Geotechnical Engineering Office 1997, The Ministry of the Environment 2000, Malone 2005 und Bell et al. 2006a), sowie in der Schweiz in Vorbereitung (Ammann 2006).

Doch: *„Risk means different things to different people because each person holds an unique view of the environment and of environmental risk“* (Smith 1992, S. 58). Es gibt verschiedene sozialwissenschaftliche Ansätze, um die Risikowahrnehmung zu untersuchen. Eine kurze Diskussion der verschiedenen Ansätze findet sich in Bell et al. (2005) und Bell et al. (2006a), ein ausführlicher Überblick in Plapp (2003).

Risikowahrnehmungsstudien zu gravitativen Massenbewegungen (z.B. Finlay und Fell 1997, DeChano und Butler 2001, Solana und Kilburn 2003, Wagner 2004, Butler und DeChano 2005 und Harmsworth und Raynor 2005 und Danscheid et al. eingereicht) und zu anderen Naturgefahren (z.B. Geipel et al. 1997, Pohl 1998, Weichselgartner 2001, Plapp 2003 und Plapp und Werner 2006) sind im Vergleich zu der Anzahl an Arbeiten zur Gefährdungs-, Gefahren- und Risikoanalyse relativ selten.

Wagner (2004) untersucht nicht nur die Risikowahrnehmung gegenüber gravitativen Massenbewegungen und entwickelt ein Konzept der Halbwertszeit des Vergessens von schadenverursachenden Ereignissen, sondern untersucht auch, welche Maßnahmen am besten geeignet sind, um die Risiken zu kommunizieren und so ein erhöhtes Bewusstsein für die Problematik zu schaffen. Oft ist in der Literatur zu lesen, dass „nur“ das Bewusstsein gegenüber bestimmten Gefahren zu erhöhen sei, um die betroffenen Personen zu risikominimierendem Verhalten anzuregen. Diesem Ansatz sind aber Grenzen gesetzt, da zum einen feststellbar ist, dass mehr Wissen nicht zu einer Verminderung von Risiken führen muss, sondern u.U. sogar die Risiken erhöht (Pohl 1998). Zum anderen helfen in diesem Zusammenhang systemtheoretische Betrachtungen nach Luhmann weiter, wie sie im Projekt *InterRISK Perception* im Detail untersucht werden (Danscheid in Vorbereitung). Aufgrund der Komplexität der Welt müssen die Individuen (nach Luhmann ein Konglomerat aus psychischen und biologischen Systemen) und die durch sie aufgebauten sozialen Systeme (Recht, Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, Medien, usw.) die Komplexität reduzieren, um überlebensfähig zu sein. Sie entwickeln eigene Strategien, Sprachen und Verhaltensmuster, die die Wahrscheinlichkeit erhöhen oder vermindern, dass eine Information sie erreicht, anschlussfähig ist und somit die Kommunikation in Gang kommt bzw. erhalten bleibt. Selbst Personen, die an einem gefährdeten Ort

wohnen, können sich nicht permanent darüber Gedanken machen, da sie dann ihre anderen Lebensaufgaben nicht mehr wahrnehmen könnten. So ist auch ein Verdrängungsmechanismus letztendlich ein Aspekt der „persönlichen Katastrophenvorsorge“.

Die Eigenheit der Individuen bzw. der sozialen Systeme entscheidet darüber, ob Informationen sie erreichen oder nicht. Daher können Strategien zur Erhöhung eines Risikobewusstseins immer nur Angebote darstellen. Inwieweit diese jedoch von den psychischen und sozialen Systemen aufgenommen und weiter verarbeitet werden und das intendierte Ziel erreichen, entscheiden die Systeme selbst. Die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Kommunikation kann dadurch erhöht werden, dass gruppen- und systemspezifische Informationen entsprechend bereitgestellt werden. Welchen Beitrag die Systemtheorie Luhmanns dazu leisten kann, ist Forschungsgegenstand von *InterRISK Perception*.

Um noch einmal auf die Frage der Risikoakzeptanz zurück zu kommen, so können nach Bell et al. (2006a) folgende fünf Formen von Risikoakzeptanz unterschieden werden:

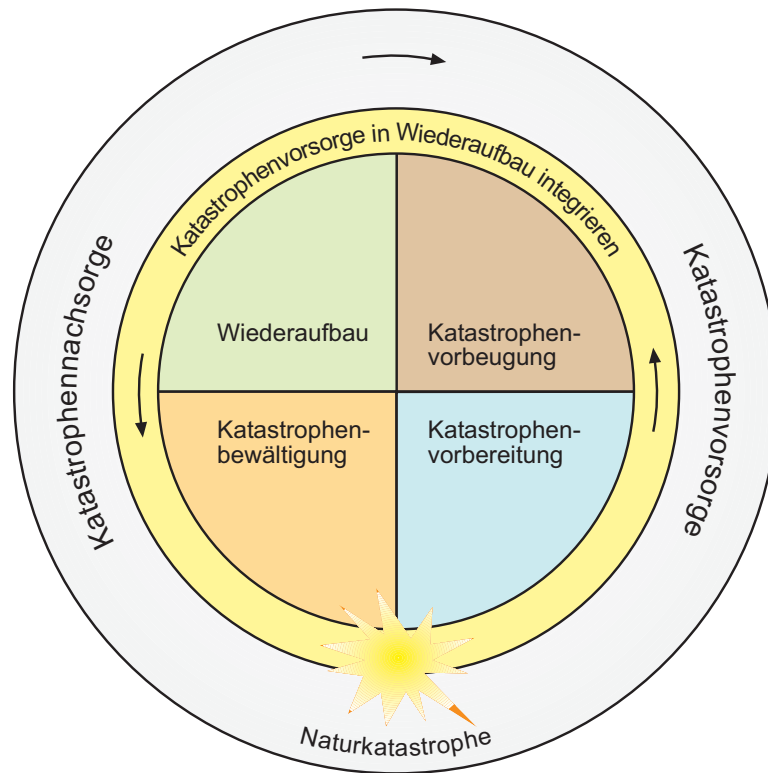
- Individuelle Akzeptanz: Die Akzeptanz einer bestimmten Person, ermittelt durch nicht aggregierte quantitative oder qualitative Methoden.
- Aggregierte individuelle Akzeptanz: Der Durchschnittswert der ermittelten individuellen Akzeptanzen.
- Systeminterne Akzeptanz: Die kommunizierte Akzeptanz eines bestimmten sozialen Systems (z.B. Stakeholder, Wissenschaftler, Politiker).
- Gesellschaftliche Akzeptanz: Die Akzeptanz einer Gesellschaft im Gesamten.
- Experten-Akzeptanz: Experten definieren, was Individuen und die Gesellschaft bereit sind zu akzeptieren.

Wie bereits erwähnt, wird bisher nur der Ansatz der Experten-Akzeptanz umgesetzt. Dieser Ansatz hat für bestimmte Einsatzbereiche sicherlich seine Berechtigung, er wird aber nicht der zeitlichen und räumlichen Variabilität der Risikoakzeptanz gerecht, so dass eine Stärkung der sozialwissenschaftlichen Ansätze sowie deren Integration in ein neues Gesamtakzeptanzkonzept wünschenswert wäre.

### **3.2.4 Risikomanagement gravitativer Massenbewegungen**

Im Rahmen des Risikomanagements ist zu beachten, dass alle zu treffenden Maßnahmen dem sogenannten Risikozyklus unterliegen (Abb. 3.4). Der Zyklus beschreibt die Abfolge von Katastrophenvorbeugung, Katastrophenvorbereitung und nach einem eingetretenen Ereignis die Katastrophengewältigung sowie den Wiederaufbau, der wiederum in die Katastrophenvorsorge überleitet. Trotz aller risikominimierenden Maßnahmen wird immer ein Restrisiko bleiben. Dieses Restrisiko birgt die Möglichkeit, dass kleinere und größere Ereignisse zu Todesfällen und ökonomischen Schäden führen, bis hin zu dem Auftreten von großen Naturkatastrophen. Um ein

optimales Risikomanagement zu gewährleisten, müssen die Maßnahmen in den einzelnen Teilbereichen aufeinander abgestimmt sein. Des Weiteren sollte der Forderung von Kofi Annan von 1999 nach einer Abkehr von der Kultur der Reaktion hin zu einer Kultur der Prävention nachgekommen werden (Dikau 2004), um die Wahrscheinlichkeit der Naturkatastrophen zu verringern. Oft ist aber auch heute noch erst ein Extremereignis nötig, damit insbesondere der politische Apparat in Gang gesetzt wird und neue Gesetze erlassen werden, wie das Hochwasserschutzgesetz als Folge des Elbehochwassers von 2002, die die Rahmenbedingungen für



die Katastrophenvorsorge verbessern.

Abb. 3.4: Der Risikozyklus (nach Dikau und Weichselgartner 2005)

Wie bereits erwähnt, sollten innerhalb des Risikomanagements die Ergebnisse der Risikoanalyse und -bewertung zusammengeführt werden. Eine Berücksichtigung sämtlicher Managementoptionen unter Einbindung aller Experten, Politiker und besonders der betroffenen Bevölkerung wird zwar zuerst zu einer Verstärkung der Interessenkonflikte führen, lässt aber nachfolgend eine Entscheidung auf einer viel breiteren Wissensbasis zu, die so zu einem nachhaltigen Risikomanagement führen kann. Dabei ist u.a. darauf zu achten, dass durch risikominimierende Maßnahmen gegenüber einer Gefahr, nicht die Risiken gegenüber anderen erhöht werden, wie das z.B. in Gondo (Schweiz) 2000 der Fall war. Dort führte eine Steinschlagschutzmauer dazu, dass die Schäden durch einen Murgang, der von der Steinschlagmauer aufgestaut wurde und diese später mit einriss, größer waren als sie ohne diese Mauer gewesen wären (Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) 2002). Um solche Fälle zu



verhindern, sollten möglichst alle Gefahren eines Ortes oder einer Region im Rahmen von Multirisiko-Analysen untersucht werden (z.B. Bell und Glade 2004b).

Das Management umfasst im Wesentlichen folgende Optionen:

- Vermeidung der Risiken (auf Basis der ausgewiesenen Risikobereiche können Auflagen hinsichtlich der Landnutzung mittels raumplanerischer Optionen erstellt werden, Umsiedlung gefährdeter Objekte);
- Reduzierung der Risiken (technische Verbauungsmaßnahmen, Aufbau von Frühwarnsystemen, Straßensperrungen und Evakuierungen in Gefahrensituationen, Ausbildung und Schulung zum Risikobewusstsein);
- Transfer der Risiken (z.B. über Versicherer und Rückversicherer);
- Eigenverantwortung (Übertragung der Mitverantwortung zur Katastrophenvorbeugung auf den Einzelnen);
- Akzeptanz der Risiken

Eine umfassende Übersicht über die jeweiligen Möglichkeiten des Risikomanagements von gravitativen Massenbewegungen wird in Glade et al. 2005a gegeben.

## 4 Daten

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vielzahl an verschiedenen analogen und digitalen Basisdaten genutzt. Eine Übersicht über diese Daten inklusive Informationen zur Auflösung, Format und Quelle ist in Tab. 4.1 zusammengestellt. Im Folgenden sollen wichtige Zusatzinformationen zur Erhebung und zur Genauigkeit einiger Datensätze, die besondere Bedeutung für diese Arbeit haben, beschrieben werden.

Das Digitale Geländemodell mit 1 m-Auflösung (DGM1) wurde mittels flugzeuggestütztem Laserscanning-Verfahren für ganz Baden-Württemberg erstellt. Die Befliegungen durch die Firma TopScan sind für die Schwäbische Alb in den vegetationsarmen Monaten Dezember bis April der Jahre 2002 bis 2004 durchgeführt worden (Baden-Württemberg 2007b). Dabei wurde ein Optech ALTM 1225 Laserscanner verwendet. Die entsprechenden Systemeinstellungen der Befliegung sind in Tab. 6.2 dargestellt. Daraus ergibt sich ein mittlerer Punktabstand von 1-2 m. Die Höhengenaugigkeit aller aufgenommenen Punkte beträgt  $\pm 0,15$  m. Die Georeferenzierung erfolgte mit dem Abbildungssystem UTM im Bezugssystem ETRS89. Die aufgenommenen Punkte wurden automatisch in Boden- und Hochpunkte der Aufzeichnungen der ersten Reflexionen (first-pulse) und der letzten Reflexionen (last-pulse) klassifiziert und in 1 km<sup>2</sup> Kacheln des Gauß-Krüger Koordinatensystems transformiert. Für die Erstellung des DGM1 werden nur die Bodenpunkte der last-pulse-Aufzeichnung genutzt. Die Qualitätskontrolle findet in der Vorverarbeitung über im Vorfeld festgelegte Kontrollflächen, nach Lage und Höhe bekannter Punkte, sowie weiterer vorhandener Höheninformationen anderer Landesämter statt. Die Algorithmen der automatischen Klassifizierung beruhen auf Höhendifferenzen benachbarter Punkte. Fehlinterpretationen sind dabei unvermeidlich, so dass die Daten einer umfangreichen interaktiven Nachbearbeitung unterzogen werden (Schleyer 2001). Neben der Korrektur falsch klassifizierter Daten erfolgt bei diesem Schritt u.a. auch die Herausfilterung sämtlicher Häuser und Brücken, um ein hydrologisch korrektes DGM zu erstellen.

Tab. 4.2: Systemeinstellung für die Laserscan-Befliegung Baden-Württembergs (Schleyer 2001)

Parameter	Einstellung
Messfrequenz	25.000 Hz
Scanfrequenz	25 Hz
Scanwinkel	+/- 20°
Fluggeschwindigkeit	80 m/sek.
Mittlere Flughöhe	900 m
Streifenabstand	300 m, 400 m und 450 m in Abhängigkeit von der Reliefenergie

Die aufwändige Nachbearbeitung zur Erstellung des endgültigen DGM führt dazu, dass für diese Arbeit nur ca. 10% des Untersuchungsgebietes (Region um Reutlingen und im Umkreis des oberen Filstales) als endgültiges DGM1 zum Zeitpunkt der Lieferung vorlagen. Für den Rest des Untersuchungsgebietes stand lange Zeit nur das DHM50 (Digitales Höhenmodell) zur Verfügung.

Tab. 4.1: Übersicht über die verwendeten Daten

Datentyp	Zusatzinformationen	Auflösung	Format	Quelle
<b>Topographie</b> DGM1 (Digitales Geländemodell)	flächendeckend für Schwäbische Alb,	1m x 1m, 1 km <sup>2</sup> Kacheln	ESRI grid (Rasterdaten)	Umweltministerium Baden-Württemberg (UM BW), Landesanstalt für Messung, Umwelt und Naturschutz (LUBW) und Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (LV BW)
<b>Geologie/Böden</b> GK25v (Geologische Karte)	Blätter 7323 Weilheim a.d. Teck, 7324 Geislingen a.d. Steige-West, 7325 Geislingen a.d. Steige-Ost, 7423 Wiesensteig, 7424 Degglingen	1:25.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB BW)
GK25a (Geologische Karte)	Blätter 7520 Mössingen, 7521 Reutlingen, 7620 Jungingen, 7718 Geislingen, 7719 Balingen, 7819 Meßstetten	1:25.000	analoge Karte	LGRB BW
GK50 (Geologische Karte)	Blatt 7520 Reutlingen	1:50.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	LGRB BW
GUK 200 (Geologische Übersichtskarte)	Blatt	1:200.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
GWÜ 350 (Geowissenschaftliche Übersichtskarten)	flächendeckend für Schwäbische Alb, verwendete Themen: Geologie und Böden	1:350.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	BGR
BUK 200 (Bodenübersichtskarte)	Blatt	1:200.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	BGR
<b>Geomorphologie</b> Geomorphologische Übersichtskarte 1:100.000 GMK25 (Geomorphologische Karte)	flächendeckend für Schwäbische Alb, Kartierung erfolgte im Maßstab 1:50.000 Blatt 9, 7520 Mössingen	1:100.000 1:25.000	analoge Karte analoge Karte	Dongus 1977 Leser 1982
<b>gravitative Massenbewegungen</b> Übersichtskartierung Massenverlagerungen	für Teilbereiche der Westalb, Mittleren Alb und Ostalb für Teilbereiche der Schwäbischen Alb, Punktinformationen mit Gauß-Krüger Koordinaten	1:25.000 und 1:50.000	analoge Karte	Kallmich 1999
Hangrutschungsdatenbank Tübingen	für Teilbereiche der Schwäbischen Alb, Punktinformationen mit Gauß-Krüger Koordinaten		Excel-Datei	Arbeitsgruppe E. Bibus und B. Terhorst, Geographisches Institut, Universität Tübingen
Historische gravitative Massenbewegungen gravitative Massenbewegungen in Forstrentschichtwerken	Forstämter Lichtenstein, Reutlingen		analoge Karten und Word-Datei Excel-Datei	InterRISK History InterRISK Perception
gravitative Massenbewegungen in der Forstlichen Standortskartierung	flächendeckend für Schwäbische Alb	1:10.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
Hangrutschungsinventar Oberes Filstal	Punktinformationen		ESRI Shapefile (Vektordaten)	Brennecke 2006
Hangrutschungsinventar Straßenbauverwaltung Regierungsbezirk Stuttgart	Punktinformationen		ESRI Shapefile (Vektordaten)	Kohn 2007
<b>Hydrologie</b> Flüsse	flächendeckend für Schwäbische Alb	1:10.000	ESRI Shapefile (Vektordaten)	LUBW
<b>Klima</b> Niederschlag, Temperatur regionalisierte Klimadaten (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung, Schneedecke)	flächendeckend für Schwäbische Alb	Minute bis Monat 500m x 500m	Ascii-Daten Ascii-grid (Rasterdaten)	Deutscher Wetterdienst (DWD) und LUBW LUBW
<b>Landnutzung/Siedlung</b> DLM25 (Digitales Landschaftsmodell) CORINE Landnutzung	flächendeckend für Schwäbische Alb flächendeckend für Schwäbische Alb	1:10.000 1:100.000	ESRI Shapefile (Vektordaten) ESRI Shapefile (Vektordaten)	UM BW, LUBW, LVBW Statistisches Bundesamt der BRD
<b>Luftbilder/Orthofotos</b> Luftbilder 1965 Luftbilder 1985 DOP 2002-2003 (Digitale Orthofotos)	für Teilbereiche der Westalb und Mittleren Alb für Teilbereiche der Westalb und Mittleren Alb flächendeckend für Schwäbische Alb	1:24.000 1:32.000 0,25m x 0,25m, 1 km <sup>2</sup> Kacheln	nicht georeferenzierte digitale Fotos nicht georeferenzierte digitale Fotos georeferenzierte digitale Fotos	Amt für Geoinformation der Bundeswehr (AGeoBW) UM BW, LUBW, LVBW
<b>Schadenpotenzial</b> Flächennutzungsplan Sachwerte Häuser Bewohner pro Haus	für Region Balingen bis Bad Urach, 2km Pufferzone vom Albrauf für Region Balingen bis Bad Urach, 2km Pufferzone vom Albrauf für Rutschhänge in Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen Mössingen-Öschingen (nur volljährige Bewohner)	1:10.000 1:10.000	ESRI Shapefile (Vektordaten) ESRI Shapefile (Vektordaten) AutoCAD Dateien analoges Buch	InterRISK Assess InterRISK Assess Stadt Mössingen, Staatliches Vermessungsamt Tübingen Adressbuch Mössingen 2003
<b>Sonstiges</b> Vermessung Geophysik 14C-Datierung	Mössingen-Öschingen Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen Mössingen-Öschingen		digitale Karte digitale Karte, Rohdaten	W. Schauer O. Sess, J.-E. Kruse Tandem Laboratory, Prof. G. Possnert, Uppsala, Schweden

Dieses weist nur eine Auflösung von 50 m x 50 m auf, wurde photogrammetrisch erstellt und gibt u.a. die Oberfläche der Vegetation wieder. Im Laufe der Arbeit ergab sich die Möglichkeit auf ein vorläufiges DGM1 zurückgreifen zu können, welches von der Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz (LUBW) erstellt wurde. Bei diesem werden alle Bodenpunkte der last-pulse-Aufzeichnung genutzt, d.h. auch die fehlerhaften Punkte, sowie die Brücken und Häuser sind enthalten.

Das DGM1 wurde am Computer und im Gelände permanenten Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sowohl das endgültige, als auch bereits das vorläufige DGM1 eine hervorragende Qualität aufweisen. Bayer (2006, Persönliche Mitteilung) wies darauf hin, dass die Qualität in Regionen mit dichtem Nadelwaldbestand deutlich schlechter ausfällt, da in solchen Fällen der Punktabstand der Bodenpunkte auf 5 bis 10 m abnehmen kann. Da die Schwäbische Alb aber überwiegend einen Laub- oder Mischwaldbestand aufweist, macht sich dieser Nachteil nicht deutlich bemerkbar. Die Anzahl der Fehlinterpretationen im vorläufigen DGM scheint relativ gering. Des Weiteren stören die Häuser und Brücken im vorläufigen DGM auf Grund der Fragestellung der Arbeit nicht. Vielmehr ist es als Vorteil zu betrachten, dass das DGM nicht zusätzlich gefiltert wurde, da so sicher davon ausgegangen werden kann, dass nicht auch gravitative Massenbewegungen bei der Nachbearbeitung verändert wurden. Dass auch die Nachbearbeitung nicht immer fehlerfrei abläuft, konnte im Bereich des Filstales festgestellt werden. Dort wurde eine Straße mit dem Flusslauf verwechselt und somit eine Brücke herausgefiltert, die nicht existierte. Des Weiteren blieb dadurch eine tatsächlich vorhandene Brücke im DGM1 erhalten.

Der überwiegende Anteil der geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 ist in Baden-Württemberg nur als analoge Karte oder als eingescanntes Bild verfügbar. Nur sehr wenige Kartenblätter liegen im digitalen Vektorformat vor und stehen somit weiteren GIS-Analysen zur Verfügung. Daher musste für Modellierungen für einen größeren Raum auf die Geologische Übersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (GÜK200) zurückgegriffen werden. Sowohl bei der GK25 als auch bei der GÜK200 mussten einzelne Blätter zusammengefügt werden. Dabei wurde eine Homogenisierung der Daten erforderlich. Zum einen kommt es an den Blatträndern auf Grund unterschiedlichen Interpretationen durch unterschiedliche Bearbeiter zu Unstimmigkeiten. Zum anderen wurden insbesondere bei der GÜK200 teilweise Geologische Einheiten anders benannt oder anders zusammengefasst. Darüber hinaus fehlt bei den verschiedenen Blättern der GÜK200 ein gemeinsames Identifizierungsfeld, so dass die Karten nicht gemeinsam dargestellt werden können. Auf Grund dessen wurde zusammen mit Horst Meyenfeld ein neuer siebenstelliger Code entwickelt, über welchen jede Schicht eindeutig über die verschiedenen Blätter der GÜK200 hinweg identifiziert werden kann. Auf Grund der unterschiedlichen Namensgebung und Zusammenfassungen gestaltete sich die Homogenisierung über den neuen Code als teilweise sehr schwierig und sehr aufwändig. Der Code ist bewusst so angelegt, dass auch alle weiteren Karten der GÜK200 integrierbar sein sollten.

In den fünf Blättern der GK25v in der Umgebung des Oberen Filstales sind auch gravitative Massenbewegungen kartiert worden, die aus dem Datensatz extrahiert werden können und somit ein eigenständiges Hangrutschungsinventar bilden.

Dongus (1977) weist in seiner Geomorphologischen Karte 1:100.000 pleistozäne bis holozäne Berggrutsch- und Bergsturzhalden aus. Da er aber keine einzelnen Rutsch- oder Sturzkörper abgrenzt, wird im folgenden Verlauf der Arbeit von Hangrutschungsprozessbereichen gesprochen.

Im Rahmen der Übersichtskartierung der Massenverlagerungen am Albrauf kartierte Kallinich (1999) zum einen die Verebnungsbereiche alter großer Rotationsrutschungen und zum anderen rezente vorwiegend kleinere Rutschungen in deren Umfeld. Die Geländekartierung erfolgte im Maßstab 1:25.000, die Darstellung im Maßstab 1:50.000.

Die Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen wurde im Wesentlichen durch die Arbeit von Kraut (1995) aufgebaut. Die Einträge basieren auf einer Auswertung der wissenschaftlichen Literatur, der geologischen Karten und der forstlichen Standortskarten. Die Datenbank wurde für die Teilbereiche der Schwäbischen Alb erstellt, in denen Informationen verfügbar waren. Für die einzelnen Rutschkörper sind Punktinformationen zur Lage verfügbar. Des Weiteren sind in der Datenbank zahlreiche weitere Informationen zur Geomorphometrie, Geomorphologie und Hydrologie eingetragen. Für einen kleinen Bruchteil der Ereignisse konnte auch das Alter bestimmt werden.

Innerhalb der forstlichen Standortskartierung werden rutschgefährdete Flächen aufgenommen. Zum Zeitpunkt als Kraut (1995) die Forstliche Standortskarte nutzte, war diese nur in analoger Kartenform erhältlich. Seit 1999 werden alle Inhalte der forstlichen Standortskarten im FOGIS digital erfasst. Die Rutschgefährdung wird in drei Klassen eingeteilt: akute Rutschgefährdung, Rutschhang in Ruhe und latente Rutschgefährdung. Als Kriterien dienen insbesondere geomorphologische Aspekte als auch Veränderung im Pflanzenwuchs, sowie Informationen über das Ausgangsmaterial. Die Forstliche Standortskarte ist flächendeckend für Baden-Württemberg erhoben. In einzelnen Bereichen im Untersuchungsgebiet wurden zum Zeitpunkt der Lieferung, die Karten überarbeitet, so dass für diese Regionen keine Informationen verfügbar waren. Eine weitere Einschränkung ist, dass die Forstliche Standortskarte im Wesentlichen nur den Staatlichen Forst und nur sehr wenige Privatwälder umfasst. Das Ziel der Standortskartierung ist, dass auf Basis dieser Informationen eine möglichst naturnahe und nachhaltige Forstwirtschaft betrieben werden kann.

Die Recherchen zu historischen gravitativen Massenbewegungen durch das Teilprojekt *InterRISK History* erfolgten vor allem im Hauptstaatsarchiv Stuttgart, in den Staatsarchiven Sigmaringen und Ludwigsburg sowie in verschiedenen Gemeindearchiven. Neben Oberamtsbeschreibungen wurden eine Vielzahl handschriftlicher und gedruckter Quellen sowie historischer Karten ausgewertet.

Im Laufe des *InterRISK* Projekts stellte sich heraus, dass auch die Forsteinrichtungswerke eine nützliche Quelle für das Auffinden von historischen und rezenten Rutschungen sein müssten. In der Folge untersuchte das Teilprojekt *InterRISK Perception* eine große Anzahl von Forstakten aus der

Region um Albstadt, Mössingen, Rottenburg, Tübingen, Reutlingen, Lichtenstein und Bad Urach im Staatsarchiv Ludwigsburg.

Das Hangrutschungsinventar für das Obere Filstal wurde von Brennecke (2006) auf Basis der Interpretation von Luftbilder aus den Jahren 1965 und 1985 und der Auswertung von Schummerungsdarstellung des DGM1 erstellt. Dabei wurden die 4 Prozesstypen Rotationsrutschung, Translationsrutschung, Fließung und Komplexe Massenbewegung unterschieden.

Kohn (2007) wertete das Archiv der Baustoff- und Bodenprüfstelle Ludwigsburg hinsichtlich vergangener gravitativer Massenbewegungen aus. Die Prüfstelle gehört zur Straßenbauverwaltung des Regierungsbezirks Stuttgart. Nur ein kleiner Bereich des Untersuchungsgebietes gehört zum Regierungsbezirk Stuttgart, so dass nur dieser Teil in der vorliegenden Arbeit genutzt werden kann.

Die Klimadaten (Niederschlag und Temperatur) wurden für 14 Klimastationen vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und für weitere 16 Klimastationen von der LUBW für das Untersuchungsgebiet bereitgestellt. Während die Daten des DWD täglich und monatlich aufgelöst sind und maximal einen Zeitraum von 1931 bis 2004 umfassen, liegen die Daten der LUBW in minütlicher, halbstündlicher, stündlicher oder täglicher Auflösung vor. Der maximale Zeitraum der LUBW Daten beschränkt sich auf 1994-2006. Diese Daten wurden mittels des Softwarepakets R in Tages- und Monatswerte umgerechnet.

Weiterhin konnten von der LUBW regionalisierte Klimadaten in einer Auflösung von 500 m x 500 m zur Verfügung gestellt werden. Sie umfassen interpolierte Niederschlags- und Temperaturdaten, sowie daraus abgeleitet Verdunstungsdaten und Daten des Wasseräquivalents der Schneedecke. Die Modellierung erfolgte mit dem Modell GWN\_BW, welches im Rahmen des Wasser- und Bodenatlas (WaBoa) Baden-Württemberg entwickelt (Armbruster 2002) und anschließend im Auftrag der damaligen LfU (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Bürttemberg) von der GIT HydrosConsult GmbH weiterentwickelt wurde (Gudera 2005, Persönliche Mitteilung). Weitere Details finden sich in Ministerium für Umwelt und Verkehr (UVM) und Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) (2004). Während die LUBW davon ausgeht, dass die modellierten Niederschlags- und Temperaturdaten in der täglichen Auflösung sehr zuverlässig sind, bestehen bei der modellierten Verdunstung und der Schneedecke größere Unsicherheiten. So wird beispielsweise bei der Schneedecke die Winddrift nicht berücksichtigt, die lokal eine sehr große Bedeutung haben kann. Es wird aber davon ausgegangen, dass die Daten im Rahmen einer ca. 10-tägigen Ungenauigkeitsspanne zuverlässig sind (Wingering 2006, Persönliche Mitteilung).

Das DLM25 (Digitale Landschaftsmodell) ist Bestandteil des Amtlichen Topografisch-Kartografischen Informationssystems (ATKIS) und enthält detaillierte Informationen zur Landnutzung (z.B. Siedlung, Verkehr, Vegetation und Gewässer). Es wird vor allem auf Basis digitaler Orthophotos und Topografischer Karten erstellt. Mittlerweile wurde das DLM25 vom Basis-DLM ( $\pm 3$  m Lagegenauigkeit) und DLM50 ( $\pm 6$  m Lagegenauigkeit) abgelöst (Baden-Württemberg 2007a). Die

Lagegenauigkeit des DLM25 dürfte zwischen den beiden neuen Varianten liegen. Das vorliegende DLM25 enthält Informationen des Jahres 2003.

Im Rahmen der Schadenpotenzialanalyse wurden von Alexander Blöchl (*InterRISK Assess*) Flächennutzungspläne in einer Pufferzone von 2 km unterhalb des Albtraufs im Gebiet des Regionalplanungsverbandes Neckar-Alb (Kreis Reutlingen, Kreis Tübingen und Zollernalbkreis) digitalisiert. Auf Basis eines neu entwickelten Ansatzes wurden die Sachwerte für die einzelnen Flächen berechnet. Aus diesen konnten Durchschnittswerte für die einzelnen Landnutzungsklassen aggregiert werden. Zusätzlich wurden die Sachwerte in fünf qualitativen Sachwerteklassen zusammengefasst. Detailinformationen zu dem verwendeten Ansatz finden sich in Blöchl und Braun (2005) und Blöchl (in Vorbereitung).

Da die ersten Inklinometerergebnisse zeigten, dass die Rutschungsbewegungen im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen sehr langsam sind, wurde Kontakt zu Wolfgang Schauerte vom Geodätisches Institut der Universität Bonn aufgenommen. In Kooperation wurde vor Ort das Vermessungsmessnetz aufgebaut und die Messungen durchgeführt. Zum Einsatz kamen das Mekometer ME 5000 und das Präzisionstachymeter Leica TDA 5005. Unerwartete Probleme beim ersten Messversuch führten zu einer verzögerten Messkampagne. Die Nullmessung wurde gemeinsam im Juni 2005 durchgeführt, die erste Wiederholungsmessung im November 2005 und die zweite im Juni 2006. Bisher liegen nur die Ergebnisse der ersten Wiederholungsmessung vor, die zweite ist noch in der Auswertung. Eine detaillierte Beschreibung des Messnetzes findet sich in Schauerte et al. (2006).

In gemeinsamer Geländearbeit wurden mit Oliver Sass (Universität Augsburg) Georadar- und Geoelektrikmessungen in Mössingen-Öschingen durchgeführt. Für die Georadarmessungen kam ein Malå Ramac GPR mit 25, 50 und 100 MHz Antennen zum Einsatz. Die Geoelektrik wurde mit dem Multielektrodengerät GeoTom RES durchgeführt. Die Auswertungen wurden von Oliver Sass vorgenommen. Detailinformationen werden in Sass et al. (im Druck) gegeben. Im Rahmen einer Diplomarbeit setzte Jan-Erik Kruse die Radiomagnetotellurik in Mössingen-Öschingen ein. Des Weiteren führte er geoelektrische Messungen mit einem ABEM Terrameter SAS 300 in Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen durch. An letzterem Standort betrieb er von Januar bis März 2006 ein ungefähr monatlich aufgelöstes Bodenfeuchtemonitoring mit der Geoelektrik. Die Geländearbeiten wurden weitestgehend gemeinsam durchgeführt, die Auswertung erfolgte durch J.-E. Kruse. Detailinformationen zu den Untersuchungen finden sich in Bell et al. (2006b) und Kruse (2006).

In den Bohrkernen von Mössingen-Öschingen konnten Kohlereste gefunden werden. Von fünf eingeschickten Proben waren drei datierbar. Die  $^{14}\text{C}$ -Datierungen wurden von Göran Possnert im Tandem Laboratory in Uppsala (Schweden) durchgeführt.

## 5 Methoden

Um die Gefahren und Risiken durch gravitative Massenbewegungen zuverlässig analysieren zu können, muss ein breites Spektrum an verschiedenen Methoden sowohl auf regionaler als auch lokaler Skale eingesetzt werden.

Die Basis aller regionaler Analysen stellen umfangreiche Informationen über die räumliche Verbreitung sowie das Alter von gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet dar. Darauf aufbauend können Gefährdungsmodellierungen durchgeführt und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten berechnet werden. Eine zentrale Schwachstelle in den bestehenden regionalen Ansätzen ist, dass das Volumen zukünftiger Ereignisse nicht ausreichend berücksichtigt wird. Daher wird in dieser Arbeit ein neuer quantitativer Ansatz entwickelt, um diese Volumina in der Gefahren- und Risikoanalyse zu integrieren und somit dieses Defizit zu beheben. Parallel wird ein einfacher qualitativer Ansatz angewendet. Die regionalen Analysen werden in den Untersuchungsgebieten Schwäbische Alb und Oberes Filstal durchgeführt.

Auf lokaler Skale zielt die Gefahrenanalyse zuerst auf die Erfassung der aktuellen und vergangenen Prozessdynamik, aus der dann die Gefahren mittels eines heuristischen Ansatzes qualitativ abgeschätzt werden. Untersucht werden zwei Hangrutschungskomplexe in den zwei Untersuchungsgebieten Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen.

Abgerundet wird das Methodenspektrum von einer Nutzenanalyse, die Aufschluss über den Nutzen der produzierten Ergebnisse für Akteure des Risikomanagements liefern soll.

Einen Überblick über die eingesetzten Methoden, die im Folgenden näher ausgeführt werden, gibt Abb. 5.1.

### 5.1 Regionale Gefahrenanalyse

#### 5.1.1 Inventare gravitativer Massenbewegungen

Zur Erstellung von Inventaren gravitativer Massenbewegungen werden in einem ersten Schritt potenzielle Quellen wie wissenschaftliche Publikationen, Behördenarchive und bereits existierende Datenbanken recherchiert und entsprechende Informationen zusammengetragen. Sofern die Daten nicht in einem GIS-Format vorliegen, werden die gravitativen Massenbewegungen von den Vorlagen digitalisiert oder in ein GIS-Format konvertiert. In einem nächsten Schritt werden die Daten im GIS räumlich dargestellt, analysiert und auf Ihre Verwendbarkeit insbesondere für die Frequenz-Magnitude-Analyse und die Gefährdungsanalyse untersucht und bewertet.



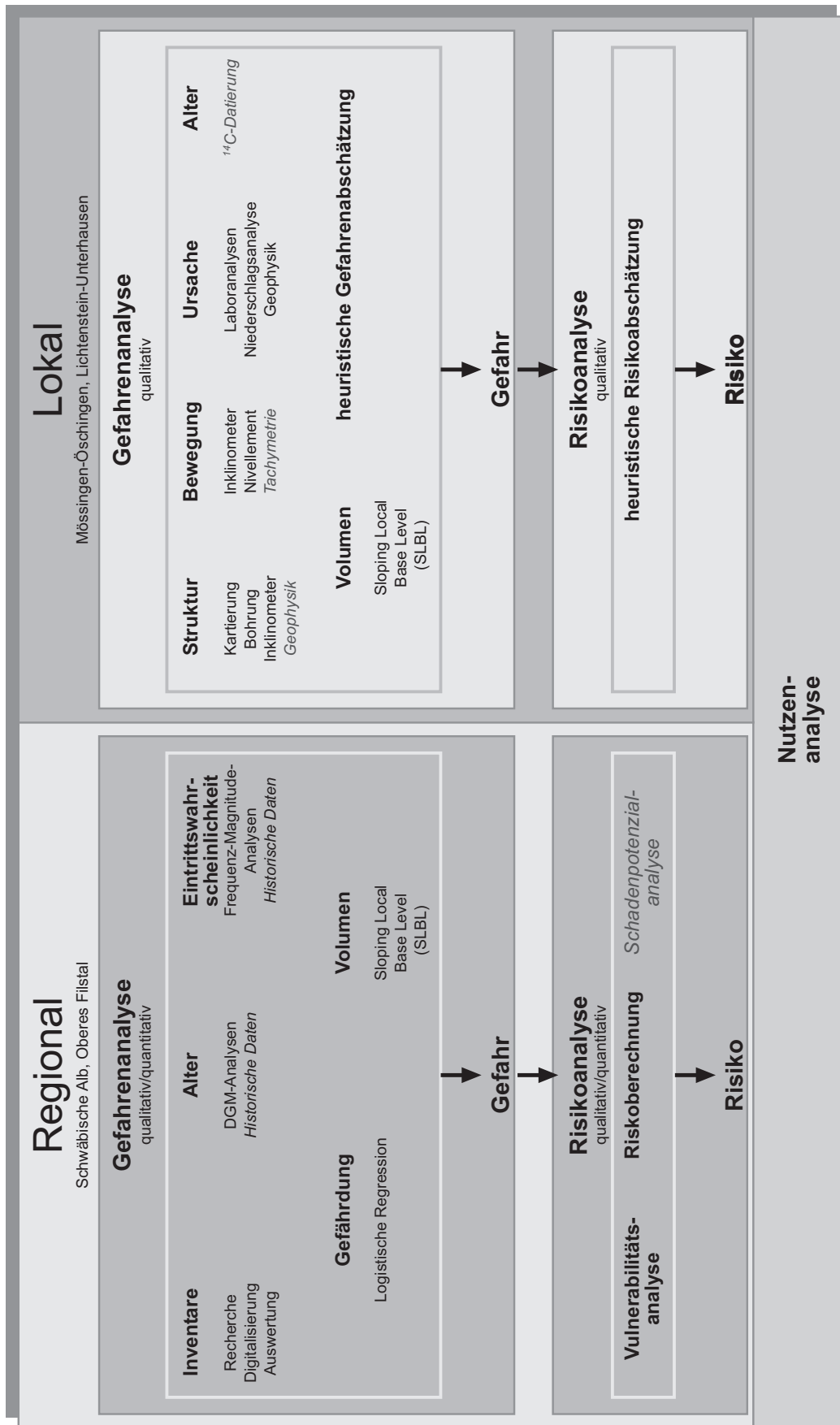


Abb. 5.1: Methodisches Konzept (kursiv gedruckte Arbeitsschritte wurden zumindest teilweise von anderen Bearbeitern durchgeführt und dieser Arbeit zur Verfügung gestellt)

## 5.1.2 Altersbestimmung

### 5.1.2.1 Auswertung historischer Daten

Die vom Teilprojekt *InterRISK History* erhobenen Daten wurden zum einen als reiner Text und zum anderen als historische Karten zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse wurden daher hinsichtlich des Zeitpunktes, Ortes, Schaden und der Größe ausgewertet, tabellarisch erfasst und anschließend in einer Zeitreihe dargestellt. Zusätzlich wurden die rezenten Ereignisse aus den Forsteinrichtungswerken, die von *InterRISK Perception* erhoben wurden, die Daten der Straßenbauverwaltung (Kohn 2007) sowie die datierten Ereignisse aus der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen ausgewertet und in die Zeitreihe aufgenommen.

Die historischen Karten wurden zusammen mit Marion Metzger aus dem Teilprojekt *InterRISK History* gesichtet und bezüglich des Vorkommens von gravitativen Massenbewegungen und deren Verortung im DGM1 analysiert. Bei einer erfolgreichen Verortung wurden die gravitativen Massenbewegungen in der Originalform aus der historischen Karte übernommen und anschließend deren genaue Umrisse im DGM1 digitalisiert.

### 5.1.2.2 Relative Datierungen mittels DGM-Analysen

Auf Grund der sehr hohen Auflösung des DGM1 wird die geomorphologische Aktivität einzelner Lokalitäten und Regionen im Untersuchungsgebiet anhand geomorphologischer Kriterien, wie sie McCalpin (1984 in Keaton und DeGraff 1996) zusammengestellt hat (siehe Kapitel 2.8), untersucht und eine relative Datierung vorgenommen. Neben rein geomorphologischen Kriterien werden auch Überschneidungsbereiche von gravitativen Massenbewegungen mit anthropogenen Strukturen analysiert. Dabei wird angenommen, dass, wenn z.B. anthropogen geschaffene Strukturen durch gravitative Massenbewegungen modifiziert oder zerstört werden, das Ereignis selbst jünger sein muss als die von ihm veränderte anthropogene Struktur.

## 5.1.3 Wiederkehrwahrscheinlichkeit

### 5.1.3.1 Historische Daten

Auf Basis der Zeitreihe der historischen und rezenten Rutschungen (Kap. 5.1.2.1) werden in Abhängigkeit von der Magnitude die entsprechenden Wiederkehrwahrscheinlichkeiten berechnet. In diesem Zusammenhang werden die Daten hinsichtlich Vollständigkeit und Informationsgehalt bezüglich der Magnitude untersucht und bewertet.

### 5.1.3.2 Frequenz-Magnitude-Analysen

Wie in Kap. 2.9 ausgeführt, können Frequenz-Magnitude-Analysen zur Berechnung der Wiederkehrwahrscheinlichkeiten genutzt werden. Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten, sollte der Datensatz für einen bestimmten Raum möglichst alle gravitativen Massenbewegungen enthalten,

sowie über genaue Informationen zur Größe der Ereignisse (betroffene Fläche oder involviertes Volumen) verfügen.

Da davon auszugehen ist, dass keins der in dieser Arbeit erhobenen Inventare alle über den zugrunde liegenden Zeitraum aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen erfasst, scheidet eine kumulative Frequenz-Magnitude-Analyse aus, da diese zu falschen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten führen würde. Daher wird in dieser Arbeit ein zweistufiges Vorgehen gewählt. In der ersten Stufe wird eine Frequenz-Magnitude-Analyse nach dem Verfahren von Malamud et al. (2004) durchgeführt. Dazu wurde von Fausto Guzzetti (CNR-IRPI Perugia, Italien) eine Microsoft EXCEL-Vorlage zur Verfügung gestellt. Die gravitativen Massenbewegungen werden nach der Flächengröße sortiert und in logarithmische Klassen (*bins*) aufgeteilt. Aus der Anzahl pro Klasse wird die Frequenzdichte in Abhängigkeit von der Größe der logarithmischen Klasse berechnet, die gegen die Magnitude im Diagramm aufgetragen wird. Die Auswertung dieser Analyse dient der Entscheidung, ab welcher Größe die gravitativen Massenbewegungen im Datensatz vollständig erfasst sind. Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Übergang zur Potenzgesetzverteilung (siehe Abb. 2.9, Kap. 2.9) genau diese Größe bestimmt. Auf Basis dieser Information wird dann für bestimmte Ereignisgrößen, die größer als dieser Schwellenwert sind, die Anzahl aus dem Datensatz ermittelt. Um das Wiederkehrintervall berechnen zu können, muss die Frequenz eines Ereignisses einer bestimmten Magnitude mit dem maximalen Alter des Datensatzes kombiniert werden. Dazu muss das maximale Alter der im Datensatz enthaltenen gravitativen Massenbewegungen bekannt sein bzw. grob abgeschätzt werden.

Das Wiederkehrintervall eines Ereignisses eines Teiluntersuchungsgebietes kann durch folgende Formel berechnet werden:

$$W_{T,A} = \frac{T_T}{N_{T,A}} \quad (7)$$

mit

$W_{T,A}$  = Wiederkehrintervall einer gravitativen Massenbewegung eines Teiluntersuchungsgebietes T mit einer Fläche größer oder gleich A

$T_T$  = Zeitraum, den der Datensatz des Teiluntersuchungsgebietes T umspannt, definiert durch die jüngste und älteste gravitative Massenbewegung im Datensatz

$N_{T,A}$  = Anzahl der gravitativen Massenbewegungen im Teiluntersuchungsgebiet T mit einer Fläche größer oder gleich A

A = Fläche der gravitativen Massenbewegung

Wie Crozier (1999a) anmerkt, ist das Wiederkehrintervall von der Größe des Untersuchungsgebietes abhängig (Kap. 2.9). Da kein vollständiger Datensatz flächendeckend für die Schwäbische Alb verfügbar ist, werden die Analysen in Abhängigkeit vom Datensatz nur für begrenzte Ausschnitte der Schwäbischen Alb durchgeführt. Unter der Annahme, dass die Frequenz-Magnitude-Beziehung von

gravitativen Massenbewegungen im jeweiligen Datensatz repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet ist, wird anschließend das Wiederkehrintervall für das gesamte Untersuchungsgebiet mit der nachfolgenden Formel hochgerechnet. Da die Schwäbische Alb jedoch eine ausgeprägte Hochfläche aufweist, auf der keine gravitativen Massenbewegungen auftreten, werden die Berechnungen zum einen für die jeweiligen Hangbereiche und zum anderen für die jeweiligen Albtraufbereiche durchgeführt:

$$W_{SWA,A} = W_{T,A} \times \frac{UG_T}{UG_{SWA}} \quad (8)$$

mit

$W_{SWA,A}$  = Wiederkehrintervall einer gravitativen Massenbewegung für die Schwäbische Alb mit einer Fläche größer oder gleich A

$W_{T,A}$  = Wiederkehrintervall einer gravitativen Massenbewegung des Teiluntersuchungsgebietes T mit einer Fläche größer oder gleich A

$UG_T$  = Größe des Hangbereichs bzw. Albtraufbereich im Teiluntersuchungsgebiet T (in km<sup>2</sup>)

$UG_{SWA}$  = Größe des Hangbereichs bzw. Albtraufbereich im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb (in km<sup>2</sup>)

Die Wiederkehrwahrscheinlichkeit pro Jahr errechnet sich aus dem Wiederkehrintervall wie folgt:

$$P_{W,A} = \frac{1}{W_A} \quad (9)$$

mit

$P_{W,A}$  = Wiederkehrwahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A pro Jahr

$W_A$  = Wiederkehrintervall einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A

#### 5.1.4 Gefährdungsmodellierung

Für die Modellierung der Gefährdung wurde die multiple logistische Regression ausgewählt. Ein Vorteil der logistischen Regression liegt in der Möglichkeit, kontinuierliche, binäre und kategoriale Variablen gleichzeitig zu verwenden, wie sie häufig in der Geomorphologie und Geologie vorkommen (Guzzetti 2005).

Bei der multiplen logistischen Regression wird die Beziehung zwischen einer binären abhängigen Variablen Y (d.h. Vorkommen (Y=1) und Nichtvorkommen (Y=0) von gravitativen Massenbewegungen) und einer Anzahl von unabhängigen, erklärenden Variablen analysiert. Die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen von gravitativen Massenbewegungen wird nach folgender Formel berechnet:

$$P(Y_i = 1) = \frac{e^{Z_i}}{1 + e^{Z_i}} = \frac{1}{1 + e^{-Z_i}} \quad (10)$$

mit

$$Z_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_m X_{im}, \quad i = 1, \dots, N \quad (11)$$

Die Regressionskoeffizienten werden mittels des Maximum-Likelihood-Verfahrens geschätzt. Das Ergebnis ist eine Wahrscheinlichkeitsaussage, die für jeden Punkt des Untersuchungsgebiet Werte zwischen 0 (0% Wahrscheinlichkeit für eine gravitative Massenbewegung) und 1 (100% Wahrscheinlichkeit für eine gravitative Massenbewegung) ausweist. Eine ausführliche Beschreibung der logistischen Regression findet sich z.B. in Hosmer und Lemeshow (2000).

Der Ansatz verlangt „[...] *near equal numbers of samples in the groups, and equal variance-covariance matrices of the groups. Deviance from equality may have severe consequences [...]*“ (Guzzetti 2005, S. 124). Aus diesem Grund und zur Verhinderung räumlicher Autokorrelationen, wurden in ESRI ArcGIS 9.1 mit der Erweiterung „Hawth’s Tools“ zufallsverteilte Punkte ausgewählt (100, 500 oder 1000 Punkte innerhalb und außerhalb von gravitativen Massenbewegungen). Dabei wurden voneinander unabhängige Trainings- und Testdatensätze erstellt. Für diese Punkte wurden die Werte der erklärenden Variablen abgeleitet und die Daten nach R (eine Open Source Statistiksoftware) exportiert. Das importieren der Daten erfolgte über ein Skript, welches von Alexander Brenning (Universität Waterloo, Kanada) bereitgestellt wurde.

Die Berechnung der logistischen Regression für die Trainingsdatensätze erfolgte in R mit Hilfe einer automatischen, schrittweise rückwärtsgerichteten Variablenselektion (mit dem Befehl *stepAIC*). Dabei wird mit allen Variablen im Anfangsdatensatz begonnen und bei jedem Schritt die Variable entfernt, die das Selektionskriterium am meisten verschlechtert (Schröder 2000). Das vom Algorithmus verwendete Selektionskriterium ist das Akaike Information Criterion (AIC). Das AIC bestraft eine zu hohe Anzahl von erklärenden Variablen im Modell (Brenning 2005). „*Das Modell mit dem geringsten AIC Wert wird als das bessere angesehen und Schritt für Schritt wird aus dem Gesamtangebot an Variablen die Menge ausgewählt, die sich als statistisch am günstigsten herausstellt*“ (Oldeland 2004, S. 49). Zusätzlich zu diesem Vorgehen wurden einzelne Berechnungen manuell durchgeführt.

Die Bestimmung der Modellgüte kann z.B. über eine Klassifikationstabelle erfolgen, in dem ein Schwellenwert (oft 0,5) festgelegt und anschließend die Anzahl der korrekt und falsch vorhergesagten Vorkommen und Nichtvorkommen analysiert wird (Hosmer und Lemeshow 2000). Da ein solches Vorgehen stark von dem zu wählenden Schwellenwert abhängt, bevorzugen Hosmer und Lemeshow (2000) und Schröder (2000) die sogenannte „Area under ROC Curve“ (AUROC). Die *Receiver Operating Characteristic* (ROC) Kurve entspricht einem Streudiagramm, in dem die Sensitivität (der Anteil der korrekt klassifizierten gravitativen Massenbewegungspunkte) gegen die 1-Spezifität (1 - Anteil der korrekt klassifizierten nicht von gravitativen Massenbewegungen betroffenen Punkte) für

sämtliche Schwellenwerte aus [0,1] aufgetragen wird (Schröder 2000). Die ROC-Kurve ist somit ein vom Schwellenwert unabhängiges Bewertungsverfahren. Die Fläche unterhalb dieser Kurve (AUROC) stellt ein integrierendes Gütemaß dar, welches die Eignung des Modells zur Klassifizierung beschreibt und Werte zwischen 0,5 (für ein Zufallsmodell) und 1 (bei perfekter Trennung zwischen den Gruppen) annehmen (Schröder 2000). Eine allgemeine Bewertung des AUROC-Wertes wurde von Hosmer und Lemeshow (2000) wie folgt vorgenommen:

AUROC = 0,5:	no discrimination
$0,7 \leq \text{AUROC} < 0,8$ :	acceptable discrimination
$0,8 \leq \text{AUROC} < 0,9$ :	excellent discrimination
$\text{AUROC} \geq 0,9$ :	outstanding discrimination

Die Berechnung des AUROC-Wertes erfolgt in dieser Arbeit ebenfalls mit einem Skript von Alexander Brenning, sowohl für die Trainings- als auch für die Testdatensätze, d.h. es wird eine zufällige Kreuzvalidierung durchgeführt. Unter der Annahme, dass die ermittelte statistische Beziehung für die Zufallspunkte repräsentativ für das gesamte Untersuchungsgebiet ist, wird diese in ArcGIS auf den ganzen Datensatz angewendet und anschließend in die fünf folgenden Klassen zur Anfälligkeit gegenüber gravitativen Massenbewegungen eingeteilt:

0 – 0,2:	sehr gering
> 0,2 – 0,4:	gering
> 0,4 – 0,6:	mittel
> 0,6 – 0,8:	hoch
> 0,8:	sehr hoch

Als weiteres Gütemaß wird abschließend der Anteil der gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen untersucht.

Für die Gefährdungsmodellierung im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb stehen folgende Variablen zur Verfügung: Höhe, Exposition, Hangneigung, vertikale, horizontale, tangentielle, maximale und minimale Wölbung (100 m und 500 m Radius), Einzugsgebiet oberhalb des jeweiligen Punktes und Geologie (GÜK200). Die Gefährdungsmodellierung wurde zum einen mit den Prozessbereichen gravitativer Massenbewegungen von Dongus (1977) und zum anderen mit den Daten aus der forstlichen Standortkartierung mit einer Auflösung von jeweils 50 m durchgeführt.

Für die Gefährdungsmodellierung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal stehen folgende Variablen zur Verfügung: Höhe, Exposition, Hangneigung, vertikale, horizontale, tangentielle, maximale und minimale Wölbung (100 m und 500 m Radius), Einzugsgebiet oberhalb des jeweiligen Punktes,

Geologie (GÜK200, GK25) und Böden (BÜK200). Die Informationen über die gravitativen Massenbewegungen wurden aus dem Datensatz von Brennecke (2006) gewonnen. Die Berechnungen wurden mit einer Auflösung von 10 m durchgeführt.

Da die gravitativen Massenbewegungen in den Untersuchungsgebieten teilweise relativ alt sein können, machte es keinen Sinn, die vorhandenen Informationen zur aktuellen Landnutzung in den Modellierungen zu berücksichtigen.

### **5.1.5 Regionale Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL)**

Der Ansatz des Sloping Local Base Level (SLBL) wurde von Jaboyedoff et al. (2004) für die Berechnung des Volumens potenzieller zukünftiger gravitativer Massenbewegungen entwickelt. Er basiert auf dem geomorphologischen Konzept der Erosionsbasis (*base level*). Die Erosionsbasis ist definiert als das Niveau, bis zu dem ein Fluss sein Bett erodieren kann und ist somit durch die Höhenlage seiner Mündung gegeben. Eine temporäre lokale Erosionsbasis (*local base level*) ist an jeder Stelle eines Flusslängsprofils gegeben, d.h. stromaufwärts kann der Fluss nicht tiefer erodieren als bis zu dem Niveau des jeweils betrachteten Punktes (Ahnert 1996). Unter der Annahme, dass alle unterschrittenen Hangbereiche das Potenzial aufweisen, früher oder später durch eine gravitative Massenbewegungen hangabwärts verlagert zu werden, definieren Jaboyedoff et al. (2004) eine geneigte lokale Erosionsbasis (*sloping local base level*). Diese entspricht z.B. für Rutschungen der potenziellen Gleitfläche.

Auf Basis des SLBL entwickeln Jaboyedoff et al. (2004) einen Algorithmus, der es ermöglicht, das Volumen zukünftiger gravitativer Massenbewegungen in einer Region aus einem DGM abzuleiten. Es handelt sich dabei um ein iteratives Verfahren, das für jeden Punkt des DGM die Höhe dieses Punktes mit der Höhe der vier Nachbarkunkte vergleicht. Aus den vier Nachbarkunkten wird das sich gegenüberliegende Punktepaar ausgewählt, welches die extremsten Höhendifferenzen aufweist. Ist die Höhe des zentralen Punktes größer als der Durchschnitt der zwei ausgewählten Punkte, so wird die Höhe des zentralen Punktes auf den Durchschnittswert reduziert. Die Berechnungen setzen sich so lange fort, bis sich die Höhen zwischen zwei Iterationen nicht mehr verändern. Mittels vieler Iterationen kann so der SLBL errechnet werden (siehe Abb. 5.2 A). Einige Punkte müssen dabei im Rahmen der Berechnung fixiert werden, da sie ansonsten in einer Ebene resultieren würde. Unter der Annahme, dass Flüsse für gravitative Massenbewegungen temporäre lokale Erosionsbasen darstellen, verwenden Jaboyedoff et al. (2004) diese auf regionaler Ebene als Fixpunkte (siehe Abb. 5.2 B). Sie leiten das Flussnetz direkt aus dem DGM ab. Dabei ist die Festlegung des Schwellenwerts zur Ausweisung der Flüsse, d.h. die Anzahl der Pixel, die in ein anderes Pixel entwässern, als kritisch anzusehen, da diese die Dichte des Flussnetzes bestimmt und damit Einfluss auf die berechneten

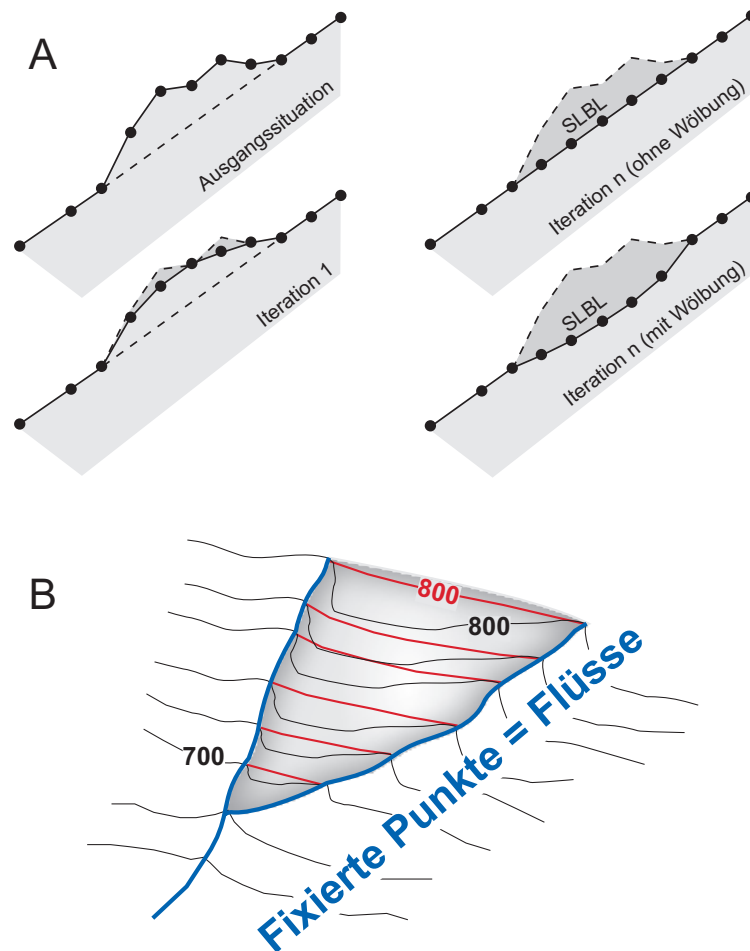


Abb. 5.2: Konzept des Sloping Local Base Level (SLBL). In A sind das iterative Vorgehen des Algorithmus, sowie dessen Endprodukte mit und ohne eingesetzten Wölbungsparameter dargestellt. In B wird die Bedeutung der Fixpunkte für die Berechnung des SLBL veranschaulicht. Durch die Fixpunkte wird nur das Volumen für den begrenzten Körper berechnet, welches ansatzweise durch die grau hinterlegte Fläche und den neuen Verlauf der Höhenlinien (in rot) angezeigt wird (nach Jaboyedoff et al. 2004).

Volumina der gravitativen Massenbewegungen nimmt. Als weitere Fixpunkte verwenden Jaboyedoff et al. (2004) die höchsten Bereiche des Grats des Untersuchungsgebietes.

Neben den Fixpunkten nimmt auch die Auflösung des DGM Einfluss auf die Berechnung des SLBL. In der Berechnung können folgende Parameter angegeben werden: Ein Wölbungsparameter, der anstatt zu einer linearen zu einer gekrümmten Gleitfläche führt; ein Wölbungsgrenzwert, um eine Endlosschleife bei der Wölbungsberechnung zu vermeiden; ein Parameter, der mit Ausnahme der Fixpunkte eine Übertiefung unter die, durch die Fixpunkte vorgegebene Erosionsbasis erlaubt oder verbietet; und eine maximale Tiefe.

Der SLBL-Ansatz ist ursprünglich für das Hochgebirge entwickelt worden. Die Anwendung im Untersuchungsgebiet zeigte schnell, dass Flüsse als wichtigstes Kriterium für die Berechnung der



Volumen potenzieller gravitativer Massenbewegungen nicht geeignet sind, da das Relief nicht so markant ausgeprägt ist wie im Hochgebirge und somit keine sinnvollen Einheiten abgegrenzt werden können. Zudem wird die Annahme, dass vor allem im Bereich der unterschrittenen Hänge gravitative Massenbewegungen in Zukunft auftreten, in der Schwäbischen Alb oft nicht erfüllt. Daher ist es notwendig, den Ansatz weiter zu entwickeln und neue Kriterien für die Diskretisierung des Reliefs in potenzielle gravitative Massenbewegungseinheiten zu testen.

Für die Diskretisierung des Reliefs wurden ein Hangneigungsschwellenwert, unterhalb dessen alle Pixel Festpunkte darstellen, sowie verschiedenste geomorphometrische oder geomorphometrisch abgeleitete Parameter getestet. Insbesondere kamen verschiedene Wölbungsparameter (maximale, minimale, tangentiale, vertikale und horizontale Wölbung) nach Evans (1980) zum Einsatz. Die Umsetzung der Interpolationsalgorithmen für ESRI ArcInfo GIS erfolgte durch Schmidt et al. (2003) mittels der Arc Macro Language (AML). Die Algorithmen basieren auf einer Moving-Window Analyse bei der die Größe des Windows frei gewählt werden kann (Schmidt und Andrew 2005). In dieser Arbeit kamen vielfältige Window-Größen zwischen 3 m (3 Pixel beim DGM1) und 500 m (50 Pixel beim DGM10, d.h. DGM mit 10 m-Auflösung) zum Einsatz. Ein weiterer, von Jochen Schmidt (NIWA, Neuseeland) entwickelter Algorithmus berechnet auf Basis der Hangneigung und der vertikalen, tangentialen, maximalen und minimalen Wölbung 15 Formelemente des Reliefs (u.a. Ebene, Hang, Hangfuß, Depression, Sattel, Grat, Gerinne, und Sporn). Da die Eingangsparameter mit unterschiedlichen Window-Größen berechnet wurden, konnten auch die Formelemente für unterschiedliche Skalenebenen berechnet werden. Durch den multiskaligen Ansatz sollte gewährleistet werden, dass das Relief in Abhängigkeit der Größenszenarien der potenziellen gravitativen Massenbewegungen in größere und kleinere Einheiten zerlegt wird.

## **5.1.6 Gefahrenberechnung**

### **5.1.6.1 Qualitativ**

Bei der qualitativen Gefahrenberechnung werden die Gefährdungskarten in qualitative Gefahrenkarten transformiert, unter der Annahme, dass die Flächen die die höchsten Gefährdungen aufweisen auch jene sind, die am ehesten versagen werden und somit eine Zeitkomponente enthalten (siehe Kap. 3.1). Aus der sehr geringen Gefährdung wird somit eine sehr geringe Gefahr, aus der sehr hohen Gefährdung eine sehr hohe Gefahr, usw.

### **5.1.6.2 Quantitativ**

Bei der quantitativen Gefahrenberechnung wird die Gefährdung mit der Fläche der jeweiligen gravitativen Massenbewegungseinheit, der für diese Fläche errechneten Wiederkehrwahrscheinlichkeit und dem Volumen kombiniert. Für die jeweilige Fläche wird der Durchschnittswert der Gefährdung aus allen Pixeln berechnet. Dieser Wert wird mit der magnitudenabhängigen Wiederkehrwahrscheinlichkeit multipliziert. Dabei werden zwei Szenarien berücksichtigt: Zum einen

ein Worst-Case-Szenario, bei dem jeder Hang der Fläche A die Wiederkehrwahrscheinlichkeit dieser Fläche zugewiesen bekommt. Dabei kommt es aber regional zu einer wesentlichen Überschätzung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit, da diese für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet wurde. In einem zweiten Szenario wird die Wiederkehrwahrscheinlichkeit einer Fläche A durch die Anzahl der gravitativen Massenbewegungseinheiten, die diese Fläche aufweisen, dividiert und den jeweiligen Hängen zugewiesen. Da bisher nur die Fläche als Magnitudenparameter berücksichtigt wurde, über den SLBL-Ansatz aber das Volumen der gravitativen Massenbewegung abgeschätzt werden kann, wird zusätzlich ein Skalierungsfaktor für das Volumen in die Berechnung integriert. Dabei wird das Volumen der gravitativen Massenbewegungen in fünf Klassen eingeteilt und ein entsprechender Skalierungsfaktor zugewiesen (Tab. 5.1):

Tab. 5.1: Klassifikation des Skalierungsfaktors für das Volumen der gravitativen Massenbewegungen

Volumen der gravitativen Massenbewegung (V <sub>o</sub> )	Skalierungsfaktor Volumen (S <sub>v</sub> )
< 1.000 m <sup>3</sup>	1
1.000 - < 10.000 m <sup>3</sup>	2
10.000 - < 100.000 m <sup>3</sup>	3
100.000 - < 1.000.000 m <sup>3</sup>	4
> 1.000.000 m <sup>3</sup>	5

Der Ansatz kann in folgenden Formeln zusammengefasst werden:

$$H_{WC,A} = G_A \times W_A \times S_V \quad (12)$$

mit

$H_{WC,A}$  = Gefahr bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A im Worst-Case-Szenario

$G_A$  = durchschnittliche Gefährdung einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A

$W_A$  = Wiederkehrwahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A

$S_V$  = Skalierungsfaktor für das Volumen einer gravitativen Massenbewegung

$$H_A = G_A \times \frac{W_A}{N_{H,A}} \times S_V \quad (13)$$

mit

$H_A$  = Gefahr bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A

$N_{H,A}$  = Anzahl der gravitativen Massenbewegungseinheiten mit einer Fläche größer oder gleich A

## **5.2 Lokale Gefahrenanalyse**

### **5.2.1 Kartierungen**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die lokalen Untersuchungsgebiete geomorphologisch im Maßstab 1:5.000 kartiert. Dabei wurde sowohl auf die Legende der GMK25 (Leser und Stäblein 1980) als auch auf die speziell auf gravitative Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb zugeschnittene Legende von Terhorst (1997) zurückgegriffen. Für die Umsetzung in ArcInfo 9.1 wurde der GMK Map Style von Jan-Christoph Otto (Geographisches Institut, Universität Bonn) verwendet. Die Kartierungen erfolgten mittels Kartiervorlagen, die auf Basis des DGM1 erstellt wurden.

### **5.2.2 Bohrungen**

Die letztendlich zu Inklinometermessstellen ausgebauten Bohrungen, wurden so verteilt, dass mittels der Inklinometermessungen möglichst die Dynamik des jeweiligen gesamten Geosystems erfasst werden konnte. Daher wurden zur Festlegung der Bohrstandorte intensive Geländebegehungen durchgeführt, um den Aufbau der Rutschareale zu analysieren. Die Rammkernsondierungen wurden mit dem Rammsondiergerät der Firma Abovo Geo-Technik durchgeführt. Dabei kam ein Fallgewicht von 50 kg bei einer Fallhöhe von 50 cm zum Einsatz. Die Tiefe der Rammkernsondierungen gibt immer die an den jeweiligen Standorten maximal mit der Geräteausstattung zu erreichende Tiefe an. In Lichtenstein-Unterhausen ergab sich auf dem Grundstück des geschädigten Hauses die Möglichkeit, eine im Auftrag des Hausbesitzers durch die Bohrfirma Goller erbrachte Rotationsbohrung zu nutzen und auszuwerten. Die für Mössingen-Öschingen geplante Großbohrung wurde vom Forschungsträger nicht genehmigt.

### **5.2.3 Laboranalysen**

Die bei den Bohrungen gewonnenen Bohrkerns wurden vor allem auf der Basis von Zusammensetzung, Farbe und Wassergehalt in einheitliche Abschnitte unterteilt, aus denen Proben für die Körnungsanalyse und die Bestimmung des Kalkgehalts und des Wassergehalts genommen wurden. Die Körnungsanalyse wurde mit der Pipettanalyse nach Köhn in Kombination mit der Siebmethode durchgeführt. Der Kalkgehalt wurde mit der gasvolumetrischen Methode nach Scheibler bestimmt. Detailinformationen zu den jeweiligen Messverfahren finden sich in Schlichting et al. (1995).

### **5.2.4 Inklinometermessungen**

Alle Rammkernsondierungen sowie die große Bohrung in Lichtenstein-Unterhausen wurden zu Inklinometermessstellen ausgebaut. Dazu wurden in die Bohrlöcher Plastikinklinometerrohre (55 mm Durchmesser) der Firma Glötzl installiert. Die Messungen in Schritten von 50 cm wurden mit der mobilen Messsonde NMG (System Glötzl) durchgeführt. Die Genauigkeit der Messsonde variiert zwischen 0,01 und 0,1 mm pro Messschritt, in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des

Inklinometerrohres (von bis zu  $5,5^\circ$  bzw.  $30^\circ$ ). Die Messungen erfolgten ab der Nullmessung ungefähr einmal im Monat, soweit dies die Bedingungen zuließen. Die Auswertung der Messungen wurde zum einen mit der Software GLNP V3.1 (Firma Glötzl) durchgeführt, die die gemessenen Neigungsveränderungen in Verschiebungsbeträge pro Tiefeneinheit umrechnet und als Summenkurve darstellt. Zum anderen wurden pro Messstelle die Messwerte aus der Tiefe mit der größten Bewegung abgegriffen und in Microsoft EXCEL übertragen. Dort wurde zusammen mit den Klimadaten deren zeitlicher Verlauf ausgewertet, um Hinweise auf die Ursachen der Bewegung zu bekommen.

### 5.2.5 Nivellements

Beim Nivellement handelt es sich um eine geometrische Höhenmessung, die mittels Nivelliergerät und Nivellierlatten durchgeführt wird. Der Höhenunterschied zweier Punkte wird mit Hilfe der horizontalen Ziellinie (Zielstrahl) des Nivelliergeräts und der vertikal aufgestellten Nivellierlatten über die Differenz aus der Ablesung des Rückblicks zur Ablesung des Vorblicks gemessen (siehe Abb. 5.3). Um die Höhenunterschiede zwischen mehreren Punkten zu messen, wird das Streckennivellement eingesetzt (Petrahn 1999). Ist die Distanz oder der Höhenunterschied zu groß, oder gibt es unüberwindbare Hindernisse, so werden temporäre Wechsellatten zwischen die zu messenden Punkte gesetzt (Abb. 5.3). Unter Umständen ist es sinnvoll, einzelne Zielobjekte, die nicht in Zugrichtung liegen, als sogenannte Seitblicke aufzunehmen. Die Nivellements wurden in den lokalen Untersuchungsgebieten als Doppelnivellements durchgeführt. Das Doppelnivellement setzt sich aus zwei unabhängigen Streckennivellements zusammen, die einmal vom Start- zum Endpunkt und vom End- zum Startpunkt geführt werden (Petrahn 1999). Da theoretisch die Differenz aus der Summe aller Vorblicke und der Summe aller Rückblicke Null ergibt, kann über diese Differenz der Messfehler berechnet werden kann. Die Messungen wurden mit dem Digitalnivellier SDL30 von Sokkia durchgeführt. Der Messfehler dieses Systems beträgt ca. 0,2-0,4 mm bei der Höhenmessung im Vergleich zum Anschlusspunkt (Schauerte 2007, Persönliche Mitteilung).

Im Laufe der ersten Inklinometermessungen in Mössingen-Öschingen wurde festgestellt, dass der Boden um das oberflächlich einbetonierte Inklinometer in sehr trockenen Zeiten auf Grund des Schrumpfens des tonreichen Materials um bis zu 3 cm gegenüber dem Fundament absank. Daraufhin stellten sich Fragen nach der Dynamik des Schrumpfens und Quellens des Bodens und deren Auswirkungen auf die Inklinometermessungen. Um diese Dynamik zu erfassen, wurden Nivellements im Bereich der Wiese oberhalb des Grundstücks mit dem zerstörten Haus durchgeführt. Dazu wurden drei Festpunkte auf der Straße angebracht, sowie Markierungen an den zwei sich auf der Wiese befindenden Inklinometer (Oes01 und Oes04). Zusätzlich wurde der Vermarkungspunkt 108 aus dem tachymetrischen Vermessungsnetz in die Nivellements miteinbezogen. Etwas später wurden zwei zusätzliche Bodenpunkte in der Nähe der beiden Inklinometer installiert und mit eingemessen. Die Nullmessung wurde im November 2004 durchgeführt. Die erste Wiederholungsmessung erfolgte im Juni 2005. Danach wurden im engeren zeitlichen Abstand 8 Wiederholungsmessungen durchgeführt.

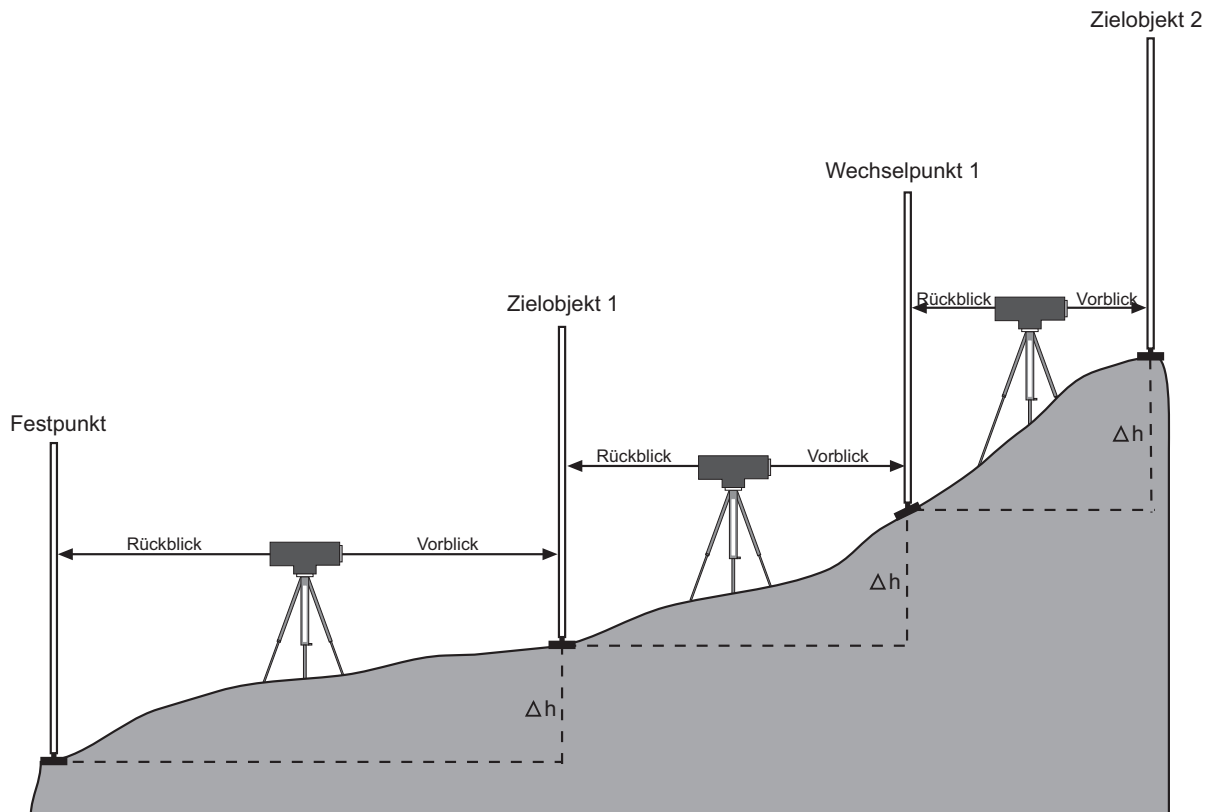


Abb. 5.3: Prinzip des Streckennivellements (nach Petrahn 1999)

In Lichtenstein-Unterhausen wurden an einem Haus mit Risschäden 2002 und 2003 Nivellements von einem Vermessungsbüro durchgeführt. Es umfasst drei Festpunkte auf der Straße, sowie vier Nivellementpunkte am Haus. Da die Rissbildung in der Mitte des Hauses zwischen Altbau und Neubau auftritt, wurde mittels der Wiederholungsmessung im Jahr 2003 bestimmt, welche Haushälfte sich von welcher weg bewegt. Die ersten Inklinometermessungen in Lichtenstein-Unterhausen zeigten Bewegungen im Untergrund an. Daher wurden ab Oktober 2005 insgesamt neun Nivellements auf Basis des vorhandenen Messsystems durchgeführt, um die Auswirkungen der Bewegungen auf das Haus untersuchen zu können. Die Messergebnisse von 2002 und 2003 wurden vom Hauseigentümer E. Siegler zur Verfügung gestellt, so dass dadurch die Messreihe bis 2002 verlängert werden konnte.

### 5.2.6 Goelektrisches Bodenfeuchtemonitoring

Wie in Kap. 2.4 bereits erwähnt, so sind die Ergebnisse der Gleichstromgeoelektrik vom Bodenwasserhaushalt abhängig. Auf Grund dieser Tatsache wurden erste Vorstudien zum Monitoring der Bodenfeuchte mittels Gleichstromgeoelektrik in Lichtenstein-Unterhausen durchgeführt, die sehr brauchbare Ergebnisse lieferten (Bell et al. 2006b). Daraufhin wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Jan-Erik Kruse zwei permanente Gleichstromgeoelektrikprofile in Lichtenstein-Unterhausen installiert und das Bodenfeuchtemonitoring gestartet (Kruse 2006). Das Monitoring wurde im Rahmen der vorliegenden Doktorarbeit weitergeführt. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Aspekte der

Gleichstromgeoelektrik erwähnt und anschließend im Detail auf den Untersuchungsaufbau eingegangen.

Bei der Gleichstromgeoelektrik werden über zwei Spannungselektroden elektrische Ströme in den Boden eingespeist, die stationäre Gleichstromfelder aufbauen. Über zwei Potzialektroden wird die Spannung gemessen, aus der ein scheinbarer Widerstand für die jeweilige Konfiguration berechnet wird. Charakteristische Widerstandswerte für unterschiedliches Untergrundmaterial sind in Tab. 5.2 nach verschiedenen Autoren zusammen gestellt.

Tab. 5.2: Charakteristische spezifische Widerstandswerte für unterschiedliche Materialien

Material	Spezifischer Widerstand ( $\Omega\text{m}$ )			
	Reynolds 1997	Knödel et al. 1997	Bouillon 2005	Kneisel 2003 (v.a. nach Telford et al. 1990)
Kalksteine	50 – 10 <sup>7</sup>	100 (geklüftet, feucht) – >10 <sup>5</sup> (kompakt)	60 – 6000	100 - 10 <sup>4</sup>
Mergel	3 – 70			
Ton	1 – 100	3 – 30	1 – 100	1 – 100
Ton (sehr trocken)	50 – 150	>1000		
London Ton	4 – 20			
Lias Ton	10 – 15			
Boulder Ton	15 – 35			
Mercia Ton	20 – 60			
Regenwasser	20 – 100			
Grundwasser				10 – 300
Oberboden	250 – 1700			
Boden (40% Ton)	8			
Boden (20% Ton)	33			
Trockener sandiger Boden	80 – 1050			
Kiese	100 (wassergesättigt) – 1400 (trocken)	50 (wassergesättigt) – >10 <sup>4</sup> (trocken)		100 – 400
Sand		50 (wassergesättigt) – >10 <sup>4</sup> (trocken)		100 – 5000
Trockener Sand			500 – 3000	
Quartärer / rezenter Sand	50 – 100			
Sand und Kiese	30 – 225		1000 - 10 <sup>4</sup>	
Sandiger Ton / toniger Sand	30 – 215			
Schluff		20 – 50		
Lösslehm		30 – 100		
Schutt und Kolluvium			150 - 400	

Der spezifische Widerstand ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes ist auf folgende drei Ursachen zurück zu führen (nach Weidelt 1997):

1) Elektronische (metallische) Matrixleitfähigkeit

Dabei handelt es sich um die Leitfähigkeit der gesteinsbildenden Minerale. Da sie bei Silikaten, Karbonaten und Sulfaten sehr gering ist, kann sie für das betrachtete Untersuchungsgebiet vernachlässigt werden.

2) Elektrolytische Leitfähigkeit

Darunter ist die Leitfähigkeit zu verstehen, die durch Ionentransport im Porenwasser des Gesteins stattfindet. Sie ist von der Leitfähigkeit des Porenwassers und der Größe und Vernetzung des Porenraums abhängig. Da bereits ein durchgehender dünner Feuchtigkeitfilm an den inneren Gesteinsoberflächen eines zusammenhängenden Porennetzwerks die Leitfähigkeit um vier bis fünf Zehnerpotenzen erhöhen kann, stellt sie im Untersuchungsgebiet die wichtigste Komponente dar.

Die Leitfähigkeit gesättigter und teilgesättigter tonfreier Sedimente kann in guter Näherung mit „Archies Formel“ beschrieben werden (Weidelt 1997):

$$\rho_0 = \frac{a}{\phi^m} \cdot \rho_w \cdot S^{-n} \quad (14)$$

wobei

$\rho_0$  spezifischer elektrischer Widerstand des Sediments

$\rho_w$  spezifischer Widerstand des Porenwassers

$\phi$  Porosität des Gesteins

$a$  Proportionalitätsfaktor

$m$  Zementationsexponent

$S$  Sättigungsgrad

$n$  Sättigungsexponent

Daraus folgt, dass die Veränderungen des spezifischen Widerstands des Untergrunds direkt abhängig sind von den Veränderungen des Sättigungsgrades des Untergrunds, wenn alle anderen Faktoren konstant bleiben (Kruse 2006). Diese Annahme stellt die wichtigste Grundlage für die Eignung der Gleichstromgeoelektrik zum Bodenfeuchtemonitoring dar.

3) Grenzflächenleitfähigkeit

Die Grenzflächenleitfähigkeit entsteht durch die Wechselwirkung der Porenflüssigkeit mit der Gesteinsmatrix, wodurch ein Stromfluss im Bereich der Kornoberflächen bewirkt wird. Sie ist vor allem eine Eigenschaft der Tone und wird mit deren Kationenaustauschkapazität in Verbindung gebracht. Da der Untergrund im Untersuchungsgebiet einen hohen Tonanteil aufweist, muss die „Archies Formel“ um eine Ohm'sche Komponente der Grenzleitfähigkeit erweitert werden. Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, diese Komponente zu

quantifizieren. Es wurde davon ausgegangen, dass auch ohne die Quantifizierung des Einflusses des Tons generelle Veränderungen des Durchfeuchtungsmusters erkennbar sein sollten, die mit den abwechselnden und unterschiedlich tiefen Fließ- und Rutschbewegungen, wie sie durch das Inklinometer Lic02 angezeigt werden, in Verbindung stehen, um so weitere Hinweise auf die Bewegungsursachen zu erhalten

Die zwei permanenten Gleichstromgeoelektrik-Profile setzen sich aus einem Längs- und einem Querprofil zusammen. Das Längsprofil weist eine Länge von 180 m auf und besteht aus 61 Edlestahlelektroden im Abstand von 3 m. Das Profil beginnt im Garten des geschädigten Hauses und reicht auf der Schutthalde bis ca. 25 m an eine ausstreichende Kalksteinwand heran. Bei Profilmeter 47 befindet sich die Großbohrung, bzw. das Inklinometer Lic02 (direkt am geschädigten Haus). Das Querprofil ist 210 m lang und verläuft parallel zur Straße. Es besteht aus 71 Edlestahlelektroden im Abstand von 3 m. Die Edlestahlelektroden haben einen Durchmesser von 6 mm und eine Länge von 300 mm. Ab Januar 2006 wurden das Längsprofil mit drei Kabeln und das Querprofil mit vier Kabeln gemessen, um die maximale Auslage sowie die Eindringtiefe zu erhöhen. Die Messungen wurden mit der Wenner-Auslage durchgeführt. Für die Messungen wurde ein ABEM Terrameter SAS 300 und ein ABEM Terrameter SAS 4000 eingesetzt. Kruse (2006) führte vom 31.01.2006 bis zum 09.03.2006 drei Messungen durch. Im Rahmen dieser Arbeit wurden weitere sieben, meist monatliche Messungen durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten mit Res2Dinv und Surfer 8.0.

Die Arbeit von Kruse (2006) zeigte, dass für das Monitoring die Auswertung der gemessenen scheinbaren Widerstände zu besseren Ergebnissen führt, als eine Auswertung der invertierten Widerstände, da durch die Inversion Artefakte erzeugt werden, die die Analyse der Veränderung der Bodenfeuchte behindern. Daher wurden in dieser Arbeit nur die gemessenen scheinbaren Widerstände analysiert.

### **5.2.7 Lokale Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL)**

Die Berechnung des Volumens potenzieller zukünftiger gravitativer Massenbewegungen auf lokaler Skale basiert weitestgehend auf den Ausführungen zum regionalen Ansatz (Kap. 5.1.5). Die einzige Ausnahme besteht darin, dass die Fixpunkte zur Volumenberechnung durch die Grenzen eines einzelnen Hangrutschungskörpers vorgegeben werden. Somit entfällt die aufwändige Ableitung von geeigneten Fixpunkten und wird ersetzt durch verschiedene Szenarien des Ausmaßes zukünftiger Ereignisse.

Die Berechnungen sind nur in Mössingen-Öschingen durchgeführt worden. Um die Rechenzeit gering zu halten, wurde eine 20 m-Auflösung des DGM verwendet. Die Parametereinstellungen wurden durch ein iteratives Verfahren optimiert, in dem die Lage und Form der Gleitfläche an zwei Profilen auf Plausibilität überprüft wurde.



## 5.2.8 Heuristische Gefahrenabschätzung

Auf Basis sämtlicher in den lokalen Untersuchungsgebieten erhobenen Daten werden die Gefahren durch gravitative Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude mittels eines heuristischen Ansatzes qualitativ abgeschätzt. Dabei sind insbesondere die gemessenen Bewegungsraten, sowie die im Gelände und im DGM1 anhand der Erdoberflächenformen festzustellenden Aktivitätsmuster von großer Bedeutung. Des Weiteren werden die Erfahrungen über die generelle Aktivität von gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb als Hintergrundinformation zur Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Großereignissen genutzt.

## 5.3 Regionale Risikoanalyse

### 5.3.1 Vulnerabilitätsanalyse

Im qualitativen Ansatz wird von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen, d.h. dass ein Risikoelement total zerstört wird, wenn es von einer gravitativen Massenbewegung getroffen wird (Vulnerabilität  $V = 1$ ).

Beim quantitativen Ansatz wird jeder Landnutzungseinheit in Abhängigkeit vom jeweiligen Volumen der potenziellen zukünftigen gravitativen Massenbewegung ein Vulnerabilitätswert zugewiesen. Dieser wird auf Basis von Richtwerten aus der Literatur abgeschätzt, die in Bell (2002) und Glade (2003b) zusammenfassend dargestellt sind.

### 5.3.2 Schadenpotenzialanalyse

Für die Untersuchungsgebiete Schwäbische Alb und Oberes Filstal wurden die Informationen über die Risikoelemente aus den Landnutzungsdaten des Digitalen Landschaftsmodells (DLM25) gewonnen. Da das DLM25 zu detaillierte Landnutzungsklassen aufweist, wurde dieses in vier Siedlungsflächentypen (Wohngebiete, Mischgebiete, Gewerbegebiete und Flächen für Gemeinbedarf (u.a. Verwaltung, Krankenhäuser, Kureinrichtungen)) sowie in forstwirtschaftliche Flächen, landwirtschaftliche Flächen, vegetationslose Flächen, Wasser und Sonstiges reklassifiziert.

Die Zuweisung der qualitativen und quantitativen Sachwerte erfolgte auf Basis der von Alexander Blöchl (*InterRISK Assess*) erhobenen und klassifizierten Werte (Tab. 5.3). Die Einteilung der Klassen orientiert sich an natürlichen Klassengrenzen in den erhobenen Schadenpotenzialdaten (Blöchl in Vorbereitung). Den Landnutzungen vegetationslose Fläche, Wasser und Sonstige, die nur sehr geringe Flächenanteile einnehmen, wurde mit der Schadenpotenzialklasse sehr gering nur ein qualitativer Sachwert zugeordnet.

Tab. 5.3: Durchschnittliche Sachwerte nach unterschiedlichen Nutzungstypen, sowie daraus abgeleitete Schadenpotenzialklassen (Blöchl in Vorbereitung)

Flächennutzung	Sachwert in €/m <sup>2</sup>	Schadenpotenzialklasse
Forstwirtschaftliche Flächen	0,75	1 (sehr gering)
Landwirtschaftliche Flächen	1,05	1 (sehr gering)
Wohngebiete <sup>1</sup>	630	3 (mittel)
Mischgebiete <sup>1,2</sup>	935	4 (hoch)
Gewerbegebiete <sup>3</sup>	225	2 (gering)
Flächen für Gemeinbedarf <sup>2,4</sup>	1360	5 (sehr hoch)
Grünflächen <sup>4</sup> (Gestehungskosten)	50	1 (sehr gering)
Sonderflächen <sup>2,4</sup>	540	3 (mittel)

<sup>1</sup>ohne Hausrat <sup>2</sup>ohne Ausstattung an mobilen Gütern <sup>3</sup>ohne Produktionsgüter und ohne mobile Güter  
<sup>4</sup>Grundstückswert entfällt, da nicht im Immobilienmarkt

### 5.3.3 Risikoberechnung

#### 5.3.3.1 Qualitativ

Da hinsichtlich der Vulnerabilität von einem Worst-Case-Szenario ( $V = 1$ ) ausgegangen wird, kann das qualitative Risiko über eine Risikomatrix aus Gefahr und Schadenpotenzial ermittelt werden. Diese ist in Tab. 5.4 dargestellt.

Tab. 5.4: Risikomatrix

		Schadenpotenzial				
		sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Gefahr	sehr gering	sehr gering	sehr gering	gering	gering	gering
	gering	sehr gering	gering	mittel	mittel	mittel
	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
	hoch	gering	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
	sehr hoch	gering	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch

#### 5.3.3.1 Quantitativ

Die Berechnung der ökonomischen Risiken von gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb und im Oberen Filstal erfolgt mittels der Kombination aus Gefahr, Vulnerabilität und Schadenpotenzial nach folgenden Formeln:

$$R_{WC,A} = H_{WC,A} \times V_{L,A} \times S_L \quad (15)$$

mit

$R_{WC,A}$  = Ökonomisches Risiko von gravitativen Massenbewegungen in €/m<sup>2</sup>/Jahr (Worst-Case-Szenario)

$H_{WC,A}$  = Gefahr bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A im Worst-Case-Szenario

$V_{L,A}$  = Vulnerabilität des Risikoelements (L) gegenüber einer gravitativen Massenbewegung mit einem Volumen größer oder gleich  $V_0$

$S_L$  = durchschnittliches Schadenpotenzial in Abhängigkeit der Landnutzung in €/m<sup>2</sup>

$V_0$  = Volumen der gravitativen Massenbewegung (siehe Tab. 5.1)

$$R_A = H_A \times V_{L,A} \times S_L$$

(16)

mit

$R_A$  = Ökonomisches Risiko von gravitativen Massenbewegungen in €/m<sup>2</sup>/Jahr

$H_A$  = Gefahr bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegung mit einer Fläche größer oder gleich A

## 5.4 Lokale Risikoanalyse

In den lokalen Untersuchungsgebieten wird auf Basis der heuristischen Gefahrenabschätzung und unter Berücksichtigung der Vulnerabilität und des Schadenpotenzials eine heuristische Risikoabschätzung vorgenommen.

Dabei wird die Vulnerabilität der Risikoelemente auf Basis der Messergebnisse sowie der Erfahrungen aus dem Gelände qualitativ abgeschätzt. Das ökonomische Schadenpotenzial wird für die Siedlungsflächen in den untersuchten Hangbereichen, ohne Berücksichtigung der Straßen oder sonstiger Infrastruktur, auf Basis des DLM25 und dem durchschnittlichen Sachwert für den jeweiligen Typ der Siedlungsfläche (siehe Tab. 5.3) berechnet. Darüber hinaus werden bei der Risikoabschätzung die unterschiedlichen Schadenpotenziale einzelner Häuser, wie sie im Gelände zu erfassen sind, qualitativ berücksichtigt. Für die untersuchten Hangbereiche wird zudem die Anzahl der dort wohnenden Bevölkerung grob abgeschätzt. Dabei wird von einem Durchschnittswert von zwei Bewohnern pro Haus ausgegangen, wie er oft in der Literatur verwendet wird (z.B. Borter 1999b).

## 5.5 Nutzenanalyse

Im Rahmen des *InterRISK* Projekts wurden gemeinsam mit Marco Danscheid 23 qualitative Experten-Interviews durchgeführt. Eine ausführliche sozialwissenschaftliche Analyse der Interviews erfolgt durch Danscheid (in Vorbereitung). In dieser Arbeit wurden die Interviews zum einen als Informationspool für gravitative Massenbewegungen und damit verbundener Aspekte in der Schwäbischen Alb und zum anderen als Basis für eine Nutzenanalyse der verschiedenen erstellten Daten und Karten genutzt. Es wurden verschiedene Vertreter von Behörden, Ingenieurbüros, Architekturbüros, Infrastrukturunternehmen (z.B. Gas-, Wasser- und Stromversorgung), Bau- und

Planungsgesellschaften sowie aus dem Verwaltungs- und Forstwesen befragt. Ihnen wurden sowohl Karten des DGM1 mit sichtbaren gravitativen Massenbewegungen, Inventare gravitativer Massenbewegungen sowie Gefährdungs- und Gefahrenkarten gezeigt und hinsichtlich des Nutzens dieser Karten für die jeweilig zu bearbeitenden Aufgaben erfragt. In dieser Arbeit beschränkt sich die Analyse auf die Interviews mit den Ingenieurgeologen.

## 6 Untersuchungsgebiete

In diesem Kapitel werden die einzelnen Untersuchungsgebiete beschrieben. Zuerst wird die Schwäbische Alb im Gesamten behandelt, danach regionale Besonderheiten des Oberen Filstals herausgearbeitet, die wichtig sind für das Verständnis der regionalen Detailmodellierungen. Abschließend wird auf die Gegebenheiten in den lokalen Untersuchungsgebieten Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen eingegangen. Die Lage der Untersuchungsgebiete ist in Abb. 6.1 dargestellt.

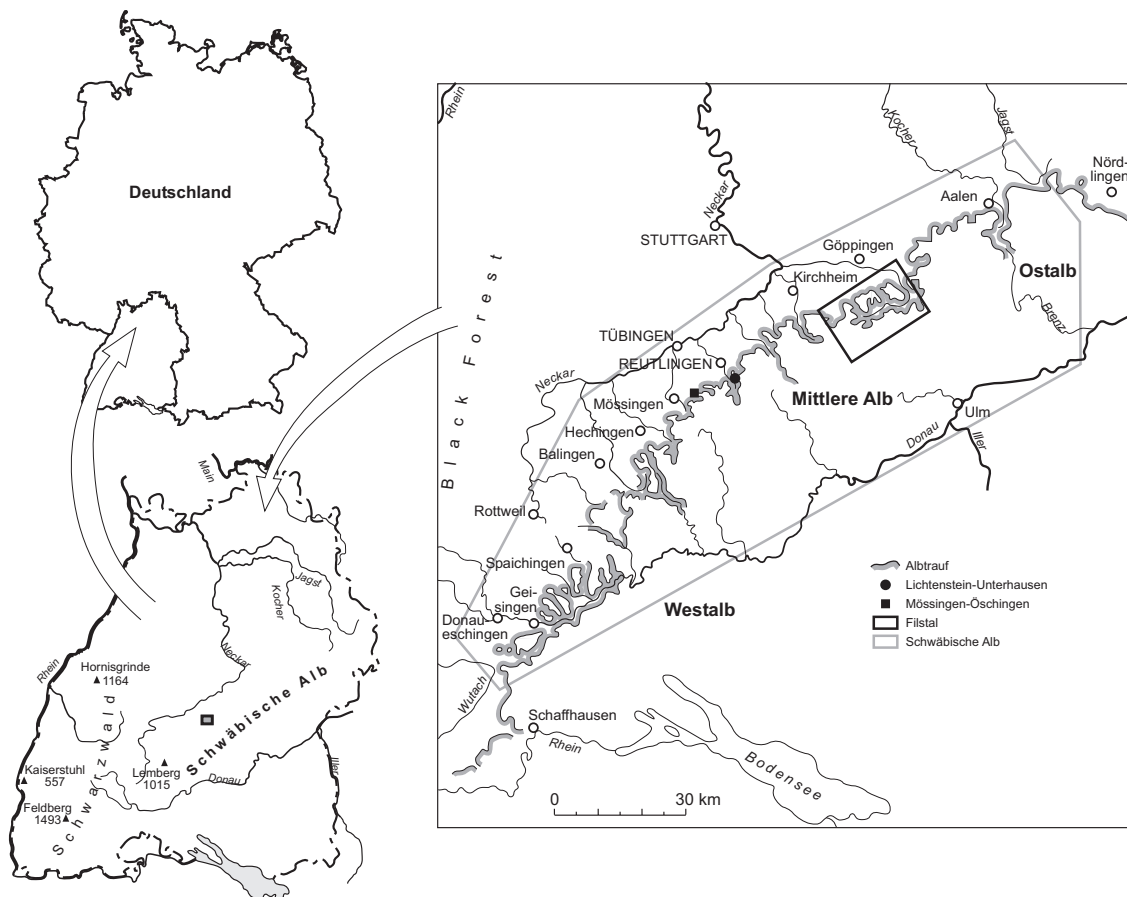


Abb. 6.1: Lage der Untersuchungsgebiete

### 6.1 Schwäbische Alb

Die Schwäbische Alb ist Teil der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft und erstreckt sich von Südwesten (Hochrhein bei Schaffhausen) nach Nordosten (Nördlinger Ries) über eine Länge von ca. 220 km, bei einer mittleren Breite von ca. 40 km. Sie kann in Westalb (bis zur Linie Reutlingen-Sigmaringen), Mittlere Alb (bis zur Linie Göttingen-Ulm) und Ostalb (bis zum Nördlinger Ries) unterteilt werden (Geyer und Gwinner 1986). Unterschiedliche Hebungsvorgänge führten dazu, dass die Westalb höher herausgehoben wurde und heutzutage im Albraufbereich Höhen von 800 m bis

knapp über 1000 m aufweist. Die Mittlere Alb ist ca. 700-800 m, die Ostalb ca. 700 m hoch. Inklusive des Albvorlandes umfasst das Untersuchungsgebiet eine Fläche von ca. 10.000 km<sup>2</sup>.

### 6.1.1 Geologie

Das Untersuchungsgebiet ist im Wesentlichen aus Sedimentgesteinen des Jura aufgebaut. Während im Albvorland überwiegend Gesteine des Unterjuras zu finden sind, besteht das Gebiet der Vorberge aus dem Mitteljura. Der Mitteljura steigt langsam zum Albrauf hin an, welcher wie die Albhochfläche aus dem Oberjura aufgebaut ist (Geyer und Gwinner 1997). Im Bereich des Urach-Kirchheimer Vulkangebietes wurden die Juragesteine von über 350 tertiären Tuffschloten durchschlagen (Rothe 2005). Tertiäre Verwitterungsprodukte (z.B. „Bohnerzlehm“ als lateritischer Verwitterungsrest der Kalksteinauflösung (Wagenplast 2005)) und quartäre Ablagerungen (z.B. Alblehm als Verwitterungsprodukt der pleistozänen und holozänen Kalksteinauflösung, Hangschutt, Fließerden, gravitative Massenbewegungen und fluviale Ablagerungen) vervollständigen die grobe Gliederung des Untersuchungsgebietes (siehe Abb. 6.2). Die tertiären Ablagerungen im Süden (v.a. südlich der Donau) werden im Wesentlichen durch Molassesedimente aufgebaut.

Während der Unterjura vorwiegend aus (teils bituminösen) tonig-mergeligen Schichten mit zwischengelagerten kalkigen und sandigen Komplexen besteht, setzt sich der Mitteljura aus vorwiegend feinsandigen Tonen mit eingeschalteten eisenschüssigen Kalksandsteinen und eisenoolithischen Horizonten zusammen. Der Oberjura wird zum Teil von gut gebankten Abfolgen von Kalken und Mergeln und zum anderen von bankig bis massigen Schwamm- und Korallenkalken aufgebaut (Geyer und Gwinner 1997). Eine detaillierte Zusammenstellung inklusive der älteren Bezeichnungen der einzelnen Einheiten findet sich in Tab. 6.1.

Die Schichten fallen im Allgemeinen mit 2,5-3° nach Südosten ein (Leser 1982a). Regional gibt es verschiedene Mulden- und Sattelstrukturen, in denen das Schichteinfallen erheblich davon abweicht (z.B. Roth 2004). Der Schichtaufbau des gesamten Süddeutschen Schichtstufenlandes (inklusive Albvorland, Albvorberge, Albrauf und Albhochfläche) ist anschaulich in Abb. 6.3 dargestellt, in der zudem die rutschungsanfälligen Schichten gekennzeichnet sind.

**Geologie**

- Verwerfung oder Blattverschiebung, nachgewiesen
- - - - Verwerfung oder Blattverschiebung, vermutet
- Quartär
- Tertiär
- Oberjura
- Mitteljura
- Unterjura
- Trias

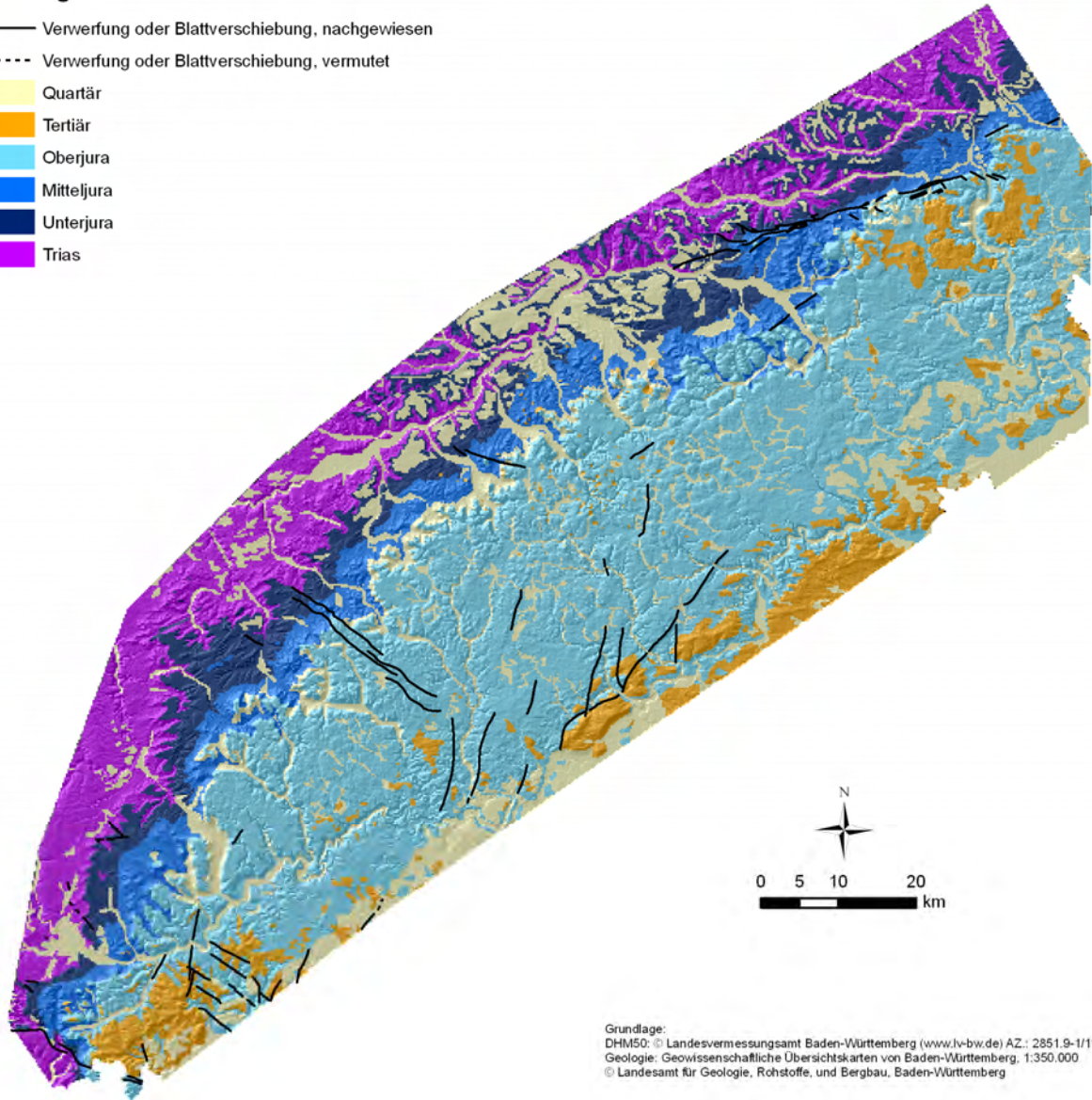


Abb. 6.2: Geologische Haupteinheiten und Hauptstörungslinien des Untersuchungsgebietes (auf Basis der Geologischen Übersichtskarte 1:350.000 Baden-Württemberg; Detailinformationen zu den einzelnen Einheiten finden sich in Tab. 6.1)

Tab. 6.1: Detailübersicht über die Juragesteine im Bereich des Untersuchungsgebietes (nach Geyer und Gwinner 1997 und Wagenplast 2005)

	Stufe	Schicht	Petrographie	Mächtigkeit	
Oberjura (Weißer Jura, Malm)	Tithonium	Hangende Bankkalke	gelbgraue bis graubraune, gut geschichtete Kalksteine (10-35cm mächtig) mit Mergelkalcken und Mergelfugen	80-300m	
	Kimmeridgium	Zementmergel	blaugraue, gelblichgraue und lichtgraue Mergel, Kalkmergel, Mergelkalke und Kalk, teilweise massiv ausgeprägt	0-120m	
		Kimmeridge-Kalke	Liegende Bankkalke	hellgelbe bis graue Wechselfolge von Kalk- bis Mergelkalkbänken (10-40cm mächtig), die durch Mergelfugen getrennt sind; daneben massige Fazies entwickelt	30-80m
			Obere Felsenkalke	vorwiegend massige Kalke; daneben: dichte, leicht kristalline Kalksteinbänke (10-40cm mächtig), nach oben hin zunehmende Mergelführung	25-35m bis 60m (massig)
			Untere Felsenkalke	vorwiegend massige Kalke; daneben: gut geschichtete, dichte, leicht kristalline Kalksteinbänke (10-150cm mächtig); im unteren und mittleren Bereich durch stärkere Mergelfugen und -bänke getrennt; im oberen Bereich sehr dünne Mergellagen, teilweise ganz fehlend	35-50m >100m (massig)
			Lacunosamergerl (Kimmeridge-Mergel)	graue Mergel- und Mergelkalksteine (5-50cm mächtig) mit variierendem Tongehalt; Verwitterung zu feinschubigem bis blättrigem Stückwerk	20-60m
	Oxfordium	Wohlgeschichtete Kalke (Oxford-Kalke)	lichtgraue bis gelbgraue, regelmäßig geschichtete Kalksteinbänke (i.d.R. 10-60cm mächtig) mit dünnen Mergelbänken; meist splittiger Bruch; teilweise massiv entwickelt	15-80m	
Impressamergerl (Oxford-Mergel)		Wechselfolge von regelmäßig gelagerten Mergel- und Mergelkalkbänken; an Basis auch Tonmergel; an Obergrenze schalten sich Kalksteinbänke ein; in der Westalb teilweise massiv ausgeprägt	50-125m		
Mitteljura (Brauner Jura, Dogger)	Callovium	Ornatenton	dunkelgraue Tonsteine (5-15% Kalkgehalt) mit eisenoolithischen Horizonten; Phosphorit- und Mergelkalk-Konkretionen	3,3-37m	
	Bathonium	Parkinsonien-Oxyeritenschichten	dunkle Tonsteine mit eingelagerten Mergelkalkbänken und Laibsteinlagen	0,7-70m	
	Bajocium	Oolithische Laibsteinschichten	dunkelgraue bis blaugraue, z.T. blättrig-sandige, z.T. fette Tone und Tonmergel mit Laibstein- und Muschelknollenlagen, Pyrit- und Toneisensteinkonkretionen sowie zwischengeschalteten Mergelkalkbänken	5-42m	
		Kalksandige Braunjuratone	dunkelgraue bis gelblichgraue, sandige Tone, Tonmergel und Mergel mit einzelnen Kalksandsteinbänken und Sandplättchen; häufige Toneisensteinkonkretionen (enthält "Wedelsandstein" und "Blaukalk")	3-39m	
	Aalenium	Eisensandstein- bzw. Eichberg-Formation (Sandflasrige Braunjuratone)	häufig wechselnde Gesteinsausbildung zwischen sandflasrigen bis schwach sandigen Tonen und Tonmergel (60-80% der Gesamtmächtigkeit), eisenschüssige Sandsteine, Eisenoolithe und sandige Mergelkalke; in Ostalb stärkere Sandstein- und Eisenerzkomponente	24-75m	
Opalisenuston		blauschwarze bis dunkelgraue, bröckelig zerfallende, oft schiefrige Tone und Tonmergel, teilweise Schwefelkies; einzelne Mergelkalkbänken und Sandmergelbänke	80-131m		
Unterejura (Schwarzer Jura, Lias)	Toarcium	jurensis-Mergel	schiefrig-blättrige, gelbgraue bis hellgraue Mergel und Kalkmergel in Wechsellagerung mit knolligen, graublauen bis gelbgrauen Mergelkalkbänken; an Basis teilweise bituminös	0,6-13m	
		Posidonienschiefer	Wechselfolge von schwarzgrauen, schiefrigen, bituminösen Tonmergeln und einzelnen festeren, bituminösen Mergelkalkbänken; auf Grund des Bitumengehalts auch als "Ölschiefer" bezeichnet	4-16m	
	Pliensbachium	Amaltheen-Tone	dunkelgraue bis blaugraue, z.T. schiefrige Tone mit zwischengelagerten Kalkmergel- und Mergelkalkbänke; Tone enthalten viele Pyritkonkretionen	9-28m	
		numismalis-Mergel	graue Mergel und Kalkmergel; teilweise mehrere hellgraue Mergelkalkbänke	2-13m	
	Sinemurium	turneri-Tone	dunkelgraue, z.T. schiefrige Tone und Tonmergel; zahlreiche Schwefelkies- und Toneisensteinkonkretionen; Mergelkalkbank	0-43m	
		Gryphaeenkalke oder Arietenkalke	fossilreiche, meist dunkelblaugraue Kalkbänke im Wechsel mit schiefrigen Tonen und dentritischen Mergeln		
	Hettangium	Angulatensandsteine bzw. -tone	dunkle, schiefrige meist sandige Tone und Tonmergel mit zwischengeschalteten Mergelkalk- und Kalksandsteinbänken; in Mittelwürttemberg Angulatensandstein eingeschaltet	1,7-16m	
Psilonotentone		Tone und Tonmergel, an Basis ein oder zwei dunkelgraue, harte Kalkbänke	3,5-11m		

Entlang des Albtraufes zieht sich ein komplexes West-Südwest/Ost-Nordost gerichtetes Störungssystem, welches als „Schwäbisches Lineament“ bezeichnet wird. Darüber hinaus finden sich weitere tektonische Störungen im Bereich der Schwäbischen Alb (siehe Abb. 6.2), wie z.B. der Hohenzollerngraben oder der Lauchertgraben. Die Schwäbische Alb ist nach wie vor tektonisch aktiv, was sich in zahlreichen Erdbeben bemerkbar macht. Die stärksten Erdbeben in der jüngeren Vergangenheit traten 1911, 1943 und 1978 bei Albstadt auf (Rothe 2005). Ersteres löste bei Albstadt-Margrethausen eine Hangrutschung aus, wie bei Recherchen für das Teilprojekt *InterRISK History*



herausgefunden wurde (Röhrs 2006, Persönliche Mitteilung). Die Erdbebengefährdung führte zur Ausweisung von Erdbebenzonen, an welche bestimmte Sicherheitsstandards als Bauauflagen geknüpft sind (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 2001). Eine Neuberechnung der Erdbebengefährdung führte unter anderem zu einer Ausweitung bzw. Höherstufung der Gefährdungszonen im Bereich der Schwäbischen Alb (Innenministerium Baden-Württemberg 2005).

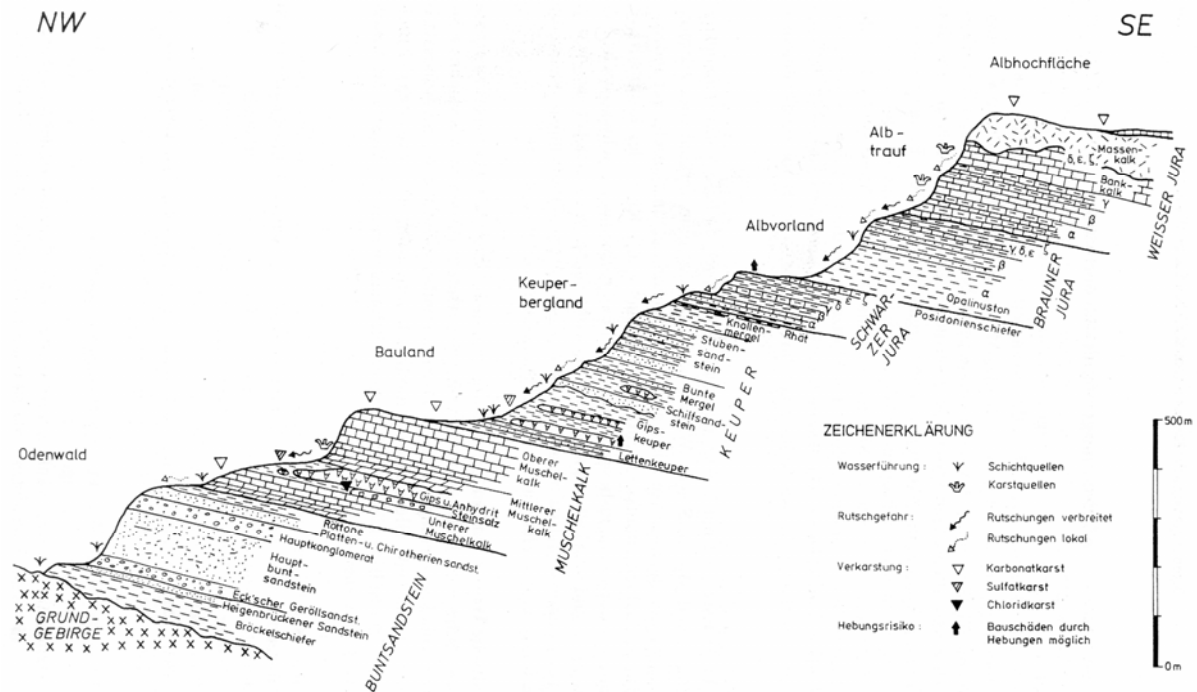


Abb. 6.3: Schematisches geologisches Profil durch das Süddeutsche Schichtstufenland, u.a. mit Kennzeichnung der zu Rutschungen und Quellenbildung neigenden Gesteinsschichten (aus Wagenplast 2004a)

### 6.1.2 Klima

Nach Leser (1982a) repräsentiert das Klima der Schwäbischen Alb einen mitteleuropäischen Durchschnittsfall des ozeanischen Typs mit Übergangstendenzen zum gemäßigten osteuropäischen Kontinentalklima. Er weist aber ausdrücklich darauf hin, dass insbesondere das Relief (v.a. auf Grund der Höhe der Schwäbischen Alb und der Richtung des Albtraufs) das Makroklima stark modifiziert und somit den meso- und mikroklimatischen Prozessen eine große Bedeutung zukommt. Der Einfluss des Reliefs wird auch in den Abbildungen zur regionalen Temperatur- und Niederschlagsverteilung (Abb. 6.4 und 6.5) deutlich. Beide Klimaparameter sind als Durchschnittswerte für zwei Referenzperioden (1941-1970 und 1971-2000) aufgeführt. Des Weiteren ist die Veränderung zwischen den Perioden dargestellt.

Bei den durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen (5,84 bis 8,95°C (1941-1970) und 6,17 bis 9,64°C (1971-2000)) ist zu erkennen, dass die Albhochfläche wesentlich kälter ist als das Vorland und zudem, abgesehen von lokalen Abkühlungsbereichen, eine Zunahme der Temperaturen von bis zu 0,8°C von der ersten zur zweiten Referenzperiode festzustellen ist.

Die Niederschlagsverteilung in der Schwäbischen Alb wird stark von orographischen Faktoren beeinflusst. Zum einen sind die Niederschläge auf Grund der Leewirkung des Schwarzwaldes im Südwesten geringer als im Nordosten, zum anderen führt die Schwäbische Alb als orographisches Hindernis dazu, dass mehr Niederschläge im Bereich des Albtraufs und der direkt anschließenden Hochfläche fallen als im Vorland oder auf der weiter südlich gelegenen Hochfläche. Über kurze Distanzen können Unterschiede in der Jahressumme von bis zu 300 mm Niederschlag auftreten. Zwischen den zwei Referenzperioden kam es zu einer sehr markanten Zunahme der durchschnittlichen jährlichen Niederschläge um überwiegend 50-100 mm, teilweise gar um mehr als 200 mm. Lediglich im äußersten Südwesten hat der Einfluss des Leeeffektes offensichtlich zugenommen, so dass dort ein Rückgang der Niederschlagssummen zu verzeichnen ist.

Da für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen insbesondere die Niederschläge eine große Rolle spielen, sind in Abb. 6.6 Zeitreihen der Niederschlagsentwicklung für zwei ausgewählte Stationen dargestellt. Sonnenbühl-Genkingen befindet sich relativ nah am Albtrauf auf der Albhochfläche und Nehren im Albvorland. Beide Zeitreihen zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei die Niederschläge in Nehren um einiges niedriger ausfallen. Eine lineare Korrelation der Zeitreihen ergab einen Korrelationskoeffizienten von  $R^2 = 0,78$  und bestätigt damit die Ähnlichkeit der Niederschlagsverteilung, gibt aber auch Raum für die temporären mikro- und mesoklimatischen Sonderkonditionen. Auffällig ist die enorme Schwankungsbreite der jährlichen Niederschlagssummen, die bei der Station Sonnenbühl-Genkingen von ca. 650 mm bis über 1450 mm reicht. Extrem feuchte Jahre waren 1941, 1965 und 2002. Feuchtere Perioden werden über den 5-jährigen gleitenden Durchschnitt ausgewiesen und umfassen die frühen 1940er, späten 1960er und gesamten 1980er Jahre. Der ansteigende Trend der Niederschläge ist auch in Abb. 6.6 erkennbar.

In Abb. 6.7 ist die monatliche Niederschlagsverteilung für verschiedene Jahre sowie für zwei Referenzperioden für die Station Sonnenbühl-Genkingen dargestellt. Sie zeigt die hohe Variabilität der Niederschläge im Jahresverlauf, welche im Vergleich des sehr feuchten 2002 und des sehr trockenen 2003 am deutlichsten zu Tage tritt. Anhand der Zeitreihen für die Referenzperioden ist zu erkennen, dass die meisten Niederschläge im Frühjahr und Frühsommer fallen, wobei sich die zwei Maxima im Juni und August der Referenzperiode 1961-1990 zu einem Maximum im Juni der Referenzperiode 1971-2000 verlagert haben.

In den Wintermonaten fällt der Niederschlag in höheren Lagen oft in fester Form als Schnee. Dieser kann zeitverzögert bei der Schneeschmelze große Wassermengen freisetzen, die für die Auslösung von gravitativen Massenbewegungen sehr bedeutend sind.

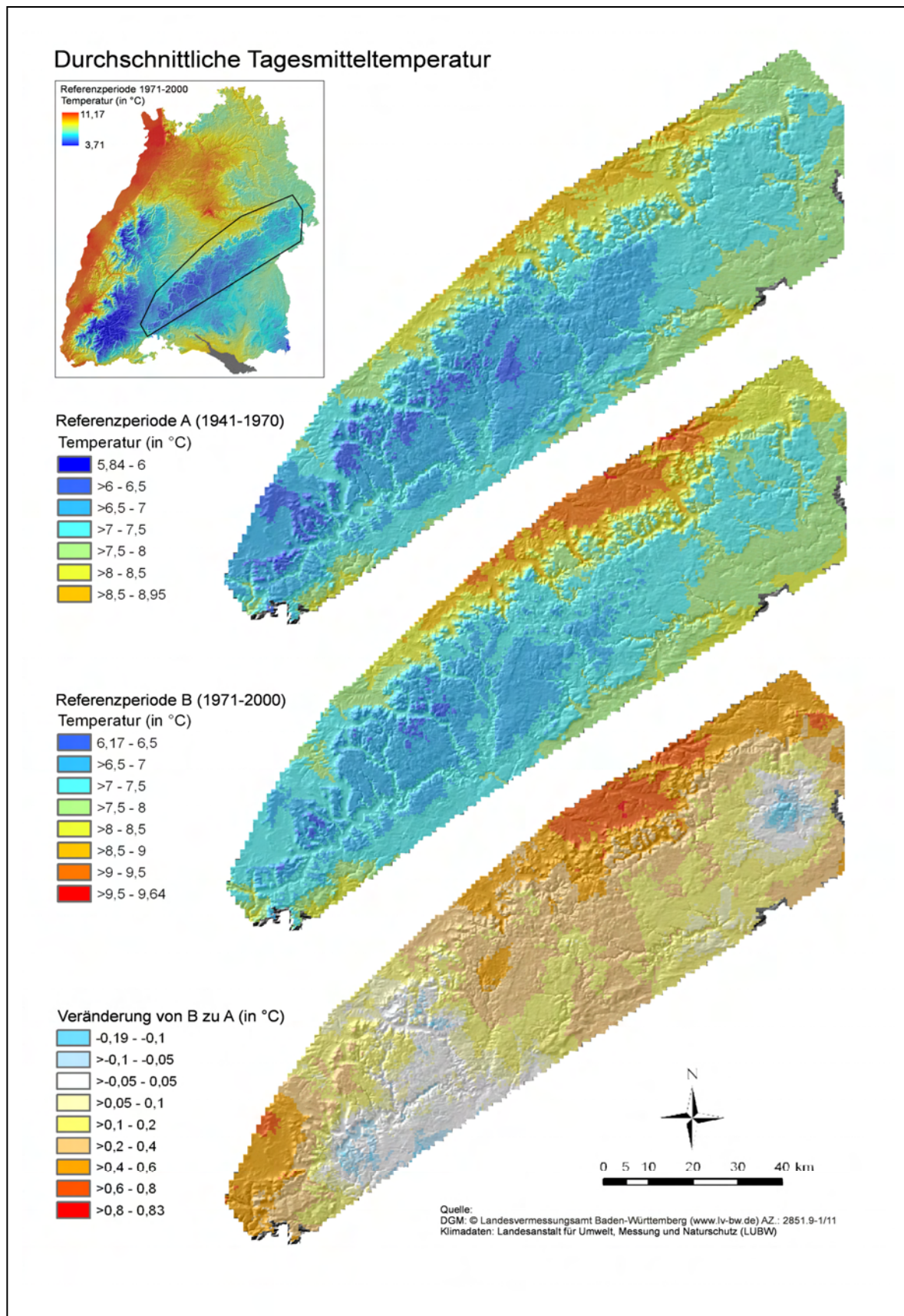


Abb. 6.4: Durchschnittliche Tagesmitteltemperatur in der Schwäbischen Alb sowie die Veränderung zwischen den beiden Referenzperioden

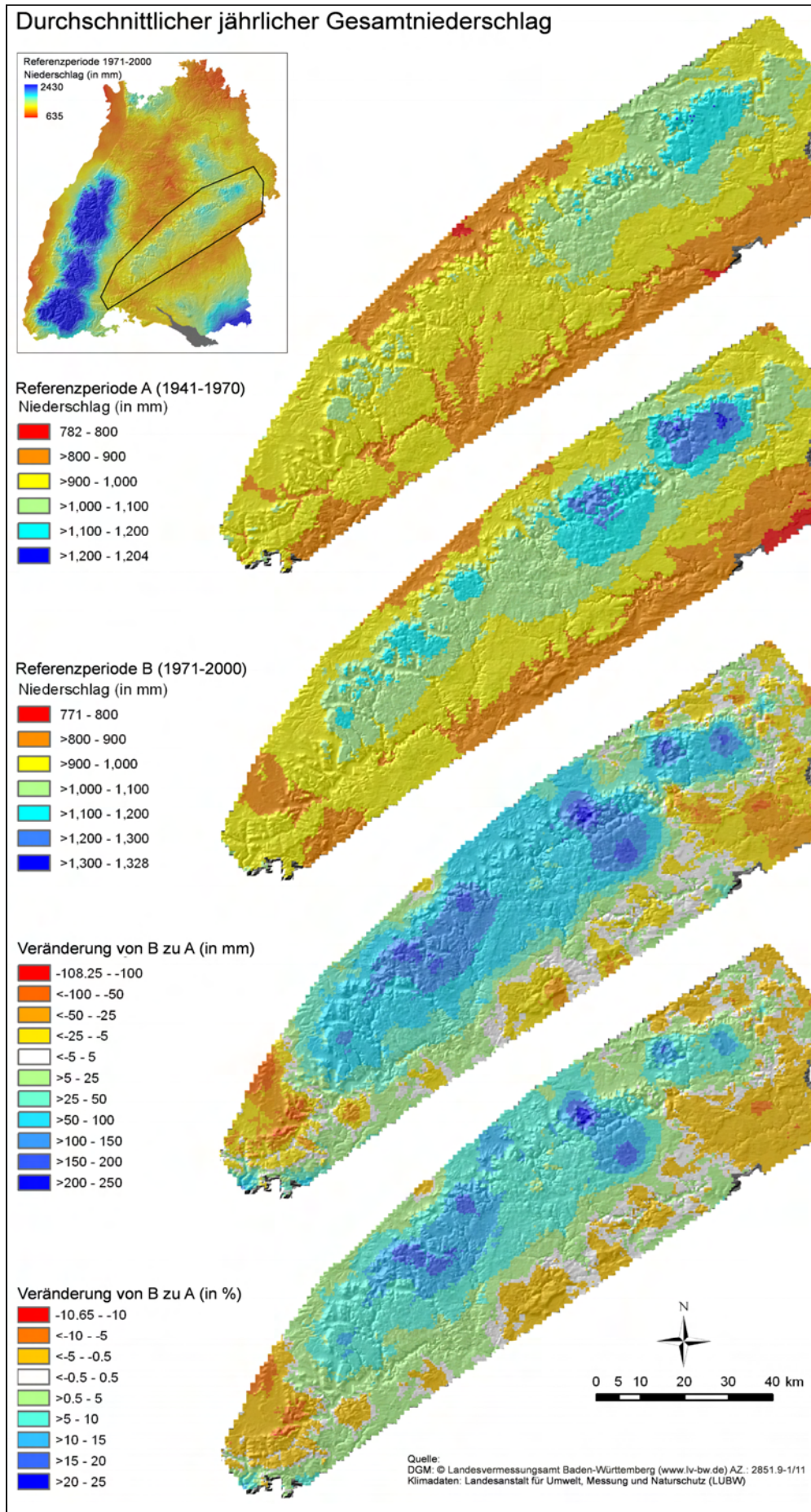


Abb. 6.5: Durchschnittlicher jährlicher Gesamtniederschlag in der Schwäbischen Alb sowie die Veränderung zwischen den beiden Referenzperioden

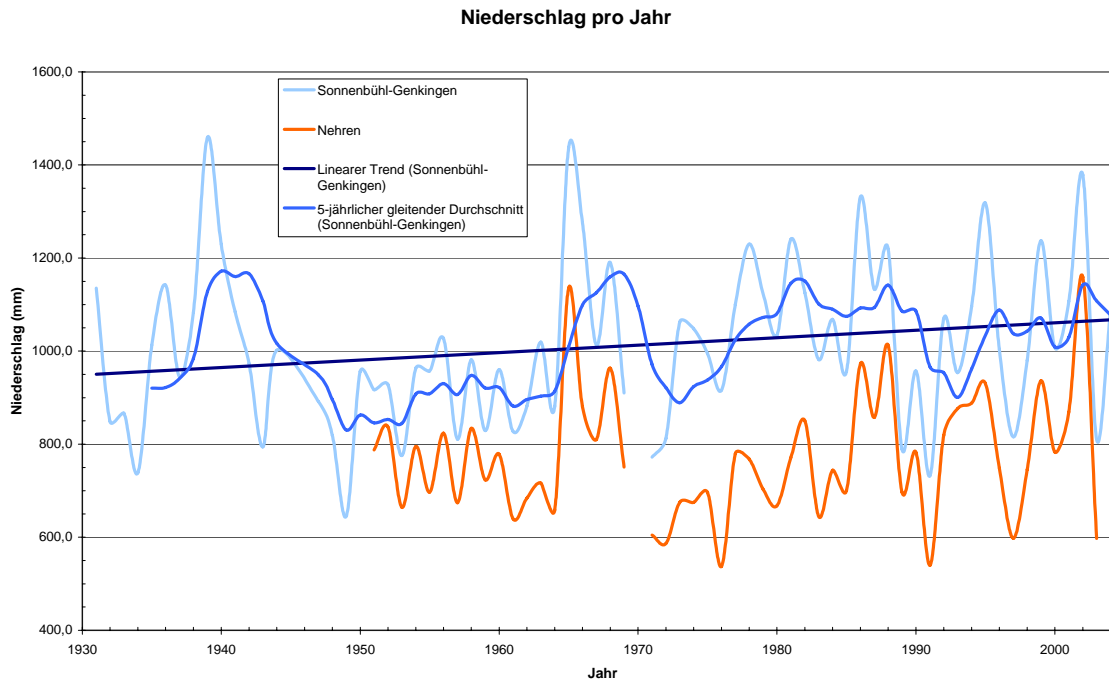


Abb. 6.6: Jährlicher Niederschlag zweier ausgewählter Klimastationen der Schwäbischen Alb (Nehren befindet sich im Albvorland und Sonnenbühl-Genkingen auf der Albhochfläche in der Nähe des Albraufs)

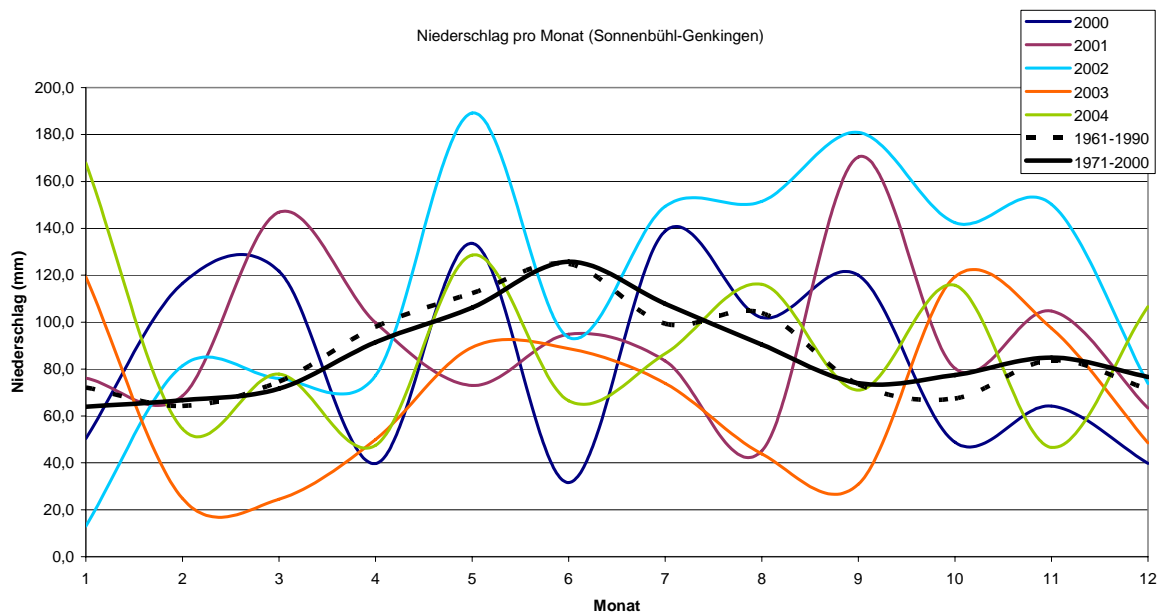


Abb. 6.7 Monatlicher Niederschlag der Station Sonnenbühl-Genkingen (Die Station befindet sich auf der Albhochfläche in der Nähe des Albraufs)

### 6.1.3 Hydrologie

Im Bereich der Schwäbischen Alb befindet sich die Europäische Wasserscheide, so dass ein Teil der Flüsse zum Rhein hin entwässert und der andere Teil zur Donau (siehe Abb. 6.8). Die Kalke des Oberjuras sind in hohem Maße verkarstet, so dass die unterirdischen Einzugsgebiete der Flüsse viel größer sein können als die oberirdischen. Es können Seichter und Tiefer Karst unterschieden werden. Beim Seichten Karst, der weitestgehend auf das nähere Umfeld des Albtraufs beschränkt ist, streicht die Sohlschicht über dem Vorfluter-Niveau aus, beim Tiefen Karst darunter (Terhorst 1997). Auf Grund der Verkarstung weist das Flusssystem auf der Albhochfläche nur eine sehr geringe Dichte auf. Nur wenige Flüsse erreichen die Donau auf oberirdischem Wege (Geyer und Gwinner 1997) und Trockentäler sind auf der Albhochfläche weitverbreitet. Die weniger durchlässigen Gesteine und zahlreichen Quellhorizonte im Bereich des Albtraufs und im Albvorland (siehe Abb. 6.3) führen dazu, dass das Flusssystem dort wesentlich dichter entwickelt ist (siehe Abb. 6.8). Die erhöhte Dichte an Quellen hat eine rutschungsfördernde Wirkung, wie ebenfalls aus Abb. 6.3 hervorgeht.

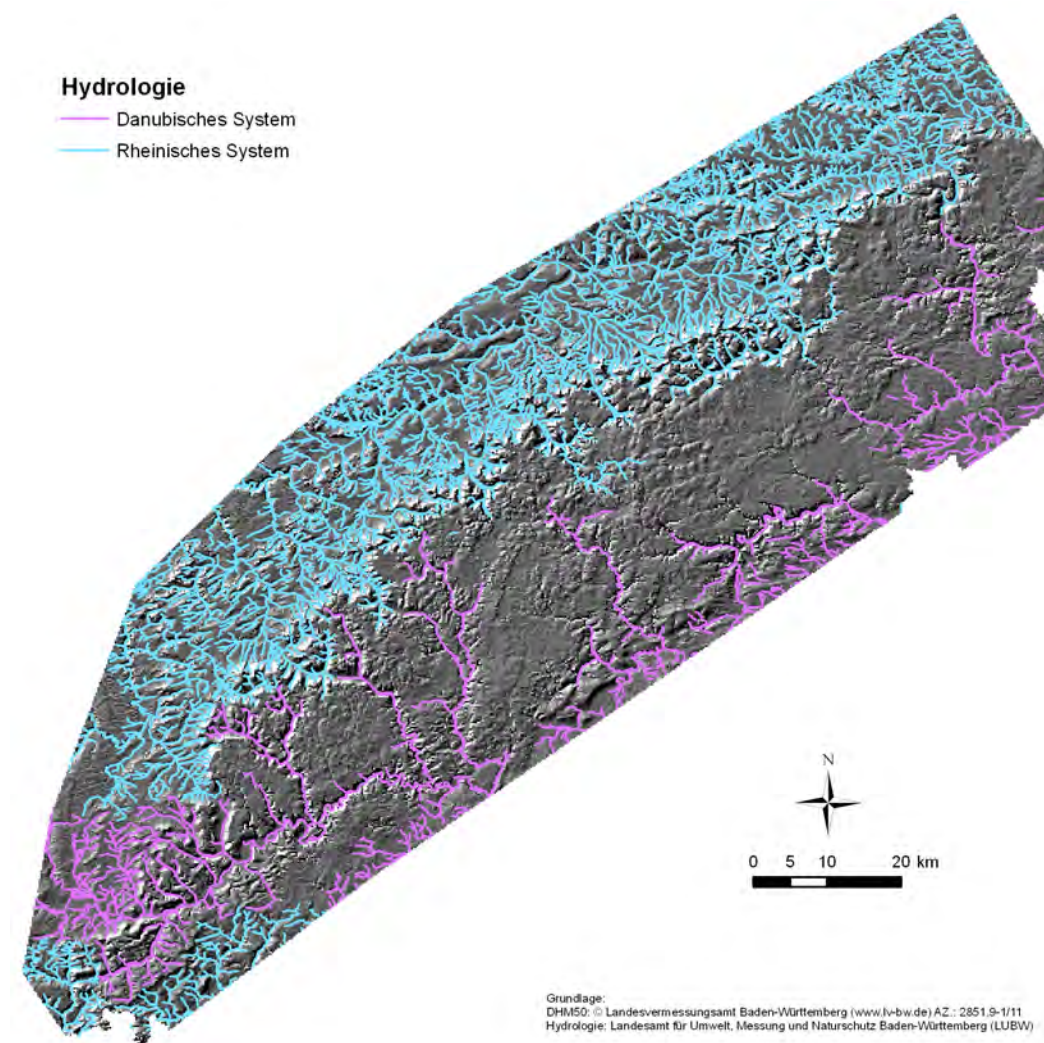


Abb. 6.8: Die Flusssysteme der Schwäbischen Alb

### 6.1.4 Geomorphologie

Bei der Schwäbischen Alb handelt es sich als Teil der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft um eine Vorzeitform (z.B. Blume 1971, Dongus 1977, Leser 1982a und Brunotte 2007). Zur Zeit des Urach-Kirchheimer Vulkanismus vor ca. 18 Mio. Jahren reichten zumindest Teile des Albtraufes mindestens 20 km weiter nördlich als heute, wie Gesteinsbrocken des Oberjuras im Tuffschlot von Scharnhausen belegen (Geyer und Gwinner 1986 und Geyer und Gwinner 1997). Daraus lässt sich eine durchschnittliche Rückverlagerungsrate des Albtraufes von ca. 1 m/1000 Jahre errechnen (Kallinich 1999), wobei aber weder lokale und regionale Unterschiede, noch klimatisch bedingte Änderungen in der Geomorphodynamik berücksichtigt wurden. Für das Pleistozän ermittelte Dongus (1977) lokale Rückverlagerungen des Albtraufes um bis zu 2-3 km. Eine ausführlichere Diskussion der Stufenrückverlagerung ist in Kallinich (1999) enthalten. Terhorst (1997) merkt dazu an, dass die Abtragungsvorgänge und damit der Mechanismus der Rückverlegung der Jurastufe bis heute nicht vollständig geklärt sind.

Während Blume (1971) für die Rückverlagerung vor allem die Solifluktion und fluviale Erosion als dominierende Prozesse ansieht und den gravitativen Massenbewegungen nur lokale Bedeutung zumisst, sieht Dongus (1977) in den gravitativen Massenbewegungen einen Faktor, der neben den beiden anderen Prozessen wesentlich zum Rückschreiten der Stufe beiträgt. Für das Holozän wird von den meisten Autoren weitestgehend Formungsruhe angenommen (z.B. Büdel 1944, Weippert 1960 und Bleich 1960). *„Die holozäne Formung beschränkt sich an den Stufenstirnen weitgehend auf Quellerosion und zumeist lokale Rutschungen und Bergstürze“* (Brunotte 2007, S. 324). Generell stimmt Blume (1971) der holozänen Formungsruhe zu, räumt aber ein: *„Es zeigt sich jedoch deutlich, daß starke Reliefenergie und Nähe zum Vorfluter bei günstigen petrographischen Voraussetzungen auch in der Gegenwart zu Abtragungsprozessen an Stufenrändern, zu Hangrutschungen und Bergstürzen führen können“* (S. 99). Nach Leser (1982a) sind über die geomorphologische Wirksamkeit des Holozäns auf Grund der Kürze des Zeitabschnitts noch keine Aussagen zu machen.

Als Zeichen der Formungsruhe werden unter anderem die Schuttkörper der Kalkgesteine des Oberjuras herangezogen. So hat Weippert (1960) die Schuttmassen am Albtrauf auf Basis klimageomorphologischer Kriterien in folgende drei Klassen gegliedert: (1) Holozäner, unsortierter Schutt der Scherbenhalden, (2) wärmzeitlicher, grobstückiger Kalkschutt und (3) wärmzeitlicher, feinstückiger Kalkschutt. Die weite Verbreitung des wärmzeitlichen Schuttes dienen Weippert (1960) und Bleich (1960) als wichtige Argumente für das weitestgehend wärmzeitliche Alter des Albtraufes. Dongus (1977) stimmt zwar zu, dass der überwiegende Anteil des Hangschuttes am Albtrauf aus der letzten Kaltzeit stammt, weist aber die Altersbestimmung der verschiedenen Hangschutttypen zurück, da die Ausprägung des Schuttes im Wesentlichen nicht von der Klimavarianz, sondern der Petrovarianz, d.h. den Gesteinseigenschaften, abhängig ist. Demnach ist die Altersbestimmung des Albtraufes bzw. seiner Phänomene mittels der verschiedenen Hangschutttypen nicht möglich.

Einen modifizierten Ansatz nutzen Terhorst (1997), Bibus (1999) und Bibus et al. (2001). Wie in Kapitel 2.8 bereits ausgeführt, verwenden sie vor allem die unterschiedlichen Solifluktionsdecken, um gravitative Massenbewegungen und somit auch das Alter des Albraufes zu datieren. Sie kommen zu dem Schluss, dass insbesondere die großen Hangrutschungen, die unter anderem zu den weitverbreiteten Hangleisten entlang des Albraufes geführt haben, weitestgehend aus dem Pleistozän stammen. Eine ausführlichere Diskussion befindet sich im nächsten Kapitel.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in der Literatur überwiegend eine sehr geringe Geomorphodynamik für das Holozän angenommen wird. Die geomorphologischen Prozesse, die im Holozän aktiv waren und rezent noch vorhanden sind, umfassen im Wesentlichen fluviale Erosion und Akkumulation, gravitative Massenbewegungen, Schutthaldenbildung, Verkarstung und Bodenerosion. Die Schutthaldenbildung erfolgt vor allem unterhalb von Steilwänden, die entweder durch erosive oder gravitative Prozesse oder durch Einwirkung des Menschen (z.B. Bergbautätigkeit) im Bereich der gebankten und massigen Kalksteine des Oberjuras entstanden sind. Als Folge der Verkarstung entstehen einerseits Dolinen und Höhlensysteme werden ausgeweitet. Andererseits kommt es im Bereich der Karstquellen, Bach- und Flussläufe infolge der Kohlensäurefreisetzung durch Erwärmung oder erhöhter Durchwirbelung des Wassers zur weitverbreiteten Ausscheidung von Süßwasserkalken (auch „Quell- und Bachkalke“, „Sinterkalke“ oder „Kalktuff“ genannt). Dadurch entstehen Sinterkalkriegel an den Quellen und Kalktuffterassen in den Bächen und Flüssen (Geyer und Gwinner 1997). Letztere können ausgesprochen getreppte Gefällskurven hervorrufen, beispielsweise im Echaztal. Infolge der im Holozän einsetzenden Bodenerosion kommt es zu Kolluvien- und Auelehmbildungen. Eine umfassende Beschreibung der Geomorphologie der Schwäbischen Alb, inklusive einer flächendeckenden geomorphologischen Kartierung im Maßstab 1:100.000 wurde von Dongus (1977) erarbeitet. Leser (1982b) kartierte das Blatt Mössingen im Rahmen der Geomorphologischen Karte 1:25.000 der Bundesrepublik Deutschland.

Im folgenden Kapitel wird ausführlicher auf die Bedeutung der gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb eingegangen.

### **6.1.5 Gravitative Massenbewegungen**

Wie schon im vorherigen Kapitel angeklungen, ist die Frage des Alters der gravitativen Massenbewegungen eng verknüpft mit der Frage des Alters und der Aktivität im Bereich des Albraufes. Umfassende Untersuchungen zu gravitativen Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb wurden bereits von Hölder (1953), Bleich (1960) und Reiff (1968) vorgelegt. Eine große Anzahl unterschiedlicher methodischer Arbeiten wurden von der Arbeitsgruppe um E. Bibus und B. Terhorst an der Universität Tübingen v.a. im Rahmen des DFG-Projekts MABIS (Massenbewegungen in Süd- und Westdeutschland) durchgeführt (z.B. Bibus 1985, Bibus 1986, Kraut 1995, Wiegand 1996, Kößler 1997, Terhorst 1997, Kallinich 1999, Knipping 1999, Riedinger und Terhorst 1999, Kreja 2000, Thein 2000, Kreja und Terhorst 2006 und Neuhäuser und Terhorst 2006).



Hölder (1953) geht von einem kontinuierlichen Auftreten von gravitativen Massenbewegungen (insbesondere der großen Rotationsrutschungen) aus. Auf Basis der mittels des Tuffschlotts von Scharnhausen berechneten Rückverlagerungsrate geht er davon aus, dass „*alle Erscheinungen nahe am oder am heutigen Trauf in spätglaziale oder nachglaziale Zeit*“ (S. 375), weiter entfernte ins frühe bis späte Pleistozän einzuordnen sind.

Bleich (1960) weist die Sichtweise Hölders zurück und erstellt seinerseits vier Rutschungsphasen. Wie bereits erwähnt, nutzt er die von Weippert (1960) klassifizierten Schutttypen, um die Rutschungen der drei ältesten Phasen ins Pleistozän einzuordnen. Die älteste Rutschungsphase stellt er ins letzte Interglazial (Eem). Die Kriterien für die innerpleistozäne Klassifizierung sind das Vorkommen von Verlehmungshorizonten und Solifluktionsschutt, sowie geomorphologische Faktoren. Die vierte Phase umfasst das Spätglazial und Holozän. Alle großen Rotationsrutschungen, die bis ins Festgestein reichen, ordnet Bleich (1960) den drei ältesten Phasen zu. Er geht davon aus, dass alle holozänen Rutschungen ausschließlich im Hangschutt stattfinden oder nur oberflächlich angewittertes Material umfassen. Dies wird von German (1961) stark kritisiert und für die Rutschung an der Bronner Mühle 1960 zurückgewiesen, da dort sehr wohl Festgestein involviert war. Wie oben beschrieben, weist Dongus (1977) die klimatische Klassifizierung des Hangschutts zurück, so dass der generellen Einordnung der drei ältesten Phasen ins Pleistozän das Hauptargument entzogen wird. Terhorst (1997) kritisiert die Kriterien von Bleich für die Zuweisung zu den einzelnen Rutschphasen und kommt auf Basis der eigenen Forschungen zur Erkenntnis, dass „*die Rutschphasen nach Bleich (1960) nach dem heutigen Wissensstand nicht mehr für Datierungszwecke herangezogen werden*“ (S. 199) können. Nach Terhorst (1997) bietet nur die Hauptlage des Solifluktionsschuttes auf Grund des Vorkommens der Laacher See-Tephra die einzige Möglichkeit um pleistozäne und holozäne Formen und Prozesse zu unterscheiden. Während bei der generellen Zuordnung der großen Rotationsrutschungen ins Pleistozän Terhorst (1997) und Bibus (1999) weitestgehend dieselbe Meinung wie Bleich (1960) vertreten, divergieren die Aussagen zur Einteilung innerhalb des Pleistozäns. Neben der Kritik an den Kriterien zur Einordnung in einzelne pleistozäne Rutschphasen lehnt Terhorst (1997) vor allem die eemzeitliche Obergrenze des Alters von Rutschungen von Bleich (1960) ab und merkt an, dass die großen Rotationsrutschungen auch noch viel älter sein können, wie sie mittels einer Uran/Thorium-Datierung von 260.000 Jahren ( $\pm 50,9-33,7\text{ka}$ ) belegt. Zustimmung erfährt Bleich (1960) von Terhorst (1997) dahingehend, dass bisher im Holozän keine neuen tiefgreifenden Rotationsrutschungen aufgetreten sind. Diese Aussage wird durch German (1961) wie auch den Ausführungen von Fraas (1853) zum Bergrutsch am Plettenberg, bei dem es sich ebenfalls um eine neue, tiefgreifende Rotationsrutschung handelt, widerlegt. Bibus (1999) und Kallinich (1999) räumen die Möglichkeit neuer großer Rotationsrutschung im Holozän ein, u.a. mit Verweis auf die Rutschung am Plettenberg. Bezüglich der Alterseinstufung der gravitativen Massenbewegungen lassen sich die Ergebnisse der Tübinger Arbeitsgruppe wie folgt zusammenfassen: „*Vor allem durch die Deckschichtenmethode aber auch durch den Reifegrad der Böden ließ sich zeigen, dass die Rotationsgleitungen [...] an der*

*Jurastufe fast durchweg [...] vor der jüngeren Tundrenzeit entstanden sind. Sie stellen deshalb einen klimaspezifischen Formentyp dar. [...] Bei holozänen Klimaverhältnissen erfolgte unter Wald fast keine Neuentstehung von Rotationsschollen, da auch kein nennenswerter Abtransport der Hangsedimente über die Vorfluter möglich war. [...] Im Gegensatz zu den pleistozänen Rotationsgleitungen zeichnen sich die holozänen Massenverlagerungen an der Jurastufe durch eine andere Dynamik und damit auch durch einen anderen Formenschatz aus. [...] Es dominieren somit im Holozän Fließ- und Kriechbewegungen, während Schutthaldenbildung und Rotationsbewegungen eine nur vollkommen untergeordnete Rolle spielen. Die jungen Massenverlagerungen können eine hohe Frequenz erreichen, sind jedoch durch ein geringes Ausmaß charakterisiert“ (Bibus 1999, S. 43-44).*

Zusätzlich zu den relativen Datierungen mittels Böden und Deckschichten wurden zahlreiche absolute Datierungen mittels Pollenanalysen und <sup>14</sup>C-Datierungen durchgeführt (Terhorst 1997, Bibus 1999, Kallinich 1999, Knipping 1999). Die umfassendste Zusammenstellung findet sich in Bibus (1999). Von den 31 Datierungen liegen 7 in der Neuzeit (jünger als 1850), 15 im Mittelalter bis Neuzeit (jünger als 500 AD), 6 an der Grenze Subatlantikum/Suboreal (ca. 3000 ± 600 BP) und 2 im Atlantikum. Bibus (1999) merkt dazu an: *„Überraschenderweise befindet sich die größte Anzahl an Torfbasisproben (insgesamt 22) an der Jurastufe im Bereich Mittelalter bis Neuzeit, wobei Gebiete dabei sind, die aufgrund der Deckschichten und Böden eindeutig in das Pleistozän gehören. [...] Da wir davon ausgehen, dass nicht gehäufte Nachrutschungen der Grund für die hohe Zahl historischer Daten ist, dürfte ein Großteil der Mindestalter erheblich zu jung sein“* (S. 44). Als Erklärung führen sie an, dass erst auf Grund des anthropogenen Eingriffs (Rodung der Wälder) die Hanghydrologie so verändert wurde, dass sich die beprobten Moore bilden konnten (Terhorst 1997, Bibus 1999 und Knipping 1999). Als weitere Gründe werden die Bildung abflussloser Senken in rutschungsbedingten Hohlformen durch Kolluvienbildung (Bibus 1999) oder kleinere Nachbewegungen in fossilen Rutschgebieten (Terhorst 1997) genannt.

Die Schwächen des Ansatzes der relativen Datierung mittels periglazialer Deckschichten, die bereits in Kapitel 2.8 diskutiert wurden, kommen auch in dem folgenden Zitat zum Ausdruck: *„Eine eindeutige Abgrenzung zwischen holozänen und pleistozänen Formen mit Hilfe periglazialer Schuttdecken ist ebenfalls in vielen Fällen schwierig, denn ein fehlender oder teilweise umgelagerter Deckschutt kann am früher in viel weiterem Ausmaß gerodeten Altrauf ebenso durch anthropogene Einflüsse abgetragen worden sein wie durch holozäne Hangbewegungen. Mit Hilfe periglazialer Schuttdecken in der Abrissnische ließ sich für einige Gleitschollen ein pleistozänes Alter nachweisen, aber für viele weitere Schollen bleibt aus o.g. Gründen offen, ob sie dem Holozän oder dem Pleistozän zuzurechnen sind“* (Kallinich 1999, S. 142).

Hinsichtlich der Altersfrage geht Fundinger (1985) davon aus, dass größere Bergstürze und Rutschungen vorzugsweise im Pleistozän aufgetreten sind. Diese sind oft auch heute noch morphologisch deutlich zu erkennen (Fundinger 1985). Er schließt aber die Auslösung neuer

Großrutschungen nicht explizit aus, da sie Teil der natürlichen Traufrückverlagerung des Albtraufes sind (Funding 2006, Persönliche Mitteilung).

Groschopf (1973) stellt heraus, dass besonders im Übergangszeitraum von Pleistozän zum Holozän auf Grund der übersteilten Talhänge die Voraussetzungen am Albtrauf geschaffen waren, um zahlreiche Bergstürze und Rutschungen auszulösen. Dabei stellt er die Tatsache heraus, dass viele der Gesteinsschollen ohne wesentliche Störungen des Schichtverbands auf einer Gleitfläche abrutschten. Er verweist zudem auf große historische Rutschungen und schließt somit deren Eintrittsmöglichkeit im Holozän ebenfalls nicht aus.

Zur Frage des Alters der Rutschungen und Bergstürze schreibt Rothe (2005): „Viele solcher Bergsturzmassen sind seit dem Pleistozän niedergegangen, als Frostverwitterung größere Blöcke vom Steilrand des Albtraufs abgespalten hatte. Die Hauptmasse rutschte aber im Holozän ab, und die Vorgänge reichen bis in die Gegenwart hinein.“ (S. 118). Leider werden dort keine weiteren Informationen bereitgestellt, so dass nicht klar wird, wie er zu dieser Einschätzung kommt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass in der Literatur die Ansicht überwiegt, dass die weitverbreiteten großen Rotationschollen ins Pleistozän einzuordnen sind. Dies wird auch durch die im Rahmen der Erstellung der Geologischen Karte 1:25.000 (GK25) kartierten Rutschschollen bestätigt. Sofern sie kartiert werden, werden sie meist ins Pleistozän eingeordnet, seltener in den gesamten Bereich des Quartärs oder ins Holozän.

Aufbereitete Informationen zu historischen Rutschungen an der Schwäbischen Alb sind bisher sehr wenig vorhanden. Eine erste Übersicht mit Detailinformationen wurde von Kallinich (1999) zusammengetragen und ist in Tab. 6.2 zusammengestellt.

Tab. 6.2: Historische Rutschungen an der Schwäbischen Alb (nach Kallinich 1999)

Datum	Lokalität	Kartenblatt (TK 25)	Breite (m)	Länge (m)	Fläche (km <sup>2</sup> )	Volumen (Mio. m <sup>3</sup> )	Literatur
14.05.1787	Ortenberg (Rathshausen)	7818	?	?	0,6	?	Rösler 1788, Riede 1990
07.02.1789	Ortenberg (Rathshausen)	7818	?	?	0,5	?	Riede 1990
03.03.1805	Greut (Hausen a.d. Fils)	7324	500	>130	ca. 0,1?	?	Groschopf 1957
05.10.1851	Plettenberg (Ratshausen)	7718	1000	800	1,1	?	Fraas 1853, Kible 1894, Riede 1990
01.07.1953	Bachzimmern	8018	150	150	0,02	0,065	Seibold 1955
17.10.1960	Broner Mühle	7919	100	70	0,01	0,2	Schädel und Stober 1988
16.06.1965	Achalm (Eningen u.A.)	7521	300	500	0,11	1	Schädel und Stober 1988
26.08.1972	Irrenberg (Thanheim)	7719	600	900	0,31	?	Funding 1985
12.04.1983	Hirschkopf (Mössingen)	7620	600	1000	0,5	6	Funding 1985, Bibus 1986, Schädel und Stober 1988

Der Mössinger Berggrutsch, bei dem 6 Mio. m<sup>3</sup> Material versetzt wurden, ist das jüngste Großereignis (Schädel und Stober 1988). Es handelt sich um eine Reaktivierung einer älteren Rutschscholle. Der Berggrutsch wurde umfassend von Bibus (1985), Funding (1985), Bibus (1986) und Schädel und

Stober (1988) untersucht. Bibus (1985) und Schädel und Stober (1988) weisen explizit daraufhin, dass sich dieses Ereignis durch die Öffnung von Spalten direkt am Albrauf lange im Voraus ankündigte, was u.a. zur notwendigen Verlagerung eines Wanderweges führte. Für die Auslösung am 12.04.1983 macht Fundinger (1985) ein sehr feuchtes Winterhalbjahr 1982/1983, die damit verbundene starke Schneeschmelze im Frühjahr, sowie die Starkniederschläge Anfang April (130 mm) verantwortlich. Während Bibus (1985) noch die Niederschläge im März und April als rutschungsauslösend anführt, beschränken sich Schädel und Stober (1988) nur auf die Aprilniederschläge. Das Ereignis dauerte mehrere Tage an und verursachte einen Schaden von ca. 1,5 Mio. € (Fundinger 1985). Bodenmechanische Rückrechnungen zur Hangstabilität wurden von Fundinger (1985) und Schädel und Stober (1988) durchgeführt. Schädel und Stober (1988) kommen zu dem Schluss, dass sie zwar den Sicherheitsfaktor mittels ihrer Software auch unter 1 modellieren können, dabei dann aber so an den Parametern drehen müssen, dass bei der Übertragung diese Parameterkonstellationen auf die Nachbarhänge diese ebenfalls hätten versagen müssen.

Bei den Rutschungen im Greut bei Hausen a.d. Fils 1805, sowie der beiden Rutschungen am Ortenberg bei Ratshausen 1787 und 1789 ist herauszustellen, dass alle drei Ereignisse bis ins Tal rutschten und die jeweiligen Flüsse (Fils bzw. Schlichem) blockierten und sich Seen bildeten. Alle Hangrutschungsdämme wurden zur damaligen Zeit von Hand aufgegraben, um Dammdurchbrüche mit katastrophalen Flutwellen zu verhindern (Groschopf 1957, Riede 1990, Borngraeber 2002, Röhrs 2006, Persönliche Mitteilung). Die Forschungsarbeiten aus *InterRISK History* in Zusammenarbeit mit der Bad Überkingen Gemeindecarchivarin A. Schall-Straub ergaben, dass die Rutschung im Greut bereits am 27.02.1805 ausgelöst wurde (Röhrs 2006, Persönliche Mitteilung) und nicht erst am 03.03.1805 wie von Groschopf (1957) postuliert (vgl. Tab. 6.2).

Bei den Rutschungen am Plettenberg 1851 und an der Bronner Mühle 1960 handelt es sich nachweislich um neu ausgelöste große Rotationsrutschungen, in die das Festgestein mit einbezogen wurde (Fraas 1853, German 1961, Schädel und Stober 1988 und Riede 1990).

Die Besonderheit der Rutschung am Irrenberg ist, dass diese durch starke Niederschläge ausgelöst wurde, die auf eine lang anhaltende Trockenperiode folgten. Durch diese Trockenperiode öffneten sich große Trockenrisse, die das Infiltrieren des Niederschlagswassers wesentlich beschleunigten und somit eine wichtige Rolle für die Auslösung der Rutschung hatten (Fundinger 1985). Für weitere Details zu den einzelnen Ereignissen sei auf die zitierten Arbeiten verwiesen.

Während Bibus (1999) den Mössinger Berggrutsch als Jahrhundertereignis betrachtet, kommt Terhorst (2001) auf Basis der von Kallinich (1999) zusammengetragenen historischen Ereignisse zu folgendem Schluss: *„Events on the scale of the Hirschkopf Landslide do not occur frequently, but with a recurrence interval of about 20 years (5 events in 100 years)“* (S. 107). Bei der Berechnung des Wiederkehrintervalls berücksichtigt Terhorst (2001) auch Ereignisse, die wesentlich kleiner sind als der Mössinger Berggrutsch. Werden nur ähnlich große bzw. größere Ereignisse berücksichtigt, resultiert

daraus ein maximales Wiederkehrintervall von ca. 50 Jahren. Generell sind sowohl ein 20-jähriges als auch ein 50-jähriges Wiederkehrintervall für ein Ereignis der Magnitude des Mössinger Bergrutsches als sehr häufig einzustufen. Insgesamt überraschen diese Aussagen, wenn sie mit den allgemeinen Aussagen zu der Aktivität gravitativer Massenbewegungen im Holozän und Pleistozän von Terhorst (1997), Bibus (1999) und Terhorst (2001) verglichen werden. Nutzt man die berechneten Wiederkehrintervalle, um die ungefähre Anzahl der Ereignisse von der Größe des Mössinger Bergrutsches im Holozän zu berechnen, kommt man auf 200 bis 500 Ereignisse. Eine Multiplikation mit dem Volumen des Mössinger Bergrutsches von 6 Mio. m<sup>3</sup> ergibt ein bewegtes Gesamtvolumen von 1,2 Mrd. m<sup>3</sup> bis 3 Mrd. m<sup>3</sup>. Auch wenn solche Berechnungen selbstverständlich sehr problematisch sind, und ein Wiederkehrintervall nicht über einen solch langen Zeitraum konstant sein kann, so geben diese Berechnungen aber einen ersten Eindruck vom möglichen Ausmaß des mittels gravitativer Massenbewegungen verlagerten Materials. Dies steht im starken Widerspruch zu den sonstigen Aussagen von Bibus (1999) und Terhorst (2001) zur Rutschungsaktivität im Holozän.

Neben der Frage des Alters wurden noch zahlreiche weitere Aspekte der gravitativen Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb untersucht, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Erste Inventarkarten gravitativer Massenbewegungen für die komplette Schwäbische Alb wurden von Reiff (1968) zusammengestellt. Kraut (1995 und 1999) erstellte eine Hangrutschungsdatenbank auf Basis einer Literaturrecherche, sowie von geologischen Karten und der Forstlichen Standortskarten, die sie anschließend statistisch auswertete. Die Datenbank enthält 588 gravitative Massenbewegungen, von denen 34 zumindest auf das Jahr genau datiert sind. Weitere Hangrutschungsdatenbanken inklusive Inventarkarten wurden im Rahmen des *InterRISK* Projekts von Brennecke (2006) mittels der Auswertung eines hochaufgelösten Digitalen Geländemodells sowie durch Luftbildinterpretation für das Filstal und von Kohn (2007) unter Auswertung eines Archivs der Straßenbauverwaltung für den Regierungsbezirk Stuttgart erstellt. Weitere Informationen zu den Datenbanken finden sich in Kapitel 4.

Geomorphologische Detailkartierungen (1:5.000 bis 1:10.000) zahlreicher Rutschungen wurden von Kößler (1997), Terhorst (1997), Kallinich (1999) und Kreja (2000) angefertigt. Dafür wurde von Terhorst (1997) eine neue Kartierlegende für Massenbewegungen und Hangformen entwickelt. Kallinich (1999) führte zudem für verschiedene Bereiche der Westalb, Mittleren Alb und Ostalb Übersichtskartierungen (1:50.000) durch, in denen er die Verebnungsbereiche der Rotationsschollen sowie aktive Rutschbereiche aufnahm. Auf Basis der Übersichtskartierungen berechnete er einen Schollenindex (= Verhältnis der Gesamtbreite der Rotationsschollen zu der Trauflänge) und einen Aktivitätsindex (= Verhältnis der Gesamtbreite aller rezenter Rutschungen zu der Trauflänge). Insgesamt konnte er bei einer bearbeiteten Trauflänge von 341 km über 600 Rotationsschollen des Oberjuras und 176 vor allem kleinere rezente Rutschgebiete kartieren. Anhand der berechneten Indizes stellt er fest, dass die rezente Aktivität und die Anzahl der Rotationsschollen von der Westalb zur

Ostalb immer mehr abnehmen. Des Weiteren befinden sich fast 60% der rezenten Massenverlagerungen unterhalb von Rotationsschollen (Kallinich 1999). Nach Terhorst (1997) und Bibus (1999) stellen sogar 90% der jungen Rutschungen Reaktivierungen innerhalb pleistozäner Rutschareale dar. Terhorst (1997) ermittelte weiterhin charakteristische Typen gravitativer Massenbewegungen in Abhängigkeit von der lithologischen Einheit (Tab. 6.3).

Tab. 6.3: Charakteristische Typen gravitativer Massenbewegungen in Abhängigkeit von der Lithologie (nach Terhorst 1997)

Lithologie	Rutschungstyp
Mittel-Kimmeridge-Kalke	Rotationsgleitungen, Fels- und Schuttstürze, Felskippungen, Translationsrutschungen im Schutt
Unter-Kimmeridge-Mergel	Fließungen
Oxford-Kalke	kombinierte Rotationsgleitungen, Schuttstürze, Translationsrutschungen im Schutt
Oxford-Mergel	Fließungen, Rotationsgleitungen (untergeordnet), Schuttstürze, Translationsrutschungen im Schutt
Braunjurate, insbesondere Ornaten- und Opalinustone	Fließungen, Translationsrutschungen
Braunjurakalke und -sandsteine	Rotationsgleitungen, Fließungen

Vegetationsökologische Untersuchungen im Zusammenhang mit gravitativen Massenbewegungen wurden von Riedinger und Terhorst (1999) in der Mittleren Alb durchgeführt. Dendrogeomorphologische Analysen zur Ermittlung von Aktivitätsphasen der letzten 80 bis 100 Jahre werden aktuell am Urselberg in Pfullingen durchgeführt (Holland in Vorbereitung). Geophysikalische Untersuchungen an gravitativen Massenbewegungen der Schwäbischen Alb umfassen Geoseismik (Hecht 2001), Geoelektrik (Bell et al. 2006b, Kruse 2006 und Sass et al. im Druck), Radiomagnetotellurik (Kruse 2006) und Georadar (Sass et al. im Druck). Durch Analysen der Lageveränderung der trigonometrischen Punkte aus dem amtlichen Liegenschaftskataster konnte Bogenschütz (1999) Bewegungen von bis zu 3,40 m in Rutschgebieten der Schwäbischen Alb zwischen 1837 und 1998 nachweisen.

Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen auf die Aktivität von gravitativen Massenbewegungen wurden im Zusammenhang mit der Bundesautobahn A8 von Scheuer (1998) untersucht. Eine Diskussion von gravitativen Massenbewegungen im Zusammenhang mit ingenieurgeologischen Tätigkeiten und Bauvorhaben findet sich in Wagenplast (2004b) und Wagenplast (2005) sowie in den Ingenieurgeologischen Karten von Pfullingen (Ruch 1996) und Reutlingen (Ruch 2003).

Gefährdungskarten gravitativer Massenbewegungen wurden mittels statistischer Verfahren für Untersuchungsgebiete im Bereich von Reutlingen und Jungingen (Thein 1999 und Thein 2000), Balinger Berge und Irenberg (Wiegand 1996), sowie den Mössinger bis Reutlinger Raum (Neuhäuser 2005 und Neuhäuser und Terhorst 2006) erstellt. Auf Basis des deterministischen Modells SINMAP wurden Gefährdungskarten für Mössingen-Öschingen (Kreja 2000 und Kreja und Terhorst 2006) und eine Region bei Eningen unter Achalm (Thiebes 2006) generiert.

### 6.1.6 Landnutzung

„Von Natur aus ist die ganze Schwäbische Alb ein Buchenwaldgebiet [...]“ (Grees 1993, S. 342). Da die Schwäbische Alb zum Altsiedelland gehört und somit bereits seit der Jungsteinzeit permanent besiedelt ist (Grees 1993), hat der Mensch seit dieser Zeit kontinuierlich die Landnutzung seinen Zwecken angepasst. Für die Ostalb haben Mailänder et al. (2004) den Kulturlandschaftswandel in einem 22 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet flächendeckend seit dem 19. Jahrhundert untersucht. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts bestand für die Bevölkerung noch der Zwang zur Selbstversorgung, was sich in der Landnutzung dadurch bemerkbar machte, dass Äcker und Heiden eine wesentlich größere, Wälder und Wiesen eine viel kleinere Verbreitung hatten als heutzutage. Die Bewirtschaftungsmethoden sowie gesellschaftliche und naturräumliche Voraussetzungen hatten zudem Einfluss darauf, dass um 1830 über 35% der Gesamtfläche von Äckern eingenommen wurden, an Unterhängen gar über 67%. Die Wälder hatten einen Anteil von 34% an der Gesamtfläche, die Heiden über 23%. Die Wiesen machten nur 3% der Fläche aus. Selbst die Steilhänge waren nur zu 46% bewaldet, der Rest wurde überwiegend als Heideland genutzt. Bis 1953 nahm der Waldanteil an der Gesamtfläche auf über 50%, an den Steilhängen auf 70% zu, während die Ackerflächen im Gesamten auf 16% und an den Unterhängen auf 25% zurückgingen. Diese Tendenz setzte sich fort, so dass 2002 67% der Gesamtfläche und 86% der Steilhänge bewaldet waren, während die Äcker im Gesamten auf 7% und an den Unterhängen auf unter 4% zurückgingen.

Inwieweit ähnliche Veränderungen der Landnutzung für die angegebenen Zeiträume auch für andere Bereiche entlang des Albtraufes angenommen werden können, kann derzeit nicht gesagt werden. Es ist aber zumindest zu vermuten, dass insbesondere die Landnutzung an anderen Albtraufhängen eine ähnliche Entwicklung durchgemacht hat.

Bei Betrachtung der gesamten Schwäbischen Alb zeigt sich aktuell eine ganz andere Verteilung der Landnutzung, als in dem von Mailänder et al. (2004) untersuchten Gebiet. Insbesondere nimmt das Ackerland auf Grund der ackerbaulichen Nutzung weiter Bereiche der Albhochfläche sehr stark zu. In Abb. 6.9 ist die aktuelle Landnutzung aus dem Jahr 2003 für die Schwäbische Alb auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (DLM25) dargestellt. Die Verteilung ist wie folgt: 8,2% Siedlungsfläche, 28,5% Ackerland, 22,2% Grünland und 41% Wald.

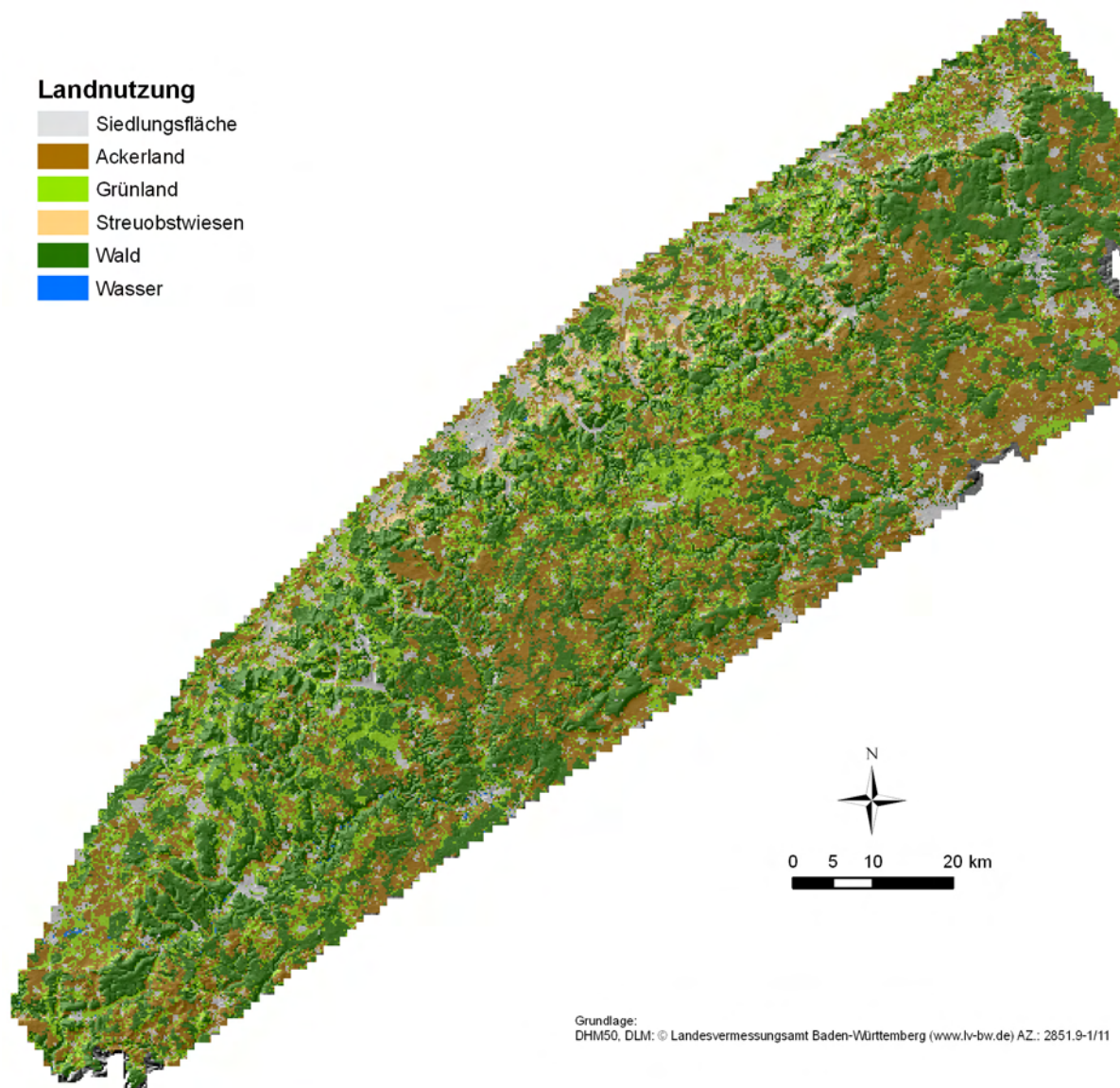


Abb. 6.9: Klassifizierte Landnutzung 2003 der Schwäbischen Alb auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (DLM25)

### 6.1.7 Siedlungen

Wie bereits erwähnt zählt die Schwäbische Alb zum Altsiedelland. Die ältesten Siedlungen sind im 6. und 7. Jahrhundert entstanden (Grees 1993). In den nachfolgenden Jahrhunderten sind immer neue Siedlungen hinzugekommen, die man anhand der Namensendungen bestimmten Zeitperioden zuordnen kann. Eine entsprechende Klassifizierung wurde von Grees (1993) für die Schwäbische Alb vorgenommen. Diese dient als Basis der Übersicht über die Verteilungen der Siedlungen mit entsprechendem Gründungsalter. In Abb. 6.10 sind die heutigen Flächen der Siedlungen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bereits im 6. und 7. Jahrhundert Siedlungen sowohl auf der Albhochfläche, dem Albvorland als auch entlang der engen, tief in die Schwäbische Alb einschneidenden Flusstäler gebildet haben. In den nachfolgenden Jahrhunderten verdichtet sich zwar



das Siedlungsnetz und wachsen die Siedlungen bis zur heutigen Größe heran, doch ist insgesamt die Siedlungsdichte auch heute noch im Bereich der Schwäbischen Alb relativ gering. Demnach ist die Alb als Ganzes bis heute ein ländlicher Raum geblieben (Grees 1993). Die Bevölkerungsdichte betrug 1990 lediglich 148 Einwohner/km<sup>2</sup>.

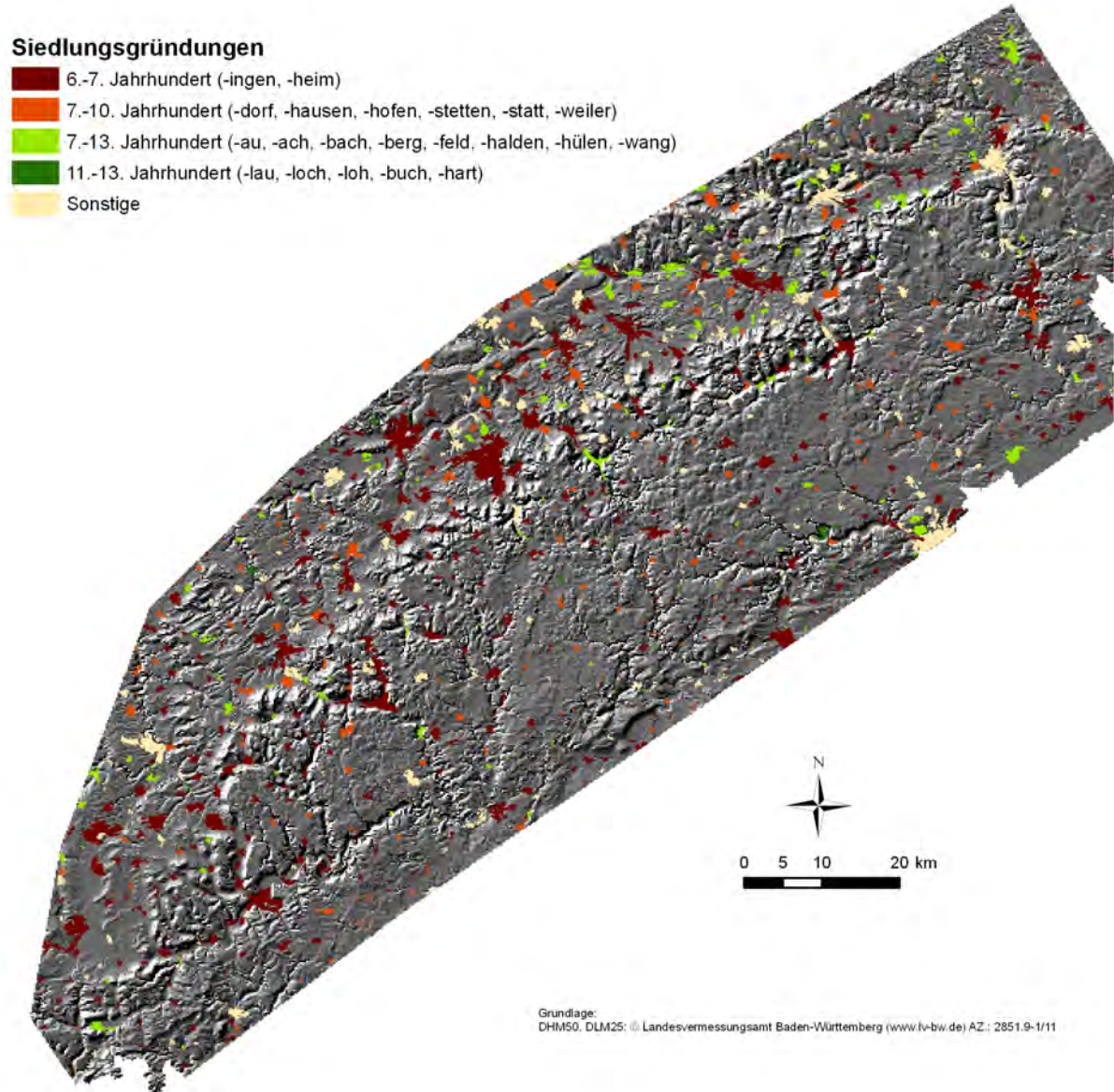


Abb. 6.10: Verteilung und Alter der Siedlungen in der Schwäbischen Alb (Klassifizierung nach Grees 1993, Siedlungsflächen auf Basis des DLM25 mit Stand von 2003)

## 6.2 Oberes Filstal

Das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal erstreckt sich von Geislingen an der Steige im Osten bis Gosbach im Südosten und Schlatt im Norden. Es umfasst eine Fläche von ca. 120 km<sup>2</sup>.

Die Geologie ist begrenzt auf den Mittel- und Oberjura, sowie tertiäre und quartäre Gesteine und Sedimente. In der Originalversion der geologischen Karte 1:25.000 sind die gravitativen Massenbewegungen als eigene geologische Einheit ausgewiesen. Für die Gefährdungsanalyse wurde

es notwendig, die geologischen Einheiten vor dem Eintreten der Rutschungen zu rekonstruieren. In Abb. 6.11 ist bereits die modifizierte Geologie mit überlagernden gravitativen Massenbewegungen dargestellt. Insgesamt wurden von Borngraeber und Geyer (2002) relativ viele große gravitative Massenbewegungen kartiert. Des Weiteren ist in der Abbildung die große Anzahl an meist vermuteten Störungen zu erkennen.

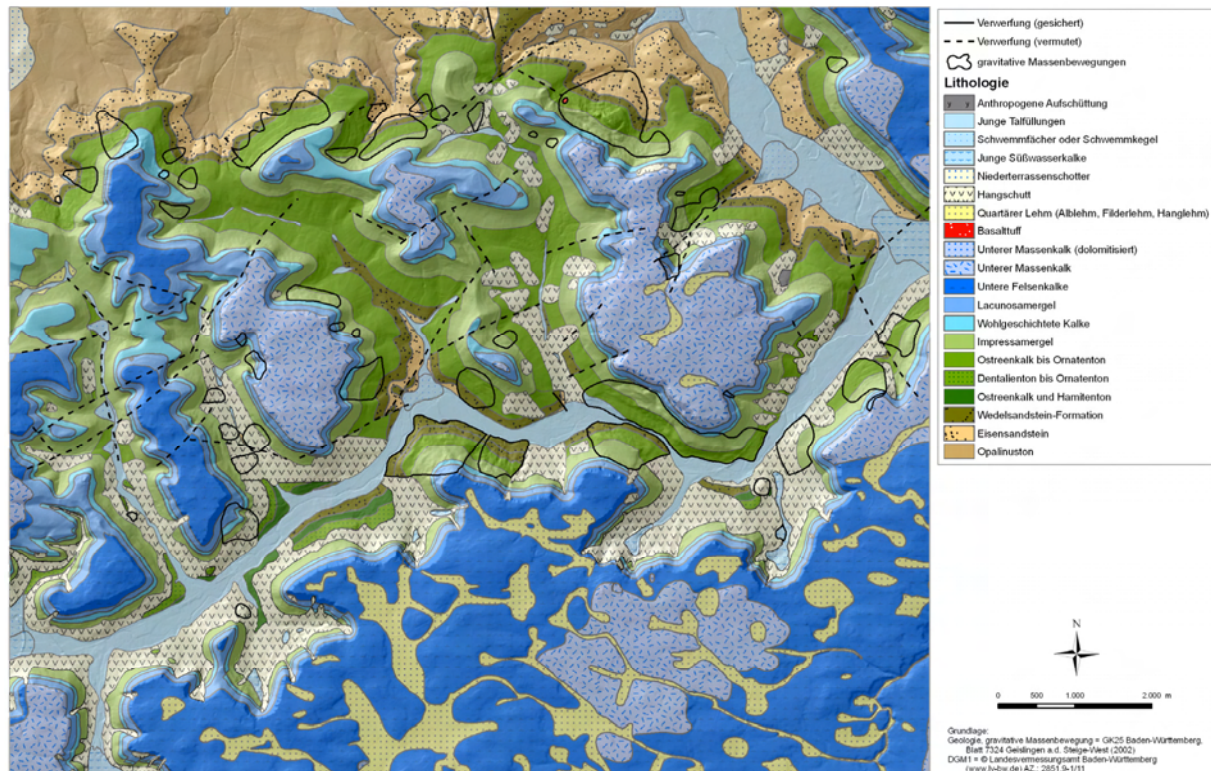


Abb. 6.11: Geologie des Untersuchungsgebietes Oberes Filstal (auf Basis der Geologischen Karte 1:25.000)

Arbeiten zu gravitativen Massenbewegungen wurden u.a. von Groschopf 1957, Groschopf 1973, Borngraeber 1993, Kößler 1997, Borngraeber 2002 und Brennecke 2006 bereitgestellt. Die bekannteste gravitative Massenbewegung ist die Rutschung an der Hausener Wand. Bei Mineralbrunnenbohrungen wurden unter der Rutschmasse Flusskiese der Fils angetroffen (Borngraeber 1993), die anzeigen, dass die fluviale Unterschneidung ein wichtiger vorbereitender oder gar auslösender Faktor war. Zeitlich wird die Rutschung an das Ende des Pleistozäns gestellt (Groschopf 1973). Auf das historische Ereignis im Greut von 1805 wurde in Kapitel 6.1.5 bereits eingegangen. Im Mai 1994 wurden bei einem Starkniederschlagsereignis 11 kleinere Rutschungen innerhalb von 2 Tagen ausgelöst (Saum 2006, Persönliche Mitteilung).

Die aktuelle Landnutzung (Stand 2003) ist auf Basis des Digitalen Landschaftsmodells (DLM25) in Abb. 6.12 dargestellt. Dabei entfallen 8% auf Siedlungsflächen, 24,9% auf Ackerflächen, 18,7% auf Grünland, 39,5% auf Wald und 8,9% auf Streuobstwiesen.

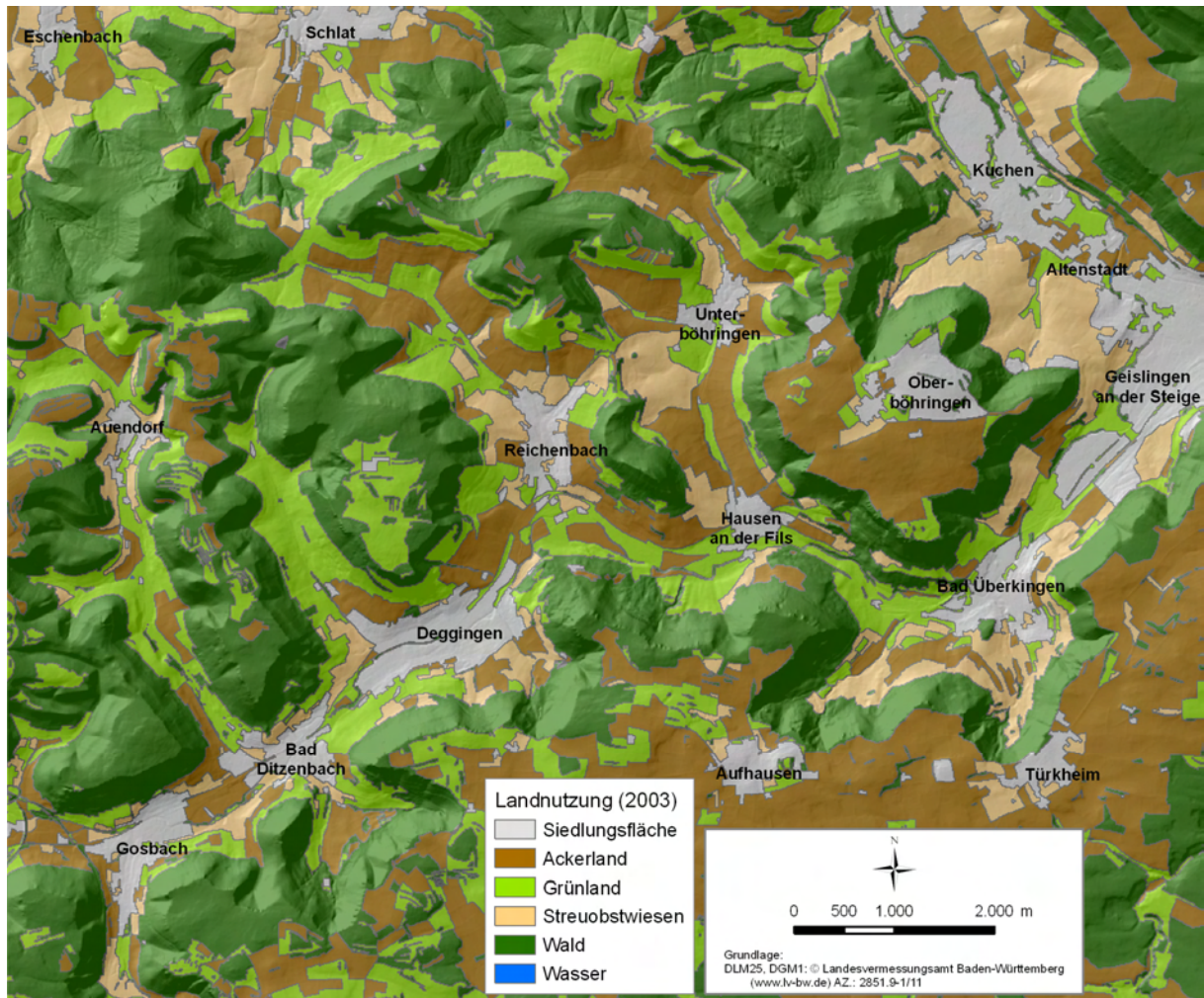


Abb. 6.12: Aktuelle Landnutzung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal (auf Basis des DLM25, Stand 2003)

### 6.3 Mössingen-Öschingen

Das Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen liegt in der Mittleren Alb. Das Rutschungsareal umfasst einen Sporn sowie dessen östliche Flanke und weist eine Fläche von 1,3 km<sup>2</sup> auf. In Abb. 6.13 ist ein Foto des Untersuchungsgebietes dargestellt, inklusive der Grenzen der Rutschmassen an der Spornfront.



Abb. 6.13: Blick auf das Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen mit eingezeichneter Abrisskante der alten Rotationsrutschung (Foto: M. Danscheid)

Das Untersuchungsgebiet weist im Bereich der Rutschung Gesteine des oberen Mitteljuras, sowie des unteren Oberjuras auf (Abb. 6.14). Die größten Bereiche der Rutschung befinden sich im Bereich der Tone des Banthonium und Callovium, deren Untergrenze bis auf das Niveau des Öschenbachs (im Dorfzentrum bei 550 m NN) hinunter reicht. Die Obergrenze der Ornatentone (Callovium) liegt in einer Höhe von 640 m NN. Darüber liegt der Impressamergel, der in 720 m NN in die wohlgeschichteten Kalke übergeht. Oben auf dem Plateau (820 m NN) sind die Lacunosamergel zu finden. Weite Bereiche des Untersuchungsgebietes sind mit Hangschutt bedeckt. Die Schichten fallen im Untersuchungsgebiet im Durchschnitt mit 2-3° nach Osten ein (Schmidt 1994). Störungslinien sind innerhalb des Untersuchungsgebietes in der Geologischen Karte 1:25.000 (GK25) nicht ausgewiesen.

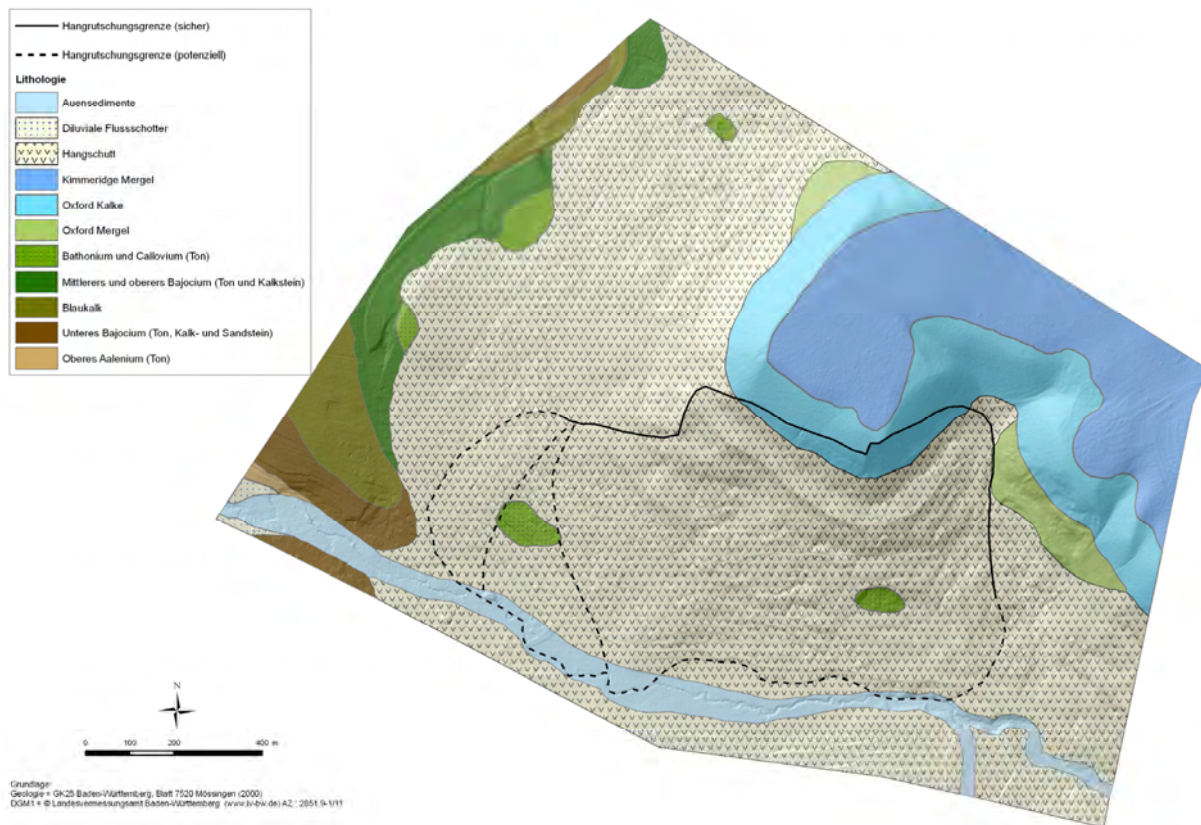


Abb. 6.14: Geologie und Hangrutschungsgrenzen des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen (auf Basis der GK25)

In Abb. 6.15 ist die Siedlungsentwicklung seit 1820 dargestellt. Es wird deutlich, dass bereits in den 60er Jahren die Besiedlung des alten Rutschkörpers beginnt und bis heute fortschreitet. Mittlerweile weisen einzelne Häuser Risse auf, die mit Bewegungen des Untergrundes in Verbindung gebracht werden. Ein Haus wurde so stark zerstört, dass es seit mehreren Jahren unbewohnbar ist (Abb. 6.16). Um dieses Haus gibt es ein langwieriges Gerichtsverfahren zwischen Hauseigentümer und der Stadt Mössingen, in dem es u.a. darum geht, herauszufinden, ob die Schäden durch Baumängel oder durch Bewegungen des Untergrundes entstanden sind.

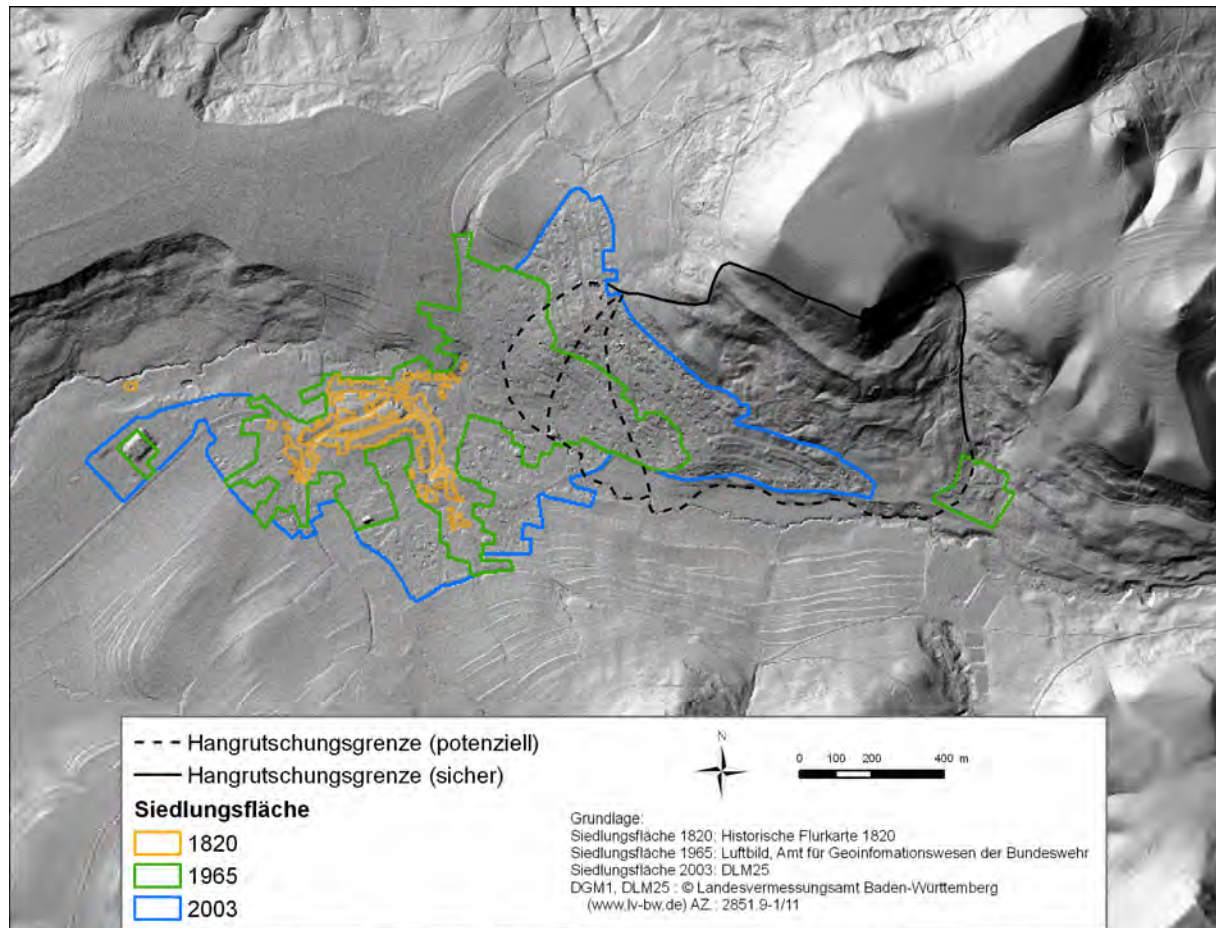


Abb. 6.15: Historische Entwicklung der Siedlungsfläche in Mössingen-Öschingen



Abb. 6.16: Zerstörtes Haus im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen

Kreja (2000) und Kreja und Terhorst (2006) haben zum einen die in der Zwischenzeit erstellten Gutachten ausgewertet, sowie das Auftreten der Schäden mit Niederschlagsdaten korreliert und kommen zu dem Schluss, dass die Schäden sehr deutlich auf Bewegung im Untergrund hinweisen. Ein Bewegungsmonitoring im Baugebiet mittels differenziellen GPS wurde von der Stadt Mössingen in Auftrag gegeben, doch in der Zwischenzeit auf Grund der zu ungenauen Methode und daraus resultierender unplausibler Ergebnisse wieder eingestellt (Koll 2006, Persönliche Mitteilung).

Auch wurden von Kreja (2000) und Kreja und Terhorst (2006) deterministische Hanggefährdungsanalysen mittels dem Modell SINMAP durchgeführt. Die Ergebnisse weisen eine Rutschgefährdung im Bereich der Siedlung aus. Auf Basis der Modellierung, mittels derer allerdings nur flachgründige Translationsrutschungen analysiert werden können, treffen Kreja und Terhorst (2006) auch Aussagen zur Stabilität der untersten großen Rotationsscholle, die jedoch aufgrund der Limitierung des eingesetzten Modells, kritisch zu hinterfragen sind. Weitere Mängel in der Modellierung beziehen sich auf die eingesetzten Parameterwerte. Es werden keine Sensitivitätsanalysen durchgeführt und auch keine Aussagen über die Unsicherheiten des Modells gemacht. Die Arbeit von Thiebes (2006), der das gleiche Modell in einem anderen Untersuchungsgebiet in der Schwäbischen Alb einsetzt, zeigt, dass die Ergebnisse teilweise sehr sensibel hinsichtlich der Eingangsparameter sind, so dass bei den Modellierungen immer Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden sollten, auf deren Basis die Unsicherheiten des Modells abschätzbar sind.

## 6.4 Lichtenstein-Unterhausen

Das Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen befindet sich an einem südwestlich exponierten Hang im Echaztal, südlich von Reutlingen (Abb. 6.17). Es umfasst eine Fläche von ca. 0,5 km<sup>2</sup>.

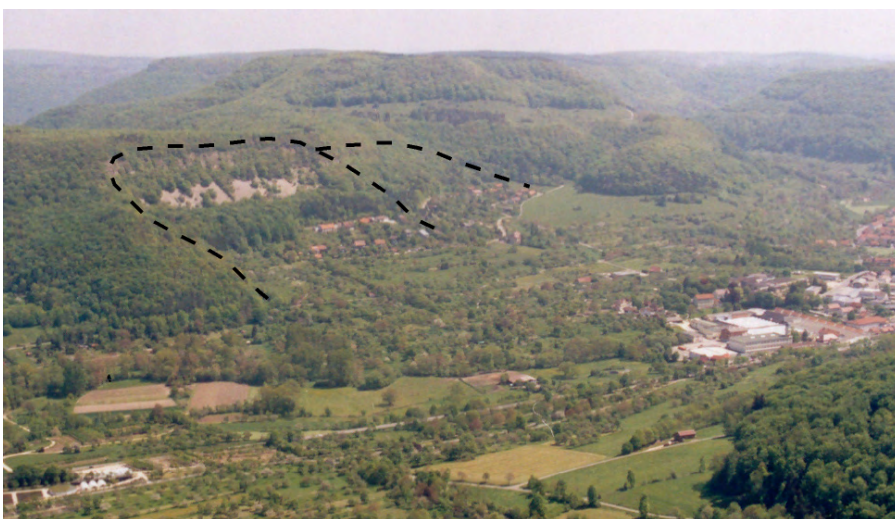


Abb. 6.17: Blick auf das Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen mit eingezeichneten Abrisskanten der alten Rotationsrutschungen

Der untersuchte Hang am Urselberg wird im Wesentlichen vom oberen Mitteljura und unteren Oberjura aufgebaut, die von Hangschutt bedeckt sind (Abb. 6.18). Die flacheren Hänge im Ornatenton reichen bis in eine Höhe von ca. 535 m NN. Der Übergang zu den etwas steileren Impressamergeln ist im Untersuchungsgebiet aufgrund alter Rotationsrutschungen, die sich teilweise bis zur Echaz ins Tal (ca. 467 m NN) hinunter ziehen, modifiziert. Im ungestörten Bereich reichen die Impressamergel bis in eine Höhe von ca. 620 m NN. Oberhalb der Verebnungsbereiche der Rotationsschollen befinden sich steile, weitestgehend vegetationslose Schutthalden, die zu den noch steileren Partien der teilweise massig ausgeprägten Formation der wohlgeschichteten Kalke überleiten. Diese bilden auf einer Höhe von ca. 660m NN die Plateaufläche des Urselbergs. Im nordwestlichen Bereich wird das Untersuchungsgebiet vom Kugelberg begrenzt, der aus basaltischem Tuff aufgebaut ist. Die Schichten fallen mit 1-2° nach Südwesten ein (Ohmert 1994). Der Bereich der Schutthalden wurde zeitweise als Steinbruch genutzt. Insgesamt wurden dort ca. 30.000 m<sup>3</sup> Kalksteine abgebaut (Schönwälder 2006, Persönliche Mitteilung).

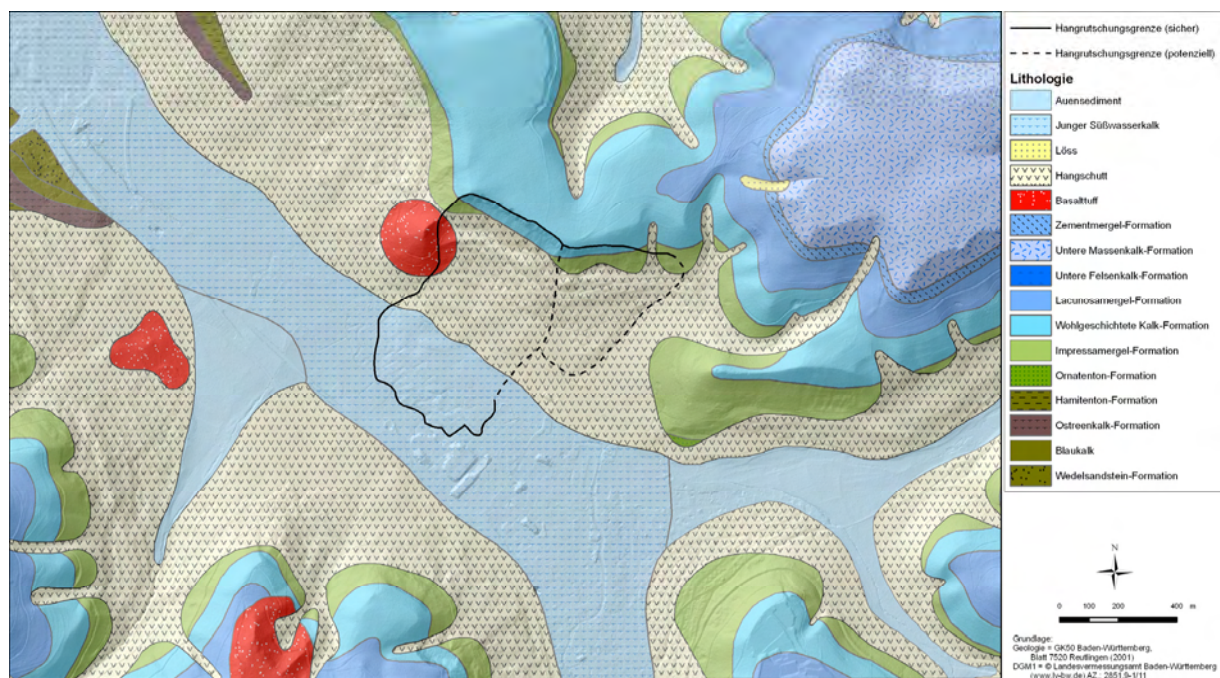


Abb. 6.18: Geologie des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen und Ausmaße der alten Rotationsrutschungen (auf Basis der GK50)

Wie in Abb. 6.17 zu sehen, werden die flacheren Bereiche weitestgehend von Grünland eingenommen, während die Steilhänge bis auf die aktiven Schutthalden durchweg bewaldet sind.

Die Siedlungsentwicklung im Zungenbereich sowie kurz unterhalb der Verebnungsflächen der alten Rotationsrutschungen beginnt in den 1960er Jahren und setzt sich bis heute fort (Abb. 6.19). Der Bebauungsplan enthält die Auflage, dass jedes Bauvorhaben im Untersuchungsgebiet ein spezielles Ingenieurgeologisches Gutachten benötigt (Heyd 2005, Persönliche Mitteilung). Trotz Beachtung dieser Bauauflage kommt es seit einigen Jahren auf Grund von Bewegungen im Untergrund



regelmäßig im Sommer und Herbst zur Rissbildung an einem Haus (Abb. 6.20, Siegler 2005, Persönliche Mitteilung).

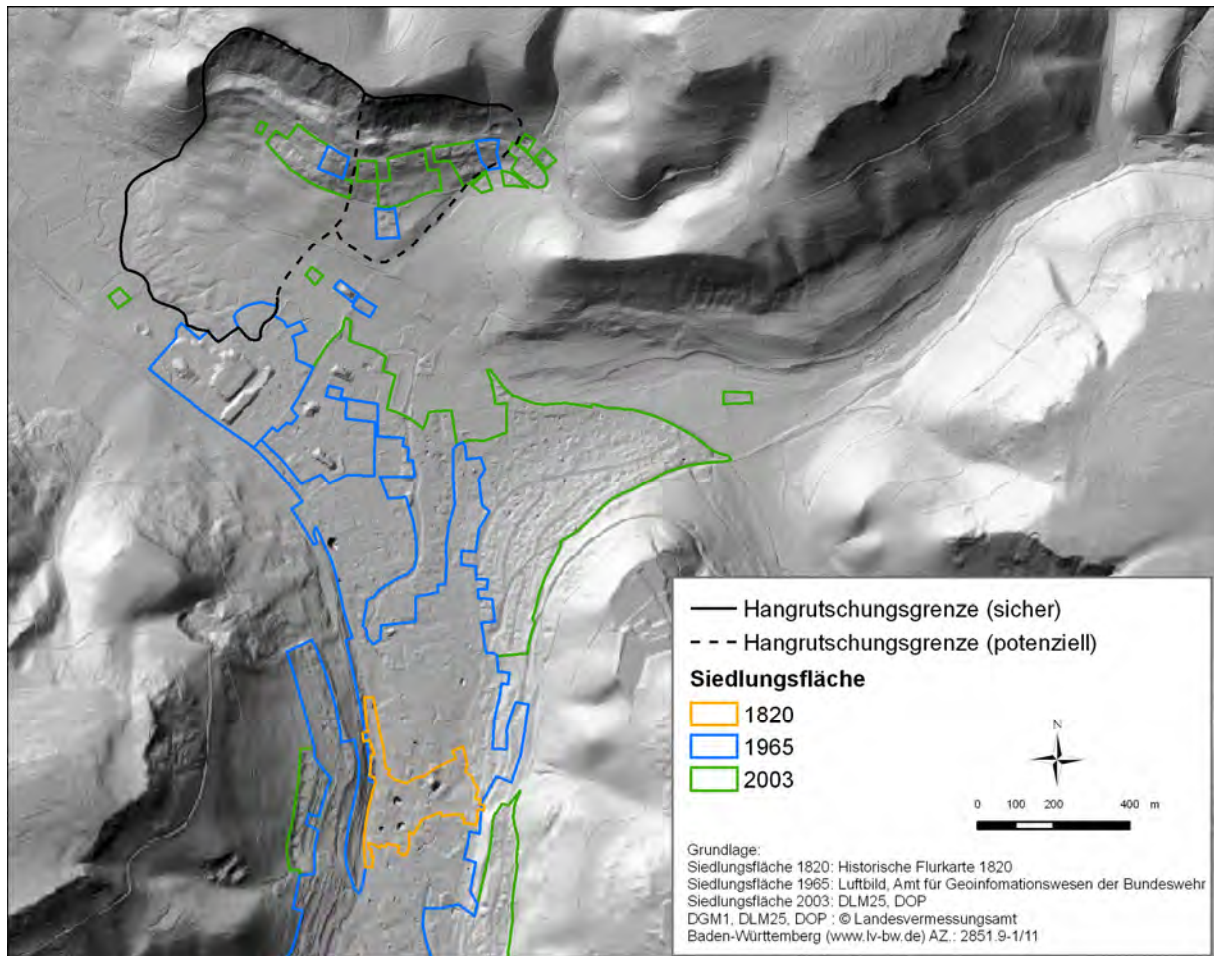


Abb. 6.19: Siedlungsentwicklung im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen



Abb. 6.20: Rissbildung am Haus von Familie Siegler im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen

## 7 Gefahrenanalyse

In diesem Kapitel werden zuerst die Ergebnisse der zwei regionalen Untersuchungsgebiete Schwäbische Alb und Oberes Filstal präsentiert, gefolgt von den zwei lokalen Untersuchungsgebieten Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen. Dort wo es sinnvoll erschien, erfolgt eine Diskussion der Detailergebnisse am Ende der jeweiligen Unterkapitel der Untersuchungsgebiete. Ansonsten werden am Ende jedes Untersuchungsgebietkapitels die Ergebnisse diskutiert

### 7.1 Gefahrenanalyse Schwäbische Alb

#### 7.1.1 Räumliche Inventare gravitativer Massenbewegungen

(Die präsentierten Inventarkarten gravitativer Massenbewegungen (Abb. 7.1 und Abb. 7.3 bis Abb. 7.8) befinden sich zusätzlich in digitalem Format auf der beigelegten CD-ROM)

##### *Inventar gravitativer Massenbewegungen nach Kallinich (1999)*

Die Auswertung der digitalisierten gravitativen Massenbewegungen aus der Übersichtskartierung von Kallinich (1999) ergibt, dass er in ausgewählten Untersuchungsgebieten der Westalb und Mittleren Alb insgesamt 654 Verebnungsbereiche von großen Rutschschollen, sowie 14 größere und 259 kleinere rezente Rutschungen kartierte. Insbesondere die Anzahl der kleineren rezenten Rutschungen ist damit wesentlich höher als von Kallinich (1999) selbst angegeben (siehe Kap. 6.1.5). Die Unstimmigkeiten sind eventuell darauf zurück zu führen, dass er einzelne kleine Rutschungen zu Rutschgebieten zusammengefasst hat. Dies kann aber nicht abschließend geklärt werden.

Eine Übersicht über die kartierten Bereiche sowie zwei vergrößerte Ausschnitte sind in Abb. 7.1 dargestellt. Der Ausschnitt A befindet sich am Irrenberg und stellt neben den dort anzutreffenden Rutschschollen und kleineren rezenten Rutschungen auch die Rutschung von 1972 dar (siehe Kap. 6.1.5). Die zu erkennenden Lageungenauigkeiten resultieren zum einen auf nicht zu behebbende Fehler bei der Georeferenzierung der Vorlage, zum anderen auf dem von Kallinich (1999) verwendeten Kartiermaßstab von 1:50.000. Ausschnitt B zeigt einen Teil des Schlichemtals und das Gebiet nördlich davon und gibt die Verbreitung der kartierten Rutschgebiete für eine größere Region wieder. Der Ausschnitt ist zwar charakteristisch für die anderen von Kallinich (1999) kartierten Gebiete, aber in diesem Bereich kommen bereits 6 der 14 kartierten großen rezenten Rutschungen vor. Der Blick auf das DGM1 zeigt, dass bei der Übersichtskartierung nicht alle größeren rezenten Rutschungen erfasst werden konnten. Abgesehen von dem Überblick, den das Inventar hinsichtlich der Verbreitung von gravitativen Massenbewegungen vermittelt, ist der Nutzen für diese Arbeit sehr gering. Da nicht die gesamte Fläche der Rutschungen kartiert wurde, eignen sich die überwiegend kartierten Verebnungsbereiche der großen Rutschschollen weder für Frequenz-Magnitude-Analysen noch für die Gefährdungsmodellierung. Bei der Gefährdungsmodellierung würde die Verwendung der kartierten

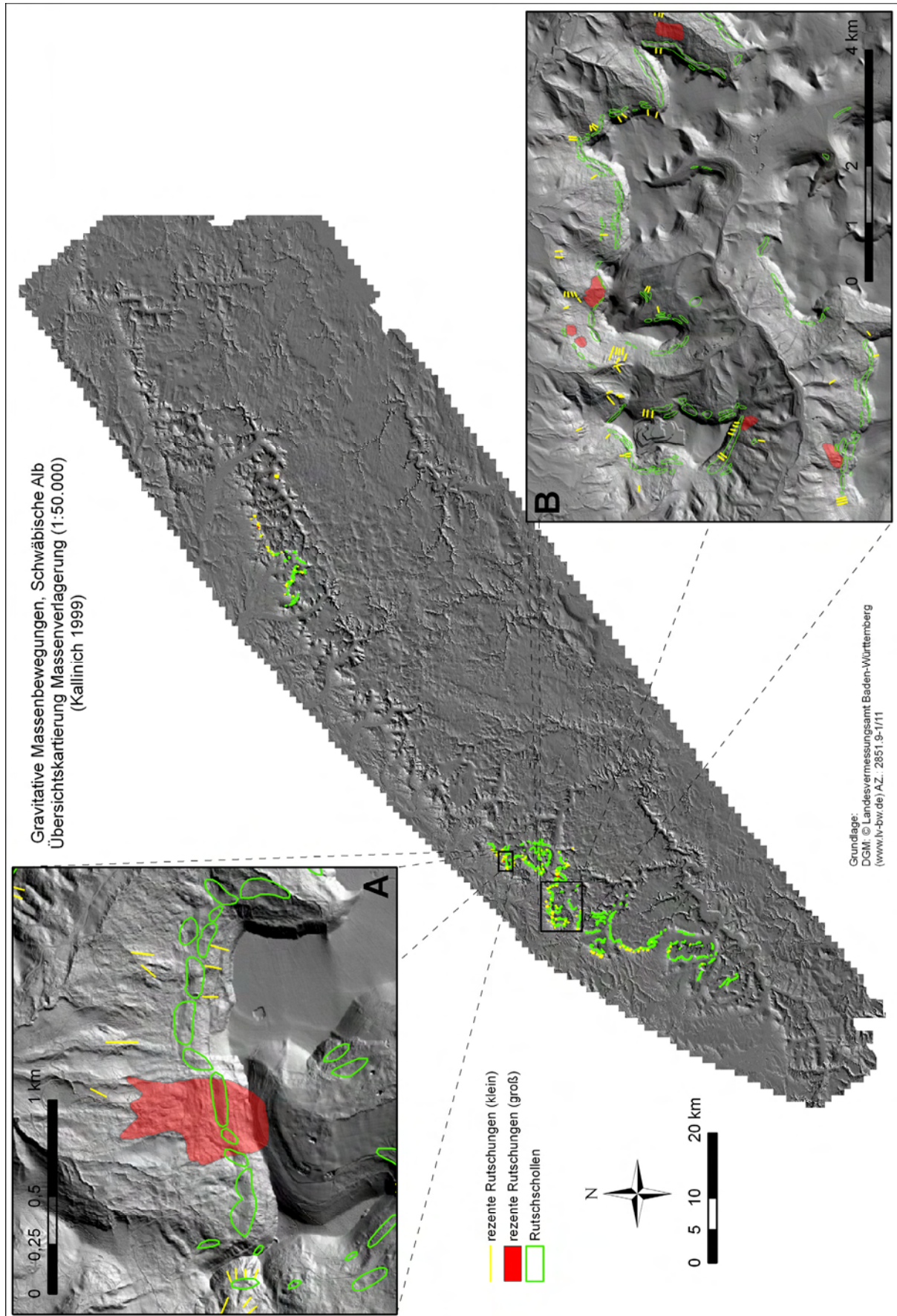


Abb. 7.1: Inventar gravitativer Massenbewegungen nach Kallinich (1999) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Irrenberg (A) und Schlichemtal (B))

Verebnungsbereiche der Rutschschollen dazu führen, dass flachere Bereiche als höher gefährdet eingestuft würden als steilere Hanglagen.

*Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen (E. Bibus, B. Terhorst, Stand 2003)*

Die originale Hangrutschungsdatenbank enthält 588 Einträge zu gravitativen Massenbewegungen, die über Rechts- und Hochwert punktuell verortet sind. Für 9 Hangrutschungen sind die Eintragungen der Gauß-Krüger Daten jedoch äußerst fehlerhaft, so dass einzelne Hangrutschungspunkte weit von der Schwäbischen Alb entfernt liegen. Eine Korrektur der Originaleinträge konnte leider nicht erfolgreich durchgeführt werden. Daher wurden diese Einträge gelöscht. Insgesamt blieben 579 Ereignisse übrig. Auch bei diesen sind die Koordinaten oft ungenau, wie aus Abb. 7.2 ersichtlich wird. Selbst bei Großereignissen, wie dem Mössinger Berggrutsch von 1983 (A) oder der Hangrutschung im Greut von 1805 (C) liegen die dazu gehörigen Referenzpunkte um bis zu 500 m entfernt. Auf Grund der Lageungenauigkeiten kommt es auch vor, dass Referenzpunkte anstatt im Bereich der Rutschung auf der ungefährdeten Hochfläche liegen (B), welches wiederum die Eignung zur Gefährdungsmodellierung stark einschränkt, so dass das Inventar für diese Zwecke nicht eingesetzt wird. In Abb. 7.3 ist das Inventar räumlich dargestellt. Die besondere Gefährdung des Albtraufbereichs im Vergleich zur restlichen Schwäbischen Alb wird sehr deutlich. Die Ausschnitte zeigen zum einen den Raum von Mössingen-Öschingen bis Lichtenstein-Unterhausen (A) und enthalten somit auch die zwei lokalen Untersuchungsgebiete. Zum anderen ist das Untersuchungsgebiet des Oberen Filstales dargestellt (B). In Ausschnitt A wird deutlich, dass selbst ein so großes Rutschareal wie das lokale Untersuchungsgebiet in Mössingen-Öschingen lediglich durch einen einzigen Punkt erfasst wird. Die Hangrutschung im zweiten lokalen Untersuchungsgebiet ist gar nicht erfasst.

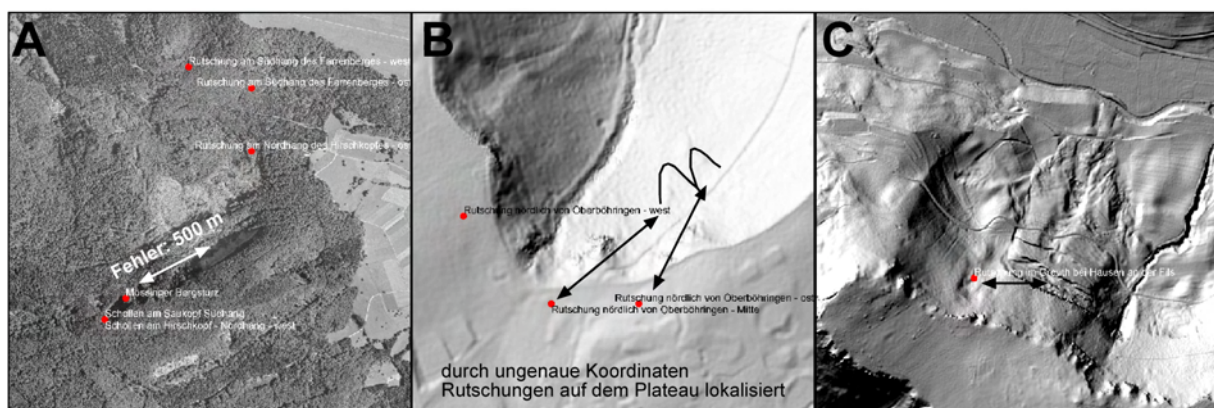


Abb. 7.2: Lageungenauigkeiten im Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen (A = Mössinger Berggrutsch, B = Lage von Hangrutschungspunkten auf der Albhochfläche, C = Rutschung im Greut bei Hausen. Die roten Punkte zeigen die Lage der Hangrutschungen unter Verwendung der Gauß-Krüger Koordinaten aus der Datenbank. Die eingetragenen Pfeile verdeutlichen den Fehler zur tatsächlichen Lage)

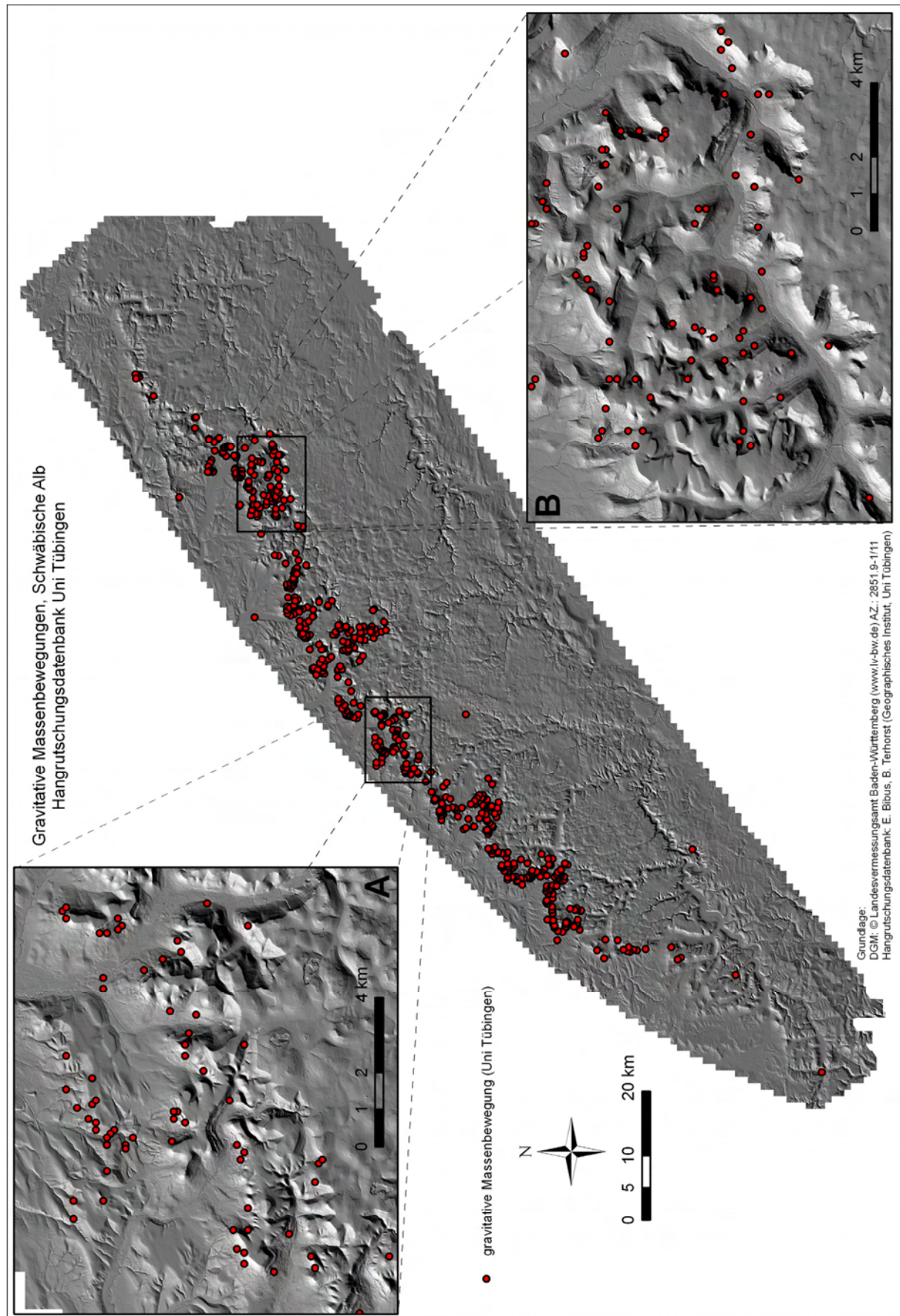


Abb. 7.3: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen (E. Bibus, B. Terhorst, Stand 2003) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Raum Mössingen bis Lichtenstein (A) und Oberes Filstal (B))

Die Datenbank enthält für 400 Einträge Flächeninformationen, so dass Frequenz-Magnituden-Analysen durchgeführt werden konnten. Es zeigte sich aber, dass es sich bei den Flächenangaben um meist grobe Schätzwerte handelt. Die Unsicherheiten die daraus resultieren, können nicht eingeschätzt werden. Trotzdem zeigte die Frequenz-Magnitude-Analyse die typische Potenzgesetzverteilung und den so genannten Rollover-Effekt. Da aber der Datensatz weder für die Schwäbische Alb im gesamten noch für ausgewählte Teilgebiete vollständig ist, eignet sich der Datensatz nicht für die Berechnung von Wiederkehrwahrscheinlichkeiten, wie in Kap. 5.1.3 ausgeführt wurde. Von den 589 Hangrutschungen sind 34 Ereignisse datiert, die meisten zumindest auf das Jahr genau. Diese Ereignisse werden in die Auswertung der historischen Daten zur Altersbestimmung integriert. Da ein Großteil der Einträge auf Daten aus der Forstlichen Standortkartierung basiert, initiierte die Hangrutschungsdatenbank die Beschaffung von Hangrutschungsinformationen aus dem Forstwesen. Der entsprechende Datensatz wird im nächsten Abschnitt diskutiert.

*Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsinformationen aus der Forstlichen Standortkartierung (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Stand 2006)*

Im Rahmen der Forstlichen Standortkartierung werden innerhalb der kartierten Waldflächen Hangrutschungsinformationen in folgenden drei Klassen erfasst: latente Rutschgefährdung, Rutschhang in Ruhe und akute Rutschgefährdung. Insgesamt wurden 7286 Flächen als latent gefährdet, 1348 Flächen als Rutschhang in Ruhe und 436 Flächen als akut gefährdet ausgewiesen (Abb. 7.4). Die latente Rutschgefährdung wird über das vorgefundene Ausgangsmaterial bestimmt. So werden z.B. Ton- und Mergelhänge als latent gefährdet ausgewiesen, wenn sie keine besonderen Rutschungsanzeichen aufweisen. Da diese Rutschgefährdung mittels der Gefährdungsmodellierung bestimmt werden soll, eignen sich nur die beiden anderen Kategorien für die Modellierung. Die Forstliche Standortkartierung wird in erster Linie im staatlichen Forst durchgeführt. Von den Privatwäldern sind nur wenige im Rahmen der Standortkartierung erfasst, so dass diese Gebiete sowie waldfreie Flächen oft zu Lücken innerhalb von Rutschungen im Datensatz führen, wie in Abb. 7.4 A zu sehen ist. Es handelt sich in diesem Fall wieder um das Rutschgebiet am Irrenberg, wobei die Rutschung von 1972 weitestgehend als akut rutschgefährdet ausgewiesen wird. Im westlichen Bereich der Rutschung sind aber nur Teilgebiete kartiert worden, so dass das Rutschgebiet zu klein abgegrenzt ist. Des Weiteren ist die Rutschungsaktivität nur ein Kriterium zur Ausweisung bestimmter Flächen, so dass die Grenzen nicht unbedingt die genauen Grenzen einer Rutschung wiedergeben, sondern auch schon einmal mehrere Rutschungsgebiete zusammen als eine Fläche ausweisen können. Diese Einschränkungen in der Erfassung der Flächen verhindern, dass Frequenz-Magnitude-Analysen sinnvoll durchgeführt werden können. Da im Modellierungsansatz mit zufallsverteilten Punkten gearbeitet wird, erscheint der Nachteil der kompletten Erfassung einzelner Rutschkörper bzw. die Datenlücken als nicht ganz so gravierend, da generell eine sehr gute Lagegenauigkeit auf Grund des

Kartiermaßstabs von 1:10.000 und der digitalen Datenverfügbarkeit gegeben ist. Der große Vorteil ist, dass die Daten flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorliegen und somit nicht nur den Albtraufbereich abdecken, sondern auch das Albvorland sowie die Flusstäler, die sich nach Süden zur Donau hin erstrecken, und das Donautal selbst erfassen. Daher eignet sich der Datensatz mit Einschränkungen zur Gefährdungsmodellierung.

*Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis des Archivs der Baustoff- und Bodenprüfstelle Ludwigsburg (Kohn 2007)*

Das Inventar umfasst aktuell 207 Ereignisse, von denen 54 im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb lokalisiert sind (Abb. 7.5). Es sind ausschließlich Rutschungen erfasst, die Schäden an Straßen verursacht haben. Daher handelt es sich oft um kleinere Böschungsrutschungen. Teilweise kommen aber auch größere Ereignisse vor. Der Vorteil ist, dass die Ereignisse im Vergleich zu den anderen Inventaren über das Eingangsdatum der Meldung bei der Prüfstelle relativ gut datiert sind. Zwischen Ereignis und Meldung kann jedoch einige Zeit vergehen, so dass die Daten für weitere Ursachenanalysen zuerst sorgfältig geprüft werden müssen. Zudem besteht keine Meldungspflicht, sondern die Meldung ergeht nur, wenn die Prüfstelle mit der Untersuchung der Rutschung beauftragt wird. Daher sind nicht alle aufgetretenen Ereignisse erfasst. Insgesamt liefert das Inventar aber wertvolle räumliche und zeitliche Informationen zu den Rutschungsaktivitäten an Straßen über die letzten 30 Jahre. Auf Grund der relativ wenigen Ereignisse im Untersuchungsgebiet eignet sich das Inventar weder für Frequenz-Magnitude-Analysen noch für die Gefährdungsmodellierung. Die datierten Ereignisse werden aber im Rahmen der historischen Altersbestimmung von Rutschungen berücksichtigt.

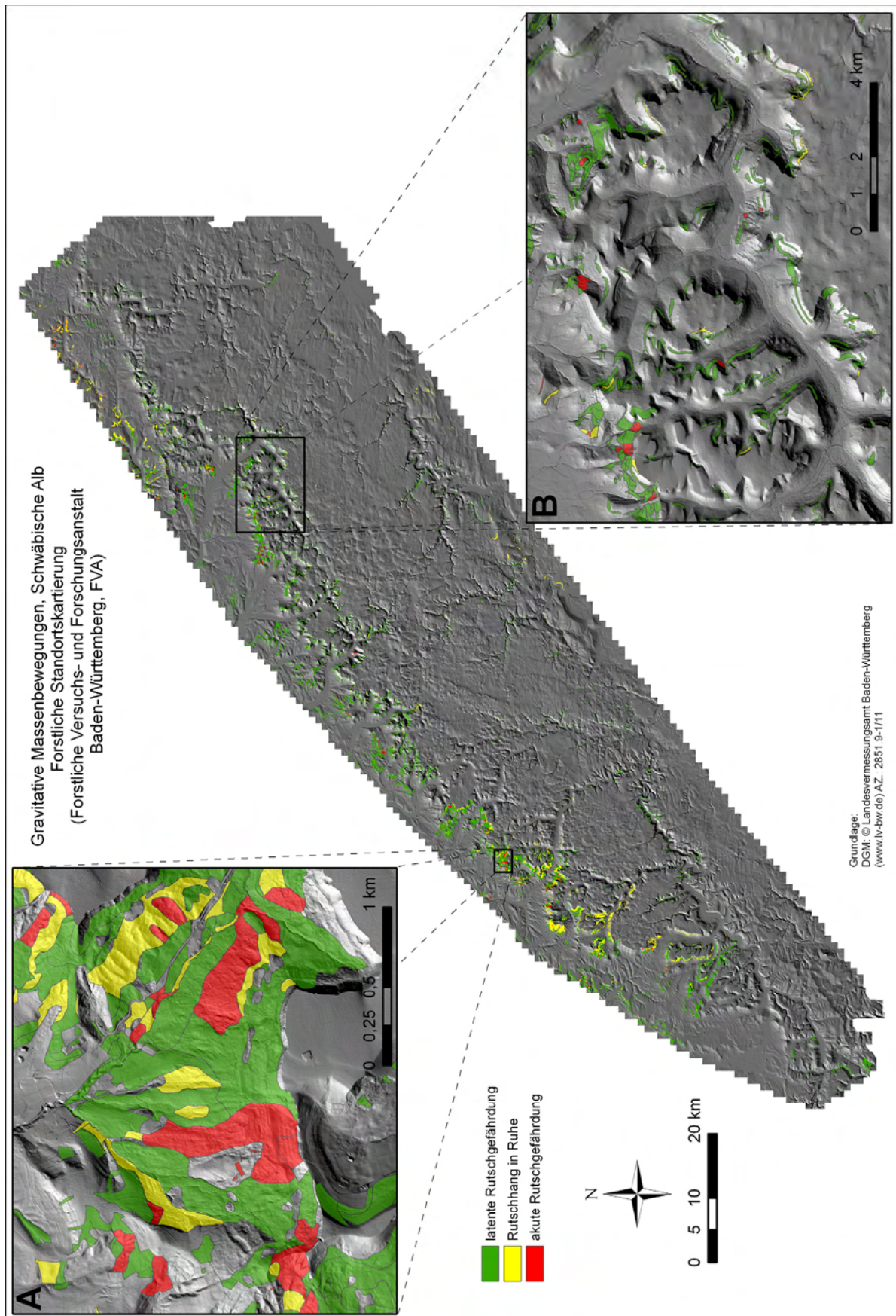


Abb. 7.4: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Hangrutschungsinformationen aus der Forstlichen Standortskartierung (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Stand 2006) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Irrenberg (A) und Oberes Filstal (B))



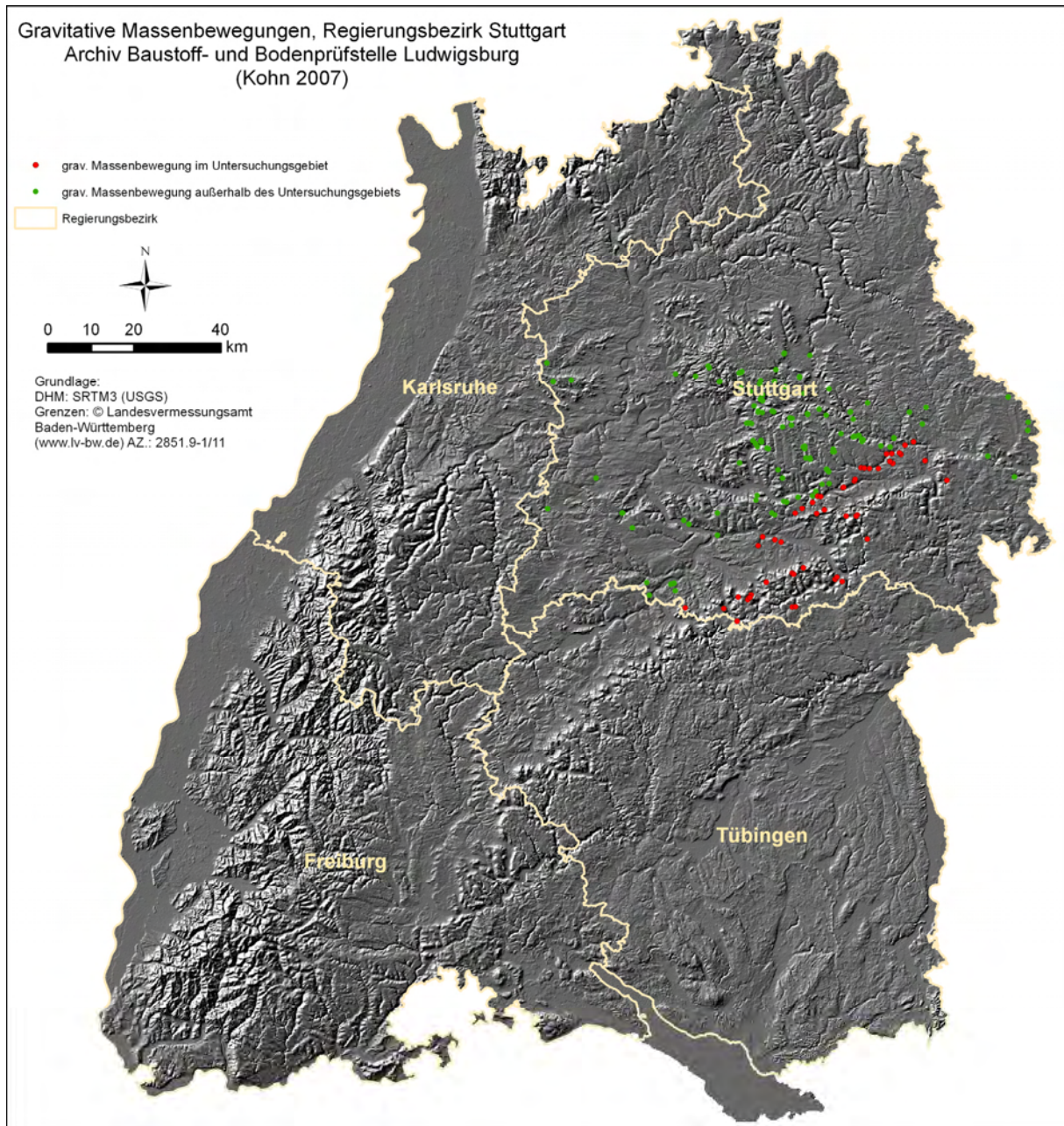


Abb. 7.5: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis des Archivs der Baustoff- und Bodenprüfstelle Ludwigsburg (Kohn 2007)

*Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Geomorphologischen Kartierung 1:100.000 (Dongus 1977)*

Insgesamt hat Dongus (1977) im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb 261 Flächen dem Prozessbereich der gravitativen Massenbewegungen zugewiesen. Der Fokus liegt durchaus auf größeren Ereignissen, die oft zusammenhängend als Prozessbereich ausgewiesen werden und nicht als einzelne Ereignisse dargestellt sind. In Abb. 7.6 ist zu erkennen, dass sich die Rutschgebiete vor allem entlang des Albtraufs befinden und sich nur wenig in die Flusstäler hineinziehen, die sich in die Schwäbische Alb einschneiden. Im Bereich der Donau sowie ihrer Tributäre finden sich so gut wie

keine gravitativen Prozessbereiche. In der Übersichtsdarstellung wird deutlich, dass das Vorkommen von gravitativen Prozessbereichen nach Nordosten im Bereich der östlichen Mittleren Alb sowie der Ostalb stark abnimmt. In den Ausschnitten A und B ist zu erkennen, dass die gravitativen Prozessbereiche deutlich unterhalb des Albtraufs einsetzen. Im oberen Bereich sind meist denudative Prozessbereiche ausgewiesen (Dongus 1977), die aber in vielen Fällen noch zum gravitativen Prozessbereich zählen. Im Ausschnitt A ist deutlich zu erkennen, dass die Rutschungsareale der beiden lokalen Untersuchungsgebiete Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen als gravitative Prozessbereiche ausgewiesen sind. Im Ausschnitt B fällt demgegenüber auf, dass relativ wenig gravitative Prozessbereiche kartiert worden sind. Die Tatsache, dass keine einzelnen Rutschkörper von Dongus (1977) kartiert worden sind, verhindert, dass Frequenz-Magnituden-Analysen durchgeführt werden können. Trotz der erwähnten Defizite eignet sich das Inventar sehr gut für die Gefährdungsmodellierung.

*Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Obere Filstal auf Basis von DGM-Analysen und Luftbildinterpretationen (Brennecke 2006)*

Dieses Inventar ist für die Zielsetzung dieser Arbeit der qualitativ hochwertigste Datensatz. Er umfasst insgesamt 525 gravitative Massenbewegungen, die sowohl relativ nach Alter als auch nach Typ klassifiziert worden sind. Dabei hat Brennecke (2006) 237 Fließungen, 203 Rotationsrutschungen, 64 Translationsrutschungen und 21 komplexe Massenbewegungen kartieren können (Abb. 7.7). Die meisten Ereignisse sind direkt auf Basis des DGM1 kartiert worden, so dass die Lagegenauigkeit sehr hoch ist. Das Untersuchungsgebiet von Brennecke (2006) ist etwas kleiner als das in der Abbildung dargestellte und umfasst 80 km<sup>2</sup>. Für dieses Gebiet wurden die in den verwendeten Datensätzen sichtbaren gravitativen Massenbewegungen vollständig erhoben, so dass für dieses Inventar sowohl Frequenz-Magnitude-Analysen, als auch Gefährdungsmodellierungen durchführbar sind.

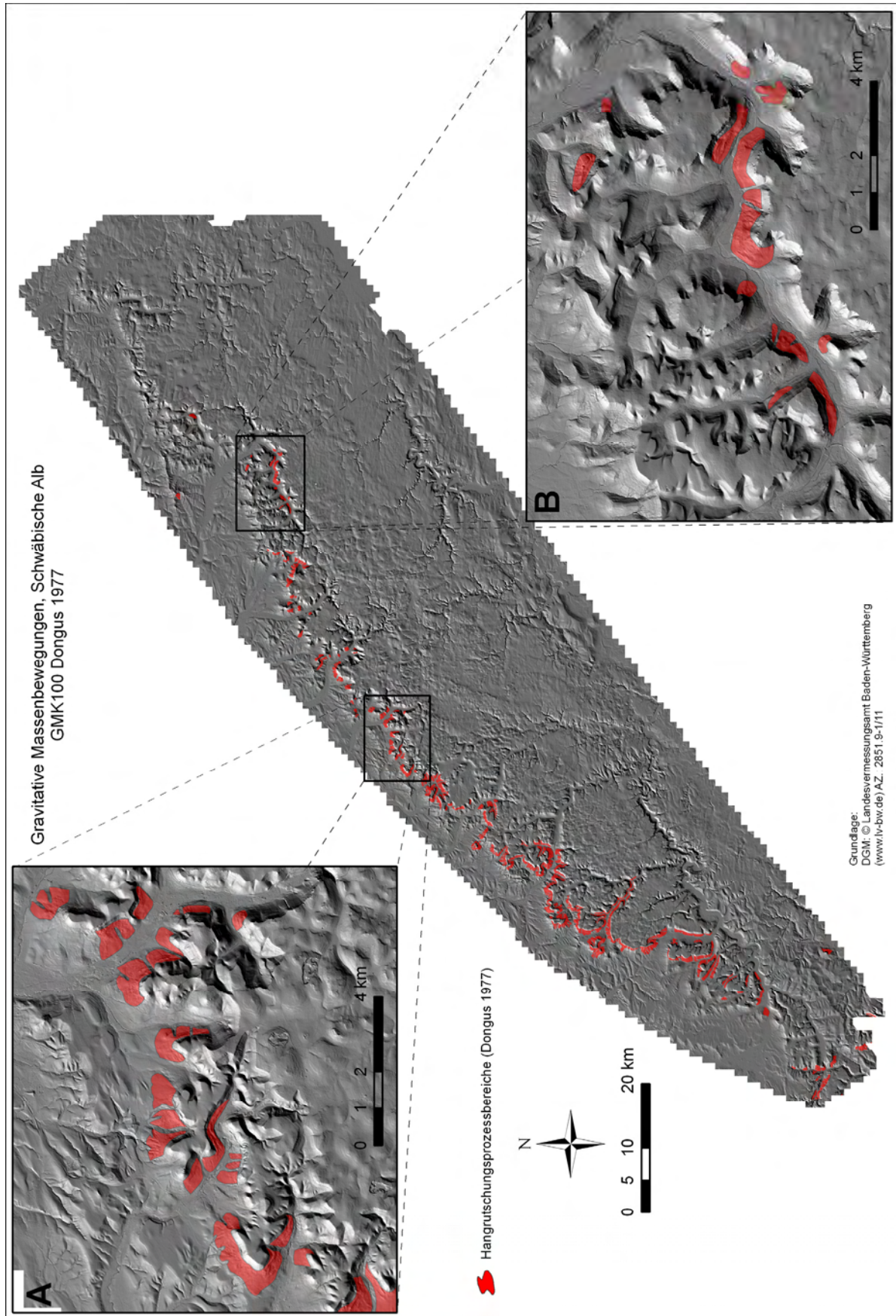


Abb. 7.6: Inventar gravitativer Massenbewegungen auf Basis der Geomorphologischen Kartierung 1:100.000 (Dongus 1977) (Verbreitung in der Schwäbischen Alb sowie Detailausschnitte vom Raum Mössingen bis Lichtenstein (A) und Oberes Filstal (B))

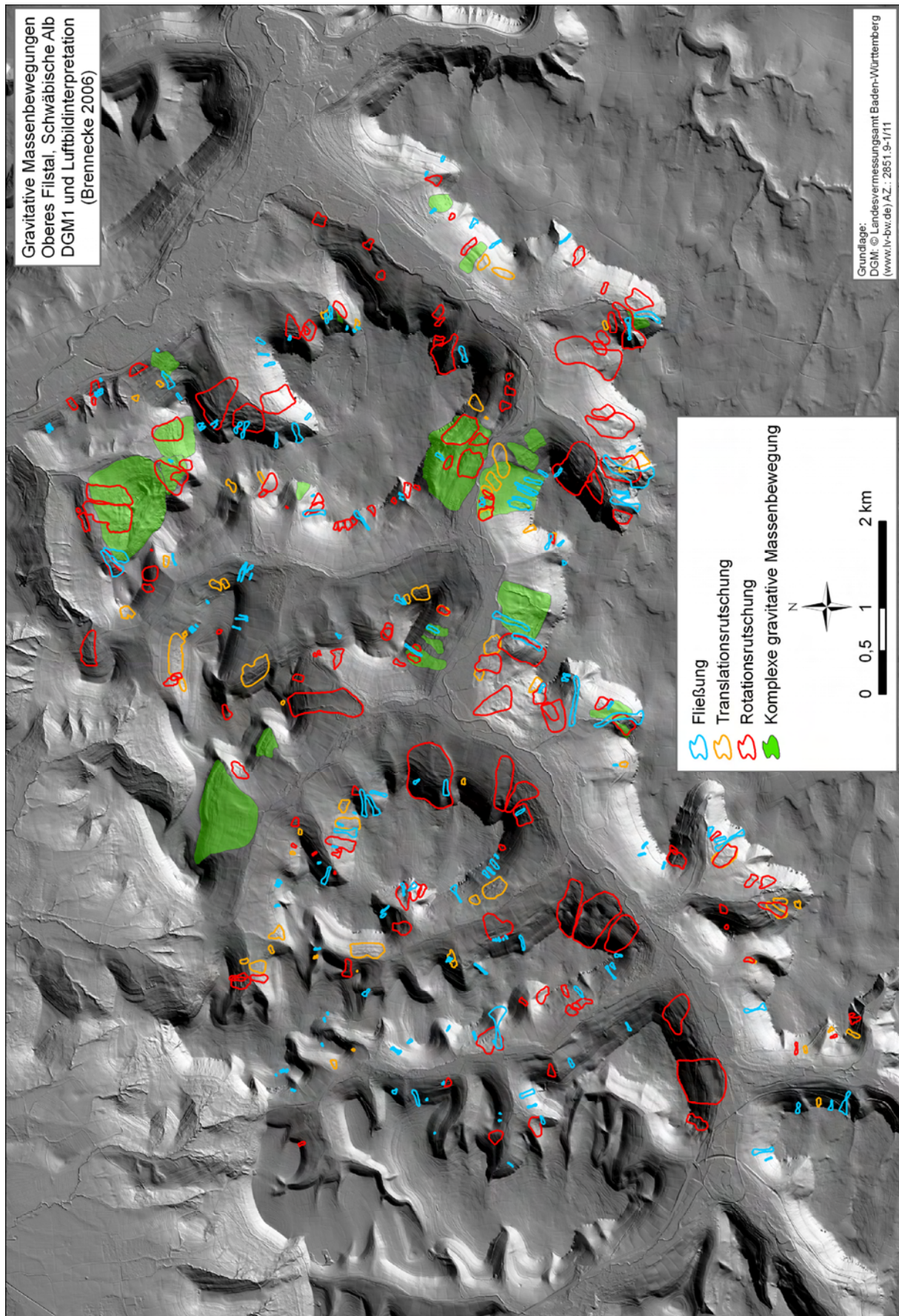


Abb. 7.7: Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Obere Filstal auf Basis von DGM-Analysen und Luftbildinterpretationen für das Obere Filstal (Brennecke 2006)

*Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Umfeld des Filstales auf Basis der digitalen GK25(Stand 2001 bis 2004)*

In den neueren Ausgaben der geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 (GK25) werden explizit auch gravitative Massenbewegungen ausgewiesen. In Abb. 7.8 sind die Ereignisse aus fünf Kartenblättern zusammenfassend dargestellt. Insgesamt wurden 86 gravitative Massenbewegungen kartiert. Es scheint durchaus Unterschiede zwischen den einzelnen Bearbeitern dahingehend zu geben, welche Ereignisse aufzunehmen sind und welche nicht. Im Bereich des Untersuchungsgebietes Oberes Filstal sind beispielsweise verhältnismäßig viele große Ereignisse kartiert worden. Insgesamt führt die relativ geringe Anzahl an kartierten gravitativen Massenbewegungen dazu, dass sich das Inventar nicht für Frequenz-Magnitude-Analysen eignet. Für die Gefährdungsmodellierung ist der Datensatz trotz lückenhafter Kartierung einsetzbar.

*Diskussion*

Die Recherche nach verfügbaren Informationen zu gravitativen Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet war sehr erfolgreich und hat zahlreiche und sehr verschiedene Inventare zu Tage gebracht. Je nach Fokus der Datenerhebung weichen die Informationen für ein und dasselbe Gebiet jedoch erheblich voneinander ab, wie Abb. 7.9 sehr deutlich zeigt.

Es existieren sicherlich noch viel mehr Informationen zu gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb. Neben der vollständigen Erfassung des Archivs der Baustoff- und Bodenprüfstelle in Ludwigsburg, die zum Regierungsbezirk Stuttgart gehört, wären insbesondere die Pendanten der Regierungsbezirke Tübingen und Freiburg zu nennen, die ähnliche Informationen in ihren Archiven lagern. Als sehr wichtige Informationsquelle ist das Archiv des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg anzusehen, das im Rahmen dieser Arbeit leider nicht ausgewertet werden konnte. Eine weitere Übersicht über gravitative Massenbewegungen am Albtrauf der Schwäbischen Alb wurde von Reiff (1968) in Kartenform bereit gestellt. Leider war die Karte nicht in ausreichender Qualität verfügbar, so dass dieser Datensatz nicht digitalisiert werden konnte.

Für die weitergehenden Analysen reichen aber die gesammelten Informationen bereits aus. Da das Inventar von Brennecke (2006) das einzige ist, bei dem für ein Teilgebiet flächendeckend einzelne gravitative Massenbewegungskörper kartiert wurden, wird dieses genutzt, um mittels Frequenz-Magnitude-Analysen Wiederkehrintervalle und -wahrscheinlichkeiten für den Raum zu berechnen. Ebenso bietet sich derselbe Datensatz für die Gefährdungsmodellierung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal an. Das Inventar von Brennecke (2006) ist wesentlich umfassender als das GK25-Inventar und erhält dadurch für die Gefährdungsmodellierung den Vorzug vor diesem. Für das gesamte Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb bieten sich vor allem die Inventare auf Basis der GMK100 (Dongus 1977) und der Forstlichen Standortskartierung an, da sie die einzigen sind, die flächenhafte Informationen zu gravitativen Massenbewegungen über große Bereiche des Untersuchungsgebietes bereitstellen.

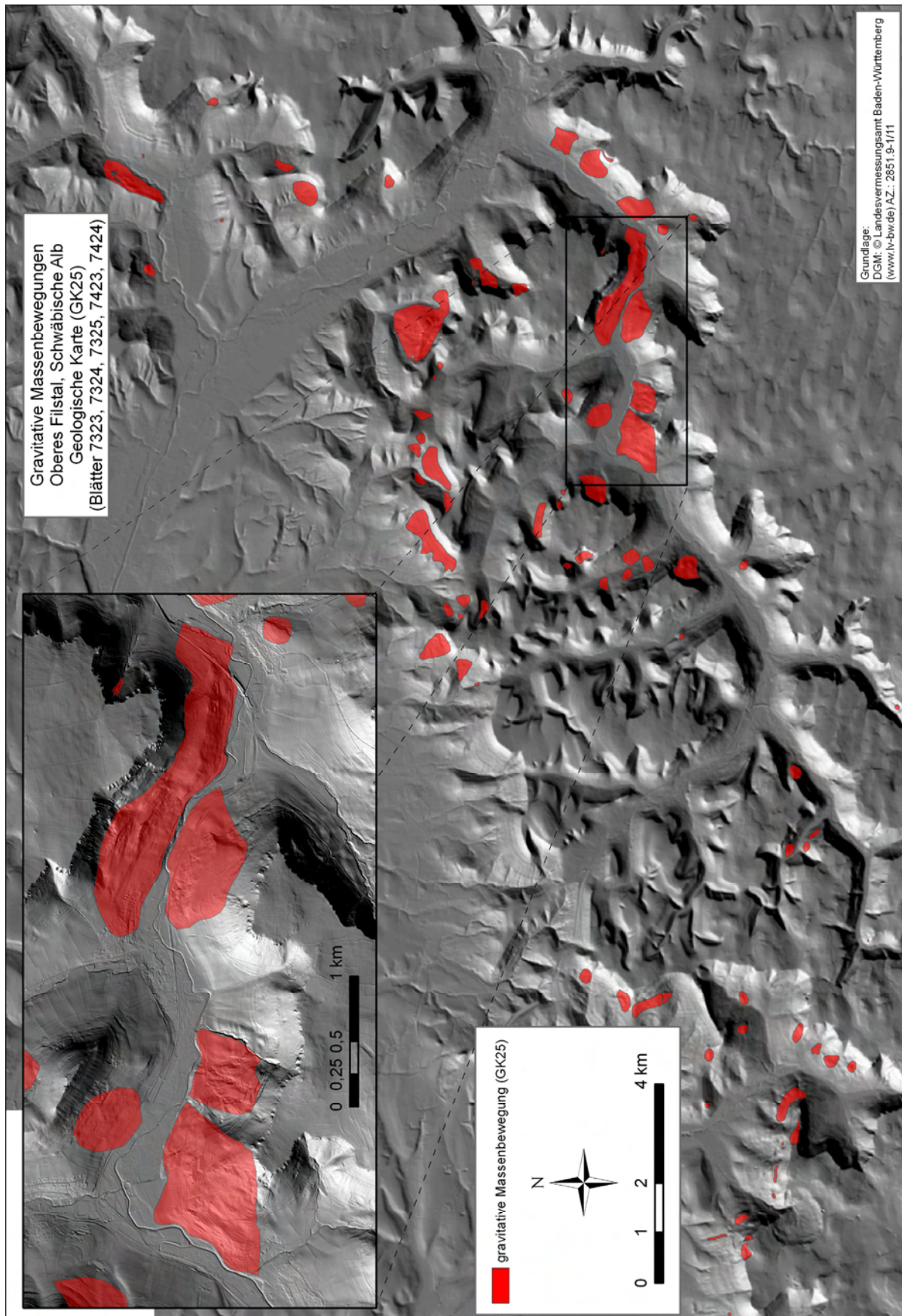


Abb. 7.8: Inventar gravitativer Massenbewegungen für das Umfeld des Filstales auf Basis der digitalen GK25 (Stand 2001 bis 2004) (Der vergrößerte Ausschnitt zeigt unter anderem die Rutschung im Greut von 1805 sowie die Hausener Wand)

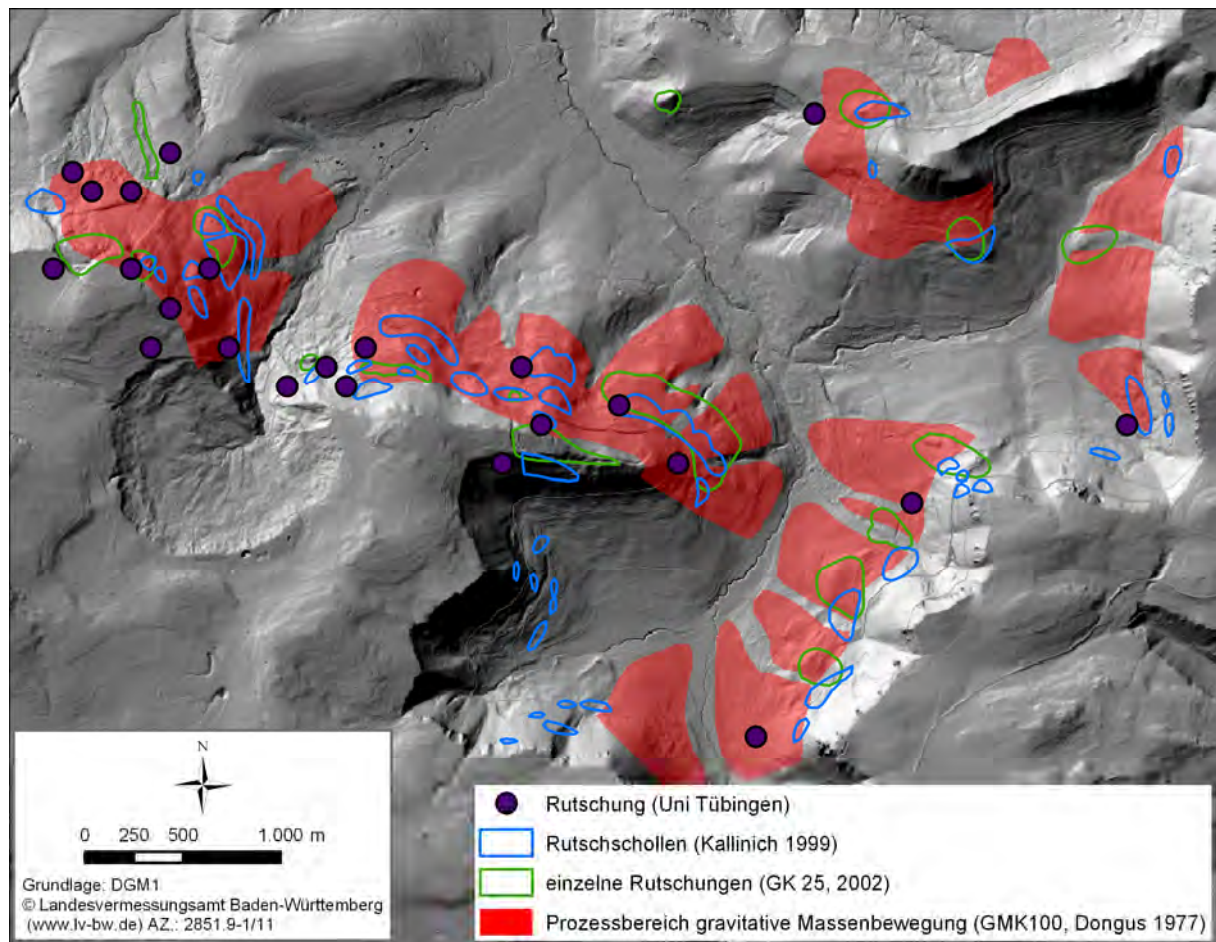


Abb. 7.9: Unterschiede zwischen verschiedenen Inventaren gravitativer Massenbewegungen

## 7.1.2 Altersbestimmung

### 7.1.2.1 Auswertung historischer Daten

Bei den Recherchen von *InterRISK History* wurden historische Forstkarten aus dem damaligen Revier Wiesensteig (Forstamt Geislingen) und der Bissinger Huth (Kirchheimer Oberforst) gefunden, die von Aichelen gezeichnet wurden. Die Karten entstanden von 1816 bis 1819. In den Karten sind insgesamt 26 gravitative Massenbewegungen erfasst, die als Erdschiffe bezeichnet werden. Auf Grund der hohen Qualität der Karten war ein Auffinden der kartierten Regionen im DGM1 relativ einfach. Bei der Lokalisierung der sehr kleinen Ereignisse (22 sind kleiner als 2.000 m<sup>2</sup>) traten dadurch Probleme auf, da diese über die letzten knapp 200 Jahre mit großer Wahrscheinlichkeit bereits erodiert worden sind und somit nicht mehr im DGM1 auffindbar waren. Dennoch erlaubte die Qualität der Karten eine recht genaue Verortung auf Basis anderer Bezugsparameter (Lage im Relief, Nähe zu Felstürmen oder zum Gerinne, usw.) (siehe 7.10 A). Die zwei größten Ereignisse (38.000 m<sup>2</sup> bzw. 48.000 m<sup>2</sup>) sind noch deutlich im DGM1 sichtbar (Ausschnitt B bzw. C). Die im DGM1 kartierten gravitativen Massenbewegungen, die zu den von Aichelen kartierten Bereichen gehören, sind um einiges größer (122.000 m<sup>2</sup> bzw. 258.000 m<sup>2</sup>). Es scheint durchaus plausibel, dass die in Ausschnitt B dargestellte Aichelen-Kartierung mit der tatsächlich im DGM kartierten Rutschung übereinstimmt.

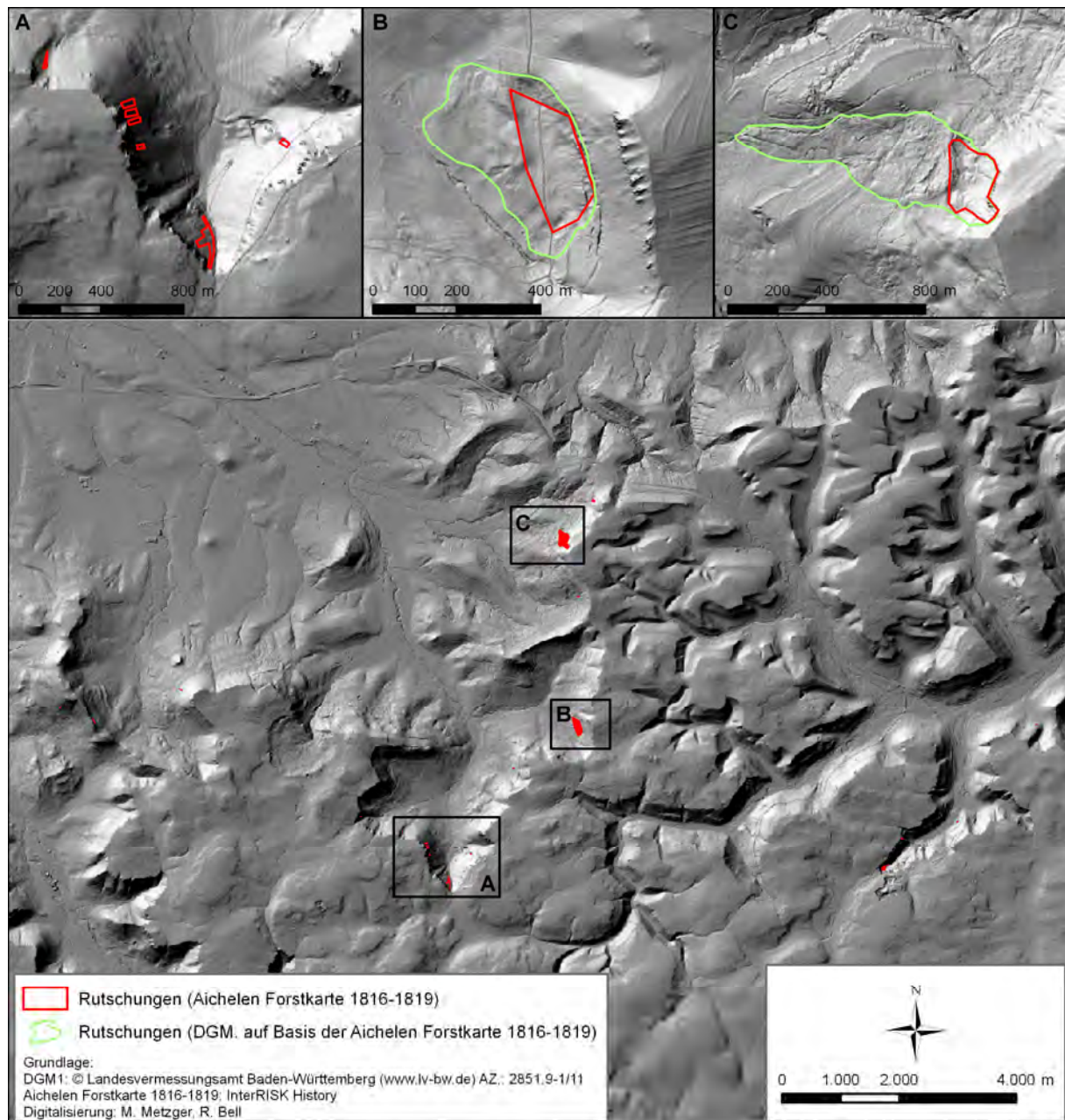


Abb. 7.10: Gravitative Massenbewegungen aus den Aichelen Forstkarten 1816-1819 (A = Detailansicht kleinerer Rutschungen, B = Große Rutschung bei Neidlingen, C Große Rutschung bei Weilheim an der Teck)

Der Grund für diese Annahme ist, dass sich die Kartierungen in der Forstkarte auf den Waldbestand beschränken (ähnlich der heutigen Forstlichen Standortskarte, siehe Abb. 7.4) und dieser am unteren Ende der von Aichelen kartierten Rutschung endet. Zudem ist es auch denkbar, dass nur die Bereiche als Rutschung ausgewiesen wurden, in denen der Wald komplett vernichtet wurde. Die Form der Originalkartierung weist eher ein untypisches Breite-Längen-Verhältnis auf, so dass die Richtigkeit der Annahmen auch dadurch unterstützt wird. Bei der größeren Rutschung (Ausschnitt C) sind durchaus größere Zweifel berechtigt, ob die im DGM kartierte Rutschung auch jene ist, die Aichelen kartierte. Erschwert wird die Interpretation dadurch, dass die Rutschung am seitlichen Rand des kartierten Waldes liegt und unter Umständen auf Grund dessen nicht mehr ganz genau gezeichnet



wurde. Insgesamt ist fraglich, ob, angenommen das Ereignis wäre so groß gewesen, die Größe des Ereignisses Aichelen nicht dazu bewegt hätte, ausnahmsweise die Rutschung in ihrem gesamten Umfang mit aufzunehmen. Es ist durchaus auch denkbar, dass eine größere Rutschung auf die von Aichelen kartierte folgte und nun einen falschen Eindruck erweckt. Auf Grund der großen Unsicherheiten bei dieser großen Rutschung wird nur die Rutschung im DGM1 im Ausschnitt B als jene angenommen, die von Aichelen kartiert wurde. Zur zeitlichen Einordnung lässt sich festhalten, dass die Rutschungen zeitnah zur Forstkartierung aufgetreten sein müssen, da andere alte und im DGM1 deutlich sichtbare Rutschungen nicht in der Forstkarte auftauchen. Da insbesondere die sehr kleinen Rutschungen relativ schnell wieder erodiert werden, sollten die Rutschungen zum Zeitpunkt der Kartierung nicht zu alt gewesen sein, so dass von einem Zeitraum von 1810 bis 1819 für die Auslösung der Ereignisse ausgegangen wird.

Es wurden noch zahlreiche andere historische Karten von *InterRISK History* bereitgestellt, die teilweise auch Signaturen für gravitative Massenbewegungen beinhalten, doch handelt es sich meist um einzelne Ereignisse, die weder räumlich noch zeitlich eindeutig einzuordnen sind, da die Qualität der Karten dazu nicht ausreicht. Daher fanden diese Karten keine weitere Berücksichtigung in dieser Arbeit.

Neben den historischen Karten wurden eine Reihe von schriftlichen historischen Informationen im Rahmen des *InterRISK* Projekts erhoben, die im Folgenden ausgewertet werden:

Die umfassendsten Informationen wurden von Matthias Röhrs (*InterRISK History*) zusammengetragen und, soweit diese schon aufbereitet sind, als Exzerpte der Originalquellen zur Verfügung gestellt. Derzeit liegen die Exzerpte für 40 datierte gravitative Massenbewegungen vor, wobei die älteste Primärquelle zwei Rutschungen von 1416 beschreibt. Es konnten zahlreiche, bisher unbekannte Beschreibungen gravitativer Massenbewegungen gefunden werden, für die leider nur in wenigen Fällen detaillierte Angaben über die betroffene Fläche gemacht werden. Sofern Flächenangaben gemacht werden, sind diese oft in alten Flächenmaßen (z.B. Jauchert oder Morgen) angegeben. Diese wurden mit den von Matthias Röhrs bereitgestellten Umrechnungswerten in ein metrisches Maß überführt. Zwei bisher unbekannte Großereignisse umfassen den Bergrutsch am Hangenden Stein zwischen Onstmettingen und Boll von 1879 mit einer Größe von über 315.000 m<sup>2</sup>, und eine Großrutschung am Farrenberg bei Mössingen, die vor 1788 stattgefunden haben muss, da sie zu diesem Zeitpunkt aus noch vom Schwarzwald aus zu sehen war. Da auch der Mössinger Bergrutsch vom Schwarzwald aus sichtbar ist, liegt die Vermutung nahe, dass es sich um ein ähnlich großes Ereignis gehandelt haben muss. Damit das Ereignis über so große Distanz sichtbar sein konnte, muss die Rutschung sämtliche Vegetation vernichtet haben, so dass die hellen, wohlgeschichteten Kalksteine zum Vorschein kommen konnten. Da nach dem Ereignis sukzessiv die natürliche Wiederbesiedlung des Rutschareals durch die Pflanzen stattfand, die letztendlich wohl in einem typischen Laubwald endete, kann über die Regenerationszeit des Waldes ein Maximalalter der

Rutschung abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung von evtl. ungünstigen Bedingungen, kann für einen Eichen- oder Buchenwald eine Dauer von ca. 100 Jahren für die Wiederbesiedlung angenommen werden (Neuwirth 2007, Persönliche Mitteilung). Unter der Annahme, dass nach dieser Zeitspanne der Wald wieder so hoch und dicht wäre, dass die Rutschung nicht mehr zu sehen sein sollte, wird das maximale Eintrittsjahr der Rutschung auf ca. 1690 abgeschätzt. Eine zusammenfassende Darstellung aller datierten Ereignisse mit Informationen zum Eintrittsdatum, zum Ausmaß, zur Ursache und zum hervorgerufenen Schaden befindet sich auf der CD-ROM im Anhang (GM\_IR\_History.xls). Über diese Zusammenstellung hinaus wurden noch zahlreiche weitere Ereignisse gefunden, die sich derzeit noch in der Aufbereitung befinden. Dazu zählen unter anderem über 60 gravitative Massenbewegungen, die während des Hochwassers von 1824 vom östlichen Schwarzwald, entlang des Albraufs und des Alvorlands bis zum Keuper Bergland im Nordosten aufgetreten sind (Röhrs 2007, Persönliche Mitteilung).

In den im Rahmen von *InterRISK* Perception ausgewerteten Forsteinrichtungswerken konnten insgesamt 45 datierte gravitative Massenbewegungen nachgewiesen werden. Die Güte der Datierung schwankt sehr. Einige Ereignisse können nur einer bestimmten Dekade zugewiesen werden, andere sind bis auf den Tag genau datiert. Die besten Informationen entstammen einer speziell angefertigten Liste mit 15 Rutschungseignissen, die zur Zeit des Mössinger Bergrutschs im April 1983 im Forstamt Reutlingen aufgetreten sind. Die vollständige Liste befindet sich auf der CD-ROM im Anhang (GM\_IR\_Perception.xls).

Die Auswertung des Archivs der Baustoff- und Boden-Prüfstelle Ludwigsburg ergab insgesamt 207 gravitative Massenbewegungen (Kohn 2007), von denen 53 Ereignisse im Zeitraum von 1974 bis 2005 an Straßen im Untersuchungsgebiet aufgetreten sind. Ein außergewöhnliches Ereignis fand im Frühjahr 1988 statt, bei dem vom 14.03. - 07.04. insgesamt 29 gravitative Massenbewegungen aufgetreten sind, von denen vier im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb liegen. Eine ausführliche Liste zu den Ereignissen im Untersuchungsgebiet findet sich auf der CD-ROM im Anhang (GM\_Kohn.xls).

In der Hangrutschungsdatenbank der Universität Tübingen liegen insgesamt 34 datierte Ereignisse vor, die überwiegend aus dem 20. Jahrhundert stammen (auf der CD-ROM im Anhang: GM\_Tübingen.xls). Es finden sich nur drei gravitative Massenbewegungen aus dem 19. Jahrhundert.

Des Weiteren konnte in Erfahrung gebracht werden, dass im Mai 1994 zehn kleinere Rutschungen im Filstal ausgelöst worden sind (Saum 2006, Persönliche Mitteilung), sowie 1983 zum Zeitpunkt des Mössinger Bergrutsches in Mössingen-Öschingen eine 0,5 ha große Rutschung im Wald aufgetreten ist (Dilger 2006, Persönliche Mitteilung).

Die Zusammenführung aller Informationen zu historischen gravitativen Massenbewegungen ergibt für das Untersuchungsgebiet 207 Ereignisse. Diese sind in Abb. 7.11 in ihrem zeitlichen Verlauf für 20-jährige Intervalle dargestellt. Sehr deutlich ist eine Häufung der Ereignisse am Ende des 18. sowie in

der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu erkennen. Der Verlauf der Anzahl der Ereignisse spiegelt in erster Linie den unvollständigen Charakter der Daten wieder und kann daher auch nicht hinsichtlich einer Veränderung insbesondere klimatischer Auslösefaktoren, interpretiert werden. Die Abbildung vermittelt aber einen ersten Eindruck über historische Aktivitäten gravitativer Massenbewegungen. Für die Darstellung der Anzahl der Ereignisse pro Jahr reduziert sich die Anzahl auf 177, da die nicht sämtliche Ergebnisse einzelnen Jahren zugewiesen werden konnten (Abb. 7.12). Auch diese Abbildung unterliegt derselben Unvollständigkeit, was z.B. durch das Fehlen der noch auszuwertenden Ereignisse von 1824 deutlich wird. Anders als bei der Darstellung in 20-jährigen Intervallen, kann aber die jährliche Verteilung ansatzweise mit klimatischen Auslösefaktoren in Verbindung gebracht werden. So gab es 1983 ein sehr feuchtes Frühjahr, welches zu der Auslösung zahlreicher Rutschungen führte. Insbesondere die Funde in den Reutlinger Forstakten scheinen außerdem darauf hinzudeuten, dass es im Umfeld von Großereignissen zu einer großen Anzahl von kleineren Ereignissen kommt. Es wird vermutet, dass insbesondere in den Forstakten anderer Forstbezirke, sowie in den Archiven der Baustoff- und Bodenprüfstellen der anderen Regierungsbezirke noch zahlreiche weitere Hinweise zu Rutschungen im Frühjahr 1983 zu finden sind. Bei den Großereignissen von 1789 und 1851 scheint es auch erste Hinweise zu geben, dass im Umfeld noch viele weitere Rutschungen aufgetreten sind, jedoch dürften diese schwieriger zu finden sein als die nicht so weit zurück liegenden. In den Jahren 1988 und 1994 scheinen extreme Witterungsbedingungen zur Auslösung zahlreicher kleinerer Rutschungen geführt zu haben, ohne dass größere Ereignisse aufgetreten sind. Diese Beispiele bestätigen den in der Literatur beschriebenen Effekt der häufigen Clusterbildung von gravitativen Massenbewegungen.

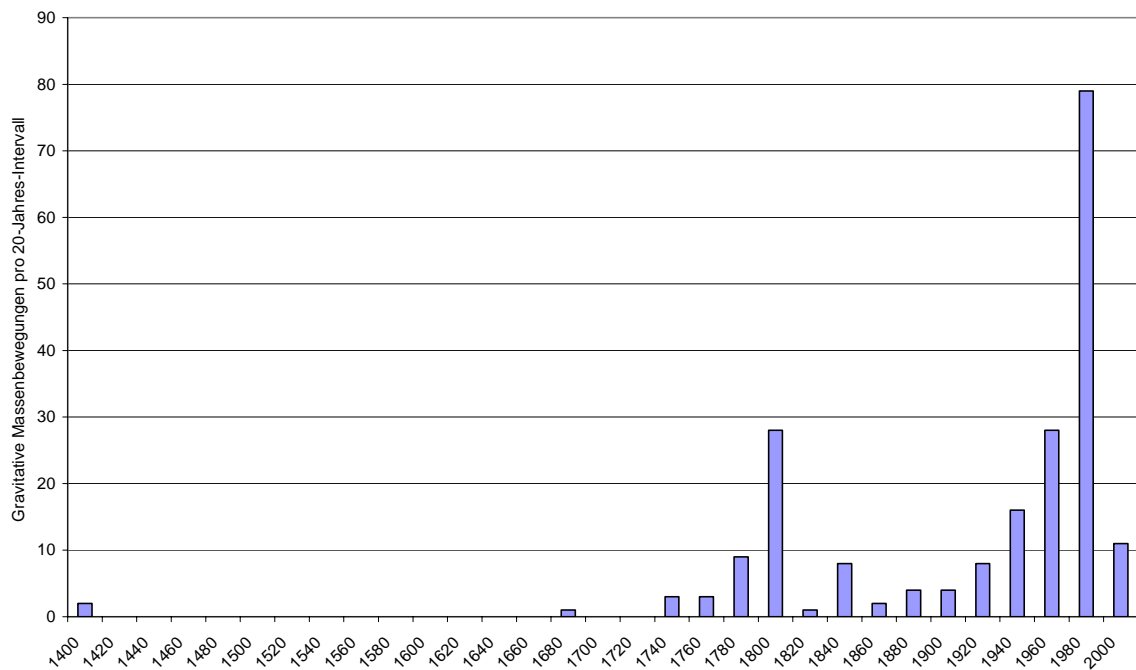


Abb. 7.11: Anzahl an gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet pro 20-jähriges Intervall von 1416 – 2005 (Die Abbildung täuscht eine höhere Aktivität um 1800 und ab 1950 vor, die im Wesentlichen auf Lücken in der Dokumentation älterer Ereignisse bzw. in der Datenerhebung zurück zu führen ist.)

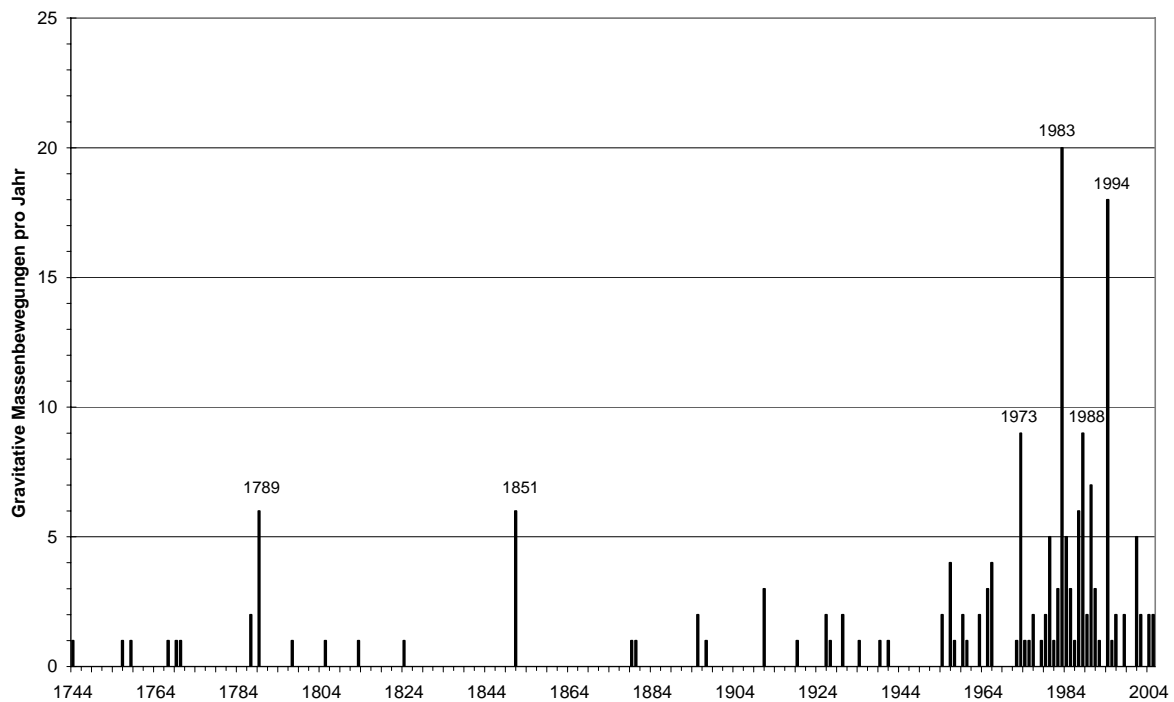


Abb. 7.12: Anzahl an gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet pro Jahr von 1744 bis 2005 (Die Abbildung täuscht eine höhere Aktivität vor allem ab 1950 vor, die im Wesentlichen auf Lücken in der Dokumentation älterer Ereignisse bzw. in der Datenerhebung zurück zu führen ist.)

### **7.1.2.2 Relative Datierung mittels DGM-Analysen**

Das hochaufgelöste DGM1 ermöglicht auf der Basis von Schummerungsdarstellungen erste Analysen, welche Folgen gravitative Massenbewegungen auf die sichtbaren morphologischen Strukturen haben. Unter der Annahme, dass ähnliche Strukturen ein ähnliches Alter aufweisen, werden diese Erkenntnisse dann genutzt, um eine erste Aussage zum Alter der weitverbreiteten gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb zu machen und damit zur Diskussion um das Alter des Albtraufs beizutragen.

Der Mössinger Bergrutsch von 1983 ist das jüngste Großereignis. In Abbildung 7.13 ist eine Schummerungsdarstellung des Gebietes um den Mössinger Bergrutsch mit dem vorgelagerten Farrenberg dargestellt. Generell ist zu erkennen, dass das Gebiet um den Mössinger Bergrutsch sehr bewegt aussieht. Ohne nähere Informationen und Unterstützung von Luftbildern ist die genaue Abgrenzung des Mössinger Bergrutsches allein auf Basis der morphologischen Strukturen extrem schwierig. Erst die Zuhilfenahme der mittels Luftbilder und Geländebegehungen von Fundinger (1985) kurz nach dem Ereignis kartierten Grenzen ermöglicht die genaue Kartierung des Mössinger Bergrutsches.

Im vorherigen Kapitel wurde die Rutschung am Farrenberg beschrieben, die vom Schwarzwald aus sichtbar war und für die das Eintrittsjahr auf ca. 1690 abgeschätzt wurde. Um vom Schwarzwald aus sichtbar zu sein, muss die Rutschung am Nordhang des Farrenberges stattgefunden haben. Im DGM1 lässt sich eine große Rutschung am Nordhang finden (Abb. 7.13). Innerhalb der großen Rutschmasse liegt eine kleinere, die nicht ganz so alt ist, aber auf jeden Fall älter als 1945, wie eine Luftbilddauswertung ergab (Galli 2007, Persönliche Mitteilung). Da die Rutschung von vor 1945 keine Kalksteinschichten freigelegt hat, scheidet sie als das alte Großereignis aus. Vielmehr besteht eine große Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei der eingezeichneten Großrutschung um das Ereignis von ca. 1690 handelt. Somit geben die Bereiche außerhalb der Rutschung von 1945 erste Hinweise darauf, wie eine so alte Rutschung heutzutage im Relief erhalten sein kann. Es ist sichtbar, dass die Strukturen in der Zwischenzeit schon deutlich überprägt worden sind. Insbesondere der Auslaufbereich der alten Rutschung ist nur noch sehr schwach zu erkennen. Hier mag sich auch eine starke anthropogene Überformung bemerkbar machen.

Als weiteres Beispiel wird das Rutschgebiet am mehrmals erwähnten Irrenberg angeführt. In Abb. 7.14 ist zu erkennen, dass nur in wenigen Hangbereichen keine deutlichen und frischen Rutschungsanzeichen zu erkennen sind. Ähnlich wie beim Mössinger Bergrutsch fällt es auch hier sehr schwer, das Ereignis, welches nach Fundinger (1985) bereits 1972 einsetzte, klar abzugrenzen. Erschwert wird die Abgrenzung vor allem dadurch, dass diese Rutschung sich von 1972 mit einer Fläche von ca. 20 ha, über 23,5 ha (1974) und 30 ha (1975) bis 1984 auf 31,4 ha vergrößerte (Fundinger 1985). Das heißt, es finden im Rutschareal immer wieder Reaktivierungen statt, welche sich in der Morphologie durch eine Erneuerung der frischen Rutschungsstrukturen bemerkbar machen. Somit werden die frischen Strukturen praktisch „konserviert“. Die in Abb. 7.14

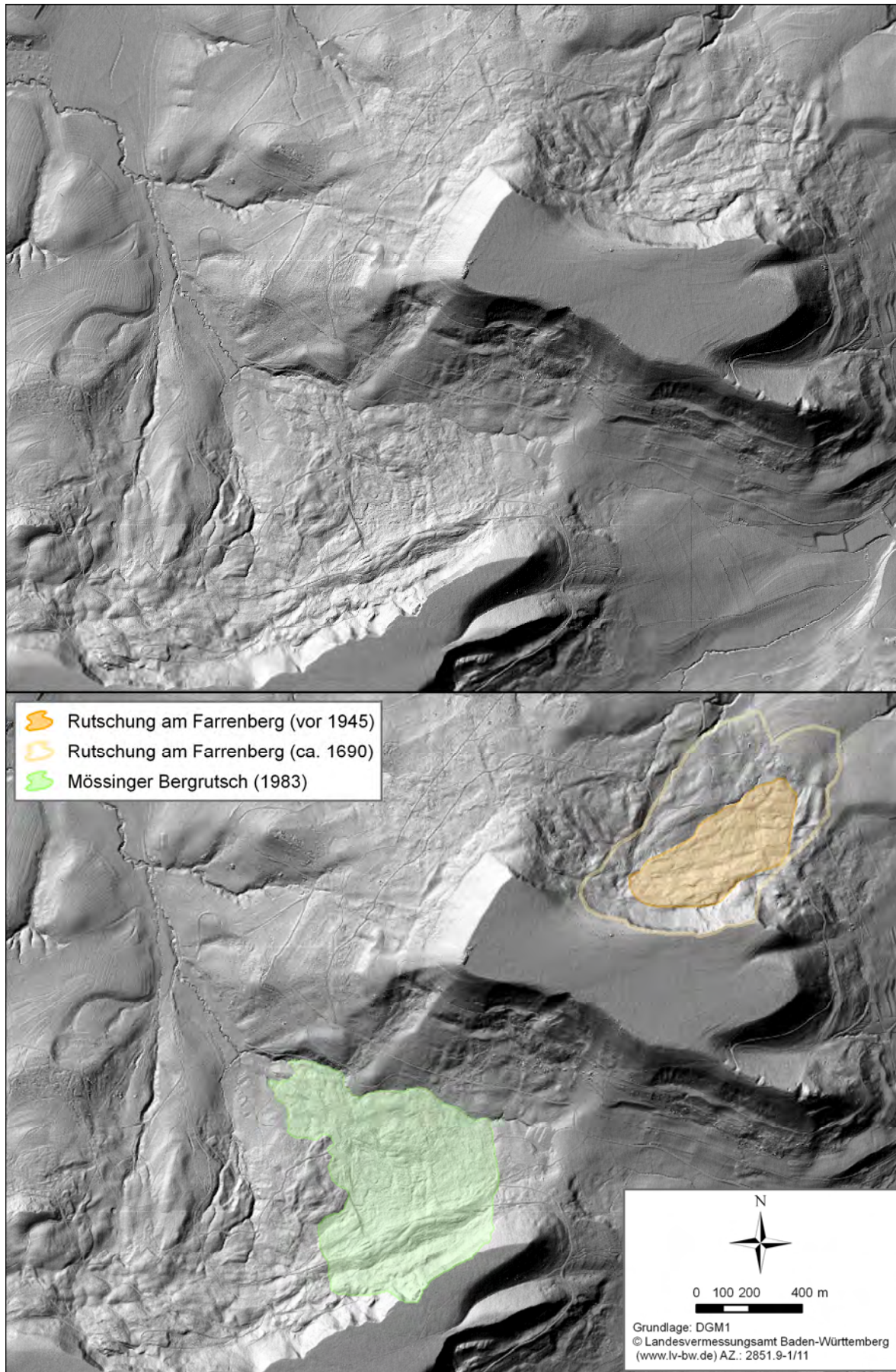


Abb. 7.13: Mössinger Bergrutsch 1983 und Rutschungen am Farrenberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen)

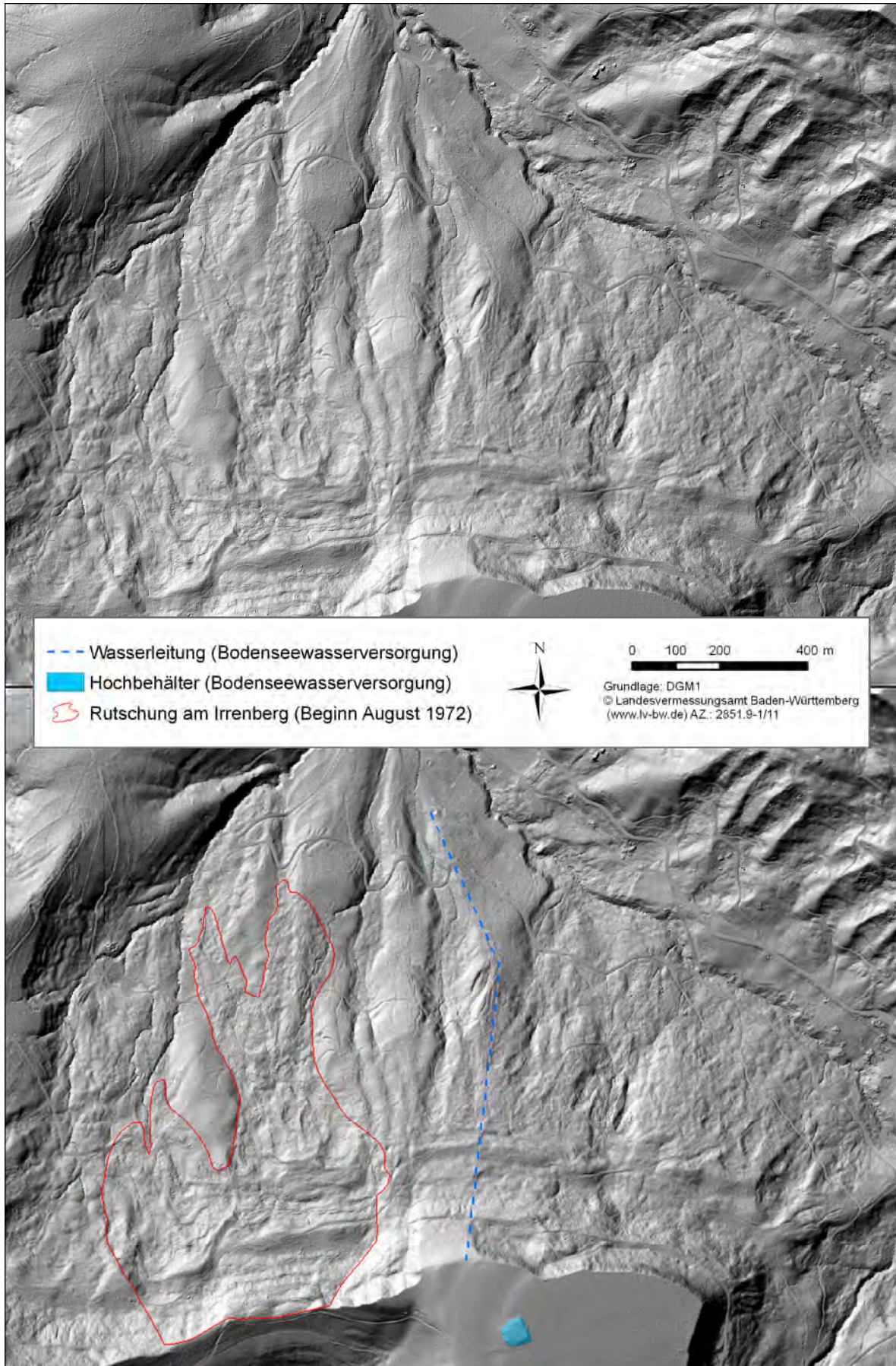


Abb. 7.14: Rutschungen am Irrenberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen sowie Wasserversorgungseinrichtungen)

dargestellte Abgrenzung der Rutschung umfasst eine Fläche von 36,5 ha. Trotz gewisser Unsicherheiten in der Abgrenzung scheint sich die Masse also weiterhin zu bewegen. Eine Geländebegehung vor der Verfügbarkeit des DGM1 bestätigt diese Annahme. Auch sei auf das durchaus große Risikopotenzial hingewiesen, welches von der Wasserleitung der Bodenseewasserversorgung ausgeht, die sich mitten durch den von zahlreichen Rutschungen betroffenen Hang zum Hochbehälter nach oben zieht.

Im Vergleich zu den bisherigen Beispielen scheint demgegenüber - trotz eines wesentlich höheren Alters - die Rutschung im Greut von 1805 viel einfacher abgrenzbar zu sein (Abb. 7.15). Die Strukturen sind zwar schon ein wenig überprägt und nicht mehr ganz so frisch, ist jedoch noch deutlich zu erkennen, wie sich die Rutschung bis ein kleines Stück über die Fils hinaus nach unten bewegte und diese damals aufgestaut haben muss. Wie bereits in Kap. 5.1.6 erwähnt, wurde der Damm damals von der Bevölkerung wieder aufgegraben. Unter Berücksichtigung des Alters von über 200 Jahren sind die Strukturen aber noch verhältnismäßig gut erhalten, was vor allem daran liegen sollte, dass seitdem das Areal weitestgehend einen Waldbestand aufweist. Östlich von der klar abgrenzbaren Rutschmasse sind ebenfalls noch wellige Strukturen erkennbar, die aber wesentlich stärker überprägt worden sind. Dieses ist insbesondere auf eine andere Landnutzung zurück zu führen, die heutzutage aus Grünlandwirtschaft, in früheren Tagen evtl. aber auch aus Ackerbau bestanden haben könnte. Östlich des Gerinnes setzt sich zudem eine Abrisskante weiter fort. Da diese aber andere Strukturen aufweist als die westlich des Gerinnes, mag es sich um eine ältere Abrisskante handeln, zu der auch die Rutschmassen beiderseits des Gerinnes gehören können. Westlich des Gerinnes, d.h. im unteren Bereich, mag aber auch die Möglichkeit bestehen, dass dieses zumindest teilweise in der Rutschung von 1805 involviert gewesen ist, aber anschließend stärker modifiziert wurde.

Im Bereich des Gräbelesberges finden sich sowohl historische Wallanlagen, die auf eine alte Besiedlung des Sporns hinweisen, als auch zahlreiche Rutschungsphänomene (Abb. 7.16). In der Geologischen Karte 1:25.000 (Blatt 7719 Balingen) wird die eingezeichnete Rutschscholle ins Pleistozän datiert. Eine detaillierte Analyse der Schummerungsdarstellung des DGM1 vom Gräbelesberg zeigt aber sehr deutlich, dass die hintere historische Wallanlage (Nr. 2) durch das Rutschereignis versetzt worden ist. Eine Geländebegehung durch Horst Meyenfeldt bestätigte diese erste Hypothese. Bisher existieren zu den Wallanlagen zwei verschiedene Daten: Zum einen wurden hallstattzeitliche Nachweise gefunden (d.h. jünger als 800 v. Chr.), zum anderen konnten Fundstücke in das 6. Jahrhundert datiert werden (Schmitt 2005). Da die Strukturen durch die Rutschung verändert worden sind, muss also die Rutschung jünger als 800 v. Chr. sein. Im Umfeld der großen Rutschschollen gibt es ausgeprägte rezente Rutschgebiete. Des Weiteren weisen lineare Strukturen im Bereich der großen Rutschscholle auf aktive Abrisskanten hin, so dass diese Rutschscholle auf Basis der DGM-Analysen nicht als stabil angesehen werden kann. Diese Aussage muss aber durch eine intensive Geländebegehung noch überprüft werden.



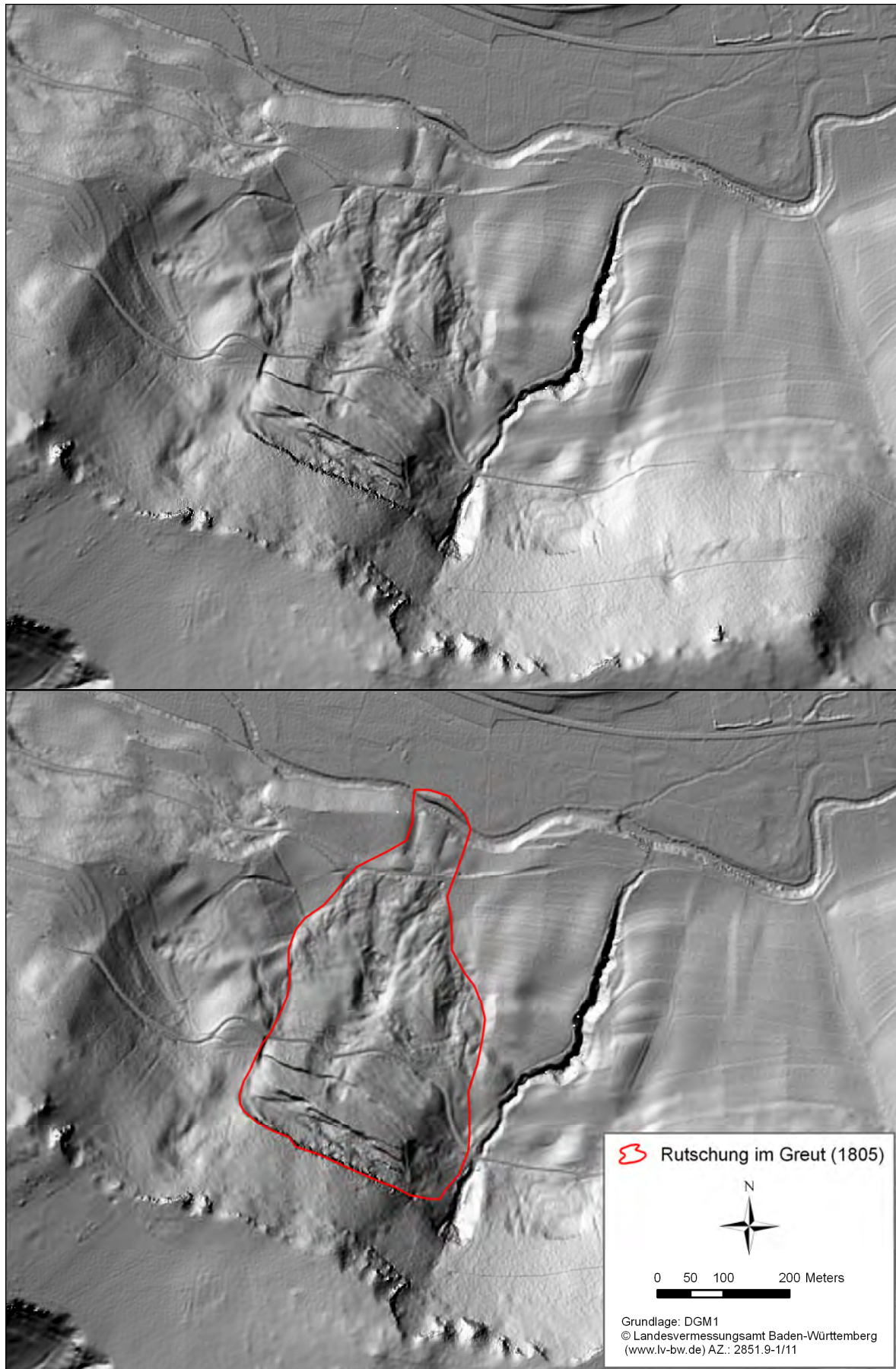


Abb. 7.15: Rutschung im Greut 1805 (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen)

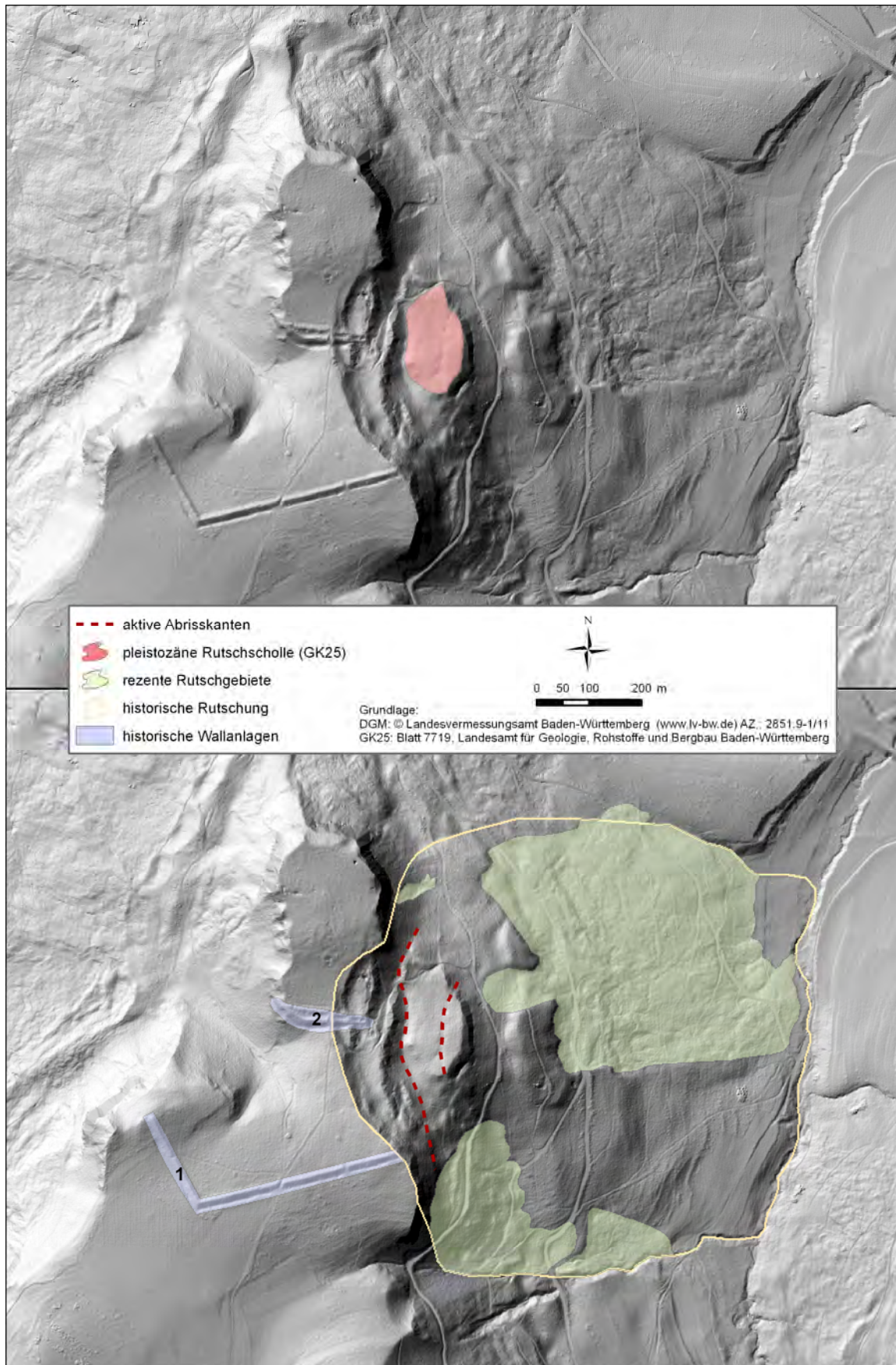


Abb. 7.16: Rutschung am Gräbelesberg (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1 mit kartierter Rutschscholle aus der GK25, unten = Schummerungsdarstellung mit kartierten gravitativen Massenbewegungen und historischen Schutzwällen)

Ein weiteres Untersuchungsgebiet befindet sich am Hangenden Stein und liegt zwischen Onstmettingen und Boll in der Nähe der Burg Hohenzollern. Der Name Hangender Stein steht in Zusammenhang mit den im Bereich des Albtraufs vorzufindenden großen Rutschungsspalten. Huttenlocher (1961) und Reiff (1968) erwähnen einen großen Abbruch im Jahre 1879. Sie machen allerdings keine Angaben über die tatsächlich betroffene Fläche. Diese Daten konnten durch Matthias Röhrs bereitgestellt werden (Kap. 7.1.2.1 und GM\_IR\_History.xls auf der CD-ROM im Anhang), demnach das Ereignis eine Größe von über 315.000 m<sup>2</sup> hatte. Auf Basis dieser Information wurde versucht, das Ereignis im DGM1 zu finden. In Abb. 7.17 ist das Ergebnis dargestellt. Die berechnete wahre Fläche von 309.000 m<sup>2</sup> liegt sehr nahe an der in der historischen Quelle genannten Größe. In der Schummerungsdarstellung sind innerhalb der kartierten Fläche auch zwei Verebnungsbereiche größerer Rotationsschollen zu erkennen, so dass davon ausgegangen werden muss, dass diese bei dem Ereignis 1879 ebenfalls um einige Meter versetzt worden sind, ähnlich wie es beim Mössinger Bergrutsch der Fall gewesen ist. Das kartierte Rutschareal, sowie sein gesamtes Umfeld weisen relativ frische Strukturen auf, so dass auch hier mit immer wiederkehrenden kleineren und größeren Ereignissen zu rechnen ist, ähnlich wie am Irrenberg und beim Mössinger Bergrutsch.

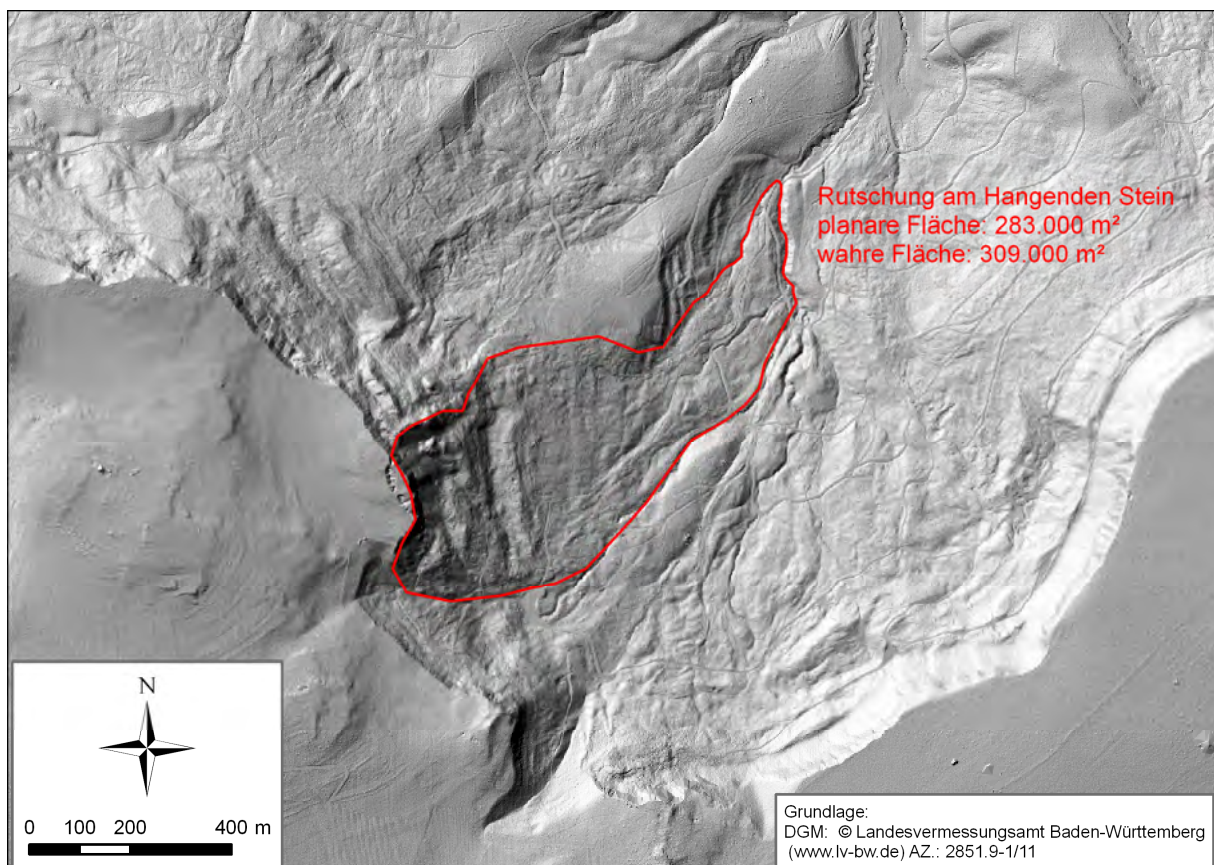


Abb. 7.17: Rutschung am Hangenden Stein (Die rote Linie stellt die Grenze der kartierten Rutschung dar)

Die bisherigen Beispiele entstammten alle Regionen, in der die Tone der obersten Mitteljuraschichten (v.a. der Ornatenton) ausstreichen. Welchen Einfluss das Ausstreichen dieser Tonschichten hat, wird in der Abb. 7.18 deutlich. In den Bereichen, wo der Mitteljuraton zu Tage tritt, findet sich eine

wesentlich höhere Hangrutschungsdynamik, und damit verbunden zahlreiche große Rotationsschollen. Im Bereich um Ebingen, wo der Ornatenton abtaucht, kommen zwar auch noch Rutschungen vor, doch in wesentlich geringerer Zahl. Insbesondere sind keine großen Schollenabbrüche mehr zu finden. Ganz markant zeigen sich die Unterschiede in den von Dongus (1977) kartierten Prozessbereichen gravitativer Massenbewegungen.

Die gleichen Gegebenheiten sind auch in Abb. 7.19 im Umfeld des Schlichemtals ersichtlich, wobei mit dieser Abbildung die weite Verbreitung der Hänge mit ausgeprägten, teils sehr frischen Strukturen gravitativer Massenbewegungen verdeutlicht werden soll.

### *Diskussion*

Die Auswertung der historischen Informationen gibt trotz aller Unvollständigkeiten einen ersten Eindruck von der Aktivität der gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb wieder. Die Integration der noch aufzuarbeitenden, aber schon von *InterRISK History* erfassten Ereignisse wird den Eindruck einer nicht geringen Aktivität verstärken. Dass Ereignisse wesentlich jünger sein können als vermutet, zeigt das folgende Beispiel vom Hangenden Stein:

Die Rutschungen am Hangenden Stein wurden detailliert von Terhorst (1997) untersucht. Bezüglich des Alters kommt sie zu folgenden Aussagen: „*Die Rotationsschollen am Hangenden Stein lassen sich mit der durchgeführten Methodik [Datierung mittels pedologischen Analysen und periglazialen Deckschichten (siehe Kap. 2.8 und 5.1.6)] nicht datieren, da die rezente Aufarbeitung zu weit fortgeschritten ist. Feststellen läßt sich aber, daß die rezenten Rutschungen des Unterhangs „Rutschhalde“ derzeit einen pleistozänen Hang aufarbeiten, was durch das Auftreten des Deckschutts belegt wird. Die pollenanalytische Untersuchung von anmoorigen Horizonten auf der östlichen Gleitscholle ergab [...] ein neuzeitliches Alter und läßt daher keine Datierung zu. Es handelt sich bei solchen Feuchtstellen in der Regel um Auswirkungen des anthropogenen Eingriffs (Knipping 1999)*“ (S. 123). Aus diesen Aussagen lässt sich ableiten, dass Terhorst davon ausgeht, dass das Alter der Rutschscholle wesentlich älter als neuzeitlich ist. Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse der historischen Recherchen von *InterRISK History*, sowie die Verortung im DGM1 zeigen, dass die große Rutschscholle 1879 versetzt worden sein muss. In der Folge können sich durchaus die von Terhorst beprobten anmoorigen Horizonte ausgebildet haben. Diese Annahme wird durch die Datierung von Terhorst bestätigt, die ein neuzeitliches Alter, d.h. jünger als 1850, ergeben hat und somit ziemlich genau mit den historischen Informationen übereinstimmt.

Dieses Ergebnis könnte weit reichende Konsequenzen für die Interpretation der zahlreichen von Terhorst (1997) und Bibus (1999) in das Mittelalter und die Neuzeit datierten Ereignisse haben. Beide Autoren interpretieren die Ergebnisse als viel zu jung und verweisen auf eine durch anthropogene Eingriffe veränderte Hanghydrologie als Erklärungsmuster für die Entstehung mittelalterlicher bis neuzeitlicher Moore. Der Fund vom Hangenden Stein scheint zu

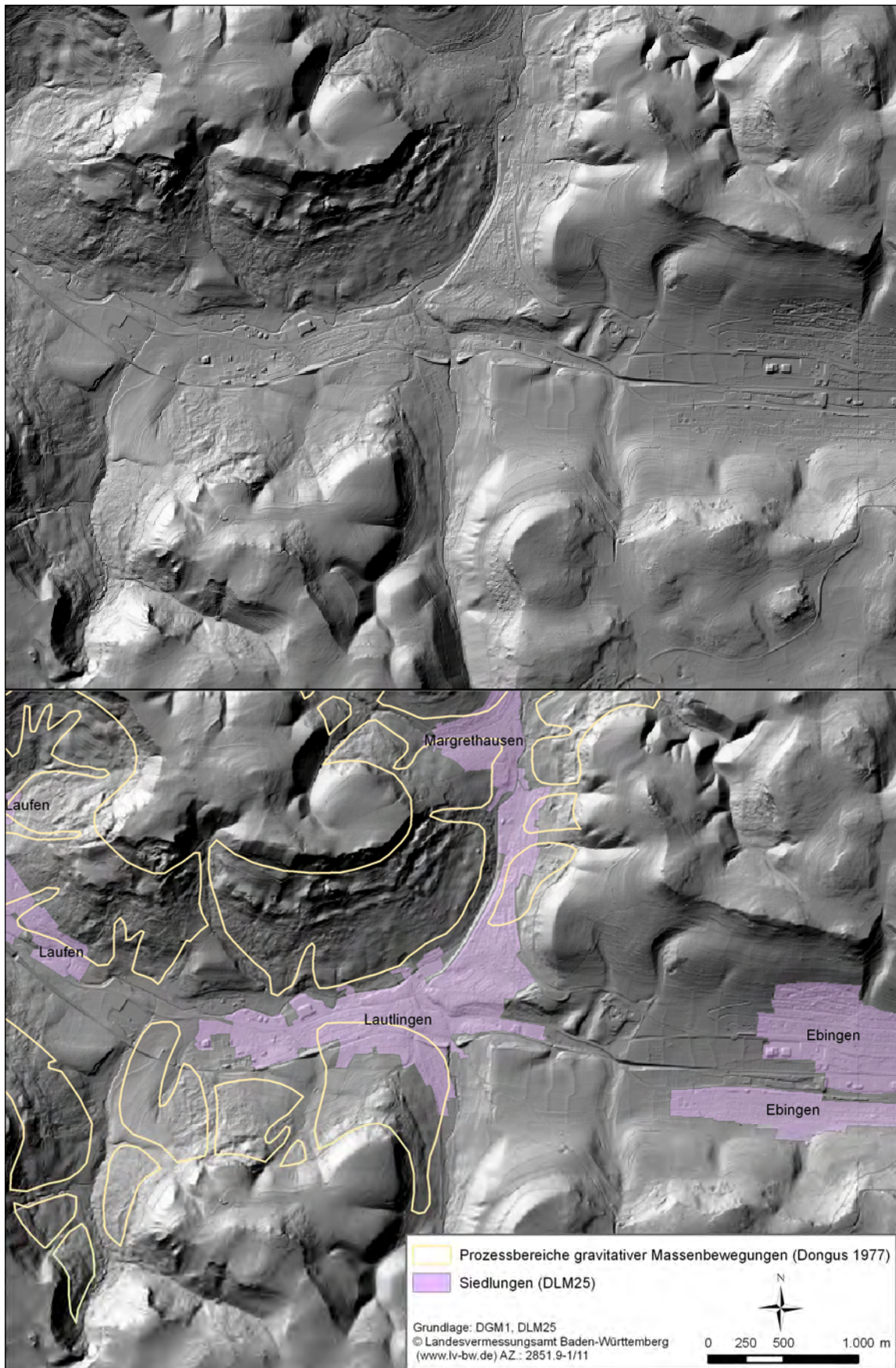


Abb. 7.18: Unterschiedliche Aktivitäten gravitativer Massenbewegungen bei Albstadt (oben = Schummerungsdarstellung des DGM1, unten = Schummerungsdarstellung mit Prozessbereichen gravitativer Massenbewegungen und Siedlungen)

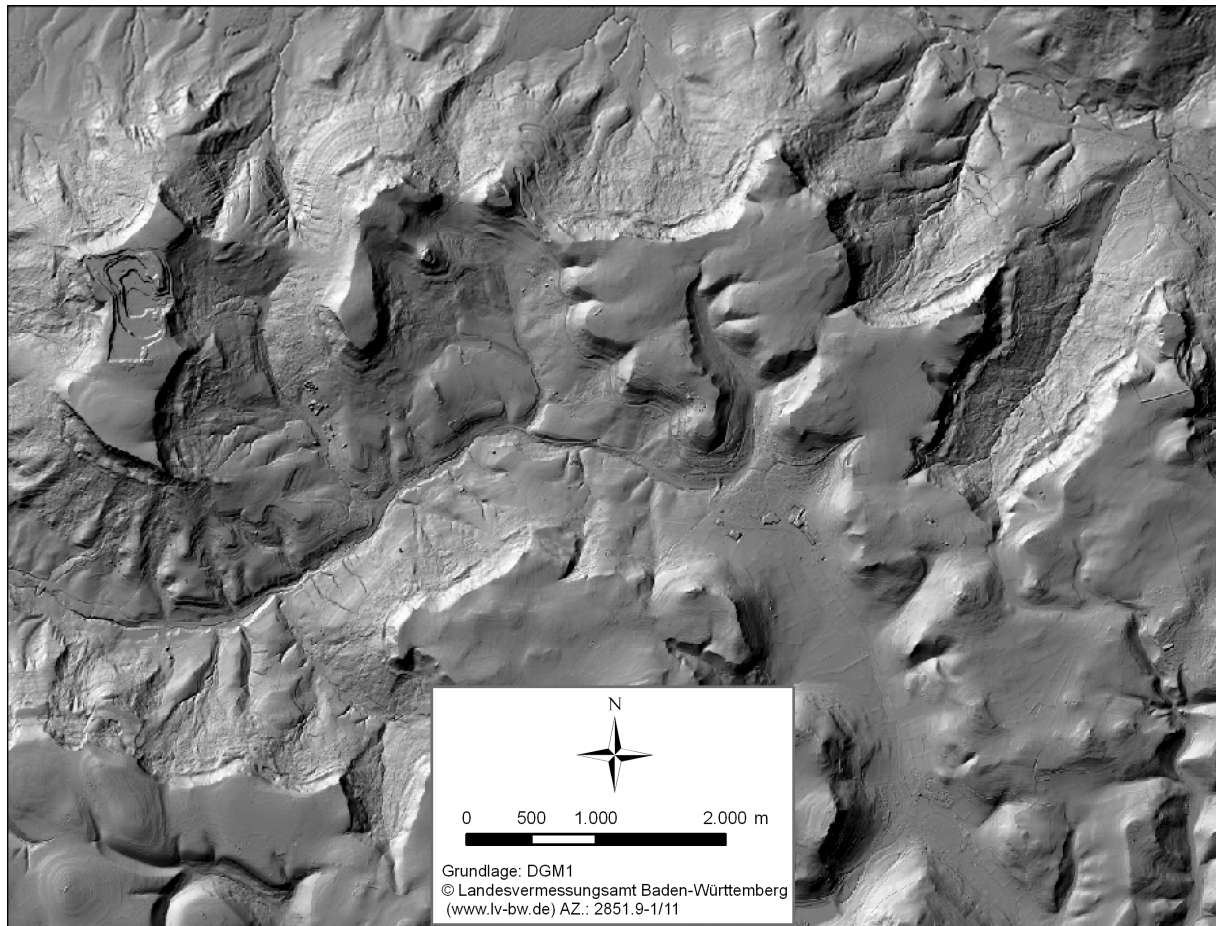


Abb. 7.19: Rutschungsaktivitäten im Schlichemtal

zeigen, dass diese Erklärung keine Allgemeingültigkeit besitzt, auch wenn es in Einzelfällen sicherlich denkbar ist, dass sich die Moore erst wesentlich später auf Grund von anthropogenen Eingriffen gebildet haben.

In dieser Arbeit stand zum ersten Mal flächendeckend für die Schwäbische Alb das DGM1 zur Verfügung, welches eine umfassende Analyse der geomorphologischen Formen und Strukturen insbesondere entlang des Albtraufs ermöglichte. Die Einblicke, die durch Schummerungsdarstellung des DGM1 zu erzielen sind, sind in dieser Form meist nicht oder nur mit extrem hohem Aufwand im Gelände selber zu gewinnen, da vor allem die Vegetation einen schnellen und detaillierten Überblick über das gesamte Geosystem einer gravitativen Massenbewegung verhindert. Bei sehr großen Rutscharealen dauert es oft mehrere Tage, bis ein umfassender Überblick über die Entstehung und aktuelle Dynamik gewonnen werden kann, wie der Autor bei eigenen Geländebegehungen z.B. im Bereich des Irrenbergs feststellen konnte. Zu dem Zeitpunkt stand das DGM1 noch nicht zur Verfügung. Nachfolgende Analysen des DGM1 vom Irrenberg vermittelten wesentlich schneller den Aufbau sowie die rezenten Aktivitätsbereiche. Selbstverständlich sind zur abschließenden Beurteilung der aus dem DGM1 gewonnen Erkenntnisse detaillierte Geländebegehungen notwendig. Eine Vorerkundung durch DGM1-Analysen ermöglicht aber eine Optimierung der Geländearbeiten, so dass gezielt kritische Bereiche aufgesucht und untersucht werden können.

Das DGM1 ermöglicht weiterhin die Erkundung vielfältiger anderer Strukturen, z.B. Folgen anthropogener Eingriffe in die Landschaft (historische Wallanlagen, Steinbrüche, Lehmgruben, Flussverbauungen, usw.). Werden beispielsweise die anthropogenen Strukturen von gravitativen Massenbewegungen verändert, so kann über das Alter der Strukturen ein Mindestalter für die gravitative Massenbewegung abgeleitet werden, wie dies für den Gräbelesberg möglich war. Des Weiteren kann mittels DGM1-Auswertungen der Einfluss von gravitativen Massenbewegungen auf fluviale Systeme untersucht werden (z.B. bei der Rutschung im Greut 1805). Weitere Analysen zur Kopplung von gravitativen und fluvialen Systemen, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann, zeigen, dass selbst Großereignisse, die offensichtlich die Flüsse blockierten und zur Aufstauung von Seen führten, oft keine markanten Veränderungen im Flussprofil zurück lassen. Spätestens seit dem ausgehenden 18. Jahrhundert liegen Informationen vor, dass solche Dämme von Menschenhand beseitigt wurden, um große Flutwellen infolge katastrophaler Dammdurchbrüche zu verhindern (siehe Kap. 5.1.6). Die Rolle der fluvialen Erosion bei der Auslösung von gravitativen Massenbewegungen konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden. Sie hat aber vermutlich einen durchaus großen Einfluss. Trotz einer im Vergleich zu den periglazialen Umweltbedingungen während der letzten Kaltzeit reduzierter Erosionsleistung der Flüsse scheint das Material von gravitativen Massenbewegungen relativ schnell ausgeräumt worden zu sein. Dies ist durchaus plausibel, da oft nur relativ feines Material (Tone, Mergel und zerbrochene dünnbankte Kalksteine) durch die gravitative Massenbewegung die Flüsse erreicht, die einfacher erodiert werden können als massive Festgesteinsblöcke, wie dies in anderen Regionen (z.B. in den Alpen) der Fall ist. Insgesamt zeigen die Analysen des DGM1, dass viele Hänge entlang des Albtraufs noch relativ frische Strukturen aufweisen, so dass von mehr oder weniger regelmäßigen Reaktivierungen auszugehen ist, vor allem in Bereichen, in denen die obersten Mitteljuratone ausstreichen. Ein pleistozänes Alter der Rutschungen, wie es von vielen Autoren angenommen wird (siehe Kap. 5.1.6), erscheint doch sehr fragwürdig. Die Ergebnisse der relativen Datierung mittels Analysen des hochaufgelösten DGM1 zeigen sehr deutlich, dass in Kombination mit dem DGM-Analysen ein System zur relativen Datierung, wie es McCalpin (1984 in Keaton und DeGraff 1996) für die Rocky Mountains vorgeschlagen haben, auch in der Schwäbischen Alb zu etablieren sein sollte, wenn genügend gravitative Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude absolut datiert sind. Die DGM1-Analysen in Kombination mit den historischen Informationen geben deutliche Hinweise darauf, dass die Aktivitäten von gravitativen Massenbewegungen größer sind, als bisher vermutet.

Abschließend sind in Tab. 7.1 die größten historischen gravitativen Massenbewegungen der Schwäbischen Alb zusammengestellt.

Tab. 7.1: Die größten historischen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet der Schwäbischen Alb

Nr.	Datum	Name	Lokalität	Größe (m²)	Quelle
1	vor 1788 (eigene Abschätzung: ca. 1690)	Rutschung am Farrenberg	Mössingen	523.000 (eigene Abschätzung)	Rösler 1788, S.219, eigene Lokalisierung
2	14.-27.05.1787	Berggrutsch am Tannbühl/ Bahnholzhalde	Ratshausen/ Deilingen	424.000	HStA Stuttgart, B38, Bü 1444: Berggrutsch 1787. Vgl. Rösler 1788, S. 59-61. OAB Spaichingen, 1876, S. 365 f.
3	Januar 1789	Berggrutsch am Tannbühl	Ratshausen/ Deilingen	848.000	HStA Stuttgart, B38, Bü 1444: Berggrutsch 1789
4	27.-28.02.1805	Berggrutsch im Greut	Hausen an der Fils	163.000	Gemeindearchiv Bad Überkingen, Aktenbündel Berggrutsch im Greut 1805
5	1810-1819	Rutschung bei Neidlingen	Neidlingen	122.000	Aichelen Forstkarte 1816-1819
6	06.10.1851	Rutschung am Plettenberg	Ratshausen	1.100.000	OAB Spaichingen, 1876, S. 366. Vgl. OAB Rottweil, 1875, S. 500 f.. Fraas 1853
7	1879	Berggrutsch am hangenden Stein/Zellerhorn	Onstmetingen/ Boll (Hohenzollern)	>315.000	OAB Balingen 1880, S. 18
8	16.06.1965	Rutschung an der Achalm	Eningen u.A.	110.000	Schädel und Stoiber 1988
	07.-09.1.1966	Eichberg-rutschung	Blumberg	550.000	Reiff 1968, Schädel und Stoiber 1988, Hangrutschungsdatenbank Universität Tübingen
9	26.08.1972	Rutschung am Irrenberg	Thanheim	200.000	Fundinger 1985
10	12.04.1983	Mössinger Berggrutsch	Mössingen	500.000	Fundinger 1985, Bibus 1986, Schädel und Stoiber 1988, Hangrutschungsdatenbank Universität Tübingen



### 7.1.3 Wiederkehrwahrscheinlichkeit

Die Frequenz-Magnitude-Analyse des Inventars gravitativer Massenbewegungen von Brennecke (2006) zeigt für Ereignisse, größer als 10.000 m<sup>2</sup> sind, die typische Potenzgesetzverteilung und für kleinere gravitative Massenbewegungen den so genannten Rollover-Effekt (Abb. 7.20). Letzterer ist noch stärker ausgeprägt, wenn statt der planaren Fläche die wahre Fläche berücksichtigt wird. Die Berechnung der wahren Fläche führt im Vergleich zur planaren Fläche insgesamt zu einer 10% größeren von gravitativen Massenbewegungen betroffenen Fläche. Bei der Verwendung der wahren Fläche ist zu erkennen, dass die Kurve hin zu größeren Ereignissen verschoben ist, und dass die Trendlinie ein wenig flacher verläuft. Im Allgemeinen sind die Kurven im Bereich der Potenzgesetzverteilung aber recht ähnlich. Gemäß der Annahme, dass der Übergang in die Potenzgesetzverteilung, die die Mindestgröße der gravitativen Massenbewegung anzeigt, die vollständig über die letzten 10.000 Jahre im Datensatz erfasst werden konnten, wird für die Berechnung der Wiederkehrintervalle von einem Schwellenwert von 10.000 m<sup>2</sup> ausgegangen, oberhalb derer, die Wiederkehrintervalle und -wahrscheinlichkeiten berechnet werden können.

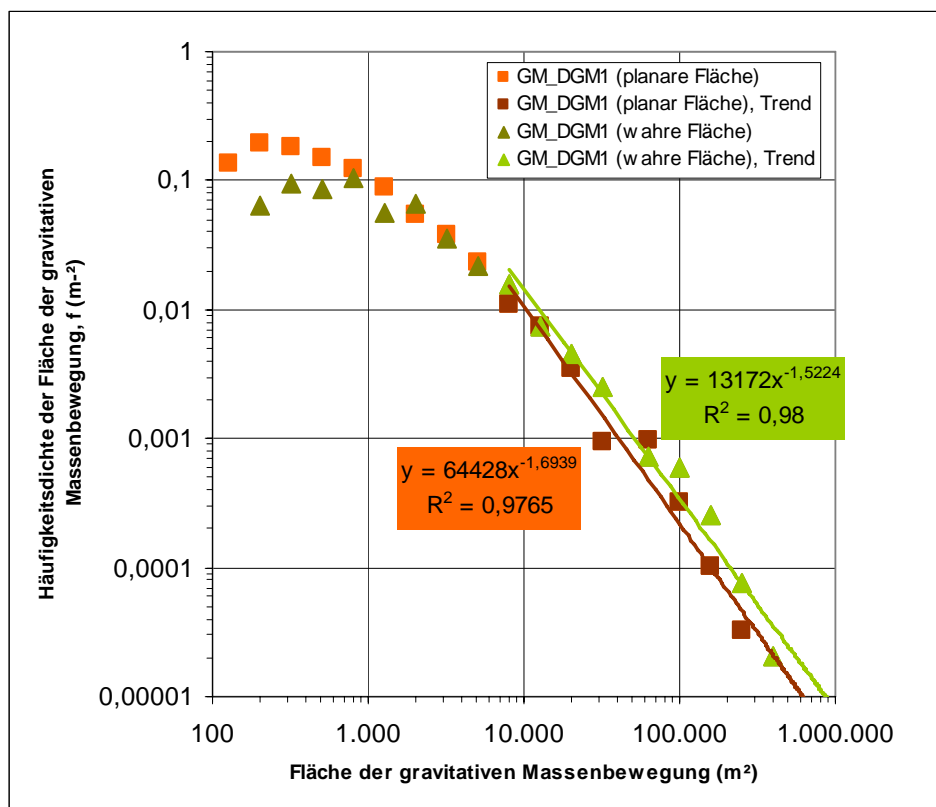


Abb. 7.20: Frequenz-Magnitude-Analyse des Inventars gravitativer Massenbewegungen von Brennecke (2006)

In Tab. 7.2 sind die mit den Formeln 7, 8 und 9 berechneten Wiederkehrintervalle und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten (siehe Kap. 5.1.3) zusammenfassend für gravitative Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal

dargestellt. Die gleichen Parameter wurden für die Schwäbische Alb zum einen unter Verwendung der Flächen der Hangbereiche berechnet, zum anderen unter Berücksichtigung des gesamten Albtraufbereichs. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tab. 7.2 dargestellt. Die Berechnungen wurden jeweils für die wahre und planare Fläche der gravitativen Massenbewegungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, wie das Wiederkehrintervall mit zunehmender Magnitude zu- und die Wiederkehrwahrscheinlichkeit abnimmt. Des Weiteren liefert die Berücksichtigung des kompletten Albtraufbereichs wesentlich geringere Wiederkehrintervalle als die Berechnung nur auf Basis der Hangbereiche. Der Werte zwischen dem Ansatz mit der wahren Flächen und dem mit der planaren Fläche weichen teilweise relativ stark voneinander ab.

Tab. 7.2: Wiederkehrintervall und Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude in den Untersuchungsgebieten Oberes Filstal und Schwäbische Alb

		Oberes Filstal		Schwäbische Alb (Hangbereiche des Albtraufs)		Schwäbische Alb (gesamter Albtraufbereich)	
GM_DGM1 (wahre Fläche)							
Fläche A (in m <sup>2</sup> )	Anzahl	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit
>10.000	191	52,4	0,0191	2,2	0,4574	1,4	0,7323
>100.000	29	344,8	0,0029	14,4	0,0695	9,0	0,1112
>250.000	7	1428,6	0,0007	59,6	0,0168	37,3	0,0268
>400.000	4	2500,0	0,0004	104,4	0,0096	65,2	0,0153
>500.000	3	3333,3	0,0003	139,2	0,0072	86,9	0,0115
>800.000	1	10000,0	0,0001	417,5	0,0024	260,8	0,0038
GM_DGM1 (planar)							
Fläche A (in m <sup>2</sup> )	Anzahl	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit	Wiederkehr- intervall	Wiederkehrwahr- scheinlichkeit
>10.000	178	56,2	0,0178	2,3	0,4263	1,5	0,6825
>100.000	23	434,8	0,0023	18,2	0,0551	11,3	0,0882
>250.000	6	1666,7	0,0006	69,6	0,0144	43,5	0,0230
>400.000	3	3333,3	0,0003	139,2	0,0072	86,9	0,0115
>500.000	3	3333,3	0,0003	139,2	0,0072	86,9	0,0115
>700.000	1	10000,0	0,0001	417,5	0,0024	260,8	0,0038

In Tab. 7.3 sind die Ergebnisse der Berechnung der Wiederkehrintervalle auf Basis der größten historischen gravitativen Massenbewegungen (siehe Tab. 7.1) angegeben. Da das Ereignis von 1690 gewisse Unsicherheiten in sich birgt, sind die Berechnung einmal mit und einmal ohne dieses Ereignis durchgeführt worden.

Tab. 7.3: Anzahl historischer gravitativer Massenbewegungen bestimmter Magnitude und daraus berechneter Wiederkehrintervalle (auf Basis der Ereignisse in Tab. 7.1)

Magnitude	Anzahl der Ereignisse		Wiederkehrintervall	
	mit Rutschung von 1690	ohne Rutschung von 1690	mit Rutschung von 1690	ohne Rutschung von 1690
>100.000	11	10	29	22
>250.000	7	6	45	37
>400.000	6	5	53	44
>500.000	5	4	63	55
>800.000	2	2	159	110
Zeitraum (Jahre)	317	220		

### Diskussion

Der neu entwickelte Ansatz zur Berechnung der Wiederkehrintervalle für ein Untersuchungsgebiet auf Basis von vollständigen Inventaren für Teilbereiche des Untersuchungsgebietes liefert plausible Ergebnisse. Im Vergleich zu den Wiederkehrintervallen auf Basis der historischen Daten scheint der Ansatz unter Verwendung des gesamten Albraufbereichs bessere Werte zu liefern. Bei den historischen Daten muss aber beachtet werden, dass die Zeitreihe nur relativ kurz ist und zudem auch unvollständig, so dass der Vergleich durchaus mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Trotz der scheinbar besseren Übereinstimmung mit dem Datensatz für den gesamten Albraufbereich wird der Ansatz unter Nutzung der Hangbereiche bevorzugt, da dieser nur die Bereiche berücksichtigt, in denen tatsächlich gravitative Massenbewegungen auftreten können. Im Vergleich zu den immer in historischen Datenbanken enthaltenen Unsicherheiten und Lücken birgt der neu entwickelte Ansatz ein großes Potenzial, welcher insbesondere in großen Untersuchungsgebieten oder in Gebieten mit wenigen historischen Informationen zu vergangenen Ereignissen eine Möglichkeit bietet, mit vertretbarem Aufwand die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen zu berechnen. Die Anwendbarkeit dieses Ansatzes hängt aber stark vom Eingangsdatensatz ab. Je besser das räumliche Inventar gravitativer Massenbewegungen, desto besser ist die Eignung dieses Ansatzes.

### 7.1.4 Gefährdungsmodellierung

(Die präsentierten Gefährdungskarten (Abb. 7.21 bis Abb. 7.23) befinden sich zusätzlich in digitalem Format auf der beigelegten CD-ROM)

Es wurden umfangreiche Gefährdungsmodellierungen mittels der logistischen Regression durchgeführt. Als Basisdaten zu den gravitativen Massenbewegungen wurden zuerst die Daten von Dongus (1977) und aus der Forstlichen Standortkartierung getrennt voneinander eingesetzt. Da die ersten Karten keine vollständig zufrieden stellenden Ergebnisse lieferten, was auf die jeweiligen Nachteile der Datensätze zurückgeführt werden konnte, wurden die zwei Datensätze in einem weiteren Schritt miteinander kombiniert. Dies hat den Vorteil, dass die von Dongus kartierten Prozessbereiche, die sich in erster Linie auf größere Ereignisse stützen, durch eine Vielzahl kleinerer Rutschungsbereiche ergänzt werden, die sich außerhalb der Dongus-Daten im Bereich des Albtraufs und darüber hinaus in den Flusstälern und im Albvorland befinden.

Insgesamt ist bei allen Modellierungen festzustellen, dass der AUROC-Wert sehr hoch ist und einen Wert von 0,85 nicht unterschreitet, selbst bei der Berechnung für die unabhängigen Testdatensätze nicht (siehe Tab. 7.4). Nach Hosmer und Lemeshow (2000) sind demnach die Modellgüten „*excellent*“ bis „*outstanding*“. Auch liegt der Anteil der gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen zum Teil weit über 70%. Lediglich bei einer Berechnung befinden sich 63,6% in den höchsten Gefährdungsklassen. Aus den DGM1-Analysen (Kap. 7.1.2.2) ergab sich, dass das Ausstreichen der obersten Mitteljuratone einen großen Einfluss auf die Aktivität gravitativer Massenbewegungen hat, so dass ein Parameter für die Distanz zum obersten Mitteljuraton berechnet und in den Gefährdungsmodellierungen berücksichtigt wurde. Um die Auswirkungen dieses Parameters auf die Gefährdungskarte zu untersuchen, wurden die Modelle mit den Dongus-Daten (Do50\_SWA), den Daten aus der Forstlichen Standortkartierung (FVA50\_SWA) und den kombinierten Daten (DoFva50\_SWA) jeweils mit und ohne Distanzparameter berechnet. Die genannten Modelle wurden alle mit einer Rasterauflösung von 50 m durchgeführt. In allen Berechnungen ist der Distanzparameter hoch signifikant (Signifikanzniveau  $<0,001$ ) und führt zu besseren statistischen Gütemaßen (Tab. 7.4). Insbesondere im Modell Do50SWA\_1 sorgt der Distanzparameter für außerordentlich gute statistische Gütewerte, u.a. liegen über 94% aller gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen. In Abb. 7.21 wird aber ersichtlich, dass die Verwendung des Distanzparameters zu einer Überanpassung des Modells an die Dongus-Daten führt und weite Bereiche der Schwäbischen Alb als sehr gering gefährdet ausgewiesen werden, in denen dennoch gravitative Massenbewegungen auftreten können. Neben dem Distanzparameter sind vor allem die Hangneigung und die Geologie in den Modellen mit einer Auflösung von 50 m hoch signifikant. Die anderen Parameter und deren Signifikanz variieren stärker zwischen den einzelnen Modellen. In zwei Modellen (FVA50\_SWA2 und DoFva50\_SWA2) erlangt die Verteilung der durchschnittlichen Niederschläge eine sehr hohe Signifikanz. Da die

Gefährdungskarte des Modells DoFva50\_SWA2 trotz etwas geringerer statistischer Gütemaße plausibler wirkt als die anderen Gefährdungskarten, wurden für diesen Datensatz Berechnungen mit einer Auflösung von 25 m ohne Distanzparameter durchgeführt. Die Abb. 7.22 zeigt, dass die Verwendung der höheren Auflösung zum einen zu einem höheren Detailgrad führt, so dass z.B. die Verebnungsbereiche der großen Rutschschollen als weniger gefährdet ausgewiesen werden als steilere Partien im Umfeld, was für den Rückgang des Anteils der gravitativen Massenbewegungen in den höchsten Gefährdungsklassen verantwortlich ist. Zum anderen werden generell mehr Flächen als gefährdet ausgewiesen, von denen sich ein Großteil auf der Hochfläche und in den Flussauen befindet, welches abseits der statistischen Gütemaße nicht akzeptabel ist. Um diesen Effekt zu reduzieren, wurde anschließend ein Parameter in die Berechnung mit aufgenommen, der auf Basis einer geomorphometrischen Analyse die Hangbereiche flachen Arealen unterscheidet. Dieser wurde als binärer Parameter (Hangbereich ja/nein) in der Modellierung berücksichtigt. Das Ergebnis ist zum einen in Tab. 7.4 und zum anderen in Abb. 7.23 dargestellt. Die statistischen Gütemaße liegen in einem akzeptablen bis hohen Bereich. Die resultierende Karte wirkt aus geomorphologischer Perspektive sehr plausibel, da die zuvor als zu hoch gefährdet ausgewiesenen Bereiche auf der Albhochfläche sowie in den Flussauen nun eine sehr geringe Gefährdung aufweisen.

Tab. 7.4 Übersicht über die Gefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb mittels logistischer Regression inklusive der Gütemaße

<b>mit Distanzparameter</b>				<b>ohne Distanzparameter</b>			
<b>Modell Do50SWA_1 (Abb. 7.21)</b>				<b>Modell Do50SWA_2</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz		Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-7,13E+00	1,93E+00	<0,001	Intercept	-1,51E+01	1,38E+00	<0,001
Hangneigung	1,33E-01	2,16E-02	<0,001	Hangneigung	1,95E-01	1,69E-02	<0,001
Höhe	2,86E-03	9,29E-04	<0,01	Höhe	3,08E-03	7,49E-04	<0,001
Geologie	2,12E-06	2,73E-07	<0,001	Geologie	2,19E-06	2,00E-07	<0,001
Distanz zum Obersten Mitteljura	-1,01E-03	1,02E-04	<0,001	Exposition	3,16E-03	8,22E-04	<0,001
Exposition	2,24E-03	1,09E-03	<0,05	Minimale Wölbung	1,46E+03	3,87E+02	<0,001
Minimale Wölbung	1,07E+03	4,71E+02	<0,05	Vertikale Wölbung	-2,92E+03	3,80E+02	<0,001
Vertikale Wölbung	-2,76E+03	4,76E+02	<0,001	Durchschnittlicher Niederschlag	2,29E-03	9,90E-04	<0,1
Durchschnittlicher Niederschlag	-2,71E-03	1,57E-03	<0,1				
AUROC	Trainingsdatensatz	0,96		AUROC	Trainingsdatensatz	0,91	
	Testdatensatz	0,98			Testdatensatz	0,93	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		94,70		Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		82,66	
Geomorphologische Güte		gering		Geomorphologische Güte		mittel	
<b>Modell FVA50SWA_1</b>				<b>Modell FVA50SWA_2</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz		Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-5,95E+00	7,03E-01	<0,001	Intercept	-1,10E+01	1,25E+00	<0,001
Hangneigung	1,80E-01	1,56E-02	<0,001	Hangneigung	2,06E-01	1,54E-02	<0,001
Geologie	1,24E-06	1,90E-07	<0,001	Geologie	1,16E-06	1,83E-07	<0,001
Distanz zum Obersten Mitteljura	-8,73E-05	1,17E-05	<0,001	Minimale Wölbung	-7,13E+02	1,81E+02	<0,001
Minimale Wölbung	-6,08E+02	1,80E+02	<0,001	Durchschnittlicher Niederschlag	4,43E-03	9,09E-04	<0,001
AUROC	Trainingsdatensatz	0,88		AUROC	Trainingsdatensatz	0,88	
	Testdatensatz	0,87			Testdatensatz	0,86	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		76,04		Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		76,04	
Geomorphologische Güte		mittel		Geomorphologische Güte		mittel	
<b>Modell DoFVA50SWA_1</b>				<b>Modell DoFVA50SWA_2</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz		Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-4,95E+00	1,60E+00	<0,01	Intercept	-1,30E+01	1,31E+00	<0,001
Hangneigung	1,32E-01	1,95E-02	<0,001	Hangneigung	1,97E-01	1,60E-02	<0,001
Höhe	2,30E-03	7,53E-04	<0,01	Höhe	1,54E-03	6,94E-04	<0,05
Geologie	1,49E-06	2,30E-07	<0,001	Geologie	1,64E-06	1,86E-07	<0,001
Distanz zum Obersten Mitteljura	-4,05E-04	4,34E-05	<0,001	Minimale Wölbung	4,20E+02	2,53E+02	<0,1
Maximale Wölbung	-1,33E+03	3,95E+02	<0,001	Vertikale Wölbung	-1,93E+03	2,84E+02	<0,001
Minimale Wölbung	-1,45E+03	2,73E+02	<0,001	Durchschnittlicher Niederschlag	3,87E-03	9,95E-04	<0,001
Tangentiale Wölbung	1,27E+03	3,21E+02	<0,001				
Durchschnittlicher Niederschlag	-2,24E-03	1,32E-03	<0,1				
AUROC	Trainingsdatensatz	0,95		AUROC	Trainingsdatensatz	0,89	
	Testdatensatz	0,95			Testdatensatz	0,89	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		89,35		Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		73,8	
Geomorphologische Güte		gering		Geomorphologische Güte		hoch	
<b>ohne Distanzparameter und ohne Formelement Hang</b>				<b>ohne Distanzparameter aber mit Formelement Hang</b>			
<b>Modell DoFVA25SWA_1 (Abb. 7.22)</b>				<b>Modell DoFVA25SWA_2 (Abb. 7.23)</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz		Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-1,53E+01	1,25E+00	<0,001	Intercept	-1,41E+01	1,43E+00	<0,001
Hangneigung	1,21E-01	1,13E-02	<0,001	Hangneigung	3,97E-02	1,29E-02	<0,01
Höhe	1,89E-03	6,50E-04	<0,01	Höhe	2,09E-03	7,40E-04	<0,01
Geologie	2,06E-06	1,71E-07	<0,001	Geologie	1,66E-06	1,99E-07	<0,001
Durchschnittlicher Niederschlag	5,06E-03	9,38E-04	<0,001	Vertikale Wölbung	-1,06E+03	1,85E+02	<0,001
				Durchschnittlicher Niederschlag	3,84E-03	1,10E-03	<0,001
				Formelement Hang	2,80E+00	2,48E-01	<0,001
AUROC	Trainingsdatensatz	0,85		AUROC	Trainingsdatensatz	0,91	
	Testdatensatz	0,85			Testdatensatz	0,91	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		63,6		Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		77,52	
Geomorphologische Güte		gering		Geomorphologische Güte		sehr hoch	

<sup>1</sup> GM = Gravitative Massenbewegung

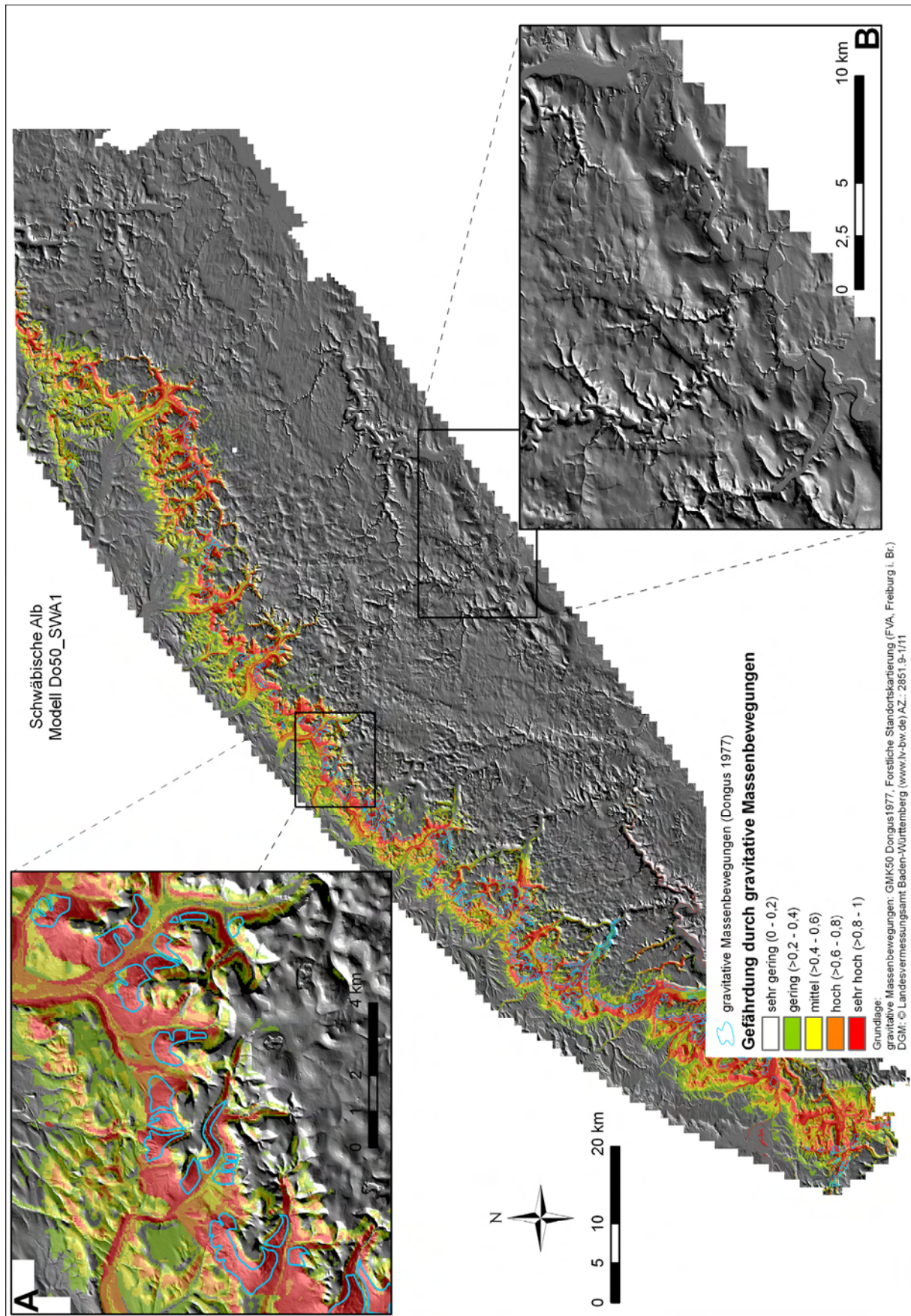


Abb. 7.21: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells Do50\_SWA1 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)

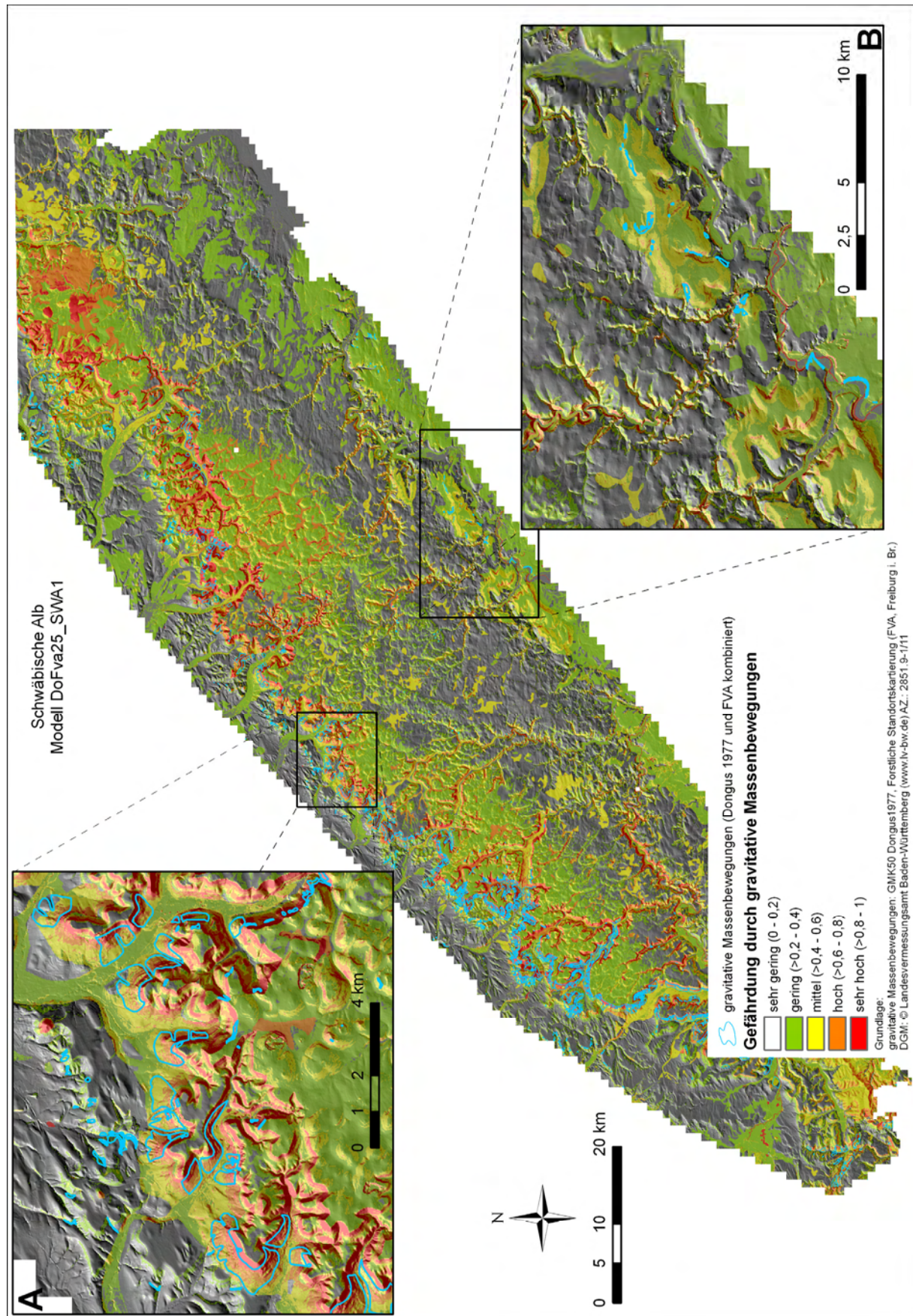


Abb. 7.22: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25\_SWA\_1 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)



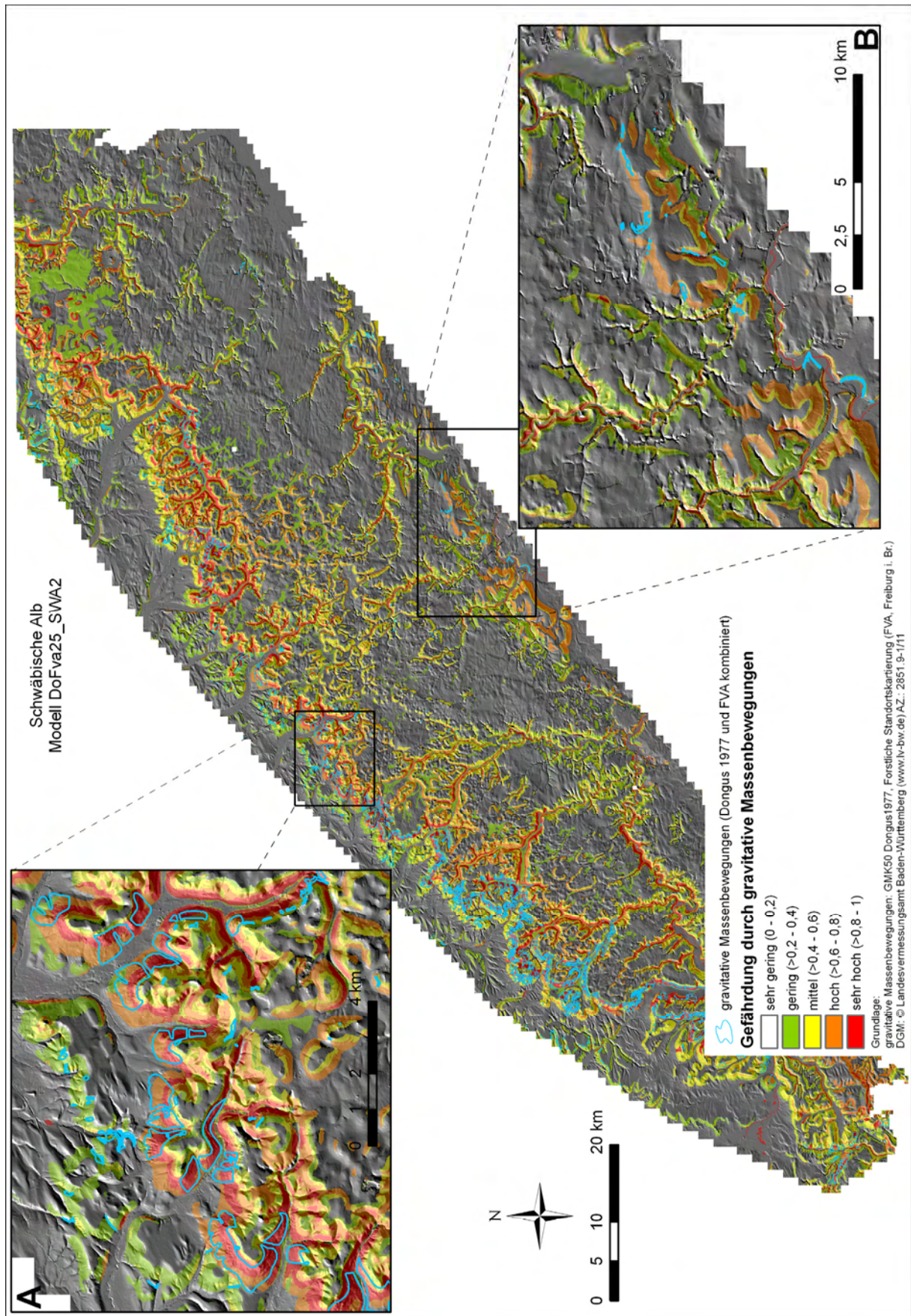


Abb. 7.23: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25\_SWA\_2 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)

*Diskussion*

Die umfassenden Gefährdungsmodellierungen mittels verschiedener Eingangsdatensätze für gravitative Massenbewegungen zeigen, dass der kombinierte Datensatz aus den Dongus-Daten und den Daten aus der Forstlichen Standortskartierung bei einer Rasterauflösung von 25 m die besten Ergebnisse liefert. Diese Einschätzung drückt sich aber nicht alleine in den statistischen Gütemaßen aus. Würde eine Beurteilung allein auf Basis der statistischen Gütemaße erfolgen, so müsste das Modell Do50\_SWA\_1 (Abb. 7.21) bevorzugt werden. Um ein Gütekriterium zu haben, mittels dessen die Auswahl des endgültigen Modells begründet werden kann, wird ein qualitatives geomorphologisches Gütekriterium eingeführt, welches die Güte der finalen Karte aus einer geomorphologischen Perspektive bewertet. Die Klassen der geomorphologischen Güte (sehr gering bis sehr hoch) basieren darauf, wie gut die Karte des jeweiligen Modells die tatsächliche Rutschungsgefährdung wiedergeben kann. Werden Gebiete, in denen gravitative Massenbewegungen in der Vergangenheit aufgetreten sind, nicht als rutschgefährdet ausgewiesen, so wirkt sich das negativ auf die geomorphologische Güte aus. Ebenso negativ wirken sich Effekte aus, die relativ ebene Bereiche wie Hochflächen und Flussauen als gefährdet ausweisen. Die für die jeweiligen Modelle abgeschätzten geomorphologischen Güten sind in Tab. 7.4 angegeben. Auf Basis aller Gütekriterien wird das Modell DoFva25\_SWA2 als das beste angesehen und wird somit in den nachfolgenden Schritten als Inputparameter verwendet. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die endgültige regionale Gefährdungskarte sehr gute Ergebnisse liefert, wenn berücksichtigt wird, dass für die Analysen nur eine Geologische Karte im Maßstab 1:200.000 zur Verfügung stand. Ein Blick auf die lokalen Untersuchungsgebiete Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen im vergrößerten Ausschnitt zeigt, dass für beide Gebiete eine hohe Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen modelliert wird.

Da in der Literatur oft sehr kleine Werte aus der logistischen Regression resultieren (siehe Tab. 3.2), die bei einer Verteilung auf die in dieser Arbeit verwendeten Klassen wohl kaum mittlere bis sehr hohe Gefährdungen ausweisen würde, wurde in weiteren Modellierungen untersucht, wie es zu solch kleinen Werten kommen kann. Das Ergebnis war, dass es zu solch niedrigen Werten kommen kann, wenn die logistische Regression mit allen Pixeln eines Untersuchungsgebietes durchgeführt wird. Das gleiche geschieht, wenn aus der Gesamtanzahl der Pixel zufällig ein gewisser Prozentsatz ausgewählt wird, ohne auf die von Guzzetti (2005) hingewiesene notwendige Gleichverteilung zwischen Bereichen mit und ohne gravitativen Massenbewegungen zu achten. In der Literatur werden für gewöhnlich die Klassengrenzen in Fällen mit geringen Werten so angepasst, dass ein akzeptabler Anteil der gravitativen Massenbewegungen in den höchsten Gefährdungsklassen zu finden ist (siehe Tab. 3.2). In dieser Arbeit wurden die Klassengrenzen bewusst im Voraus ausgewählt und nicht mehr in Abhängigkeit von den Ergebnissen verändert. Dies wurde dadurch notwendig, da die Gefährdungswerte einen Inputparameter für die Berechnung der quantitativen Gefahrenkarte

darstellen. In diesem Zusammenhang ist es nicht akzeptabel, dass auf Grund einer fehlerhaften Durchführung der Gefährdungsmodellierung die Gefährdungswerte zu klein berechnet werden und damit in zu geringen Gefahren und zu geringen Risiken in den nachfolgenden Berechnungen resultieren.

### **7.1.5 Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL)**

Die Berechnung des Volumens zukünftiger gravitativer Massenbewegungen hat auf regionaler Skale leider keine brauchbaren Ergebnisse geliefert. Die Schwierigkeit lag in der automatischen Ableitung von geeigneten Fixpunkten zwischen denen der Algorithmus das Volumen berechnet. Werden nur die Flüsse als Kriterium verwendet, werden viel zu große Einheiten gravitativer Massenbewegungen ausgewiesen. Wird ein zusätzliches Hangneigungskriterium aufgenommen, d.h. alle Flächen unter beispielsweise 10° Hangneigung werden als Fixpunkte betrachtet, so führt das dazu, dass u.a. auch die Verebnungsbereiche der zahlreichen Rotationsschollen fixiert werden, obwohl diese für die Volumenbestimmung von Großereignissen, in denen die Rotationschollen reaktiviert werden, mit in die Berechnung eingehen müssen, da ansonsten viel zu kleine Volumina resultieren. Als nächster Schritt wurde versucht, über verschiedenste geomorphometrische Parameter das Relief automatisch in Einheiten gravitativer Massenbewegungen zu diskretisieren. Dies war aber ebenfalls nicht erfolgreich, da zum einen die Hänge teilweise zu homogen sind und somit zu große Einheiten ausgewiesen werden. Zum anderen konnten keine geeigneten Kriterien abgeleitet werden, die im Falle eines heterogenen Hangabschnitts diesen automatisch in sinnvolle Einheiten unterteilt. Entweder wurden zu breite Bereiche als Fixpunkte ausgewiesen oder zwischen einzelnen Einheiten blieben Lücken, die von Hand hätten nachdigitalisiert werden müssen, was für die Größe des Untersuchungsgebietes nicht zu leisten gewesen wäre.

### **7.1.6 Gefahrenberechnung**

#### **7.1.6.1 *Qualitativ***

(Die präsentierte Gefahrenkarte (Abb. 7.24) befindet sich zusätzlich in digitalem Format auf der beigelegten CD-ROM)

Unter der Annahme, dass die gefährdetsten Bereiche auch jene sind, in denen in Zukunft am ehesten gravitative Massenbewegungen auftreten werden, wird die Gefährdungskarte in eine qualitative Gefahrenkarte überführt. In Abb. 7.24 ist die Gefahrenkarte auf Basis von Abb. 7.23 dargestellt.

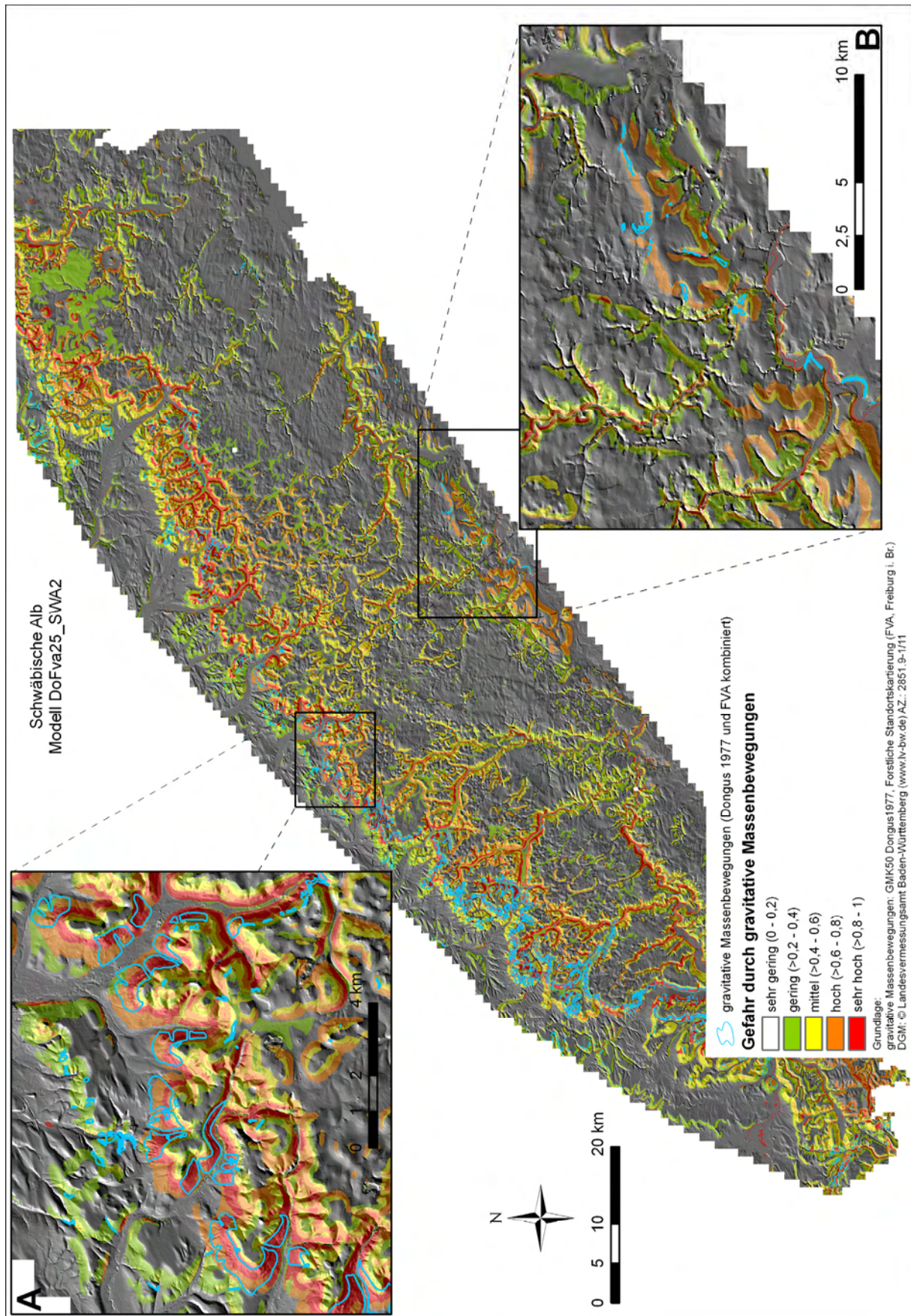


Abb. 7.24: Gefahrenkarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)

### 7.1.6.2 Quantitativ

Die quantitative Gefahrenberechnung konnte leider nicht durchgeführt werden, da die Basisdaten in Form eines in sinnvolle gravitative Massenbewegungseinheiten diskretisierten Reliefs sowie die darauf basierende Volumenberechnung nicht durchgeführt werden konnten. Auf die Volumenberechnung hätte für eine Übergangslösung noch verzichtet werden können, nicht aber auf die Massenbewegungseinheiten.

### 7.1.7 Diskussion

Die Ergebnisse der regionalen Gefahrenanalyse für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb zeigen, dass oft vielfältige Informationen über vergangene gravitative Massenbewegungen in einer Region vorhanden sind. Dabei sind diese Informationen oftmals ein wenig „versteckt“, so dass nicht direkt ersichtlich ist, welche Institutionen unter Umständen Informationen zu gravitativen Massenbewegungen sammeln (so die Archive der Straßenbauverwaltung, Forsteinrichtungswerke, oder die Forstliche Standortskarte). Es ist durchaus davon auszugehen, dass noch weitere Institutionen über entsprechende Informationen verfügen. Wie bereits erwähnt, dürfte das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau zumindest über die letzten 50 Jahre das beste Archiv an Informationen bereithalten. Leider war es aber dem Amt v.a. aus Gründen personeller Ressourcenengpässe nicht möglich, eine Kooperation mit dem Forschungsprojekt einzugehen, so dass dieses Archiv nicht ausgewertet werden konnte.

Historische Analysen bezüglich gravitativer Massenbewegungen haben sich bisher im Wesentlichen auf die Auswertung von Zeitungsarchiven, wissenschaftlichen Publikationen oder Sekundärquellen gestützt (z.B. Guzzetti et al. 1994, Damm 2002 und Guzzetti und Tonelli 2004). Primärquellen, auf denen der Hauptfokus von *InterRISK History* lag, wurden nur selten genutzt. Die Ergebnisse von *InterRISK History* zeigen aber den großen Vorteil der Analyse von Primärquellen. Es werden wesentlich detailreichere Informationen bereitgestellt, die zudem nachträglich nicht gefiltert wurden. Oft beinhalten nur die Primärquellen Informationen über die Größe der gravitativen Massenbewegung, die für die Rekonstruktion des Ereignisses, für die Landschaftsgeschichte und für historische Frequenz-Magnituden-Analysen von außerordentlicher Bedeutung sind. Auf die Probleme historischer Recherchen wurde bereits in Kap. 2.8 eingegangen.

Eine Hauptquelle für die Bereitstellung von Informationen über gravitative Massenbewegungen sowohl bei Brennecke (2006), als auch in der vorliegenden Arbeit, stellt das neue hochaufgelöste DGM1 dar. Diese Quelle konnte bei weitem nicht erschöpfend ausgewertet werden, doch hat sie wesentlich zum Erkenntnisgewinn über die Aktivitäten der gravitativen Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb beigetragen. Neben der Erkundung von gravitativen Massenbewegungen, können auch zahlreiche weitere, insbesondere historische oder geomorphologische Fragestellungen auf Basis des DGM1 bearbeitet werden.

Eine letzte hilfreiche Quelle stellen multitemporale Luftbilder dar. Derzeit noch laufende Arbeiten zeigen, dass für ein 26,6 km<sup>2</sup> großes Untersuchungsgebiet um den Mössinger Bergrutsch mittels multitemporaler Luftbildinterpretationen in Kombination mit DGM1-Analysen 240 gravitative Massenbewegungen kartiert werden konnten (Galli 2007, Persönliche Mitteilung). Der große Vorteil der multitemporalen Luftbildinterpretation ist, dass die Ereignisse auch datiert werden können. Die vorläufigen Ergebnisse sind in Tab. 7.5 dargestellt.

Tab. 7.5: Alter und Anzahl gravitativer Massenbewegungen in einem Untersuchungsgebiet im Mössinger Raum auf Basis der multitemporalen Luftbildinterpretation in Kombination mit DGM1-Analysen (Galli 2007, Persönliche Mitteilung)

Alter der gravitativen Massenbewegung	Anzahl
sehr alt	8
vor 1945	92
1945	10
1945-1967	60
1968	53
1968-1992	2
1983	7
1984-1991	3
1992	5
1993-2001	0
2002	0
	240

Diese Ergebnisse weisen einmal mehr in die Richtung, dass die Hänge der Schwäbischen Alb eine größere Aktivität von gravitativen Massenbewegungen aufweisen, als bislang vermutet. Des Weiteren verdeutlichen diese Resultate aber auch die noch existierende Lückenhaftigkeit der historischen Zeitreihe. Insbesondere sind die zahlreichen Ereignisse von 1968 bisher nicht bekannt gewesen. Dies liegt vor allem daran, dass bisher der Hauptfokus auf älteren Ereignissen gelegen hat, abgesehen von den Forsteinrichtungswerken und dem Archiv der Baustoff- und Bodenprüfstelle.

Aus all diesen Ergebnissen wird offensichtlich, welchen Stellenwert die Aufarbeitung historischer Informationen zu gravitativen Massenbewegungen hat. Ohne diese Informationen ist der Geomorphologe auf die Anwendung seines Erfahrungsschatzes in Kombination mit Geländebefunden angewiesen, die zu einer für ihn plausiblen Hypothesenbildung führen. Solange die entsprechenden Informationen nicht vorliegen, mögen die getroffenen Hypothesen ihre Berechtigung haben. Sie können aber durch neue Erkenntnisse zu historischen Ereignissen in Erklärungsnot kommen. Die Zusammentragung aller bisher verfügbaren Informationen scheinen genau dieses in der Schwäbischen Alb zu bewirken, so dass deutliche Anzeichen vorhanden sind, dass die Aktivität der gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb größer ist als bisher angenommen. Weitere Arbeiten in

diese Richtung werden wiederum mehr Erkenntnisse bringen, die vielleicht die neu aufgestellten Hypothesen in Erklärungsnot bringen oder aber bestätigen.

Der neue Datensatz zu gravitativen Massenbewegungen im Mössinger Raum bietet die Möglichkeit, den für das Obere Filstal erfolgreichen Ansatz zur Berechnung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit auf seine Tauglichkeit in einem noch kleineren Teilbereich der Schwäbischen Alb zu untersuchen.

Die Gefährdungsmodellierung für die Schwäbische Alb macht sehr deutlich, dass große Bereiche vor allem entlang des Albtraufs, aber auch im Albvorland sowie entlang der Flusstäler durch gravitative Massenbewegungen gefährdet sind. Die in den Abb. 7.18 und 7.19 dargestellten Unterschiede der Aktivität der gravitativen Massenbewegungen in Abhängigkeit vom Ausstreichen der obersten Mitteljuratone kann in der endgültigen Gefährdungskarte nicht abgebildet werden. Eine Berücksichtigung des Distanzparameters führte zu einer Überanpassung des Modells an die Verbreitung der gravitativen Massenbewegungen am Albtrauf. In diesen Modellen wird somit nicht die Gefährdung durch vor allem kleinere gravitative Massenbewegungen in den Flusstälern, aber auch im Albvorland wiedergegeben. Diese täuschen daher eine falsche Sicherheit vor, so dass sich für das andere Modell entschieden wurde, obschon die Aktivitätsunterschiede nicht herausgearbeitet werden. Eine ausführlichere Diskussion der Gefährdungs- und Gefahrenmodellierung erfolgt im Rahmen des folgenden Kapitels.

## **7.2 Gefahrenanalyse Oberes Filstal**

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung sowie der qualitativen Gefahrenberechnung präsentiert. Die berechneten Wiederkehrintervalle wurden bereits in Kap. 7.1.3 präsentiert. Da der Ansatz der Volumenberechnung und die Ausweisung von gravitativen Massenbewegungseinheiten nicht erfolgreich umgesetzt werden konnten, können in diesem Kapitel keine Ergebnisse für die Volumenberechnung sowie die quantitativen Gefahrenberechnung präsentiert werden.

### **7.2.1 Gefährdungsmodellierung**

(Die präsentierten Gefährdungskarten (Abb. 7.25 bis Abb. 7.27) befinden sich zusätzlich in digitalem Format auf der beigelegten CD-ROM)

Für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal wurden zahlreiche Gefährdungsmodellierungen auf Basis der logistischen Regression durchgeführt. Als Eingangsdatensatz für die gravitativen Massenbewegungen stand der qualitativ hochwertige Datensatz von Brennecke (2006) zur Verfügung, bei dem alle kartierten Ereignisse zusammen in die Berechnung eingingen und nicht nach den

verschiedenen Typen unterschieden wurde. Des Weiteren wurde insbesondere die Auswirkung von verschieden aufgelösten geologischen Basisdaten untersucht. Überraschenderweise war weder bei der automatischen, schrittweise rückwärtsgerichteten Variablenselektion, noch bei umfangreichen manuellen Modellierungen die Geologie im Maßstab 1:25.000 signifikant, so dass dieser Parameter im endgültigen Modell LsDGM10GK25 (Abb. 7.25) nicht enthalten ist (Tab. 7.6). In diesem Modell sind nur die Hangneigung und die vertikale Wölbung hoch signifikant. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der GK25 zeigte sich die Geologie im Maßstab 1:200.000 (GÜK200) in den Modellen LsDGM10GÜK200\_1 und LsDGM10GÜK200\_2 als hoch signifikant. Da aber im Modell LsDGM10GÜK200\_1 teilweise relativ ebene Hochflächen sowie Flussauenbereiche als gefährdet ausgewiesen wurden, wurde wie beim Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb der binäre Hangbereichsparameter (Formelement Hang) aufgenommen und führte auch in diesem Fall zu einer deutlichen Verbesserung des Modells LsDGM10GÜK200\_2 (Abb. 7.26).

Was die statistischen Gütemaße angeht, so liegen vor allem die AUROC-Werte sowohl bei den Trainingsdatensätzen als auch bei den Testdatensätzen, in einem sehr hohen Bereich (mindestens 0,81) und sind somit nach Hosmer und Lemeshow (2000) ebenfalls den Klassen „*excellent*“ und „*outstanding*“ zuzuordnen. Der Anteil der gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen ist wesentlich geringer als bei den Modellierungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb und überschreitet die 70% - Grenze nicht.

In einem weiteren Schritt wurde überprüft, inwieweit das beste Modell für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb geeignet ist, um Aussagen über die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal zu machen. Obwohl das Modell DoFva25\_SWA\_2 (Abb. 7.27) mit anderen gravitativen Massenbewegungsdatensätzen berechnet wurde, liegen 80,24% der gravitativen Massenbewegungen aus dem Datensatz von Brennecke (2006) in den zwei höchsten Gefährdungsklassen. Somit liefert dieses Modell wesentlich bessere Werte für dieses Gütemaß als die anderen, speziell für das Obere Filstal berechneten Modelle.



Tab. 7.6: Übersicht über die Gefährdungsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal mittels logistischer Regression inklusive der Gütemaße

<b>Modell LsDGM10GK25</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	3,71E+00	2,20E+00	<0,1
Hangneigung	1,10E-01	1,99E-02	<0,001
Exposition	-5,96E-03	1,84E-03	<0,01
Vertikale Wölbung	-1,81E+03	3,19E+02	<0,001
Böden	-1,04E-01	4,30E-02	<0,05
AUROC	Trainingsdatensatz	0,84	
	Testdatensatz	0,81	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		60,55	
Geomorphologische Güte		mittel	
<b>Modell LsDGM10GÜK200_1</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-3,08E+00	2,79E+00	<1
Hangneigung	1,32E-01	2,28E-02	<0,001
Geologie	2,03E-06	4,78E-07	<0,001
Exposition	-5,45E-03	1,94E-03	<0,01
Vertikale Wölbung	-1,62E+03	3,35E+02	<0,001
Böden	-1,20E-01	4,66E-02	<0,05
AUROC	Trainingsdatensatz	0,88	
	Testdatensatz	0,85	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		66,62	
Geomorphologische Güte		mittel	
<b>Modell LsDGM10GÜK200_2</b>			
	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Signifikanz
Intercept	-2,29E+00	2,99E+00	<1
Hangneigung	9,97E-02	2,39E-02	<0,001
Geologie	2,18E-06	5,43E-07	<0,001
Exposition	-5,00E-03	2,01E-03	<0,05
Vertikale Wölbung	-1,43E+03	3,40E+02	<0,001
Böden	-1,31E-01	5,13E-02	<0,05
Formelement Hang	-3,08E+00	1,16E+00	<0,01
AUROC	Trainingsdatensatz	0,91	
	Testdatensatz	0,93	
Anteil GM <sup>1</sup> in den zwei höchsten Gefährdungsklassen (in %)		69,03	
Geomorphologische Güte		hoch	

<sup>1</sup> GM = Gravitative Massenbewegung

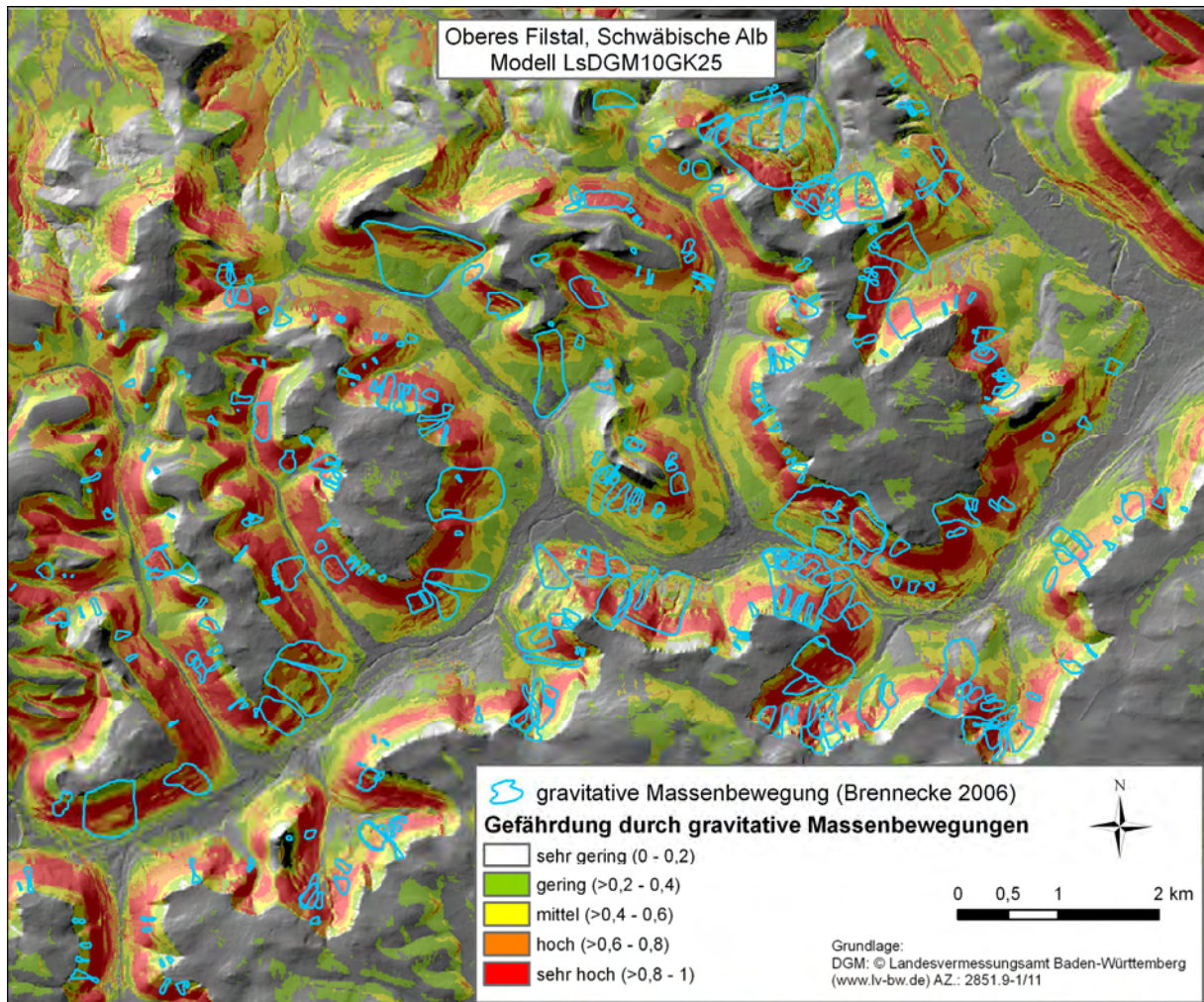


Abb. 7.25: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GK25

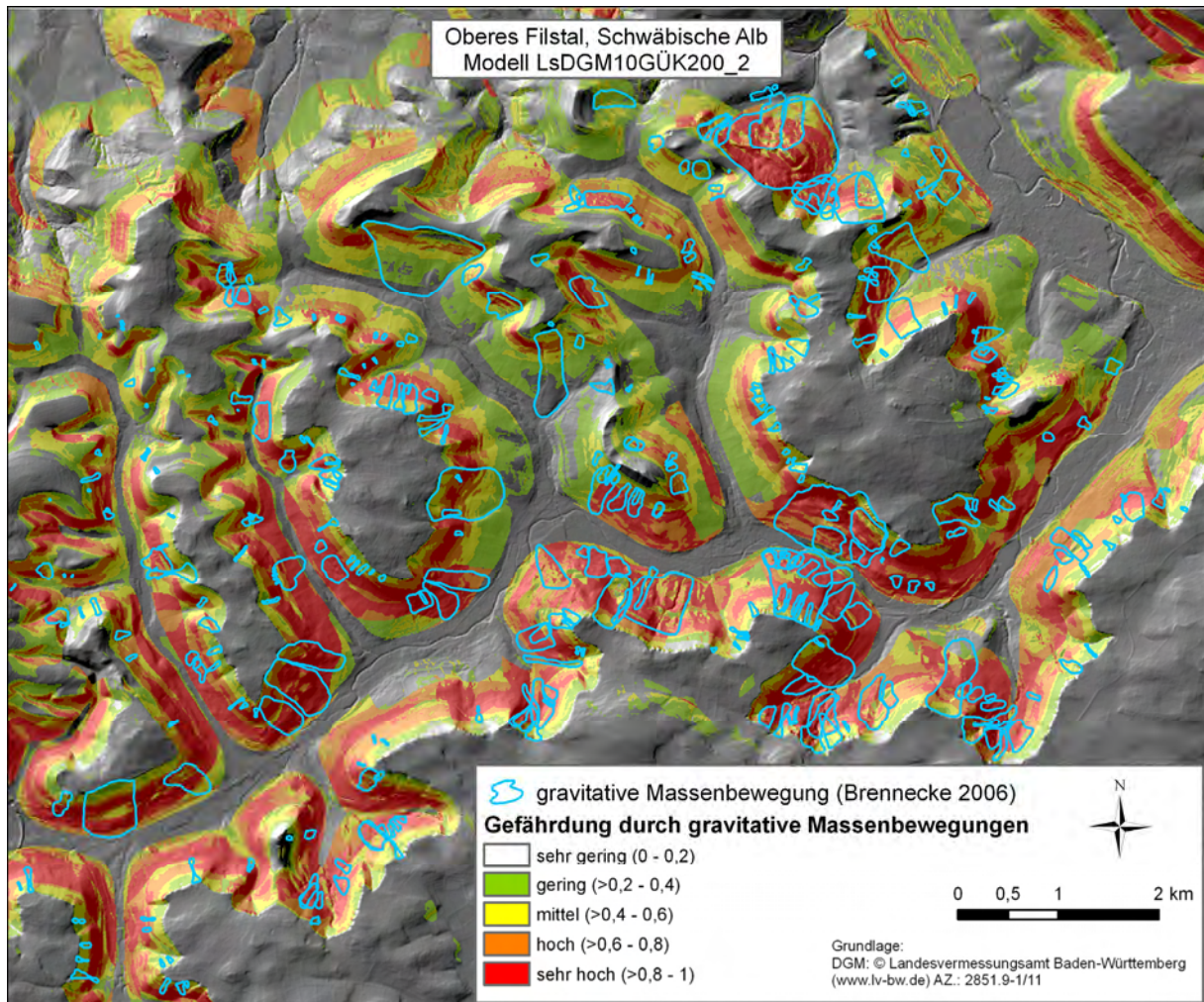


Abb. 7.26: Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GÜK200\_2

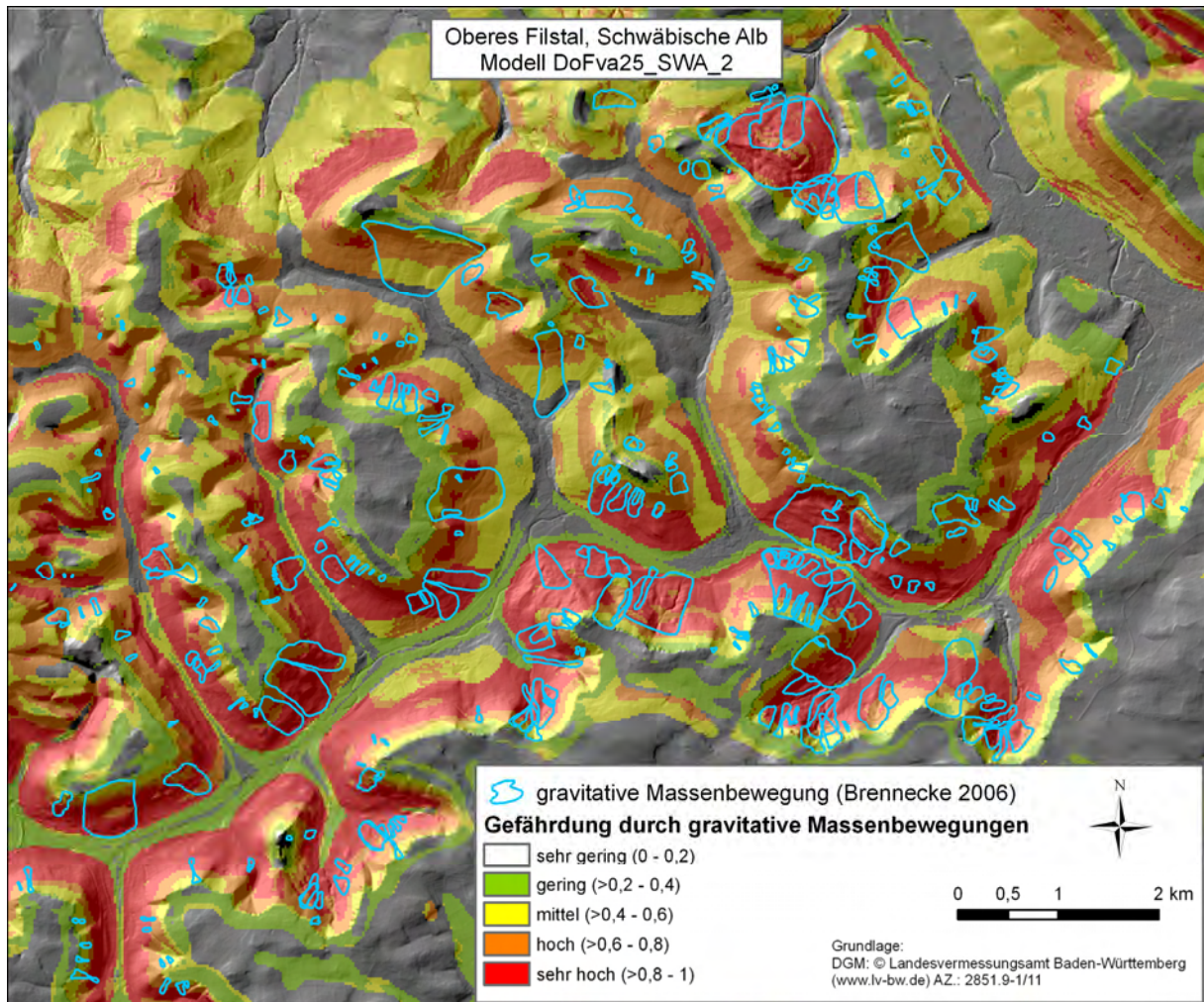


Abb. 7.27: Ausschnitt der Gefährdungskarte für gravitative Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb auf Basis des Modells DoFva25\_SWA\_2

*Diskussion*

Dem Modell LsDGM10GK25 wird eine mittlere geomorphologische Güte zugewiesen, da zum einen teilweise Hochflächen als gefährdet und zum anderen größere gefährdete Hangbereiche als nicht gefährdet ausgewiesen werden. Hingegen wird für die Flussaue weitestgehend keine höhere Gefährdung modelliert, bis auf ein kleines Areal im Nordosten des Filstals. Dabei handelt es sich um ein statistisches Artefakt, für das bei näheren Untersuchungen kein eindeutiger Inputparameter verantwortlich gemacht werden kann. Das Modell LsDGM10GÜK200\_2 weist nur sehr wenige höher gefährdete Bereiche auf der Hochfläche aus, und auch in der Flussaue ist nur das bereits beschriebene Artefakt zu finden. Insgesamt werden die gefährdeten Hänge besser wiedergegeben als bei dem vorherigen Modell, so dass die geomorphologische Güte als hoch eingeschätzt wird. Beim Modell DoFva25\_SWA\_2, welches für das gesamte Untersuchungsgebiet der Schwäbischen Alb modelliert wurde, werden mehr gefährdete Bereiche als höher gefährdet ausgewiesen als bei den spezifischen Oberen Filstal-Modellen. Des Weiteren ist auch nicht das Flussauenartefakt zu finden. Demgegenüber werden aber andere Flussauenbereiche, und die Randbereiche der Hochebenen als gering gefährdet ausgewiesen, so dass insgesamt dem Modell eine hohe geomorphologische Güte zugesprochen wird. Für die weiteren Schritte der qualitativen Gefahren- und Risikoanalyse wird das Modell LsDGM10GÜK200\_2 verwendet, da es von den Modellen mit der Auflösung von 10 m sowohl die besten statistischen, als auch das beste geomorphologische Gütemaß aufweist. Das Modell DoFva25\_SWA\_2 wird im Rahmen der qualitativen Risikoanalyse für die gesamte Schwäbische Alb auch für das Obere Filstal durchgeführt, so dass ein Vergleich der Ergebnisse möglich wird.

Die geomorphologische Güte des Modells DoFva25\_SWA\_2 wurde für das Obere Filstal geringer als für die gesamte Schwäbische Alb eingestuft. Dadurch wird offensichtlich, dass die geomorphologische Güte durchaus in Abhängigkeit des betrachteten Maßstabs festzulegen ist. Insgesamt zeigt gerade die Abschätzung der geomorphologischen Güte der Modelle für das Obere Filstal, dass die Festlegung dieses Maßes durchaus Schwierigkeiten bereiten kann, da es sich unter Umständen bei einem kleineren Raum nur noch um Nuancen handelt, die die Entscheidung für die eine oder die andere Güteklasse bestimmen. Letztendlich handelt es sich um ein subjektives Gütemaß, welches gewisse Probleme in der Nachvollziehbarkeit verursacht. Allerdings hat vor allem die Anwendung bei den Modellierungen im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb den Nutzen eines solchen Gütemaßes gezeigt. Eine ausschließliche Orientierung an objektive statistische Gütemaße kann in die Irre und zu einer Auswahl eines aus geomorphologischer Perspektive nicht optimalen Modells führen. In der Literatur werden meist nur statistische Gütemaße für die Auswahl bestimmter Modelle genutzt. Zudem werden die finalen Karten oft ohne Topographie, d.h. ohne Schummerungsdarstellung, in den wissenschaftlichen Arbeiten dargestellt (z.B. Thein 2000, Lee und Min 2001, Süzen und Doyuran 2004), so dass die Nachvollziehbarkeit der geomorphologischen Güte nicht möglich ist. Daraus resultiert die eindringliche Forderung, zukünftige Gefährdungskarten immer mit Schummerungsdarstellungen abzubilden, so dass für den Außenstehenden die Güte der Karte aus

geomorphologischer Perspektive nachvollziehbar wird und nicht blind den statistischen Gütemaßen vertraut werden muss.

Im Folgenden wird auf das überraschende Modellierungsergebnis eingegangen, dass die GK25 in keinem Modell des Oberen Filstals als signifikant ausgewiesen wird, im Gegensatz dazu die GÜK200 aber als hoch signifikant. Die Gründe dafür liegen darin, dass bei der GK25 Hangschuttbereiche und anstehendes Festgestein detaillierter ausgewiesen werden. Bei der Extrapolation der Geologie in die Bereiche, die in der Originalkarte als gravitative Massenbewegungen ausgewiesen sind, wurden die geologischen Einheiten im direkten Umfeld als Orientierungshilfe herangezogen (siehe Abb. 6.11). Daher kommt es vor, dass einigen gravitativen Massenbewegungen Hangschutt zugewiesen wurde und anderen die verschiedenen Festgesteinseinheiten. Die Kombination aus der detailreicheren, ursprünglichen Karte und der Extrapolation in die Bereiche der gravitativen Massenbewegungen lassen wohl ein Mosaik entstehen, welches bei der zufälligen Punktauswahl unter Nutzung des Datensatzes der gravitativen Massenbewegungen nach Brennecke (2006) zu einem Resultat führt, woraus sich keine Signifikanz der GK25 ergibt. Bei der GÜK200 wird der Hangschutt flächenmäßig viel generalisierter ausgewiesen. Die Folge ist, dass ein Großteil der gravitativen Massenbewegungen in diesen Bereichen liegt, so dass genau diese Einheit für die hohe Signifikanz der GÜK200 sorgt. Deutlich wird das in der Karte an den oft sehr scharf abgegrenzten höher gefährdeten Bereichen.

Die Tatsache, dass trotz hoher AUROC-Werte bei den verschiedenen Modellen des Oberen Filstals geringere Anteile der gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen liegen als bei der Modellierung für das gesamte Gebiet der Schwäbischen Alb, ist zum einen darauf zurück zu führen, dass die Modelle einzelne große Rutschungen weitestgehend nicht erklären können. Zum anderen liegt es an der wesentlich höheren Rasterauflösung von 10 m. Diese höhere Auflösung führt auf Grund der hohen Signifikanz der Hangneigung dazu, dass die in gröber aufgelösten Modellierungen (25m oder 50m) als hoch gefährdet ausgewiesene Bereiche differenzierter dargestellt werden. Der Effekt trat schon beim Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb zwischen den Modellierungen mit den Auflösungen von 50 m und 25 m auf und wird bei einer Auflösung von 10 m noch einmal extrem verstärkt. Insbesondere die alten Rutschgebiete sind im Vergleich zu den mehr oder weniger ungestörten Hängen geomorphometrisch sehr heterogen, d.h. dass sie v.a. im Bereich der Rutschschollen große Verebnungsflächen aufweisen, die bei der höher aufgelösten Modellierung auf Grund der Hangneigung als weniger gefährdet ausgewiesen werden. Genau diese Bereiche gehen aber in die Berechnung des Anteils der gravitativen Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen mit ein und führen so zu geringeren Gütewerten. Zusammenfassend kann also festgehalten werden: Je höher die Rasterauflösung der Eingangsdaten, desto weniger werden die Bereiche von gravitativen Massenbewegungen als hoch gefährdet ausgewiesen. Diese Feststellung wirft zwangsweise zwei Fragen auf: Inwieweit ist es notwendig, dass Ursprungsrelief vor der Auslösung der in dem Eingangsdatensatz vorhandenen gravitativen Massenbewegungen für die

Modellierung zu rekonstruieren? Welche Rasterauflösung ist für die Gefährdungsmodellierung am besten geeignet?

Die Antwort auf die erste Frage ist offensichtlich abhängig von der gewünschten Rasterauflösung. Die Modellierungen aus beiden Untersuchungsgebieten zeigen, dass bei einer Rasterauflösung von 50 m das Relief bereits so generalisiert wird, dass die heterogenen Bereiche alter gravitativer Massenbewegungen nicht mehr zum Tragen kommen und die gesamten Hänge als hoch gefährdet ausgewiesen werden. Bei einer Rasterauflösung von 25 m können die alten Rutschgebiete schon wesentlich detaillierter wiedergegeben werden, so dass größere Verebnungsbereiche ausgewiesen werden, die entsprechend Einfluss auf die Modellierung nehmen. Wie aber aus den Abb. 7.22, 7.23 und 7.26 ersichtlich ist, ist der Einfluss des Reliefs noch nicht so stark, dass alle flacheren Bereiche in Rutschgebieten erfasst werden und zwangsweise eine geringere Gefährdung zugewiesen bekommen. Bei einer Rasterauflösung von 10 m wird das Relief so detailliert wiedergegeben, dass in allen Modellen den flacheren Bereichen in gravitativen Massenbewegungen eine geringere Gefährdung zugewiesen wird (Abb. 7.24 und 7.25), die dann zu einem schlechterem Gütemaß führen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend weiter fortsetzt, je höher die Rasterauflösung wird. Auf Grund dieser Ergebnisse scheint eine Rekonstruktion des Ursprungsreliefs für eine Rasterauflösung größer als 50 m nicht notwendig, unterhalb dieses Grenzwertes könnte es aber als ratsam angesehen werden. Dabei stellen sich aber methodische Fragen zur Umsetzbarkeit der Rekonstruktion des Ursprungsreliefs. Sinnvoll wäre es sicherlich, das Relief aus der Umgebung zu extrapolieren. Dieses könnte unter Umständen für ein kleines Untersuchungsgebiet noch manuell durchgeführt werden, was für große Untersuchungsgebiete nicht geleistet werden. Eine Automatisierung dieses Prozesses scheint durchaus mit einigen Schwierigkeiten bei der Generierung eines geeigneten Algorithmus verbunden. Weiterhin stellt sich zudem die Frage, welches Ursprungsrelief denn zu rekonstruieren ist. Unter der Annahme, dass alle gravitativen Massenbewegungen in dem Untersuchungsgebiet Erstaumlösungen waren, wäre die Frage relativ einfach zu beantworten. In dem Fall könnte das Hangprofil eines ungestörten Hangs rekonstruiert werden. Es zeigt sich aber immer wieder in der Literatur, dass die meisten gravitativen Massenbewegungen heutzutage Reaktivierungen von älteren Massenbewegungen darstellen. So kommt z.B. Bibus (1999) zu dem Ergebnis, dass ca. 90% der jüngeren Ereignisse in der Schwäbischen Alb Reaktivierungen darstellen. Dies hängt unter anderem auch damit zusammen, dass die Scherfestigkeit des Ausgangsmaterials durch die Erstrutschung reduziert wird und somit die Schwellenwerte für die Reaktivierung schneller überschritten werden als bei einer Erstaumlösung. Aus diesem Grunde kann es also besser sein, die Gefährdungsanalyse mit dem tatsächlichen Relief anstatt mit dem Ursprungsrelief durchzuführen. Zusätzlich wird die Frage nach dem Ursprungsrelief auch dadurch erschwert, dass es zu mehrmaligen Reaktivierungen an ein und demselben Ort kommen kann und dass die Erstaumlösung einer gravitativen Massenbewegung, die die Basis für die Reaktivierungen in historischer Zeit erst ermöglichte, zu ganz anderen Umwelt- bzw. Klimabedingungen und somit in einem ganz anderen geomorphologischen Prozessregime stattgefunden haben kann. In so einem Fall

existieren gleich mehrere Ursprungsreliefs, so dass die Frage, von welchem auszugehen wäre, nur sehr schwer beantwortet werden kann. In der Literatur gibt es bisher nur äußerst wenige Arbeiten, in denen ein Ursprungsrelief rekonstruiert und auf dieser Basis die Gefährdungsmodellierung durchgeführt wurde (z.B. Van Den Eeckhaut et al. 2006). Sützen und Doyuran (2004) nutzen eine Pufferzone um die Abrisskante, um daraus die morphometrischen Parameter aus dem Zeitraum vor der Rutschung automatisch abzuleiten. In der praktischen Umsetzung stößt dieser Ansatz aber durchaus auf Probleme, z.B. wenn kleinere reaktivierte Rutschungen in größeren älteren Rutschungen auftreten, oder aber, wie im Falle des Oberen Filstals die Abrisskanten oft bis zur Albraufkante hinaufragen und Teile der Pufferzonen somit auf der ebenen Hochfläche liegen würden.

Die Frage, welche Rasterauflösung für die Gefährdungsmodellierung am besten geeignet ist, hängt somit letztendlich vom Ziel und Zweck der Karte ab. Sollen großflächig Gefährdungsbereiche z.B. für die Raumplanung ausgewiesen werden, so eignet sich wahrscheinlich eher eine gröbere Rasterauflösung. Für detaillierte Fragen wie bei der Trassenplanung für lineare Infrastrukturen ist eine höhere Rasterauflösung besser, da einzelne kritische Lokalitäten besser ausgewiesen werden.

### **7.2.2 Gefahrenberechnung**

Ähnlich wie für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb wird die qualitative Gefährdungskarte unter der Annahme, dass die höher gefährdeten Bereiche auch jene sind, in denen am ehesten mit gravitativen Massenbewegungen zu rechnen ist, in eine qualitative Gefahrenkarte transformiert. Da sich aber dadurch an dem Aussehen der Karte bis auf die Klassenüberschrift nichts ändert, wie Abb. 7.24 für die Schwäbische Alb demonstriert, wird hier auf eine Präsentation der Gefahrenkarte verzichtet.

### **7.2.3 Diskussion**

Die Gefährdungsmodellierungen für beide regionalen Untersuchungsgebiete haben gezeigt, dass die logistische Regression sehr gut geeignet ist, um hochwertige regionale Gefährdungskarten für gravitative Massenbewegungen zu produzieren. Dabei stellt sich wie so oft die Frage nach dem notwendigen Maßstab der Eingangsdaten und der am besten geeigneten Rasterauflösung, mit der die Modellierung durchgeführt werden soll. Die Maßstabsfrage der Eingangsdaten wird sehr oft von den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten geklärt. So stand z.B. für die gesamte Schwäbische Alb nur eine GÜK350 zur Verfügung, die aber zu stark generalisiert ist und somit in den Modellierungen nicht berücksichtigt wurde. Daher wurde für einen etwas kleineren Ausschnitt der Schwäbischen Alb, für den verschiedene Blätter der GÜK200 vorlagen, die Modellierung durchgeführt, was aber im Vorfeld zu einem enormen Arbeitsaufwand bei der Datenhomogenisierung führte. Die GK25 lag nur für einen sehr kleinen Ausschnitt der Schwäbischen Alb vor, aus dem das Obere Filstal ausgewählt wurde. Es wäre durchaus sehr wünschenswert, wenn in Zukunft die Geobasisdaten, und hier vor allem die GK25 und die GÜK200 flächendeckend und homogenisiert verfügbar wären. Trotz des Spezialfalls bei den Berechnungen im Oberen Filstal, bei dem die GK25 als nicht signifikant aus dem Modell rausgeflogen



ist, wird davon ausgegangen, dass auf Basis der GK25 für weite Bereiche der Schwäbischen Alb wesentlich bessere Gefährdungskarten produziert werden können als mit der verwendeten GÜK200. Ob dies wirklich so ist, kann sich jedoch erst in weiteren Modellierungen zeigen.

Auf Basis der Gefährdungskarten lassen sich erste qualitative Gefahrenkarten erzeugen, die neben der Schadenpotenzialkarte Verwendung in der qualitativen Risikoanalyse finden.

Leider konnte in dieser Arbeit der vorgeschlagene Ansatz zur quantitativen Gefahrenanalyse nicht umgesetzt werden, da das Untersuchungsgebiet nicht in sinnvolle gravitative Massenbewegungseinheiten unterteilt werden konnte. Dennoch sollen im Folgenden einige Kommentare zu diesem Ansatz geäußert werden.

Der vorgeschlagene Ansatz zur quantitativen Gefahrenanalyse hat den Vorteil, dass er die Gefahr in Abhängigkeit von der Magnitude des zukünftigen Ereignisses berechnet, wie es die Definition erfordert. Eine Erfüllung dieser zentralen Forderung der Definition wird bei keinem der in Kapitel 3.2.1.3 diskutierten Ansätze (u.a. Catani et al. 2005a, Chung 2006, Guzzetti et al. 2006a) umgesetzt.

Sollte das Problem der Diskretisierung des Reliefs in sinnvolle gravitative Massenbewegungseinheiten gelöst werden können, so wäre die Umsetzung der quantitativen Gefahrenkarte möglich. In einem nächsten Schritt müsste allerdings noch das Problem der Zuweisung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit zu den einzelnen Massenbewegungseinheiten in Abhängigkeit von der Magnitude gelöst werden. Wie schon im Methodenkapitel angemerkt, wird die Wiederkehrwahrscheinlichkeit einer gravitativen Massenbewegungen einer bestimmten Magnitude für eine Region bestimmt und kann nicht ohne weiteres auf die einzelnen Massenbewegungseinheiten übertragen werden. Aus der vorgeschlagenen Dividierung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit durch die Anzahl der Massenbewegungseinheiten einer gleichen Größenklasse könnten sehr geringe Wahrscheinlichkeiten resultieren, die insgesamt zu einer Unterschätzung der Gefahren und nachfolgend der Risiken führen könnte. Eine Zuweisung zu jedem Hang würde hingegen zu einer Überschätzung führen.

Die Zuweisung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit stellt vor allem bei rasterbasierten Ansätzen ein großes Problem dar, das Fabbri et al. (2004) und Chung (2006) auf mathematischem Wege zu umgehen versuchen. Dies führt aber zu einer Nichtberücksichtigung der Magnitude des potenziellen zukünftigen Ereignisses, woraus sich zwangsweise sehr große Unsicherheiten in der resultierenden Karte ergeben.

Der Vorteil der Verwendung von einheitlichen „Terrain Units“ (z.B. Guzzetti et al. 2006a) ist, dass über die Anzahl der Ereignisse in einer solchen Einheit in einem gewissen Zeitraum die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen relativ einfach berechnet werden kann. Das Problem dort ist, wie schon erwähnt, die Kopplung mit der Magnitude. Ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes ist, dass eine genaue Abgrenzung der gefährdeten Bereiche innerhalb der „Terrain Unit“ nicht möglich ist.

Die Verwendung der unterschiedlichen Ansätze scheint einmal mehr eine Frage nach dem vorgesehenen Anwendungsbereich zu sein. So ist der Ansatz von Guzzetti et al. (2006a) auf der einen Seite weniger geeignet, um hilfreiche Detailinformationen für eine Trassenplanung zur Verfügung zu stellen. Auf der anderen Seite kann er sehr wohl wertvolle Hinweise für die Raumplanung geben, da relativ einfach verschiedene Szenarien zur Gefahr durch gravitative Massenbewegungen für die nächsten 5, 10, 25 oder 50 Jahre zu berechnen sind (Guzzetti et al. 2006a).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass noch große Herausforderungen hinsichtlich der Erstellung einer ausgereiften Methodik zur Modellierung quantitativer Gefahren mittels regionaler statistischer Ansätze bestehen, die unter Umständen auch in Zukunft nicht zufrieden stellend gelöst werden können.

Anders verhält es sich, wenn sich regionale Gefahrenkarten aus der Analyse und Modellierung einzelner lokaler Prozesse zusammensetzen. Beispielsweise kann für ein Murgerinne, für das ein genügend großer Sedimentspeicher im Einzugsgebiet vorhanden ist, die Wiederkehrwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Wiederkehrintervalle entsprechend starker Niederschläge berechnet werden. Über die Niederschlagsmenge kann auch das potenzielle Volumen des Murgangs abgeschätzt werden, für das dann empirische oder deterministische Reichweitenmodelle eingesetzt werden können. Eine solch hohe Güte an Informationen gewährleistet die Möglichkeit die Gefahren quantitativ abzuschätzen. Wird dies für jedes Murgerinne durchgeführt, kann aus den lokalen Ergebnissen eine regionale Gefahrenkarte generiert werden. Für große Rotationsrutschungen oder komplexe gravitative Massenbewegungen scheint aber auch so ein Vorgehen äußerst schwierig und mit sehr großen Unsicherheiten verbunden.

## **7.3 Gefahrenanalyse Mössingen-Öschingen**

### **7.3.1 Geomorphologische Kartierung**

Das Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen weist über weite Bereiche einen sehr großen, alten Rutschungskomplex auf, der die Spornstirn und die südöstliche Spornflanke umfasst und sich bis zum Öschenbach hinunter ins Tal erstreckt (Abb. 7.27). Eine klare seitliche Abgrenzung wird im Osten durch gravitative Massenbewegungen vom angrenzenden Hangbereich und im Westen durch die Siedlungsentwicklung und der damit verbundenen Umgestaltung der Erdoberfläche erschwert. Im Hangrutschungskomplex finden sich bis zu drei hangaufwärts übereinander liegende Verebnungsbereiche großer Rutschschollen. Während der oberste Verebnungsbereich durchgehend erhalten ist, setzen sich die Verebnungsbereiche der mittleren Rutschschollen aus drei einzelnen Körpern zusammen. Der unterste Verebnungsbereich ist am deutlichsten im Westen direkt oberhalb der Siedlung erhalten. Da die geophysikalischen Ergebnisse keine Anzeichen für Kalksteintrümmer im Nordwesten dieses Verebnungsbereiches anzeigen (Kruse 2006 und Sass et al. im Druck), reicht die Grenze des Hangrutschungskomplexes nicht bis zur muldenförmigen Tiefenlinie, wie in der ursprünglichen Version der Karte angezeigt wurde. Im Osten ist der unterste Verebnungsbereich nicht so markant ausgeprägt, da nachfolgende Rutschungen die Struktur überprägen. Im mittleren Bereich des Gesamtkomplexes, in dem der unterste Verebnungsbereich fehlt, ist eine wesentlich größere Anzahl an kleinen und größeren Rutschkörpern zu finden, die auf eine stärkere rezente Rutschungsaktivität hinweisen. Unterhalb dieses Bereichs finden sich zudem drei Häuser, die größere Schäden aufweisen. Am Rande der untersten Rutschscholle im Osten erfolgten größere Reaktivierungen, die unterhalb des westlichen Verebnungsbereiches auf Grund der Siedlungsentwicklung nicht feststellbar sind. An der südöstlichen Spornflanke hinterließ ein historischer Steinbruch oberhalb der obersten Rutschscholle eine aktive Schutthalde, an der es öfter zu Steinschlägen aus dem Bereich der wohl geschichteten Kalke kommt.

Im Nordwesten des großen Hangrutschungskomplexes findet sich die bereits erwähnte muldenförmige Tiefenlinie, in deren Verlängerung das Haus steht, welches auf Grund der Gebäudeschäden seit Jahren nicht mehr bewohnbar ist. Insbesondere in der Schummerungsdarstellung des DGM1 lässt sich ein größerer unruhiger Bereich dieser Tiefenlinie zuordnen. Die Grenzen dieses welligen Bereichs könnten eine potenzielle Anrisskante darstellen. Ein ähnlich welliges Relief, allerdings ohne muldenförmige Tiefenlinie, weist auch der Bereich hangaufwärts von der Siedlungsfläche im Norden des Untersuchungsgebietes auf. Zwischen diesen zwei welligen Phänomenen befindet sich ein ungestörter Hangbereich. Weiter nordöstlich nimmt die Rutschungsaktivität wieder zu und ist mit der im mittleren Bereich des Rutschungskomplexes vergleichbar.

Abschließend soll noch auf die Ansammlung von mehreren sehr kleinen Dolinen hingewiesen werden, die sich in Verlängerung des sich in den Sporn einschneidenden Gerinnes befinden. Sie stellen unter Umständen Anzeichen für einen stärker geklüfteten Bereich im Untergrund dar.

Auf Basis der geomorphologischen Kartierung kann nicht geklärt werden, inwieweit es sich bei den großen Rutschschollen des Hangrutschungskomplexes um mehrfache (*multiple*) oder aufeinander folgende (*successive*) Rotationsrutschungen handelt und ob somit die Rutschschollen eine gemeinsame Gleitfläche aufweisen oder nicht (siehe Kap. 2.1).

Unter der Annahme, dass es sich zumindest bei der untersten und obersten Rutschscholle um aufeinander nachfolgende Rotationsrutschungen handelt, wurden auf Basis der geomorphologischen Kartierung Szenarien der zukünftigen Entwicklung gravitativer Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet entwickelt (Abb. 7.28). Die zentrale Frage ist, inwieweit es möglich ist, dass die alten Rutschschollen ähnlich des Mössinger Bergrutsches reaktiviert werden können, oder ob es gar zu einer Rutschung noch größerer Bereiche kommen kann. Geht man von einer hohen Stabilität der Rutschschollen aus, so ist nur mit kleineren, flachgründigen Rutschungen im gesamten Hangrutschungskomplex zu rechnen (Abb. 7.28 A). Insbesondere auf lange Sicht besteht aber durchaus die Möglichkeit, dass es bei sehr feuchten Witterungs- bzw. Klimabedingungen zu einer Reaktivierung der Rutschschollen kommen kann (Abb. 7.28 B - G). Angenommen, dass die Einschneidung des Gerinnes sowie die Ansammlung von kleinen Dolinen auf der Albhochfläche eine Schwächezone im geologischen Schichtaufbau anzeigen, wäre unter extremsten Bedingungen auch ein Versagen des gesamten Sporns denkbar (Abb. 7.28 H).

Die große Anzahl kleinerer Rutschungen im Untersuchungsgebiet in Kombination mit dem Fehlen von aufgerissenen Spalten im Bereich der großen Rutschschollen zeigt, dass das Szenario A die Situation der vergangenen Jahre und Jahrzehnte am besten wiedergibt.

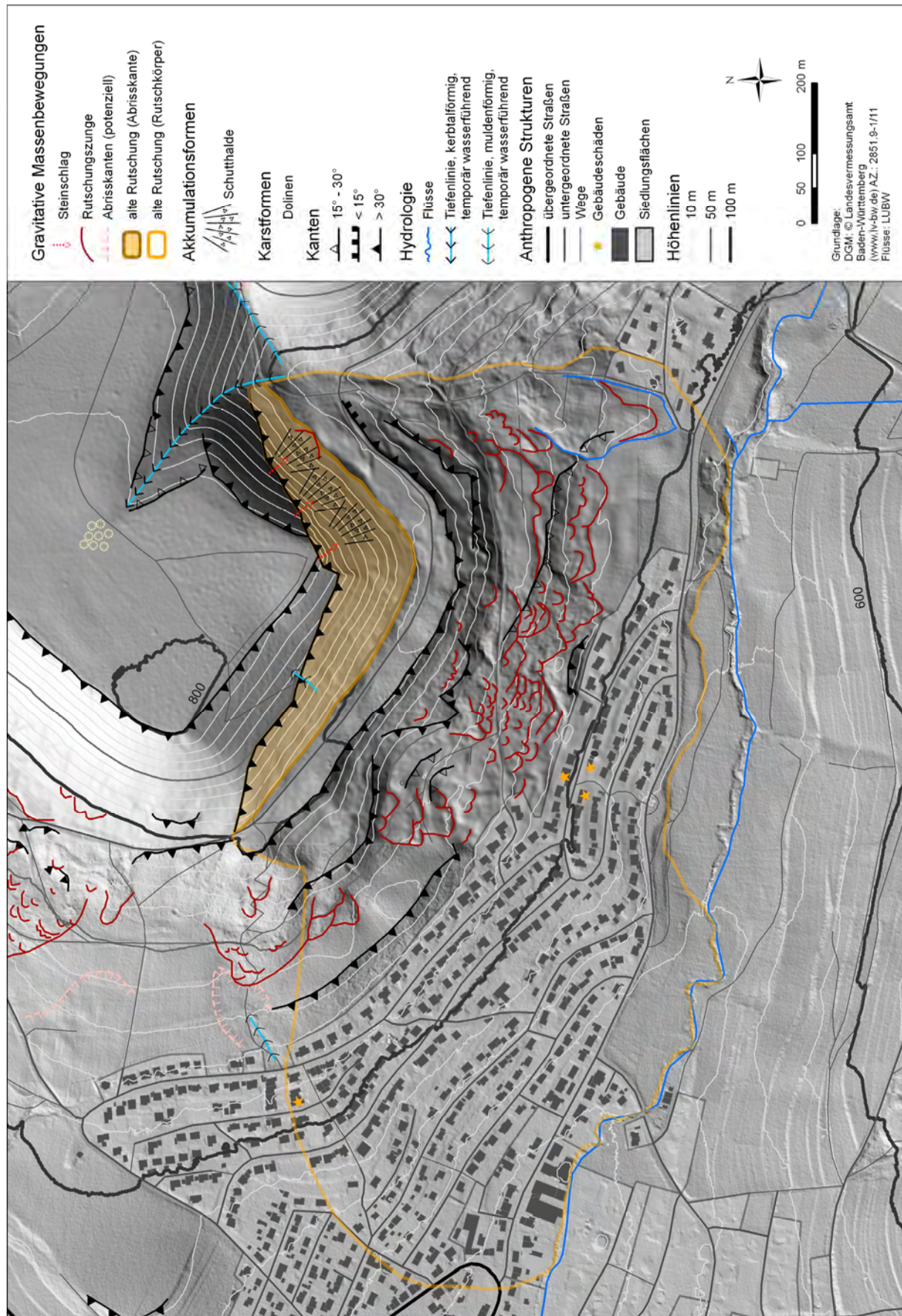


Abb. 7.28: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen

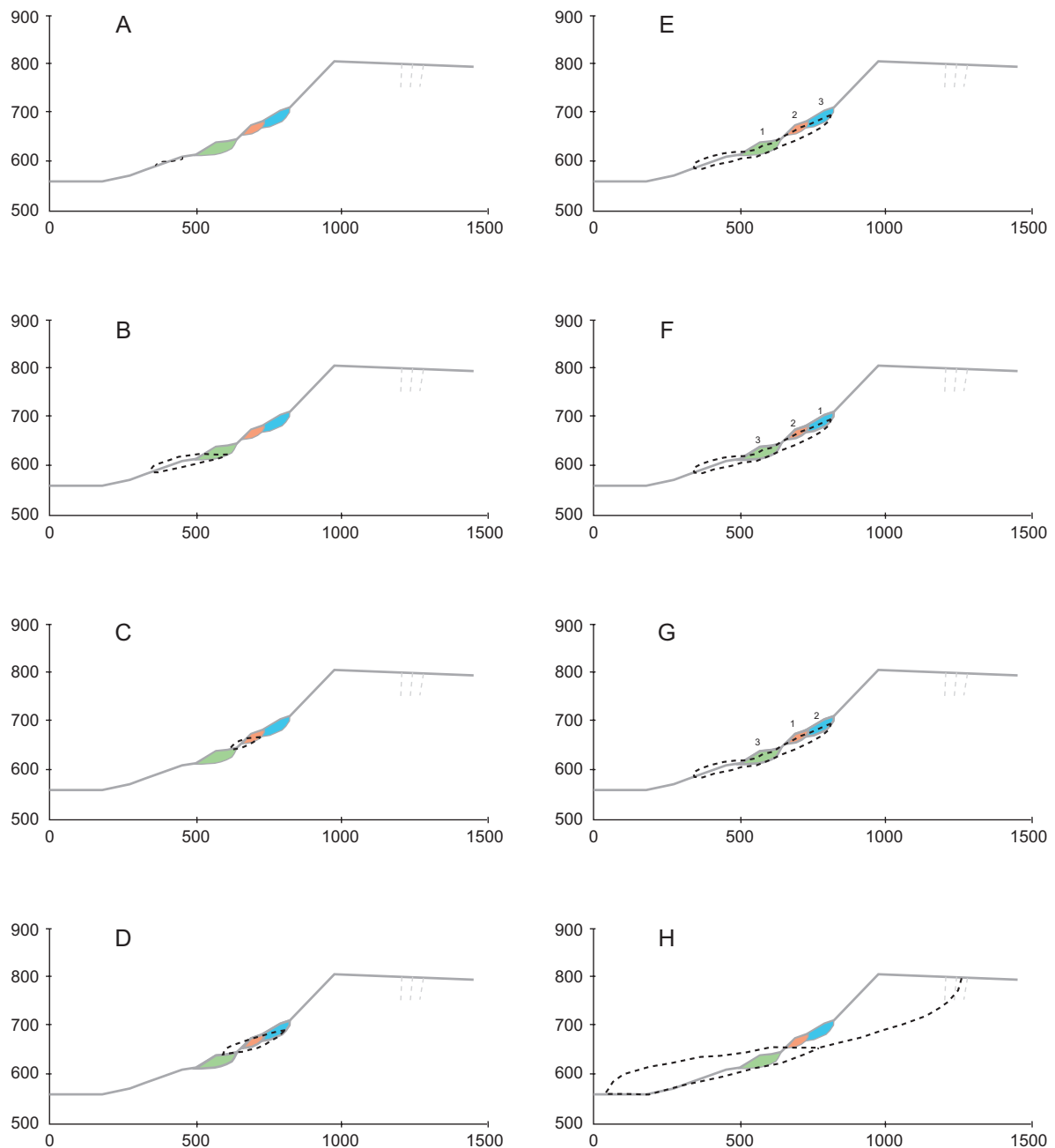


Abb. 7.29: Szenarien zur Entwicklung zukünftiger gravitativer Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (A = nur flachgründige Bewegungen unterhalb der großen Rutschscholle, B – D = Reaktivierung einzelner Rutschschollen, E – G = durch Reaktivierung einzelner Rutschschollen Reaktivierung der anderen Rutschschollen (in unterschiedlicher Reihenfolge), H = Rutschung des gesamten Sporns)

### 7.3.2 Bohrungen und Laboranalysen

Die Bohrlokalitäten und damit die Inklinometerstandorte wurden auf Basis von umfangreichen Geländebegehungen so ausgewählt, dass die Dynamik aller wesentlichen Bereiche des Hangrutschungskomplexes (oberste und unterste Rutschschollen, Auslaufbereich unterhalb der untersten Rutschscholle, mittlerer Bereich mit zahlreichen kleineren Rutschungen, Auslaufbereich der Reaktivierungen unterhalb der untersten Rutschscholle im Osten des Komplexes) erfasst werden können.

Die Bohrkerne Oes02 (unterste Rutschscholle) und Oes03 (oberste Rutschscholle) zeigen einen sehr ähnlichen Aufbau mit zerbrochenen Kalksteinbrocken in einer tonig schluffigen Matrix im unteren Bereich (Anhang 1). Bei diesen handelt es sich um Material des Rutschkörpers. Im oberen Bereich finden sich bei beiden Bohrkerne Kolluvien, welche auf Grund der Senkenlage bei Oes02 wesentlich mächtiger ausgeprägt sind. Innerhalb des Kolluviums wurde bei Oes02 in einer Tiefe von ca. 3 m ein Kohlerest gefunden, der auf ein Alter von  $3630 \pm 60$  BP bzw.  $1985 \pm 215$  cal BC ( $^{14}\text{C}$ -Alter, Ua-23912, Tandem Laboratory, Uppsala University, Schweden) datiert werden konnte. Da sich das Kolluvium erst nach der Ablagerung der Rutschscholle gebildet haben kann, gibt dieses ein Mindestalter der Rutschscholle an.

In Oes06 aus dem mittleren Bereich des Rutschkomplexes zeigen sich oberhalb von 9,50 m ebenfalls zerbrochene Kalksteinbrocken in einer tonig schluffigen Matrix, die von einer feinkörnigen Schicht unterbrochen sind (Anhang 1). Unterhalb von 9,50 m findet sich nur noch ein geringer Bodenskelettanteil. Der gesamte Bohrkern wird als Rutschmasse interpretiert. Bei ca. 7.40 m wurde ein Kohlerest gefunden, der aber nicht datiert werden konnte.

Der Bohrkern Oes05 weist über das gesamte Profil schluffig toniges Feinmaterial mit vernachlässigbarem Bodenskelettanteil auf (Anhang 1). Es konnten mehrere Kohlereste bei ca. 6,80 m und zwischen 11,34 m und 12,60 m gefunden werden. Zwei davon konnten datiert werden und ergaben für ca. 6,80 m ein Alter von  $1180 \pm 35$  BP bzw.  $850 \pm 130$  cal BC ( $^{14}\text{C}$ -Alter, Ua-23913) und für ca. 12 m ein Alter von  $1285 \pm 45$  BP bzw.  $760 \pm 90$  cal BC ( $^{14}\text{C}$ -Alter, Ua-23914, Tandem Laboratory, Uppsala University, Schweden). Da die Kohlereste in die Rutschmasse eingearbeitet worden sind, ist zu vermuten, dass sie mit den Rutschungen verlagert worden sind, so dass sie ein Höchstalter für die Ereignisse darstellen. Die zeitliche Überlappung der beiden Datierungen räumt durchaus die Möglichkeit ein, dass es sich auch um ein einzelnes Ereignis handeln könnte. Dies würde bedeuten, dass beim Ereignis eine mindestens 12 m mächtige Rutschmasse bewegt worden wäre.

Die Bohrkerne Oes01 und Oes04 bestehen bis auf die obersten 1,50 m bei Oes04 nur aus schluffig tonigem Feinmaterial, welches in erster Linie durch die Verwitterung der Ornatentone entstanden sein sollte (Anhang 1). Sie zeigen keinerlei Kalksteinbrocken, so dass sie wohl nicht Bestandteil des großen alten Hangrutschungskomplexes sind.

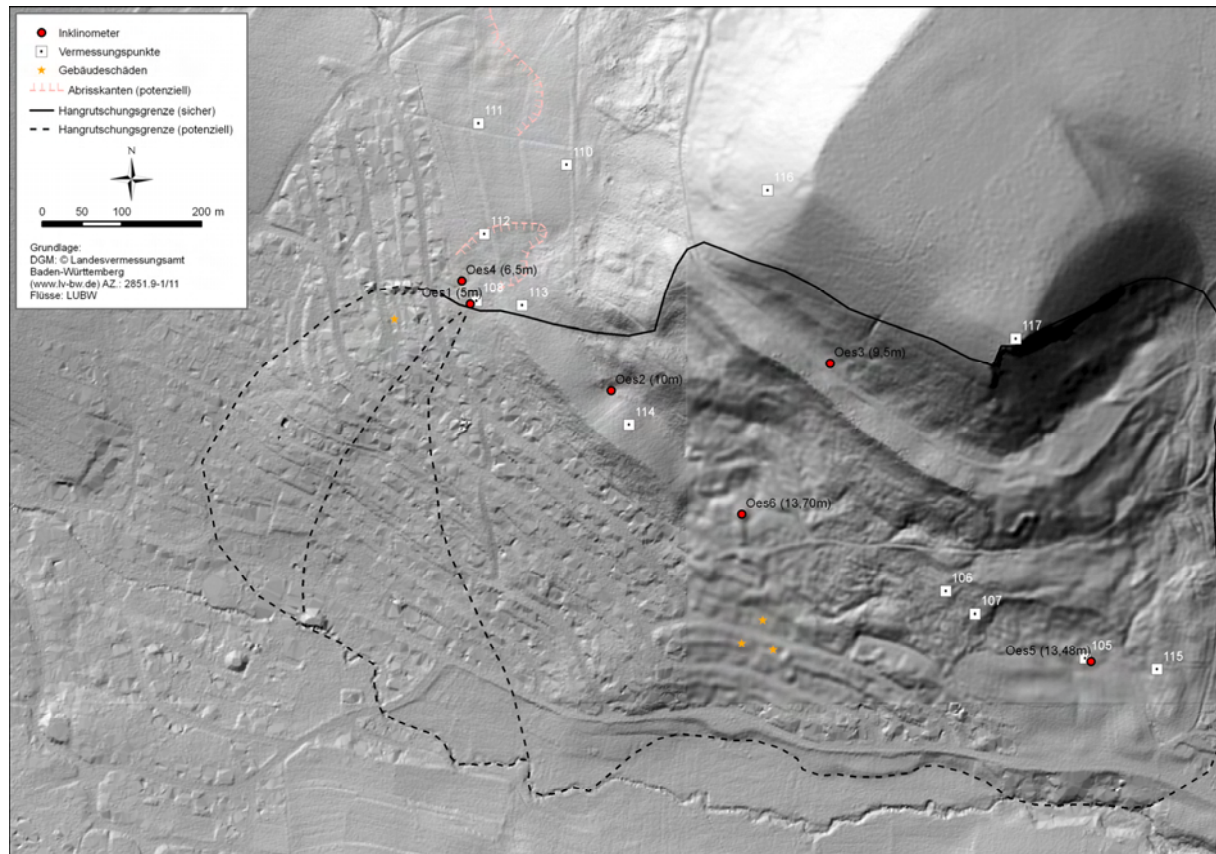


Abb. 7.30: Lage der Bohrungen bzw. Inklinometer und Vermessungspunkte im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen.

### 7.3.3 Inklinometermessungen

Bei der Installation der Inklinometer setzten sich einige Bohrlöcher in den tieferen Bereichen wieder sehr schnell zu, so dass die Tiefe der Inklinometer teilweise wesentlich geringer ist, als die Bohrlöcher selbst.

Von den sechs eingebauten Inklinometern zeigen nur vier (Oes01, Oes04, Oes05 und Oes06) signifikante Bewegungen an (Anhang 2), die aber allesamt extrem langsam sind und einen Betrag von 1 cm in 2 bis 2,5 Jahren nicht überschreiten. Während die Inklinometer Oes01 und Oes04 auf der Wiese oberhalb des am stärksten beschädigten Hauses mit maximal 1,5 m Mächtigkeit nur sehr flachgründige Gleitungen anzeigen, reicht die Gleitbewegung in Oes06 bis in eine Tiefe von ca. 10 m. Das Inklinometer Oes05 weist eine Fließbewegung bis in 5m Tiefe auf. Für die zwei Inklinometern Oes02 und Oes03 in den großen Rutschschollen waren im Messzeitraum keine Bewegungen feststellbar, wobei zu berücksichtigen ist, dass beide nicht die ehemalige Scherfläche durchteufen, da die Bohrung auf Grund des eingesetzten Bohrgeräts vorher abgebrochen werden musste.

Eine einfache Korrelation der signifikanten Bewegungen mit den Niederschlägen erbrachte keine wesentlichen Erkenntnisse zu den Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Die Integration der Verdunstung, sowie des Wasseräquivalents in der Schneedecke aus den regionalisierten Klimadaten der LUBW in die Auswertung führt zu wesentlich besseren Ergebnissen. Die Abb. 7.30 zeigt sehr



deutlich, dass die Kurve des kumulierten verfügbaren Wassers (Verfügbares Wasser = Niederschlag - Verdunstung - Wasseräquivalent in der Schneedecke) auch ohne Berücksichtigung des Oberflächenabflusses einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Bewegungskurven der Inklinometer zeigt. Insbesondere der Auf- und Abbau der Schneedecke hat einen sehr starken Einfluss auf die Bewegungsrate der Gleitungen. Während die Bewegungen bei Oes01 und Oes04 nur in der Aprilmessung eine relativ starke Beschleunigung anzeigen, setzt sich diese Bewegung bei der tiefgründigen Gleitung bei Oes06 noch bis in den Juni fort und weist damit auf die Bedeutung der Mächtigkeit der bewegten Masse im Systemverhalten hin. Leider liegen die regionalisierten Klimadaten nur bis Ende 2005 vor, so dass eine detaillierte Auswertung für die Messungen von 2006 nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit erfolgen kann. Dennoch kann der Einfluss der Schneeschmelze auch für 2006 auf Grund der Geländeerfahrungen zur Zeit der Messungen bestätigt werden. Insgesamt war das Schneeaufkommen 2006 geringer als 2005, was sich in Oes01 und Oes06 in geringeren Bewegungen zur Zeit der Schneeschmelze äußert. In Oes04 scheint eine generell höhere Feuchtigkeit in der muldenförmigen Tiefenlinie eine stärkere Bewegung auch unabhängig von Schneeschmelzereignissen hervorzurufen.

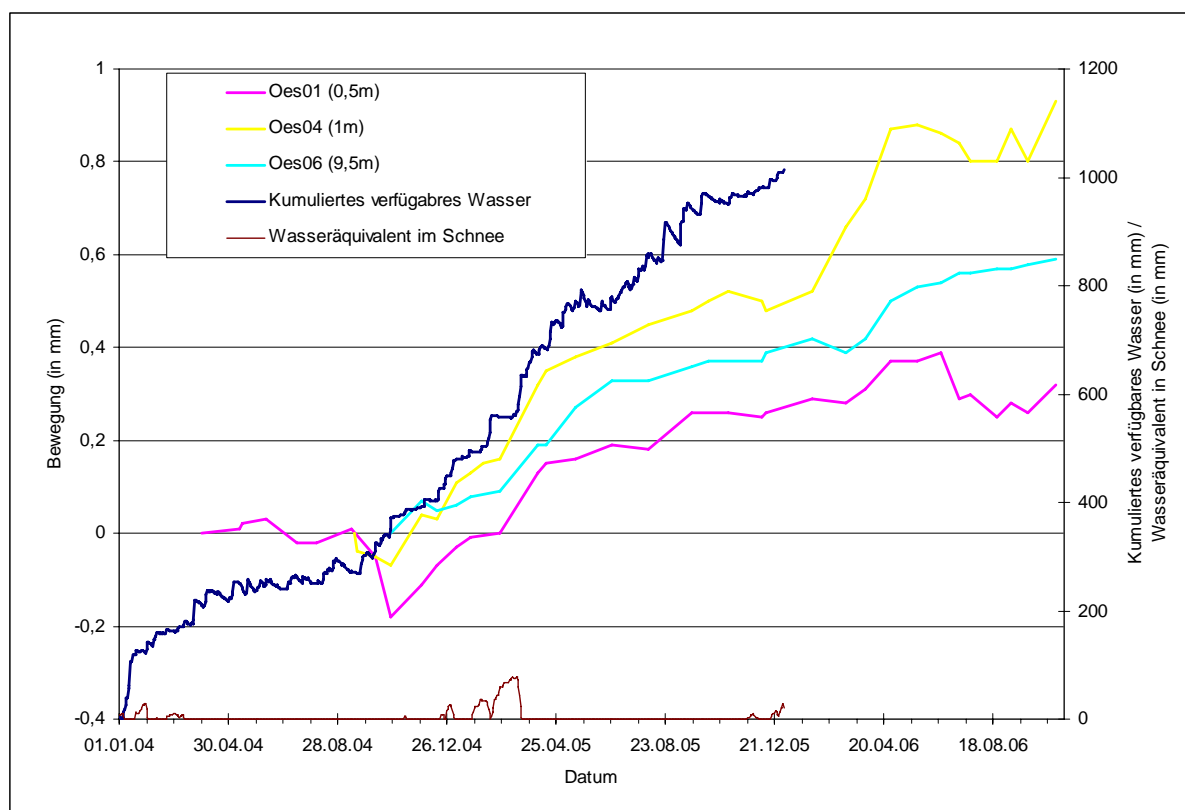


Abb. 7.31: Maximale Bewegungsraten der Inklinometer Oes01, Oes04 und Oes06, kumuliertes verfügbares Wasser, sowie Wasseräquivalent in der Schneedecke (Verfügbares Wasser = Niederschlag - Verdunstung - Wasseräquivalent in der Schneedecke).

### 7.3.4 Nivellementmessungen

Die Nivellementmessungen wurden durchgeführt, um Informationen bezüglich der Höhenveränderung der Inklinometer Oes01 und Oes04 sowie des Vermessungspunktes 108 zu erhalten. Die ersten Messungen von November 2004 bis Juni 2005 zeigen bereits Veränderungen in der Höhe von bis zu 1 cm. Während sich Oes04 und Vermessungspunkt 108 relativ gleichmäßig gehoben haben, sank Oes01 um einen ähnlichen Betrag ab (Abb. 7.30). Die daraufhin häufiger durchgeführten Messungen zeigen einen übereinstimmenden Verlauf aller drei vermessenen Punkte bis zu den letzten zwei Messungen. Bei diesen weicht wiederum Oes01 mit gegensätzlichen Bewegungen von den anderen ab. Die maximale Höhenveränderung über die gesamte Messreihe beträgt knapp 2 cm (bei Oes04). Bei den Geländearbeiten konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass die Dynamik im Bereich des Bodens noch wesentlich größer war. Die Höhenveränderung ist auf das Quellen und Schrumpfen der Tonminerale im Untergrund in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit zurückzuführen.

Während das abweichende Verhalten von Oes01 bei den ersten Messungen noch auf Messfehler zurückgeführt werden könnte, deutet das erneute Auftreten der Abweichungen in den letzten Messungen auf ein zeitweise anderes Systemverhalten bei Oes01 hin, das nicht durch Messfehler zu begründen ist. Die Ergebnisse sind dahingehend überraschend, dass der Vermessungspunkt 108 wesentlich näher an Oes01 liegt als an Oes04 und somit ein abweichendes Verhalten von Oes04 eher zu erwarten gewesen wäre als von Oes01.

Die Analyse der Auswirkungen der Höhenveränderung der Inklinometer auf deren Messergebnisse zeigt keinen offensichtlichen Zusammenhang. Die gemessenen Veränderungen sind aber von Bedeutung für die Interpretation der Ergebnisse aus dem tachymetrischen Vermessungsnetz, da das Heben und Senken der Vermessungspunkte unter Umständen die Lage der Punkte so verändern kann, dass sie geringfügige Rutschbewegungen vortäuschen.

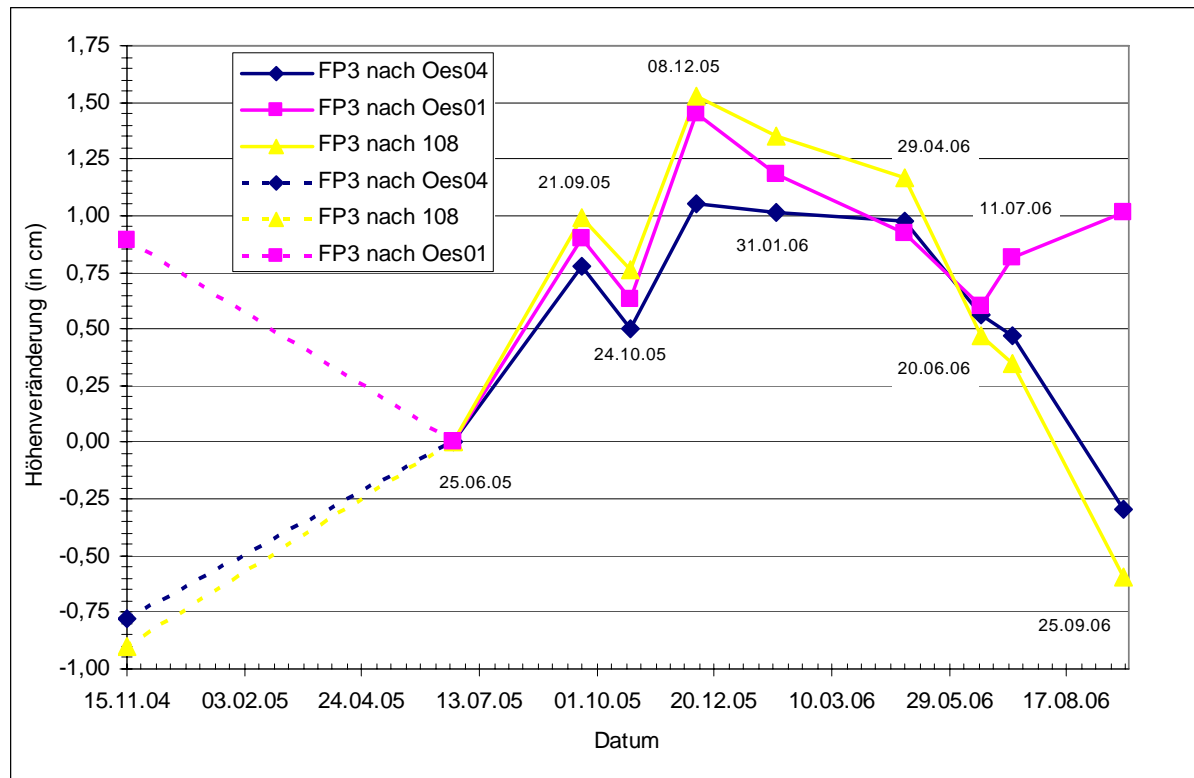


Abb. 7.32: Höhenveränderung der Inklinometer Oes01 und Oes04 sowie des Vermessungspunktes 108 (Anmerkung: Bei FP3 handelt es sich um einen Festpunkt auf der Straße)

### 7.3.5 Volumenberechnung mittels Sloping Local Base Level (SLBL)

Aus den in Kap. 7.3.1 diskutierten Szenarien der Entwicklung zukünftiger gravitativer Massenbewegungen für das Untersuchungsgebiet (siehe Abb. 7.28) wurden drei Szenarien ausgewählt, für die jeweils das potenzielle Volumen auf Basis des SLBL-Ansatzes berechnet wurde. Die Szenarien umfassen eine Reaktivierung der untersten Rutschscholle (Abb. 7.28 A), eine Rutschung der Spornfront und ein Versagen des gesamten Sporns (Abb. 7.28 H). Das Szenario der „Spornfront-Rutschung“ basiert auf den Szenarien, bei denen alle Rutschschollen im Hang reaktiviert werden (Abb. 7.28 E - G). Dieses wurde dahingehend ausgeweitet, dass von einer Destabilisierung und einem Nachrutschen des Oberhanges durch die Reaktivierung ausgegangen wurde. Somit entspricht dieses Szenario in etwa dem Mössinger Bergrutsch. Die jeweilig genutzten Modellierungsgrenzen der Szenarien sind in den entsprechenden Abb. 7.32 - 7.34 dargestellt.

Nach umfangreichen Modellierungen ergaben sich für alle drei Szenarien folgende Parametereinstellungen als die geeignetsten: Ein Wölbungsparameter von -0,1 m, ein Wölbungsgrenzwert von 0,01, sowie die Deaktivierung der Übertiefungsfunktion. Größere Wölbungsparameter von z.B. -0,2 m führten zu einer zu tiefen Lage der Gleitfläche, kleinere Wölbungsparameter von z.B. -0,05 m zu einer zu flachen Gleitfläche.

Die Ergebnisse liefern für das Szenario der Reaktivierung der untersten Rutschscholle ein Volumen von 1,5 Mio. m<sup>3</sup> (Abb. 7.32), für die Rutschung der gesamten Spornfront 5 Mio. m<sup>3</sup> (Abb. 7.33) und

für eine Rutschung, die den gesamten Sporn umfasst, 17,4 Mio. m<sup>3</sup> (Abb. 7.34). In den jeweiligen Abbildungen sind, neben dem Ausgangs-DGM, ein DGM mit der modellierten Gleitfläche, ein Längsprofil mit der modellierten Gleitfläche und die resultierende Mächtigkeitsverteilung dargestellt. Eine Validierung erfolgt über die Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen. In allen drei Szenarien beträgt die modellierte Mächtigkeit im Verebnungsbereich der untersten Rutschscholle maximal 20 m. Dieses stimmt mit den geophysikalischen Messergebnissen von Kruse (2006) und Sass et al. (im Druck) überein.

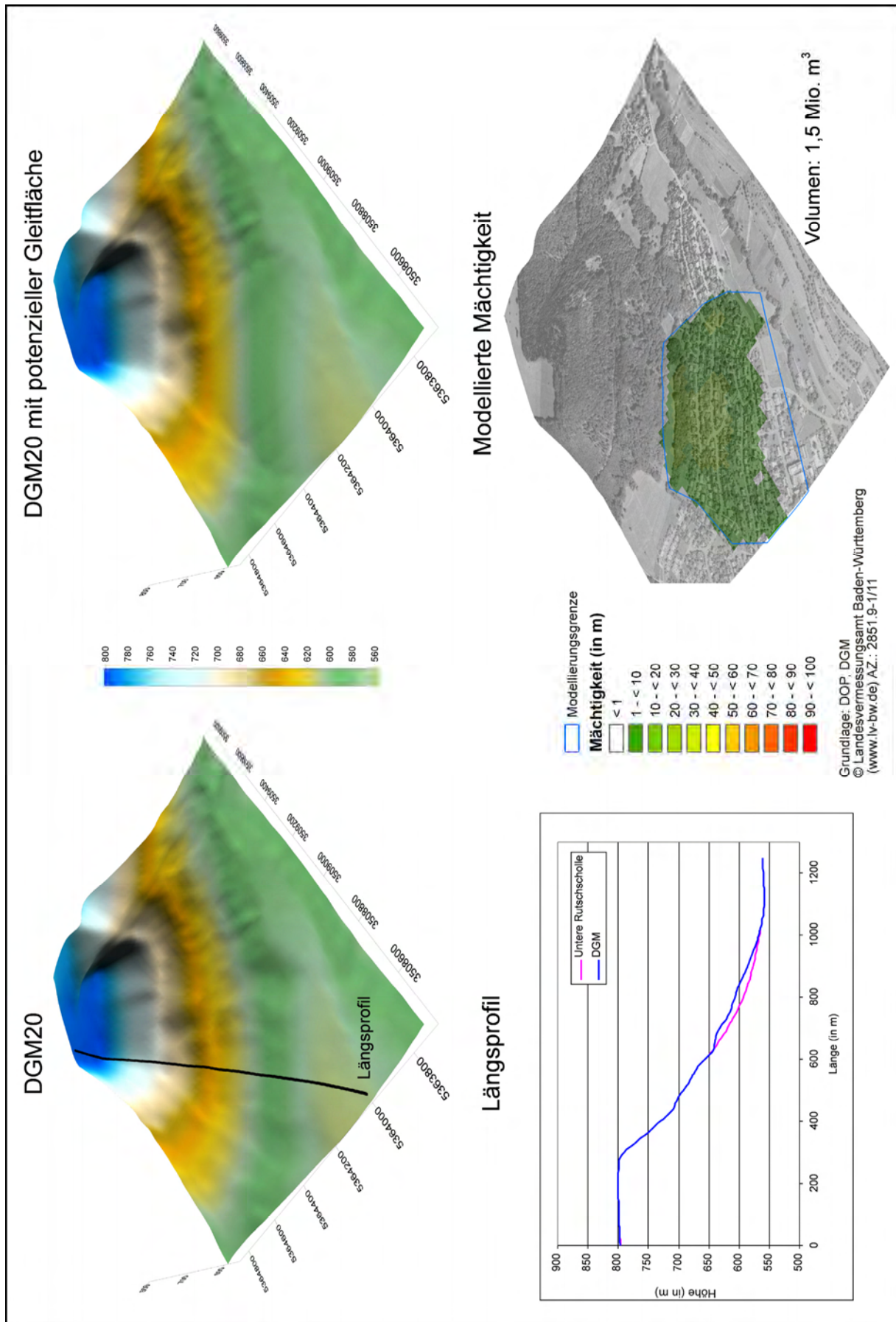


Abb. 7.33: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung der untersten Rutschscholle

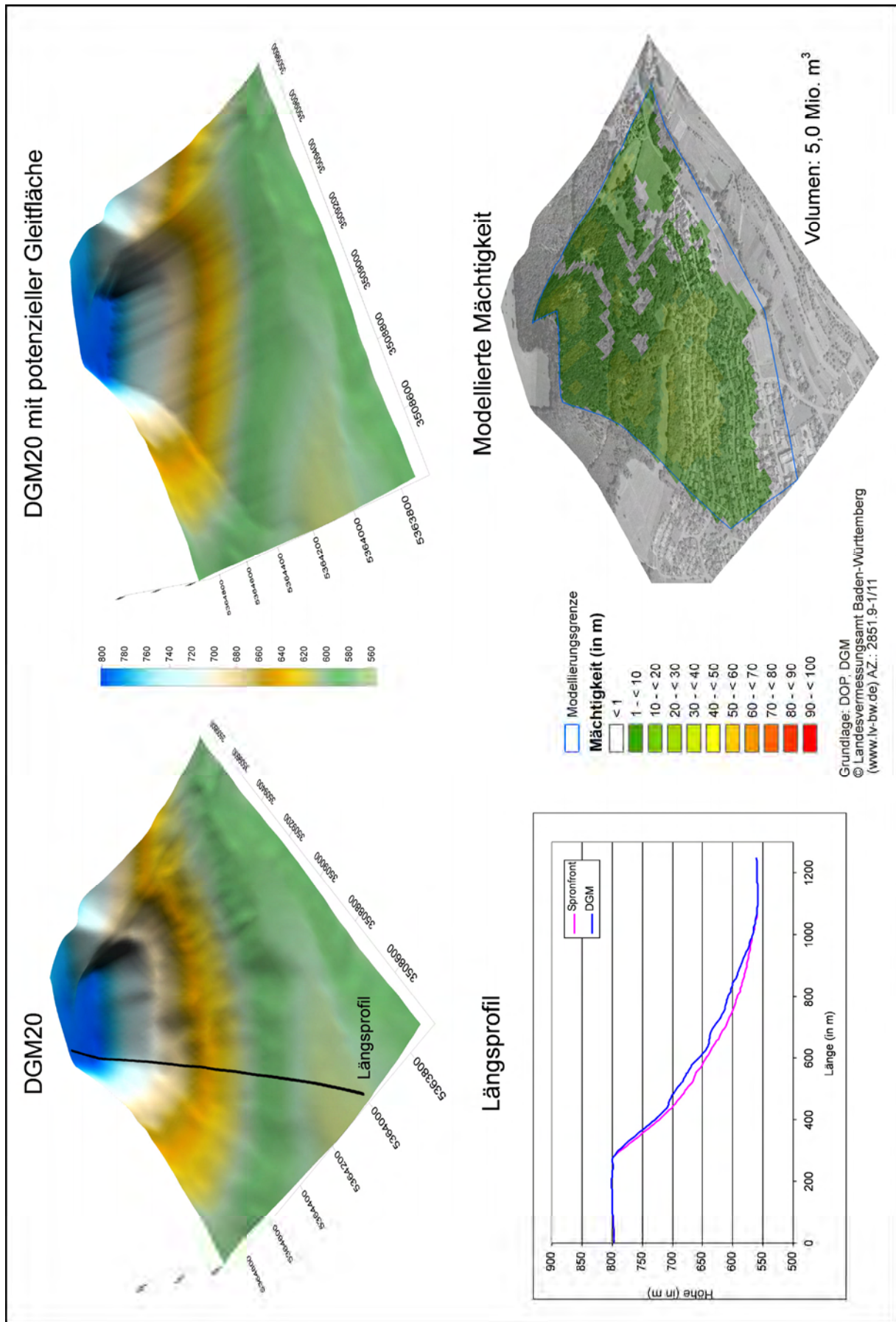


Abb. 7.34: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung der Spornfront

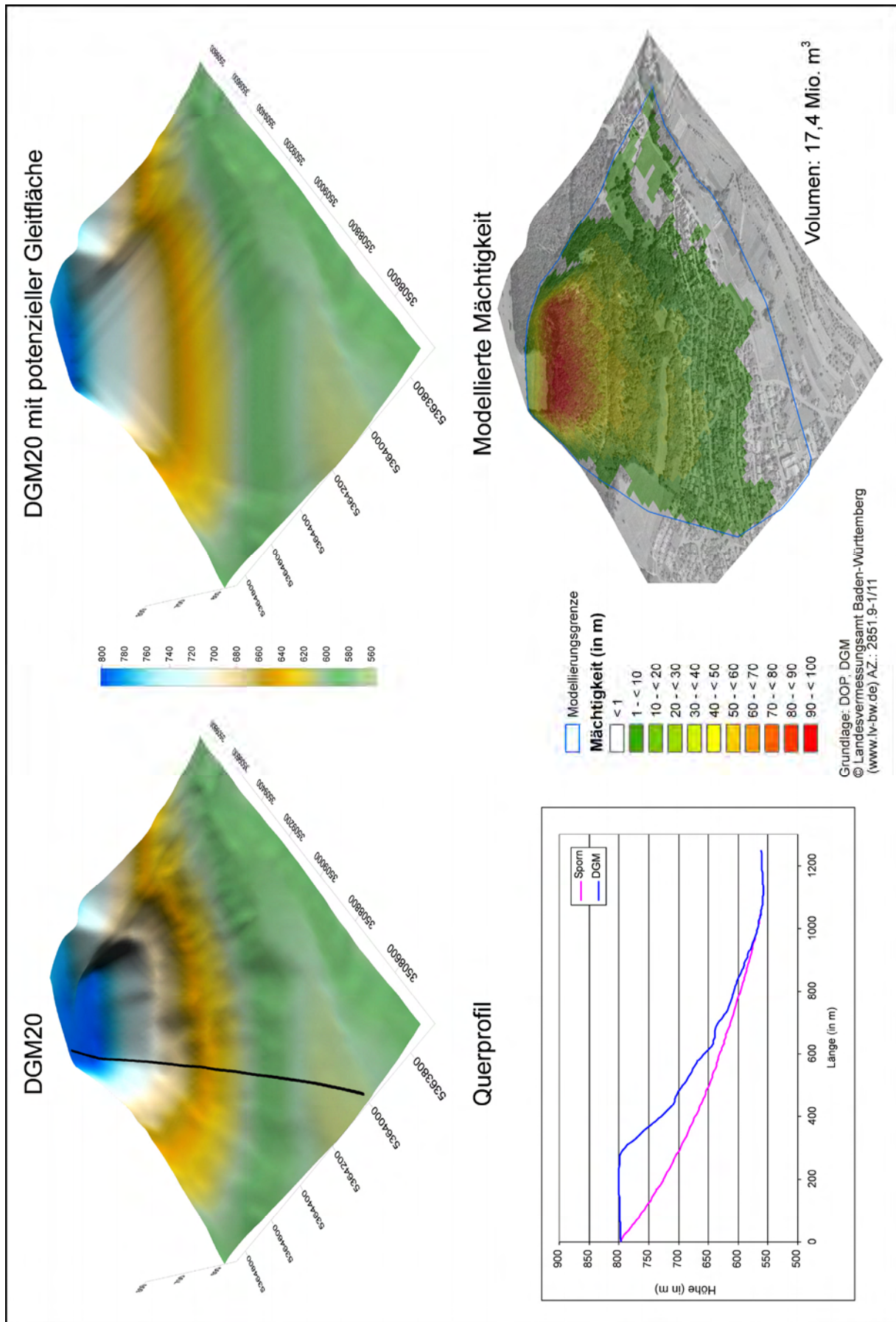


Abb. 7.35: Ergebnisse der Volumenberechnung mittels des SLBL-Ansatzes für das Szenario einer zukünftigen Rutschung des gesamten Sporns

### 7.3.6 Externe Ergebnisse

In diesem Kapitel soll kurz auf andere Arbeiten eingegangen werden, die im Rahmen des *InterRISK* Projekts durchgeführt worden sind und dem Verständnis des Aufbaus des Hangrutschungskomplexes bzw. seiner Aktivität dienen. Diese Informationen sind für die heuristische Gefahrenabschätzung von Bedeutung.

Zur Erkundung des Untergrunds wurden verschiedenste geophysikalische Untersuchungsmethoden eingesetzt. Diese umfassen Georadar, Gleichstromgeoelektrik und Radiomagnetotellurik (Kruse 2006 und Sass et al. im Druck). Die besten Ergebnisse konnten mit der Gleichstromgeoelektrik erzielt werden, so dass im Folgenden kurz darauf eingegangen wird.

Die Ergebnisse der Gleichstromgeoelektrik von Kruse (2006) und Sass et al. (im Druck) für die unterste Rutschscholle zeigen, dass die Bereiche, die Kalksteine oder Kalksteinbrocken aufweisen, auf Grund der Unterschiede in den spezifischen Widerständen (siehe Tab. 5.2) relativ gut von den Tonen und Mergeln unterschieden werden können. Wie bereits in Kap. 7.3.1 erwähnt, konnten so insbesondere die Grenzen des alten Rutschkomplexes klar identifiziert werden. Diese treten morphologisch nicht in Erscheinung, so dass eine Abgrenzung nur auf Basis geomorphologischer Kriterien zu anderen Grenzziehungen führen würde.

Im Gegensatz zu Sass et al. (im Druck) reicht das Profil von Kruse (2006) von der untersten Rutschscholle bis weit in den mittleren, sehr unruhigen Bereich hinein. Dabei treten in den obersten 5 m immer wieder Bereiche mit höheren spezifischen Widerständen auf, die auf ein gehäuftes Vorkommen von Kalksteinbrocken hinweisen, die durch Rutschungen dorthin verlagert worden sind.

Um Hinweise darauf zu erhalten, ob es sich bei den großen Rutschschollen des Hangrutschungskomplexes um mehrfache (*multiple*) oder aufeinander folgende (*successive*) Rotationsrutschungen handelt, nahm Kruse (2006) sowohl ein weiteres Querprofil entlang der obersten Rutschscholle auf, als auch ein Längsprofil von der Albhochfläche über die oberste, die mittlere und die unterste Rutschscholle hinweg bis hinunter zu den ersten Häusern unterhalb der untersten Rutschscholle (Abb. 7.35). Beide Profile weisen für die oberste Rutschscholle eine Mächtigkeit der kalksteinreichen Schichten von ca. 20 m aus. Im Längsprofil ist zudem zu erkennen, dass die Kalksteinlage im Bereich der mittleren Rutschscholle wesentlich weniger mächtig ist. Auf Grund der Ergebnisse liegt im Vergleich mit der morphologischen Form die Vermutung nahe, dass die Gleitflächen zumindest teilweise in die tieferen Bereiche der Ton- und Mergelschichten hineinreichen. In diesem Falle kann die Gleichstromgeoelektrik aber keine weiteren Informationen über die exakte Lage der Gleitfläche liefern, da ton- und schluffreiche Lockersubstrate ähnliche geoelektrische Eigenschaften haben wie die entsprechenden Festgesteine.

Abschließend bleibt daher festzuhalten, dass die bisherigen geophysikalischen Ergebnisse nicht ausreichen, die Frage nach der Untergrundstruktur und dem Aktivitätstyp des Rutschungskomplexes endgültig zu beantworten.



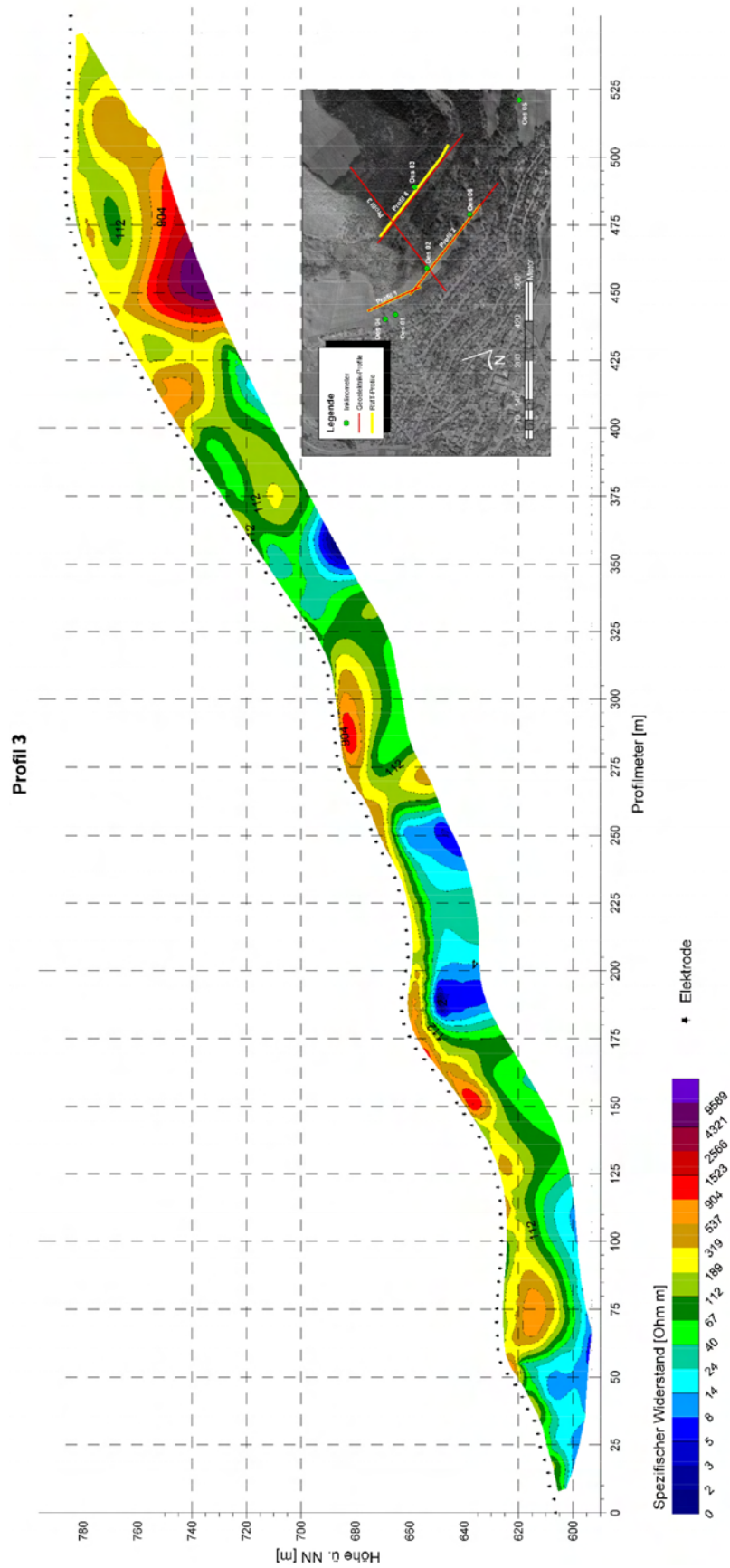


Abb. 7.36: Geoelektrisches Längsprofil im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (aus Kruse 2006). (Die Bereiche mit höheren spezifischen Widerstandes ( $> 100 \text{ Ohm m}$ ) geben kalksteinreiche Schichten wieder, Bereiche mit geringeren spezifischen Widerständen sind ein Anzeichen für Mergel- und Tonsteine, sowie deren Verwitterungsprodukte).

Für eine detaillierte Darstellung und Diskussion der Ergebnisse, auch der anderen Methoden, sei auf Kruse (2006) und Sass et al. (im Druck) verwiesen.

Zur Verdichtung der Bewegungsmessungen mittels Inklinometer wurde ein tachymetrisches Vermessungsnetz aufgebaut (Schauerte et al. 2006). Die Lage der Vermessungspunkte ohne die vier Fixpunkte, von denen aus die Messungen durchgeführt wurden, ist in Abb. 7.29 dargestellt. Derzeit liegt leider nur die Auswertung der ersten Wiederholungsmessung vor. Demnach konnten im Zeitraum von Juni bis November 2005 Lageveränderungen von bis zu 3 cm gemessen werden (Abb. 7.36). Während die Vermessungspunkte im Nordwesten des Untersuchungsgebietes überwiegend einheitliche, hangabwärtsgerichtete Bewegungen anzeigen, kommt es im Südosten zu einem uneinheitlichen Ergebnis mit meist nicht hangabwärtsgerichteten Verschiebungsvektoren. Im Nordosten fallen die großen Verschiebungsbeträge der Vermessungspunkte 110 bis 112 auf, die außerhalb des großen Rutschungskomplexes liegen. Von diesen befinden sich Vermessungspunkt 111 und 112 am Rande der etwas welligen Bereiche, für die potenzielle Abrisskanten in der geomorphologischen Karte kartiert wurden (Abb. 7.27). Der Punkt 110 liegt in dem bisher als ungestört angesehenen Hangbereich. Die Vermessungspunkte 113 und 114 deuten auf eine stärkere Bewegung der untersten Rutschscholle hin, die durch das Inklinometer Oes02 nicht bestätigt wird. Da Oes02 aber nicht durch die Gleitfläche reicht, besteht durchaus die Möglichkeit, dass dieses mit der Rutschscholle versetzt wird, ohne dass die relative Lage des Inklinometerrohrs beeinträchtigt wird. Der Punkt 108 zeigt keine Bewegungen an, welches mit den Inklinometerergebnissen von Oes01 und Oes04 für die Zeitspanne zwischen den zwei tachymetrischen Vermessungen übereinstimmt.

Die zentrale Frage bei den tachymetrischen Messergebnissen ist, wie die gemessenen Bewegungen interpretiert werden müssen. Die Nivellementmessungen (Kap. 7.3.4) zeigen, dass das Quellen und Schrumpfen der Tone in diesem Zusammenhang nicht außer Acht gelassen werden darf. Da die Nullmessung in einer trockenen Sommerphase, die Wiederholungsmessung im feuchten November durchgeführt wurden, kann dieser Einfluss durchaus eine Rolle spielen. Für diesen Zeitraum sind für den Vermessungspunkt 108 Höhenveränderungen von bis zu 1,5 cm festzustellen. Jedoch zeigt gerade dieser Punkt keine Bewegungen zwischen den tachymetrischen Vermessungen an. Inwieweit das Quellen und Schrumpfen der Tone für einen Großteil der gemessenen Bewegungen verantwortlich gemacht werden muss oder diese doch tatsächliche Gleitbewegungen darstellen, kann nur durch weitere Vermessungen geklärt werden.

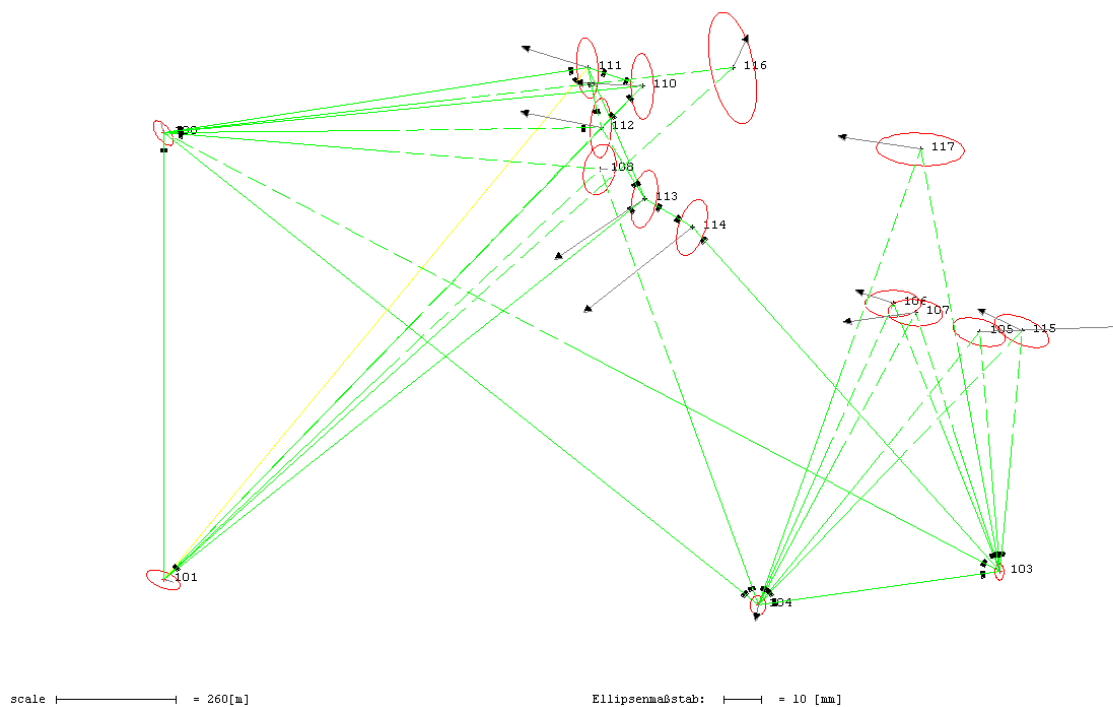


Abb. 7.37: Ergebnisse der ersten tachymetrischen Wiederholungsmessung im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen (Die Lage der Vermessungspunkte ist in Abb. 7.29 dargestellt. Die roten Ellipsen zeigen den Fehlerbereich jeder einzelnen Messung an.) (aus Schauerte et al. 2006) .

### 7.3.7 Heuristische Gefahrenabschätzung

Auf Basis der für das Untersuchungsgebiet erhobenen Daten ist davon auszugehen, dass mit häufigen kleineren, flachgründigen Rutschungen im Untersuchungsgebiet gerechnet werden muss. Diese werden schwerpunktmäßig in den steileren und bewaldeten Hangpartien auftreten, können sich aber durchaus auch in den Siedlungsbereich hinein erstrecken. Insbesondere der unruhige mittlere Bereich des Hangrutschungskomplexes scheint eine höhere Gefahr, auch durch tiefgründigere Bewegungen, darzustellen. Inwieweit mit größeren Ereignissen wie der Reaktivierung einzelner Rutschschollen gerechnet werden muss, ist sehr schwer abzuschätzen.

Die regionalen Analysen zeigen, dass das Auftreten größerer Rutschungen häufiger vorkommt als bislang vermutet. Daher ist nicht von einer generellen Stabilität der großen Rutschschollen allein auf Grund ihrer Größe und ihres Alters auszugehen. Wo und wann aber das nächste Großereignis stattfinden wird, ist nicht vorherzusagen. Derzeit zeigt keine der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Rutschschollen Bewegungen an, weder in den Inklinometern, noch in Form von Rissen oder Spalten im Gelände. Daher scheint die Gefahr einer Realisierung der drei Szenarien, für die das Volumen berechnet wurde, eher gering. Am unwahrscheinlichsten scheint das Szenario, dass der ganze Sporn versagen könnte. Sollte es sich beim Aufbau des Hangrutschungskomplexes um mehrfache, anstatt aufeinander folgende Rutschungen handeln, so wäre im Falle einer Reaktivierung mit einem wesentlich größeren Ereignis zu rechnen.

Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass extrem langsame Bewegungen mit unterschiedlichen Mächtigkeiten regelmäßig stattfinden. Die starke Korrelation mit den Schneeschmelzereignissen lässt vermuten, dass in der Vergangenheit wesentlich feuchtere Bedingungen als jene herrschten, die im Rahmen der Messreihe aufgetreten sind und die somit auch stärkere Bewegungen verursachten. Aus demselben Grund ist auch zukünftig bei extremen Witterungsbedingungen mit stärkeren Bewegungen zu rechnen, die unter Umständen zu einem kompletten Versagen der sich bewegenden Rutschmassen führen können.

Auf die Problematik, dass die Inklinometer Oes02 und Oes03 in den großen Rutschschollen nicht die Gleitfläche durchstoßen, ist bereits in Kap. 7.3.3 eingegangen worden. Unter Berücksichtigung des größeren welligen Bereichs, innerhalb dessen sich die Inklinometer Oes01 und Oes04 befinden, mag es durchaus im Rahmen des Möglichen sein, dass auch in diesen Fällen tiefere Gleitflächen vorhanden sind, die durch die Inklinometer nicht erreicht werden, so dass neben den sehr flachgründigen Bewegungen auch noch tiefgründigere Bewegungen auftreten können.

Die offenen Fragen bezüglich potenzieller tieferer Bewegungen im Bereich der großen Rutschschollen, aber auch bei Oes01 oder Oes04, können nur durch weitere und tiefere Inklinometermessungen beantwortet werden. Darüber hinaus wird die Auswertung der zweiten Wiederholungsmessung des tachymetrischen Vermessungsnetzes weitere Hinweise dafür liefern, ob es sich bei den Messergebnissen der ersten Wiederholungsmessung tatsächlich um Rutschbewegungen handelt, oder andere Einflüsse zu den teils großen Verschiebungsbeträgen führten.

### **7.3.8 Diskussion**

Die Verwendung des hochaufgelösten DGM1 in der geomorphologischen Kartierung erleichterte diese sehr und gewährleistete zudem eine sehr genaue Verortung der im Gelände vorgefundenen Phänomene. Zudem waren einige Formen auch nur in Kombination mit dem DGM1 zu erkennen, die ansonsten bei der Kartierung im Gelände übersehen worden wären.

Auf Basis der Inklinometermessungen konnten trotz einiger Einschränkungen, die im Wesentlichen auf die Limitierungen des zur Verfügung stehenden Bohrgerätes zurückzuführen sind, wertvolle Hinweise zur Aktivität der gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet gewonnen werden. Insbesondere eignet sich die Methode sehr gut, um Informationen über die Lage der Gleitfläche zu bekommen. Die gemessenen Bewegungsraten sind sehr gering und daher ohne Messinstrumente im Gelände nicht feststellbar.

Die Nivellementmessungen geben einen ersten Eindruck von der Dynamik, die durch die Tonminerale im Boden verursacht wird. Daher ergänzt dieser Ansatz die ansonsten im Labor durchgeführten Quellversuche an Tonen sehr gut, um die Auswirkungen im Gelände zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit konnten die beteiligten Tonminerale nicht näher bestimmt werden. Aufgrund der großen zeitlichen Messabstände kann zudem leider keine Aussage über die Reaktionszeiten der Tone bezüglich sehr trockener oder sehr feuchter Phasen getroffen werden.

Die Volumenbestimmung mittels des Sloping Local Base Level (SLBL)-Ansatz liefert auf lokaler Skale sehr gute Ergebnisse für potenzielle zukünftige Ereignisse. Die Probleme in der Abgrenzung sinnvoller Massenbewegungseinheiten im regionalen Ansatz bestehen auf lokaler Ebene nicht, da die Modellierungen für einzelne Rutschungsszenarien durchgeführt werden, deren Grenzen manuell vorgegeben werden. Weitere, hier nicht präsentierte Modellierungen zeigen zudem, dass der SLBL-Ansatz auch zur zuverlässigen Berechnung des Volumens vergangener Ereignisse eingesetzt werden kann.

Zur Klärung der Frage nach dem Aktivitätstyp des Hangrutschungskomplexes müssen weitere geophysikalische Methoden wie die Geoseismik eingesetzt werden, mittels derer im Gegensatz zur Geoelektrik sehr gut die Lockergesteinssubstrate von dem Festgestein unterschieden werden können.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen sehr deutlich, dass es Aktivitäten gravitativer Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet gibt, wie ausführlich im vorherigen Kapitel diskutiert. Ein Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit der Karte des Stabilitätsindex von Kreja und Terhorst (2006), die für denselben Hang entwickelt wurde, zeigt, dass es in einigen Bereichen durchaus gute Übereinstimmungen gibt, insgesamt die Karte aber viele Bereiche als zu stabil ausweist, so beispielsweise auch im mittleren Bereich des Hangrutschungskomplexes.

Der Vergleich der lokalen Untersuchungen mit der regionalen Gefahrenkarte (Abb. 7.24) zeigt, dass regionale Gefahrenanalysen zwar eine generelle Gefährdung bzw. Gefahr für lokale Untersuchungsgebiete ausweisen können, die im Rahmen von übergeordneten Planungsverfahren sicherlich hilfreich sind. Auf lokaler Ebene sind aber Detailuntersuchungen zu den Aktivitäten gravitativer Massenbewegungen unerlässlich, sollen verlässliche Aussagen über die Nutzungsmöglichkeiten bestimmter Hangbereiche getroffen werden.

## **7.4 Gefahrenanalyse Lichtenstein-Unterhausen**

### **7.4.1 Geomorphologische Kartierung**

Das Untersuchungsgebiet wird geprägt von zwei sehr großen und alten Rutschungen. Dabei ist die westliche Rutschung wesentlich größer, reicht bis ins Echaztal hinunter und drängte die Echaz damals in ihrem Verlauf ab. Beide Rutschungen weisen einen großen Verebnungsbereich unterhalb der Abrisskante auf. Die Verebnungsbereiche gehen über zwei Stufen in den steileren Hangbereich über. Innerhalb der westlichen Rutschung ist deutlich eine relativ große, mittelalte reaktivierte Rutschung zu erkennen, auf der sich eine kleinere rezente Rutschung befindet. Am westlichen Rand der Siedlungsfläche kam es 1984 infolge der an die lokalen Gegebenheiten nicht angepassten Bautätigkeiten zu einer kleineren Rutschung. Alle noch nicht bebauten Grundstücke zeigen Anzeichen von flachgründigen Rutschungsaktivitäten, die aber nicht dargestellt werden, um eine bessere Übersichtlichkeit der Abbildung zu gewährleisten.

Oberhalb der Verebnungsbereiche existierten Steinbrüche, die zum Teil sehr aktive Schutthalden zurückließen. Eine hohe Steinschlagaktivität wird durch die vielen abgelagerten Blöcke angezeigt. Neben zahlreichen kleineren und teilweise sehr frischen Blöcken, die aus den dünn gebankten Kalken stammen, finden sich auch größere Blöcke aus massigem Kalkstein, die aber wesentlich älter zu sein scheinen, worauf die Bemoosung hindeutet.

Außerhalb der Siedlungsflächen werden die Hangbereiche vor allem als Grünland genutzt. Die zahlreichen Ackerrandstufen, die in der Karte ebenfalls aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt sind, deuten aber auf eine frühere ackerbauliche Nutzung hin. Durch die menschliche Nutzung ist das Relief stark überprägt worden, so dass eventuell weitere deutliche Hinweise auf gravitative Massenbewegungen über die Zeit verschwunden sind.

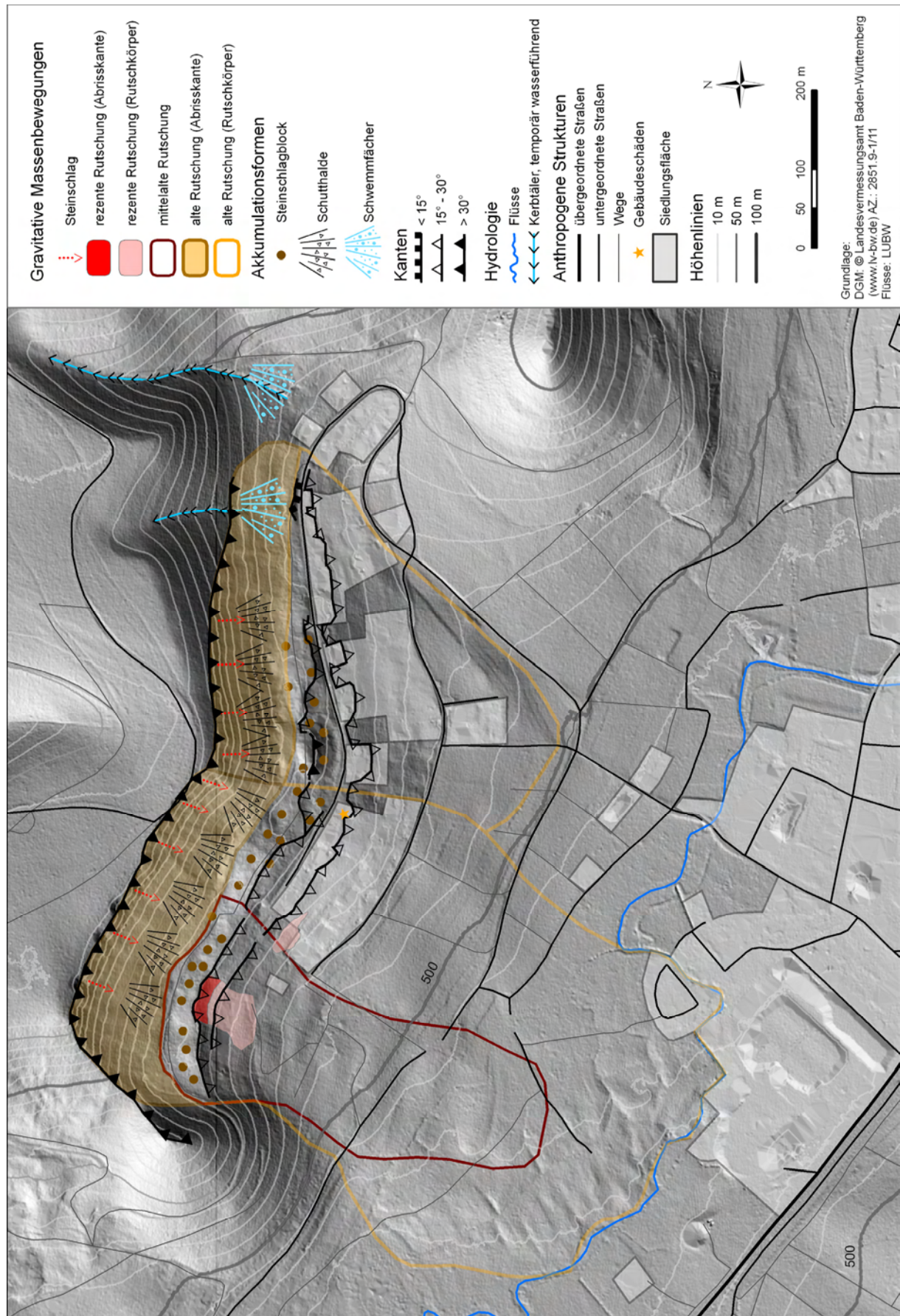


Abb. 7.38: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen

## 7.4.2 Bohrungen und Laboranalysen

Die Bohrlokalitäten wurden so gewählt, dass mittels der installierten Inklinometer die Untersuchung der Rutschungsaktivitäten im Siedlungsbereich möglich sein sollte. In Frage kamen daher zuerst nur die unbebauten Grundstücke. In einem Fall wurde jedoch die Bohrgenehmigung abgelehnt. Im weiteren Verlauf ergab sich die Möglichkeit, die tiefe Bohrung Lic02, die durch den Besitzer des einzigen beschädigten Hauses in Auftrag gegeben wurde, auszuwerten und mit einem Inklinometer auszustatten. Die ersten Ergebnisse der Inklinometermessungen Lic01 und Lic02 führten zu der Entscheidung, im westlichen Siedlungsbereich eine weitere Bohrung direkt neben der Straße durchzuführen und das Inklinometer Lic03 zu installieren. Die Lage der Bohrungen bzw. Inklinometerstandorte ist in Abb. 7.38 dargestellt.

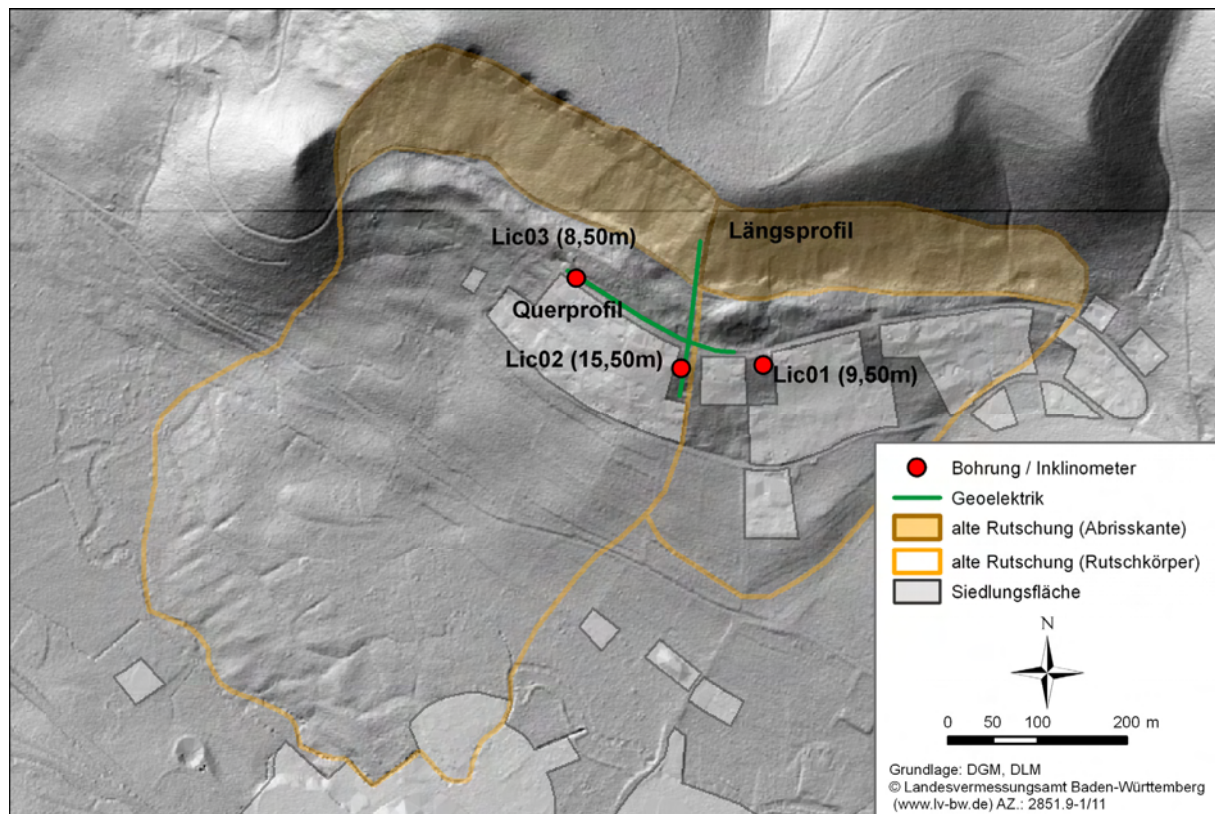


Abb. 7.39: Lage der Bohrungen bzw. Inklinometer und der Geoelektrikprofile im Untersuchungsgebiet Lichtenstein-Unterhausen

Die Bohrungen Lic01 und Lic03, sowie die oberen Bereiche von Lic02 zeigen mit überwiegend schluffig-tonigem Feinmaterial bei sehr geringem Bodenskelettanteil einen sehr ähnlichen Aufbau. Im unteren Bereich von Lic02 finden sich zunehmend zerbrochene Mergel- und Tonsteinbrocken, die anschließend in einen verwitterten Tonstein und einen Kalkstein übergehen. Alle Bohrkernstellen stellen Teile der alten Rutschmassen dar. Während Lic02 bis in das Festgestein reicht, war dies bei den Bohrungen Lic01 und Lic03 auf Grund der Limitierungen des eingesetzten Bohrgeräts nicht möglich. Die detaillierten Auswertungen zu den Bohrkernen finden sich im Anhang 3.



### 7.4.3 Inklinometermessungen

Von den drei eingebauten Inklinometern zeigt nur Lic02 signifikante Bewegungen an. Insgesamt handelt es sich um extrem langsame Bewegungen unterschiedlicher Art, die sich im Jahresverlauf ändern. Während im Sommer und Herbst ausschließlich Fließbewegungen festzustellen sind, die bis in 8,50 m Tiefe reichen, kommt es im Frühjahr zu tiefgründigen Gleitbewegungen, die direkt oberhalb des Kalksteins in den verwitterten Tonsteinen einsetzen (siehe Anhang 4).

Des Weiteren ist aus der Abbildung im Anhang ersichtlich, dass es im Januar 2005 zu einer rückwärtsgerichteten Rotationsbewegung gekommen ist, lange bevor eine Gleitbewegung festzustellen ist. Diese Rotation befindet sich durchaus im Fehlerbereich der Messmethode, doch wird sie durch eine Messung mit einem wesentlich höher aufgelösten Tiltmeter bestätigt (Garcia 2005, Persönliche Mitteilung). Teilweise befinden sich auch die gemessenen Fließbewegungen nahe des Fehlerbereichs der Methode, doch korrelieren diese Fließbewegungen sehr gut mit der Rissentwicklung im Haus, so dass die Messungen realistisch erscheinen. Die tiefen Gleitbewegungen führen hingegen nicht zu einer Rissentwicklung im Haus.

In Abb. 7.39 sind die Messergebnisse für die zwei Tiefen über den Messzeitraum aufgeführt, die die stärksten Bewegungen aufweisen. Die versetzte Aktivität der Fließ- und Gleitbewegungen wird sehr deutlich. Eine Analyse des Einflusses der Klimaparameter unter Verwendung der regionalisierten Klimadaten der LUBW zeigt sehr deutlich einen Zusammenhang zwischen Schneeschmelze und der tiefgründigen Gleitbewegung (Abb. 7.40). Allein auf Basis der Niederschlagsdaten lassen sich die Bewegungen jedoch nicht erklären.

Für weniger tiefgründige Fließbewegungen ist eine Korrelation mit den Klimadaten nicht direkt zu erkennen. So sind die Bewegungen beispielsweise nicht ausschließlich an erhöhte Niederschläge gebunden; selbst wenn eine gewisse Reaktionszeit des Hanges auf die eingetretenen Niederschläge berücksichtigt wird, ergibt sich keine eindeutige Beziehung. Auffällig ist, dass selbst die starken Niederschläge Ende August und Anfang September 2005 zu keinerlei Bewegungen führen. Erst Ende März bzw. Anfang April 2006 sind wieder Bewegungen infolge der Schneeschmelze (eigene Geländebeobachtung) zu verzeichnen. Eine Analyse der kumulierten Niederschläge liefert auch keine brauchbaren Erkenntnisse. Insgesamt sind leider sowohl die detaillierten Klimadaten, die nur bis Ende 2005 vorliegen, als auch die Inklinometermessreihen viel zu kurz, um einen komplexen Zusammenhang zwischen Bewegungen und Klimaparametern ableiten zu können.

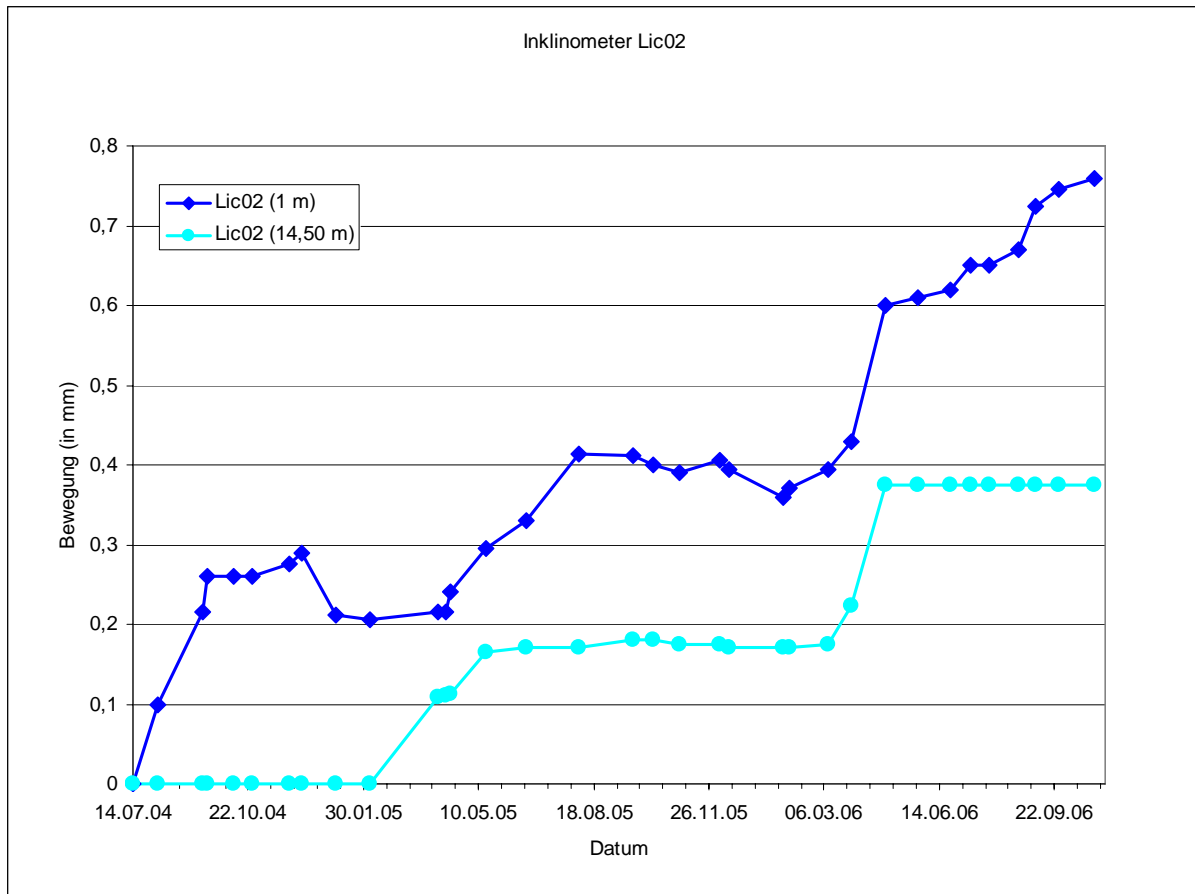


Abb. 7.40: Verlauf der Bewegungen im Inklinometer Lic02 aus den zwei Tiefen mit den stärksten Bewegungen

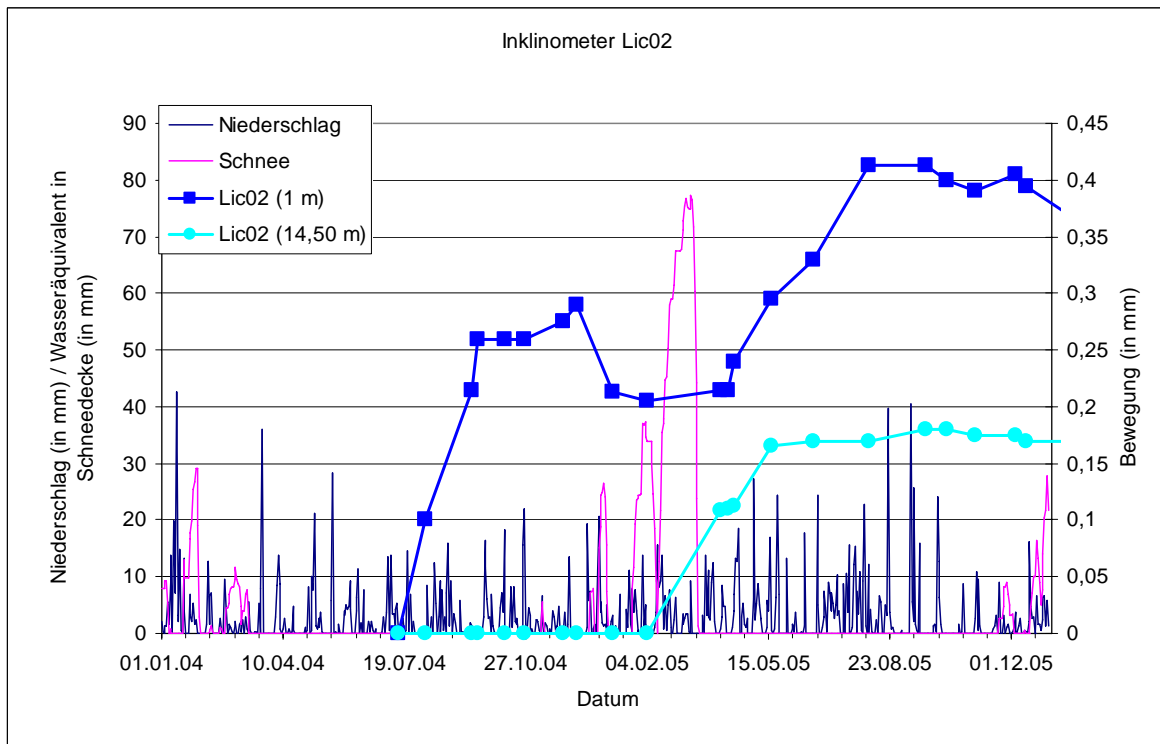


Abb. 7.41: Ergebnisse der Bewegungsmessungen mittels Inklinometer Lic02 sowie Verteilung des Niederschlags und des Wasseräquivalents im Schnee.

#### 7.4.4 Nivellementmessungen

Die Nivellementmessungen in Lichtenstein-Unterhausen wurden genutzt, um Hinweise auf die Reaktion des Hauses auf die Rutschbewegungen zu erhalten. Dazu stand ein Messnetz zur Verfügung, welches 2002 von einem Vermessungsbüro aufgebaut wurde (Abb. 7.41). An die Messreihen des Vermessungsbüros wurden die eigenen Daten angehängen, um so eine längere Messreihe von 2002 bis 2006 zu erhalten.

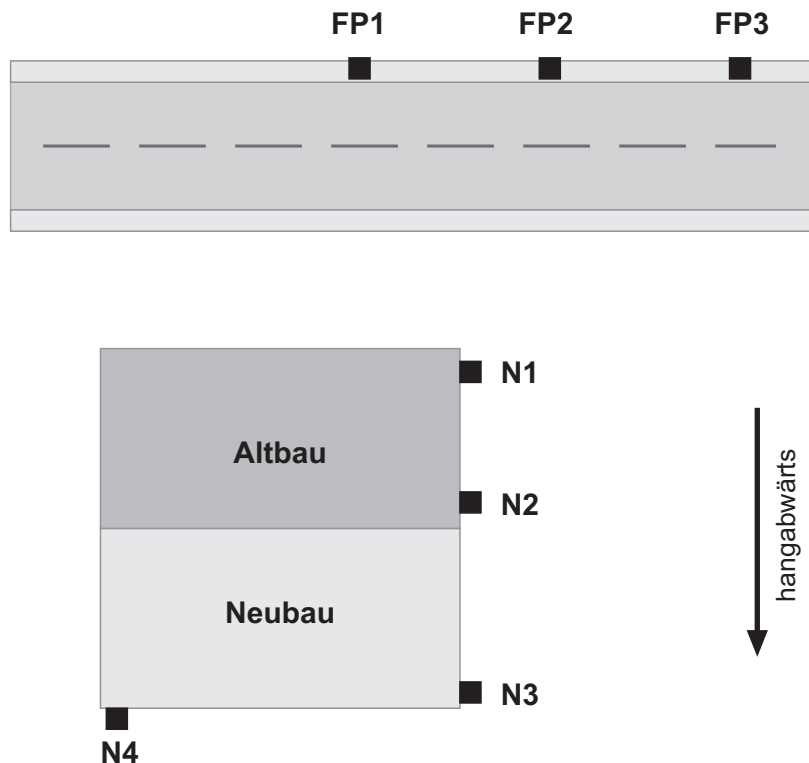


Abb. 7.42: Skizze des Nivellementmessnetzes in Lichtenstein-Unterhausen (FP1 bis FP3 = Festpunkte am Straßenrand, N1 bis N4 = Messbolzen am geschädigten Haus)

Die Festpunkte des Messnetzes liegen etwas ungünstig am Straßenrand. Bei den Auswertungen konnten durchaus größere Abweichungen zwischen den drei benachbarten Festpunkten von Messung zu Messung festgestellt werden. Diese sind nicht zwangsweise auf Rutschbewegungen zurückzuführen, sondern können auch dadurch bedingt sein, dass ein größeres Fahrzeug über die Festpunkte gefahren ist. Um diese Unsicherheiten auszuschließen, wurden für die endgültige Auswertung nur die vier Nivellementpunkte am Haus selbst genutzt, um so relative Bewegungen der Punkte zueinander feststellen zu können.

Die Messergebnisse zeigen, dass zwischen den beiden Messbolzen am Altbau (N1 und N2) nur sehr geringe Höhenveränderungen festzustellen sind (Abb. 7.42). Die Messbolzen N3 und N4 am Neubau haben sich mit ca. 1,2 cm deutlich gegenüber dem Messbolzen N1 abgesenkt, wodurch ein Wegkippen des Neubaus vom Altbau bestätigt wird. Insgesamt zeigt sich, dass die größten Bewegung zwischen 2002 und 2003 zu verzeichnen sind.

Während das Jahr 2002 sehr feucht war, zeichnete sich das Jahr 2003 durch extreme Wärme und Trockenheit aus. Wären die Höhenveränderungen auf das Schrumpfen und Quellen der Tone zurückzuführen, sollten sich alle Punkte relativ ähnlich verhalten. Dies ist aber nicht der Fall, so dass die Bewegungen wahrscheinlich mit stärkeren Bewegungen im Untergrund ursächlich zusammenhängen. Seit Auftreten der Schäden am Haus waren die breitesten Risse im Jahr 2003 zu verzeichnen.

Anhand der Höhenveränderungen der Messpunkte in den Jahren 2005 und 2006 ist eine deutliche Dynamik zu erkennen, die den Beobachtungen an den Messbolzen N2, N3 und N4 ähnelt. Diese Schwankungen werden in erster Linie auf das Quellen und Schrumpfen der Tone im Untergrund zurückgeführt. Da die Veränderungen bei N3 und N4 aber etwas stärker ausgeprägt sind, scheinen dort vor allem Fließbewegungen die Dynamik des Quellens und Schrumpfens zu überlagern. Die geringeren Höhenveränderungen in den Messungen von 2005 bis 2006 stimmen mit der schwächeren Rissbildung im Vergleich zu den Vorjahren überein.

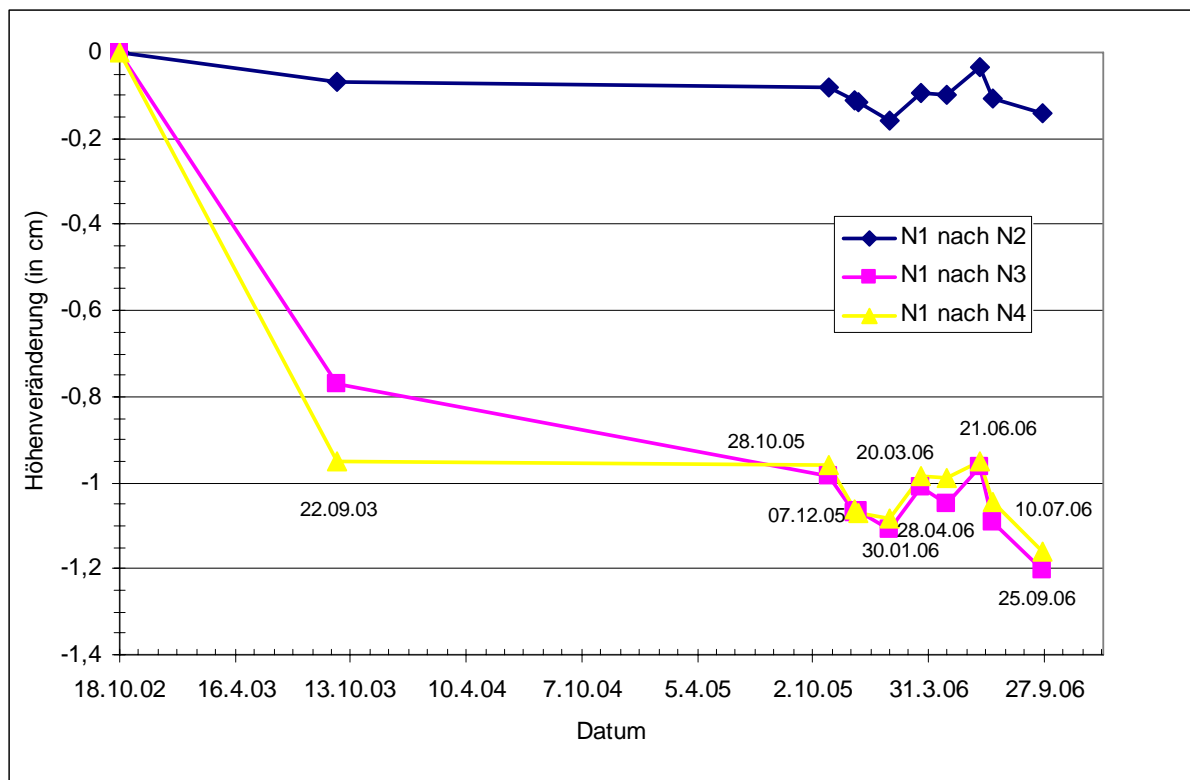


Abb. 7.43: Ergebnisse der Nivellementmessungen in Lichtenstein-Unterhausen (N1 und N2 sind Messbolzen am Altbau, N3 und N4 befinden sich am Neubau)

### 7.4.5 Geoelektrisches Bodenfeuchtemonitoring

Um weitere Hinweise auf die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der sich im Jahresverlauf ändernden Bewegungsarten bei Lic02 zu erhalten, wurden die zwei geoelektrischen Monitoringprofile von Kruse (2006) weiter betrieben. Ziel war es, unterschiedliche Durchfeuchtungsfronten ausfindig zu machen, die mit den Fließ- bzw. Gleitbewegungen in Zusammenhang gebracht werden können.

Da für das Jahr 2006 noch keine regionalisierten Klimadaten vorliegen, musste für die Auswertung auf die tägliche Niederschlagsverteilung an der Station Reutlingen der LUBW zurückgegriffen werden, die sich wenige Kilometer nördlich im Albvorland befindet (Abb. 7.43).

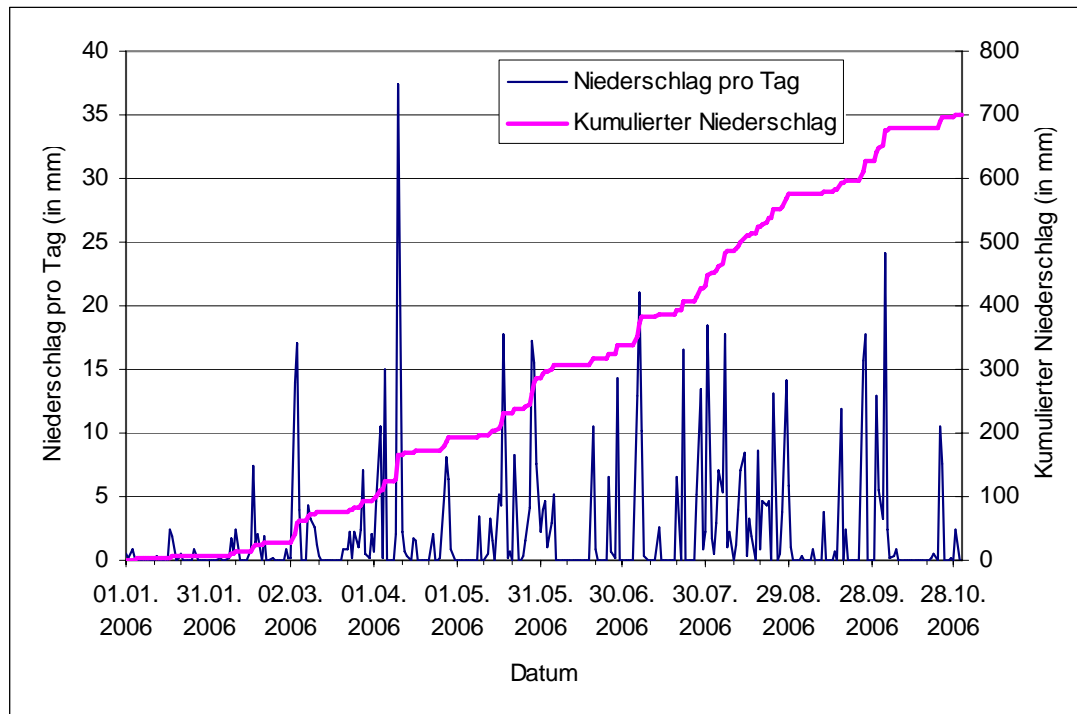


Abb. 7.44: Niederschlagsverteilung an der Station Reutlingen für das Jahr 2006 (Quelle: LUBW)

Da die Auswertung des Querprofils keine brauchbaren Ergebnisse lieferte, werden im Folgenden nur die Ergebnisse des Längsprofils präsentiert. Um das Verständnis der Abbildungen des Bodenfeuchtemonitorings zu erleichtern, ist in Abb. 7.44 das invertierte Referenzprofil vom 31.01.2006 mit der Topographie dargestellt.

Im steileren Oberhang zeigen die höheren spezifischen Widerstände bis ca. Profilmeter 110 die mächtige Kalksteinschutthalde an, in deren tieferen Bereichen die Impressamergel ansatzweise zu erkennen sind. Unterhalb beginnt der breite Verebnungsbereich der Rutschscholle, der sich bis ca. Profilmeter 40 erstreckt und dann in den steileren Mittelhang übergeht. Zwischen Profilmeter 40 und 50 befindet sich das beschädigte Haus. Die direkt hangaufwärts vom Haus gelegenen höheren spezifischen Widerstände zeigen die Straße an. Der Verebnungsbereich ist von Profilmeter 60 bis 110 unterschiedlich dicht bewaldet. Überwiegend finden sich darin entlang des Profils Laubbäume mit einzelnen Nadelbäumen. Im Untergrund finden sich nahe der Erdoberfläche nur wenige Kalksteinbrocken in der ansonsten tonreichen Rutschmasse, deren Untergrenze zu den Tonsteinen des obersten Mitteljuras im Diagramm nicht ersichtlich ist, da sich die geoelektrischen Eigenschaften zu sehr ähneln.

Beim Bodenfeuchtemonitoring (Abb. 7.45) zeigen sich die deutlichsten Veränderungen im Bereich der Schutthalde. Die Veränderungen in den spezifischen Widerständen sind eindeutig auf die

Niederschlagsverteilung zurückzuführen. Dabei versickern die Niederschläge im Bereich der Schutthalde sehr schnell, wie insbesondere die Ergebnisse der Aprilmessung zeigen: Obwohl es Anfang April mit sehr starken Niederschlägen vom 09. - 11.04.2006 (ca. 42 mm) sehr feucht war, weist die Schutthalde sehr hohe Widerstände auf, die auf eine starke Austrocknung schließen lassen. Dies ist durchaus plausibel, da seit dem 11.04.2006 kaum noch Niederschläge gefallen sind. Offensichtlich haben geringe Niederschläge wie die vom 26. und 27.04.2006 keinen nachhaltigen Einfluss auf die Bodenfeuchteverhältnisse.

Ein erstaunliches Phänomen zeigt die Schutthalde bei der Messung vom 08.03. bis 09.03.2006: Über Nacht sind im Untersuchungsgebiet 30 bis 50 cm Schnee abgeschmolzen, so dass mit feuchteren Bedingungen und einer Abnahme der spezifischen Widerstände gerechnet wurde. Die Schutthalde zeigt aber in der Messung höhere Werte an. Eine Hypothese ist, dass infolge des Abschmelzens der Schneedecke vermehrt Luft in die Schutthalde eindringen konnte, die dann für die geringere Leitfähigkeit sorgte.

Im bewaldeten Bereich treten vor allem im Vergleich zur Referenzmessung vom 31.01.2006 sehr deutlich Bereiche mit erhöhten spezifischen Widerständen hervor, die auf den Wasserverbrauch durch die Vegetation zurück geführt werden können. Abgesehen von diesem Effekt können in den Messungen keine deutlichen Durchfeuchtungsfronten identifiziert werden, die in einem ursächlichen Zusammenhang mit den Fließ- bzw. Gleitbewegungen gebracht werden können. Dieses wird in erster Linie auf die Grenzflächenleitfähigkeit der Tone zurückgeführt. Dieser Einfluss ist offensichtlich so stark, dass er nicht nur detaillierte Einblicke in den Bodenwasserhaushalt ohne Quantifizierung des Einflusses der Grenzflächenleitfähigkeit verhindert, sondern auch das Erkennen von generellen Veränderungen von Durchfeuchtungsmustern unmöglich macht.

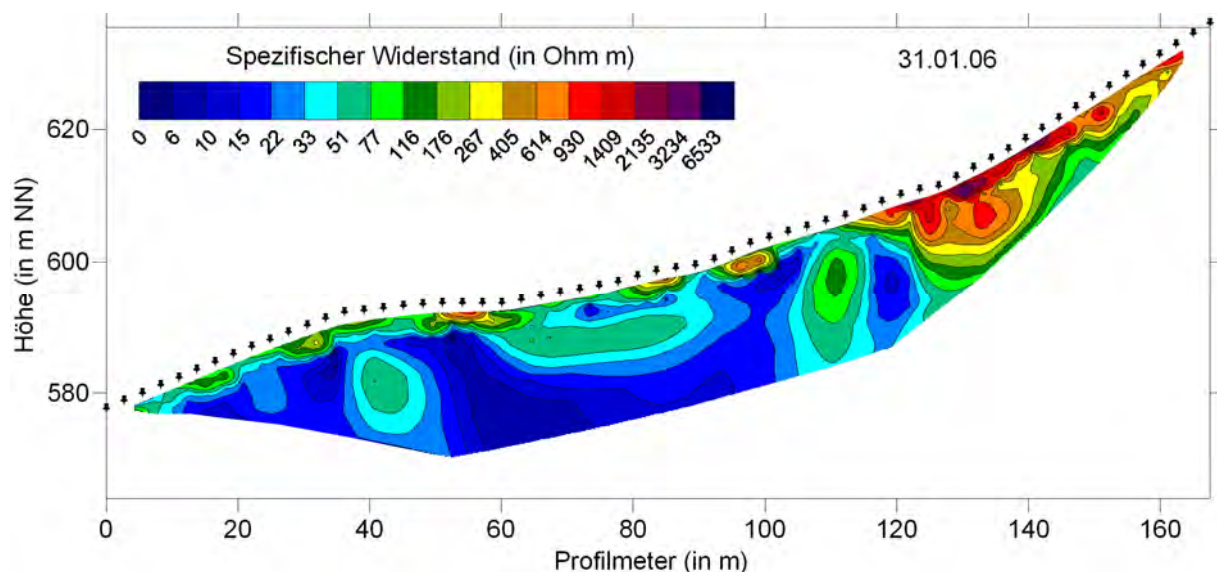


Abb. 7.45: Invertiertes geoelektrisches Längsprofil in Lichtenstein-Unterhausen. (Die hohen spezifischen Widerstände (> 100 Ohm m) zeigen v.a. kalksteinreiche Schichten an, die niedrigen spezifischen Widerstände weisen auf tonreiches und schluffiges Material an)

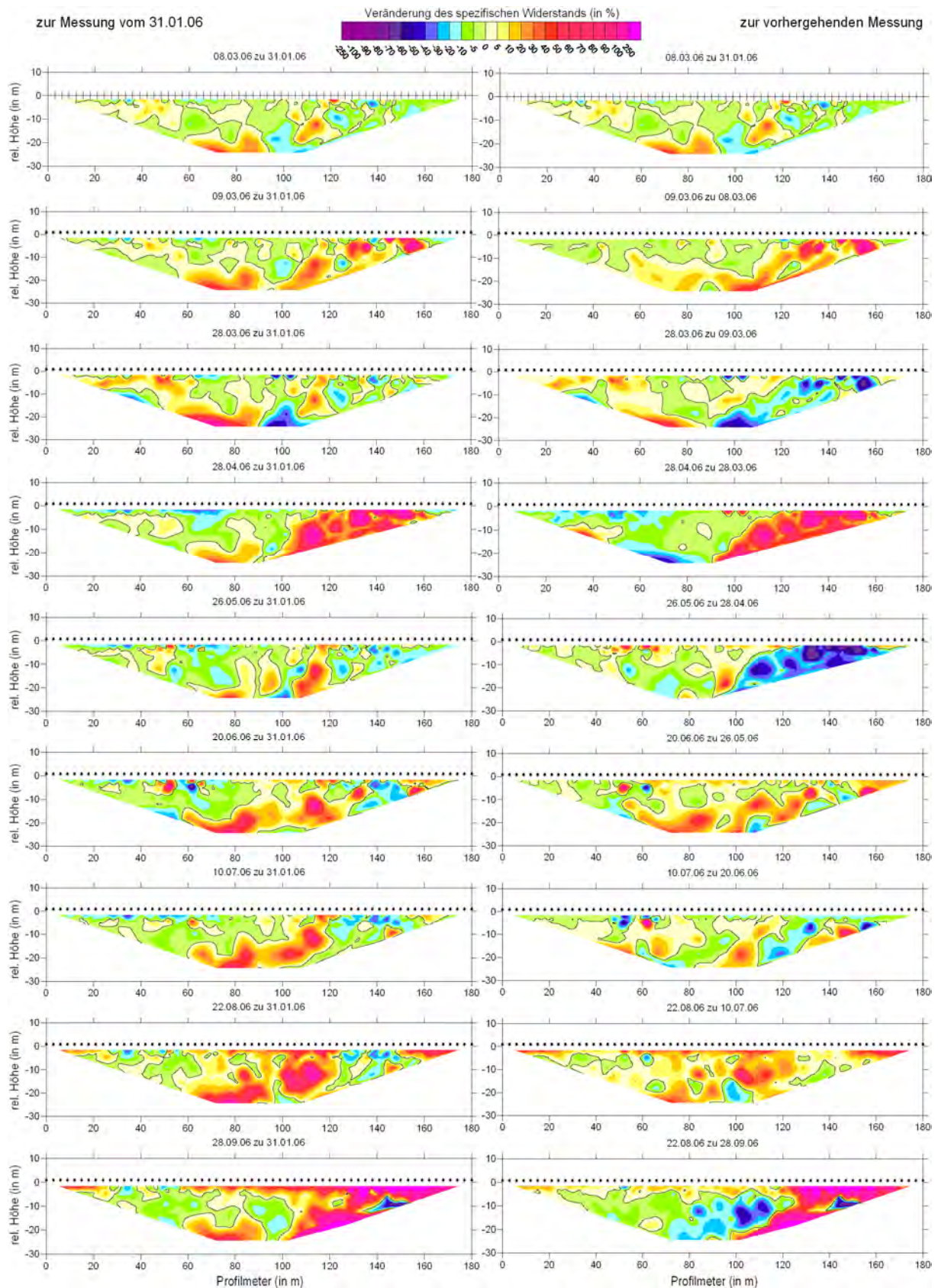


Abb. 7.46: Bodenfeuchtemonitoring mittels Geoelektrik entlang des Längsprofils in Lichtenstein-Unterhausen. Dargestellt wird die Veränderung des spezifischen Widerstands (in %) von verschiedenen Messungen zum Referenzprofil vom 31.01.2006 und zur vorherigen Messung. Deutlich zu erkennen sind die Veränderungen im Bereich der Schutthalde, wohingegen im bewaldeten Bereich nur der Einfluss der Vegetation (Wasserverbrauch) ersichtlich wird.

### 7.4.6 Heuristische Gefahrenabschätzung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen deutlich, dass es in Teilbereichen des Untersuchungsgebietes langsame, aber regelmäßige Bewegungen im Untergrund gibt. Die welligen Strukturen auf den noch nicht bebauten Grundstücken weisen ebenfalls auf Rutschaktivitäten hin.

Lic01 befindet sich auf einem solchen Grundstück, bei dem die Oberflächenformen auf flachgründige Bewegungen schließen lassen. Dennoch konnte in diesem Bereich über den gesamten Messzeitraum keine hangabwärtsgerichtete Bewegung in den obersten 9,5 m festgestellt werden. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass das Gebiet innerhalb der östlichen großen, alten Rutschung weniger aktiv ist als vergleichbare Bereiche innerhalb der westlichen großen, alten Rutschung. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass das Inklinometer Lic01 nicht bis in das Festgestein reicht und daher eine tiefere Bewegung unter Umständen nicht erfasst worden ist. Dies ließe sich aber nur durch eine weitere und tiefere Inklinometermessung mit Sicherheit entscheiden.

Die Messergebnisse des Inklinometers Lic02, das sich im westlichen alten Rutschkörper befindet, zeigen regelmäßige, abwechselnde Fließ- und Gleitbewegungen an. Insbesondere die tiefgründigen Bewegungen lassen vermuten, dass von diesen Bewegungen ein größeres Areal betroffen ist. Die östliche Grenze liegt vermutlich am Übergang zwischen den zwei großen, alten Rutschungen. Eine westliche Grenze konnte weder durch das geoelektrische Bodenfeuchtemonitoring entlang des Querprofils, noch durch das Inklinometer Lic03 bestimmt werden.

Mit 8,50 m reicht das Inklinometer Lic03 leider nicht tief genug, um eine tiefe Gleitbewegung erfassen zu können. Würden in diesem Bereich jedoch ähnliche Fließbewegungen wie bei Lic02 auftreten, so sollten diese durch Lic03 erfasst werden können. Dies ist nicht der Fall, weshalb dieser Bereich allerdings nicht unbedingt außerhalb der sich bewegenden Masse liegen muss. Insbesondere die Nivellementmessungen von 2003 zeigen im Vergleich zu den aktuelleren Messungen, dass in der Vergangenheit stärkere Bewegungen aufgetreten sein müssen. Daher ist davon auszugehen, dass auch zukünftig bei extremen Witterungs- und Klimabedingungen mit stärkeren Bewegungen zu rechnen ist. Vor allem nach dem extrem trockenen Sommer 2003 traten die stärksten Rissbildungen und damit wohl auch stärksten Bewegungen auf. Dies lässt vermuten, dass auf Grund der großen Trockenheit in dem sehr tonreichen Material große Trockenrisse entstanden sind, wodurch die nachfolgenden Niederschläge sehr schnell in den Untergrund eindringen und die starken Bewegungen auslösen konnten. Da in der aktuellen Klimadebatte davon ausgegangen wird, dass zukünftig in Süddeutschland die Sommer trockener und die Winter feuchter werden, könnte dies durchaus zu verstärkten Bewegungen führen, da der beschriebene Mechanismus regelmäßiger aktiviert würde. Dies könnte somit die Hangrutschungsgefahren erhöhen.

Insgesamt muss derzeit die Frage offen bleiben, ob der Hang sich durch die abwechselnden Fließ- und Gleitbewegungen langsam in einen systemkritischen Zustand bringt, bei dem am Ende ein totales Versagen des Hanges eintreten und eine großflächige, schnelle Rutschung die Folge sein könnte.



Genauso ist aber auch denkbar, dass der Hang zur Ruhe kommt und sich in einen stabilen Zustand bringt.

Um diese Fragen beantworten zu können, müssen die Messreihen weiter fortgeführt werden, wie dies in einem Folgeprojekt des BMBF zur Frühwarnung vor gravitativen Massenbewegungen vorgesehen ist. Im Rahmen dieses Projekts sollen weitere Messmethoden zum Einsatz kommen, die es ermöglichen werden, die aktiven von den inaktiven Bereichen im Untersuchungsgebiet zu unterscheiden. Auf Basis dieser zukünftigen Ergebnisse wird eine verbesserte Gefahreinschätzung vorgenommen werden können.

Abgesehen von einer rezenten Rutschung von 1984 sind die in der geomorphologischen Karte dargestellten Rutschungen nicht datiert. Ein genaues Alter für die unterschiedlich großen Rutschungen würde jedoch ebenfalls wertvolle Erkenntnisse bezüglich der Aktivität gravitativer Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet liefern. Darauf basierend könnten dann Überlegungen angestellt werden, inwieweit heutzutage mit ähnlich großen Rutschungen wie der kartierten mittelalten Rutschung zu rechnen ist. Da insbesondere die westliche große, alte Rutschung Böden und Kalktuffablagerungen im Auslaufbereich überfahren haben muss, ist die Datierbarkeit als sehr hoch einzuschätzen. Liegt zwischen alter und mittelalter Rutschung eine genügend große Zeitspanne, so können sich auch an der Basis der mittelalten Rutschung datierbare Böden befinden.

Von der erwähnten hohen Steinschlagaktivität im Untersuchungsgebiet scheinen keine größeren Gefahren auszugehen, da die ausstreichende Wand oberhalb der Schutthalden vor allem dünn gebankte Kalksteine aufweist, so dass die einzelnen, potentiell herabfallenden Blöcke relativ klein sind. Frische große Blöcke aus den massigen Kalksteinpartien wurden nicht gefunden, so dass die Steinschlagaktivität in diesem Bereich als eher gering einzustufen ist. Sollten sich dennoch größere Blöcke lösen, so scheint der Wald im Verebnungsbereich sowie der Verebnungsbereich selbst einen sehr guten Schutz darzustellen

Abschließend ist noch darauf hinzuweisen, dass auf den verbliebenen Baugrundstücken eine gewisse Rutschungsgefährdung bei nicht angepassten Sicherheitsvorkehrungen im Rahmen der zukünftigen Bautätigkeiten gegeben ist.

### **7.4.7 Diskussion**

Wie bei der geomorphologischen Kartierung in Mössingen-Öschingen erleichterte das hochaufgelöste DGM1 die Kartierarbeiten vor Ort sehr und gewährleistet auch in diesem Fall eine sehr genaue Verortung der kartierten Phänomene. Ein großer Vorteil bestand darin, dass das ganze Ausmaß der großen alten Rutschung im Westen des Untersuchungsgebietes durch die Schummerungsdarstellung direkt erkannt werden konnte. Dieses gestaltet sich im Gelände wesentlich schwieriger. So wird auch in der Geologischen Karte im Maßstab 1:25.000 (Blatt 7521 Reutlingen) im Auslaufbereich der Rutschung großzügig Kalktuff und sogar eine Kalktuffterrasse quer durch die Rutschungszunge ausgewiesen, so dass zu vermuten ist, dass bei der Kartierung die Grenzen der Rutschmassen nicht erkannt worden sind.

Der große Nutzen der Inklinometer- und Nivellementmessungen ist bereits im vorherigen Kapitel diskutiert worden, so dass an dieser Stelle nur die Bedeutung der regionalisierten Klimadaten der LUBW herausgestellt werden soll. Wie bereits im Kap. 5 erwähnt, weisen insbesondere die aus Temperatur und Niederschlag abgeleiteten Parameter von Verdunstung und Wasseräquivalent in der Schneedecke größere Unsicherheiten auf. Dennoch führt die Berücksichtigung dieser Parameter in Ermangelung eigener lokaler Klimastationen zu einem enormen Erkenntnisgewinn. Zudem sind die Klimadaten flächendeckend und in einer täglichen Auflösung verfügbar. Die Genauigkeit dieser Daten wird im Rahmen des Folgeprojektes mit einer eigenen Klimastation im Detail überprüft werden.

Das durchgeführte Bodenfeuchtemonitoring zeigt, dass sich die Geoelektrik generell sehr gut für ein solches Monitoring eignet. In Fällen, in denen der gesamte Rutschkörper aus sehr tonreichem Material besteht, ist allerdings eine Quantifizierung der Grenzflächenleitfähigkeit der Tone unumgänglich. In anderen Lokalitäten, in denen im wesentlichen nur die Gleitfläche aus tonreichem Material besteht, kann unter Umständen darauf verzichtet werden, da die Entwicklung der Durchfeuchtungsfronten beispielsweise in darüber lagernden sandigen Sedimenten sehr gut zu erkennen sein sollte.

Das Bodenfeuchtemonitoring wird im Rahmen des Folgeprojekts ausgeweitet werden. Beispielsweise wird eine ferngesteuerte Geoelektrik eingebaut, die dann z.B. alle zwei Stunden eine Messung durchführen kann, um damit wesentlich höher aufgelöste Zeitreihen zu erhalten, die einfacher mit den Klimadaten korreliert werden können. Zudem soll der Einfluss der Grenzflächenleitfähigkeit der Tone quantifiziert werden. Sobald diese Quantifizierung vorliegt, können diese Informationen genutzt werden, um die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Messdaten erneut auszuwerten und somit die damit verbundenen offenen Fragen zu klären.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass auf Grund der Messergebnisse von einer nicht zu vernachlässigenden Gefahr durch gravitative Massenbewegungen ausgegangen werden muss, zumindest für Teilbereiche des Untersuchungsgebietes. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um das genaue Ausmaß der Bewegungen zu bestimmen und um über längere Messreihen den Systemzustand besser abschätzen zu können.

Der Vergleich mit der regionalen Gefahrenkarte (Abb. 7.24) zeigt einerseits einmal mehr die Notwendigkeit lokaler Detailuntersuchungen. Andererseits können aus den Messergebnissen von Lichtenstein-Unterhausen durchaus Rückschlüsse auf ähnliche lokale Gegebenheiten in anderen Bereichen der Schwäbischen Alb gezogen werden. Es ist zu vermuten, dass eine Vielzahl von Hängen vergleichbare, langsame, aber tiefgründige Bewegungen vollziehen. Auch mit dem Wechsel zwischen Fließ- und Gleitbewegungen ist eventuell häufiger zu rechnen. Diese auf lokaler Ebene gewonnenen Erkenntnisse können daher durchaus Bedeutung für die Raum- und Infrastrukturplanung auf regionaler Ebene haben.

Bei lokalen Bautätigkeiten sind die Erkenntnisse dahingehend von Nutzen, dass bei Baugrunduntersuchungen die Möglichkeit tiefgründiger Bewegungen in vergleichbaren Lokalitäten in Betracht gezogen werden. Bei einer alleinigen Geländebegehung können die Bewegungen auf Grund

ihrer geringen Geschwindigkeit nicht wahrgenommen werden. Somit besteht das Risiko, dass für die auf die Begehungen folgenden Erkundungsbohrungen zu geringe Bohrtiefen angesetzt werden und eventuelle Gefahren übersehen werden.

## 8 Risikoanalyse

Die Ergebnisse der Risikoanalyse werden zuerst für die zwei regionalen Untersuchungsgebiete Schwäbische Alb und Oberes Filstal und anschließend für die zwei lokalen Untersuchungsgebiete Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen präsentiert. Eine Diskussion der Ergebnisse findet jeweils am Ende jedes Untersuchungsgebietkapitels statt.

### 8.1 Risikoanalyse Schwäbische Alb

Da die quantitative Gefahrenanalyse auf regionalem Maßstab nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte, waren auch die Risiken nicht quantifizierbar, so dass in diesem Kapitel nur die Ergebnisse der qualitativen Risikoanalyse präsentiert werden. Des Weiteren wird sich die Darstellung auf die Schadenpotenzialanalyse und die Risikoberechnung beschränken, da von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen wird und die Vulnerabilität dementsprechend auf 1 gesetzt wird.

#### 8.1.1 Schadenpotenzialanalyse

Weite Bereiche des Untersuchungsgebietes Schwäbische Alb weisen ein sehr geringes Schadenpotenzial auf (Abb. 8.1). Darin drückt sich zum einen der hohe Anteil an forst- und landwirtschaftlichen Flächen sowie Grünland aus. Zum anderen liegt es an der relativ dünnen Besiedlung der Schwäbischen Alb, der in Abhängigkeit der Nutzung die Schadenpotenzialkategorien gering bis sehr hoch zugeordnet sind. In Tab. 8.1 sind die flächenmäßigen Anteile der einzelnen Kategorien zusammenfassend dargestellt. Den Hauptanteil der Siedlungsfläche stellen Wohn- und Mischgebiete dar, die 5,58% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes ausmachen.

In den lokalen Untersuchungsgebieten Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen wird in den untersuchten Hangbereichen ein mindestens mittleres Schadenpotenzial ausgewiesen (Abb.8.1 A). In Ausschnitt B wird die sehr dünne Besiedlung im Bereich der südlichen Albhochfläche mit Übergang ins Donautal sehr deutlich.

Ein relativ hohes Schadenpotenzial stellen sicherlich auch die zahlreichen Straßen, die Schienen und sonstige lineare Infrastrukturen, z.B. Strom-, Gas- und Wasserleitungen dar, die im Rahmen dieser Arbeit aber nicht näher untersucht worden sind.

Tab. 8.1: Schadenpotenzialkategorien und deren Verbreitung im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb

Schadenpotenzial-kategorie	Landnutzung	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (%)
sehr gering	Forst- und landwirtschaftliche Flächen, Grünland (Ø 0,75 - 50 €/m <sup>2</sup> )	5534,75	92,58
gering	Gewerbegebiete (Ø 225 €/m <sup>2</sup> )	79,86	1,34
mittel	Wohngebiete (Ø 630 €/m <sup>2</sup> )	176,90	2,96
hoch	Mischgebiete (Ø 935 €/m <sup>2</sup> )	156,75	2,62
sehr hoch	Flächen für Gemeinbedarf (u.a. Verwaltung, Krankenhäuser, Kureinrichtungen) (Ø 1360 €/m <sup>2</sup> )	30,08	0,50
	Summe	5978,34	100,00

### 8.1.2 Risikoberechnung

Auf Basis der Risikomatrix (Tab. 5.4) wurden die klassifizierte Gefahrenkarte (Abb. 7.24) und die klassifizierte Schadenpotenzialkarte (Abb. 8.1) miteinander verschnitten und so die qualitativen Risiken bestimmt.

Aus Abb. 8.2 wird ersichtlich, dass weite Bereiche des Untersuchungsgebietes ein sehr geringes Risiko aufweisen, welches sowohl auf die geringe Gefahr der Albhochfläche sowie der ebenen Bereiche des Albvorlands und der Flusstäler, als auch auf das sehr geringe Schadenpotenzial in diesen Bereichen zurückzuführen ist. Entlang des Albtraufs und in anderen stärker geneigten Hanglagen wirkt sich die hohe Gefahr derartig aus, dass auch Flächen mit sehr geringem Schadenpotenzial (v.a. der Forst) ein etwas höheres aber dennoch geringes Risiko zugewiesen bekommen, welches sich deutlich in der Risikokarte abzeichnet. Insgesamt kommen die Flächen mit einem mittleren bis sehr hohem Risiko relativ selten vor, was wiederum auf die dünne Besiedlung zurückzuführen ist. Dennoch gibt es zahlreiche Ortschaften, deren Baugebiete sich teilweise in steilere Hangbereiche hinein entwickelten, so dass diese einem höheren Risiko unterliegen. In Abb. 8.2 A zeigt sich, dass beide lokale Untersuchungsgebiete aufgrund der Bebauung der etwas steileren Hanglagen ein mindestens mittleres Risiko aufweisen. In demselben Ausschnitt ist zudem am westlichen Rand in Lichtenstein-Unterhausen ein Problembereich zu erkennen, so dass sich ein paar Flächen mit hohem und sehr hohem Risiko bis in das Echaztal hinunterziehen. In anderen Flusstälern ließen sich teilweise ähnliche relativ ebene Bereiche mit hohem Risiko finden.

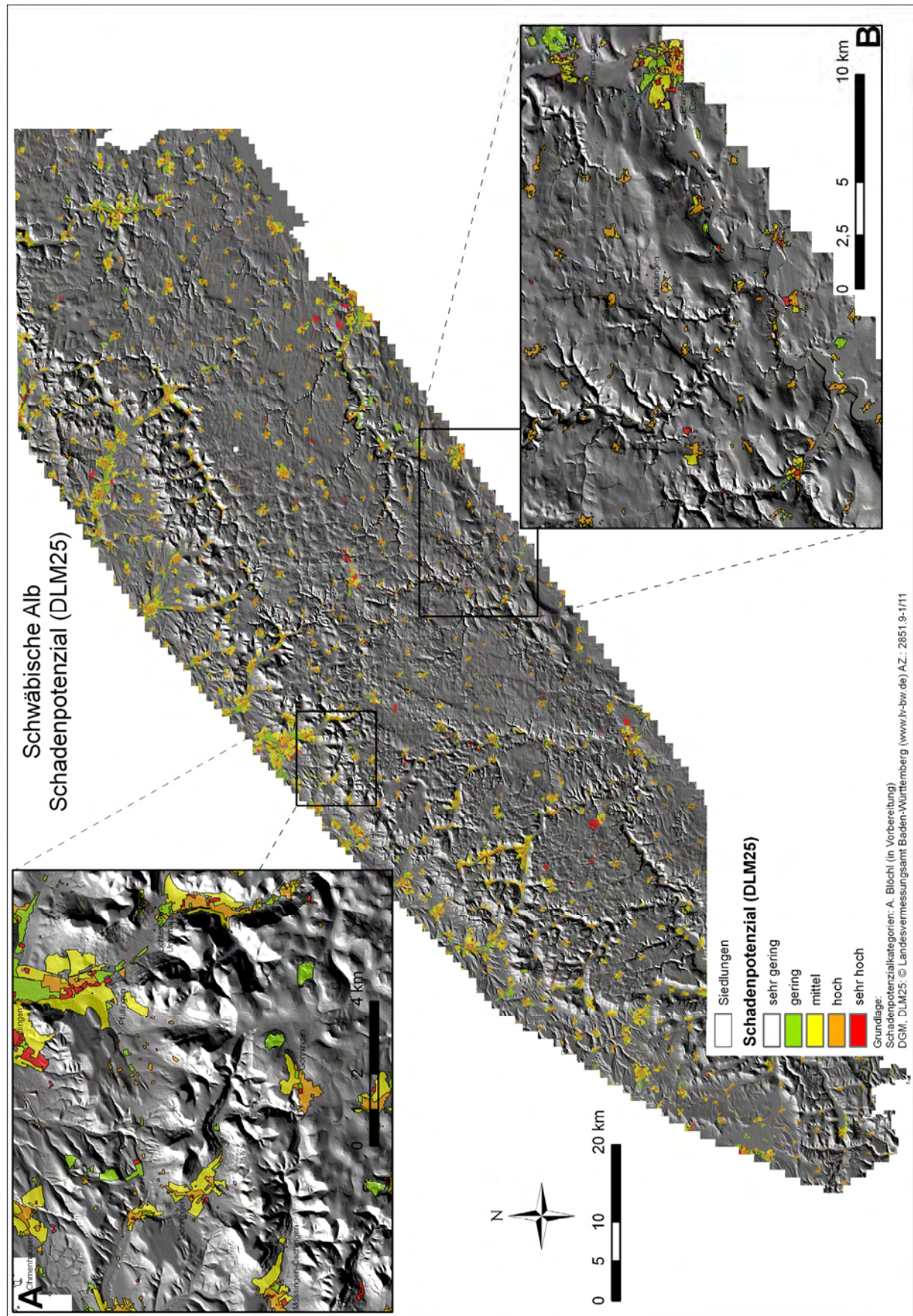


Abb. 8.1: Qualitatives Schadenpotenzial in der Schwäbischen Alb auf Basis des DLM25 (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)

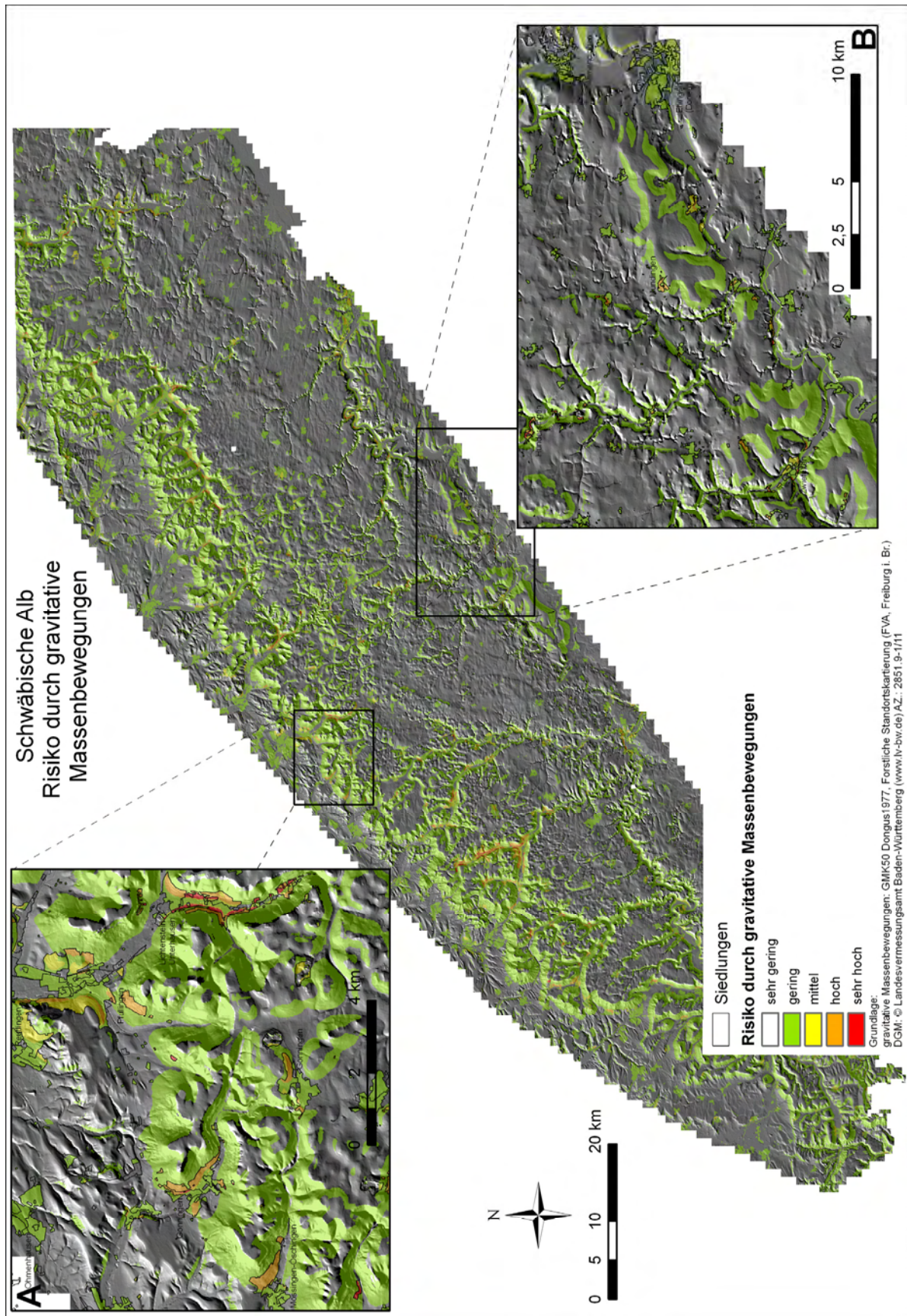


Abb. 8.2: Qualitatives Risiko durch gravitative Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb (A = Raum Mössingen bis Lichtenstein, B = Raum Zwiefalten)

Ein anderer Schwachpunkt ist die Verwendung der Siedlungsflächen auf Basis des DLM25. Da in diesem Datensatz keine einzelnen Häuser erfasst sind, weisen die Siedlungsflächen auch Flächen aus, in denen (noch) keine Häuser stehen. Unter Zuhilfenahme von digitalen Orthophotos konnte festgestellt werden, dass auf Grund dieser Tatsache teilweise Flächen ein hohes bis sehr hohes Risiko zugewiesen bekommen, obwohl dort wegen der fehlenden Bebauung die Risiken gegenwärtig wesentlich geringer sind.

In Tab. 8.2 ist die flächenmäßige Verteilung der einzelnen Risikoklassen für die Schwäbische Alb zusammenfassend dargestellt. Die Flächen mit mittlerem bis sehr hohem Risiko machen zwar insgesamt nur 1,64% der gesamten Flächen aus, stellen aber absolut mit 92,22 km<sup>2</sup> doch eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung dar.

Tab. 8.2: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb

Risikokategorie	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (%)
sehr gering	4371,14	73,12
gering	1514,98	25,34
mittel	53,30	0,89
hoch	31,56	0,53
sehr hoch	7,36	0,12
Summe	5978,34	100,00

### 8.1.3 Diskussion

Die erwähnten Probleme der Risikokarte im randlichen Flussauenbereich des Echaztals sind auf eine teilweise zu großzügige Ausweisung von gefährdeten Gebieten bei der Gefährdungsmodellierung zurückzuführen. In anderen Flusstälern ließen sich teilweise ähnliche Bereiche mit hohem Risiko finden, so dass die Güte der Risikokarte ein wenig eingeschränkt wird. Diese Flächen würden nur bei einem Auftreten sehr großer gravitativer Massenbewegung in Mitleidenschaft gezogen. Die angeführte Überschätzung der Risiken durch Nutzung der DLM25-Daten ist auf den Generalisierungsgrad zurück zu führen und ist auf Grund des Maßstabs der Risikokarte akzeptabel. Zum Teil bietet sich dadurch zudem die Möglichkeit, im Vorfeld der Bebauung die durch die Bebauung entstehenden Risiken zu erkennen und beim Bau entsprechend zu berücksichtigen oder aber das Gebiet zu meiden. Insgesamt lässt sich aber festhalten, dass die risikoreichen bebauten Hanglagen sehr gut wiedergegeben werden, so dass von einer akzeptablen Güte der Risikokarte ausgegangen werden kann, insbesondere, wenn der Maßstab der Risikoanalyse in der Bewertung berücksichtigt wird.

Eine bedeutende Limitierung weist die Risikokarte allerdings auf. Diese resultiert aus dem Ansatz, dass die Vulnerabilität auf 1 gesetzt wurde. Das heißt, dass die Karte ein Worst-Case-Szenario darstellt. Es ist anzunehmen, dass in vielen Fällen die Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen bei der Bebauung erkannt worden sind, so dass ein Großteil der Häuser entsprechende Fundamente aufweisen und ihre Vulnerabilität v.a. gegenüber kleineren oder



langsameren Bewegungen relativ gering ist. Die Berücksichtigung der Vulnerabilität würde in vielen Bereichen daher zu einer Reduzierung des qualitativen Risikos führen. Da aber keine Informationen zur Vulnerabilität vorlagen, konnte diese nicht integriert werden.

Die Erhebung von Vulnerabilitätswerten ist teilweise sehr schwierig. Selbst bei der Erhebung von qualitativen Vulnerabilitätswerten besteht das Problem, dass diese von Haus zu Haus sehr unterschiedlich sein können und somit nicht vom jeweiligen Haustyp auf seine Fundamente geschlossen werden kann. Welche Parameter im regionalen Ansatz für die Erhebung bzw. Abschätzung der Vulnerabilität von Gebäuden sinnvoll eingesetzt werden können, ist noch nicht geklärt. Auf Grund dieser Schwierigkeiten stellt das Worst-Case-Szenario eine sehr gute Zwischenlösung dar.

## 8.2 Risikoanalyse Oberes Filstal

In diesem Kapitel wird wie bei der Risikoanalyse für die Schwäbische Alb (Kap. 8.1), nur auf die qualitative Risikoanalyse eingegangen.

### 8.2.1 Schadenpotenzialanalyse

Wie im Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb, findet sich auch im Oberen Filstal über weite Bereiche nur ein sehr geringes Schadenpotenzial (Abb. 8.3). Dies ist ebenfalls auf die geringe Besiedlungsdichte zurückzuführen. Während die gesamte Siedlungsfläche prozentual ziemlich genau dem Anteil in der Schwäbischen Alb entspricht, verschiebt sich innerhalb der Siedlungsfläche die Verteilung auf Kosten der Gewerbegebiete leicht zu Gunsten der Wohn- und Mischgebiete (5,89%). Dabei ist das Filstal selbst dichter besiedelt als seine Nebentäler oder die Albhochfläche. Tab. 8.3 gibt einen Überblick über die flächenmäßige Verteilung der einzelnen Schadenpotenzialkategorien.

Tab. 8.3: Schadenpotenzialkategorien und deren Verbreitung im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal

Schadenpotenzial- kategorie	Landnutzung	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (%)
sehr gering	Forst- und landwirtschaftliche Flächen, Grünland (Ø 0,75 - 50 €/m <sup>2</sup> )	110,98	92,84
gering	Gewerbegebiete (Ø 225 €/m <sup>2</sup> )	0,95	0,79
mittel	Wohngebiete (Ø 630 €/m <sup>2</sup> )	3,94	3,30
hoch	Mischgebiete (Ø 935 €/m <sup>2</sup> )	3,09	2,59
sehr hoch	Flächen für Gemeinbedarf (u.a. Verwaltung, Krankenhäuser, Kureinrichtungen) (Ø 1360 €/m <sup>2</sup> )	0,59	0,49
	Summe	119,54	100,00

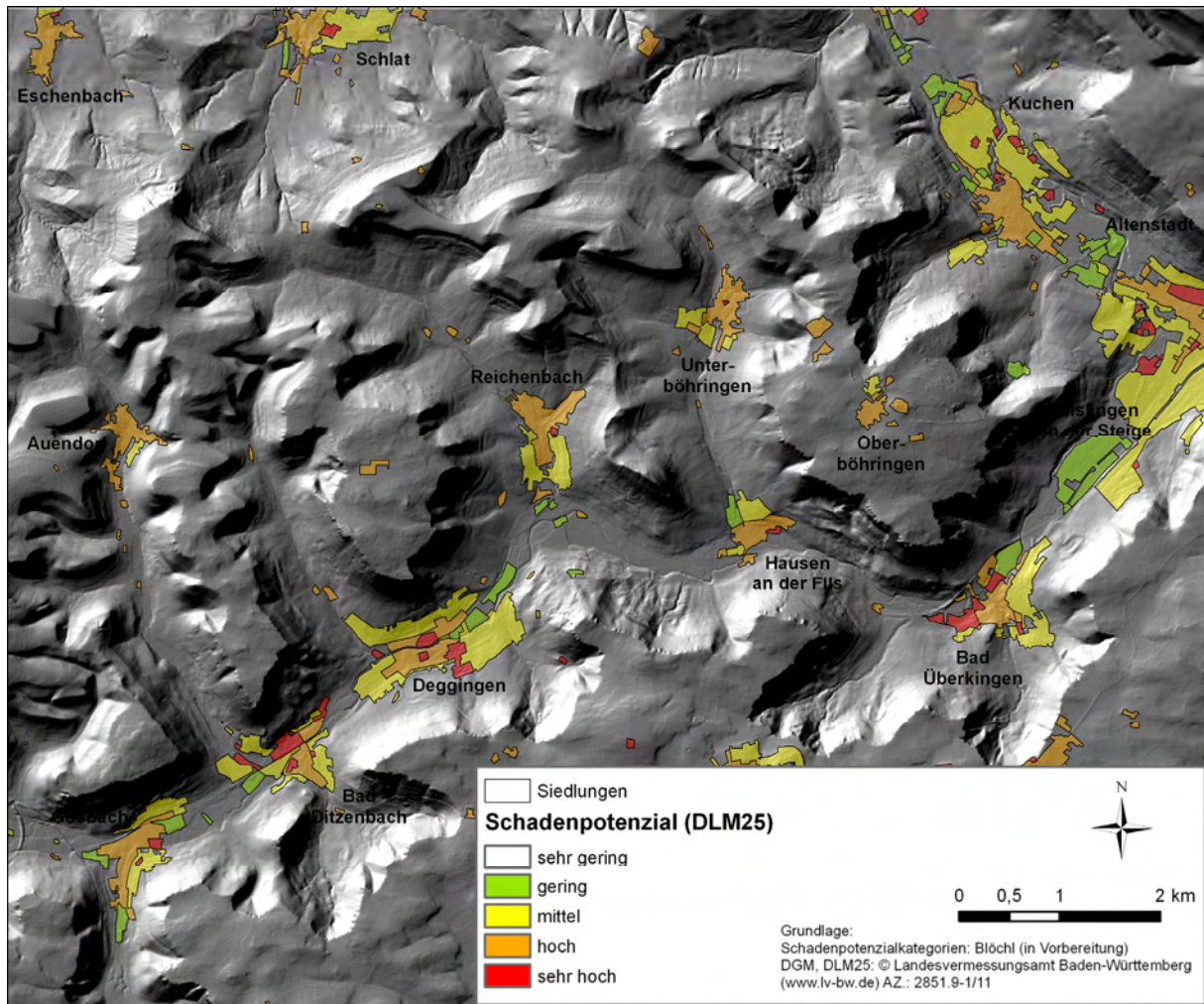


Abb. 8.3: Schadenpotenzial im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des DLM25

## 8.2.2 Risikoberechnung

Im Rahmen der Risikoberechnung wurden die klassifizierte Gefahrenkarte (auf Basis der Abb. 7.25) und die klassifizierte Schadenpotenzialkarte (Abb. 8.3) über die Risikomatrix (Tab. 5.4) bei einer Rasterauflösung von 10 m miteinander kombiniert und so die qualitativen Risiken abgeleitet. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der Risikoberechnung für die Schwäbische Alb, welche mit einer Rasterauflösung von 25 m durchgeführt wurde, für das Obere Filstal ausgewertet.

Generell zeigt sich das gleiche Bild wie beim Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb. Weite Bereiche unterliegen entweder sehr geringen oder geringen Risiken (Abb. 8.4 und 8.5). Letztere werden insbesondere durch die starke Neigung der Albtraufhänge und deren hoher Gefährdung in Kombination mit sehr geringen Schadenpotenzialen (v.a. auf Grund des weitverbreiteten Waldes) hervorgerufen. Höhere Risiken existieren dort, wo die Siedlungen die steileren Hanglagen hinaufziehen.

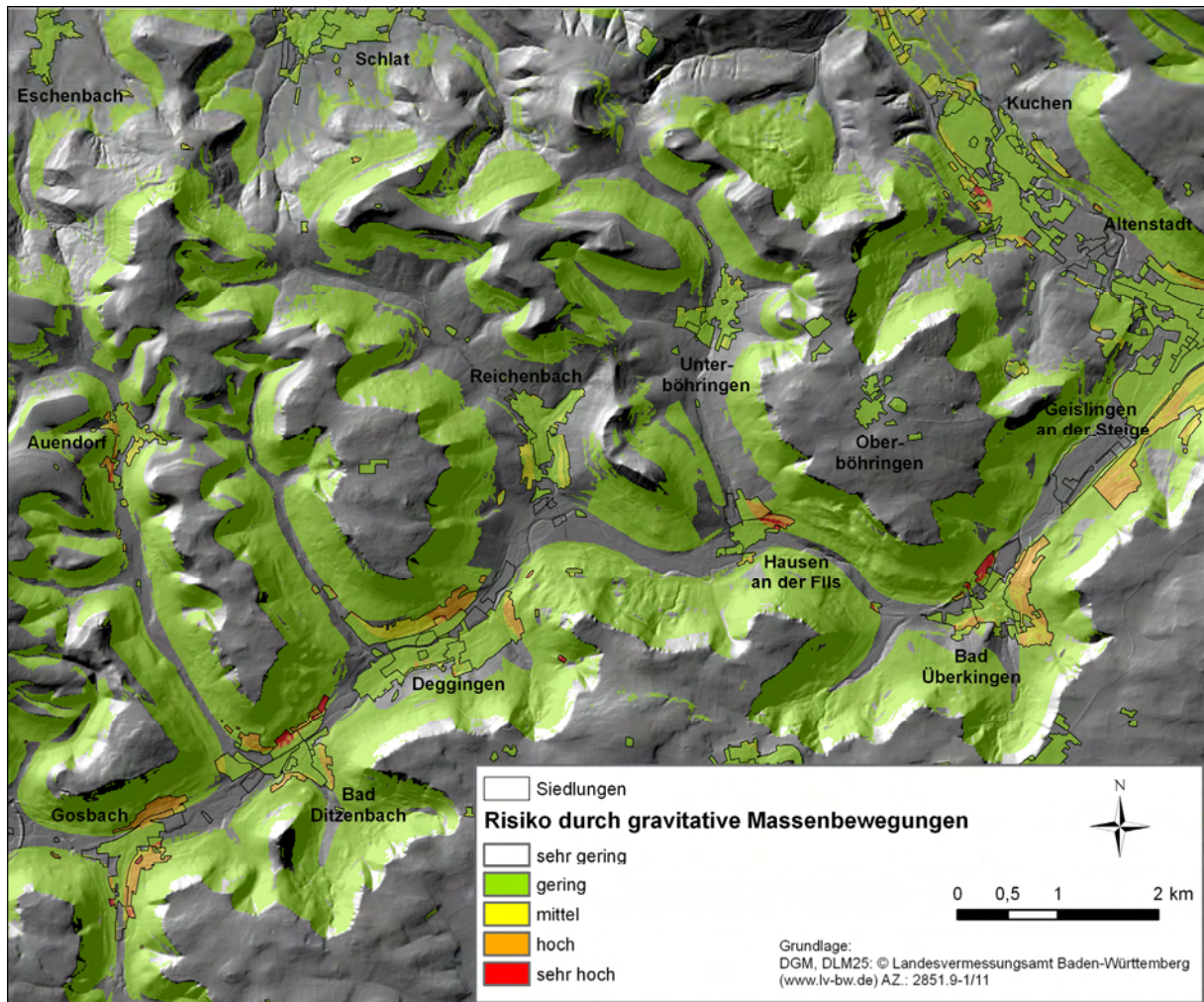


Abb. 8.4: Risiko durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells LsDGM10GÜK200\_2 und des DLM25

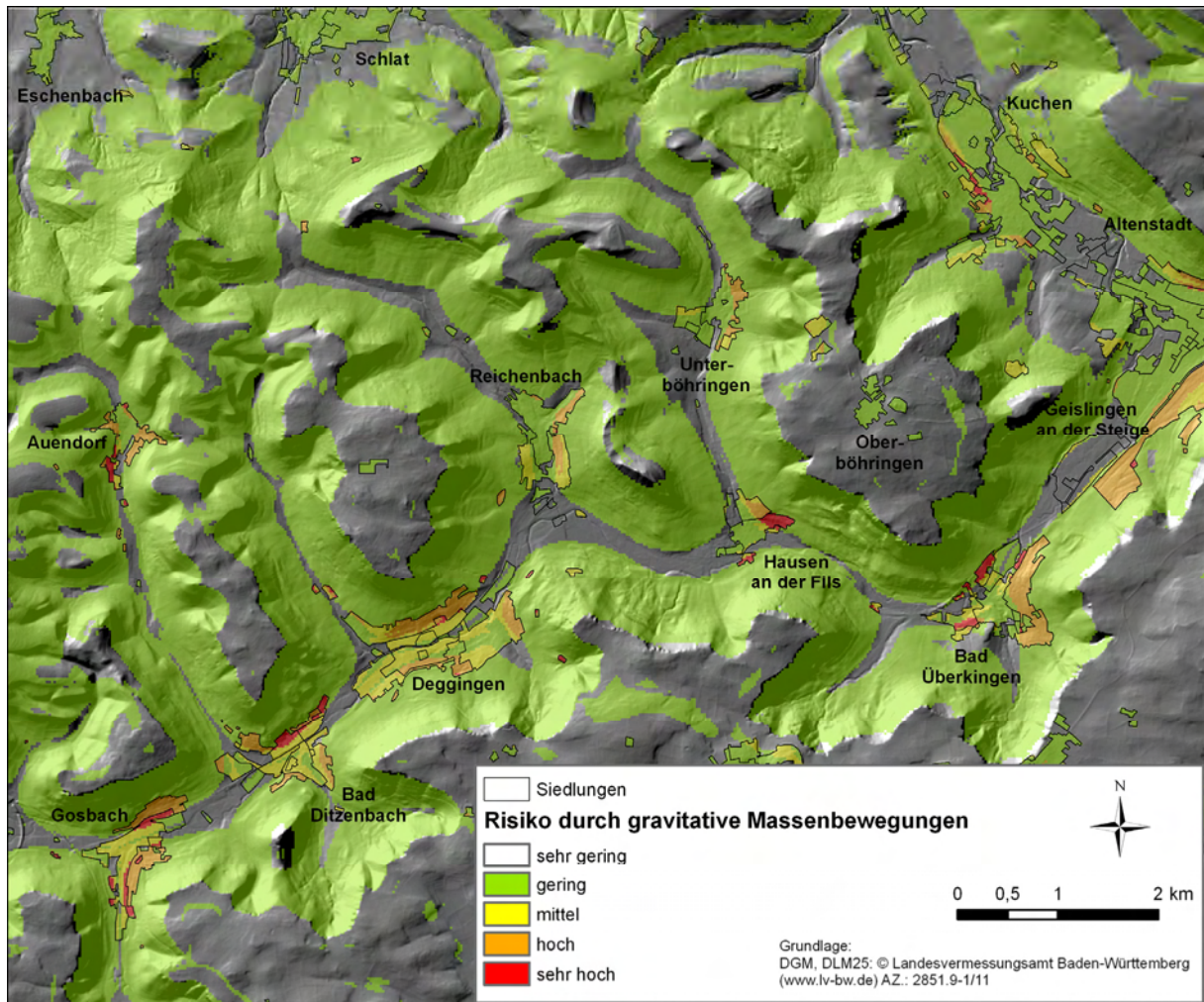


Abb. 8.5: Risiko durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Modells DoFva25\_SWA\_2 und des DLM25

Beim Vergleich der beiden Risikokarten fällt auf, dass bei der Verwendung der Gefahrenkarte mit der Auflösung von 25 m mehr Siedlungsbereiche mit einem höheren Risiko ausgewiesen werden. Dies spiegelt sich auch in den beiden Tab. 8.4 und 8.5 wieder. Während bei der Risikokarte mit einer Auflösung von 10 m nur 1,63% der Flächen bzw. 1,94 km<sup>2</sup> mit einem mittleren bis sehr hohen Risiko dargestellt werden (Tab. 8.4), sind es bei der Auflösung mit 25 m bereits 2,8% der Gesamtfläche bzw. 3,36 km<sup>2</sup> (Tab. 8.5). Zudem wird einem wesentlich größeren Bereich bei der Auflösung mit 25 m ein geringes anstatt sehr geringes Risiko zugewiesen.

Tab. 8.4: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des Gefahrenmodells LsDGM10GÜK200\_2 (vgl. Abb. 7.23)

Risikokategorie	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (%)
sehr gering	72,94	61,01
gering	44,66	37,36
mittel	0,95	0,80
hoch	0,88	0,74
sehr hoch	0,11	0,09
Summe	119,54	100,00

Tab. 8.5: Flächenmäßige Verteilung der qualitativen Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet Oberes Filstal auf Basis des für die Schwäbische Alb berechneten Gefahrenmodells DoFva25\_SWA\_2 (vgl. Abb. 7.24)

Risikokategorie	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (%)
sehr gering	52,79	44,00
gering	63,83	53,20
mittel	1,63	1,36
hoch	1,44	1,20
sehr hoch	0,29	0,24
Summe	119,98	100,00

### 8.2.3 Diskussion

Der Unterschied in den beiden Risikokarten ist ausschließlich auf die Unterschiede in den zwei Gefahrenkarten zurückzuführen. Die Tatsache, dass die Modellierung mit einer Auflösung von 25 m wesentlich größere Bereiche als hoch gefährdet ausweist, spiegelt sich deutlich in der Risikokarte wieder. Der Großteil der Zunahme der Flächen mit mittlerem Risiko liegt im Flussauenbereich und minimiert die Güte der Karte ein wenig. Hingegen stellt die stärkere Ausweisung der Hangbereiche mit höherem Risiko einen Vorteil dieser Risikokarte dar. Abzüge in der Güte bekommt die Risikokarte mit einer Auflösung von 10 m im Bereich des in der Gefährdungsmodellierung besprochenen Artefakts in der Flussaue im Nordosten des Untersuchungsgebietes. Die höhere Gefährdung bzw. höhere Gefahr in diesem Bereich sorgen für die Ausweisung von Flächen mit mittlerem und hohem Risiko mitten in der Flussaue.

Trotz dieser marginalen Unterschiede sind sich die zwei Risikokarten doch sehr ähnlich. Aus Erkenntnissen, die bei Geländebegehungen erlangt werden konnten, lässt sich zumindest für zwei Bereiche in beiden Karten das hohe bis sehr hohe Risiko bestätigen. Dabei handelt es sich zum einen um den südöstlichen Bereich von Gosbach, wo bei einem Grundstück Missachtungen in der Bauausführung zu Problemen mit gravitativen Massenbewegungen und aufwändigen

Nachbesserungen führten. Im nordöstlichen Hausen an der Fils handelt es sich um einen Bereich, der auch von einem lokalen Baugrundgutachter als sehr gefährdet angesehen wird.

Die Ausführungen in Kap. 8.1.3 zum Aspekt der Vulnerabilität gelten natürlich auch für die beiden Risikokarten für das Obere Filstal, so dass auch hier in vielen Fällen das Risiko sinken würde, wenn die Vulnerabilität der Gebäude berücksichtigt würde.

Im Vergleich zu der Gefährdungs- bzw. Gefahrenkarte nimmt der Detailgrad in der Risikokarte ab. Daran gekoppelt richtet sich die Frage nach dem Nutzen der verschiedenen Kartentypen. Während für eine Trassenplanung eine Gefährdungs- oder Gefahrenkarte durchaus wertvoller ist, mag für viele Fragestellungen der Raumplanung eine Risikokarte vorteilhafter sein. Insbesondere, wenn die Risikokarten auf Basis von Flächennutzungsplänen erstellt werden, wie im Projekt *InterRISK Assess* (Blöchl in Vorbereitung), die neben den bestehenden Siedlungsbereichen auch geplante Siedlungsflächen ausweisen, kann die Risikokarte einen großen Nutzen entfalten und noch rechtzeitig vor der Bautätigkeit auf eventuelle kritische Baubereiche hinweisen. Für diese Flächen können dann detaillierte Einzelgutachten gefordert werden, die Baufehler und spätere Schäden zu vermeiden helfen. Im Idealfall sollten Gefahren- und Risikokarten bereits in der Erstellung von Flächennutzungsplänen berücksichtigt werden, um, wenn möglich, entsprechend risikoträchtige Gebiete im Vorhinein zu meiden und Ausweichflächen zu suchen.

Zum Thema Unsicherheiten bleibt zu sagen, dass jeder einzelne Schritt in der Gefahren- und Risikoanalyse mit Unsicherheiten behaftet ist, die sich im endgültigen Produkt der Risikokarte summieren. Je mehr Daten letztendlich in eine Karte einfließen, umso unsicherer wird das Ergebnis und umso schwieriger wird die Validierung. Dies alles verstärkt sich noch einmal, wenn quantitative Risikoanalysen angestrebt werden. Auf den in dieser Arbeit ausgearbeiteten Ansatz zur quantitativen Risikoanalyse soll im Folgenden noch mal kurz eingegangen werden.

Die aus der Literaturrecherche ermittelten Schwachstellen bei existierenden Ansätzen in der quantitativen regionalen Risikoanalyse (siehe Kap. 3.2.2) sollten zum Teil mit dem neu entwickelten Ansatz behoben werden. Leider konnte das Vorhaben nicht umgesetzt werden, da in einem frühen Stadium der Gefahrenanalyse ein Weiterkommen nicht möglich war. Sollten die Probleme in diesem Bereich gelöst werden können, könnte untersucht werden, inwieweit der vorgeschlagene Ansatz zu einer verbesserten quantitativen Risikoanalyse führt. Insgesamt erscheinen die Herausforderungen im Bereich der regionalen quantitativen Risikoanalyse bei gravitativen Massenbewegungen auf Basis statistischer Gefährdungsmodellierungen noch sehr groß. Neben den im Rahmen der regionalen Gefahrenanalyse bereits diskutierten Aspekte, stellt insbesondere die Bestimmung von Vulnerabilitätswerten in Abhängigkeit von der Magnitude und dem Typ der gravitativen Massenbewegung trotz verschiedenster verfügbarer Schätzwerte noch ein ungelöstes Problem dar (siehe Kap. 3.2.2.1).

Abschließend muss wohl der Aussage von van Westen et al. (2006) (vgl. Kap. 3.2.2) zugestimmt werden, dass die regionale Quantifizierung von Risiken durch gravitative Massenbewegungen noch

immer ein Schritt zu weit ist und daher auf regionaler Ebene qualitative Risikokarten zu bevorzugen sind. Damit ist die Wissenschaft gegenüber den ausgehenden 1990er Jahren schon etwas vorangekommen, als z.B. Leroi (1996) und Mihalic (1998) noch forderten, dass die Risikoanalyse nur auf lokaler Skala durchgeführt werden und im regionalen Maßstab eine Gefahrenanalyse ausreichen sollte.

## **8.3 Risikoanalyse Mössingen-Öschingen**

### **8.3.1 Heuristische Risikoabschätzung**

Zur heuristischen Abschätzung des Risikos müssen neben der heuristischen Gefahrenabschätzung noch das Schadenpotenzial sowie die Vulnerabilität der Risikoelemente berücksichtigt werden.

Bei dem größten denkbaren Szenario einer gravitativen Massenbewegung im Untersuchungsgebiet, dem Versagen des gesamten Sporns, ist wahrscheinlich der gesamte Hangbereich oberhalb des Öschenbaches betroffen. Daher wurde für dieses Gebiet das Schadenpotenzial bestimmt. In diesem Bereich befinden sich insgesamt 480 Häuser (Stand 2003). Bei durchschnittlich zwei Personen pro Haus summiert sich die Anzahl der potenziell betroffenen Personen auf 960. Auf Basis der Schadenpotenzialkarte von Blöchl (in Vorbereitung) konnte allein für die Siedlungsfläche, d.h. ohne Berücksichtigung von Straßen und sonstiger Infrastruktur, ein ökonomisches Schadenpotenzial von 247 Mio. € berechnet werden.

Die Vulnerabilität der Gebäude ist in Abhängigkeit der Magnitude des zu erwartenden Ereignisses zu bestimmen. Für das Szenario des Versagens des ganzen Sporns ist die Bestimmung der Vulnerabilität relativ einfach, da in diesem Fall die Impactenergien der Masse wahrscheinlich so groß sind, dass alle Häuser komplett zerstört werden und somit die Vulnerabilität auf eins gesetzt werden kann. Lediglich auf einzelne Häuser in der Auslaufzone wirken durch Abnahme der Hangneigung und durch Reibungsverluste nicht mehr so große Kräfte ein, so dass diese Häuser den einwirkenden Kräften unter Umständen widerstehen können.

Bei den Szenarien, in denen unterschiedlich große Bereiche durch die Rutschschollen reaktiviert werden, gestaltet sich die Bestimmung der Vulnerabilität wesentlich schwieriger, da diese von der tatsächlichen Größe, der Lage und der Reichweite der Rutschung abhängig sind. In diesen Fällen spielt die Gebäudestruktur vermutlich eine wesentlich größere Rolle.

Eine zentrale Rolle hat die Gebäudestruktur und damit die Vulnerabilität bei extrem langsamen und unterschiedlich mächtigen Rutschbewegungen. Die zuverlässige Bestimmung der Vulnerabilität muss aber in diesen Fällen durch eine intensive Befragung der Hausbesitzer erfolgen, da die Geländeerfahrungen zeigen, dass vom Haustyp nicht direkt auf die Gebäudestruktur geschlossen werden kann. Ebenso muss nicht zwangsweise ein teureres Haus bessere Fundamente aufweisen. Alle generalisierenden Ansätze rufen daher zu große Unsicherheiten hervor und können in der Folge zu

Fehlern in der Risikobestimmung führen. Eine solche Erhebung war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Außerdem muss noch erwähnt werden, dass selbst bei einer solch detaillierten Erhebung der Gebäudestrukturen immer noch viele Unsicherheiten in der Bestimmung der Vulnerabilität bestehen, da das komplexe Wechselspiel zwischen gravitativen Massenbewegungen und Gebäuden bei weitem noch nicht umfassend erforscht ist (siehe Kap. 3.2.2.1).

Im Folgenden werden die Gefahr, das Schadenpotenzial und die Vulnerabilität zu einer von der Magnitude abhängigen Risikoabschätzung zusammengeführt:

Trotz einer erhöhten Gefahr durch extrem langsame gravitative Massenbewegungen unterschiedlicher Mächtigkeit scheinen die damit verbundenen Risiken für einen Großteil der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Häuser relativ gering zu sein, da sie entsprechend starke Fundamente (z.B. verwindungssteife Kästen) aufweisen und sich im Zweifelsfall langsam hangabwärts bewegen, ohne dass Schäden an den Gebäuden entstehen. Bei Häusern, die eine schwächere Gebäudestruktur aufweisen, bestehen bei gleicher Gefahr und gleichem Schadenpotenzial hingegen wesentlich größere Risiken. Um eine detaillierte Abschätzung der Risiken gegenüber den extrem langsamen Bewegungen vornehmen zu können, fehlen vor allem detaillierte Informationen zur Verbreitung dieser Bewegungen, sowie zur Vulnerabilität einzelner Häuser.

Die Gefahr durch kleinere und schnelle Rutschungen unterschiedlicher Mächtigkeit ist ebenfalls relativ hoch. Diese treten in erster Linie im unbebauten Hangbereich auf, wo das Schadenpotenzial sehr gering ist und dadurch auch nur sehr geringe bis geringe Risiken hervorgerufen werden. Sollten solche Rutschungen jedoch den Siedlungsbereich treffen, so ist dieses vor allem im mittleren Bereich des Hangrutschungskomplexes zu erwarten, der sich durch eine höhere Aktivität auszeichnet. Je nach Mächtigkeit können diese Rutschungen durchaus größere Schäden an den Häusern anrichten, so dass in diesem Bereich von größeren Risiken auszugehen ist. Wie hoch diese tatsächlich sind, hängt vor allem von der Vulnerabilität ab.

Ein weiterer Bereich mit vergleichbaren Risiken stellt vermutlich das wellige Gelände im Bereich der Inklinometer Oes01 und Oes04 dar, in dessen hangabwärtiger Fortsetzung auch das zerstörte Haus zu finden ist. Inwieweit an dieser Stelle aber tatsächlich tiefergreifende Bewegungen vorhanden sind, die sich unter extremeren Witterungsbedingungen beschleunigen können, muss durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Größere bis katastrophale Schäden sind lediglich von den unterschiedlichen Großereignissen zu erwarten. Da aber die Messergebnisse derzeit keine Bewegungen der Rutschschollen anzeigen und zudem im gesamten Hangbereich keine Anzeichen für potenzielle Großereignisse (z.B. Risse oder Spalten) zu finden sind, scheint diese Gefahr und die damit verbundenen Risiken derzeit sehr gering. Am geringsten sind die Risiken gegenüber dem Szenario des Versagens des gesamten Sporns, da die Eintrittswahrscheinlichkeit derzeit als äußerst gering eingestuft werden muss.



Die Gefahr durch Großereignisse kann sich aber über die Zeit verändern. Sollten sich erste Risse im Bereich der großen Rutschschollen bilden, so käme es schlagartig zu einer extremen Erhöhung der Risiken.

Des Weiteren soll kurz auf die Schadensfälle im Untersuchungsgebiet eingegangen werden. Es war nicht das Hauptziel dieser Arbeit, Aussagen über die Hangstabilität auf den Grundstücken der geschädigten Häuser zu machen. Daher sind die Aussagen zu den Schadensfällen nur mit Einschränkungen möglich. Dennoch lassen sich auf Grund der Messergebnisse gewisse Vermutungen anstellen.

Sowohl das am stärksten zerstörte Haus am nördlichen Rand des alten Hangrutschungskomplexes, als auch die drei geschädigten Häuser im aktiveren mittleren Bereich dieses Komplexes können wahrscheinlich mit den derzeit extrem langsamen Bewegungen im Untergrund in Verbindung gebracht werden. Wie sich diese Bewegungen im Bereich der geschädigten Häuser im Detail verhalten, kann nicht gesagt werden, da die Inklinometer zu weit von diesen Objekten entfernt sind. Zudem sind die Messreihen zu kurz und teilweise reichen die Inklinometer nicht tief genug, um detailliertere Aussagen zu potenziellen Bewegungen im Untergrund machen zu können.

Bezüglich des Risikos ist abschließend festzuhalten, dass die Hausschäden wahrscheinlich Folge einer Gefahr durch sich extrem langsam bewegende Rutschungen unterschiedlicher Mächtigkeit auf der einen Seite und einer nicht optimal an diese Bedingungen angepasste Bauweise (hohe Vulnerabilität) auf der anderen Seite sind.

Abschließend soll noch auf die Risikoentwicklung im Untersuchungsgebiet eingegangen werden. Die Risikoentwicklung ist zum einen abhängig von Veränderungen im natürlichen System, beispielsweise der Zunahme der Gefahren durch einen Anstieg der Niederschläge oder einer Abnahme der Scherfestigkeit infolge von Verwitterung des Ausgangsmaterials. Zum anderen wird die Risikoentwicklung von Veränderungen im Sozialsystem beeinflusst, z.B. durch eine zunehmende Besiedlung von gefährdeten Bereichen. Letzteres ist im Untersuchungsgebiet festzustellen. In Abb. 6.15 wurde die Siedlungsentwicklung im Mössingen-Öschingen anhand der Zeitscheiben 1820, 1965 und 2003 verdeutlicht. Unter der Annahme, dass die Gefahren über diesen Zeitraum relativ gleich geblieben sind, hat das Risiko kontinuierlich durch die Besiedlung des gefährdeten Hanges zugenommen. Insbesondere von 1965 bis 2003 nahm die Besiedlung höher gelegener Bereiche zu und näherte sich damit zugleich den stärker gefährdeten Bereichen, wodurch die Risiken stark erhöht wurden.

### **8.3.2 Diskussion**

Die heuristische Risikoabschätzung verdeutlicht, dass Risiken durch gravitative Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet vorhanden sind.

Da das Risiko ein komplexes Ergebnis aus Gefahr, Schadenpotenzial und Vulnerabilität darstellt, kann die Aussagekraft einer Risikoabschätzung durchaus limitiert sein, wie sich in folgendem Beispiel

zeigt: Zwei Häuser A und B sind einer gleich hohen Gefahr gegenüber extrem langsamen Rutschbewegungen ausgesetzt. Während Haus A ein sehr hohes Schadenpotenzial aufweist, sehr gute Fundamente hat und demnach eine sehr geringe Vulnerabilität besitzt, hat Haus B ein mittleres Schadenpotenzial und hat auf Grund sehr schwacher Fundamente eine sehr hohe Vulnerabilität. In der Kombination aller Faktoren besitzen beide Häuser ein identisches mittleres Risiko gegenüber den extrem langsamen Rutschbewegungen. Treten nun die genannten Bewegungen ein, so wird aber nur Haus B auf Grund der sehr hohen Vulnerabilität geschädigt. Im Fall von Haus A könnte beispielsweise durch Veröffentlichung der Risikoabschätzung der Verkaufswert des Objekts sinken, obwohl zukünftig keinerlei Schäden zu erwarten sind.

Demnach sollten Risikoabschätzungen, seien sie quantitativ oder qualitativ, durchaus mit Vorsicht betrachtet werden und die Unsicherheiten und Limitierungen offen gelegt werden.

Eine quantitative Risikoanalyse konnte nicht durchgeführt werden, da zum einen weder die genauen Grenzen der sich aktuell extrem langsam bewegenden Massen, noch die Grenzen zukünftiger kleiner und schneller Rutschungen festgelegt werden konnten. Für die regelmäßig auftretenden, extrem langsamen Bewegungen ist eine Wiederkehrwahrscheinlichkeit von eins anzusetzen, bei den kleineren Rutschungen ist diese Abschätzung allerdings bereits wesentlich schwieriger. Für die Großereignisse wurden drei Szenarien ausgewählt, für die zwar Grenzen festgelegt worden sind, aber denen ebenfalls keine zuverlässige Wiederkehrwahrscheinlichkeit zugeordnet werden konnte. Zum anderen stellt die detaillierte Bestimmung der Vulnerabilität ein großes Problem dar, welches im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gelöst werden konnte.

Können sinnvolle Szenarien zum zukünftigen Auftreten von gravitativen Massenbewegungen aufgestellt werden, so bietet der Sloping-Local-Base-Level (SLBL) Ansatz eine sehr gute Möglichkeit, die zu erwartenden Volumina zuverlässig abzuschätzen. Ist darüber hinaus den Szenarien eine Wiederkehrwahrscheinlichkeit plausibel zuzuweisen, so können diesbezüglich die Herausforderungen erfüllt werden und bei einer zuverlässigen Bestimmung der Vulnerabilität die Risiken quantifiziert werden. Eine fundierte Umsetzung dieses quantitativen Ansatzes erscheint jedoch nicht nur im Untersuchungsgebiet Mössingen-Öschingen noch in weiter Ferne.

Um die Abschätzung der Risiken im Untersuchungsgebiet zu verbessern, sollten weitere Untersuchungen angestellt werden, die mittels tief reichender Inklinometer die Stabilität der Rutschschollen endgültig klären könnten. Des Weiteren sollte im Bereich der Inklinometer Oes01 und Oes04 ebenfalls ein weiteres tief reichendes Inklinometer Aufschluss darüber geben, ob in diesem welligen Bereich tiefere Bewegungen stattfinden. Vorteilhaft wäre auch ein tief reichendes Inklinometer oberhalb der drei geschädigten Häuser im mittleren Bereich, um auch dort detaillierte Hinweise auf eventuelle Bewegungen zu erhalten.

Die Auswertung der zweiten tachymetrischen Wiederholungsmessung wird wertvolle Informationen über aktuelle Bewegungen im Untersuchungsgebiet bereitstellen, so dass auch auf dieser Basis eine bessere Gefahren- und nachfolgende Risikoeinschätzung möglich sein sollte. Die tachymetrischen

Vermessungen sollten weitergeführt werden, um rechtzeitig bedrohliche Entwicklungen wahrnehmen zu können. Darüber hinaus wäre auch der Einsatz der SAR-Interferometrie sehr vielversprechend, da diese innerhalb der Siedlungsfläche unter Verwendung von älteren Satellitenbildszenen wichtige Erkenntnisse über Bewegungen in den letzten Jahren liefern könnte.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der extrem langsamen Bewegungen mit unterschiedlichen Mächtigkeiten sollten bei zukünftigen Bautätigkeiten berücksichtigt werden, so dass aus einer entsprechenden Bauweise geringe Vulnerabilitäten und somit geringe Risiken resultieren.

Abschließend sollen die lokalen Ergebnisse mit der regionalen Risikokarte (Abb. 8.2) verglichen werden. Diese weist unter der Annahme, dass die Vulnerabilität 1 beträgt, den gesamten Hang mit einem hohen Risiko aus. Dies ist insofern gerechtfertigt, dass es sich um einen gefährdeten Hangbereich handelt. In vielen Fällen scheint dies jedoch bei der Bebauung berücksichtigt worden zu sein, so dass die Gebäude entsprechend stabil gebaut wurden. Dadurch weist eine große Anzahl der Häuser gegenüber den extrem langsamen Bewegungen ein geringes Risiko auf. Der Unterschied zwischen den hohen Risiken in der regionalen Karte und den teilweise geringen Risiken vor Ort liegt somit vor allem an der Vulnerabilität. Die regionale Risikokarte kann demnach ein gutes Kommunikationsmittel darstellen, um genau diese Problematik dem Bauherrn zu vermitteln, so dass er eher bereit ist, in einem so gefährdeten Hangbereich durch Bau geeigneter Fundamente die Risiken stark zu reduzieren.

## **8.4 Risikoanalyse Lichtenstein-Unterhausen**

### **8.4.1 Heuristische Risikoabschätzung**

Im Untersuchungsgebiet befinden sich in der Siedlungsfläche im oberen Hangbereichen 40 Häuser (Stand 2003), die von 80 Personen bewohnt werden (bei der angenommenen durchschnittlichen Anzahl von zwei Personen pro Haus). Auf Basis der Daten von Blöchl (in Vorbereitung) konnte für diese Siedlungsfläche ohne Straßen und sonstiger Infrastrukturen ein ökonomisches Schadenpotenzial von 50 Mio. € berechnet werden.

Die Bewegungsmessungen zeigen, dass zumindest in Teilbereichen mit 15 m mächtigen Gleitbewegungen und 8,50 m mächtigen Fließbewegungen zu rechnen sein muss. Das geschädigte Haus zeigt sehr deutlich, wie unterschiedlich die Vulnerabilität gegenüber unterschiedlichen Typen von gravitativen Massenbewegungen sein kann. Neben dem Typ spielt auch die Mächtigkeit der Bewegung eine Rolle, sowie die Lage des Hauses zur Bewegung. Die randliche Lage zu der sich bewegenden Masse kann differenzielle Kräfte auf das Haus einwirken lassen, die in der Mitte einer Fließ- oder Gleitbewegung nicht in diesem Ausmaß gegeben sind.

Die Fließbewegung übt offensichtlich solche Kräfte auf das unterschiedlich tief fundamentierte Haus aus, dass der Neubau vom Altbau wegbewegt wird. Bei der Gleitbewegung hingegen wird

offensichtlich das Haus en bloc bewegt, so dass keine Schäden an dem Haus entstehen. Dementsprechend hat das Haus gegenüber den Fließbewegungen eine wesentlich höhere Vulnerabilität als gegenüber den Gleitbewegungen.

Die Häuser in der Umgebung des geschädigten Hauses weisen wesentlich stärkere Fundamente und verwindungssteife Kästen auf, so dass sie eine deutlich geringere Vulnerabilität haben. Zugleich weisen einige dieser Häuser ein wesentlich höheres Schadenpotenzial auf als das geschädigte Haus, so dass unter Umständen genau der Fall eintritt, der in Kap. 8.3.2 beschrieben wurde.

Unter der Annahme, dass die festgestellten Bewegungen wesentlich größer sind, sich nach Westen fortsetzen und somit gleiche Gefahren für die Häuser gegenüber diesen derzeit extrem langsamen Bewegungen bestehen, besitzen alle Häuser ähnliche mittlere Risiken, obwohl nur eines auf Grund seines spezifischen Risikos Schäden davon trägt.

Sollte sich der Hang in einen kritischen Zustand bringen, so dass mit einem Versagen der Hangbereiche und einer schnellen Bewegung gerechnet werden muss, so würden wesentlich größere Risiken bestehen. Dann könnten auch die Häuser, die eine stabilere Gebäudestruktur haben, Schäden davon tragen oder gar - in Abhängigkeit der Größe des Ereignisses - komplett zerstört werden. Da die Messreihen aber derzeit noch zu kurz sind und zudem die genauen Grenzen der sich bewegenden Massen noch nicht definiert werden konnten, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob sich der Hang in einen kritischen Zustand bringen wird oder sich eher stabilisiert. Daher sind für dieses Untersuchungsgebiet dringend weitere Untersuchungen erforderlich, um weitere Hinweise über das Ausmaß und das Verhalten der sich bewegenden Massen zu bekommen. Im schlimmsten Fall müsste damit gerechnet werden, dass eine ähnliche Bewegung wie die mittelalte Rutschung westlich der Siedlungsfläche auftreten könnte. Ein solches Szenario trägt ein großes Risikopotenzial in sich und ist mit hohen ökonomischen Schäden verbunden. In Abhängigkeit davon, ob die Bewegung plötzlich auftritt oder sich mit Vorwarnzeichen (z.B. Aufreißen von Rissen) ankündigt, muss zudem mit etlichen Tode gerechnet werden.

Ähnlich wie in Mössingen-Öschingen hat das Risiko im Laufe der Jahre durch die Siedlungsentwicklung zugenommen, allerdings wesentlich langsamer. Um 1820 existierten noch keine Häuser an dem gefährdeten Hang, und auch im Jahr 1965 waren dort erst wenige Häuser gebaut. Erst von 1965 bis 2003 nahm die Bautätigkeit enorm zu, so dass in dieser Zeit auch die stärkste Risikozunahme zu verzeichnen ist.

#### **8.4.2 Diskussion**

Die am Inklinometer Lic02 gemessenen Bewegungen weisen auf einen kritischen Bereich im Untersuchungsgebiet hin. Die Inklinometer Lic01 und Lic03 reichen leider nicht tief genug, um tiefe Gleitbewegungen komplett ausschließen zu können. Offensichtlich treten aber in diesen Bereichen keine Fließbewegungen auf. Dennoch sind weitere und tiefer reichende Inklinometer erforderlich, um die Gesamtsituation besser abschätzen zu können.

Da es noch einige offene Bauplätze im Untersuchungsgebiet gibt, sollten die Messergebnisse bei den Bautätigkeiten beachtet werden, so dass die Häuser entsprechend stabil gebaut werden, um im Zweifelsfall den extrem langsamen Bewegungen Widerstand leisten zu können. In diesem Zusammenhang kann die regionale Gefahren- und Risikokarte sehr hilfreich sein, um die Problematik dem Bauherrn zu verdeutlichen und ihn von der Notwendigkeit der größeren Investition in die Fundamente des Hauses zu überzeugen.

Es ist durchaus denkbar, dass sich die extrem langsamen Bewegungen in den nächsten Jahrzehnten weiter fortsetzen, ohne sich zu beschleunigen, so dass keine größeren Schäden bei einer angepassten Bauweise zu erwarten sind. Ob mit schnelleren Bewegungen gerechnet werden muss, sollte auf jeden Fall durch weitere Untersuchungen abgesichert werden. Dieses wird zumindest teilweise in dem bereits erwähnten BMBF-Projekt zur Frühwarnung vor gravitativen Massenbewegungen geleistet werden können.

Abschließend soll die lokale Risikoanalyse zusammenfassend diskutiert werden. In beiden Untersuchungsgebieten stellen derzeit vor allem die extrem langsamen Bewegungen Probleme für Gebäude und Infrastruktur dar. Auf diese hat sich ein Großteil der Hausbesitzer, oft auf Basis von geologischen Einzelgutachten, eingestellt, so dass die Häuser so gebaut wurden, dass sie diesen Bewegungen widerstehen können. Allerdings ist davon auszugehen, dass in vielen Fällen tiefgründige Bewegungen wie in Lichtenstein-Unterhausen nicht berücksichtigt wurden. Diese führen vermutlich dazu, dass die stabilen Gebäude langsam mit der Bewegung hangabwärts verlagert werden. Inwieweit die Kenntnis von solch tiefen Gleitbewegungen zu einer anderen Bauweise oder Meidung des Gebiets geführt hätten, kann nicht eingeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, wie wichtig Inklinometermessreihen sind, um ein besseres Verständnis für die Dynamik der Hänge am Albtrauf aufzubauen. Es ist durchaus zu vermuten, dass tiefe Gleitbewegungen auch in anderen Lokalisationen anzutreffen sind. Solange sie nicht wahrnehmbar sind, kann dies zum einen zu einer Besiedlung von Gebieten führen, die gemieden werden sollten, und zum anderen zu nicht angepassten Bauweisen. Die zentrale Frage ist, inwieweit sich diese Bewegungen beschleunigen können und dann zu großen Rutschungen führen können, die in den besiedelten Gebieten zu enormen Schäden und eventuell auch Todesopfern führen können.

In diesem Zusammenhang muss auch die in dieser Arbeit festgestellte wesentlich höhere Aktivität von gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb angeführt werden. Auf Grund dieser Ergebnisse kann nicht ausgeschlossen werden, dass große Ereignisse bei extremen Niederschlägen oder Schneeschmelzen in Kombination mit längeren Feuchtephasen auch in Siedlungsgebieten auftreten werden. Insgesamt besteht daher durchaus ein großes Risikopotenzial in der Schwäbischen Alb, welches aber auf Grund der derzeit noch vorhandenen Unsicherheiten weder auf regionaler, noch auf lokaler Skala näher bestimmt werden kann. Wie groß die Schadenpotenziale jedoch sein können, zeigen eindrucksvoll die Beispiele aus den lokalen Untersuchungsgebieten.

Aufgrund aller Unsicherheiten, die sowohl auf regionaler, als auch auf lokaler Skala bestehen, stellt sich die Frage, ob quantitative Risikokarten zuverlässig für Rutschungen in der Schwäbischen Alb erstellt werden können. Zudem ist fraglich, welchen Mehrwert Karten liefern werden, die derart große Unsicherheiten aufweisen. Für andere gravitative Massenbewegungen in anderen Lokalitäten mag eine Quantifizierung wesentlich einfacher sein und durchaus wichtige Zusatzinformationen liefern. Die Forderungen, dass auf jeden Fall quantitative Risikoanalysen anzustreben sind, da nur sie die Akteure und Entscheidungsträger in die Lage versetzen würden, adäquate Lösungen zu finden (z.B. Ammann 2006 und Chung 2006, siehe auch Kap. 3.2.2), scheint auf Basis der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit überdenkenswert. In vielen Fällen scheinen die Unsicherheiten so hoch, dass die Aussagekraft quantifizierter Risikokarten stark limitiert ist.

Werden dennoch quantitative Risikoanalysen angestrebt, so sollten die Ergebnisse immer als relative, nicht als absolute Risiken betrachtet werden. Abgesehen davon, dass bereits die Definition von allgemein akzeptierten Risikoleveln nicht unproblematisch ist (siehe Kap. 3.2.3), scheint auch ein sinnvoller Vergleich mit den von einigen Autoren geforderten „*uniform safety level accepted by the public*“ (z.B. Ammann et al. 2006, S. IX) somit nur sehr schwer möglich.

Abschließend soll noch einmal auf den Fall des geschädigten Hauses in Lichtenstein-Unterhausen eingegangen werden. Aus Sicht der Katastrophenvorsorge hat sich der derzeitige Hausbesitzer korrekt verhalten; so hat er vor dem Kauf des alten Hauses, welches in der Mitte schon Risse aufwies, sowohl Ingenieurgeologen, Statiker und einen Architekten befragt, ob er das Haus kaufen und umbauen kann sowie was dabei zu beachten sei. Trotz der Beachtung der Expertenempfehlungen, die jedoch offensichtlich die Gegebenheiten nicht korrekt erfasst haben, weist das Haus eine zu hohe Vulnerabilität gegenüber den Fließbewegungen auf und trug somit bereits nach einigen Jahren Schäden von den regelmäßigen Fließbewegungen im Sommer und Herbst davon.

## 9 Nutzenanalyse

(Die Transkripte der qualitativen Interviews Inggeol\_01 bis Inggeol\_04 befinden sich in digitaler Form auf der CD-ROM im Anhang)

In der vorliegenden Arbeit liegt ein Fokus auf der Erfassung sämtlicher verfügbarer Informationen über vergangene gravitative Massenbewegungen sowie deren Analyse und räumliche Modellierung. In diesem Kapitel erfolgt nun die Auswertung der qualitativen Interviews mit Vertretern von vier Ingenieurgeologischen Büros, um deren Einschätzung zum Nutzen der räumlich erhobenen Daten zu analysieren. Im Detail wurden die Potenziale der Inventare gravitativer Massenbewegungen, des 1m-DGM und der Gefährdungskarten hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeiten in der alltäglichen ingenieurgeologischen Praxis untersucht.

Generell wurde in den Interviews sehr deutlich, dass alle Informationen, die im Vorfeld von Erkundungsmaßnahmen hinzugezogen werden können, als sehr vorteilhaft zu betrachten sind (z.B. Inggeol\_03, S.20). Im Folgenden wird auf den Nutzen der einzelnen Datengrundlagen näher eingegangen.

### *Inventare gravitativer Massenbewegungen*

Der Nutzen solcher Inventare wurde als durchaus hilfreich bzw. „*im Einzelfall interessant*“ (Inggeol\_03, S. 15) bewertet. Es gewährleistet die Möglichkeit, sich im Vorfeld schon darauf einzustellen, dass bei der Gutachtertätigkeit für ein bestimmtes Objekt mit einer Rutschung zu rechnen ist (Inggeol01, S. 11). Allerdings wurde bei der Bereitstellung umfangreicher Inventare das Problem gesehen, dass irgendwann so viele Rutschungen erfasst sein könnten, dass es schwierig werden könnte zu beurteilen, welche noch aktive und welche alte abgeschlossene Bewegungen darstellen (Inggeol\_03, S. 17).

### *Hochaufgelöstes digitales Geländemodell (DGM1)*

Im Vergleich zu der eher zurückhaltenden Bewertung zum Nutzen von Inventaren, löste die Präsentation der Auswertemöglichkeiten des 1m-DGM Erstaunen und Begeisterung hervor. „*Schon erstaunlich, was man so alles sehen kann*“ (Inggeol\_04, S. 21). „*So schön hab' ich's [das Relief bzw. die gravitativen Massenbewegungen] noch nie gesehen*“ (Inggeol\_03, S. 8). „*Also das ist auch spannend, also muss ich sagen, dass diese, in dieser Schärfe... hab' ich's bisher noch nicht gesehen, auch hier sieht man ja, dass da [Rutsch-] Zungen sind*“ (Inggeol\_03, S. 9).

Die Vorteile des DGM1 wurden darin gesehen, dass über eine Schummerungsdarstellung sehr schnell ein Überblick über das gesamte zu untersuchende Areal zu gewinnen ist und so besser beurteilt werden kann, ob es sich im Falle von Schadenfällen bzw. Sanierungsarbeiten um kleine und flachgründige lokale Prozesse handelt oder ob ein größerer Bereich betroffen und die Möglichkeit tiefgründiger Rutschungsbewegungen gegeben ist (Inggeol\_02, S. 34 und 36). Auch würde die Auswertung des

DGM1 sowohl die Planung neuer Verkehrswege (Inggeol\_02, S. 36), als auch die Abschätzungen des Umfangs der notwendigen Baugrunduntersuchungen (Inggeol\_03\_14) erleichtern. Die Tatsache, dass das DGM die Erdoberfläche ohne Vegetation wiedergibt, führt dazu, dass es in vielen Fällen ein besseres Gesamtbild vermitteln kann, als es durch Geländebegehungen zu erzielen ist. Oft verhindert die Vegetation, dass das gesamte Rutschareal bei der Geländebegehung erfasst werden kann, so dass das DGM1 die einzige Option bleibt (Inggeol\_02, S. 38).

Von den vier Ingenieurbüros war das DGM1 nur einem einzigen bekannt. Dort werden die Schummerungsdarstellungen mittlerweile seit über einem Jahr bereits bei Projekten eingesetzt (Inggeol\_04, S. 15 und 19). Der Preis des DGM1 von ca. 60 €/km<sup>2</sup> erschien zwei weiteren Ingenieurbüros vor allem im Vergleich mit den Gesamtkosten für Gutachten als eher günstig (Inggeol\_02, S.38 und Ingeol\_03, S. 14), so dass ein Ingenieurgeologe zu der abschließenden Stellungnahme kommt: „Für mich ist das eine hochinteressante Sache“ (Inggeol\_03, S. 15).

### *Gefährdungskarten*

Der Nutzen der Gefährdungsmodellierung und der daraus resultierenden Karten wurde in zwei Bereichen gesehen: Zum einen als zusätzliche Information, die zur Verbesserung der Voruntersuchungen beitragen kann und zum anderen als Kommunikationsmittel.

*„Klar, ich meine, diese Darstellung ist jetzt natürlich eine Summendarstellung aller vorhandenen Informationen und gibt dadurch komprimiert wieder, wo muss ich auf dieses Thema Hangrutschungen besonderes Augenmerk legen, wobei es natürlich für uns sicher vor allem dort interessant ist, wo Siedlungstätigkeit ist“* (Inggeol\_03, S. 19). Im Bereich der Vorerkundung liegt der Nutzen für die Ingenieurgeologen vor allem in den nicht ganz so steilen Bereichen, die unter Umständen nicht direkt auf Basis der geologischen Karte und einer Geländebegehung alleine als gefährdet erkannt werden (Inggeol\_04, S.26 und 27). In steileren Lagen sind die rutschgefährdeten Bereiche dem Gutacher bekannt, so dass für ihn selber kaum bis kein Mehrwert aus der Karte zu gewinnen ist (Inggeol\_04, S. 27).

Die Ausweisung rutschgefährdeter Gebiete mittels Gefährdungsmodellierungen ermöglicht es dem ingenieurgeologischen Gutachter, im Vorfeld zu überlegen, ob nicht von Anfang an ein größerer Umfang an Erkundungsbohrungen in das Angebot aufzunehmen sind (Inggeol\_01, S. 11). Da beispielsweise Architekten oft wenig Wissen über Geologie und Rutschungen haben, wären die Gefährdungskarten ein geeignetes Mittel, um im Vorfeld auf eventuelle Mehrkosten hinzuweisen. Oft wird erst bei der Erkundung vor Ort festgestellt, dass eine Rutschgefährdung besteht und nachträglich der Untersuchungsumfang erhöht werden muss, was zu einer Steigerung der Gutachtenkosten führt (Inggeol\_01, S. 12). Darüber hinaus können Gefährdungskarten auch der Sensibilisierung von Bauherren und Prüfstatikern dienen (Inggeol\_01, S. 12). „[...] gegenüber einem Bauherrn oder einer Gemeinde, die irgendwo was erschließen will, [ist die Gefährdungskarte] auf jeden Fall ein zusätzliches Argument, zu sagen, hört mal, ihr befindet euch hier in einem... in einem Gebiet, das



*geologisch, jetzt z.B. im Hinblick auf Rutschungen nicht ungefährlich ist, und wenn man dann belegen kann, das ist nicht nur mein Bauchgefühl, das ist auch publiziert, z.B. und abrufbar, insofern ist das auf jeden Fall eine wichtige Information für die Bebauungs- und Erschließungsplanung“ (Inggeol\_03, S. 20). Da gelegentlich in Bebauungsplänen für rutschgefährdete Gebiete auf die Konsequenzen dieser Gefährdung, wie erhebliche Mehrkosten für die Fundamente, nicht deutlich genug hingewiesen wird, können Gefährdungskarten auch der Aufklärung des Bürgers dienen und sollten daher auf jeden Fall veröffentlicht werden (Inggeol\_02, S. 32). Welche Bedeutung Gefährdungskarten erlangen können, kommt im folgenden Zitat gut zum Ausdruck: „Ich kenne Gemeinderatssitzungen über die Hochwasserkartierung, das sind ganze Gebiete, sind gestorben, weil einfach irgendeiner hat die Karte rausgezogen und hat gesagt, ihr glaubt doch wohl nicht, ihr könnt doch da kein Neubaugebiet machen, was mit der Häufigkeit X überflutet wird“ (Inggeol\_02, S. 32).*

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Gefährdungskarten für gravitative Massenbewegungen aus Sicht der befragten Ingenieurgeologen ein wichtiges Kommunikationsmittel darstellen, mit denen den ingenieurgeologischen Laien die Gefährdung anschaulich vermittelt werden kann. Die Tatsache, dass in den Karten viele Flächen in der Schwäbischen Alb als hoch gefährdet ausgewiesen werden, wird so bewertet, dass dies zwar zuerst alle erschrecken könnte, aber in der Folge zum Nachdenken anregen würde, welches als positiv eingestuft wurde (Inggeol\_02, S. 35). Der Nutzen für die Vorerkundung wurde abschließend von einem Interviewpartner wie folgt bewertet: „Also ich würd' die Karte jederzeit sofort immer nutzen“ (Inggeol\_04, S. 27)

Die Veröffentlichung der Projektergebnisse wird ausdrücklich gewünscht (z.B. Inggeol\_03, S. 15), um die Informationsgrundlage für die Gutachtertätigkeiten zu verbreitern. Für die Bereitstellung der Informationen im Internet wird eine Seite der öffentlichen Hand bevorzugt (Inggeol\_03, S. 15), um einen nachhaltigen Zugriff auf die Daten zu gewährleisten. Hier wurde explizit das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau als Serviceanbieter vorgeschlagen (Inggeol\_03, S. 16). Um zu gewährleisten, dass die Ingenieurgeologen von den neuen Informationsquellen erfahren, wird vorgeschlagen, diese in der einschlägigen Fachliteratur bekannt zu geben (Inggeol\_03, S. 15).

## 10 Ideenskizze zum kooperativen Frühwarnsystem

Im Laufe der Arbeiten im *InterRISK* Projekt wurden Defizite in bestehenden Ansätzen zum Risikomanagement, insbesondere in Frühwarnsystemen deutlich. Es wurde daraufhin eine erste Skizze entwickelt, wie ein kostengünstiges System aussehen könnte, um die Entwicklung des Eintretens großer gravitativer Massenbewegungen mit einem großen Katastrophenpotenzial rechtzeitig zu erkennen und darauf basierend risikominimierende Maßnahmen einzuleiten. Da die Entwicklung eines umfassenden Risikomanagementansatzes nicht Hauptbestandteil dieser Arbeit ist, sei ausdrücklich betont, dass es sich um erste innovative Gedanken und Ideen aus der geomorphologischen Perspektive handelt. In intensiverem Maße werden Möglichkeiten und Grenzen eines Naturrisikomanagements, unter Berücksichtigung eines kooperativen Frühwarnsystems, aus sozialwissenschaftlicher Sicht bei Danscheid (in Vorbereitung) bearbeitet.

Die Ausgangslage: Insbesondere große gravitative Massenbewegungen kündigen sich wie in den Alpen (z.B. Heim 1932) so auch an der Schwäbischen Alb über einen längeren Zeitraum an. Während erste Risse schon mehrere Jahre oder gar Jahrzehnte vorher auftreten können (z.B. Rutschung an der Bronner Mühle 1960, Mössinger Bergrutsch 1983), so kann oft vor dem totalen Versagen des Hanges verstärkte Rissbildung und ein Krachen der Gesteine und Baumwurzeln, das Versickern von Bachläufen und Teichen festgestellt werden (Rutschungen am Ortenberg 1787 und 1789 (Riede 1990) und am Plettenberg 1851 (Fraas 1853 und Riede 1990)). Beim Mössinger Bergrutsch waren allerdings ca. 5 Stunden vor dem Ereignis bei einer Kontrollfahrt der Förster durch das spätere Rutschgebiet noch keine dieser besonderen Vorzeichen wahrnehmbar (Bibus 1986). Darüber, wann genau und mit welcher Vorwarnzeit sich dort entsprechende Phänomene einstellten, liegen keine Informationen vor. Dennoch bieten generell diese Vorwarnzeichen einen möglichen Ansatzpunkt für eine neue Form eines Frühwarnsystems.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist, dass die Frühwarnung vor gravitativen Massenbewegungen an einzelnen Hängen derzeit nur mit aufwändiger Mess-, Übertragungs- und Alarmierungstechnik möglich ist. Flächendeckende Monitoringsysteme auf Basis z.B. von SAR Interferometrie scheiden auf Grund des hohen Grads der Waldbedeckung aus. Des Weiteren sind die finanziellen Ressourcen von Bund, Länder und Kommunen sehr angespannt, so dass eine Ausstattung von zahlreichen Einzelhängen mit technischen Frühwarnsystemen nicht in Frage kommt.

Auf Basis dieser Ausgangslage wurde zusammen mit M. Danscheid überlegt, wie ein kostengünstiges Frühwarnsystem konzipiert und umgesetzt werden kann.

Aus der umfangreichen Geländearbeit resultiert die Erfahrung, dass viele Personen tagtäglich am Albtrauf entlang spazieren, wandern, joggen oder reiten gehen. Des Weiteren halten sich Forstarbeiter und Jagdpächter regelmäßig in entsprechenden Gebieten auf. Die Tatsache, dass dieselben Personen in gewissen Zeitabständen (z.B. täglich, wöchentlich oder monatlich) immer wieder dieselben Gebiete durchqueren, ermöglicht es ihnen, Veränderungen in der Natur sehr gut wahrzunehmen. Öffnet sich

ein Riss im Boden, so sollten sie es schneller wahrnehmen als irgendwer anders. Die häufige Besichtigung des Gebiets führt sogar dazu, dass die lokale Bevölkerung die Aktivität von Rissbildungen unter Umständen besser einschätzen kann als von außen hinzugezogene Experten, so dass auch schon heutzutage bei entsprechenden Begehungen auf die lokale Bevölkerung zurückgegriffen wird. Dies wurde sowohl von Ingenieurgeologen als auch Behörden in den qualitativen Interviews bestätigt. Ein geöffneter Riss kann für den Experten im ersten Moment sehr gefährlich aussehen, obwohl sich dieser seit Jahren nicht verändert hat. Letzteres kann die lokale Bevölkerung oft bezeugen.

Im Rahmen eines kooperativen Frühwarnsystems sollte versucht werden, die vor Ort bei anderen Tätigkeiten erhobenen Informationen zu sammeln. Dazu müssten die Personen angeregt werden, die Veränderungen, die sie wahrnehmen, an eine zuständige Kontaktperson vor Ort weiterzuleiten. Diese soll der Qualitätskontrolle der eingehenden Meldungen und als Schnittstelle zu einer übergeordneten Behörde dienen. Im Falle einer, sich bei der Kontrolle bestätigenden Gefährdungssituation, sind die Informationen an die zuständige Behörde weiterzuleiten. Als Kontaktpersonen vor Ort können für den Forstbereich Förster dienen, außerhalb des Forstes könnten unter Umständen die Bauamtsleiter der Kommunen zuständig sein. Beide sollten eng miteinander kooperieren. Insbesondere die bei den Experteninterviews befragten Förster signalisierten ihre Bereitschaft, eine solche Rolle zu übernehmen. Trotz ihrer bereits vorhandenen Kenntnisse über gravitative Massenbewegungen wiesen sie allerdings darauf hin, dass die Übernahme eines solchen Amtes von weiteren Schulungsmaßnahmen zur Früherkennung und Gefährdungseinschätzung von gravitativen Massenbewegungen nötig wären, um die Qualitätskontrolle entsprechend zuverlässig durchführen zu können. Des Weiteren müsste das genaue Vorgehen geregelt werden, insbesondere an wen die Informationen weiter zu leiten sind. Als übergeordnete Behörde käme das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg in Betracht, die die von den lokalen Kontaktpersonen eingehenden Informationen überprüfen und gegebenenfalls geeignete Gegenmaßnahmen einleiten könnten.

In diesen ersten Ideen wird ein großes Potenzial gesehen, um ein umfassendes Netzwerk auf Basis zahlreicher lokaler und ehrenamtlicher Akteure aufzubauen, das eine Früherkennung von gefährlichen Entwicklungen hinsichtlich großer gravitativer Massenbewegungen über weite Bereiche der Schwäbischen Alb ermöglichen könnte. Derzeit scheint kein technisches Frühwarnsystem, entweder aus technischen oder finanziellen Gründen, in der Lage zu sein, ähnliche Informationen bereitzustellen zu können, wie es so ein großes Netzwerk könnte.

Es wird davon ausgegangen, dass dieses kostengünstige Konzept umsetzbar sein sollte. Zudem besteht die Möglichkeit, das Konzept den jeweiligen lokalen und regionalen Gegebenheiten anzupassen.

Abschließend soll kurz auf die Möglichkeiten hingewiesen werden, die aus den Veränderungen der digitalen Umwelt resultieren. Seit dem Zusammenbruch 2001 hat nach O'Reilly (2005) das Internet eine neue Qualität gewonnen. Es geht nicht mehr nur um das Abgreifen von Informationen, sondern

vielmehr um die Erstellung eigener Beiträge mit digitalen Fotos und Videos (Blogs und Podcasts). Es ist eine enorme Zunahme des „Laien-Journalismus“ zu verzeichnen, welches sich vor allem in eigens dafür geschaffenen und hoch frequentierten Foren bemerkbar macht. O'Reilly (2005) bezeichnet die neue Generation des Internets als Web 2.0. In diesen aktuellen Veränderungen der digitalen Welt liegt ein riesiges Potenzial, welches zukünftig auch in Ansätzen des Risikomanagements bewusst genutzt werden sollte. Die Einrichtung einer Internetseite zur Frühwarnung vor Hangrutschungen an der Schwäbischen Alb könnte demnach eine zusätzliche Option sein, die das Konzept des kooperativen Frühwarnsystems sinnvoll unterstützen könnte.

## 11 Diskussion

Die mittels vielfältiger Methoden erhobenen Informationen zu gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb (räumliche Inventare, DGM1-Analysen, Historische Daten, die durch *InterRISK History* und *Perception* bereitgestellt wurden) geben deutliche Hinweise darauf, dass gravitative Massenbewegungen zum einen häufig und weit verbreitet in der Schwäbischen Alb auftreten. Zum anderen ist ihre Aktivität im Untersuchungsgebiet wesentlich größer, als es bisher von vielen Autoren angenommen wurde (siehe Kap. 6.1.5). Somit werden die ersten zwei Hypothesen (siehe Kap. 1) bestätigt.

Das Beispiel vom Hangenden Stein zeigt sehr deutlich, wie wichtig und aufschlussreich Arbeiten von Historischen Geographen für Fragestellungen der Geomorphologie sein können. Nur mit den Informationen aus der Primärquelle konnte die Größe des Ereignisses von 1879 bestimmt und anschließend im hoch aufgelösten DGM1 kartiert werden. Neben diesem Ereignis konnten von *InterRISK History* noch zahlreiche weitere sehr große Ereignisse gefunden werden, die bisher unbekannt waren.

Der Nutzen der Historischen Geographie für die Geomorphologie wird oft unterschätzt. Dabei hilft sie, wichtige Hinweise auf vergangene Prozessabläufe oder Systemzustände zu erhalten, die anderenfalls nur mittels deduktiver, induktiver oder abduktiver Verfahren herzuleiten sind. Diese Verfahren beinhalten immer die Gefahr von Fehlschlüssen, die unter Umständen erst durch die historischen Informationen über die aufgetretenen Prozesse aufgedeckt werden können.

In diesem Zusammenhang muss auch der stratigraphische Datierungsansatz mittels periglazialer Deckschichten diskutiert werden. Es ist zu vermuten, dass die u.a. von Terhorst (1997) und Bibus (1999) ermittelten Alter für die großen Rutschschollen in den aktiveren Bereichen des Albtraufs, in denen die obersten Mitteljuratone ausstreichen, viel zu hoch eingestuft werden. Die zahlreichen von Terhorst (1997) und Bibus (1999) durchgeführten absoluten Datierungen, von denen die meisten im Mittelalter oder in der Neuzeit liegen, und von den Autoren als viel zu jung interpretiert werden (siehe Kap. 6.1.5), zeigen unter Umständen das wahre Alter der gravitativen Massenbewegungen an und bedürfen daher eventuell einer Neuinterpretation. Insbesondere für die Datierungen, die bis ins 15. Jahrhundert zurück reichen, sollten sich noch Hinweise in den historischen Archiven finden lassen, wenn es sich tatsächlich um die wahren Alter der Ereignisse handeln sollte, ähnlich wie dies beim Hangenden Stein der Fall war. Zukünftige historische Recherchen in dieser Richtung wären somit von großem wissenschaftlichem Interesse.

Bezüglich der periglazialen Deckschichten ist, abgesehen von Aufschlüssen an Straßen, meist nur der oberste Meter beprobt und analysiert worden (z.B. Terhorst 1997 und Kallinich 1999). Sollten die Ereignisse wesentlich jünger als von pleistozänem Alter sein, d.h. im Holozän stattgefunden haben, so können die periglazialen Deckschichten während des Ereignisses in den Rutschkörper eingearbeitet worden sein, so dass sie in tieferen Schichten zu finden sein müssten. Daher könnte der Ansatz unter

Umständen dahingehend angewendet werden, dass der Rutschung ein holozänes Alter zugewiesen werden kann, wenn die Laacher See Tephra in tieferen Schichten des Rutschkörpers gefunden werden.

Wie in Kap. 6.1.7 ausgeführt, wurden die ersten Siedlungen in der Schwäbischen Alb bereits im 6. Jahrhundert gegründet. Da sich die Siedlungsentwicklung damals auch in die engeren Flusstäler ausdehnte, ist es durchaus denkbar, dass die Menschen bereits in früheren Jahrhunderten mit gravitativen Massenbewegungen konfrontiert wurden. Bisher konnten durch *InterRISK History* diesbezüglich jedoch noch keine Informationen gefunden werden.

Allerdings wird aus dem Verhalten der Bevölkerung während großer Rutschungen in Ratshausen in den Jahren 1787 und 1789 deutlich, dass bereits ein ausgeprägtes Verständnis dafür vorhanden sein musste, dass ein durch eine Rutschung aufgestauter See nach einem Dambruch zu einer katastrophalen Flutwelle führen kann (Röhrs 2006, Persönliche Mitteilung). Denn nach der Bildung eines durch eine Rutschung aufgestauten Sees wurde der entstandene Damm durch die Bevölkerung aufgegraben, um eine solche Flutwelle zu vermeiden. Da es sich dabei um einen komplexeren Zusammenhang handelt, muss dieses Wissen entweder durch einen zeitlich nahe liegenden katastrophalen Dambruch aus der weiteren Umgebung (z.B. Alpen) gewonnen worden oder aber durch tradiertes Wissen von Schadenfällen in der Schwäbischen Alb im Kollektivgedächtnis gespeichert gewesen sein. Die genauen Gründe lassen sich derzeit noch nicht klären.

Sollte sich zeigen, dass das Verhalten auf Schadenfälle in der Schwäbischen Alb zurückzuführen ist, dann wäre dies ein weiterer Hinweis auf eine lange Historie von Risiken durch gravitative Massenbewegungen für Siedlungen entlang des Albtraufs bzw. in den Flusstälern. Dies würde zudem wichtige Erkenntnisse dahingehend liefern, wie früher die Bevölkerung mit den Gefahren und Risiken umgegangen ist.

Ein weiterer wichtiger, aus den historischen Daten hervorgehender Zusammenhang ist, dass während größerer Überschwemmungen zahlreiche Rutschungen aufgetreten sind. Dies wird bisher bei dem Hochwasser von 1824 am deutlichsten, dass seither nicht mehr in dieser Magnitude aufgetreten ist. Während des Hochwassers traten gleichzeitig über 60 gravitative Massenbewegungen vom Schwarzwald über die Schwäbische Alb bis ins Keuper Bergland auf (siehe Kap. 7.1.2.1). In diesem Zusammenhang stellt sich vor allem die Frage, inwieweit bei dem Jahrtausendhochwasser von 1342, als es in ganz Mitteleuropa zu extremen Überschwemmungen kam (Glaser 2001), nicht auch zahlreiche und vor allem sehr große Rutschungen aufgetreten sind, die unter Umständen auch Schäden in Siedlungen hervorgerufen haben.

Wesentliche Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit sind auf die Verfügbarkeit des hochaufgelösten DGM1 zurückzuführen. Es handelt sich dabei um eine hervorragende Quelle zur Kartierung von gravitativen Massenbewegungen. Auf Basis geomorphologischer Kriterien sind darüber hinaus auch Abschätzungen des relativen Alters möglich. Das große Potenzial dieser hochaufgelösten Laserscan-

DGM wird zum einen in der Literatur (z.B. Brennecke 2006 und Schulz 2007) und zum anderen durch die Ingenieurgeologen in der Nutzenanalyse bestätigt.

Mittels umfassender Auswertungen des DGM1 lassen sich umfangreiche Inventare aufbauen (z.B. Brennecke 2006), die eine sehr gute Basis für Frequenz-Magnitude-Analysen sowie Gefahren- und Risikoanalysen darstellen. Eine Kombination mit multitemporalen Luftbildanalysen bietet die Möglichkeit, den einzelnen Rutschungskörpern ein Alter zuzuweisen, wie die aktuellen Ergebnisse aus dem Raum Mössingen zeigen (Galli 2007, Persönliche Mitteilung).

Der neu entwickelte Ansatz zur Berechnung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit auf Basis von kompletten Inventaren gravitativer Massenbewegungen für Teilbereiche des gesamten Untersuchungsgebietes konnte erfolgreich angewandt werden und bietet eine gute Möglichkeit, um mit vertretbarem Aufwand die Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von gravitativen Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude für das gesamte Untersuchungsgebiet zu berechnen. Daher kann auch die dritte Hypothese bestätigt werden (siehe Kap. 1).

Bei der Gefährdungsmodellierung wird in der Literatur teilweise von Vorhersagbarkeit von gravitativen Massenbewegungen durch statistische Modelle gesprochen (z.B. Chung und Fabbri 2005). Dies scheint aber nur eingeschränkt möglich zu sein, da die Güte der statistischen Modelle sehr von den Eingangsdaten abhängt. Zum einen stehen räumliche Informationen über zahlreiche vorbereitende sowie auslösende Faktoren nicht zur Verfügung, zum anderen ist der Detailgrad der Eingangsdaten nicht ausreichend, um gravitative Massenbewegungen genau vorhersagen zu können. Somit können letztendlich nur unterschiedliche Gefährdungsbereiche ausgewiesen werden.

Dabei verwundert es nicht, dass die Hänge insbesondere in einer Schichtstufenlandschaft wie der Schwäbischen Alb mit entsprechend rutschanfälligen Schichten, eine hohe Gefährdung aufweisen. Wo aber genau in diesen recht großzügig ausgewiesenen Flächen mit hoher Gefährdung gravitative Massenbewegungen auftreten werden, wird in naher Zukunft nicht mit statistischen Modellen vorhergesagt werden können.

Die Modellierungsergebnisse zeigen zudem, dass eine zu starke Fokussierung auf statistische Gütemaße, wie sie in der Literatur häufig genutzt werden (siehe Kap. 3.2.1.4), Gefährdungskarten erzeugen können, deren geomorphologische Güte durchaus limitiert sein kann. Die Einführung eines geomorphologischen Gütemaßes bringt zwar eine gewisse Subjektivität in die Bewertung der angestrebten objektiven Modelle, führt aber insbesondere für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb zu einem wesentlich besseren endgültigen Modell, als bei ausschließlicher Verwendung eines statistischen Gütekriteriums, da dies zu einer Überanpassung des Modells führen kann.

In Kap. 3.2.1.1 wurde die Kritik von Guzzetti (2005) zitiert, dass heutzutage im Rahmen der Gefährdungsmodellierung zu oft eine Fokussierung auf die Techniken stattfindet und weniger auf die tatsächliche Problematik im Untersuchungsgebiet Wert gelegt wird. Nur letzteres dient aber dem Ziel, eine möglichst optimale Gefährdungskarte für das jeweilige Gebiet zu erstellen. Um dieses Ziel zu

erreichen, muss viel Zeit aufgewendet werden, für die Erstellung und Zusammenstellung umfassender Daten zu gravitativen Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet, sowie für die Parameter, die die Verbreitung der gravitativen Massenbewegungen erklären können.

Guzzetti (2005) kritisiert weiterhin, dass es zu wenige Arbeiten gibt, die die verschiedenen Methoden und Modelle hinsichtlich der jeweiligen Möglichkeiten und Grenzen untersuchen und kritisch bewerten. Dem kann nur zugestimmt werden, verbunden mit der Forderung, zukünftig vermehrt solche Arbeiten anzustreben. Vor allem sollte auch der Bestimmung der finalen Gefährungsklassen eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden und eine Diskussion darüber stattfinden, inwieweit es vertretbar ist, die Klassengrenzen so anzupassen, dass sich ein gewisser Mindestprozentsatz der gravitativen Massenbewegungen in den höchsten Gefährungsklassen befindet.

Die Forderung nach einer intensiven Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Ansätze der Gefährungsmodellierung kann auf die Gefahren- und Risikoanalyse im Allgemeinen ausgeweitet werden. Auch hier mangelt es an Arbeiten, die die verschiedenen Ansätze kritisch betrachten und sich intensiv mit den Möglichkeiten und Grenzen der Methode sowie dem Nutzen der jeweiligen Endprodukte auseinandersetzen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass mit einfachen qualitativen Ansätzen sehr gute Ergebnisse zu erzielen sind, die für viele Zwecke bereits ausreichen. Dies wird durch die Nutzenanalyse bestätigt. Leider lagen zum Zeitpunkt der Interviews die Risikokarten noch nicht vor, so dass über den Nutzen dieser Karten für die Ingenieurgeologen nur zu spekulieren ist. In der Diskussion der lokalen Risikoabschätzung (Kap. 8.4.2) wurde der Wert dieser Karte hervorgehoben. Es ist gut vorstellbar, dass diese Risikokarten ebenfalls ein wichtiges Kommunikationsmittel für die Ingenieurgeologen darstellen können, wenn entsprechende Hintergrundinformation gegeben werden, wie diese zu interpretieren sind, da sie den Unterschied zwischen Gefahr und Risiko sehr deutlich machen können.

Häufig wird in der Literatur bei der Publikation von Ergebnissen der Gefahren- und Risikoanalyse davon gesprochen, dass die entsprechenden Karten einen großen Nutzen für Raumplanung, Versicherungen usw. haben. Über solch allgemeine Aussagen hinaus finden sich meist keine detaillierten Informationen, wie die entsprechenden Produkte von welchen Akteuren genutzt werden können. Es fehlt eine ausführliche Diskussion über den wirklichen Nutzen aller Produkte aus der Gefahren- und Risikoanalyse. In dieser Arbeit wurde ein erster Schritt in diese Richtung unternommen, der unbedingt weiter verfolgt werden sollte. Insbesondere muss die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen sowie dem Nutzen quantitativer Gefahren- und Risikokarten intensiv diskutiert werden.

Zu Beginn des *InterRISK* Projekts sowie der vorliegenden Arbeit ging der Autor noch davon aus, dass alle Risiken durch gravitative Massenbewegungen quantifizierbar sind. Ebenso wurde zu Beginn angenommen, dass akzeptable Risikolevel mittels sozialwissenschaftlicher Untersuchungen definiert werden können. Aus dem Vergleich zwischen quantifiziertem und akzeptablem Risiko, so die Idee,



könnten dann die Bereiche identifiziert werden, in denen zu hohe Risiken bestehen und in denen entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten wären.

Auf Grund dieser Annahmen wurde, nach einer umfangreichen Literaturrecherche, ein neuer quantitativer Gefahren- und Risikoansatz für den regionalen Maßstab entwickelt, der zumindest teilweise die Schwachstellen in den bestehenden Ansätzen beheben sollte. Wie ausführlich in Kap. 7 diskutiert, konnte der Ansatz nicht erfolgreich umgesetzt werden. Während auf der lokalen Skala der SLBL-Ansatz zur Berechnung des Volumens zukünftiger gravitativer Massenbewegungen eingesetzt werden konnte, war dies auf der regionalen Skala nicht möglich. Demzufolge kann die Hypothese vier für die lokale Skala bestätigt werden, muss aber für die regionale Skala verworfen werden. Aus letzterem folgt, dass auch Hypothese fünf verworfen werden muss.

Es ist durchaus denkbar, dass der quantitative Ansatz in anderen Untersuchungsgebieten erfolgreicher eingesetzt werden kann, doch müssen in der Durchführung auch dort zahlreiche Herausforderungen überwunden werden. Die kritischsten Bereiche in der Gefahrenanalyse sind die Bestimmung von sinnvollen gravitativen Massenbewegungseinheiten sowie die Zuweisung von zuverlässigen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten. Außerdem ist bisher die Reichweite der zukünftigen gravitativen Massenbewegung nicht berücksichtigt. Wird auch diese noch integriert, so besteht in vielen Untersuchungsgebieten wahrscheinlich das Problem, dass nicht nur steilere Hangbereiche, sondern auch noch die Auslaufbereiche mit einer hohen Gefahr belegt werden und sich kaum noch Gebiete mit einer geringen Gefahr finden lassen, abgesehen von weiten, ebenen Flächen.

Der Nutzen einer solchen Karte ist sehr kritisch zu hinterfragen. Bei der Weiterentwicklung zu einer quantitativen Risikokarte stellt vor allem die Bestimmung der Vulnerabilität ein zentrales Problem dar, wie dies insbesondere in der heuristischen Risikoabschätzung in den lokalen Untersuchungsgebieten zum Ausdruck gekommen ist (Kap. 8.3 und 8.4).

Des Weiteren zeigte die interdisziplinäre Zusammenarbeit im *InterRISK* Projekt, dass eine sozialwissenschaftliche Bestimmung von quantitativen, akzeptablen Risikoleveln, die die hohe Variabilität der Akzeptanz in der Bevölkerung berücksichtigt, nicht möglich ist. Die bisher umgesetzten oder vorgeschlagenen akzeptablen Risikolevel für gravitative Massenbewegungen in Hong Kong, Island oder der Schweiz wurden alle von Experten definiert, oft mittels Vergleich zu anderen scheinbar akzeptierten Risikolevel, z.B. die Wahrscheinlichkeit, im Straßenverkehr tödlich zu verunglücken (Bell et al. 2006a).

Im Rahmen der Diskussion um Nichtlinearitäten in geomorphologischen Systemen mag insbesondere geomorphologischen bzw. heuristischen Ansätzen wieder eine größere Bedeutung zukommen. Mittels statistischer oder deterministischer Modelle scheint es derzeit unmöglich, solch komplexe Verhaltensmuster für gravitative Massenbewegungen abbilden zu können. Mittels eines heuristischen Ansatzes besteht aber durchaus die Möglichkeit, auf lokaler Skala den Systemzustand und vorhandene Nichtlinearitäten auf Basis der eigenen Erfahrung subjektiv zu erfassen und in die Gefahren- und Risikoabschätzung mit einfließen zu lassen.

Die zukünftige Aktivität von gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb muss auch in Zusammenhang mit der viel diskutierten Klimaerwärmung betrachtet werden. Es wird meist davon ausgegangen, dass Extremereignisse zunehmen werden. Zudem wird für Deutschland angenommen, dass sich die bereits begonnene Verlagerung der Niederschläge vom Sommer in den Winter noch verschärfen wird. Beide Effekte könnten zu einer verstärkten Aktivität von gravitativen Massenbewegungen führen (siehe auch Kap. 7.4.6) und dadurch die Gefahren und Risiken in der Schwäbischen Alb erhöhen.

In dieser Arbeit wurden schwerpunktmäßig hydrologisch ausgelöste gravitative Massenbewegungen untersucht. Da die Schwäbische Alb seismisch aktiv ist, können jedoch einige der alten gravitativen Massenbewegungen auch durch Erdbeben ausgelöst worden sein. In den historischen Daten finden sich derzeit zwei Ereignisse, die diese Möglichkeit bestätigen. Detaillierte Untersuchungen zu seismisch ausgelösten gravitativen Massenbewegungen werden im Rahmen der Doktorarbeit von Horst Meyenfeldt durchgeführt.

Abschließend bleibt zu erwähnen, dass die intradisziplinäre Zusammenarbeit im *InterRISK* Projekt äußerst fruchtbar war. Große Teile der vorliegenden Arbeit wären in dieser Form nicht möglich gewesen, wenn die Arbeit nicht in das Projekt eingebunden gewesen wäre. So konnte auf vielfältige Daten zurückgegriffen werden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht hätten erhoben werden können. Über die reine Datenbereitstellung hinaus waren es vor allem die zahlreichen intensiven Diskussionen, die immer wieder zu neuen Ideen inspirierten, die sich insbesondere in den Kapiteln der Nutzenanalyse und der Ideenskizze zu einem kooperativen Frühwarnsystem niederschlugen, aber auch in zentralen Fragen der quantitativen Risikoanalyse und -bewertung. Des Weiteren wurden bei der Bearbeitung des Themas dieser Arbeit sehr viele Fragen aufgeworfen, bei denen das Detailwissen der Mitarbeiter der anderen Teilprojekte notwendig war, um diese zuverlässig beantworten zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurden viele Ansätze und Aussagen sehr kritisch betrachtet und teilweise auf Basis der während der Doktorarbeit gewonnenen Erkenntnisse in Frage gestellt. Weitere Forschungsarbeiten mögen auch die Erkenntnisse dieser Arbeit wieder in Frage stellen, so dass sich hier der Kreis zum Eingangszitat wieder schließt: *„Jede Erkenntnis weckt ja stets neue Fragen, und jede Untersuchung ist unvollständig und begrenzt, die Wahrheit ist aber unendlich, weil Alles in Zusammenhang steht.“* (Heim, A. 1883, zitiert in von Poschinger 1997, S. 45). In diesem Sinne ist es sehr zu wünschen, dass die durch die Ergebnisse dieser Arbeit neu aufgeworfenen Fragen von vielen verschiedenen Teildisziplinen in der Geomorphologie (u.a. Prozessgeomorphologie und historisch-genetische Geomorphologie), in der Geographie (u.a. Historische Geographie, Sozialgeographie, Wirtschaftsgeographie) und weiteren Disziplinen darüber hinaus (u.a. Geologie, Bodenkunde,

---

Psychologie, Jura und Medienwissenschaft) und in Kooperation mit der Praxis (u.a. Baugrundgutachter, Planer, Versicherer, Politiker) bearbeitet und so wiederum neue Erkenntnisse produziert werden. Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsfelder werden in dem nächsten Kapitel abschließend aufgeworfen.

## 12 Perspektiven

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen zum einen, dass teilweise die Datenlage noch nicht ausreichend ist, um abschließend bestehende Gefahren und Risiken zuverlässig abzuschätzen. Zum anderen werfen die Ergebnisse neue Fragen auf. Aus beiden Aspekten ergeben sich zahlreiche zukünftige Forschungsfelder, die im Folgenden aufgelistet sind:

### *Regional*

- Ausweitung der räumlichen und zeitlichen Inventare gravitativer Massenbewegungen (Auswertung weiterer historischer Archive, des Archivs des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, der Archive der Bau- und Bodenprüfstellen der Regierungspräsidien Stuttgart (Vervollständigung), Freiburg und Tübingen, weiterer Forsteinrichtungswerke und Zeitungsarchive sowie Durchführung weiterer DGM1-Analysen und multitemporaler Luftbildinterpretationen)
- Aufbau von vollständigen Ereignisinventaren (z.B. für die Zeit um den Mössinger Bergrutsch 1983)
- Verbesserung der berechneten Wiederkehrintervalle über neue historische Daten und die multitemporale Luftbildinterpretation
- Analyse der Eignung der periglazialen Deckschichten und vor allem der Laacher See Tephra zur Datierung holozäner gravitativer Massenbewegungen
- Analyse der Kopplung von fluvialen und gravitativen Systemen (u.a. Auswirkung der fluvialen Unterschneidung auf die Reaktivierung von gravitativen Massenbewegungen, Response-Zeit des Flusses auf den Impact)
- Aufbau eines Systems zur geomorphologischen Altersbestimmung von gravitativen Massenbewegungen auf Basis von DGM1-Analysen (vgl. Ansatz von McCalpin 1984 in Keaton und DeGraff 1996)
- Ermittlung der Grenzen und Möglichkeiten von qualitativen und quantitativen Gefahren- und Risikoanalysen
- Anwendung und Überprüfung des entwickelten Ansatzes der quantitativen Gefahren- und Risikoanalyse in anderen Untersuchungsgebieten
- Ausweitung der Nutzenanalyse (Auswertung weiterer bereits durchgeführter Interviews für andere Akteure, neue Interviews mit Analyse des Nutzens von Risikokarten)
- Ausweitung der Ideenskizze eines kooperativen Frühwarnsystems zu einem kooperativen Risikomanagementsystem

*Lokal*

- Deterministische Hangstabilitätsmodellierung in den lokalen Untersuchungsgebieten
- Einsatz von SAR-Interferometrie zur Analyse von vergangenen Bewegungen in Bereich der Siedlungsflächen
- Installation von weiteren tief reichenden Inklinometern in den lokalen Untersuchungsgebieten zur Klärung der offenen Fragen
- Ableitung von Niederschlagsschwellenwerten, die zur Auslösung von gravitativen Massenbewegungen erreicht bzw. überschritten werden müssen
- Verbesserung des geoelektrischen Bodenfeuchtemonitorings (höhere zeitliche Auflösung, Validierung mittels TDR-Sonden, Quantifizierung der Grenzflächenleitfähigkeit der Tone)
- Erkundung der Untergrundstrukturen mittels weiterer geophysikalischer Methoden (z.B. Geoseismik)
- Verbesserung des Nivellementmessnetzes zur Bestimmung der Quellungs- und Schrumpfdynamik der Tone im Hangbereich (Tonmineralbestimmung, höhere zeitliche Auflösung, mehr Bodenpunkte, Lagemonitoring mittels tachymetrischer Vermessung)
- Ermittlung der Grenzen und Möglichkeiten von qualitativen und quantitativen Gefahren- und Risikoanalysen
- Umsetzung der Ideenskizze für ein kooperatives Frühwarnsystem in den lokalen Untersuchungsgebieten

### 13 Zusammenfassung

Um die Gefahren und Risiken durch gravitative Massenbewegungen umfassend für die Schwäbische Alb zu untersuchen, wurde das DFG-Projekt *InterRISK* (Integrative Risikoanalyse und -bewertung rezenter Hangrutschungsgebiete der Schwäbischen Alb) initiiert. In vier Teilprojekten werden der Prozess der gravitative Massenbewegungen auf lokaler und regionaler Skala (*InterRISK* Analysis, Physische Geographie), die Wahrnehmung und der Umgang der Bevölkerung mit diesem Phänomen (*InterRISK* Perception, Sozialgeographie), historische Ereignisse und der Umgang früherer Gesellschaften mit gravitativen Massenbewegungen (*InterRISK* History, Historische Geographie) und das ökonomische Schadenpotenzial (*InterRISK* Assess, Wirtschaftsgeographie) untersucht. Die vorliegende Arbeit ist in das Teilprojekt *InterRISK* Analysis eingebunden.

Bei der Schwäbischen Alb handelt es sich um eine Schichtstufenlandschaft, die aus Sedimentgesteinen des Juras aufgebaut wird. Die generelle Rutschanfälligkeit resultiert vor allem daraus, dass Kalksteine über Mergel- und Tonsteinen lagern. Entlang des Albtraufs finden sich zahlreiche große Rutschschollen, für die von den meisten Autoren ein pleistozänes Alter angenommen wird. Von den rezenten kleineren Rutschungen unterhalb der großen Rutschschollen sind nach Bibus (1999) bis zu 90% Reaktivierungen.

Viele Siedlungsgründungen in der Schwäbischen Alb reichen bis in das 6. Jahrhundert zurück. Insgesamt ist die Siedlungsdichte allerdings sehr gering. Überwiegend sind die steilen Albtraufhänge heutzutage bewaldet, in den unteren flacheren Bereichen befindet sich vor allem Grünland und teilweise Ackerbau. In historischer Zeit reichte insbesondere die Grünlandnutzung teilweise bis zur der Albtraufkante.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Gefahren und Risiken durch gravitative Massenbewegungen auf zwei Maßstabsebenen. Die regionale Gefahren- und Risikoanalysen werden zum einen für das Untersuchungsgebiet Schwäbische Alb und zum anderen für das obere Filstal durchgeführt. In letzterem stehen auf Grund der geringeren Größe, höher aufgelöste Eingangsdaten zur Verfügung, so dass detailliertere Untersuchungen angestellt werden konnten. Im regionalen Ansatz werden zuerst sämtliche verfügbaren Informationen in Form von räumlichen Inventaren zusammengetragen, sowie mittels historischer Daten und Analysen eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells (Auflösung: 1 m x 1 m, DGM1) eine Altersbestimmung der gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb vorgenommen. In einem weiteren Schritt wird ein neuer Ansatz entwickelt, mit dem auf Basis eines für einen Teilbereich des Untersuchungsgebietes kompletten räumlichen Inventars die Wiederkehrwahrscheinlichkeit von gravitativen Massenbewegungen unterschiedlicher Magnitude für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet werden kann. Die Validierung erfolgt über die Auswertung der historischen Daten. Zur Analyse der Gefahren und Risiken werden ein einfacher qualitativer und ein quantitativer Ansatz entwickelt, die beide auf der Gefährdungsmodellierung mittels logistischer Regression basieren. Mittels des quantitativen Ansatzes wird versucht, die Fläche und das Volumen von potenziellen zukünftigen gravitativen Massenbewegungen auf Basis des

Sloping-Local-Base-Level (SLBL) Ansatzes (Jaboyedoff et al. 2004) zu berücksichtigen und damit eine Schwachstelle bestehender Ansätze zu beheben.

Auf der lokalen Skala wurden zwei Hangrutschungskomplexe in Mössingen-Öschingen und Lichtenstein-Unterhausen untersucht. Es wurde ein breites Methodenspektrum eingesetzt, welches geomorphologische Kartierungen, Bohrungen, Laboranalysen, Inklinometermessungen, Nivellementmessungen, ein geoelektrisches Bodenfeuchtemonitoring, sowie Volumenberechnungen mittels SLBL für ausgewählte Szenarien umfasst. Auf Basis aller erhobenen Daten wurden abschließend heuristische Gefahren- und Risikoabschätzungen vorgenommen.

Insgesamt konnten sieben verschiedene Inventare gravitativer Massenbewegungen zusammengetragen werden, von denen sich vor allem die Inventare auf Basis der geomorphologischen Kartierung im Maßstab 1:100.000 von Dongus (1977) und auf Basis der Hangrutschungsinformationen aus der Forstlichen Standortkartierung (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg) für die flächendeckende Gefährdungsmodellierung der Schwäbischen Alb eignen. Das für die Fragestellung dieser Arbeit qualitativ hochwertigste Inventar wurde von Brennecke (2006) erstellt. Es basiert überwiegend auf DGM1-Analysen, unterstützt durch Luftbildinterpretationen. Da dieses Inventar nur das Obere Filstal umfasst, konnte es auch nur für die Gefährdungsmodellierung im Oberen Filstal eingesetzt werden.

Der derzeitige Stand der Auswertung der historischen Daten ergibt 207 datierte gravitative Massenbewegungen für den Zeitraum von 1416 bis heute. Eine große Anzahl von weiteren, bereits in den Archiven gefundenen Ereignissen befindet sich noch in der Aufbereitung durch M. Röhrs (*InterRISK History*), z.B. über 60 gravitative Massenbewegungen, die während der großen Überschwemmung von 1824 vom Schwarzwald über die Schwäbische Alb bis ins Keuper Bergland auftraten. Des Weiteren deuten die historischen Daten an, dass im Umfeld von Großereignissen mit zahlreichen kleineren Ereignissen zu rechnen ist. So konnten bisher im Frühjahr 1983 zu Zeiten des Mössinger Bergrutsches (mit einem Volumen von 6 Mio. m<sup>3</sup>) 16 weitere gravitative Massenbewegungen nachgewiesen werden. Von der Existenz zahlreicher weiterer wird ausgegangen.

Die Analyse von datierten Ereignissen unterschiedlichen Alters im DGM1 liefert einen Eindruck davon, wie die Reliefformen von gravitativen Massenbewegungen eines bestimmten Alters aussehen. Anhand zahlreicher Beispiele konnten so Erkenntnisse gewonnen werden, mittels derer eine relative geomorphologische Altersbestimmung auch anderer Hangbereiche vorgenommen werden konnte. Ganz deutlich zeigt sich bei diesen Analysen der Unterschied in der Aktivität gravitativer Massenbewegungen zwischen Bereichen, in denen die obersten Mitteljuraschichten austreichen und Bereichen, in denen dies nicht der Fall ist. Zudem konnte mittels der DGM1-Analysen eine große Rutschung am Gräbesberg, für die ein pleistozänes Alter angenommen wurde, auf jünger als 800 v. Chr. datiert werden, da durch die Rutschung historische Schutzwallanlagen versetzt worden sind.

Die räumlichen Inventare, die historischen Daten, sowie die DGM1-Analysen bestätigen die Hypothese, dass die Aktivität auch der großen Rutschschollen wesentlich größer ist als bisher angenommen.

Auf Basis des neu entwickelten Ansatzes konnte für Großereignisse wie dem Mössinger Bergrutsch mit einer Fläche von mehr als 500.000 m<sup>2</sup> für die letzten 10.000 Jahre ein Wiederkehrintervall von 87 bis 139 Jahren berechnet werden. Die Auswertung der historischen Daten ergibt für ein ebenso großes Ereignis ein Wiederkehrintervall von 55 bis 63 Jahren. Da die Zeitreihe der historischen Daten relativ kurz ist und somit zu hohe Werte liefern kann, scheint der neu entwickelte Ansatz durchaus plausible Ergebnisse zu liefern.

Die Ergebnisse der Gefährdungsmodellierung aus beiden regionalen Untersuchungsgebieten zeigen deutlich, dass die steileren Hangbereiche vor allem entlang des Albtraufs einer hohen bis sehr hohen Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen unterliegen. Die statistischen Gütemaße liefern für alle Modelle sowohl für Trainings- als auch Testdatensätze extrem hohe AUROC-Werte von 0,81 bis 0,98. Die Anzahl der gravitative Massenbewegungen in den zwei höchsten Gefährdungsklassen liegt zwischen 60,55% und 94,70%. Nach diesen zwei Kriterien zeigen die Modelle weitestgehend hervorragende Validierungswerte. Es konnte allerdings festgestellt werden, dass eine Auswahl der Modelle nur auf Basis der statistischen Gütemaße zu Modellen führen kann, die zu stark an die Eingangsdaten angepasst sind. Insbesondere zeigte sich dies, wenn ein Parameter für die Distanz zu den obersten Mitteljuratonen aufgenommen wurde. Für die Auswahl eines aus statistischer und geomorphologischer Sicht besten Modells wurde ein geomorphologisches Gütekriterium neu eingeführt.

Die Gefährdungskarte wurde unter der Annahme, dass die am höchsten gefährdeten Bereiche auch jene sind, in denen am ehesten zukünftig mit gravitativen Massenbewegungen zu rechnen ist, in eine qualitative Gefahrenkarte überführt. Über eine Risikomatrix wurde unter der Annahme, dass die Vulnerabilität 1 beträgt, die qualitative Gefahrenkarte mit einer qualitativen Schadenpotenzialkarte in eine qualitative Risikokarte überführt. Insgesamt wurden 92 km<sup>2</sup> des Untersuchungsgebietes Schwäbische Alb mit einem mittleren bis sehr hohem Risiko ausgewiesen. Der neu entwickelte Ansatz zur quantitativen Gefahren- und Risikoanalyse konnte nicht erfolgreich im Untersuchungsgebiet angewandt werden.

In beiden lokalen Untersuchungsgebieten können auf Basis der Inclinometermessungen extrem langsame und unterschiedlich mächtige Bewegungen festgestellt werden, die offensichtlich in Kombination mit einer nicht an die Verhältnisse angepassten Bauweise zu Schäden führt. In Lichtenstein-Unterhausen treten saisonal abwechselnde Bewegungen auf. Während im Sommer und Herbst Fließbewegungen bis in 8,50 m Tiefe reichen und Schäden an einem Haus verursachen, finden im Frühjahr nach der Schneeschmelze bis zu 15 m mächtige Gleitbewegungen statt, die keine Schäden verursachen. Dadurch wird die Schwierigkeit der Bestimmung der Vulnerabilität von Gebäuden gegenüber den verschiedenen Typen von gravitativen Massenbewegungen sehr deutlich.



In Lichtenstein-Unterhausen konnte für den betroffenen Hang ein ökonomisches Schadenpotenzial für die Siedlungsfläche von 50 Mio. € berechnet werden. Zudem leben in dem gefährdeten Bereich geschätzte 80 Personen. In Mössingen-Öschingen belaufen sich diese Werte auf 247 Mio. € bzw. 960 Personen.

In beiden Fällen besteht eine große Gefahr gegenüber den extrem langsamen Bewegungen, die aber in den meisten Fällen auf Grund einer sehr geringen Vulnerabilität der Häuser zu geringen Risiken führt. Gegenüber größeren und schnelleren Bewegungen steigt die Vulnerabilität stark an, doch gleichzeitig geht die Gefahr stark zurück, da die Eintrittswahrscheinlichkeit auf Grund fehlender Anzeichen im Gelände (z.B. Risse und Spalten) als eher gering einzustufen ist. Sollten Risse entstehen, würde das Risiko schnell extrem ansteigen. Insgesamt ist es sehr schwierig Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten von größeren Ereignissen zu machen. In diesem Zusammenhang nutzen auch die regional abgeleiteten Wiederkehrintervalle nicht, da nicht vorherzusagen ist, welcher Hang in Zukunft am ehesten versagen wird. In beiden Untersuchungsgebieten sind somit weitere Untersuchungen notwendig, um die heuristische Gefahren- und Risikoeinschätzung zu verbessern.

Die Nivellementergebnisse aus Mössingen-Öschingen zeigen deutlich die Dynamik des Quellens und Schrumpfens der Tone, die über den gesamten Messzeitraum von fast zwei Jahren eine maximale Höhenveränderung von 2,5 cm bewirkten.

Auch das geoelektrische Bodenfeuchtemonitoring in Lichtenstein-Unterhausen zeigt erste vielversprechende Resultate. Während im Bereich der Kalksteinschutthalde schnelle und eindeutige Veränderungen festzustellen waren, verhindert dies im übrigen Bereich die Grenzleitfähigkeit der Tone fast vollständig. Im mittleren bewaldeten Bereich des gemessenen Profils ist deutlich der Einfluss des Wasserverbrauchs durch die Bäume zu erkennen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde weiterhin eine Nutzenanalyse durchgeführt, sowie eine Ideenskizze für ein kooperatives Frühwarnsystem entwickelt. Für die Nutzenanalyse von Teilergebnissen der Gefahrenanalyse wurden Ingenieurgeologen befragt. Es zeigte sich, dass sie, die ihnen vorgestellten Produkte (Schummerungsdarstellungen des DGM1, räumliche Inventare, Gefährdungskarten) für ihre tägliche Arbeit durchaus gebrauchen könnten.

Die Analyse vergangener Ereignisse zeigt, dass sich die Großereignisse in der Schwäbischen Alb für gewöhnlich vorher ankündigen (z.B. über Rissbildungen). Die Idee des kooperativen Frühwarnsystems ist daher, eine Möglichkeit zu schaffen, kostengünstig und zeitnah, unter Einbindung der lokalen Bevölkerung, solche Veränderungen zu erkennen und an die zuständigen Personen zu übermitteln, damit diese gegebenenfalls Gegenmaßnahmen einleiten können.

Für die Zukunft ist eine intensive und kritische Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen qualitativen und quantitativen Ansätze in der Gefahren- und Risikoanalyse wünschenswert. Dabei sollten auch detaillierte Nutzenanalysen für die unterschiedlichen Produkte der Gefahren- und Risikoanalyse durchgeführte werden, die zudem alle Akteure des Risikomanagements einschließt.

## Literatur

- Abele, G., 1997. Influence of glacier and climatic variation on rockslide activity in the Alps. In: J.A. Matthews, D. Brunnsden, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 1-6.
- Acharya, G., De Smedt, F. und Long, N.T., 2006. Assessing landslide hazard in GIS: a case study from Rasuwa, Nepal. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 65: 99-107.
- Ahnert, F., 1996. Einführung in die Geomorphologie. UTB, Stuttgart, 440 S.
- Alexandrowicz, S.W., 1997. Holocene dated landslides in the Polish Carpathians. In: J.A. Matthews, D. Brunnsden, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 75-84.
- Amlang, S., 2005. Regionale Modellierung der Naturgefahr durch gravitative Prozesse in New Mexico, USA. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geogr. Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Ammann, W.J., 2006. Risk concept, integral management and risk governance. In: W.J. Ammann, S. Dannenmann und L. Vulliet (Hrsg.), RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century. Taylor & Francis, London, S. 3-23.
- Ammann, W.J., Dannenmann, S. und Vulliet, L., 2006. Introduction. In: W.J. Ammann, S. Dannenmann und L. Vulliet (Hrsg.), RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century. Taylor & Francis, London, S. IX-X.
- Angeli, M.G., Pasuto, A. und Silvano, S., 2000. A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology*, 55(3): 133-147.
- Arattano, M., 2003. Monitoring the presence of the debris-flow front and its velocity through ground vibration detectors. In: D. Rickenmann und C.-L. Chen (Hrsg.), Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment, 10-12 September 2003. Millpress, Rotterdam, Netherlands, Davos, Switzerland, S. 719-730.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F. und Reichenbach, P., 2002. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 3-14.
- Aringoli, D., Gentili, B. und Pambianchi, G., 1996. The role of recent tectonics in controlling the deep-seated gravitational deformation of Mount Frascare (Central Apennines). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 19: 281-286.
- Armbruster, V., 2002. Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. Dissertation. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Bd. 7. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- Atkinson, P.M. und Massari, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24(4): 373-385.
- Australian Geomechanics Society, 2000. Landslide risk management concepts and guidelines. *Australian Geomechanics*, 35: 49-92.
- Ayalew, L. und Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2): 15-31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. und Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1: 73 - 81.
- Baden-Württemberg, L., 2007a. <http://www.lv-bw.de/lvshop2/index.htm> (15.03.2007).
- Baden-Württemberg, L., 2007b. Übersicht DGM Befliegung. [http://www.lv-bw.de/dgm\\_befliegung/html/dgmFlug.svg](http://www.lv-bw.de/dgm_befliegung/html/dgmFlug.svg), (15.03.2007).
- Baeza, C. und Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(12): 1251-1263.
- Bak, P., Tang, C. und Wiesenfeld, K., 1988. Self-organized criticality. *Physical Review A*, 38(1): 364-374.
- Ballantyne, C.K. und Stone, J.O., 2004. The Beinn Alligin rock avalanche, NW Scotland: cosmogenic Be-10 dating, interpretation and significance. *Holocene*, 14(3): 448-453.

- Barnikel, F., 2004. The value of historical documents for hazard zone mapping. *Natural Hazard and Earth System Science*, 4: 599-613.
- Barton, M.E. und McCosker, A.M., 2000. Inclinometer and Tiltmeter Monitoring of a High Chalk Cliff. In: E. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), *Landslides in Research, Theory and Practice*, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 127-132.
- Baum, I. und Schmidt, K.-H., 2001. Temporal classification of mass movements on the Wellenkalk scarp in Thuringia and northern Hesse - possibilities and limitations. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 125: 25-41.
- Baum, R.L. et al., 2005. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides*, 2: 266-279.
- Becker, A. und Davenport, C.A., 2003. Rockfalls triggered by the AD 1356 Basle Earthquake. *Terra Nova*, 15: 258-264.
- Bell, R., 2002. Landslide and snow avalanche risk analysis - methodology and its application in BÍldudalur, NW Iceland. Master, Dep. of Geography, Rheinische-Friedrich-Wilhelms-University, Bonn, 153 S.
- Bell, R. und Glade, T., 2004a. Landslide risk analysis for BÍldudalur, NW-Iceland. *Natural Hazard and Earth System Science*, 4: 1-15.
- Bell, R. und Glade, T., 2004b. Multi-hazard analysis in natural risk assessments. In: C.A. Brebbia (Hrsg.), *International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation (RISK ANALYSIS 2004)*. WIT Press, Rhodes, Greece, S. 197-206.
- Bell, R., Glade, T. und Danscheid, M., 2005. Risks in defining acceptable risk. In: E. Eberhardt, O. Hungr, R. Fell und R. Couture (Hrsg.), *Landslide Risk Management. Supplementary Volume (CD)*. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005, S. B 110.
- Bell, R., Glade, T. und Danscheid, M., 2006a. Challenges in defining acceptable risk levels. In: W.J. Ammann, S. Dannenmann und L. Vulliet (Hrsg.), *RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century*. Taylor & Francis, London, S. 77-87.
- Bell, R., Kruse, J.-E., Garcia, A., Glade, T. und Hördt, A., 2006b. Subsurface investigations of landslides using geophysical methods - geoelectrical applications in the Swabian Alb (Germany). *Geographica Helvetica*, 61(3): 201-208.
- Berrisford, M.S. und Matthews, J.A., 1997. Phases of enhanced rapid mass movement and climatic variation during the Holocene: a synthesis. In: J.A. Matthews, D. Brunsdon, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. *Palaeoclimate Research*. Gustav Fischer, S. 409-440.
- Bibus, E., 1985. Massenverlagerung im Wald und ihre Folgeschäden am Beispiel des Hirschkopfes bei Mössingen. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 35: 901-904 und 909-910.
- Bibus, E., 1986. Die Rutschung am Hirschkopf bei Mössingen (Schwäbische Alb). *Geowissenschaftliche Rahmenbedingungen - Geoökologische Folgen*. *Geoökodynamik*, 7. Geoöko-Verlag, Darmstadt, 333-360 S.
- Bibus, E., 1999. Vorzeitige, rezente und potentielle Massenbewegungen in SW-Deutschland - Synthese des Tübinger Beitrags zum MABIS-Projekt. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten*, S. 1-58.
- Bibus, E., Kallinich, J. und Terhorst, B., 2001. Dating methods for mass movements studied by the MABIS project. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 125: 153-162.
- Bichler, A. et al., 2004. Three-dimensional mapping of a landslide using a multi-geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. *Landslides*, 1: 29-40.
- Bitelli, G., Dubbini, M. und Zanutta, A., 2004. Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry to monitor landslide bodies, Proceedings of the XXth ISPRS congress, Istanbul, Turkey, Commission V, WG V/2.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. und Wisner, B., 1994. *At risk - Natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge, London, 320 S.
- Bleich, K.E., 1960. Das Alter des Albtraufs. *Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ.*, 115: 39-92.
- Blikra, L.H., Anda, E., Belsby, S., Jogerud, K. und Klempe, O., 2006. Aknes/Tafjord projektet. Statusrapport for Arbejdsgruppe 1 (Undersøking og overvaking), Aknes/Tafjord projektet.

- Blöchl, A., in Vorbereitung. Naturrisiken und ökonomische Schadenpotenziale - dargestellt am Beispiel von gravitativen Massenbewegungen in der Schwäbischen Alb, Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bamberg.
- Blöchl, A. und Braun, B., 2005. Economic assessment of landslide risks in the Swabian Alb, Germany - research framework and first results of homeowners' and experts' surveys. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5: 389-396.
- Blume, H., 1971. Probleme der Schichtstufenlandschaft. Erträge der Forschung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 117 S.
- Bogenschütz, O., 1999. Können Informationen aus dem Liegenschaftskataster zur Erforschung von Hangbewegungen beitragen? In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 149-158.
- Bogoslovsky, V.A. und Ogilvy, A.A., 1977. Geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics*, 42(3): 562-571.
- Böll, A. und Graf, F., 2001. Nachweis von Vegetationswirkungen bei oberflächennahen Bodenbewegungen - Grundlagen eines neuen Ansatzes. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 152(1): 1-11.
- Borgatti, L. und Soldati, M., 2002. The influence of Holocene climatic changes on landslide occurrence in Europe. In: J. Rybár, J. Stemberk und P. Wagner (Hrsg.), *Landslides. Proceedings of the First European Conference on Landslides*, Prague, Czech Republic, June 24-26, 2002. Balkema, S. 111-116.
- Borngraeber, O., 1993. Die Geologie des Blattes 1:25000, 7324 Geislingen an der Steige - West. Dissertation, Fakultät Geo- und Biowissenschaften, Universität Stuttgart.
- Borngraeber, O., 2002. Zwischem Rotliegendem und Weißjura. Landschaft und Geologie der Gemarkung Bad Überkingen. In: G.B.Ü.u.B. Neidhart-Keitel (Hrsg.), *Bad Überkingen mit Hausen, Unter- und Oberböhringen*. Musikkontor, Stuttgart, S. 92-108.
- Borngraeber, O. und Geyer, M., 2002. Geologische Karte von Baden-Württemberg, Blatt 7324 Geislingen a.d. Steige-West. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i.Br.
- Borter, P., 1999a. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Fallbeispiele und Daten. *Umwelt-Materialien*, 107/II, Bern, 129 S.
- Borter, P., 1999b. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Methode. *Umwelt-Materialien*, 107/I, Bern, 115 S.
- Bouillon, A.-L., 2005. Geophysics for geohazards on land: state-of-the-art, case studies and education. ICG Report No. 2005-T1-1; NGI Report No. 20051108-1, International Centre for Geohazards, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Brennecke, M., 2006. Erstellung einer Inventarkarte gravitativer Massenbewegungen an der Schwäbischen Alb. Kartierung aus Luftbildern und einem digitalen Höhenmodell. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 853-862.
- Brückl, E.P., 2001. Cause-Effect Models of Large Landslides. *Natural Hazards*, 23: 291 - 314.
- Bruno, F. und Martillier, F., 2000. Test Of High-Resolution Seismic Reflection And Other Geophysical Techniques On The Boup Landslide In The Swiss Alps. *Surveys in Geophysics*, 21(4): 335-350.
- Brunotte, E., 2007. Schichtstufen und Schichtkämme. In: H. Gebhardt, R. Glaser, U. Radtke und P. Reuber (Hrsg.), *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. Elsevier GmbH, München.
- Brunsdon, D., 1993. The persistence of landforms. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.* 93: 13-28.
- Brunsdon, D. und Ibsen, M.-L., 1997. The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community: summary of relevant results of the European Community EPOCH Programme. In: J.A. Matthews, D. Brunsdon, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. *Palaeoclimate Research*. Gustav Fischer, S. 401-408.
- Buchanan, M., 2001. Das Sandkorn, das die Erde zum Beben bringt. Dem Gesetz der Katastrophen auf der Spur oder warum die Welt einfacher ist, als wir denken. Campus, Frankfurt a.M.

- Büdel, J., 1944. Die morphologischen Wirkungen des Eiszeitklimas im gletscherfreien Gebiet. Beiträge zur Geomorphologie der Klimazonen und Vorzeitklimata I. Geologische Rundschau, 34: 482-519.
- Büdel, J., 1981. Klimageomorphologie, Stuttgart.
- Bull, W.B., 1991. Geomorphic responses to climatic change. Oxford University Press, New York, Oxford, 326 S.
- Bull, W.B., King, J., Kong, F., Moutoux, T. und Phillips, W.M., 1994. Lichen dating of coseismic landslide hazards in alpine mountains. Geomorphology, 10: 253-264.
- Buma, J. und van Asch, T., 1996. Slide (rotational). In: R. Dikau, D. Brunsten, L. Schrott und M.-L. Ibsen (Hrsg.), Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes. Wiley & Sons, Chichester, S. 43-61.
- Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), 2002. Hochwasser 2000. Ereignisanalyse/Fallbeispiele, Bern.
- Butler, D.R. und DeChano, L.M., 2005. Landslide Risk Perception, Knowledge and Associated Risk Management: Case Studies and General Lessons from Glacier National Park, Montana, USA. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, S. 201-218.
- BUWAL/BWW/BRP, 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen, Bern, Schweiz.
- Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler, Series A, 62(1-2): 23-27.
- Calcaterra, D. und Parise, M., 2001. The contribution of historical information in the assessment of landslide hazard. In: T. Glade, F. Frances und P. Albini (Hrsg.), The use of historical data in natural hazard assessments. Advances in Natural and Technological Hazards Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 201-216.
- Canuti, P. et al., 2002. Landslide monitoring by using ground-based radar differential interferometry. In: J. Rybár, J. Stemberk und P. Wagner (Hrsg.), Landslides. Proceedings of the First European Conference on Landslides, Prague, Czech Republic, June 24-26, 2002, S. 523-528.
- Cardinali, M. et al., 2002. A geomorphological approach to estimate landslide hazards and risk in urban and rural areas in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2: 57-72.
- Carrara, A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, 15: 403-426.
- Carrara, A., Cardinali, M. und Guzzetti, F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, The Netherlands, 2: 172-183.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. und Reichenbach, P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: A. Carrara und F. Guzzetti (Hrsg.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Advances in Natural and Technological Hazards Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 135-175.
- Carrara, A., Crosta, G. und Frattini, P., 2003. Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms, 28(10): 1125-1142.
- Casadei, M., Dietrich, W.E. und Miller, N.L., 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. Earth Surface Processes and Landforms, 28: 925-950.
- Casagli, N., Farina, P., Leva, D. und Tarchi, D., 2006. Application of ground-based radar interferometry to monitor an active rockslide and implications for emergency management. In: S.G. Evans, G. Scarascia Mugnozza, A. Strom und R.L. Hermanns (Hrsg.), Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, Vol. 49. Springer, S. 157-173.
- Catane, S.G. et al., im Druck. Catastrophic rockslide-debris avalanche at St. Bernard, Southern Leyte, Philippines. Landslides: DOI 10.1007/s10346-006-0050-3.
- Catani, F., Casagli, N., Erminii, L., Righini, G. und Menduni, G., 2005a. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. Landslides, 2: 329-342.
- Catani, F., Farina, P., Moretti, S., Nico, G. und Strozzi, T., 2005b. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. Geomorphology, 66(1-4): 119-131.

- Chadwick, J., Thackray, G., Dorsch, S. und Glenn, N., 2005. Landslide Surveillance: New tools for an Old Problem. *EOS*, 86(11): 109-120.
- Chang, S.Y., 2003. Evaluation of a system for detecting debris flows and warning road traffic at bridges susceptible to debris-flow hazard. In: D. Rickenmann und C.-L. Chen (Hrsg.), *Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment*, 10-12 September 2003. Millpress, Rotterdam, Netherlands, Davos, Switzerland, S. 731-742.
- Chau, K.T. und Chan, J.E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: Case of Hong Kong Island. *Landslides*, 2: 280-290.
- Chau, K.T. et al., 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers and Geosciences*, 30(4): 429-443.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C., Liu, J. und Lee, C.F., 2003. Rockfall Hazard Analysis for Hong Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(5): 383-408.
- Chorley, R.J. und Kennedy, B.A., 1971. *Physical geography - A systems approach*, London.
- Chorley, R.J., Schumm, S.A. und Sudgen, D.E., 1984. *Geomorphology*, London, New York.
- Chung, C.-J.F. und Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(12): 1389-1399.
- Chung, C.-J.F. und Fabbri, A.G., 2005. Systematic procedures of landslide-hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: T. Glade, M. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and Risk*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 139-174.
- Chung, C.-J.F., Fabbri, A.G. und van Westen, C.J., 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: A. Carrara und F. Guzzetti (Hrsg.), *Geographical Information Systems in assessing natural hazards. Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 107-134.
- Chung, C.-J.F., Kojima, H. und Fabbri, A.G., 2003. Stability analysis of prediction models for landslide hazard mapping. In: R.J. Allison (Hrsg.), *Applied Geomorphology: Theory and Practice*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 3-20.
- Chung, C.J., 2006. Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers & Geosciences*, 32: 1052-1068.
- Chung, C.J., Bonin, D., Fannin, R.J., Fabbri, A.G. und Journeay, M., 2006. Uncertainty in predicting landslide hazard in the Coquitlam reservoir area, BC, Canada, Int. Assoc. for Mathematical Geology 11th International Congress, Liège, Belgium, September, 3rd - 8th 2006, S. S09-07.
- Chung, C.J.F. und Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3): 451-472.
- Claessens, L., Heuvelink, G.B.M., Schoorl, J.M. und Veldkamp, A., 2005. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 461-477.
- Cockburn, H.A.P. und Summerfield, M.A., 2004. Geomorphological applications of cosmogenic isotope analysis. *Progress in Physical Geography*, 28(1): 1-42.
- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(2): 260-271.
- Corominas, J. et al., 2005. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2(4): 343-357.
- Corominas, J. und Moya, J., 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30(1-2): 79-93.
- Corsini, A., Pasuto, A., Soldati, M. und Zannoni, A., 2005. Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment. *Geomorphology*, 66(1-4): 149-165.
- Crosta, G.B. und Agliardi, F., 2003. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Can. Geotech. Journal*, 40: 176-191.
- Crozier, M.J., 1984. Field assessment of slope instability. In: D. Brunsten und D.B. Prior (Hrsg.), *Slope Instability*. John Wiley & Sons Ltd, London, S. 103-142.
- Crozier, M.J., 1989. *Landslides: Causes, consequences and environment*. Routledge, 252 S.
- Crozier, M.J., 1996a. Magnitude/Frequency issues in landslide hazard assessment. In: R. Mäusbacher und A. Schulte (Hrsg.), *Beiträge zur Physiogeographie - Festschrift für Dietrich Barsch*. Heidelberger Geographische Arbeiten. Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg, Heidelberg, S. 221-236.

- Crozier, M.J., 1996b. Runout behaviour of shallow, rapid earthflows. *Zeitschrift für Geomorphologie*, (Supplementband) 105: 35-48.
- Crozier, M.J., 1999a. Magnitude-Frequency concept. In: D.E. Alexander und R.W. Fairbridge (Hrsg.), *Encyclopedia of Environmental Science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, S. 635-638.
- Crozier, M.J., 1999b. Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(9): 825-833.
- Crozier, M.J. und Glade, T., 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts, and approach. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, S. 1-38.
- Crozier, M.J. und Preston, N.J., 1999. Modelling changes in terrain resistance as a component of landform evolution in unstable hill country. In: S. Hergarten und H.J. Neugebauer (Hrsg.), *Process Modelling and Landform Evolution*. Lecture Notes in Earth Sciences. Springer-Verlag, Heidelberg, S. 267-284.
- Cruden, D.M., 1997. Estimating the risks from landslides using historical data. In: D.M. Cruden und R. Fell (Hrsg.), *Landslide risk assessment - Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 February 1997. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 177-184.
- Cruden, D.M. und Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report. National Academy Press, Washington, D.C., S. 36-75.
- Cutlac, O.N. und Maillol, J.M., 2004. Study of Holocene landslide deposits by comparison of GPR, refraction seismic and electrical resistivity data, Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June 2004, Delft, The Netherlands.
- Dai, F.C. und Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and, slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4): 213-228.
- Dai, F.C., Lee, C.F. und Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1): 65-87.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Tham, L.G., Ng, K.C. und Shum, W.L., 2004. Logistic regression modelling of storm-induced shallow landsliding in time and space on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 63: 315-327.
- Damm, B., 2002. Starkregenphasen der vergangenen 140 Jahre im Nordhessisch-südniedersächsischen Mittelgebirgsraum. *Trierer Geographische Studien*(25): 161-176.
- Danscheid, M., in Vorbereitung. Grenzen und Möglichkeiten von Naturrisikomanagement - Eine systemtheoretische Betrachtung, Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bonn.
- Danscheid, M., Zehetmair, S. und Pohl, J., eingereicht. The social dimension of landslide risk. *Natural Hazard and Earth System Science*.
- Dapples, F. et al., 2002. Paleolimnological evidence for increased landslide activity due to forest clearing and land-use since 3600 cal BP in the western Swiss Alps. *Journal of Paleolimnology*, 27(2): 239-248.
- Davertzhofen, U., 2001. GIS-gestützte regionale Naturrisikoanalyse für Hangrutschungen in Rheinhessen. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Dearing, J., 2004. Non-linear Dynamics. In: A. Goudie (Hrsg.), *Encyclopedia of Geomorphology*, S. 721-725.
- Decaulne, A., 2004. Combining geomorphological, historical and lichenometrical data for assessment of risk due to present-day slope processes, a case study from the Icelandic Westfjords. In: C.A. Brebbia (Hrsg.), *International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation (RISK ANALYSIS 2004)*. WIT Press, Rhodes, Greece, S. 177-186.
- DeChano, L.M. und Butler, D.R., 2001. Analysis of public perception of debris flow hazard. *Disaster Prevention and Management*, 10(4): 261-269.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., Pierrri, P., Mascia, U. und Calcagnile, G., 2000. Gravimetric Study Of A Retrogressive Landslide In Southern Italy. *Surveys in Geophysics*, 21(4): 391-406.
- Demoulin, A. und Chung, C.J.F., 2007. Mapping landslide susceptibility from small datasets: A case study in the Pays de Herve (E Belgium). *Geomorphology*.

- Demoulin, A. und Glade, T., 2004. Recent landslide activity in Manaihan, Belgium. *Landslides*, 1(4): 305-310.
- Denness, B., Conway, B.W., McCann, D.M. und Grainger, P., 1975. Investigation of a coastal landslide at Charmouth, Dorset. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8: 119-140.
- Dewitte, O., Chung, C.J. und Demoulin, A., 2006. Reactivation hazard mapping for ancient landslides in West Belgium. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6: 653-662.
- Dewitte, O. und Demoulin, A., 2005. Morphometry and kinematics of landslides inferred from precise DTMs in West Belgium. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5: 259-265.
- Dhakal, A.S., Amada, T. und Aniya, M., 1999. Landslide Hazard Mapping and the Application of GIS in the Kluekhani Watershed, Nepal. *Mountain Research and Development*, 19(1): 3-16.
- Dikau, R., 2004. Die Bewertung von Naturgefahren als Aufgabenfeld der Angewandten Geomorphologie. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl.-Bd.*, 136: 179-191.
- Dikau, R., 2005. Geomorphologische Perspektiven integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie. In: U. Wardenga und D. Müller-Mahn (Hrsg.), *Möglichkeiten und Grenzen integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie*. forum ifl. Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig, S. 91-108.
- Dikau, R., 2006a. Komplexe Systeme in der Geomorphologie. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 148: 125-150.
- Dikau, R., 2006b. Oberflächenprozesse - ein altes oder ein neues Thema? *Geographica Helvetica*, 61(3): 170-180.
- Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L. und Ibsen, M. (Hrsg.), 1996. *Landslide Recognition. Identification, movement and causes*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 251 S.
- Dikau, R. und Glade, T., 2002. Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau*, 54(1): 38-45.
- Dikau, R. und Glade, T., 2003. Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen. In: H. Liedtke, R. Mäusbacher und K.-H. Schmidt (Hrsg.), *Relief, Boden und Wasser*. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 98-99.
- Dikau, R. und Weichselgartner, J., 2005. *Der unruhige Planet. Der Mensch und die Naturgewalten*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 191 S.
- Dongus, H., 1977. Die Oberflächenformen der Schwäbischen Alb und ihres Vorlandes. *Marburger Geographische Schriften*, 72, Marburg, 486 S.
- Donnelly, L.J., Culshaw, M.G., Hobbs, P.R.N., Flint, R.C. und Jackson, P.D., 2005. Engineering geological and geophysical investigations of a slope failure at Edinburgh Castle, Scotland. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(2): 119-137.
- Einstein, H.H., 1988. Special lecture: Landslide risk assessment procedure. In: C. Bonnard (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, 10-15 July 1988*. A.A. Balkema, Lausanne, Switzerland, S. 1075-1090.
- Einstein, H.H., 1997. Landslide risk - systematic approaches to assessment and management. In: D.M. Cruden und R. Fell (Hrsg.), *Landslide risk assessment - Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 February 1997*. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 25-50.
- Evans, I.S., 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 80: 274-295.
- Evans, S.G., 2003. Characterizing landslide risk in Canada, 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards. Canadian Geotechnical Society, Edmonton, AB, S. 35-50.
- Evans, S.G. und Hungr, O., 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. In: C. Bonnard (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, 10-15 July 1988*, Lausanne, Switzerland. A.A. Balkema, S. 685-690.
- Evans, S.G. und Hungr, O., 1993. The Assessment of Rockfall Hazard at the Base of Talus Slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4): 620-636.
- Evans, S.G. et al., 2006. Landslides from massive rock slope failure and associated phenomena. In: S.G. Evans, G. Scarascia Mugnozza, A. Strom und R.L. Hermanns (Hrsg.), *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, Vol. 49. Springer, S. 3-52.



- Fabbri, A.G., Chung, C.-J. und Jang, D.-H., 2004. A software approach to spatial predictions of natural hazards and consequent risks. In: C.A. Brebbia (Hrsg.), International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation (RISK ANALYSIS 2004). WIT Press, Rhodes, Greece, S. 289-306.
- Fantucci, R. und McCord, A., 1995. Reconstruction of landslide dynamic with dendrochronological methods. *Dendrochronologia*, 13: 43-60.
- Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2): 261-272.
- Fell, R. und Hartford, D., 1997. Landslide risk management. In: D.M. Cruden und R. Fell (Hrsg.), Landslide risk assessment - Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 February 1997. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 51-109.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. und Leroi, E., 2005. A framework for landslide risk assessment and management. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005. A.A. Balkema Publishers, S. 3-25.
- Fernández-Steeger, T.M., Rohn, J. und Czurda, K., 2002. Identification of landslide areas with neural nets for hazard analysis. In: J. Rybár, J. Stemberk und P. Wagner (Hrsg.), Landslides, 24-26 June 2002. A.A. Balkema, Prague, Czech Republic, S. 163-168.
- Finlay, P.J. und Fell, R., 1997. Landslides: Risk perception and acceptance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(2): 169-188.
- Finlay, P.J., Fell, R. und Maguire, P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6): 811-824.
- Flentje, P. und Chowdhury, R., 2000. Slope instability, hazard and risk associated with a rainstorm event - a case study. In: E.N. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), Landslides in research, theory and practice, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, 26-30 June 2000. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 559-566.
- Fourniadis, I.G., Liu, J.G. und Mason, P.J., 2006. Landslide hazard assessment in the Three Gorges area, China, using ASTER imagery: Wushan-Badong. *Geomorphology*: doi:10.1016/j.geomorph.2006.07.020.
- Fraas, O., 1853. Der Bergschliff von Rathshausen. *Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ.*, 9: 112-117.
- Froese, C.R., Keegan, T.R., Cavers, D.S. und van der Kooij, M., 2005. Detection and monitoring of complex landslides along the Ashcroft Rail corridor using spaceborn InSAR. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005. A.A. Balkema Publishers, S. 565-580.
- Fuchs, S., Bründl, M. und Stötter, J., 2004. Development of avalanche risk between 1950 and 2000 in the Municipality of Davos, Switzerland. *Natural Hazard and Earth System Science*, 4: 263-275.
- Fuchs, S., Keiler, M., Zischg, A. und Bründl, M., 2006. Temporal variability of damage potential in settlements - A contribution towards long-term development of avalanche risk. In: W.J. Ammann, S. Dannenmann und L. Vulliet (Hrsg.), RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century. Taylor & Francis, London, S. 237-247.
- Fukuzono, T., 1990. Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure. *Landslide News*, 4: 9-12.
- Fundinger, A., 1985. Ingenieurgeologische Untersuchung und geologische Kartierung (Dogger/Malm) der näheren Umgebung der Rutschungen am Hirschkopf bei Mössingen und am Irrenberg bei Thanheim (Baden-Württemberg). Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geowissenschaftliche Fakultät, Universität Tübingen, Tübingen, 125 S.
- Garcia Azuero, A., 2005. Landslide Monitoring with High Resolution Tilt and Pore Pressure Measurements. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Geologie, Fachbereich Angewandte Geophysik, Universität Bonn.
- Gärtner, H. et al., 2003. Debris-flow frequency derived from tree-ring analyses and geomorphic mapping, Valais, Switzerland. In: D. Rickenmann und C.-L. Chen (Hrsg.), Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment, 10-12 September 2003. Millpress, Rotterdam, Netherlands, Davos, Switzerland, S. 207-217.

- Geipel, R., Härta, R. und Pohl, J., 1997. Risiken im Mittelrheinischen Becken - Bericht über ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Projekt. Deutsche IDNDR-Reihe, 4. Deutsches-IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e.V., Bonn, 42 S.
- Geotechnical Engineering Office, 1997. Landslides and boulder falls from natural terrain: interim risk guidelines (GEO REPORT No. 75), Hong Kong.
- German, R., 1961. Der Hangrutsch bei der Bronner Mühle im Donautal. Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ., 115: 78-83.
- Gers, E. et al., 2001. The application of shrubs for dendrogeomorphological analysis to reconstruct spatial and temporal landslide patterns - A preliminary study. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band, 125: 163-175.
- Geyer, O.F. und Gwinner, M.P., 1986. Geologie von Baden-Württemberg. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Geyer, O.F. und Gwinner, M.P., 1997. Die Schwäbische Alb und ihr Vorland. - Sammlung geologischer Führer, Band 67. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart, 275 S.
- Glade, T., 1997. The temporal and spatial occurrence of rainstorm-triggered landslide events in New Zealand. PhD, School of Earth Science, Institute of Geography, Victoria University of Wellington, Wellington, 380 S.
- Glade, T., 1998. Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. Environmental Geology, 35(2-3): 160-174.
- Glade, T., 2001. Landslide hazard assessment and historical landslide data - an inseparable couple? In: T. Glade, F. Frances und P. Albini (Hrsg.), The use of historical data in natural hazard assessments. Advances in Natural and Technological Hazards Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 153-168.
- Glade, T., 2003a. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. Catena, 51(3-4): 297-314.
- Glade, T., 2003b. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. Die Erde, 134(2): 121-138.
- Glade, T., 2005. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. Geomorphology, 66(1-4): 189-213.
- Glade, T., Anderson, M.G. und Crozier, M.J. (Hrsg.), 2005a. Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, 807 S.
- Glade, T. und Crozier, M.J., 2005a. The nature of landslide hazard impact. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, S. 43-74.
- Glade, T. und Crozier, M.J., 2005b. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, S. 75-138.
- Glade, T., Crozier, M.J. und Smith, P., 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". Pure and Applied Geophysics, 157(6-8): 1059-1079.
- Glade, T., Stark, P. und Dikau, R., 2005b. Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refraction - a case study in Rheinhessen, Germany. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(2): 151-158.
- Glade, T., von Davertzhofen, U. und Dikau, R., in Vorbereitung. GIS-based landslide risk analysis in Rheinhessen, Germany. Natural Hazards.
- Glaser, R., 2001. Klimageschichte Mitteleuropas. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 227 S.
- Greenway, D.R., 1987. Vegetation and Slope Stability. In: M.G. Anderson und K.S. Richards (Hrsg.), Slope Stability. John Wiley & Sons Ltd, S. 187-230.
- Grees, H., 1993. Die Schwäbische Alb. In: C. Borchardt (Hrsg.), Geographische Landeskunde von Baden-Württemberg. Schriften zur politischen Landeskunde Baden-Württembergs, Band 8. Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, S. 332-362.
- Gritzner, M.L., Marcus, W.A., Aspinall, R. und Custer, S.G., 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil water wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idaho. Geomorphology, 37(1-2): 149-165.
- Groschopf, P., 1957. Der große Bergsturz von 1805 bei Hausen-Fils. Geschichtl. Mitt. v. Geislingen u. Umgebung, 15: 81-83.

- Groschopf, P., 1973. Erd- und Landschaftsgeschichte des Kreises, Der Kreis Göppingen. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, S. 133-156.
- Grote, K., Hubbard, S., Harvey, J. und Rubin, Y., 2005. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*, 57(2): 129-153.
- Grunert, J. und Hardenbicker, U., 1997. The frequency of landsliding in the north Rhine area and possible climatic implications. In: J.A. Matthews, D. Brunsten, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene. *Palaeoclimate Research*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 159-170.
- Guthrie, R.H. und Evans, S.G., 2004. Magnitude and frequency of landslides triggered by a storm event, Loughborough Inlet, British Columbia. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4: 574-483.
- Guthrie, R.H. und Evans, S.G., 2005. The role of magnitude-frequency relations in regional landslide risk analysis. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), *Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005. A.A. Balkema Publishers, S. 375-389.
- Guthrie, R.H. und Evans, S.G., 2006. Work, persistence, and formative events: The geomorphic impact of landslides. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2006.11.010.
- Guzzetti, F., 2005. *Landslide hazard and risk assessment*. Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn, 276 S.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. und Reichenbach, P., 1994. The AVI Project: A Bibliographical and Archive Inventory of Landslides and Floods in Italy. *Environmental Management*, 18(4): 623-633.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. und Carrara, A., 2000. Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Environmental Management*, 25(3): 247-263.
- Guzzetti, F. et al., 2004a. Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy. *Engineering Geology*, 73(3-4): 229-245.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. und Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4): 181-216.
- Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F. und Cardinali, M., 2006a. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(1): 115-131.
- Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L. und Reichenbach, P., 2002. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195(3-4): 169-183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. und Galli, M., 2006b. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81: 166-184.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M. und Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-4): 272-299.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P. und Ghigi, S., 2004b. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, central Italy. *Environmental Management*, 34(2): 191-208.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P. und Wieczorek, G.F., 2003. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazard and Earth System Science*, 3: 491-503.
- Guzzetti, F. und Tonelli, G., 2004. Information system on hydrological and geomorphological catastrophes in Italy (SICI): a tool for managing landslide and flood hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2): 213-232.
- Hack, R., 2000. Geophysics For Slope Stability. *Surveys in Geophysics*, 21(4): 423-448.
- Hanafy, S. und al Hagrey, S.A., 2006. Ground-penetrating radar tomography for soil-moisture heterogeneity. *Geophysics*, 71(1): K9-K18.
- Harmsworth, G. und Raynor, B., 2005. Cultural Consideration in Landslide Risk Perception. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, S. in press.

- Havenith, H.B. et al., 2000. Geophysical Investigations Of Seismically Induced Surface Effects: Case Study Of A Landslide In The Suusamyr Valley, Kyrgyzstan. *Surveys in Geophysics*, 21(4): 351-370.
- Hecht, S., 2001. Anwendung refraktionsseismischer Methoden zur Erkundung des oberflächennahen Untergrundes. *Stuttg. Geogr. Stud.*, 131, 165 S.
- Hecht, S., 2003. Differentiation of loose sediments with seismic refraction methods – potentials and limitations derived from case studies. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd.(132)*: 89-102.
- Heim, A., 1932. Bergsturz und Menschenleben. *Beiblatt zur Vierteljahrschrift*, 20, Zürich, 218 S.
- Heinimann, H.R., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, b. und Mani, P., 1998. Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. *Umwelt-Materialien*, 85, Bern, 247 S.
- Hermanns, R.L., Niedermann, S., Ivy-Ochs, S. und Kubik, P.W., 2004. Rock avalanching into a landslide dammed lake causing multiple dam failure in Las Conchas valley (NW Argentina) - evidence from surface exposure dating and stratigraphic analyses. *Landslides*, 1: 113-122.
- Heuberger, H., 1966. Gletschergeschichtliche Untersuchungen in den Zentralalpen zwischen Sellrain- und Ötztal. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 20.
- Hohlweck, T., 2005. Quantitative räumliche Prognosemodelle zur Einschätzung der Naturgefahr durch gravitative Massenbewegungen (Rheinhessen). *Magisterarbeit, Geogr. Institut, Universität Bonn, Bonn*.
- Hölder, 1953. Erosionsformen am Trauf der Schwäbischen Alb. *Neues Jb. Geol. u. Paläontol., Abh.*, 97: 345-378.
- Holland, R., in Vorbereitung. Dendrogeomorphologische Untersuchungen an einem Rutschhang am Ursulaberg, Pfullingen, Schwäbische Alb. *Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn*.
- Hollenstein, K., 1997. Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken. *vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, Zürich*, 220 S.
- Hosmer, D.W. und Lemeshow, S., 2000. *Applied logistic regression. Wiley series in probability and mathematical statistics - applied probability and statistics section. A Wiley-Interscience publication. Wiley, New York*, 373 S.
- Hovius, N., Stark, C.P. und Allen, P.A., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*, 25(3): 231-234.
- Hubbard, S.S. et al., 1997. Estimation of permeable pathways and water content using tomographic radar data. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 16(11): 1623.
- Hübl, J., Kienholz, H. und Loipersberger, A. (Hrsg.), 2002. *DOMODIS - Documentation of mountain disasters. Schriftenreihe 1, 1, Klagenfurt*, 54 S.
- Hufschmidt, G., Crozier, M.J. und Glade, T., 2005. Natural hazard and risk evolution - Wellington Region, NZ. *Natural Hazard and Earth System Science*, 5(3): 375 - 387.
- Hungr, O., 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4): 610-623.
- Hungr, O., 2004. Geotechnique and the management of landslide hazards, *Proceedings, 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec City, 2004*, S. 1-10.
- Hungr, O., Corominas, J. und Eberhardt, E., 2005. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), *Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005. A.A. Balkema Publishers*, S. 99-128.
- Hungr, O., Evans, S.G. und Harzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(2): 224-238.
- Hutchinson, J., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: C. Bonnard (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, 10-15 July 1988. A.A. Balkema, Lausanne, Switzerland*, S. 3-35.
- Hutchinson, J.N., 1983. Methods of locating slip surfaces in landslides. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 20(3): 235-252.
- Huttenlocher, F., 1961. Die Oberflächenformen des Landkreises Balingen, *Der Landkreis Balingen, amtll. Kreisbeschreibung, Stuttgart*, S. 37-64.

- Ibsen, M.-L. und Brunsden, D., 1996. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology*, 15(3-4): 241-258.
- Inkpen, R., 2005. *Science, Philosophy And Physical Geography*. Taylor and Francis, London.
- Innenministerium Baden-Württemberg, 2005. Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg 1:350000, Stuttgart.
- IUGS Working Group on Landslides - Committee on Risk Assessment, 1997. Quantitative assessment for slopes and landslides - The state of the art. In: D.M. Cruden und R. Fell (Hrsg.), *Landslide risk assessment - Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 February 1997. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 3-12.
- Ivy-Ochs, S. et al., 1998. The age of the Köffels event. Relative,  $^{14}\text{C}$  and cosmogenic isotope dating of an early Holocene landslide in the Central Alps (Tyrol, Austria). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34(1): 57-68.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Couture, R., Locat, J. und Locat, P., 2004. Toward preliminary hazard assessment using DEM topographic analysis and simple mechanical modeling by means of sloping local base level. In: Lacerda et al. (Hrsg.), *Landslides Evaluation and stabilization*. Balkema, S. 191-197.
- Jäger, S., 1997. Fallstudien zur Bewertung von Massenbewegungen als geomorphologische Naturgefahr. *Heidelberger Geographische Arbeiten*, 108. Selbstverlag des Geographischen Instituts, Heidelberg, 151 S.
- Jäger, S. und Wieczorek, G.F., 1994. Landslide susceptibility in the Tully Valley Area, Finger Lakes Region, New York. 94-615, U.S. Geological Survey.
- Jerz, H., 1999. Nacheiszeitliche Bergstürze in den Bayrischen Alpen. In: K. Fischer (Hrsg.), *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*. Relief, Boden, Paläoklima. Gebrüder Borntraeger, Berlin, S. 31-40.
- Jorda, M., 1983. La torrentialite Holocene des Alpes Francaises du Sud: facteur antropiques et parameters naturels de son evolution, Toulouse, Symposium evolution de paleoenvironment post-Wurmian.
- Kallinich, 1999. Verbreitung, Alter und geomorphologische Ursachen von Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb auf der Grundlage von Detail- und Übersichtskartierungen. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D, Nr. 4*. Geographisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen, 166 S.
- Keaton, J.R. und DeGraff, J.V., 1996. Surface observation and geologic mapping. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report. National Academy Press, Washington, D.C., S. 178-230.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 406-421.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslides caused by earthquakes - a historical review. *Surveys in Geophysics*, 23: 473-510.
- Keiler, M., 2004a. Determination of damage potential for Alpine Risk Assessment, Dissertation, Faculty of Natural Science, University of Innsbruck, Innsbruck, 93 S.
- Keiler, M., 2004b. Development of the damage potential resulting from avalanche risk in the period 1950-2000, case study Galtur. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2): 249-256.
- Kible, 1894. Plettenberg und Ratshausen. *Blätter Schwäb Albver.*, 6: 145-146.
- Kienholz, H., 1993. Naturgefahren - Naturrisiken im Gebirge. In: S. Eidg. Forschungsanstalt fuer Wald und u. Landschaft (Hrsg.), *Forum für Wissen, Naturgefahren*, Birmensdorf, Switzerland, S. 7 - 21.
- Kienholz, H., Hafner, H., Schneider, G. und Zimmermann, M., 1984. Methods for the assessment of mountain hazards and slope stability in Nepal. *Erdwissenschaftliche Forschung*, XVIII: 147-160.
- Kilburn, C.R.J. und Petley, D.N., 2003. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 54(1-2): 21-32.
- Kleist, L. et al., 2006. Estimation of the regional stock of residential buildings as a basis for a comparative risk assessment in Germany. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6: 541-552.

- Kneisel, C., 2003. Electrical resistivity tomography as a tool for geomorphological investigations - some case studies. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl.-Bd.*, 132: 37-49.
- Knipping, M., 1999. Pollenanalytische Datierungen an Feuchtsedimenten auf Hangrutschungen in Südwestdeutschland. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 117-128.
- Knödel, K., Krummel, H. und Lange, G., 1997. *Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, 3. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1063 S.
- Kohn, J.-C., 2007. Potenzial der Auswertung des Archis der Straßenbauverwaltung für die Risikoforschung. Nutzung des Archivs der Baustoff- und Bodenprüfstelle Ludwigsburg als historische Quelle. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Korup, O., 2005. Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*, 2: 43-51.
- Kößler, U., 1997. Relief, Böden und Deckschichten in ausgewählten Gebieten der Jurastufe bei Göppingen. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen.
- Kraus, D., Hübl, J. und Rickenmann, D., 2005. Buildings vulnerability related to floods and debris flows - case studies. In: CENAT (Hrsg.), *Coping with risks due to natural Hazards in the 21st century - RISK21*. Balkema, Rotterdam.
- Kraut, C., 1995. Der Einfluß verschiedener Geofaktoren auf die Rutschempfindlichkeit an der Schichtstufe der Schwäbischen Alb. *Zul. Arb.*, Tübingen, 109 S.
- Kraut, C., 1999. Der Einfluß verschiedener Geofaktoren auf die Rutschempfindlichkeit an der Schichtstufe der Schwäbischen Alb. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 129-148.
- Krauter, E., 1992. Hangrutschungen - ein Umweltproblem, *Ingenieurvermessung '92*. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung. ETH-Zentrum, Zürich, S. V4/1- V4/12.
- Krauter, E., 2001. Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: U. Smolczyk (Hrsg.), *Grundbau-Taschenbuch*. Wilhelm Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 613-666.
- Kreja, R., 2000. Die Entwicklung einer Gefährdungskarte für Rutschungen am Schönberger Kapf bei Öschingen unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen.
- Kreja, R. und Terhorst, B., 2006. GIS-gestützte Ermittlung rutschungsgefährdeter Gebiete am Schönberger Kapf bei Öschingen. *Die Erde*, 136(4): 397-414.
- Kruse, J.-E., 2006. Untergrunderkundung und Monitoring von gravitativen Massenbewegungen mit Gleichstromgeoelektrik und Radiomagnetotellurik. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L. und Dikau, R., 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*, 30(1-2): 33-52.
- Lapenna, V. et al., 2005. 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in the Lucanian Apennine chain, southern Italy. *Geophysics*, 70(3): B11-B18.
- Larsen, M.C., Wiczorek, G.F., Eaton, S. und Sierra, H.T., 2001. The Venezuela landslide and flash flood disaster of December 1999. In: A. Mugnai (Hrsg.), *2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms*, 16-18.10.2000. EGS, Siena, Italy.
- Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H. und Bonnard, C., 2005. Landslide risk management in Switzerland. *Landslides*, 2(4): 313-320.
- Lee, E.M. und Jones, D.K.C., 2004. *Landslide risk assessment*. Thomas Telford, London.
- Lee, S., 2004. Application of Likelihood Ratio and Logistic Regression Models to Landslide Susceptibility Mapping Using GIS. *Environmental Management*, 34(2): 223-232.
- Lee, S., 2006. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*: DOI 10.1007/s00254-006-0491-y.
- Lee, S., Choi, J. und Min, K., 2002. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43(1-2): 120-131.
- Lee, S. und Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40: 1095-1113.
- Lee, S., Ryu, J.H., Min, K.D. und Won, J.S., 2003. Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(12): 1361-1376.

- Leone, F., Asté, J.P. und Leroi, E., 1996. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception. In: K. Senneset (Hrsg.), *Landslides - Glissements de Terrain*. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 263-270.
- Leroi, E., 1996. Landslide hazard - Risk maps at different scales: Objectives, tools and development. In: K. Senneset (Hrsg.), *Landslides - Glissements de Terrain*, 7th. International Symposium on Landslides. Balkema, Trondheim, Norway, S. 35-51.
- Leser, H., 1982a. Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte 1: 25 000 der Bundesrepublik Deutschland GMK 25 Blatt 9 7520 Mössingen. Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Geo Center, Stuttgart, 56 S.
- Leser, H., 1982b. Geomorphologischen Karte der Bundesrepublik Deutschland 1: 25 000, GMK 25, Blatt 9, 7520 Mössingen. Geo Center, Stuttgart.
- Leser, H. und Stäblein, G., 1980. Legende der geomorphologischen Karte 1:25000 (GMK 25) - 3. Fassung im GMK-Schwerpunktprogramm. Berliner Geographische Abhandlungen, 31, Berlin, 1-100 S.
- Link, M., 1999. Geomorphologie und Datierung von Massenverlagerungen im Deggenhausertal/Oberschwaben. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 83-96.
- Linkwitz, K. und Schwarz, W., 2001. Geodätisch-photogrammetrische Überwachung von Hängen, Böschungen und Stützmauern. In: U. Smolczyk (Hrsg.), *Grundbau Taschenbuch - Geotechnische Grundlagen*. Ernst & Sohn, Darmstadt, S. 477-553.
- Lollino, G., Arattano, M. und Cuccureddu, M., 2002. The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure (North-Western Italy). *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(36): 1545-1550.
- Mailänder, S., Eberle, J. und Blümel, W.D., 2004. Kulturlandschaftswandel auf der östlichen Alb seit Beginn des 19. Jahrhunderts: Ausmaß, Ursachen und Auswirkungen. *Die Erde*, 135: 175-204.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. und Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6): 687-711.
- Malet, J.P., Maquaire, O. und Calais, E., 2002. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super- Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43(1-2): 33-54.
- Malone, A.W., 2005. The Story of Quantified Risk and its Place in Slope Safety Policy in Hong Kong. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, S. 643-674.
- Mantovani, F., 1997. The frequency of large landslides in the eastern Alps. In: J.A. Matthews, D. Brunsten, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 47-54.
- Matmon, A. et al., 2005. Landscape development in an hyperarid sandstone environment along the margins of the Dead Sea fault: Implications from dated rock falls. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3-4): 803-817.
- McCalpin, J., 1984. Preliminary Age Classification of Landslides for Inventory Mapping, Proc., 21st Engineering Geology and Soils Engineering Symposium, University of Idaho, Moscow, S. 99-120.
- McCann, D.M. und Forster, A., 1990. Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. *Engineering Geology*, 29(1): 59-78.
- McGuffey, V., Modeer, J., Victor A. und Turner, A.K., 1996. Subsurface Exploration. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report. National Academy Press, Washington, D.C., S. 231-277.
- Meisina, C. und Scarabelli, S., 2006. Acomparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*: doi:10.1016/j.geomorph.2006.03.039.
- Meißl, G., 1998. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. *Innsbrucker Geographische Studien*, 28. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Innsbruck, Innsbruck, 249 S.
- Merz, H.A., Schneider, T. und Bohnenblust, H., 1995. Bewertung von technischen Risiken: Beiträge zur Strukturierung und zum Stand der Kenntnisse, Modelle zur Bewertung von Todesfallrisiken. Dokument Nr. 3, Polyprojekt Risiko und Sicherheit. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, Zürich.

- Meyenfeld, H., 2004. Erdbeben als potentieller Auslöser von Hangrutschungen im Bonner Raum. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Michael-Leiba, M., Baynes, F. und Scott, G., 2000. Quantitative landslide risk assessment of Cairns, Australia. In: E.N. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), *Landslides in Research, Theory and Practice, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, 26-30 June 2000. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 1059-1064.
- Mihalic, S., 1998. Scales of landslide hazard and risk mapping. In: B. Maric, Z. Lisac und A. Szavits-Nossan (Hrsg.), *Geotechnical Hazards*. Balkema, Rotterdam, S. 847-853.
- Mikkelsen, P.E., 1996. Field instrumentation. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: investigation and mitigation. Special Report*. National Academy Press, Washington, D.C., S. 278-316.
- Ministerium für Umwelt und Verkehr (UVM) und Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) (Hrsg.), 2004. *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 2. Lieferung*, Stuttgart, Karlsruhe.
- Möller, R., Glade, T. und Dikau, R., 2001. Application of soil mechanical response units (SMRU) in regional landslide hazard assessment. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band*, 125: 139-151.
- Montgomery, D.R. und Dietrich, W.E., 1994. A physically based model for the Topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153 - 1171.
- Moon, A., Robertson, M. und Davies, W., 1996. Quantifying rockfall risk using a probabilistic toppling failure model. In: K. Senneset (Hrsg.), *Landslides - Glissements de Terrain*. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 1311-1316.
- Moon, A.T., Olds, R.J., Wilson, R.A. und Burman, B.C., 1992. Debris flow zoning at Montrose, Victoria. In: D.H. Bell (Hrsg.), *Proceedings of the sixth International Symposium*, 10-14 February 1992. A.A. Balkema, Rotterdam, Christchurch, New Zealand, S. 1015-1022.
- Moreiras, S.M., 2005. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology*, 66(1-4): 345-357.
- Morgan, G.C., Rawlings, G.E. und Sobkowicz, J.C., 1992. Evaluating total risk to communities from large debris flows, *Geotechnique and Natural Hazards*, 6 - 9 May 1992, Vancouver, Canada, S. 225-236.
- Moser, M., 1980. Zur Analyse von Hangbewegungen in schwachbindigen bis rolligen Lockergesteinen im alpinen Raum anlässlich von Starkniederschlägen. In: *Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung (Hrsg.), Proceedings International Symposium Interpraevent 1980*, Bad Ischl, S. 121-148.
- Moser, M. und Schoger, H., 1989. Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 531(10): 1-22.
- Mostyn, G. und Fell, R., 1997. Quantitative and semiquantitative estimation of the probability of landsliding. In: D.M. Cruden und R. Fell (Hrsg.), *Landslide risk assessment - Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment*, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21 February 1997. A.A. Balkema, Rotterdam, S. 297-315.
- Moya, J., Vilaplana, J.M. und Corominas, J., 1997. Late Quaternary and historical landslides in the south-eastern Pyrenees. In: J.A. Matthews, D. Brunsten, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene. Palaeoclimate Research*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 55-74.
- Müller-Mahn, D., 2005. Von "Naturkatastrophen" zu "Complex Emergencies" - Die Entwicklung integrativer Forschungsansätze im Dialog mit der Praxis. In: U. Wardenga und D. Müller-Mahn (Hrsg.), *Möglichkeiten und Grenzen integrativer Forschungsansätze in Physischer Geographie und Humangeographie*. forum ifl. Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig, S. 69-77.
- Münchner Rückversicherung, 2007. *Topics Geo. Naturkatastrophen 2006. Analysen, Bewertungen, Positionen*, Münchner Rückversicherung, München.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A. und Khire, M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(4): 275-287.
- Neuhäuser, B., 2005. Probabilistische Beurteilung der Rutschanfälligkeit zur Einschätzung der Gefährdung durch Hangrutschungen am Beispiel Schwäbische Alb, *AGIT Trophy 2005*, S. 1-11.



- Neuhäuser, B. und Terhorst, B., 2006. Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*: doi:10.1016/j.geomorph.2006.08.002.
- Nicoletti, P.G., 2005. Inconsistent patterns of historical seismicity and earthquake-triggered landsliding in southeastern Sicily: an alarm bell? *Geomorphology*, 65(3-4): 257-278.
- O'Reilly, T., 2005. What is Web 2.0? Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software. <http://www.oreillynet.com/pub/a/oreilly/tim/news/2005/09/30/what-is-web-20.html> (16.03.2007).
- Ohlmacher, G.C. und Davis, J.C., 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69: 331-343.
- Ohmert, W., 1994. Erläuterungen zu Blatt 7521 Reutlingen, Geologische Karte 1:25000 von Baden-Württemberg, Freiburg, Stuttgart.
- Oldeland, J., 2004. Vegetationsmodellierung am Südrand des Hohen Atlas, Marokko. Habitatmodelle und ihre Anwendung in Trockengebieten. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Allgemeine Botanik, Universität Hamburg, Hamburg.
- Ortigao, J.A.R. und Sayao, A.S.F.J. (Hrsg.), 2004. Handbook of slope stabilisation. Springer-Verlag, Berlin.
- Pachauri, A.K., Gupta, P.V. und Chander, R., 1998. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environmental Geology*, 36(3-4): 325-334.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G. und Goodwin, C.N., 1998. The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping, 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Palmer, D.F. und Weisgarber, S.L., 1988. Geophysical Survey of the Stumpy Basin Landslide, Ohio. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 25(3): 363-370.
- Panizza, M., Pasuto, A., Silvano, S. und Soldati, M., 1997. Landsliding during the Holocene in the Cortina d'Ampezzo region, Italian Dolomites. In: J.A. Matthews, D. Brunsden, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 17-32.
- Pasuto, A., Silvano, S. und Berlasso, G., 2000. Application of Time Domain Reflectometry (TDR) Technique in Monitoring the Pramollo Pass Landslide (Province of Udine, Italy). In: E. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), Landslides in Research, Theory and Practice, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 1189-1194.
- Pellerin, L., 2002. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in geophysics*, 23: 101-132.
- Pelletier, J.D., Malamud, B.D., Blodgett, T. und Turcotte, D.L., 1997. Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, 48(3-4): 255-268.
- Petley, D.N., Bulmer, M.H.K. und Murphy, W., 2002. Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, 30: 719-722.
- Petley, D.N., Hearn, G.J. und Hart, A., 2005a. Towards the Development of a Landslide Risk Assessment for Rural Roads in Nepal. In: T. Glade, M. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), Landslide hazard and Risk. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 597-619.
- Petley, D.N., Higuchi, T., Petley, D.J., Bulmer, M.H. und Carey, J., 2005b. Development of progressive landslide failure in cohesive materials. *Geology*, 33(3): 201-204.
- Petley, D.N., Mantovani, F., Bulmer, M.H. und Zannoni, A., 2005c. The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns. *Geomorphology*, 66(1-4): 133-147.
- Petley, D.N. und Petley, D.J., 2006. On the initiation of large rockslides: Perspectives from a new analysis of the Vaiont movement record. In: S.G. Evans, G. Scarascia Mugnozza, A. Strom und R.L. Hermanns (Hrsg.), Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, Vol. 49. Springer, S. 77-84.
- Peträhn, G., 1999. Taschenbuch Vermessung - Grundlagen der Vermessungstechnik. Cornelsen Verlag, Berlin, 327 S.
- Petrascheck, A. und Kienholz, H., 2003. Hazard assessment and mapping of mountain risks in Switzerland. In: D. Rickenmann und C.-L. Chen (Hrsg.), Debris-flow hazards mitigation:

- mechanics, prediction, and assessment, 10-12 September 2003. Millpress, Rotterdam, Netherlands, Davos, Switzerland, S. 25-38.
- Pflügner, W., 2005. Basic Data and Decision Support for Landslide Management: A Conceptual Framework. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, S. 377-400.
- Phillips, J.D., 2003. Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. *Progress in Physical Geography*, 27(1): 1-23.
- Phillips, J.D., 2006. Deterministic chaos and historical geomorphology: A review and look forward. *Geomorphology*, 76: 109-121.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G. und Fell, R., 2005. Hazard characterization and quantification. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), *Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005. A.A. Balkema Publishers, S. 27-61.
- Plapp, T., 2003. Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen. Eine empirische Untersuchung aus sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands, Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Karlsruhe.
- Plapp, T. und Werner, U., 2006. Understanding risk perception from natural hazards: Examples from Germany. In: W.J. Ammann, S. Dannenmann und L. Vulliet (Hrsg.), *RISK21 - Coping with Risks due to Natural Hazards in the 21st Century*. Taylor & Francis, London, S. 101-108.
- Plate, E.J. (Hrsg.), 1998. IDNDR - Vorbeugung gegen Naturkatastrophen als Modell für nachhaltige Entwicklung. 51. Deutscher Geographentag 1997- Bonn, 51. Steiner, 127-135 S.
- Pohl, J., 1998. Die Wahrnehmung von Naturrisiken in der "Risikogesellschaft". In: G. Heinritz, R. Wiessner und M. Winiger (Hrsg.), *Nachhaltigkeit als Leitbild der Umwelt- und Raumentwicklung in Europa*. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, S. 153-163.
- Pohl, J. und Geipel, R., 2002. Naturgefahren und Naturrisiken. *Geographische Rundschau*, 54(1): 4-8.
- Polemio, M. und Petrucci, O., 2000. Rainfall as a landslide triggering factor: An overview of recent international research. In: E. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), *Landslides in Research, Theory and Practice*, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 1219-1226.
- Prinz, H., 1997. Abriß der Ingenieurgeologie. Enke, Stuttgart, 546 S.
- Ragozin, A.L. und Tikhvinsky, I.O., 2000. Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. In: E. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), *Landslides in research, theory and practice*. Thomas Telford, Cardiff, S. 1257-1262.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. und Ardizzone, F., 2005. Geomorphological Mapping to Assess Landslide Risk: Concepts, Methods and Applications in the Umbria Region of Central Italy. In: T. Glade, M.G. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, S. 429-468.
- Reiff, H.-J., 1968. Die Bergrutsche und Bergschlipfe am Trauf der Schwäbischen Alb, Zulassungsarbeit, Universität Tübingen.
- Remondo, J., Bonachea, J. und Cendrero, A., 2005. A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: From landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, 2(4): 321-328.
- Renn, O., 2005. Risk Governance towards an integrative approach. White Paper. IRGC, International Risk Governance Council, Geneva.
- Renn, O., Benighaus, C. und Klinke, A., 2006. Die Bedeutung anthropogener Eingriffe in natürliche Prozesse: die Wechselwirkungen zwischen Naturgefahren und Risiken. In: E. Kulke, H. Monheim und P. Wittmann (Hrsg.), *Grenzwerte. Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen*. 55. Deutscher Geographentag Trier 2005, 1. bis 8. Oktober 2005. Deutsche Gesellschaft für Geographie (DGFG), Berlin, Leipzig, Trier, S. 443-452.
- Reynolds, J.M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 792 S.
- Rickenmann, D., 2005. Runout prediction methods. In: M. Jakob und O. Hungr (Hrsg.), *Debris flow and debris avalanches - a practically-oriented overview of the State-of-the-Art*. Springer, Heidelberg, S. 305-324.
- Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W. und Lüscher, P., 2002. Wirkungen des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 153(11): 437-445.

- Riede, G., 1990. Heimat-Chronik Ratshausen, Beiträge zur Ortsgeschichte. Eigenverlag, 586 S.
- Riedinger, R. und Terhorst, B., 1999. Vegetationsökologische Befunde in Rutschgebieten der Mittleren Schwäbischen Alb. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 97-116.
- Roch, K.-H., Chwatal, W. und Brückl, E., 2005. Potentials of monitoring rock fall hazards by GPR: considering as example the results of Salzburg. *Landslides*, 00: 1-8.
- Rodolfi, G., 1997. Holocene mass movement activity in the Tosco-Romagnolo Apennines (Italy). In: J.A. Matthews, D. Brunsten, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 33-46.
- Roering, J.J., Kirchner, J.W., . und Dietrich, W.E., 2005. Characterizing structural and lithological controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. *GSA Bulletin*, 117(5/6): 654-668.
- Roering, J.J., Schmidt, K.M., Stock, J.D., Dietrich, W.E. und Montgomery, D.R., 2003. Shallow landsliding, root reinforcement, and the spatial distribution of trees in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 237-253.
- Rösler, G.F., 1788. *Beyträge zur Naturgeschichte des Herzogthums Wirtemberg nach der Ordnung und den Gegenden der dasselbe durchströmenden Flüsse*, 1, Tübingen, 240 S.
- Rosser, N.J., Dunning, S.A., Lim, M. und Petley, D.N., 2005. Terrestrial laser scanning for quantitative rockfall hazard assessment. In: E. Eberhardt, O. Hungr, R. Fell und R. Couture (Hrsg.), *Landslide Risk Management. Supplementary Volume (CD)*. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005, S. R 081.
- Roth, M., Dietrich, M., Blikra, L.H. und Lecomte, I., 2005. Seismic monitoring of the unstable rock slope site at Aknes, Norway, 19th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP), Seattle, Washington, S. 1-9, (<http://www.nosar.no/seismology/research/aaknes/#References>, 03.02.2007).
- Roth, R., 2004. *Das Ermstal zwischen Neckartenzlingen und Bad Urach*. Natur - Heimat - Wandern. Konrad Theiss Verlag GmbH, Stuttgart, 182 S.
- Rothe, P., 2005. *Die Geologie Deutschlands. 48 Landschaften im Portrait*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 240 S.
- Rozycki, A., Ruiz Fonticiella, J.M. und Cuadra, A., 2006. Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method. *Engineering Geology*, 82(3): 145-153.
- Ruch, C., 1996. *Der Baugrund von Pfullingen*. Ingenieurgeologische Karte von Baden-Württemberg, mit Beiheft. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i.Br.
- Ruch, C., 2003. *Der Baugrund von Reutlingen*. Ingenieurgeologische Karte von Baden-Württemberg, mit Beiheft. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i.Br.
- Rybár, J., 1971. Tektonisch beeinflusste Hangdeformationen in Braunkohlebecken. *Rock Mechanics*, 3: 139-158.
- Saito, M., 1965. Forecasting the time of occurrence of a slope failure, 6th international conference on soil mechanics Montreal, S. 537-541.
- Santilli, M. und Pelfini, M., 2002. Dendrogeomorphology and dating of debris flows in the Valle del Gallo, Central Alps, Italy. *Dendrochronologia*, 20(3): 269-284.
- Sass, O., 2004. Rock moisture fluctuations during freeze-thaw cycles: Preliminary results from electrical resistivity measurements. *Polar Geography*, 28(1): 13-31.
- Sass, O., Bell, R. und Glade, T., im Druck. Comparison of GPR, 2D-resistivity and traditional techniques for the subsurface exploration of the Öschingen landslide, Swabian Alb (Germany). *Geomorphology*: 1-14.
- Schädel, K. und Stober, I., 1988. Rezente Großbrutschungen an der Schwäbischen Alb. *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, 30: 431-439.
- Schauerte, W., Bell, R., Glade, T. und Kuhlmann, H., 2006. Deformation Measurements of Landslides in the Swabian Alb - Research Project InterRisk, Conference Proceedings of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and the 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, 24.-26.05.2006.
- Scheuer, D., 1998. Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf die Geomorphodynamik im Braunjura-Bergland Südwestdeutschlands am Beispiel des Maustobels und der Riesbachklinge

- (Aichelbergtrasse der BAB A8). In: W.D. Blümel (Hrsg.), Beiträge zur Physischen Geographie Südwestdeutschlands. Stuttgarter Geographische Studien, 128. Institut für Geographie der Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Schleyer, A., 2001. Das Laserscanning-DGM von Baden-Württemberg. In: D. Fritsch und R. Spiller (Hrsg.), Photogrammetric Week '01. Wichmann, Heidelberg, S. 217-225.
- Schlichting, E., Blume, H.-P. und Stahr, K., 1995. Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studentexte, 81. Blackwell, Berlin, 295 S.
- Schmidt, J. und Andrew, R., 2005. Multi-scale landform characterization. *Area*, 37(3): 341-350.
- Schmidt, J., Evans, I.S. und Brinkmann, J., 2003. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(8): 797-814.
- Schmidt, M., 1994. Erläuterungen zu Blatt 7520 Mössingen, Geologische Karte 1:25000 von Baden-Württemberg. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., 185 S.
- Schmitt, G., 2005. Die Alemannen im Zollernalbkreis. Dissertation, Fachbereich 07, Geschichts- und Kulturwissenschaften, Universität Mainz, Mainz.
- Schmutz, M. et al., 2000. Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the super sauze earthflow (FRANCE). *Surveys in geophysics*, 21(4): 371-390.
- Schneider, T., 1980. Grundgedanken und Methodik moderner Sicherheitsplanung. In: Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung (Hrsg.), Proceedings International Symposium Interpraevent 1980, Bad Ischl, S. 49-69.
- Schröder, B., 2000. Zwischen Naturschutz und theoretischer Ökologie: Modelle zur Habitateignung und räumlichen Populationsdynamik für Heuschrecken im Niedermoor. Dissertation, Gemeinsame Naturwissenschaftliche Fakultät, Technische Universität Braunschweig.
- Schrott, L., Hördt, A. und Dikau, R. (Hrsg.), 2003. Geophysical applications in geomorphology. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände, Band 132*. Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart, 190 S.
- Schulz, W.H., 2007. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89: 67-87.
- Schumm, S.A., 1979. Geomorphic thresholds: the concept and its applications. *Transactions Institute of British Geographers (New Series)*, 4(4): 485-515.
- Seibold, E., 1955. Ein Hangrutsch als tektonisches Modell. *Jb. geol. paläont. Monatshefte*, 7: 278-297.
- Seijmonsbergen, A.C. und de Graaff, L.W.S., 2006. Geomorphological mapping and geophysical profiling for the evaluation of natural hazards in an alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6: 185-193.
- Selby, M.J., 1993. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford, 451 S.
- Semenza, E. und Ghirotti, M., 2000. History of the 1963 Vaiont slide: the importance of geological factors. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(2): 87-97.
- Semmel, A., 1968. Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen. *Frankfurter Geographische Hefte*, 133, Frankfurt a.M.
- Singhroy, V., Couture, R. und Molch, K., 2005. InSAR monitoring of the Frank Slide. In: O. Hungr, R. Fell, R. Couture und E. Eberhardt (Hrsg.), *Landslide risk Management. Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005*. A.A. Balkema Publishers, S. 611-614.
- Slaymaker, O., 1991. Mountain geomorphology: a theoretical framework for measurement programmes. In: M.J. Crozier (Hrsg.), *Geomorphology in Unstable Regions*. Catena, Cremlingen, S. 427-437.
- Slob, S. und Hack, R., 2004. 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. In: R. Hack, R. Azzam und R. Charlier (Hrsg.), *LNES 104*, S. 179-189.
- Smith, K., 1992. *Environmental Hazards: Assessing risk and reducing disaster*. The Routledge Physical Environmental Series. Routledge, London, 325 S.
- Smolczyk, U. (Hrsg.), 2001. *Grundbau Taschenbuch - Geotechnische Grundlagen*, 1. Ernst & Sohn, Darmstadt, 783 S.
- Soeters, R. und van Westen, C.J., 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: A.K. Turner und R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report. National Academy Press, Washington, D.C., S. 129-177.

- Solana, M.C. und Kilburn, C.R.J., 2003. Public awareness of landslide hazards: The Barranco de Tirajana, Gran Canaria, Spain. *Geomorphology*, 54(1-2): 39-48.
- Sorriso-Valvo, M., 1997. Landsliding during the Holocene in Calabria, Italy. In: J.A. Matthews, D. Brunnsden, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, S. 97-108.
- Sorriso-Valvo, M., 2005. Landslide Risk Assessment in Italy. In: T. Glade, M. Anderson und M.J. Crozier (Hrsg.), *Landslide hazard and Risk*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, S. 699-732.
- Starkel, L., 1985. The reflection of the Holocene climatic variations in the slope and fluvial deposits and forms in the European mountains. *Ecologia Mediterranea*, 11: 91-97.
- Starkel, L., 1997. Mass movements during the Holocene: a Carpathian example and the European perspective. In: J.A. Matthews, D. Brunnsden, B. Frenzel, B. Gläser und M.M. Weiß (Hrsg.), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the holocene*. Palaeoclimate Research. Gustav Fischer, S. 385-400.
- Stefanini, M.C., 2004. Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology*, 63(3-4): 191-202.
- Stoffel, M. und Perret, S., 2006. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: Some methodological considerations. *Dendrochronologia*, 24: 1-15.
- Süzen, M.L. und Doyuran, V., 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45(5): 665-679.
- Suzuki, K. und Higashi, S., 2001. Groundwater flow after heavy rain in landslide-slope area from 2-D inversion of resistivity monitoring data. *Geophysics*, 66(3): 733-743.
- Swissinfo, 2006a. Felssturz und Wintereinbruch behindern Nord-Süd-Achse. <http://www.swissinfo.org/ger/swissinfo.html?siteSect=43&sid=6766642> (11.04.2007).
- Swissinfo, 2006b. Gotthard-Autobahn für mindestens drei Wochen gesperrt. <http://www.swissinfo.org/ger/swissinfo.html?siteSect=43&sid=6779275> (11.04.2007).
- Takada, Y., 1968. A Geophysical Study of Landslides (Application of the Electrical Resistivity Survey to Landslides). *Bulletin. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 18: 37-58.
- Tangestani, M.H., 2003. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran, *Map India Conference 2003*, S. 1-4.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. und Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Terhorst, B., 1997. Formenschatz, Alter und Ursachenkomplexe von Massenverlagerungen an der schwäbischen Juraschichtstufe unter besonderer Berücksichtigung von Boden- und Deckschichtenentwicklung. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D, 2*, Tübingen, 212 S.
- Terhorst, B., 2001. Mass movements of various ages on the Swabian Jurassic escarpment: geomorphologic processes and their causes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band, 125*: 105-127.
- The Ministry of the Environment, 2000. Reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats. [Regulation on hazard zoning for avalanches, debris flows and rockfall, the usage of hazard zones, and the making of preliminary hazard zoning].
- Thein, S., 1999. Massenverlagerungen an der Schwäbischen Juraschichtstufe - statistische Bewertungsmodelle und Entwicklung von Gefährdungskarten unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. In: E. Bibus und B. Terhorst (Hrsg.), *Angewandte Studien zu Massenbewegungen*. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, S. 159-182.
- Thein, S., 2000. Massenverlagerungen an der Schwäbischen Alb - Statistische Vorhersagemodelle und regionale Gefährdungskarten unter Anwendung eines Geographischen Informationssystems. *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe D: Geoökologie und Quartärforschung*, 187 S.
- Thiebes, B., 2006. Räumliche Gefährdungsmodellierung flachgründiger Hangrutschungen. GIS gestützte Analyse an der Schwäbischen Alb. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Bonn, Bonn.
- Thieken, A.H. et al., 2006. Regionalisation of asset values for risk analysis. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6: 167-178.

- Thut, A., 2001. Geotechnische Messverfahren. In: U. Smolczyk (Hrsg.), Grundbau Taschenbuch - Geotechnische Grundlagen. Ernst & Sohn, Darmstadt, S. 555-611.
- Trandafir, A.C. und Sassa, K., 2005. Seismic triggering of catastrophic failures on shear surfaces in saturated cohesionless soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 42: 229-251.
- Turner, A.K. und Schuster, R.L., 1996. Landslides. Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report, 247. National Academy Press, Washington D.C., 675 S.
- UNDRO, 1991. Mitigation natural disasters. Phenomena, Effects and options, United Nations Disaster Relief, New York.
- van Beek, L.P.H. und van Asch, T., 2004. Regional Assessment of the Effects of Land-Use Change on Landslide Hazard by Means of Physically Based Modelling. *Natural Hazards*, 31: 289-304.
- van Beek, R., 2002. Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment. *Netherlands Geographical Studies*, 294, Utrecht, 363 S.
- Van Den Eeckhaut, M. et al., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76(3-4): 392-410.
- van Westen, C.J., van Asch, T.W.J. und Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation - Why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2): 167-184.
- Varnes, D.J., 1984. Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*, 3. UNESCO, Paris, France, 63 S.
- Vidal, H., 1953. Neue Ergebnisse zur Stratigraphie und Tektonik des nordwestlichen Wettersteingebirges und seines nördlichen Vorlandes. *Geologica Bavarica*, 17: 56-88.
- Voight, B., 1989. A method for prediction of volcanic eruptions. *Nature*, 332: 125-130.
- Völkel, J., Leopold, M., Mahr, A. und Raab, T., 2002. Zur Bedeutung kaltzeitlicher Hangsedimente in zentraleuropäischen Mittelgebirgslandschaften und zu Fragen ihrer Terminologie. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 146: 50-59.
- von Poschinger, A. und Haas, U., 1997. Der Flims Bergsturz, doch ein warmzeitliches Ereignis? *Bulletin für angewandte Geologie*, 2(1): 35-46.
- von Poschinger, A., Wassmer, P. und Maisch, M., 2006. The Flims Rockslide: History of Interpretation and New Insights. In: S.G. Evans, G. Scarascia Mugnozza, A. Strom und R.L. Hermanns (Hrsg.), *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, Vol. 49. Springer, S. 329-356.
- Wagenplast, P., 2004a. Ingenieurgeologische Risiken im nordöstlichen Baden-Württemberg. *Jahreshefte des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg*, 37: 241-310.
- Wagenplast, P., 2004b. Ingenieurgeologische Risiken im südöstlichen Baden-Württemberg. *Jahreshefte des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg*, 40: 253-334.
- Wagenplast, P., 2005. Ingenieurgeologische Gefahren in Baden-Württemberg. *Informationen* 16. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br., 79 S.
- Wagner, K., 2004. Naturgefahrenbewusstsein und -kommunikation am Beispiel von Sturzfluten und Rutschungen in vier Gemeinden des Bayerischen Alpenraums, Dissertation, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München.
- Weichselgartner, J., 2001. Naturgefahren als soziale Konstruktion. Eine geographische Beobachtung der gesellschaftlichen Auseinandersetzung mit Naturrisiken, Dissertation, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bonn.
- Weidelt, P., 1997. Geoelektrik. Grundlagen. In: K. Knödel, H. Krummel und G. Lange (Hrsg.), *Geophysik. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, S. 1063.
- Weippert, D., 1960. Zur Gliederung, Bildung und Altersstellung des Kalksteinschutts am Trauf der westlichen Schwäbischen Alb. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 11: 24-30.
- Wieczorek, G.F. und Glade, T., 2005. Climatic Factors Influencing Occurrence of Debris Flows. In: M. Jakob und O. Hungr (Hrsg.), *Debris flow and debris avalanches - a practically-oriented overview of the State-of-the-Art*. Springer, Heidelberg, S. 325-362.
- Wiegand, T., 1996. Modellierung von Massenverlagerungen und ihre Darstellung in Gefährdungskarten auf Blatt 7719 Balingen mit Hilfe von Geographischen

- Informationssystemen. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geographisches Institut, Universität Tübingen, Tübingen.
- Wilson, R.C. und Wieczorek, G.F., 1995. Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1(1): 11-27.
- Winchester, V. und Chaujar, R.K., 2002. Lichenometric dating of slope movements, Nant Ffrancon, North Wales. *Geomorphology*, 47(1): 61-74.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 2001. Erdbebensicher Bauen. Planungshilfe für Bauherren, Architekten und Ingenieure, Stuttgart, 107 S.
- Wolman, M.G. und Miller, J.P., 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68: 54-74.
- Wörner, G., 1998. Quaternary Eifel volcanism, its mantle sources and effect on the crust of the Rhenish Shield. In: H.J. Neugebauer (Hrsg.), *Young Tectonics - Magmatism - Fluids. A case study of the Rhenish Massif. - Workshop of the SFB 350 in Bonn (16th - 17th February 1998)*, Bonn.
- WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993. *Multilingual Landslide Glossary*. Bitech, Richmond, B.C.
- Yokota, S. et al., 1998. The effect of rainwater infiltration within a slope of pyroclastic deposits, recorded using automated electric prospecting. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57(1): 51-58.
- Zêzere, J.L., 2000. Rainfall triggering of landslides in the area north of Lisbon (Portugal). In: E. Bromhead, N. Dixon und M.-L. Ibsen (Hrsg.), *Landslides in Research, Theory and Practice, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. Thomas Telford, Cardiff, UK, S. 1629-1634.

Anhang

## **Anhang**

Anhang 1: Bohrkerne des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen

Anhang 2: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebietes Mössingen-Öschingen

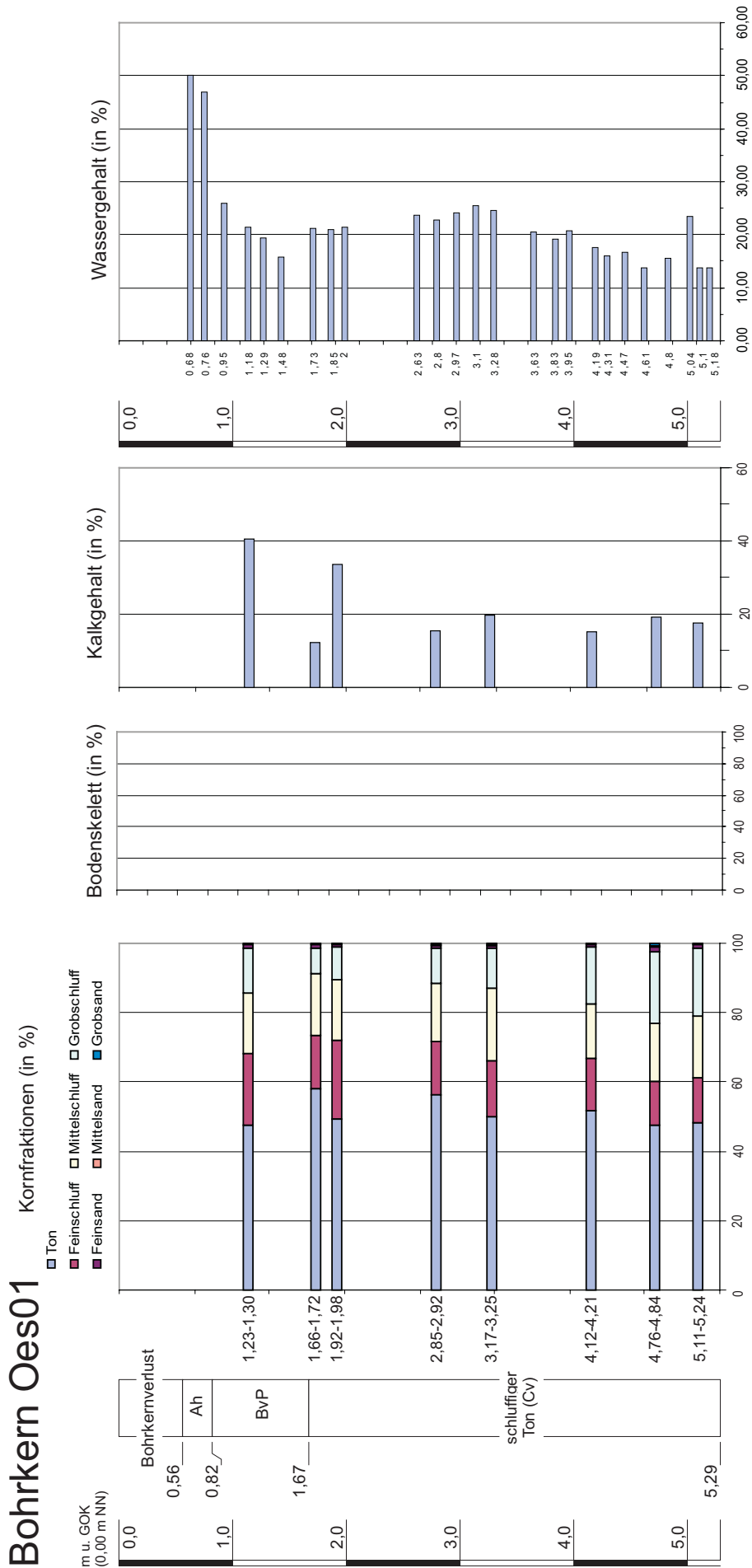
Anhang 3: Bohrkerne des Untersuchungsgebietes des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen

Anhang 4: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebietes Lichtenstein-Unterhausen

Anhang 5: Inhaltsverzeichnis der CD-ROM (Die CD-ROM sowie ausgewählte Dateien sind auf Anfrage beim Autor unter [rainerbell@gmx.de](mailto:rainerbell@gmx.de) erhältlich!)

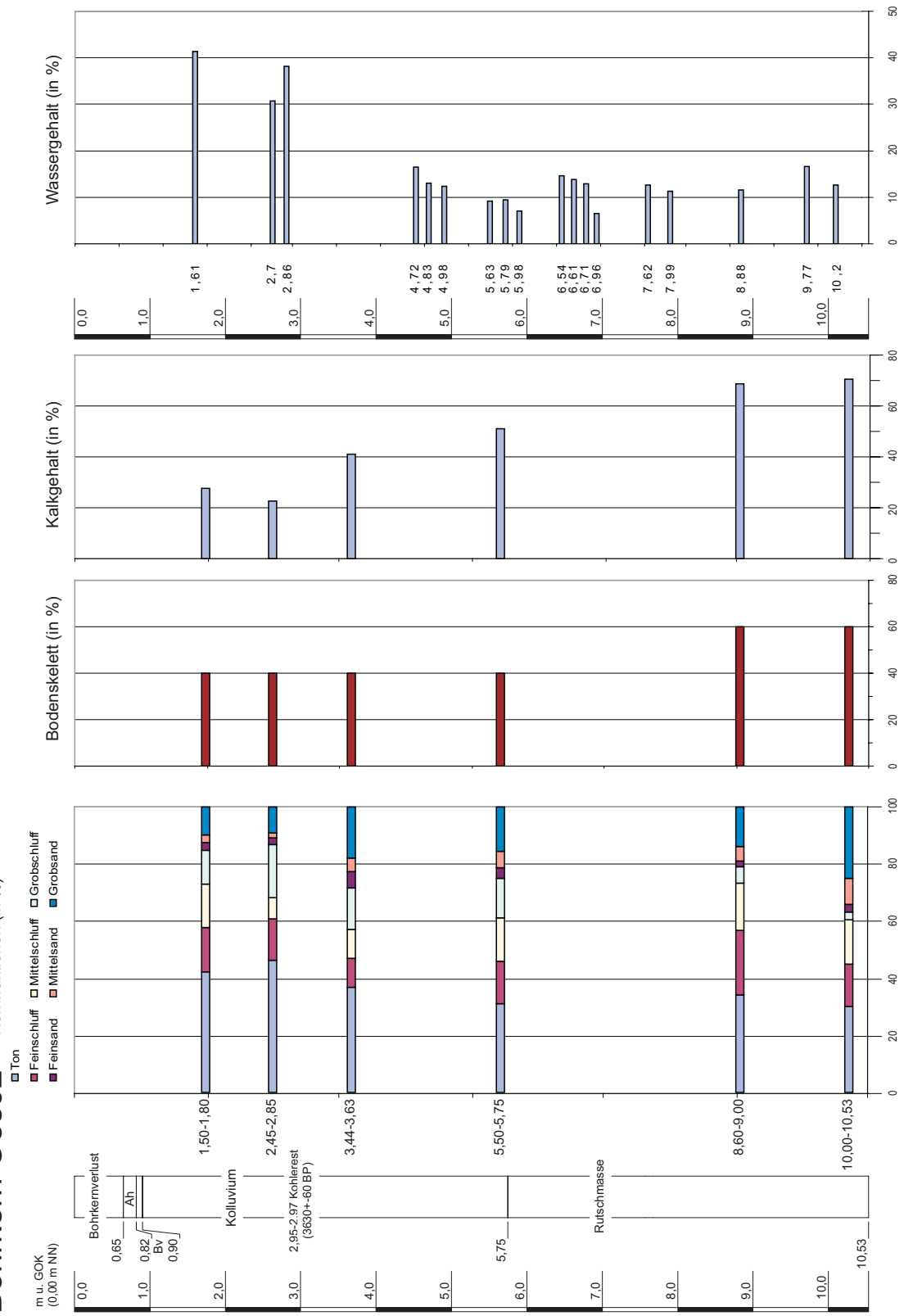


# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen



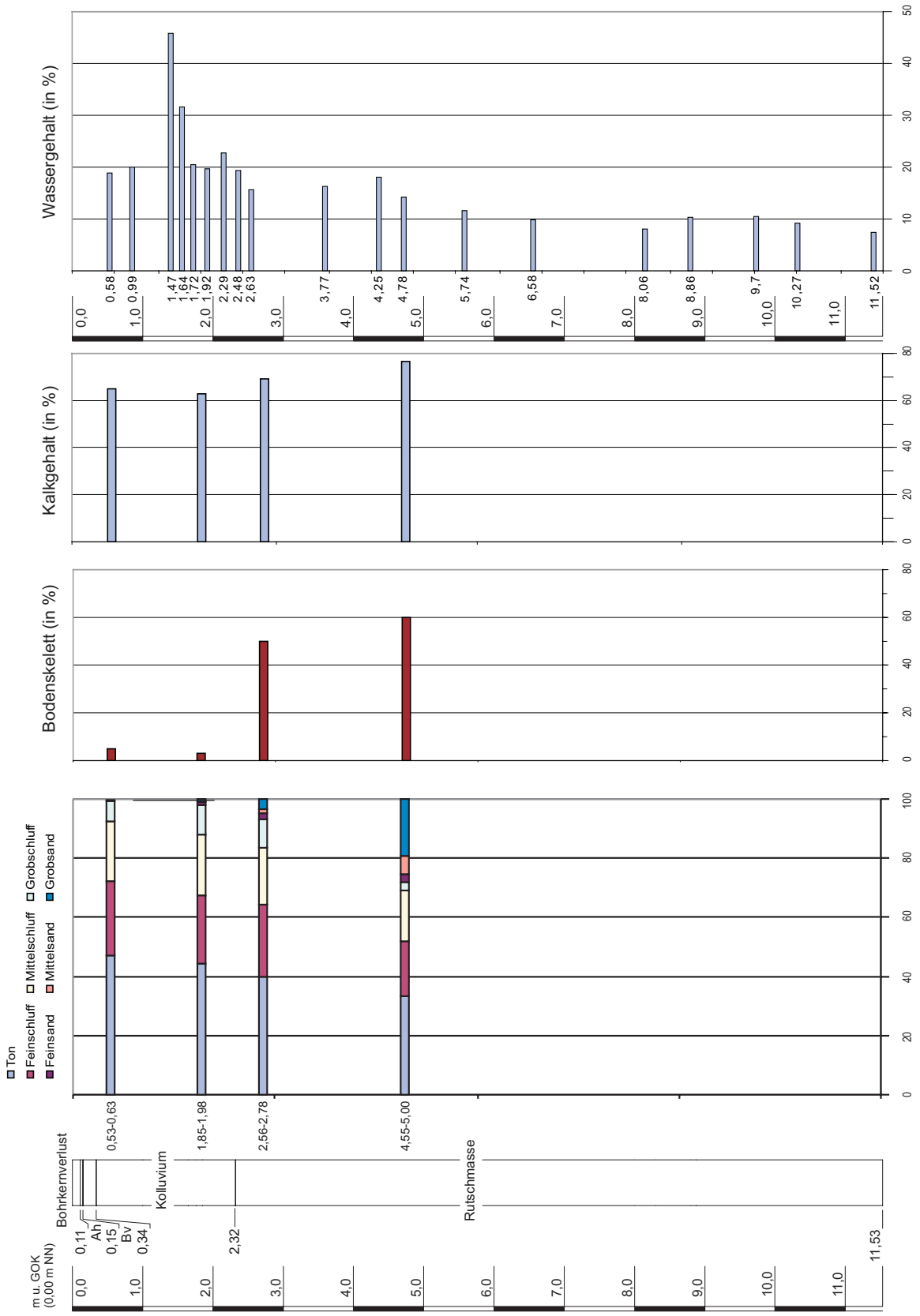
# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

## Bohrkern Oes02 Kornfraktionen (in %)



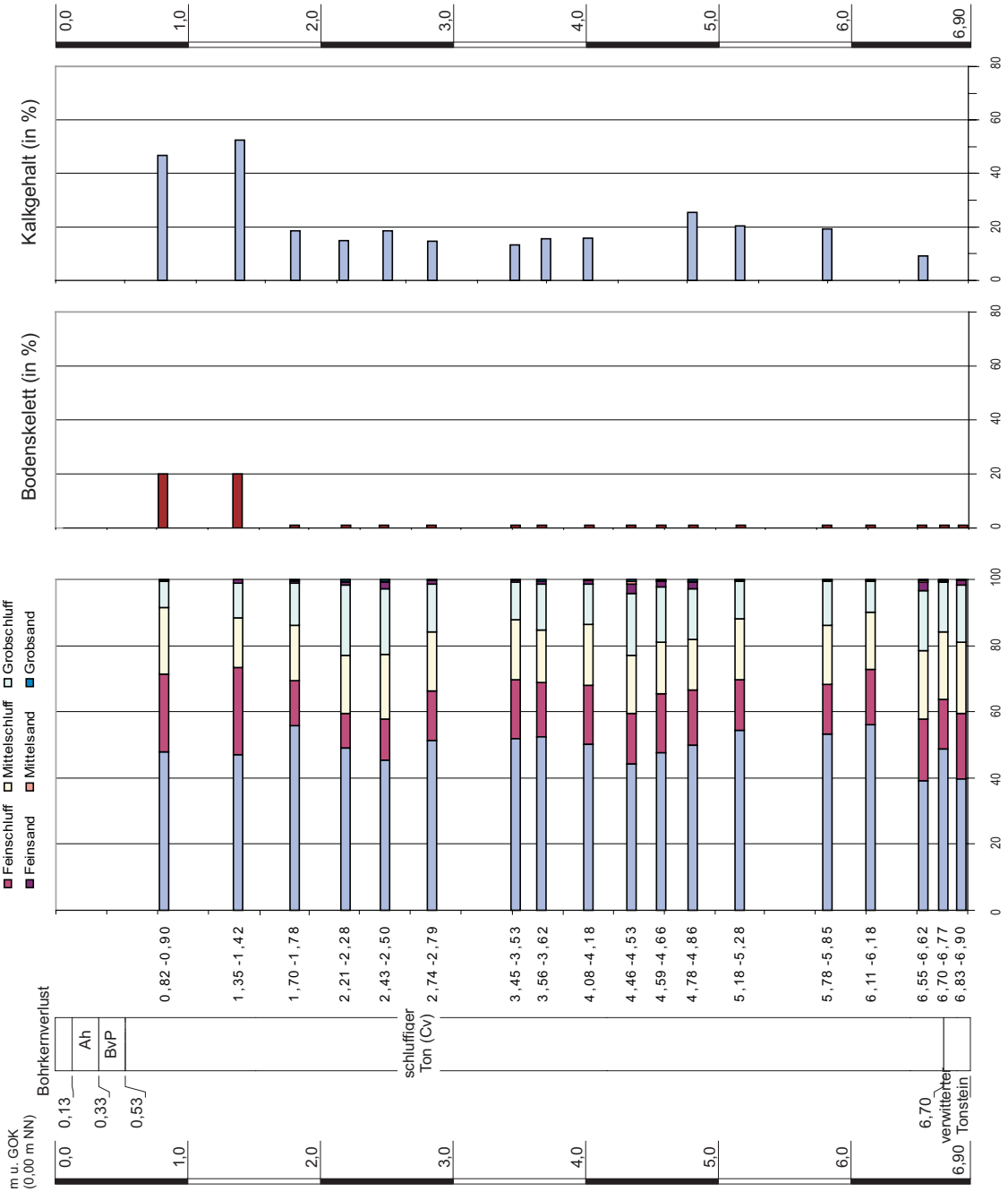
# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

## Bohrkern Oes03

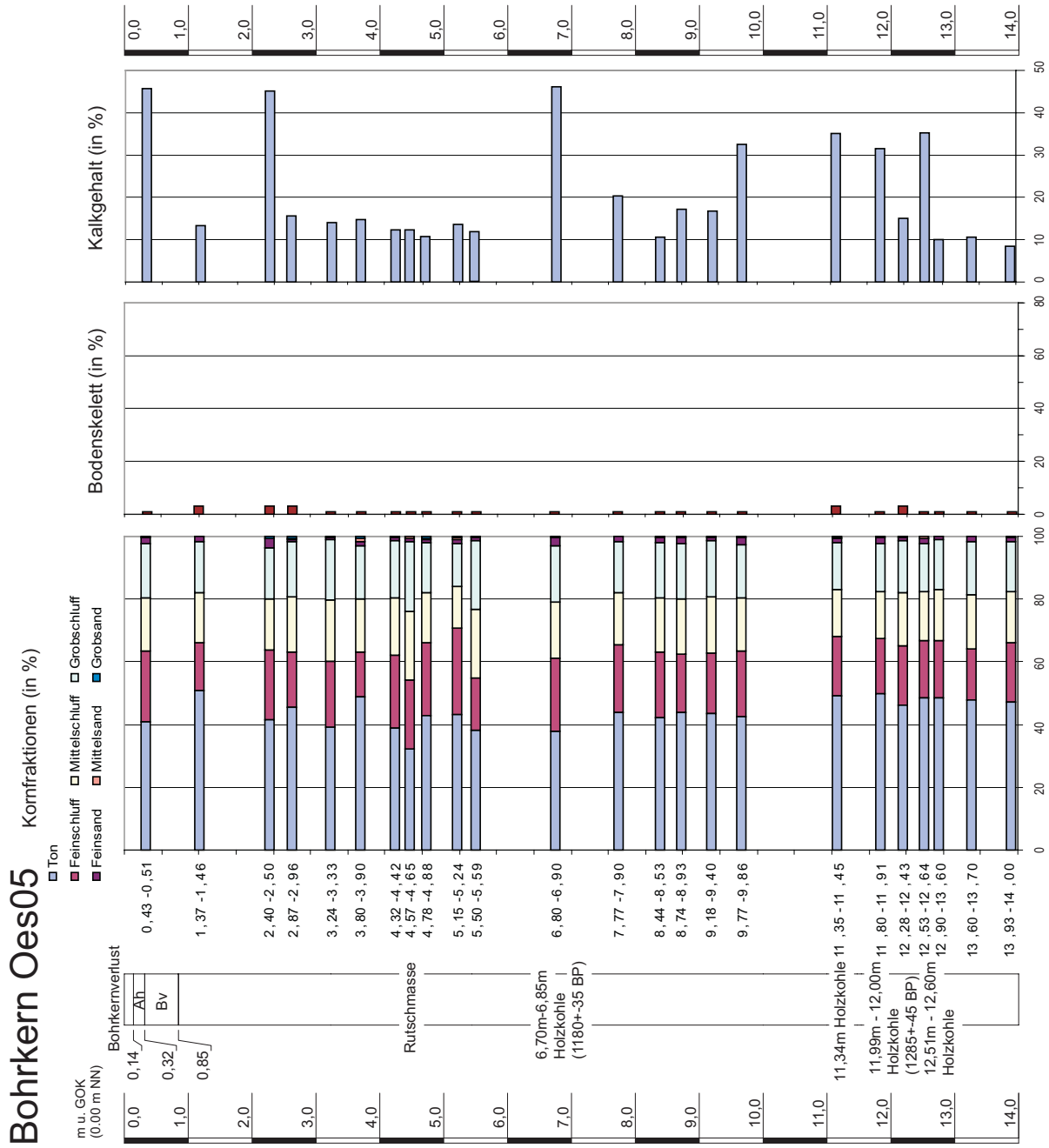


# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

## Bohrkern Oes04

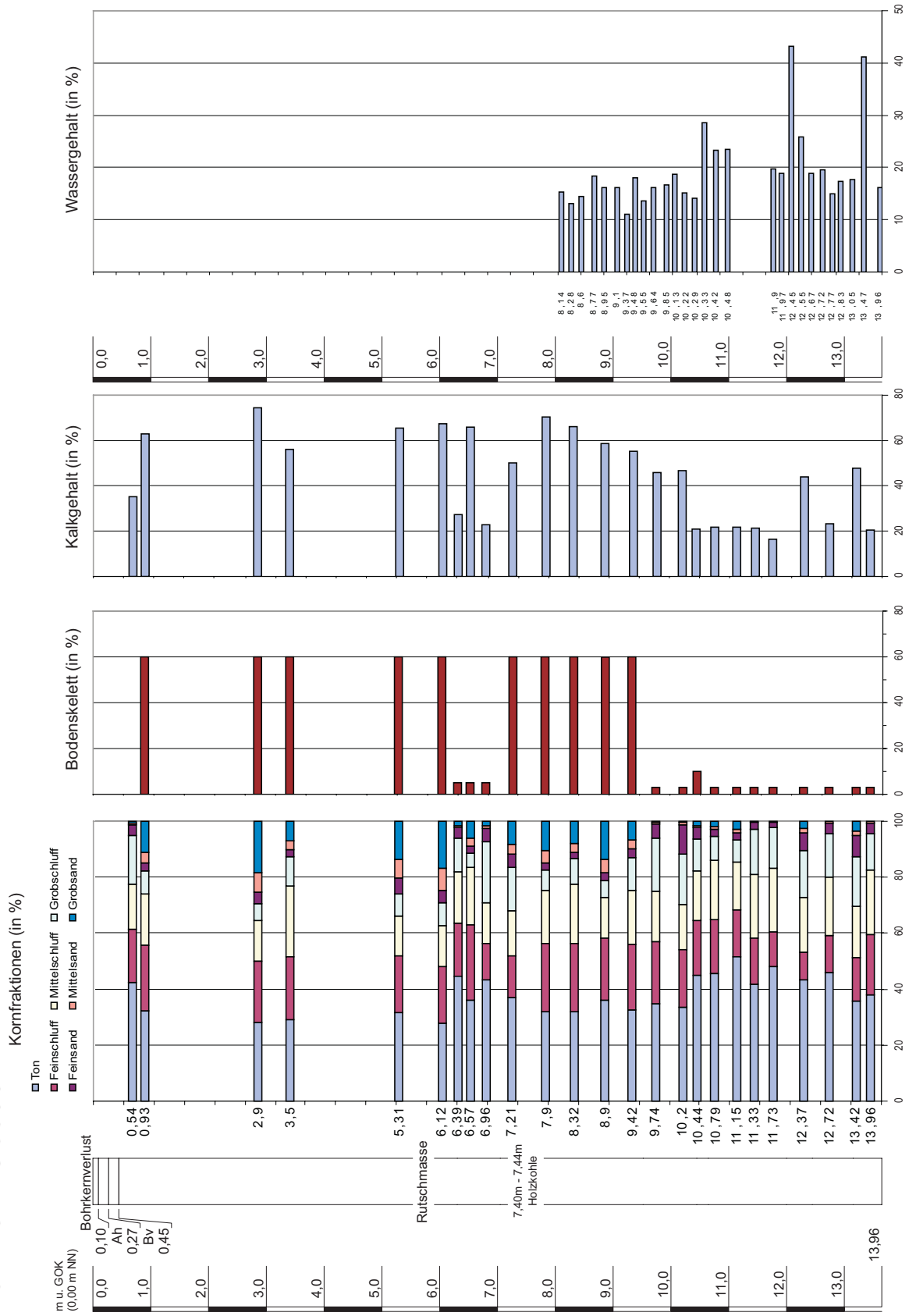


# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

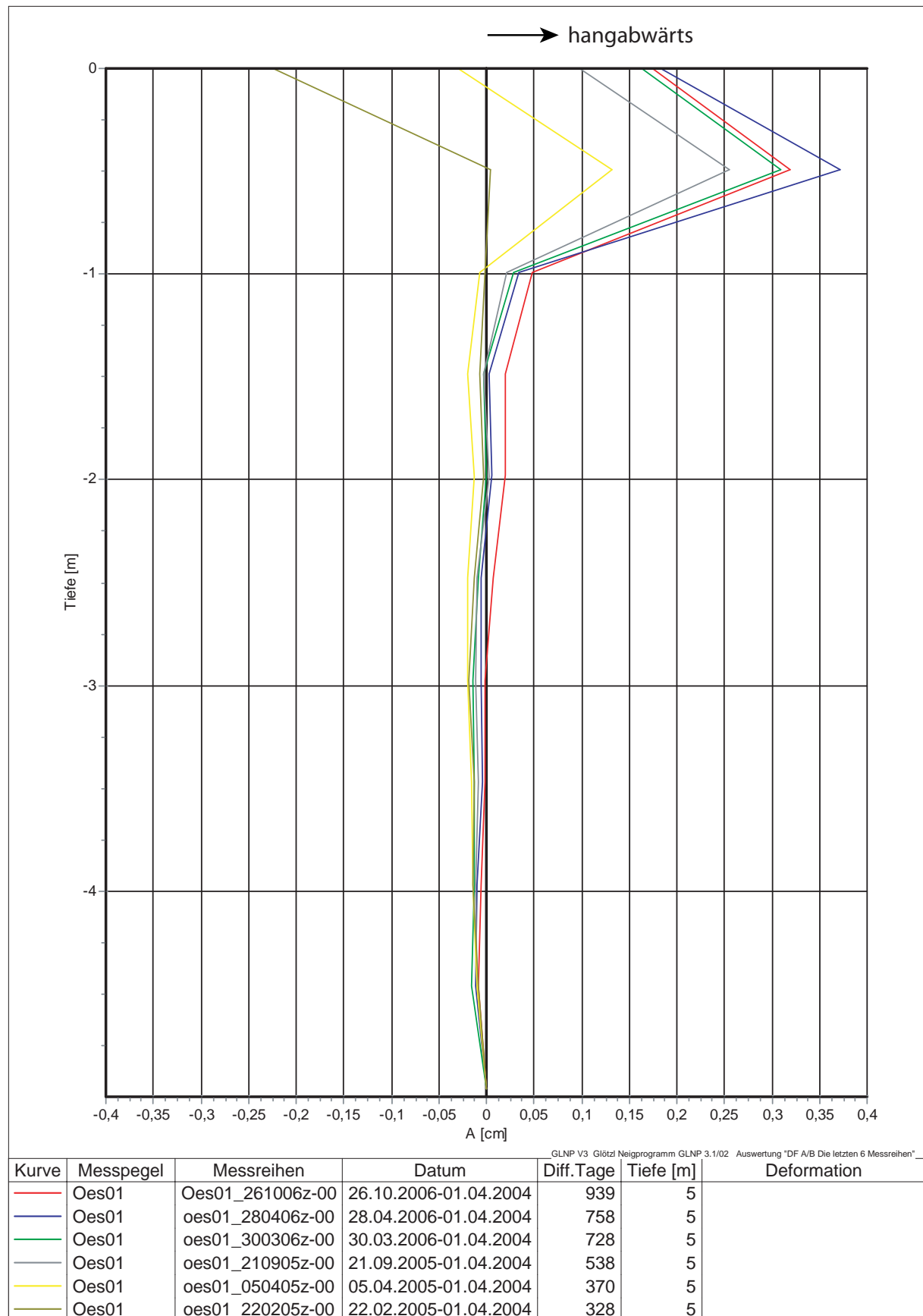


# Anhang 1: Bohrkern des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

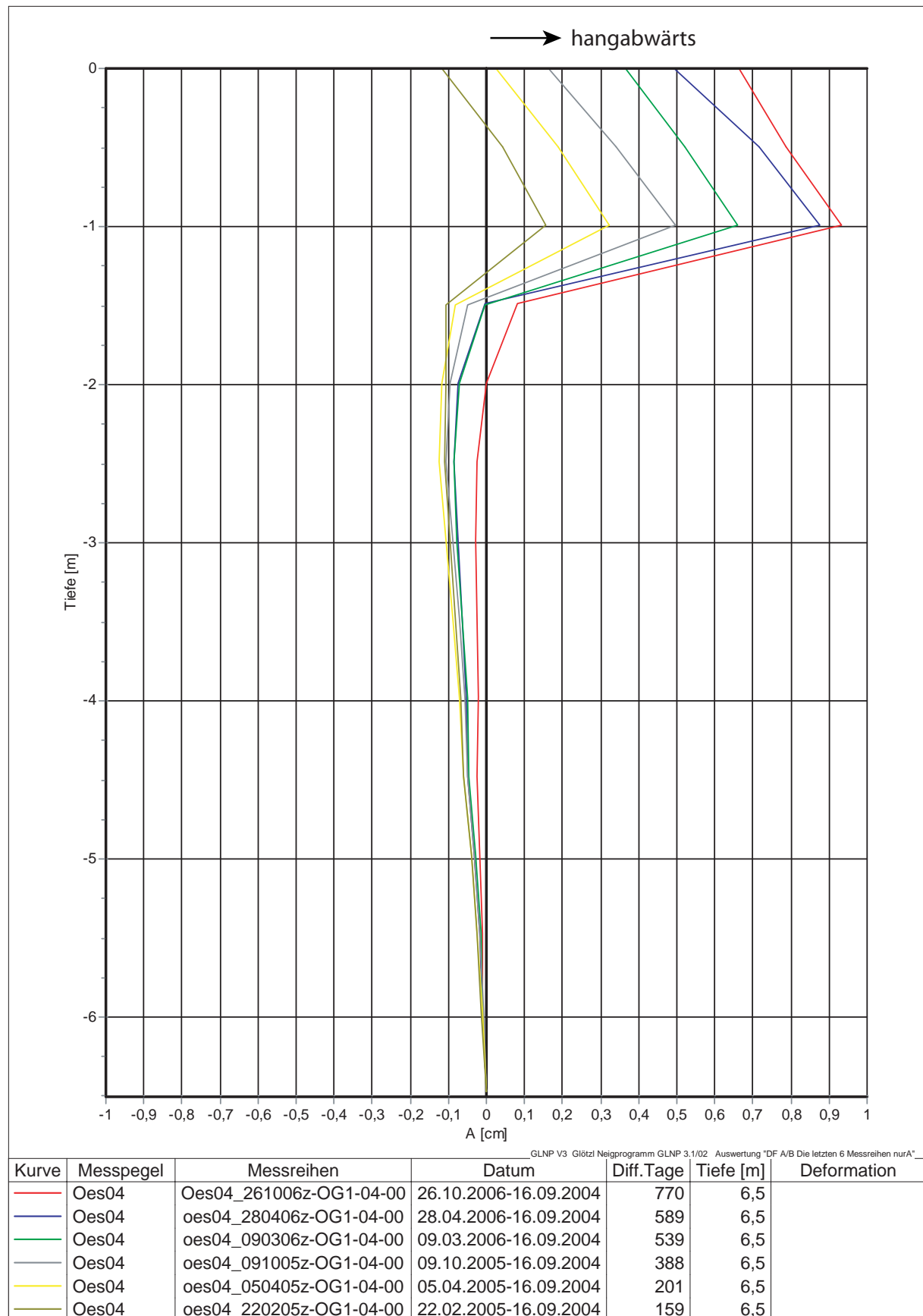
## Bohrkern Oes06



## Anhang 2: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

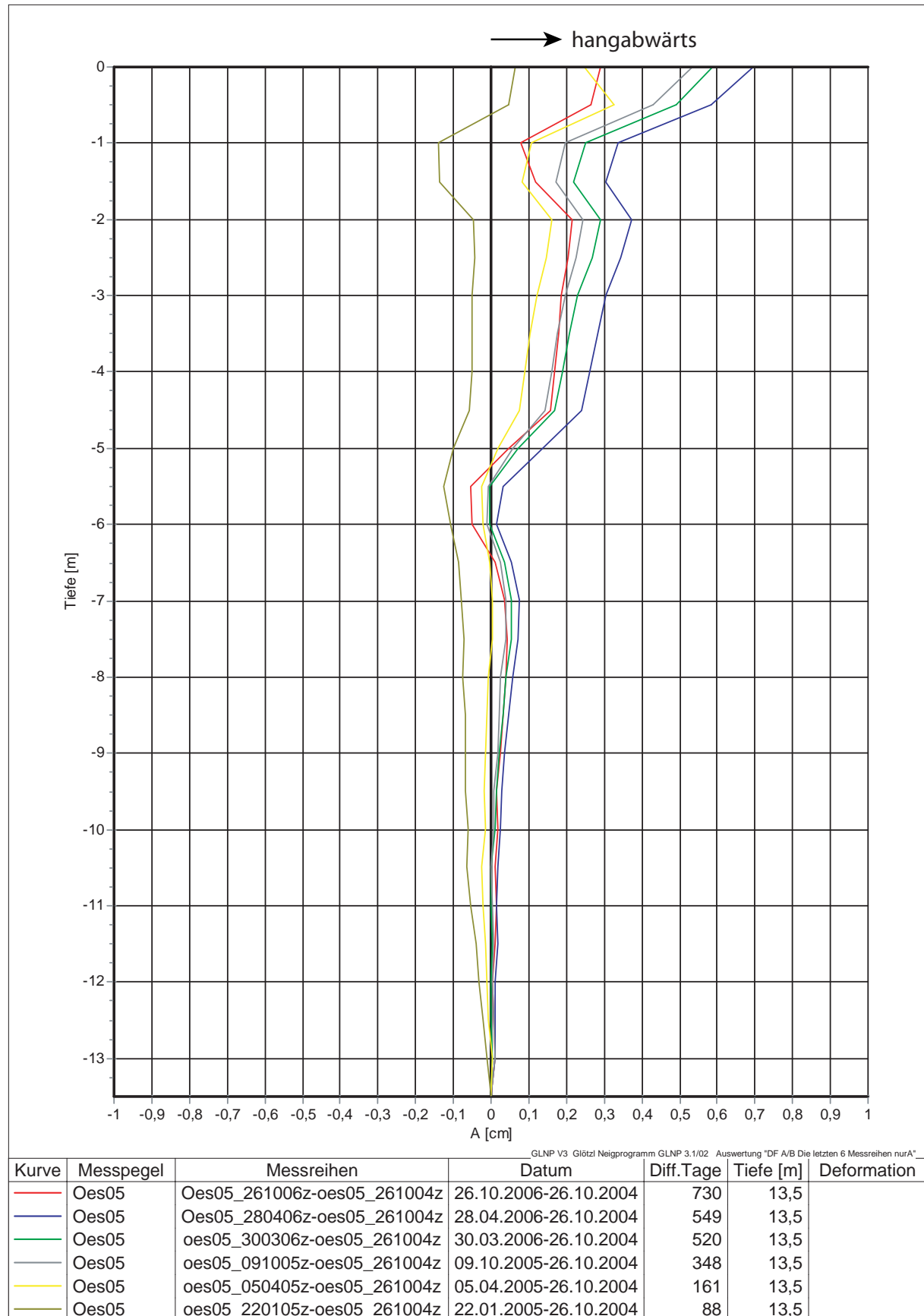


## Anhang 2: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

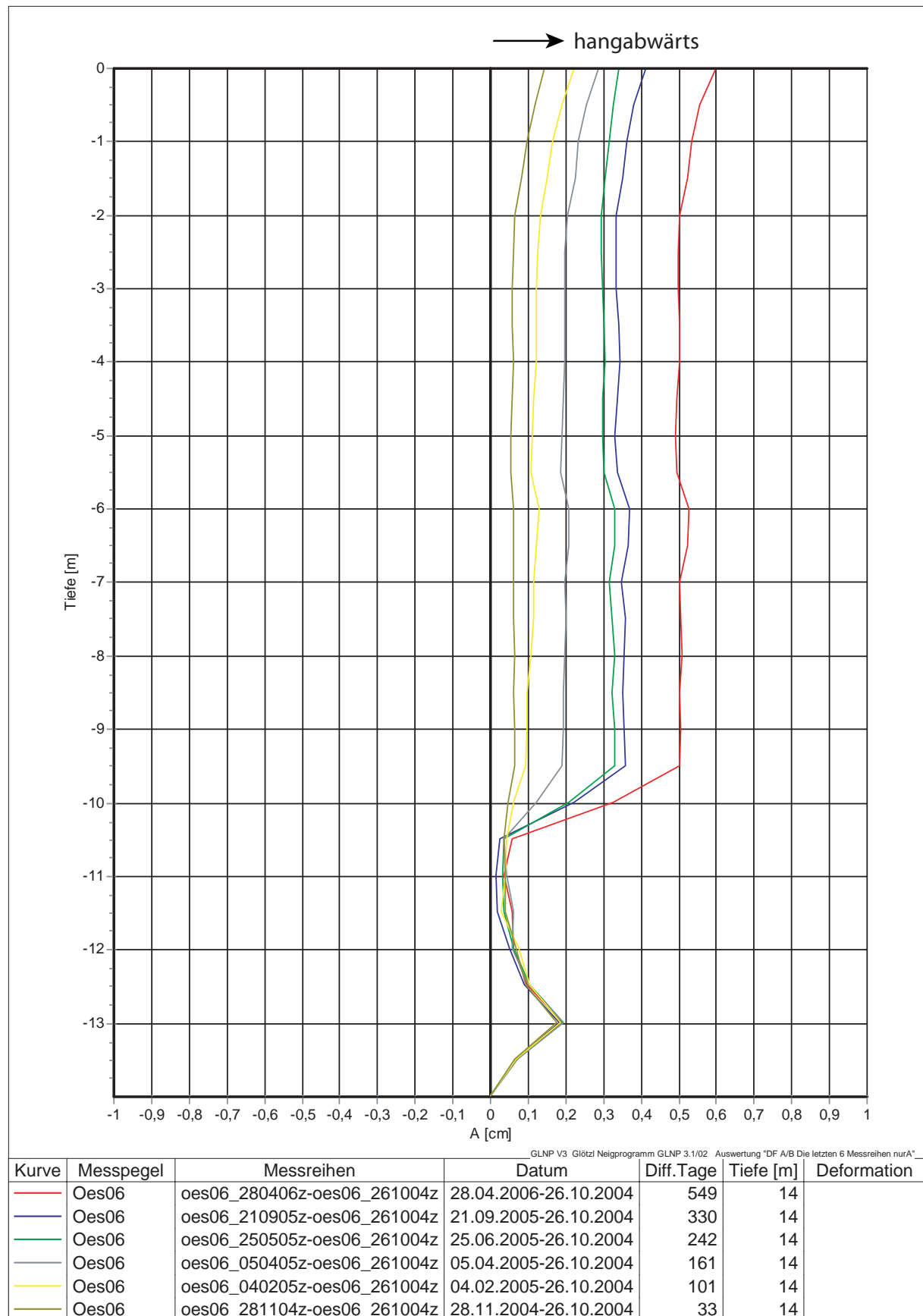




## Anhang 2: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen

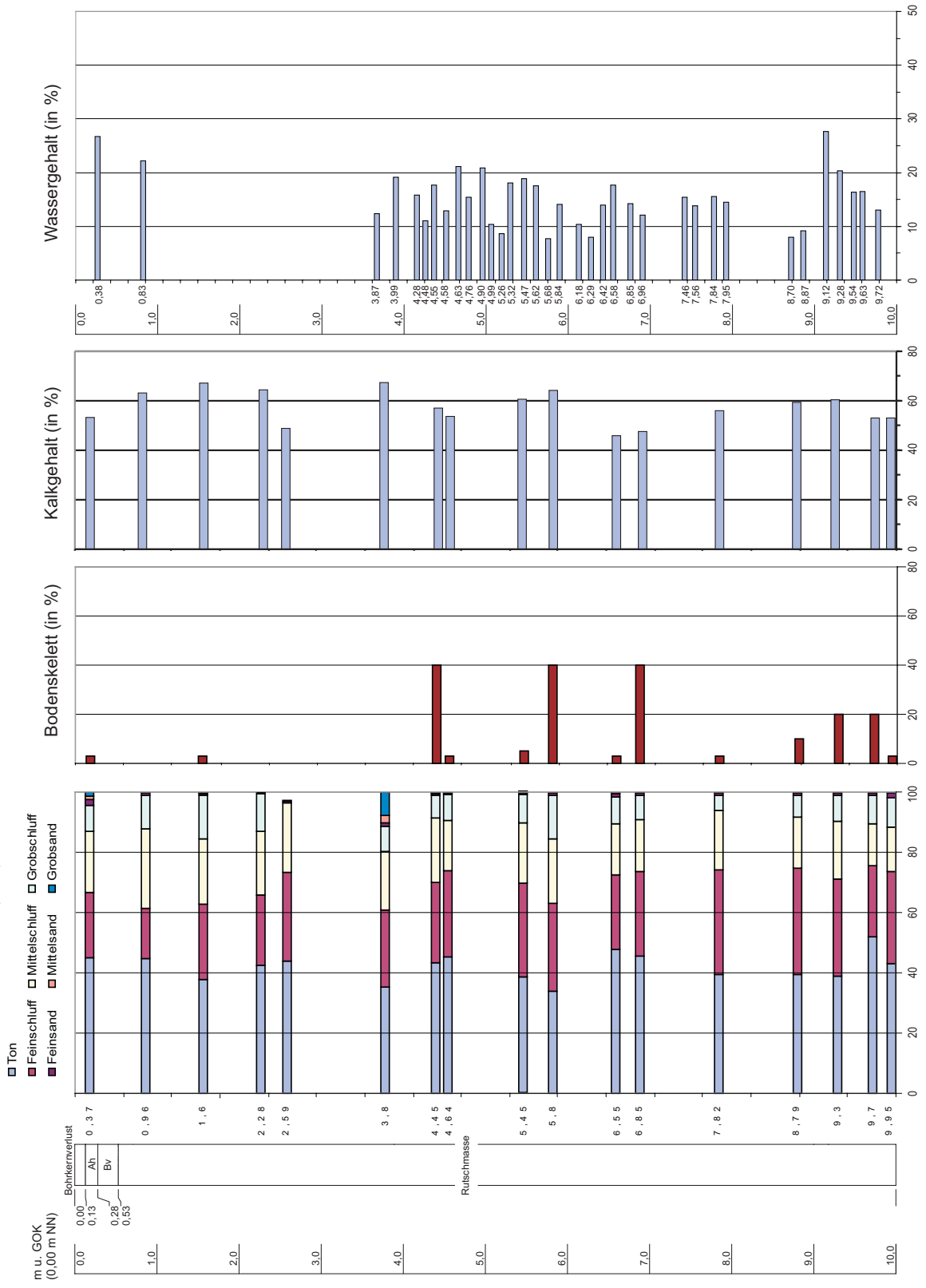


## Anhang 2: Inklinometerergebnisse des Untersuchungsgebiets Mössingen-Öschingen



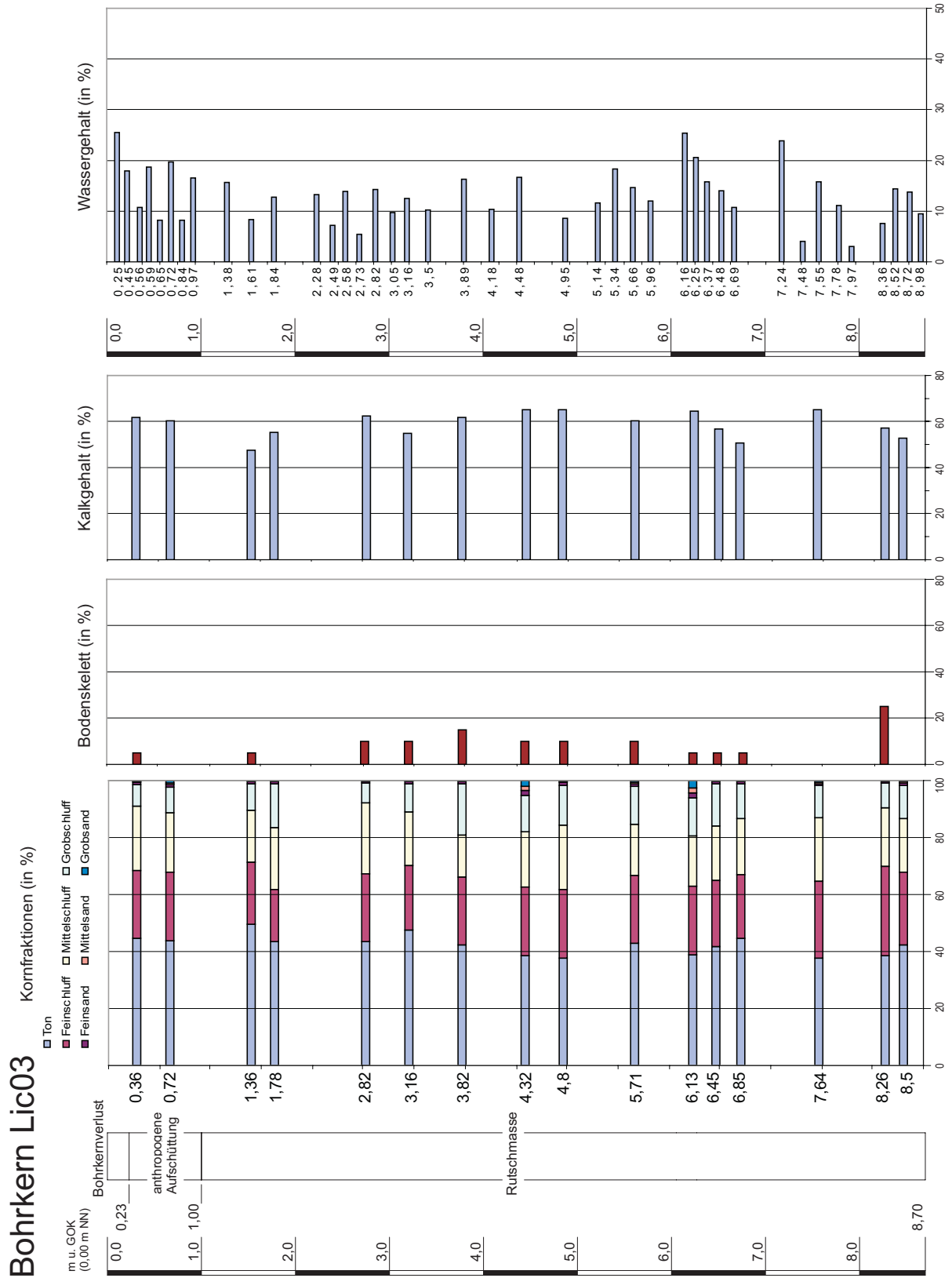
# Anhang 3: Bohrkerne des Untersuchungsgebiets Lichtenstein-Unterhausen

## Bohrkern Lic01 Kornfraktionen (in %)

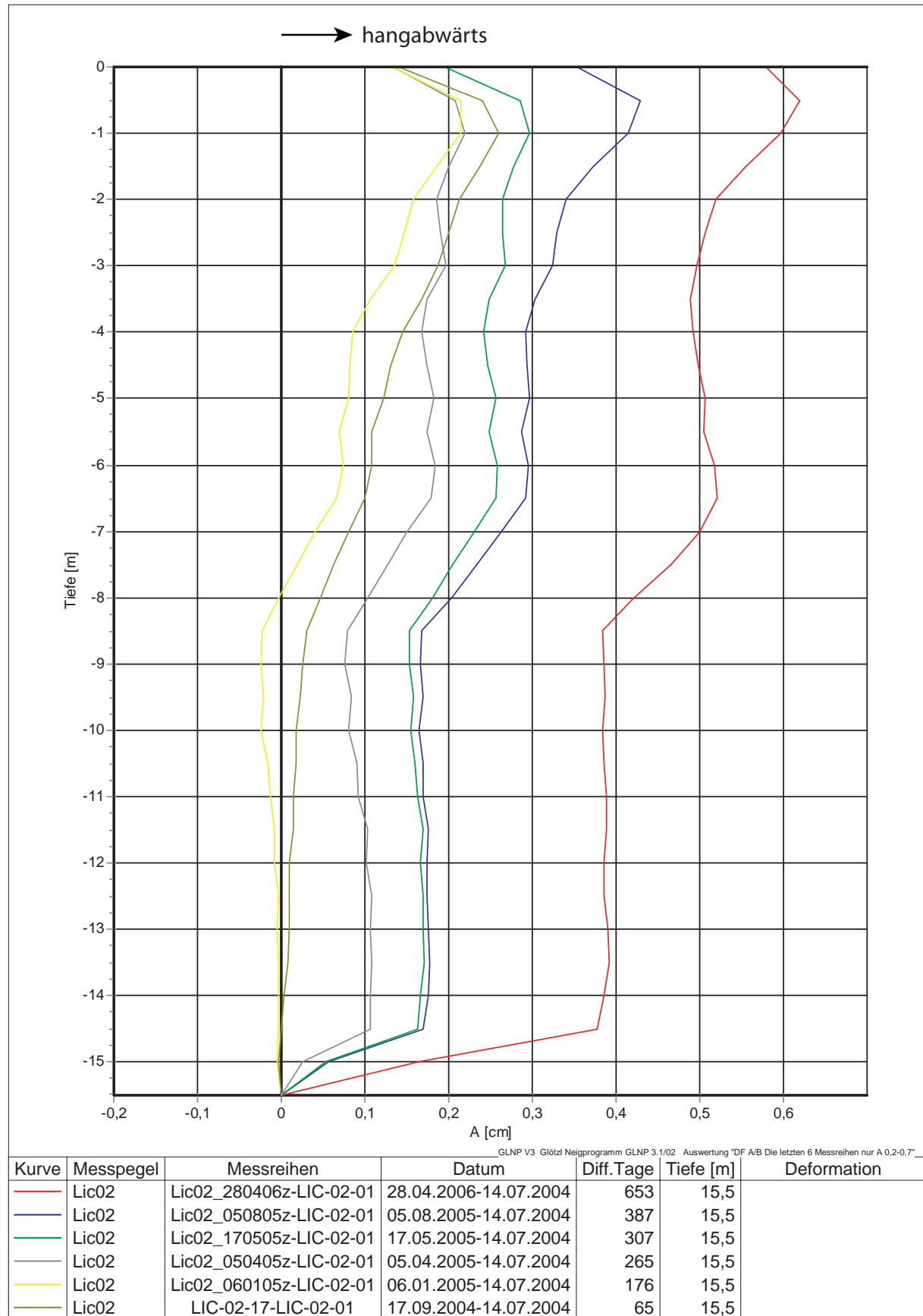




### Anhang 3: Bohrkerne des Untersuchungsgebiets Lichtenstein-Unterhausen



# Anhang 4: Inklinometerne des Untersuchungsgebiets Lichtenstein-Unterhausen



## **Inhaltsverzeichnis der CD-ROM**

(Die CD-ROM sowie ausgewählte Dateien sind auf Anfrage beim Autor unter [rainerbell@gmx.de](mailto:rainerbell@gmx.de) erhältlich!)

### **Karten**

Abb\_7\_1.pdf, Abb\_7\_3.pdf, Abb\_7\_4.pdf, Abb\_7\_5.pdf, Abb\_7\_6.pdf, Abb\_7\_7.pdf, Abb\_7\_8.pdf,  
Abb\_7\_21.pdf, Abb\_7\_22.pdf, Abb\_7\_23.pdf, Abb\_7\_24.pdf, Abb\_7\_25.pdf, Abb\_7\_26.pdf,  
Abb\_7\_27.pdf, Abb\_7\_28.pdf, Abb\_7\_38.pdf

Abb\_8\_1.pdf, Abb\_8\_2.pdf, Abb\_8\_3.pdf, Abb\_8\_4.pdf, Abb\_8\_5.pdf

### **Tabellen**

GM\_IR\_History.xls  
GM\_IR\_Perception.xls  
GM\_Kohn.xls  
GM\_Tübingen.xls

### **Interviews**

Inggeol\_01.doc  
Inggeol\_02.doc  
Inggeol\_03.doc  
Inggeol\_04.doc