"Entwicklung von computergestützten Hangstabilitätsmodellen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Region Rheinhessen"

Dissertation zur Erlangung des Grades "Doktor der Naturwissenschaften"

am Fachbereich Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz

> von Markus Becker geb. in Mainz

> > Mainz März 2005

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung computergestützter Methoden zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Region Rheinhessen zur Minimierung der Hangrutschungsgefährdung. Dazu wurde mit Hilfe zweier statistischer Verfahren (Diskriminanzanalyse, Logistische Regression) und einer Methode aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (Fuzzy Logik) versucht, die potentielle Gefährdung auch solcher Hänge zu klassifizieren, die bis heute noch nicht durch Massenbewegungen aufgefallen sind. Da ingenieurgeologische und geotechnische Hanguntersuchungen aus Zeit und Kostengründen im regionalen Maßstab nicht möglich sind, wurde auf punktuell vorhandene Datenbestände zu einzelnen Rutschungen (etwa 200 Stück) des Winters 1981/82, die in einer Rutschungsdatenbank zusammengefaßt sind, zurückgegriffen, wobei die daraus gewonnenen Erkenntnisse über Prozeßmechanismen und auslösende Faktoren genutzt und in das jeweilige Modell integriert wurden. Flächenhafte Daten (Lithologie, Hangneigung, Landnutzung, etc.), die für die Berechnung der Hangstabilität notwendig sind, wurden durch Fernerkundungsmethoden, dem Digitalisieren von Karten und der Auswertung von Digitalen Geländemodellen (Reliefanalyse) gewonnen.

Für eine weiterführende Untersuchung von einzelnen, als rutschgefährdet klassifizierten Bereichen der Gefahrenhinweiskarte, wurde am Beispiel eines Testgebietes, eine auf dem infinite-slope-stability Modell aufbauende Methode untersucht, die im Maßstabsbereich von Grundkarten (1:5000) auch geotechnische und hydrogeologische Parameter berücksichtigt und damit eine genauere, der jeweiligen klimatischen Situation angepaßte, Gefahrenabschätzung ermöglicht.

Abstract

The objective of this dissertation is to develop computer based methods to draw up a landslide hazard map for the region "Rheinhessen" in order to minimise the risk of landslides. Two statistical techniques (discriminant analysis, logistic regression) and a method within the frame of artificial intelligence (fuzzy logic) help to classify the potential risk of slopes which have not shown any mass movements until today. Since geotechnical examinations in a regional scale are not possible due to lack of time and financial reasons, the work refers to certain data of individual landslides (approximately 200 landslides) in the winter of 1981/82. The results are summarised in a landslide database. These results relating to mechanisms and causes of landslides are applied to and integrated into the various models.

Spatial data (lithology, slope, land use, etc.) necessary for the calculation of slope stability was drawn up with the help of remote sensing, digitalising of maps and analysing digital elevation models (DEM; relief analysis).

For a more accurate examination of individual hazardous areas in the hazard map, a method based on the infinite-slope-stability model and taking into consideration geotechnical and hydrological parametres was examined in a test area. This facilitated an exact risk assessment relating to the respective climatic situation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung, Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XV
1. Einleitung	1
1.1 Geographische Lage des Arbeitsgebietes	2
1.2 Geomorphologie	4
1.3 Gewässer	6
1.4 Geologie des Mainzer Beckens	6
1.5 Hydrogeologie	
1.6 Massenbewegungen in Rheinhessen	
2. Hang- und Böschungsverformungen	13
2.1. Rutschungen	
2.2. Merkmale einer Rutschung	15
2.3 Klassifikation von Rutschungen	20
2.3.1 Fallen	
2.3.2 Kippen	
2.3.3 Gleiten	23
2.3.4 Driften	
2.3.5 Fließen	
2.4 Altersstellung von Rutschungen	
2.5 Ursachen von Rutschungen	
2.5.1 Geologische Ursachen	
2.5.2 Morpholgische Ursachen	
2.5.3 Hydrogeologische Ursachen	
2.5.4 Klimatische Ursachen	
2.5.5 Biologische Ursachen	
2.5.6 Anthropogene Ursachen	
2.6 Sicherungs- und Sanierungsmöglichkeiten von Rutschungen	

3. Gefahren und Risiken durch Hang- und Böschungsbewegungen	
3.1 Einleitung	39
3.2 Schadensbilanz durch Rutschungen	39
3.3 Naturgefahr, Risiko, Gefahrenstelle	46
3.4 Gefahrenbeurteilung, Dispositionsmodelle, Prozeßmodelle	
3.5 Gefahrenkarten, Gefahrenhinweiskarten	
3.6 Gefahrenstufen-Diagramme	55
4. Digitale Geländemodelle	57
4.1 Definition	57
4. 2 Methoden zur Erfassung von Rohdaten	61
4.2.1 Photogrammetrie	61
4.2.2 Laserscanning	62
4.2.3 Radar-Interferometrie	64
4.2.4 Satellitengeodäsie	68
4.3 Interpolationsverfahren	70
4.3.1 Inverse distance weighted (IDW)	71
4.3.2 Triangulated irregular network (TIN)	72
4.3.3 Kriging	73
4.3.4 Spline	74
4.4 Auswahl des Interpolationsverfahrens	74
4.4.1 Interpolation digitalisierter Höhenlinien	75
4.4.2 Interpolation von annähernd gleichmäßig verteilten Vermessungsdaten	
4.4.3 Genauigkeit von Reliefparametern in Abhängigkeit der DGM-Auflösung	77
4.4.4 Ergebnis	79
5. Ermittlung modellrelevanter Parameter	80
5.1 Digitale Reliefanalyse	80
5.1.1 Reliefgeometrie	83
5.1.1.1 Hangneigung	84
5.1.1.2 Exposition	88
5.1.1.3 Wölbung	91
5.1.1.4 Divergenz/Konvergenz-Index	97

5.1.2 Relieftopologie	
5.1.2.1 Einzugsgebietsgrösse	
5.1.3 Sekundäre Reliefparameter	
5.1.3.1 Bodenfeuchte-Index (TWI)	
5.1.3.2 Faktoren zur Beschreibung der räumlichen Erosionsgefährdung	102
5.2 Landnutzung	
5.3 Geologie	111
5.4 Rutschungen	
6. Modelle zur Erstellung von Gefahrenkarten	118
6.1 Methoden	118
6.1.1 Qualitative Methoden	118
6.1.2 Quantitative Methoden	118
6.2 Statistische Methoden	120
6.2.1 Bivariate Statistik	121
6.2.1.1 Korrelationsanalyse	124
6.2.2 Multivariate Statistik	127
6.2.2.1 Hauptkomponentenanalyse	128
6.2.2.2 Diskriminanzanalyse	
6.2.2.3 Logistische Regression	137
6.3 Fuzzy Logik	141
6.3.1 Einleitung	141
6.3.2 Fuzzy Logik	142
6.3.2.1 Fuzzifizierung	144
6.3.2.2 Inferenz	145
6.3.2.3 Defuzzifizierung	147
6.3.3 Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit Hilfe von Fuzzy-Logik	149
6.3.4 Ergebnis	
6.4 Zusammenfassung	
7. Gefahren- und Risikoanalyse für Rheinhessen	
7.1 Einführung	157
7.2 Aufbau eines Informationssystem auf der Gefahrenhinweis-Ebene	158
7.3 Ausarbeitung einer Gefahrenhinweiskarte	159

7.4 Risikoanalyse	165
7.5 Ergebnis der Gefahren- und Risikoanalyse	
8. Testgebiet Wißberg	
8.1 Lage und Geographie des Wißbergs	173
8.2 Geologie des Wißbergs	
8.3 Hydrogeologie des Wißbergs	177
8.4 Rutschungen am Wißberg	
8.5 Luftbildanalyse	
8.6 Erstellung einer Bestandskarte für den Bereich Wißberg	
8.7 Infinite-Slope-Stability Modell	
8.8 Standsicherheitsbetrachtung nach BISHOP	198
9. Zusammenfassung	
10. Literaturverzeichnis	207
Anhang	

Abbildungsverzeichnis

1. Einleitung

Abb.1:	Übersicht über Rheinhessen und dessen Lage in Rheinland-Pfalz	3
Abb.2:	Die periglaziale Formenwelt des Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes	
	(BRÜNNING, 1977)	4
Abb.3:	Unterteilung des Rheinhessische Tafel- und Hügellandes in Kalkplateaus (grün) mit vorgelagerten Zeugenbergen (Wißberg, Petersberg, Bosenberg), Senken (blau), Talbereiche und das Rotliegend-Hügelland (nach LESER 1966; BRÜNNING, 1975)	5
Abb.4:	Geologische Übersicht von Rheinhessen	7
Abb.5:	Die Abfolge der tertiären Schichtglieder im Mainzer Becken (ROT- HAUSEN & SONNE, 1984)	8
Abb.6:	Stratigraphie des Rheingrabensystems mit Hessischer Senke, Mainzer Be- cken und Oberrheingraben (Ausschnitt aus der "Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002" der Deutschen Stratigraphischen Kommission)	9

2. Hang- und Böschungsverformungen

 Abb.8: Rutschung an der Autobahn A63 bei Göllheim gerissene Linie: Rutschungsausmaße; Foto: Geotechnik BFW GmbH a) Rutschungsfuß (blockiert Seitenstreifen der A63) b) Hauptabriß c) Hauptrutschkörper	13
 Abb.9: Blockbild einer Rutschung (Quelle: USGS) Abb.10: Profil und Aufsicht einer Rutschung, B=Breite; L=Länge; H=Höher M=Mächtigkeit (aus KLENGEL & PASEK, 1974) Abb.11: Rutschungsdimensionen (UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993) Abb.12: Merkmale einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der gepunktete Bereich bildet das Ausmaß des verlagerten Materials ab (nach UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory) 	14
 Abb.10: Profil und Aufsicht einer Rutschung, B=Breite; L=Länge; H=Höhe M=Mächtigkeit (aus KLENGEL & PASEK, 1974) Abb.11: Rutschungsdimensionen (UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993) Abb.12: Merkmale einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der gepunktete Bereich bildet das Ausmaß des verlagerten Materi- als ab (nach UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory 	15
 Abb.11: Rutschungsdimensionen (UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993) Abb.12: Merkmale einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der gepunktete Bereich bildet das Ausmaß des verlagerten Materi- als ab (nach UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory 	15
Abb.12: Merkmale einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der gepunktete Bereich bildet das Ausmaß des verlagerten Materi- als ab (nach UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory	16
1993)	18
Abb.13: Prinzipskizze einer Rutschung im Lockergesteinsbaugrund (KLENGEL & PASEK, 1974)	19

Abb.14:	Rutschungstypen: (KRAUTER, 1994)	20
Abb.15:	Felssturz bei Saarburg (Niederleuken). Bild: Geotechnik BFW GmbH	21
Abb.16:	1. Internrotation ; 2. Externrotation; 3. Knicken (KRAUTER, 1986)	22
Abb.17:	Hakenschlagen von (1) in Richtung der Böschung und (2) bergwärts einfallenden Schichten (KRAUTER, 1986)	22
Abb.18:	Ergebnisse der Bewegungsmessungen an einem Felsturm (aus PRINZ,1997).	23
Abb.19:	Grundtypen von kreisförmigen und abgeflachten Rotationsrutschungen (PRINZ, 1997)	24
Abb.20:	Schuttstromrutschung (a) und Schuttkegel (b), hervorgegangen aus einer Gleitung (ZARUBA & MENCL, 1969)	24
Abb.21:	Beispiel für Rotationsrutschungen (Quelle: USGS)	25
Abb.22:	Driften von (a) Sandsteinblöcken (Labiatus-Sandstein) auf Lohmgrund- Mergel (b) im Elbsandsteingebirge, c=liegende Sandsteine, d=plastifizierte Mergel (nach JOHNSEN, 1984; aus PRINZ, 1997)	25
Abb.23:	Driften und Blockkriechen im Elbsandsteingebirge; Labiatus-Sandstein auf Lohngrund-Mergel, Oberkreide (nach JOHNSEN, 1984; aus PRINZ, 1997)	26
Abb.24:	Fließen am Beispiel eines Schuttstroms	26
Abb.25:	Beispiel für Bodenkriechen und Hakenschlagen mit im Gelände erkennbaren Merkmalen (Quelle: USGS)	27
Abb.26:	 Aktiv, Erosion am Hangfuß verursacht das Kippen des Blockes. Blockiert, lokaler Bruch im Bereich der Krone. Reaktiviert, ein weiterer Block kippt und verformt das ältere, verlagerte Material 	
	5) Latent, auf dem gekippten Körper beginnen Bäume zu wachsen und die Verwitterung setzt randlich ein.	
	 6) Abgeschlossen, Flußablagerungen bedecken den Hangfuß und an den Steilrändern beginnen Bäume zu wachsen. 7) Stabilisiert eine Mauer stützt den Hangfuß 	
	8) Fossil , es hat sich ein gleichmäßiger Baumbestand gebildet	
	(UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993)	29
Abb.27:	Rutschungsanfälligkeit von Uferböschungen des Mittellandkanals in Ab- hängigkeit des Montmorillonitgehaltes der Unterkreidetone, bezogen auf die Tonfraktion (PRINZ, 1997)	31
Abb.28:	 Zusammenhang Niederschläge-Seespiegel-Rutschungen 1) Niederschlagsmengen in mm/Dekade 2) in mm/Jahr 3) Seespiegelschwankungen in m 4) Bewegungsgeschwindigkeit in cm/Tag 5) Gesamtbetrag der Beobachtungspunkte in cm im Vajont-Tal 	22
Abb 20.	(aus KNAUTER, 1774)	22
AUU.29	Lage del Orundwasserobernache (rKESS & SIEVEK, 1994)	22

Abb.30:	Rutschung im Spanisch Fork Canyon, Thistle, Utah, im April 1983. Die	
	Rutschung erfolgte nach dem Abschmelzen einer außerordentlich hohen	
	Schneedecke durch starke Regenfälle, wodurch die steilen Talwände instabil	
	wurden (Foto:R.L.Schuster USGS 1983)	34

3. Gefahren und Risiken durch Hang- und Böschungsbewegungen

Abb.33:	Wirtschaftliche Schäden durch Rutschungen (nach KRAUTER, 1994)	39
Abb.34:	 Durch Rutschungen verursachte Schäden an Straßen und Gebäuden in Rheinland-Pfalz. a) Zerstörter Wirtschaftsweg bei Horrweiler b) Stark beschädigte B38 bei Bad Bergzabern c) Stark beschädigtes Haus im Neubaugebiet Sulzbachtal 	40
Abb.35:	Zunahme der Rutschungen am Beispiel Rheinhessen (KRAUTER & MAT- THESIUS, 1994)	41
Abb.36:	Die Trendkurve dokumentiert die Zunahme der volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden durch Naturkatastrophen seit 1950 (Münchner Rück, 2004).	41
Abb.37:	Statistik der Naturkatastrophen 2003. Die obere Grafik zeigt die Anzahl der Schadensereignisse und Todesopfer, die untere Grafik die volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden	42
Abb.38:	Temperaturentwicklung: Die obere Grafik zeigt den Verlauf der Temperatur während der letzten 1000 Jahre, die untere Grafik zeigt die potentielle Tem- peraturentwicklung bis ins Jahr 2100 (BUWAL, 2002; Quelle: IPCC)	43
Abb.39:	Phasen verschiedener Standsicherheit (η) von Hängen mit Trend zur gene- rellen Standsicherheitsverringerung (aus KRAUTER, 1994; nach THERZA- GI, 1950)	44
Abb.40:	Todesopfer und Schäden verursacht durch Rutschungen in Japan. Auffällig ist der erheb-liche Rückgang der Verluste seit Einführung des nationalen Erdrutsch-Überwachungsprogrammes im Jahre 1958 (PRESS & SIEVER, 1994)	44
Abb.41:	Bevölkerungswachstum und Gefahrenzunahme für Siedlungen in Hang- lagen durch Rutschungen in Ländern der Dritten Welt (KRAUTER, 1994)	45
Abb.42:	Beziehung und logische Abfolge der Gefahren- und Risikoanalyse (nach PETAK & ATKISSON, 1982; aus DIKAU, 1992)	47
Abb.43:	Sicherheitsfragen zur Risikoanalyse (DIKAU, 1992)	49

Abb.44:	Flußdiagramm eines räumlichen Wahrscheinlichkeitsmodells zur Ermittlung von Naturgefahren (DIKAU, 1993)	50
Abb.45:	Beziehung zwischen Hangrutschungsforschung, Gefahrenkarten und Gefahrenkarten (DIKAU, 1993)	52
Abb.46:	Notwendige fachliche Tiefe der Gefahrenbeurteilung in Abhängigkeit von der Planungs- und Untersuchungsebene (KIENHOLZ, 1992)	53
Abb.47:	Intensitäts-Wahrscheinlichkeitsdiagramme (BUWAL, 1997)	56

4. Digitale Geländemodelle

Abb.48:	DHM mit der Oberflächer der Bebauung und Vegetation (Laserscanning-	
	Daten)	57
Abb.49:	Fotorealistische 3-dmensionale Ansicht eines DGM	58
Abb.50:	Höhenstufen von Rheinhessen (geschummert)	60
Abb.51:	Airborne Laserscanning	62
Abb.52:	Schematische Darstellung von first-pulse und last-pulse	62
Abb.53:	Terrestrisches Laserscanning am Beispiel einer Rutschung bei Schwaz in Ti- rol (www.riegl.co.at)	63
Abb.54:	Prinzip der Radarinterferometrie	64
Abb.55:	Bewegungen innerhalb einer Rutschung. Die farbigen Felder geben die Bewegungen in mm/Jahr an (ERS-SAR Bildpaar, Zeitspanne von 420 Tagen, http://dude.uibk.ac.at/MUSCL/appldemo/alpinevalleys/index.html)	65
Abb.56:	Bewegungen innerhalb einer Rutschung. Die farbigen Felder geben die Bewegungen in mm/Jahr an (http://dude.uibk.ac.at/MUSCL/appldemo/alpine-valleys/index.html)	65
Abb.57:	Prinzip der Erstellung eines DGM aus Radarbildern	67
Abb.58:	Positionsberechnung per GPS. Die eigene Position (E) ergibt sich durch den Schnittpunkt der Kugeln, deren Radius die Entfernung zu den Satelliten (S) ist. Es ergeben sich dadurch zwei mögliche Punkte von denen einer ausge- schlossen werden kann, da er nicht auf der Erdoberfläche liegt	68
Abb.59:	Übersicht der SAPOS-Stationen in Rheinland-Pfalz	69
Abb.60:	Triangular Irregular Network in perspektivischer Ansicht und in der Drauf- sicht	70
Abb.61:	Gleichmäßiges Gitter in perspektivischer Ansicht und in der Draufsicht	71
Abb.62:	Abweichungen der einzelnen Interpolationsverfahren	76
Abb.63:	Abweichungen der einzelnen Interpolationsverfahren	77

5. Ermittlung modellrelevanter Parameter

Abb.64:	3x3 Matrix mit der zentralen Rasterzelle Z_5 und der Rasterweite λ	82
Abb.65:	Ausschnitt aus der Hangneigungskarte von Rheinhessen	84
Abb.66:	Grenzgleichgewicht eines einzelnen Blocks	85
Abb.67:	Hangneigungsverteilung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete	86
Abb.68:	Verteilung der Hangexpositionen innerhalb der Rutschgebiete als Rich- tungsrose	89
Abb.69:	Ausschnitt aus der Expositionskarte von Rheinhessen	89
Abb.70:	Häufigkeitsverteilung der Hangexpositionen im DGM und innerhalb der durch Rutschungen betroffenen Flächen	90
Abb.71:	(a) vertikale Wölbungsradien, (b) horizontale Wölbungsradien KLEE- FISCH&KÖTHE 1993)	92
Abb.72:	Vertikalwölbung verschiedener Hangbereiche am Beispiel Wißberg (Rheinhessen)	92
Abb.73:	Ausschnitt aus der Karte der Vertikalwölbungen von Rheinhessen	93
Abb.74:	Häufigkeitsverteilung der Vertikalwölbung	94
Abb.75:	Ausschnitt aus der Karte der Horizontalwölbung	95
Abb.76:	Häufigkeitsverteilung der Horizontalwölbung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete	96
Abb.77:	Ausschnitt aus der Karte des Konvergenzindexes nach KÖTHE & LEHMEIER (1993)	97
Abb.78:	Einzugsgebietsgröße für jede Rasterzelle in Anzahl der Rasterzellen	100
Abb.79:	Topographischer Bodenfeuchte-Index	103
Abb.80:	Karte mit der Darstellung des LS-Faktors	105
Abb.81:	Häufigkeitsverteilung des LS-Faktors im DGM und innerhalb der Rutschflä- chen	106
Abb.82:	Kartenausschnitt des Stream-Power-Index	106
Abb.83:	Häufigkeitsverteilung der Landnutzungsklassen	107
Abb.84:	Besiedlungsdichte der Verbandsgemeinden und Kreisfreien Städte	109
Abb.85:	Verteilung der Landnutzungsklassen auf die Hangneigungsklassen	110
Abb.86:	Häufigkeitsverteilung der geologischen Schichten von Rheinhessen in- nerhalb der Rutschgebiete	111
Abb.87:	Häufigkeitsverteilung der geologischen Schichten im DGM	112
Abb.88:	Verteilung der max.Gleitflächentiefe und der Rutschungstiefe	115
Abb.89:	D/L- und L/W-Verhältnis der aufgenommenen Rutschungen	115
Abb.90:	Längen-/Breitenverhältnis von 156 ausgewählten Rutschungen in Rhein- hessen. Jeder Punkt stellt eine Rutschung mit zugehöriger Länge und Breite	
	da	116

Abb.91:	Die Grafik zeigt die berechnete relative Rutschungsdichte für den Bereich	
	Rheinhessen	117

6. Modelle zur Erstellung von Gefahrenkarten

Abb.92:	Methoden zur Erstellung von Gefahrenkarten (ALEOTTI & CHOWDHU- RY, 1999)	119
Abb.93:	Kontigenztafel (Quelle BAHRENBERG et al. 1990)	125
Abb.94:	Durch Diskriminanzfunktion 1 erstellte Gefahrenhinweiskarte mit 4 Gefähr- dungsstufen	136
Abb.95:	Mit Hilfe der logistischen Regression 2 erstellte Gefahrenhinweiskarte	140
Abb.96:	"Scharfe" Darstellung der Temperaturbereiche	144
Abb.97:	"Unscharfer" Temperaturbereich mit mehreren Zugehörigkeiten	145
Abb.98:	Zugehörigkeitsfunktionen	145
Abb.99:	Fuzzy-Set mit linguistischen Termen und Zugehörigkeitsfunktionen	146
Abb.100:	Mögliche Eingangsvariablen eines "Bremskraftreglers. oben: Geschwindigkeit des Fahrzeugs unten: Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	146
Abb.101:	Regelbasis eines Bremskraftreglers	147
Abb.102:	Logische Verknüpfung linguistischer Werte. a) UND-Verknüpfung entspricht Minimum der Zugehörigkeitsgrade der Eingangsgrößen. b) ODER-Verknüpfung entspricht Maximum der Zugehörigkeitsgrader der Eingangsgrößen.	147
Abb.103:	Prinzip der Ermittlung des "scharfen" Ausgangswertes durch die Center-of- Area-Methode (nach REIF, 2000)	148
Abb.104:	Interaktiver Debug-Modus der Software fuzzyTech 5.5. Die Ergebnisse der einstellbaren Eingangsvariablen (unten) lassen sich im Graphen der Gefähr- dung (Ausgangsvariable) direkt überprüfen	149
Abb.105:	Terme und Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsvariablen	150
Abb.106:	Darstellung des entwickelten Fuzzy-Systems zur Erstellung einer Gefahren- hinweiskarte mit 6 Eingangsvariablen	151
Abb.107:	Regelbasis des Fuzzy-Systems bei Berücksichtigung von nur drei Eingangs- variablen	152
Abb.108:	Darstellung des entwickelten Fuzzy-Systems zur Erstellung einer Gefahren- hinweiskarte mit 3 Eingangsvariablen	152
Abb.109:	Kreuztabelle der klassifizierten Rasterzellen	155
Abb.110:	Anteil der richtig klassifizierten Flächen an der im Modell berück-sichtigten Gesamtfläche (Diskriminanzanalyse/log. Regression)	155
Abb.111:	Kreuztabelle der klassifizierten Rasterzellen	156

7. Gefahren- und Risikoanalyse für Rheinhessen

Abb.112:	Ausschnitt aus dem Hauptdatenblatt der Rutschungsdatenbank von Rheinhessen.	158
Abb.113:	Verschiedene in ein GIS integrierte Datenebenen (Layer), die teilweise ein-	
	geschaltet sind (Gefahrenhinweissystem Rheinhessen)	159
Abb.114:	Ausschnitt aus der Gefahrenkarte für Rheinhessen	164
Abb.115:	Für die Berechnung des Schadensausmaßes verwendete Layer	165
Abb.116:	Streckenbelastungen im Schienenverkehr (LSV, 2003)	166
Abb.117:	Berechnung der Risikokarte durch Fuzzy Logik mit zwei Eingangsvariablen.	167
Abb.118:	Fuzzy Logik-Systemstruktur zur Ermittlung des Risikos	168
Abb.119:	Regelbasis des Fuzzy Logik-Systems zur Ermittlung des Risikos	168
Abb.120:	Karte mit dem berechneten Risiko für Rheinhessen	169

8. Testgebiet Wißberg

Lage des Wißbergs in Rheinhessen (Satellitenbild)	174
Höhenmodell des Wißbergs.	
oberes Bild: Reliefbild	
unteres Bild: Reliefbild mit überlagerten Luftbildern	175
Stratigraphie des Wißbergs	176
Obere-Cerithienschichten am Top des Wißbergs	176
Geologische Karte des Wißbergs	177
Skizze des Quellhorizontbereiches am Wißberg (WELLING, 1984)	178
Defekter, bzw. zerstörter Entwässerungsgraben	178
Zugewachsener und zugechlämmter Entwässerungsgraben	178
Abb.129: Defektes Dränagerohr am Südhang des Wißbergs.	179
Die blauen Flächen kennzeichnen die am Wißberg aufgenommenen Rut- schungen	180
Rosendarstellung der aus den Luftbildern digitalisierten Linearen	181
Linearkarte des Wißbergs	182
Ausschnitt aus der Bestandskarte des Wißbergs	183
Grenzgleichgewicht auf einer ebenen Fläche	184
a) graphische Darstellung des Mohr'schen Bruchkriteriums mit stabilem und instabilem Bereich, sowie der Mohr'schen Kreise	
 b) die Mohr'sche Umhüllende nimmt bei hohem oder niedrigem Umlage- rungsdruck die Form einer gekrümmten Parabel an; (EISBACHER 1991) 	186
	 Lage des Wißbergs in Rheinhessen (Satellitenbild)

Abb.136:	Kräftedreieck der Schwerkraft	187
Abb.137:	Ergebnis der Standsicherheitsberechnung	191
Abb.138:	 Abb.138: Sicherheitsbeiwert F unter verschiedenen Bedingungen. a) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 17° b) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 12° c) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 7° d) Versickerungsrate 1 mm/Monat, Reibungswinkel 7° e) Versickerungsrate 10 mm/Monat, Reibungswinkel 7° 	192
Abb.139:	Berechnete Porenwassergeschwindigkeit v	194
Abb.140:	 Zeit-Einzugsgebietskonzept: a) Die horizontalen Linien repräsentieren Isolinien der Zeit die für den Abfluß erforderlich ist um die Barriere zu erreichen. Wenn die Abflußzeit t_s entspricht, ist der Gleichgewichtszustand zwischen Zu- und Abflußerreicht. b) Zeit-Einzugsgebiets Kurve: Das Einzugsgebiet steigt solange an bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist (BARLING et al., 1994) 	195
Abb.141:	Größenänderung des Einzugsgebietes mit zunehmenden Niederschlagstagen. Linkes Bild: nach 15 Tagen Rechtes Bild: nach 30 Tagen	195
Abb.142:	Berechnete Versickerungsrate R für jede Rasterzelle, die notwendig ist um Sättigung zu erreichen (die hellen Flächen kennzeichnen die digitalisierten Rutschungen)	196
Abb.143:	Berechnete Versickerungsrate R für jede Rasterzelle, die notwendig ist um einen Sichersbeiwert von 1 zu erreichen (die hellen Flächen kennzeichnen die digitalisierten Rutschungen).	197
Abb.144:	Schema für die Ermittlung der Standsicherheit nach dem Gleitkreisverfahren (Lamellenverfahren)	200
Abb.145:	Profil für die Standsicherheitsberechnung mit den aufgenommenen RKS und DPH (rote Punkte). Blickrichtung nach Norden	201
Abb.146:	Für die Standsicherheitsberechnung benutztes Profil des Südhangs	202
Abb.147:	Nach JANBU ermittelte Standsicherheitsbeiwerte für verschiedene Rei- bungswinkel und Kohäsionen.	202

9. Zusammenfassung

Tabellenverzeichnis

1. Einleitung

2. Hang- und Böschungsverformungen

Tab.1:	Beispiele für episodisch wirkende bewegungsauslösende Faktoren (aus KRAUTER, 1995, nach REUTER/KLENGEL/PASEK, 1980)
Tab.2:	Beispiele für permanent wirkende, bewegungsfördernde Faktoren (aus KRAUTER, 1995)
Tab.3:	Anthropogene Ursachenfaktoren für die Gefährdung von Siedlungen durch Rutschungen (Quelle: Dixit 1990; aus KRAUTER, 1994)
Tab.4:	Auflistung von Rutschungsursachen (nach HUTCHINSON, 1992; KRAU- TER, 1990; POPESCU, 1994)
Tab.5:	Einteilung der Rutschungen nach geotechnischen Gesichtspunkten (aus KRAUTER, 1986)

3. Gefahren und Risiken durch Hang- und Böschungsbewegungen

4. Digitale Geländemodelle

Tab.6:	Sensorplattformen (CEAS Workshop on International Cooperation in Space,		
	Frascati, Italy, May 1996)	. 66	
Tab.7:	Abweichungen der verschiedenen Interpolationsverfahren in Meter	76	
Tab.8:	Abweichungen der verschiedenen Interpolationsverfahren in Meter	78	
Tab.9:	Auswirkung der Rasterweite auf die Hangneigung	78	
Tab.10:	Auswirkung der Rasterweite auf die Exposition	79	

5. Ermittlung modellrelevanter Parameter

Tab.11:	Primäre Reliefparameter (nach Speight 1974)	83
Tab.12:	Klassengrenzen der Hangneigung	87
Tab.13:	Verteilung der Neigungsklassen im DGM und innerhalb der Rutschgebiete	88
Tab.14:	Verteilung der Hangexpositionen im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.	91
Tab.15:	Häufigkeitsverteilung der Vertikalwölbung im DGM und innerhalb der	
	Rutschgebiete	95

Tab.16:	Häufigkeitsverteilung der Horizontalwölbung im DGM und innerhalb der	
	Rutschgebiete	96
Tab.17:	Klassifizierung des LS-Faktors	104
Tab.18:	Häufigkeitsverteilung des LS-Faktors im DGM und innerhalb der Rutsch- flächen	105
Tab.19:	Häufigkeitsverteilung der Landnutzung im DGM und innerhalb der Rutsch- flächen	108
Tab.20:	Klasseneinteilung der geologischen Einheiten	112
Tab.21:	Merkmale von flach- und tiefgründigen Rutschungen	114

6. Modelle zur Erstellung von Gefahrenkarten

Tab.22:	Durch Percentile ermittelte Klassengrenzen				
Tab.23:	Dichteverteilung der Rutschungen innerhalb der Parameterklassen 1				
Tab.24:	Verteilung der Gebietsdichte innerhalb der Parameterklassen	123			
Tab.25:	Verteilung der Failure Rate innerhalb der Parameterklassen	124			
Tab.26:	Zusammenhang der Reliefparameter mit dem Faktor Rutschungen	126			
Tab.27:	Zusammenfassung des KMO und des Bartlett-Tests	129			
Tab.28:	Erklärte Gesamtvarianz der Hauptkomponentenanalyse	130			
Tab.29:	Rotierte Komponentenmatrix (vier extrahierte Komponenten)	130			
Tab.30:	Anti-Image Matrix der Hauptkomponentenanalyse	131			
Tab.31:	Zusammenfassung des KMO und des Bartlett-Tests	131			
Tab.32:	Erklärte Gesamtvarianz der Hauptkomponentenanalyse	131			
Tab.33:	Rotierte Komponentenmatrix (drei extrahierte Komponenten)	132			
Tab.34:	Eigenwerte (oben) und Wilks-Lambda (unten) der Funktion 1	133			
Tab.35:	Eigenwerte (oben) und Wilks-Lambda (unten) der Funktion 2	134			
Tab.36:	Koeffizienten der Diskriminanzfunktion 1	135			
Tab.37:	Koeffizienten der Diskriminanzfunktion 2	135			
Tab.38:	Modellzusammenfassung der a) Regression 1 b) Regression 2	138			
Tab.39:	Regressionskoeffizienten der a) Regression 1 b) Regression 2	138			
Tab.40:	Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Ge- fährdungsstufen bei 6 Eingangsvariablen	153			
Tab.41:	Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Ge- fährdungsstufen bei 3 Eingangsvariablen	153			
Tab.42:	Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Ge- fährdungsstufen bei logistischer Regression und Diskriminanzanalyse	154			

7. Gefahren- und Risikoanalyse für Rheinhessen

Tab.43:	Ermitteltes Schadensmaß	167
Tab.44:	Flächenanteil der Gefährdungsklassen am untersuchten Gesamtgebiet	170
Tab.45:	Relativer Flächenanteil der Gefahrenklassen an den Hangneigungsklassen	170
Tab.46:	Failure Rates der Gefahrenklassen in Bezug zu den Hangneigungsklassen	171
Tab.47:	Verteilung der Gefährdungsklassen innerhalb bebauter Flächen	171
Tab.48:	Verteilung der Gefährdung innerhalb der Landnutzungstypen	172
Tab.49:	Verteilung der Risikoklassen im a) Gesamtgebiet und b) innerhalb der be- bauten Fläche	172

8. Testgebiet Wißberg

Tab.50:	Kontigenztabelle der	in die Berechnung	g einfließenden	Schichten	191
1 40.00.	itomigenziacene ae	in all Dereennang			1 / 1

9. Zusammenfassung

1. Einleitung

Die Anzahl der Rutschungen, sowie die volkswirtschaftlichen Kosten die durch Rutschungen entstehen, haben in den letzten Jahren weltweit dramatisch zugenommen. Inzwischen werden Massenbewegungen aufgrund des Ausmaßes ihrer Schäden (Verluste von Menschenleben und Sachwerten) gleich hinter denen von Erdbeben und Überflutungen aufgeführt. In einigen Ländern übertreffen die durch Massenbewegungen entstandenen Verluste sogar die Gesamtsumme aller, durch andere Naturkatastrophen entstandenen Schäden (KRAUTER, 1994). Eine Ausnahme bildet die Flutkatastrophe in Asien 2004. Auch in Zukunft werden die Verluste an Menschenleben und materiellen Werten weiter steigen, da Bautätigkeiten immer mehr rutschungsgefährdete Geländebereiche erfassen. Die Notwendigkeit dieser Entwicklung ergibt sich aus dem ständigen Wachstum der Bevölkerung und aus der Unkenntnis oder dem "nicht wissen wollen" von Gefahren und den damit verbundenen Kosten für Sicherungsmaßnahmen zum Schutz von Bevölkerung und Sachwerten. Auch in Rheinhessen führt die zunehmende Bevölkerungsdichte immer mehr zu einer Bebauung der Hanglagen, so daß sich eine steigende Gefährdung von Siedlungen und Verkehrswegen durch reaktivierte oder neue Rutschungen ergibt. Nach Schätzungen von KAUTER & STEINGÖTTER (1980, 1983) sind etwa 8% von Rheinhessen rutschgefährdet, was einer Fläche von ca. 8.000 ha entspricht. Potentiell rutschanfällige Hanglagen sind zu erfassen und als solche in Karten auszuweisen, um zur Vermeidung von Schadensfällen rechtzeitig Schutzmaßnahmen durchzuführen, bzw. stabilitätsmindernde Eingriffe durch Bautätigkeiten einzuschränken. Da ingenieurgeologische Untersuchungen im Hinblick auf Hanginstabilitäten aufgrund des Zeitaufwandes und der damit verbundenen hohen Kosten nur für kleine Hangabschnitte geeignet sind, sollte im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren gefunden werden, womit anhand vergleichender Methoden die potentielle Rutschungsgefährdung von Hängen im regionalen Maßstab abgeschätzt werden kann. Als am besten geeignete Methode erwies sich die Berechnung der Hangdisposition mit Hilfe der Fuzzy-Logik auf Basis eines Geoinformationssystems, da sie zum einen mit den vorhandenen Daten gute Ergebnisse liefert und sich zum anderen durch weitere Sammlung von Daten und Erfahrungen in Bezug auf die auslösenden Faktoren, sowie die Bewegungsabläufe des Rutschungsprozesses, auch in Zukunft immer wieder verfeinern und verbessern läßt. Das Ergebnis ist die, auf einem Geoinformationssystem aufbauende, Gefahrenhinweiskarte für Rheinhessen, die von Behörden, Ingenieurbüros und Planern als Entscheidungshilfe für Raumnutzungspläne und bei der Ausführung von Bauprojekten herangezogen werden kann.

1.1 Geographische Lage des Arbeitsgebietes

Rheinhessen, auch als rheinhessisches Tafel- und Hügelland bezeichnet, liegt im nördlichen Knie des Oberrheins, das durch die Städte Bingen, Mainz und Worms begrenzt wird (Abb.1). Das durch sanfte Hügel und weite Plateaus gekennzeichnete Land ist in drei Richtungen von waldreichen Mittelgebirgen umgeben. Nördlich des Rheins schließt sich der Taunus an, dessen Ränder durch den Rheingau gebildet werden. Im Nordwesten folgt der Hunsrück und im Südwesten das Saar-Nahe Bergland mit dem von weitem sichtbaren Donnersberg. Nach Süden wird das rheinhessische Tafel- und Hügelland von der Haardt begrenzt. Nach Osten schließt sich an Rheinhessen die Oberrheinische Tiefebene an, deren östliche Grenze durch den Odenwald gebildet wird.

Insgesamt umfaßt Rheinhessen ein Gebiet von ca. 1400 km², wovon etwa 1300 km² im Hinblick auf Hanginstabilitäten untersucht wurden.

Politisch gehört Rheinhessen zum Regierungsbezirk Rheinhessen-Pfalz im Bundesland Rheinland-Pfalz. Geologisch ist Rheinhessen Teil des linksrheinischen Mainzer Beckens.

Eine erste Besiedlung Rheinhessens erfolgte in der Steinzeit, danach wurde es kontinuierlich durch keltische, römische und fränkische Siedlungseinflüsse geprägt. Die dadurch entstandene hohe Besiedlungsdichte, sowie die acker- und weinbauliche Nutzung ließen die heutige Kulturlandschaft entstehen. Im heutigen Rheinhessen, das eine Einwohnerzahl von ca. 638.000 Einwohnern hat, sind etwa 14% der Fläche durch Stadt- oder Ortsbebauung belegt, mit steigender Tendenz für die Zukunft. Das Rheinhessische Tafel- und Hügelland ist auch heute noch eine offene und intensiv agrarisch genutzte Kulturlandschaft, in der eine industrielle Erschließung nur in den Randgebieten, innerhalb der größeren Städte Mainz und Worms, stattgefunden hat. Durch ihre fruchtbaren Böden ist die rheinhessische Landschaft ein ausgesprochen landwirtschaftlich geprägtes Gebiet, in welchem der Ackerbau, hauptsächlich der Anbau von Weizen und Zuckerrüben auf den weiten Plateauebenen, mit über 40% Anteil an der Gesamtfläche, den größten Teil ausmacht. Zusätzlich ist der Anbau von Wein, der von den Römern in Rheinhessen eingeführt wurde und meist an den Hängen der Plateauränder angebaut wird, zu einer wichtigen Einnahmequelle geworden. Durch das milde Klima, die kalkreichen Böden und die Hänge der Plateauränder bietet es eine hervorragende Ausgangslage für den Weinanbau und ist heute nicht umsonst das größte Weinanbaugebiet Deutschlands. Weitere Sonderkulturen mit wirtschaftlicher Bedeutung sind nur im nördlichen Rheinhessen, im Bereich der Rheinebene zwischen Mainz und Ingelheim mit Obst-, Gemüseund Spargelanbau vorhanden. Größere zusammenhängende Waldflächen finden sich nur im



Abb.1: Übersicht über Rheinhessen und dessen Lage in Rheinland-Pfalz.

Bereich von Mainz (Gonsenheimer Wald und Ober-Olmer Wald) und im südwestlichen Rheinhessen, wobei der vorhandene Wald mit einem Flächenanteil von ca. 4% relativ unbedeutend ist.

Von nur noch geringer wirtschaftlicher Bedeutung sind die in Rheinhessen abgebauten Bodenschätze, wie Kalksteine zur Zementherstellung oder vereinzelt vorhandene Sand-, Kies- und Tongruben.

Wichtige Gewässer sind neben dem Rhein noch die Nahe im Westen, sowie die Selz, der Appel- und der Wiesbach. Größere stehende Gewässer sind im relativ trockenen Rheinhessen nicht vorhanden.

1.2 Geomorphologie

Die geomorphologische Prägung des Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes ist eng verbunden mit dem Riftsystem des Oberrheingrabens. Durch die Reaktivierung alter Störungszonen und die seit dem Ende des Tertiärs beginnenden tektonischen Hebungsbewegungen, die zu einer Hebung des Mainzer Beckens führten, setzte eine Abtragung des Gebietes ein, die eine reliefarme Einebnungsfläche entstehen ließ, auf der sich die nur schwach geneigten Täler von Ur-Rhein, Ur-Nahe, Ur-Selz und Ur-Main entwickeln konnten (BRÜNNING, 1977). Durch die Hebung des Plateaus und der damit verbundenen Erosion entstanden die Reliefunterschiede, die teilweise bis zu 200 m betragen. Am Ende des Pliozäns konnte sich die Selz nach Durchschneidung des Kalktertiärs tief in die Schichttafel einschneiden, wodurch es zur Teilung in West- und Ostrheinhessisches Plateau kam, die heute noch, nur durch das Selztal getrennt, deutlich zu erkennen sind (Abb.3).

Das heutige Relief kann als ein mehrphasiges Kaltzeitrelief bezeichnet werden (BRÜNNING, 1977), das während des Pleistozäns durch den Wechsel von Warm- und Kaltzeiten entstanden ist (BRÜNNING, 1975; Abb.2). Überbleibsel der eiszeitlichen Zerstörung der Kalkplateaus



Abb.2: Die periglaziale Formenwelt des Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes (BRÜNNING, 1977).

sind die Zeugenberge in Rheinhessen, wie der Wißberg bei Gau Bickelheim, der Petersberg bei Gau-Odernheim und der Bosenberg bei Pfaffen-Schwabenheim (Abb.3). Da der Wißberg noch eine Verbindung zum Westrheinhessischen Plateau besitzt, ist er eigentlich als Auslieger zu bezeichnen. Die Zeugenberge entstehen durch Hinterschneidung von Kalkvorsprüngen entlang der Plateaus, die sich durch erosive Prozesse bilden und die, wie auch die damit verbundenen sichelförmigen Einbuchtungen, an den Plateaurändern deutlich zu erkennen sind. Häufig beobachten kann man in Rheinhessen auch Kryoturbationserscheinungen die teilweise bis in eine Tiefe von 5 m reichen und auf die starke eiszeitliche Prägung des Gebietes schließen lassen. An Hängen mit einer Hangneigung größer 2° konnte durch Frost-Auftauvorgänge des Permafrostbodens Bodenfließen (Kongelifluktion) auftreten (Abb.2). Anzeichen für Permafrostböden sind auch die in Rheinhessen häufig beobachteten Eiskeile (Abb.2).

Die weitverbreiteten Lößdecken bilden ebenfalls einen wichtigen morphologischen Faktor, der die Landschaft Rheinhessens prägt, da er die Steilheit der Hänge ausgleicht (ROT-



Abb.3: Unterteilung des Rheinhessische Tafel- und Hügellandes in Kalkplateaus (grün) mit vorgelagerten Zeugenbergen (Wiβberg, Petersberg, Bosenberg), Senken (blau), Talbereiche und das Rotliegend-Hügelland (nach LESER 1966; BRÜNNING 1975)

HAUSEN & SONNE, 1984). Dadurch und durch die wenig widerstandfähigen oligozänen Tonmergel und Feinsande, entstanden die weichen Landschaftsformen mit dem typischen Profil der flachen Unter- und Mittelhänge und der durch die harten miozänen Kalksteine gebildeten Steilstufe im Bereich der Oberhänge. Die oft anzutreffende unruhige Oberflächengestaltung der Unter- und Mittelhänge ist darüber hinaus auf die zahlreichen Rutschungen zurückzuführen.

1.3 Gewässer

Gewässer haben in Rheinhessen aufgrund geringer Niederschläge und ungünstiger lithologischer Verhältnisse nur eine geringe Bedeutung, mit Ausnahme des Rheins und seinem in dieser Region größtem Nebenfluß, der Nahe, die die Landschaft prägen. Auffällig an den im Rheinhessischen Tafel- und Hügelland vorhandenen Flüßchen (Selz, Wiesbach, Appelbach) sind die Fließrichtungen, die stark durch die tektonischen Verhältnisse geprägt sind (KLAER, 1977). So fließt die Selz zunächst entlang des variskischen Streichens nach Nordosten, biegt danach erst nach Nordwesten und dann wieder in variskische Richtung um, und erreicht schließlich den Rhein in der herzynischen Richtung (ROTHAUSEN & SONNE, 1984). Einen ähnlichen Verlauf findet man nicht nur bei den anderen rheinhessischen Flüssen, sondern auch beim Rhein, dessen Lauf ebenfalls tektonisch vorgeprägt ist.

1.4 Geologie des Mainzer Beckens

Das Mainzer Becken ist ein tertiäres Senkungsfeld am nördlichen Ende des Oberrheingrabens. Begrenzt wird es im Norden durch das Rheinische Schiefergebirge, im Südwesten durch das Nahebergland und im Osten durch den Oberrheingraben. Es stellt heute gegenüber dem abgesunkenen Oberrheingraben eine Hochscholle da, bzw. bildet, da weniger abgesunken, eine Randscholle (ROTHAUSEN & SONNE, 1984).

Die das Tertiär unterlagernden Schichten bestehen im wesentlichen aus Rotliegendem (Abb.4), das durch synsedimentäre Tektonik in 3 große tektonische Einheiten gegliedert werden kann. Das ist zum einen die Nahe-Mulde im Norden, zu der hauptsächlich der nördliche Teil des Mainzer Beckens gehört, zum anderen südlich angrenzend der Pfälzer Sattel, der im Bereich des Alzey-Niersteiner Horstes aufgeschlossen ist, sowie die Vorhaardtmulde im Süden. Das auf Rotliegendes und Zechstein folgende Mesozoikum ist im Bereich des Mainzer Beckens nicht mehr vorhanden, wobei aber anzunehmen ist, daß es zur Ablagerung von Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper kam.



Abb.4: Geologische Übersicht von Rheinhessen.

Das erste deutliche Relief entstand während der frühtertiären Festlandszeit, die mit tektonischen Aktivitäten im Oberrheingraben verbunden war. Zu Beginn des Eozäns wurden die prätertiären Täler durch Eozänen Basiston, einem limnisch-terrestrischen Sediment aufgefüllt, der innerhalb der Grabenzone große Mächtigkeiten erreicht. Durch Transgression eines brackmarinen Meeres von Süden her, wurden die Mittleren Pechelbronn Schichten in den alten Tälern auf den Eozänen Basiston abgelagert. In höheren Lagen der Talränder wurden die Schichten teilweise auch direkt auf das Rotliegende sedimentiert (ROTHAUSEN & SONNE, 1984). Die Mittleren Pechelbronn Schichten können im Mainzer Becken Mächtigkeiten von bis zu 40 m (bei Udenheim) erreichen. Durch verstärkte tektonische Bewegungen im Orthograben zu Beginn des Rupels (Unter Oligozän) kam es zur weiteren Ausdehnung der Meerestransgression und der damit verbundenen Ablagerung des Rupeltons (Beckenfazies), einem marinen Beckensediment, das im Bereich des Mainzer Beckens Mächtigkeiten von bis zu 130 m erreicht. In den küstennahen Bereichen wurde entsprechend der grobklastische Untere Meeressand (Küstenfazies) sedimentiert. Insgesamt kann der Rupelton in den Unteren Rupelton, den Mittleren Rupelton (Fischschiefer) und den Oberen Rupelton unterteilt werden. Aufgrund abnehmender Salinität des vorhandenen Binnenmeeres (zunehmende Verbrackung) kam es zu Ende des Rupels zur Ablagerung der Schleichsande, einem marin-brackischen Sediment, das aus einer lithologisch uneinheitlichen Folge mit horizontalen und vertikalen Wechseln zwischen Tonmergeln, feinsandigen Mergeln und Feinsanden mit hohem Glimmeranteil besteht. Darauf ist auch die hohe Anfälligkeit der Folge für Rutschungen zurückzuführen, was schon im Namen zum Ausdruck kommt (von "Schleichen"). Da der Schleichsand hauptsächlich in den Mittelhangbereichen der Plateauränder vorkommt, finden sich dort auch viele Rutschungen. Insgesamt werden für den Schleichsand Mächtigkeiten zwischen 50-70 m angenommen. Als Küstenfazies des Schleichsandes kam der Obere Meeressand in den küstennahen Bereichen des Meeres zur Ablagerung, der im Raum Alzey aufgeschlossen ist. Zur Zeit des Chatt (Ober Oligozän) kam es zur Sedimentation der Cyrenenmergel, einer Folge aus meist brackischen Sedimenten mit limnischen Lagen und vereinzelten Braunkohleflözen

Siu	fen	Tethys	Paratethys	Norddeutschl.	plankton- Zonen	im Miozar nach Nannoplankton	nach Säugern	Säuger - stufen	Zoner
όc	-qo	Asti/Piacenz	Roman			arvernensis - Schotter		Villanyium	12-
0.0	Unt	Tabian	Dac			Gundersheim -1		Csarnotium	15
LL N								Ruscinium	14
	- Dber -	Messin				Dorn - Dürkheim Schichten		Turolium	13
			Pont						12
									10
C	~	Torton	Pannon			Dinotheriensand		Vallesium	9
:03		Serravall	Sarmat	Langenfelde		V/////////////////////////////////////			8
N	tte		-			<i>{!!!!!!!!!!!!!</i>	<i>ι,,,,,,,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	Astaracium	7
14	Σ		Baden	Reinbek		höhere Hydrobiensch.	V / / / / / / / / / / / / / / / / / / /		6
0	_	Langh	14		5		V/////////////////////////////////////		-
Σ	Unter -	Burdigal	Karpat	-	4	tiefere Hydrobiensch.	tiefere Hydrobiensch. V////////////////////////////////////	Orleanium	2
			Ottnang	Hemmoor	3		¥//////X		3
			Eggenburg	Vierland	2	Corbiculaschichten	Vinning	Agenium	
							Hydrobiensch.		2
							Corbiculasch.		1
					NNI	Obara Carithianachicht			
ыл	ber -	Chatt	Eger	Chatt	NP25	Ubere Cerithienschichten Mittl.Cerithienschi-Landschneckenkalk Untere Cerithienschichten Süßwasserschichten		Arvernium	1.1
									1
									1
0	0						Lowener		
5						Cyrenenmergel	kalk		
		Rupel	Rupel	Rupel	24	Schleichsand	Ob Maguan	Suevium	
						Rupelton	unt sand		1
~	11				23	111111111111111111111111111111111111111	udinnint		-
0	52	Latdorf	Latdorf	Latdorf	22	Mittl.Pechelbronn Schicht.	<u>ht.</u> ////////////////////////////////////	Headonium	1
					21	?			-
	Ober -	Priabon			10		V////////		1
					19		V///////		
C	-				18		- V////////		1
-		Davisa			17		VIIIIII		1
÷Φ		Darton				Eozäner	VIIAVVIIA		
N	ē				16	Basiston	V//// u V////		
14	÷					1	V///ALV///A	Rhenanium	
0	Σ	Lutet			15		V///A K V///A		
					14		V///A A V///A		
ш	er -	Yores			13			1	
					12		V///A + V///A		
	Ę	. pres			11		V////s/////		
	_				10	7	M K///A		-
					9		6		
							3		

Abb.5: Die Abfolge der tertiären Schichtglieder im Mainzer Becken (ROTHAUSEN & SONNE, 1984).

(grünlich-graue bis blaugraue Tonmergel mit zum Liegenden zunehmendem Feinsandanteil), die im Mainzer Becken 10-15 m mächtig sind. Durch die allmähliche Abtrennung des Oberrheingrabens vom Nordseebecken und dem Tethysraum, sowie aufgrund der Zufuhr von Süßwasser durch Flüsse, endete mit der Ablagerung der Süßwasserschichten die zur Schleichsandsedimentation begonnene Aussüßung. Bei den limnischen Süßwasserschichten handelt es sich um bis 40 m mächtige graue schluff- und feinsandhaltige Tonmergel mit teilweise auffallenden ocker-farbenen Flecken. Im nördlichen Rheinhessen kam es dabei zur Ablagerung geringmächtiger Lagen von fluviatilen Milchquarzschottern. Im Verlauf weiterer tektonischer Bewegungen folgte eine erneute Meeresingression, die wieder zu brackisch-marinen Verhältnissen führte und in deren Zuge es zur Sedimentation der Unteren Cerithienschichten, bei denen es sich um grünlich-graue, teilweise pyritreiche Tonmergel handelt, kam. Insgesamt erreichen die Oligozänen Schichten (Abb.4, 5 und 6) Mächtigkeiten von bis zu 300 m. Nach einer kurzen Phase des Trockenfallens des Mainzer Beckens und einer darauf folgenden erneuten Meerestransgression an der Grenze vom Oligozän zum Miozän (Abb.5 und 6) wurden im flachen Wasser die bis 30 m mächtigen Oberen Cerithienschichten abgelagert (ROT-HAUSEN & SONNE, 1984). Dabei handelt es sich um eine Wechselfolge von grauen, weißgrauen und grünlichen Tonmergeln mit oolithischen und pisoidischen Kalksteinen die Lithound Bioklasten enthalten. Daran anschließend kam es im Unter Miozän zur Ablagerung der Corbiculaschichten, die aus brackisch-limnischen Tonmergeln und Kalksteinen bestehen, in die im Randbereich des Mainzer Beckens Algenkalkriffe eingeschaltet sind. Die darauf folgenden Hydrobienschichten zeigen häufige Fazieswechsel zwischen marinem, brackischem und limnischen Milieu und können als die letzte im Mainzer Becken unter Meereseinflüssen abgelagerte Schichtfolge betrachtet werden. Die miozänen Kalksteine bilden in Rheinhessen die harten Schichtstufen und schützen die darunter liegenden Schichten vor der Denudation. Nach der Ablagerung der Hydrobienschichten kam es im Mainzer Becken zu leichten tektonischen Hebungen (die bis heute anhalten) und einer damit verbundenen Abtragung, durch die es zur Reliefbildung und zur Entstehung von Flußnetzen kam. Während des Obermiozäns folgte dann die Ablagerung der Dinotheriensande (Ablagerungen des Ur-Rheins) und der Dorn-Dürkheim Schichten (Abb.5 und 6), beides grobklastische, fluviatile Sedimente. Im Übergang vom Obermiozän zum Unterpliozän wurden auf den Hochflächen die Bohnerztone über den Schichten des Kalktertiärs sedimentiert (siehe Wißberg, Kap.8). Die Bohnerztone sind dunkelbraune bis gelbe Tone mit geringem Feinsandanteil und eingestreuten Bohnerzen. Zum Oberpliozän hin kam es dann wieder zu verstärkten tektonischen Bewegungen in deren Verlauf der Oberrheingraben und seine Randbereiche gesenkt wurden. Den Abschluß der pliozänen Ablagerungen im Mainzer Becken bilden die fluvialtilen Arvernensis-Schotter (Sande und Schotter), sowie die Klebsande, weiße kalkfreie Feinsande mit hohem Kaolinanteil und eingeschalteten Kiesen (ROTHAUSEN & SONNE, 1984).

Mit Beginn des Pleistozäns folgte durch das wechselnde Klima die Modellierung der heutigen Landschaftsform Rheinhessens. Durch die Hebungsvorgänge im Mainzer Becken (Absinken



Abb.6: Stratigraphie des Rheingrabensystems mit Hessischer Senke, Mainzer Becken und Oberrheingraben (Ausschnitt aus der "Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002" der Deutschen Stratigraphischen Kommission).

des Rheingrabens) wurden Flußtäler eingeschnitten, wobei es zur Bildung von Terrassen kam. Während der pleistozänen Kaltzeiten wurde aus Westen der in Rheinhessen weit verbreitete Löß, ein schluffig, feinsandiges äolisches Sediment, eingeweht, der im Bereich von Hanglagen Mächtigkeiten von bis zu 30 m erreicht, aber auch auf den Plateaus mehr als 1 m mächtig werden kann (Abb.4). Zudem wurden im nördlichen Rheinhessen ("Am großen Sand", Gonsenheim) bis ins Holozän hinein Flugsande abgelagert, die noch heute eine Dünenlandschaft bilden. Durch tektonische Hebungsbewegungen, Verkarstungen im Bereich der Kalksteine, durch Rutschungen, sowie durch Abschwemm-Massen ist die Landschaftsbildung noch nicht abgeschlossen und geht auch heute noch weiter.

1.5 Hydrogeologie

Im Bereich des Mainzer Beckens sind die meisten der bis zum Oligozän entstandenen Schichten, vom eozänen Basiston bis zu den oligozänen Tonmergeln, Grundwassernichtleiter, mit Ausnahme von feinsandigen Einschaltungen in Schleichsand und Süßwasserschichten, deren Porosität und Permeabilität zu lokalen Grundwasservorkommen führen, die aber aufgrund der geringen förderwirksamen Menge keine Bedeutung haben. Allerdings kann durch die darüberliegenden geklüfteten und teilweise verkarsteten miozänen Kalke, bei denen es sich um einen guten Kluftaquifer handelt, Wasser bis auf die oligozänen Tonmergel vordringen, wobei der hydraulische Kontakt zwischen den durchlässigen Kalken und den undurchlässigen Mergeln durch einen Quellhorizont gekennzeichnet ist. Der Quellhorizont und die damit verbundene hydrogeologische Situation ist zudem eine der Voraussetzungen für die vielen in Rheinhessen auftretenden Rutschungen. Außerdem wurden die an diesem Quellhorizont austretenden Quellen in der Vergangenheit zur Trinkwassergewinnung genutzt und waren wichtige Voraussetzung für die Besiedlung Rheinhessens. Die größte natürliche Quelle ist die Seebachquelle bei Westhofen, bei der es sich um eine Karstquelle handelt (ROTHAUSEN & SONNE, 1984). Für die Trinkwassergewinnung von wirtschaftlicher Bedeutung sind die jungpleistozänen Terrassen des Rheins mit Sanden und Kiesen, die einen Porenaquifer bilden, der genug qualitativ hochwertiges Wasser zur Versorgung des Umlandes bietet (ROTHAUSEN & SONNE, 1984).

1.6 Massenbewegungen in Rheinhessen

Massenbewegungen sind in Rheinhessen trotz des trockenen Klimas ein häufig anzutreffendes Phänomen, das immer wieder zu hohen Sachschäden führt. Inzwischen sind etwa 8% von Rheinhessen als rutschungsgefährdet nachgewiesen. Bei den Bewegungsvorgängen handelt es sich hauptsächlich um Gleiten und Kriechen, das in der Regel dem Gleiten vorausgeht. Teilweise treten auch Fließbewegungen auf. Sturz- und Fallbewegungen sind in Rheinhessen selten und finden sich nur im Bereich der aufgeschlossenen Rotliegendsedimente, z.B. bei Nierstein.

Besonders durch Rutschungen betroffen sind Weinberge, Siedlungen und Verkehrswege. Aufgrund der zunehmenden Besiedlung Rheinhessens und der damit verbundenen Bebauung der Hanglagen, sowie der Zunahme von Starkregen infolge Klimaveränderung, muß mit einer vermehrten Gefährdung von Siedlungen und Verkehrswegen gerechnet werden. Bautätigkeiten lösen häufig Rutschungen aus, zum Teil auch durch die damit verbundene Reaktivierung alter Rutschungen. Größere katastrophale Rutschungsereignisse sind seit dem Mittelalter bekannt und führten sogar teilweise zur Aufgabe von Ortschaften, wie z.B. Hausen am Bleichkopf bei Engelstadt (STEINGÖTTER, 1984). Besonders betroffen sind dabei Orte, die im Bereich der Quellhorizonte angelegt wurden. Letzte extreme Rutschungen ereigneten sich in den Jahren 1880/81, 1939-41 und 1981/82. Damit verbunden waren vorhergehende nasse Jahre mit ausgiebigen Niederschlagsphasen, im Winter 1981/82 in Verbindung mit dem Abschmelzen der vorhandenen Schneedecke.

Die meisten Rutschungen in Rheinhessen finden sich an den Süd- und Westhängen, da hier im Gegensatz zu den Nord- und Osthängen die stabilisierende Lößdecke fehlt. Nur in Bereichen wo der Löß erodiert wurde treten auch an Nord- und Osthängen Massenbewegungen auf.

2. Hang- und Böschungsverformungen

2.1. Rutschungen

Unter einer Rutschung versteht man eine Verlagerung von Locker- und Festgesteinen aus einer höheren in eine tiefere Lage aufgrund der Schwerkrafteinwirkung (KRAUTER, 1995; Abb.7 und Abb.8). Diese Definition beinhaltet, daß der Begriff der Rutschung sich nicht nur auf Massenschwerebewegungen bezieht, sondern auch auf Massentransporte, also Denudation und Erosion, sofern sie hangabwärts gerichtet sind. Die Ursachen von Rutschungen sind dabei immer Veränderungen des Hanggleichgewichts (Verhältnis von rückhaltenden und treibenden Kräften), die durch verschiedene Faktoren entstehen können. Herausragende Parameter sind Geologie, Relief und Exposition, die über längere Zeiträume relativ konstant bleibend, die Grunddisposition zu Hanginstabilitäten bestimmen (=> Kap.2.5). Ein Hang ist eine geneigte Fläche, die durch endogene und exogene geodynamische Prozesse entstanden ist (KRAUTER, 1995). Dazu gehören auch Uferböschungen an fließenden und stehenden Gewässern. Wurde eine geneigte Fläche durch technische Eingriffe hergestellt, bezeichnet man sie nicht mehr als Hang, sondern als Böschung. Vom geologischen Standpunkt aus gesehen ist kein Hang, bzw. keine Böschung auf Dauer stabil, so daß durch die Einwirkung von Schwerkraft und exogenen Faktoren verschiedene Bewegungsabläufe entstehen. Das können langsame Bewegungen sein, z.B. Bodenfließen (Kriechen) oder schnelle Bewegungen wie Felsstürze und Schlammströme.



Abb.7: Luftaufnahme einer Rutschung im Neubaugebiet Guldental, Rheinhessen gestrichelte Linie: Rutschungsausmaße; Foto: Geotechnik BFW GmbH a) Rutschungsfuß (blockiert Anliegerstraße)
b) Hauptabriß
c) Hauptrutschkörper.

Nach der Art ihrer Bewegung können Rutschungen in verschiedene Typen unterteilt werden (Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Fließen =>Kap.2.3). Die Anzahl der Rutschungen, sowie die Schäden die durch Rutschungen entstehen, haben in den letzten Jahren weltweit dramatisch zugenommen. Rutschungen werden nach dem Ausmaß ihrer Schäden inzwischen gleich hinter denen von Erdbeben und Überflutungen aufgeführt. In einigen Ländern übertreffen die durch Massenbewegungen entstandenen Verluste sogar die Gesamtsumme aller, durch andere Naturkatastrophen entstandenen Schäden. In vielen Ländern werden die Verluste von Menschenleben und materiellen Werten weiter steigen, da Baumaßnahmen (Häuser, Straßen, etc.) immer mehr in rutschungsgefährdeten Geländebereichen durchgeführt werden. Die Notwendigkeit für diese Entwicklung ergibt sich aus dem ständigen Wachstum der Bevölkerung und aus der Unkenntnis oder dem Leugnen der Gefahren und Kosten, die für entsprechende Sicherungsmaßnahmen aufgewendet werden müßten.



Abb.8: Rutschung an der Autobahn A63 bei Göllheim gerissene Linie: Rutschungsausmaße; Foto: Geotechnik BFW GmbH a) Rutschungsfuß (blockiert Seitenstreifen der A63) b) Hauptabriβ c) Hauptrutschkörper.



Abb.9: Blockbild einer Rutschung (Quelle: USGS).

2.2. Merkmale einer Rutschung

Die im Folgenden dargestellten Begriffe zur Beschreibung von Rutschungen im weitesten Sinn können als Grundbegriffe von Hang- und Böschungsbewegungen (Abb.9) angesehen werden. Eine lange Zeit benutzte Begriffsterminologie für Rutschungen lieferten KLENGEL & PASEK (1974; Abb.10 und Abb.13), die aber inzwischen durch die internationale Nomenklatur der UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (1993) abgelöst wurde. Die im Multilingual Landslide Glossary veröffentlichte Nomenklatur erklärt die Dimensionen einer Rutschung (Abb.16), wobei die Rutschungsmerkmale gegenüber der ursprünglichen Hangsituation in ein Abrißgebiet, eine mittlere Bewegungszone und den Rutschungsfuß unterteilt werden (Abb.11).



Abb.10: Profil und Aufsicht einer Rutschung, B=Breite; L=Länge; H=Höhe; M=Mächtigkeit (aus KLENGEL & PASEK, 1974).

Rutschungsdimensionen : (Abb.11)

- Die Breite der Rutschmasse, W_d, ist die maximale Breite der Rutschmasse senkrecht zur Längsachse, L_d.
- Die Breite der Gleitfläche, Wr, ist die maximale Breite zwischen den Flanken der Rutschung, senkrecht zur Längsachse, Lr.
- 3) Die Gesamtlänge, L, ist der kleinste Abstand zwischen Fußspitze und Krone der Rutschung.
- 4) Die Länge der Rutschmasse, L_d, ist der kleinste Abstand zwischen Fußspitze und Top.
- 5) Die Gleitflächenlänge, Lr, ist der kleinste Abstand zwischen Gleitflächenfront und Krone.
- 6) Die Mächtigkeit der Rutschmasse, D_d, ist die maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene W_d und W_L.
- Die Tiefe der Gleitfläche, Dr, ist die maximale Tiefe der Gleitfläche unter der ursprünglichen Geländeoberfläche, gemessen senkrecht zur Ebene Wr und Lr.



Abb.11: Rutschungsdimensionen (UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993).

Rutschungsmerkmale : (Abb.12)

- 1) Krone: Nicht oder gering verlagerter Bereich unmittelbar oberhalb des Hauptabrisses (2).
- 2) Hauptabriß: Steil einfallende durch die Bewegung der Rutschmasse (13) entstandene hangabwärtsgerichtete Fläche auf dem nicht bewegten Boden oder Fels am oberen Teil der Rutschung. Er ist der deutlich sichtbare Teil der Gleitfläche (10).
- Top: Höchster Punkt des Kontaktes zwischen verlagertem Material (13) und Hauptabriß
 (2).
- Kopf: Oberer Rand der Rutschung entlang dem Kontakt zwischen verlagertem Material und Hauptabriβ (2).
- 5) **Sekundärabriß**: Durch unterschiedliche Bewegungen innerhalb des verlagerten Materials der Rutschmasse entstandene steil einfallende Fläche.
- 6) Hauptrutschkörper: Teil des verlagerten Materials der Rutschung über der Gleitfläche (10) zwischen Hauptabriβ (2) und Gleitflächenfront (11).
- 7) Fuß: Unterer Teil der Rutschmasse, der über die Gleitfläche hinausreicht (11) und über der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) liegt, auch als Rutschungszunge bezeichnet.
- 8) Fußspitze: Teil der Front (9), der am weitesten vom Top (3) der Rutschung entfernt ist.
- 9) Front: Vordere, meist gekrümmte Begrenzung des verlagerten Materials der Rutschung, die am weitesten vom Hauptabriβ (2) entfernt ist.
- 10) **Gleitfläche**: Fläche, welche die untere Grenze des verlagerten Materials (13) unter der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) bildet (oder gebildet hat).
- 11) Gleitflächenfront: Grenzlinie (meist verdeckt) zwischen dem unteren Teil der Gleitfläche (10) und der ursprünglichen Geländeoberfläche (20).
- 12) Überschiebungsfläche: Teil der ursprünglichen Geländeoberfläche, die vom Fuß der Rutschung überlagert wird.
- 13) Verlagertes Material: Von der Rutschung erfaßte und aus ihrer ursprünglichen Position verlagerte Masse. Sie umfaßt sowohl die Sackungsmasse (17) als auch die Akkumulation (18).
- 14) **Sackungszone**: Bereich der Rutschung, in der das verlagerte Material tiefer liegt als die ursprüngliche Geländeoberfläche (20).
- 15) **Akkumulationszone**: Bereich der Rutschung, in dem das verlagerte Material über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- 16) Sackungsraum: Volumen, das vom Hauptabriβ (2), von der Sackungsmasse (17) und der ursprünglichen Geländeoberfläche (20) begrenzt wird.

- 17) **Sackungsmasse**: Teil des verlagerten Materials, das über der Gleitfläche (10) und unter der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- 18) Akkumulation: Volumen des verlagerten Materials (13), das über der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt.
- 19) Flanke: Das in-situ liegende Material, das unmittelbar an die seitlichen Abrisse anschließt. Die Beschreibung mit Kompaßrichtung wird bevorzugt; falls mit rechts oder links bezeichnet, bezieht sich dies aus der Sicht von oben nach unten.
- 20) **Ursprüngliche Geländeoberfläche**: Oberfläche des Hanges, die vor Beginn der Rutschung bestand.



Abb.12: Merkmale einer Rutschung. Die Schraffur zeigt den ungestörten Boden oder Fels an. Der gepunktete Bereich bildet das Aus maß des verlagerten Materials ab (nach UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993).




2.4 Klassifikation von Rutschungen

In der Vergangenheit wurden verschiedene Arten von Klassifizierungsmöglichkeiten für Rutschungen diskutiert, die letztendlich zu keiner zufriedenstellenden Typisierung führten. Die zurzeit aktuellste ist die international anerkannte Klassifikation nach dem Multilingual Landslide Glossary (1993), das durch die UNESCO Working Party for World Landslide Inventory erstellt wurde und das Rutschungen nach ihrer Kinematik in fünf Typen von Massenbewegungen unterteilt.

Die Rutschungstypen sind (Abb.14) :

- 1) Fallen
- 2) Kippen
- 3) Gleiten
- 4) Driften
- 5) Fließen



Abb.14: Rutschungstypen: (KRAUTER, 1994)

2.3.1 Fallen

Unter dem Vorgang des Fallens versteht man plötzliche, schnelle Sturzbewegungen von losgelösten Gesteinsbrocken oder Felsmassen, bzw. die kurzfristig verlaufende Verlagerung von Gesteinsmassen an Steilhängen (ZARUBA & MENCL, 1961), in der Regel entlang von Trennflächen (Kluft-, Schicht-, Schieferungsflächen). Es überwiegt dabei der freie Fall der Gesteinskörper, im Gegensatz zum Stürzen, das die Gleit-, Fall- und Sprungbewegungen eines Felssturzes zusammenfaßt (Abb.15). Damit wird ausgesagt, daß die fallende Gesteinsmasse, im Gegensatz zur stürzenden, ihren inneren Zusammenhalt nicht unbedingt verlieren muß. Das Ablösen des Gesteinsmaterials erfolgt entlang von Flächen, an denen keine oder nur geringe Scherbewegungen stattfinden (KRAUTER, 1995). Das Fallen geht in der Regel aus Kriech- oder Gleitbewegungen, durch schnelle und anhaltende Geschwindigkeitszunahme, hervor (KRAUTER, 1973). Es können aber auch Kipp- oder Knickvorgänge vorausgehen. Fallbewegungen können außerdem nach ihrem Ausmaß in Felsstürze, Bergstürze und Stein-, bzw. Blockschläge unterteilt werden. Stein- und Blockschläge sind Fallbewegungen kleineren Ausmaßes, mit Blöcken (D > 50 cm) und Steinen (D < 50 cm), die eine Gesamtsturzmasse von 10 m³ nicht überschreiten. Die Sturzgeschwindigkeiten liegen meist im Bereich von 5 – 30 m/s. Bei einem Felssturz lösen sich größere Felsmassen mit Volumen zwischen 100 – 100.000 m³ aus dem Gebirgsverband. Dabei können Fallgeschwindigkeiten zwischen 10 m/s und 40 m/s erreicht werden. Bergstürze sind großvolumige Ausbrüche von Gesteinsmassen im Bereich größer 100.000 m³ und Sturzgeschwindigkeiten von mehr als 40 m/s.



Abb.15: Felssturz bei Saarburg (Niederleuken). Bild: Geotechnik BFW GmbH.

2.3.2 Kippen

Kippen ist eine vorwärtsgerichtete Rotation von Blöcken aus Fels oder kohäsivem Bodenmaterial aus dem Hang heraus (Abb.18), die um einen Punkt oder eine Achse, unterhalb ihres Schwerpunktes, verläuft (KRAUTER, 1995). Die Rotation kann entlang horizontaler Achsen um den Kopf (Externrotation, Sander 1936) oder den Fuß (Internrotation, Sander 1936) eines oder mehrerer hintereinanderliegender Kluftkörper erfolgen (Abb.16; KRAUTER 1995). Kippbewegungen kommen hauptsächlich an Steilhängen mit kompetenten Schichtkomplexen wie Sandsteinen, Kalksteinen oder Basalten auf plastifizierbarer tonig-mergeliger Unterlage vor (PRINZ, 1997). Kippen kann aber auch an flachen und weniger steilen Hängen aufgrund von Blockbewegungen auftreten (KRAUTER 1995). Es kann Fall- und Gleitbewegungen vorangehen und ist im Steilhang oft durch deutlich aus dem Gesteinsverband gelöste, instabile Felskörper gekennzeichnet. Eine spezielle Form des Kippens ist das Hakenschlagen (Abb.17), bei dem es durch die Schwerkraft zum hakenförmigen Verstellen der Schich-



3. Knicken (KRAUTER, 1986).

ten kommt. Durch das Eigengewicht des Gesteins, sowie durch vorhandene Auflagerungen (Gehängeschutt) und oberflächennahe Kriechbewegungen (Bodenkriechen) kann es zu spröden Deformationen kommen, wobei das Gestein an vorhandenen Diskontinuitäten bricht und die Kluftkörper dann durch Rotation und Translation in eine neue Lage gebracht werden (KRAUTER, 1973). Die entsprechenden Bewegungen verlaufen von oben nach unten, also zum Tal hin. Nach KRAUTER (1973) ist die im Scharnier auftretende Sperrauflockerung und



Abb.17: Hakenschlagen von (1) in Richtung der Böschung und (2) bergwärts einfallenden Schichten (KRAUTER, 1986).

die wesentlich geringere Kluftkörpergröße, im Vergleich zum nicht betroffenen Gebirge, typisch für das Hakenschlagen. Als Voraussetzung für tiefreichendes Hakenschlagen ist eine steiler als der Hang einfallende, engständige Trennflächenschar mit einem hohen Durchtrennungsgrad notwendig. Fallen Hang und Trennflächenschar entgegengesetzt ein, kommt es in der Regel nur zu einer oberflächennahen, hakenähnlichen Deformation (KRAUTER, 1973).



einem Felsturm (aus PRINZ, 1997).

2.3.3 Gleiten

Beim Gleiten handelt es sich um hangabwärts gerichtete Block- oder Schollenbewegungen, die hauptsächlich entlang von Gleitflächen oder Zonen intensiver Scherverformung erfolgen (KRAUTER, 1995). Die Rutschungsoberfläche bleibt dabei in der Regel relativ ungestört (PRINZ, 1996). Nach KRAUTER (1995) wird Gleiten auch als übergeordneter Begriff für Hangbewegungen von kohärenten Massen entlang von Gleitflächen benutzt. Aufgrund der Geometrie ihrer Gleitfläche kann man Gleitungen in zwei Untertypen unterteilen, deren gemeinsames Merkmal Bewegungen entlang dieser Gleitflächen (unterschiedlicher Art) sind. Ein Typ sind Translationsrutschungen mit ebenen Gleitflächen, deren Bewegungen an

24

vorgegebenen Trennflächen erfolgen, z.B. an Schicht- oder Kluftflächen und dabei meist am Ubergang von kompetenten zu inkompetenten Lagen (Tonsteinzwischenlagen). Diese Bewegungen können dabei auf einer oder mehreren Flächen stattfinden, die sich gegenseitig ablösen. Solche sich stufenartig absetzende Gleitflächen findet man hauptsächlich in dünnbankigen oder geschieferten Gesteinen. Eine weitere Form sind Rotationsrutschungen (Abb.19 und Abb.21) mit schalenförmiger Gleitfläche, die in isotropem Material mehr oder weniger kreisförmig ist. Mit in der Tiefe zunehmend fester werdendem Untergrund wird die Gleitfläche in der Regel flachschalig (ZARUBA & MENCL, 1969). Bei größerer Horizontalbewegung tritt dabei eine stärkere Beanspruchung der Rutschmasse auf. Bei ausgeprägter Rotationsbewegung sind die Rutschmassen oft wenig gestört. Rotationsrutschungen bilden in der Regel die Ausnahme und sind gegenüber Translationsrutschungen wesentlich seltener. Eine weitere Möglichkeit von Gleitungen sind kombinierte Rutschungen, bei denen die Gleitfläche aus mehreren verschieden gekrümmten und ebenen Bruchflächen besteht. Durch die in der Regel damit verbundene höhere Scherbeanspruchung kann es am oberen Abriß der Rutschung zum Doppelgrat kommen. Bei verstärktem Anfall von Wasser (z.B. nach Starkregen) können am Hang aus Gleitbewegungen auch Schutt- oder Geröllströme entstehen (Abb.20; ZARUBA & MENCL, 1961).



Abb. 19: Grundtypen von kreisförmigen und abgeflachten Rotationsrutschungen (PRINZ, 1997).



Abb. 20: Schuttstromrutschung (a) und Schuttkegel (b), hervorgegangen aus einer Gleitung (ZARUBA & MENCL, 1969).



Abb. 21: Beispiel für Rotationsrutschungen (Quelle: USGS).

2.3.4 Driften

Unter Driften versteht man die laterale Bewegung von Fels- oder kohäsiven Bodenmassen in Verbindung mit einem Einsinken in eine duktile Unterlage, wobei auf der Gleitfläche keine intensive Scherung stattfindet (Abb.22 und 23; KRAUTER, 1995). Dem Driften kann Kippen vorausgehen, das erst zum Lösen von Gesteinsblöcken, entlang vorgegebener Trennflächen, und dann zum Abdriften auf einer duktilen Unterlage führen kann. Hangabwärts können solche Bewegungen in Blockkriechen übergehen. Driften kann aber auch durch Liquefaktion (Verflüssigung) oder Fließen und Extrusion der plastifizierbaren Unterlage verursacht werden (KRAUTER, 1995).



Abb. 22: Driften von (a) Sandsteinblöcken (Labiatus-Sandstein) auf Lohmgrund-Mergel (b) im Elbsandsteingebirge, c=liegende Sandsteine, d=plastifizierte Mergel (nach JOHNSEN, 1984; aus PRINZ, 1997).



Abb. 23: Driften und Blockkriechen im Elbsandsteingebirge; Labiatus-Sandstein auf Lohngrund-Mergel, Oberkreide (nach JOHNSEN, 1984; aus PRINZ, 1997).

2.3.5 Fließen

Beim Fließen handelt es sich um räumliche, anhaltende Bewegungen, bei denen die Scherfläche nur vorübergehend vorhanden ist und meist nicht erhalten bleibt. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit. Das Fließverhalten ist nicht nur vom Wassergehalt sondern auch vom Gefüge und der Struktur abhängig (Quicktone). Beim Fließen kann unter anderem zwischen Erd-, bzw. Schlammströmen und Schutt-, bzw. Geröllstromrutschungen (Abb.24) unterschieden werden (PRINZ, 1997). Letztere entstehen oft durch starke Wasseranreicherung (z.B. Starkregen) und können sich auch bei schwachem Gefälle mit hoher Geschwindigkeit weit erstrecken. Ein Spezialfall sind Mülloder Haldenrutschungen, bei denen in Hanglagen abgelagerter Hausmüll zu Stromrutschungen führt. Weitere Sonderformen des Fließens sind Quicktonrutschungen, Kriechvorgänge und



Abb.24: Fließen am Beispiel eines Schuttstroms.

Solifluktion (Abb.31), bei der infolge von Wasserübersättigung, aufgrund von Frost- und Auftauzyklen, oberflächennahe Bodenschichten schon bei geringem Gefälle (2-4° reichen aus) anfangen, langsam zu fließen (typisch für periglaziale Gebiete). Kriechen ist eine länger anhaltende, langsame Verformung mit Gleitvorgängen auf vielen kleinen Trennflächen und mit Bewegungsbeträgen im mm- bis cm-Bereich pro Jahr, bei mehr oder weniger gleichbleibender Spannung, die sowohl in Locker- als auch in Festgesteinen vorkommen kann (Abb.25). Im Gegensatz zu Rutschungen werden keine durchgehenden Gleitflächen ausgebildet. Dabei muß das Tiefkriechen von Festgesteinen, wie z.B. beim Talzuschub oder der Bergzerreißung, vom Oberflächenkriechen der Auflockerungszone, z.B. Schuttstromkriechen, unterschieden werden.



Abb.25: Beispiel für Bodenkriechen und Hakenschlagen mit im Gelände erkennbaren Merkmalen (Quelle: USGS).

2.4 Altersstellung von Rutschungen

Rutschungen können in allen geologischen Zeiten aufgetreten sein, wenn die klimatischen, geologischen und morphologischen Voraussetzungen stimmten. Eine genaue zeitliche Abfolge ist äußerst schwierig, da Zeitanzeiger oder Datierungshilfen wie Leitfossilien, Pollen oder fossiles Holz in der Regel nicht vorhanden sind. Deshalb muß man sich auf paläoklimatische Betrachtungsweisen und geomorphologische Merkmale verlassen (PRINZ 1997). Sehr alte Rutschungen, die man heute in den Mittelgebirgen bei der Geländebegehung kaum noch erkennt, lassen sich in der Regel in das Pleistozän datieren und können als fossile Rutschungen bezeichnet werden (KLENGEL & PASEK, 1974). Im Gegensatz dazu sind alte Rutschungen, die oft jungeiszeitlichen oder nacheiszeitlichen Alters sind, noch mehr oder weniger gut im Gelände erkennbar. Zu diesen Rutschungen gehören talzuschubartige Entlastungsbrüche durch die jüngste Talerosion, sowie Rutschungen, die durch den Rückzug der Gletscher entstanden sind, weil die stützende Wirkung des Eises fehlte. Rutschungen, die unter den heutigen klimatischen und geomorphologischen Bedingungen entstanden, aber nicht mehr in Bewegung sind, werden nach KLENGEL & PASEK (1974) auch als rezente Rutschungen bezeichnet und sind in der Regel jünger als 1000 Jahre. Rutschungen, die heute noch in Bewegung sind, werden auch als aktive Rutschungen bezeichnet. Zur Altersbestimmung von jüngeren Rutschungen können auch Zeitmarken wie Terrassenablagerungen und Bodenbildungen, sowie Störungen von Bauwerken, Wegen oder Baumreihen herangezogen werden (PRINZ, 1997). Zusätzlich können Rutschungen noch nach ihren Rutschungsaktivitäten unterschieden werden (Abb.26; Multilingual Landslide Glossary, 1993).

- Aktive Rutschung (1): Rutschung die zur Zeit in Bewegung ist.
- Blockierte Rutschung (2): Rutschung die sich zwar in den letzten 12 Monaten bewegt hat, aber zur Zeit nicht aktiv ist.
- Reaktivierte Rutschung (3): Wiederbelebte, vorher inaktiv gewesene Rutschung
- Inaktive Rutschung (4
- (4): Rutschung die sich in den letzten 12 Monaten nicht
 - bewegt hat.
- Latente Rutschung (5): Inaktive Rutschung, die durch ihre ursprünglichen Ursachen reaktiviert werden kann.
- Abgeschlossene Rutschung (6): Rutschung die inaktiv ist und nicht mehr von ihren ursprünglichen Ursachen beeinflußt wird.

■ Fossile Rutschung

- Stabilisierte Rutschung (7): Inaktive Rutschung, bei der durch Sanierung die ursprünglichen Ursachen nicht mehr wirksam sind.
 - (8): Rutschung die inaktiv ist und die sich unter anderen klimatischen und geomorphologischen Bedingungen im Vergleich zur Gegenwart entwickelt hatte.



Abb. 26: 1) Aktiv, Erosion am Hangfuß verursacht das Kippen des Blockes.

- 2) Blockiert, lokaler Bruch im Bereich der Krone.
- 3) **Reaktiviert**, ein weiterer Block kippt und verformt das ältere, verlagerte Material.
- 5) *Latent*, auf dem gekippten Körper beginnen Bäume zu wachsen und die Verwitterung setzt randlich ein.
- 6) *Abgeschlossen*, *Flußablagerungen bedecken den Hangfuß und an den Steilrändern beginnen Bäume zu wachsen.*
- 7) Stabilisiert, eine Mauer stützt den Hangfuß.
- 8) **Fossil**, es hat sich ein gleichmäßiger Baumbestand gebildet (UNESCO-Working Party for World Landslide Inventory, 1993).

2.5 Ursachen von Rutschungen

Die Ursachen von Rutschungen liegen in der Veränderung des Gleichgewichts zwischen den rückhaltenden und den angreifenden Kräften im Hang, durch permanent oder episodisch wirkende Faktoren (Tab.1 und Tab.2; KRAUTER, 1994). Wird das Verhältnis von rückhaltenden und angreifenden Kräften kleiner oder gleich 1, dann wird das Gleichgewicht zerstört und es kann zu Rutschungsereignissen kommen, d.h. das Verhalten von Hängen und Böschungen ist das Ergebnis, das durch die Änderung des Gleichgewichts und der Materialeigenschaften, durch permanente und episodische Faktoren, entsteht (KRAUTER, 1995). Zu den rückhaltenden Kräften gehören unter anderem die Scherfestigkeit und die Normalspannung, wohingegen z.B. Schwerkraft und Wasserdruck zu den angreifenden Kräften zu zählen sind. Gerade die permanent am Gestein wirkende Gravitationskraft ist ein nicht unwichtiger Faktor, da sie den Gesteinsverband entfestigt und damit den vorhandenen Gleichgewichtszustand stört.

Bei den episodisch oder permanent wirkenden Faktoren kann man zwischen natürlichen Faktoren, z.B. Niederschlägen oder Erdbeben und anthropogenen Faktoren, z.B. künstlichen Hanganschnitten oder Sprengungen, unterscheiden. In der Regel wirken immer mehrere Faktoren gleichzeitig, so daß es, je nach dem welche Faktoren überwiegen, zur Beschleunigung oder Verzögerung der Rutschungsbewegung kommen kann. Im weiteren Verlauf des Kapitels sollen die folgenden Ursachen, Geologie, Morphologie, Klima, Hydrogeologie, Biologie und anthropogene Ursachen, näher betrachtet werden.

Faktor	Ursach natürlich	Ursache anthropogen	Wirkung
Veränderung des Bergwasserstandes, hohe Durchfeuchtung	anomale Niederschläge, Frostverschluß, Frostaufgang, Schneeschmelze	Defekte in Wasserleitungen oder Kanalisation, gestörte Dränage, Aufstau, Bewässerung	Konsistenzänderung, Plastifizierung von Kluftfüllungen, Strömungsdruck, Kluftwasserdruck, Auftrieb, Verwitterung, Hydrolyse
Erschütterung	Erdbeben	Sprengung, Ramm- und Bohrarbeiten, rollender Verkehr	Porenwasserüberdruck, Thixotropieeffekt, Auf- lockerung, Spannungs- änderung
Belastungsänderungen	anomale Nieder- schläge, Schmelz- wasser, Frostverschluß	Aufschüttungen, Kippen, Halden, Bauwerke	Spannungsänderung
Änderung der äußeren Form	Unterspülung	Hangan- und Hangeinschnitte	Spannungsänderung

Tab.1: Beispiele für episodisch wirkende bewegungsauslösende Faktoren (aus KRAUTER, 1995, nach REUTER/KLENGEL/PASEK, 1980).

Faktor	Wirkung		
Tektonik	Veränderung der Neigung und Höhe eines Hanges		
Erosion	Wegnahme des Widerlagers am Hangfuß, Unterschneidung, Talvertiefung; Verringerung der horizontalen Einspannung durch linienhafte Erosion in Gefällrichtung		
Verwitterung	Auflockerung und Entfestigung des Gebirges durch chemische und physikalische Prozesse		

Tab.2: Beispiele für permanent wirkende, bewegungsfördernde Faktoren (aus KRAUTER, 1995).

2.5.1 Geologische Ursachen

Der geologische Aufbau bildet in der Regel die Primärursache für das Auftreten von Massenbewegungen. Dabei spielen Faktoren wie die Petrographie des anstehenden Gesteins, oder das Trennflächengefüge eine große Rolle. Gerade die Ausbildung und Raumstellung des Trennflächengefüges, hauptsächlich der Schicht-, Schieferungs- und Kluftflächen, ist ein Faktor der die Stabilität von Hängen stark beeinflußt (KRAUTER, 1995). Die Art der Ausbildung und die Raumstellung der Trennflächen sind abhängig von den spezifischen Gesteinseigenschaften, also der Petrographie und den Beanspruchungsrichtungen der 3 Normalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 . Schicht- und Schieferungsflächen, aber auch Kluftflächen bilden bevorzugt Gleitflächen auf denen Bewegungen stattfinden können. Auch die Tonmineralogie kann eine Ursache sein (Abb.27), da die Scherfestigkeit stark von ihr abhängig ist. So sind gerade tonig-



Abb. 27: Rutschungsanfälligkeit von Uferböschungen des Mittellandkanals in Abhängigkeit des Montmorillonitgehaltes der Unterkreidetone, bezogen auf die Tonfraktion (PRINZ, 1997).

schluffige Schichten durch ihre niedrigen Scherparameter sehr rutschungsanfällig (PRINZ, 1997). Erdbeben ab einer Intensität von VIII auf der Mercalli-Sieberg-Skala können ebenfalls Rutschungen auslösen, spielen in Rheinhessen als auslösender Faktor aber keine Rolle. Eine weitere Ursache von Massenbewegungen kann die Thixotropieeigenschaft von Böden sein. Dies ist dann gegeben wenn Böden (z.B. Quicktone) durch mechanische Beanspruchung ihren festen Zustand verlieren und schlagartig in einen flüssigen Zustand übergehen (KRAUTER, 1994).

2.5.2 Morpholgische Ursachen

Morphologische Faktoren, welche die Stabilität eines Hanges beeinflussen können, sind u.a. die Hangneigung, die Geländeform und die Exposition eines Hanges (\rightarrow Kap. 5). Die Gelände- oder Landschaftsform wird von verschiedensten endogenen und exogenen Prozessen, wie Erosion, Denudation, Akkumulation etc. geprägt und ständig weiterentwickelt. Mit zunehmender Hangneigung nimmt auch die Gefahr von Massenbewegungen zu. Die Erosion kann zu Unterschneidungen oder Veränderungen des Widerlagers am Hangfuß führen. Die Verwitterung zur Auflockerung und Entfestigung des Gebirges.

In bestimmten Gebieten kann auch die Exposition Auswirkungen auf die Stabilität eines Hanges haben (\rightarrow Solifluktion). Dies trifft hauptsächlich auf pleistozäne Schichten zu, wie man sie auch in Rheinhessen findet. An solchen konnte KRAUTER (1980) nachweisen, daß süd- und westexponierte Hänge häufiger von Rutschungen betroffen sind als andere Richtungen, da dort die Verwitterung stärker und intensiver angreift (\rightarrow Kap. 5).

2.5.3 Hydrogeologische Ursachen

Zu den hydrogeologischen Ursachen, die Massenbewegungen auslösen können, gehören Veränderungen des Grund- und Bergwasserspiegels, Niederschläge, speziell extreme Niederschlagsereignisse (Starkregen), Naßstellen und Quellen, Veränderungen des Wasserchemismus, sowie Wasserverluste aus Leitungen, Kanälen, Dränagen und Behältern. Gerade zwischen Niederschlägen und Rutschungshäufigkeit besteht ein direkter Zusammenhang, weshalb Niederschlagssummen bei der Beurteilung von Rutschungen stets zu berücksichtigen sind (Abb.28). Die Wirkung von Niederschlägen kann durch das Auftauen von größeren Schneedecken, bedingt durch Dauerregen, noch verstärkt werden, da zu dem Regenwasser das Schmelzwasser hinzukommt (Abb.30), wie z.B. im Winter 1981/82 in Rheinhessen als dadurch über 200 Rutschungen ausgelöst wurden. Auch die Wirkung des Wassers im Boden kann Auswirkungen auf Massenbewegungen haben. Durch Überschreitung der Feldkapazität nach längeren Regenperioden, also der maximalen Wassermenge, die ein Boden in ungestörter Lagerung gegen die Schwerkraft zurückhalten kann (HÖLTING, 1992), ist ein Oberflächenabfluß möglich. Bei erhöhtem Strömungs- oder Porenwasserdruck kann die Scherfestigkeit (rückhaltende Kraft) in feinkörnigen Böden herabgesetzt und damit die angreifenden Kräfte verstärkt werden. Das Gleiche gilt für den Kluftwasserdruck in geklüftetem Festgestein. Dort kann ein Wasserfilm auf potentiellen Gleitflächen (z.B. Kluftflächen) die Scherfestigkeit stark herabsetzen. Die Änderung des Strömungs-, sowie des Porenwasserdruckes, aber auch des Kluftwasserdruckes, wird durch den Zu- und Abfluß gesteuert, d.h. ist die Wasserbilanz positiv, also sind die Niederschlagsmengen größer als Evaporation und Abfluß zusammen, dann kann es zur Grundwasserneubildung kommen. Damit ist ein Grundwasserspiegelanstieg (Abb.29) verbunden, der zu einer Zunahme des Strömungs- und des Kluftwasserdruckes führt. Aber auch im umgekehrten Falle (bei negativer Wasserbilanz) kann es durch das rasche Absinken des Grundwasserspiegels zu einer Zunahme des Strömungsdruckes durch den erhöhten Abfluß kommen. Eine Wasserzufuhr (z.B. durch Regen) in den oberen Bereichen einer Böschung oder eines Hanges kann zu einem Lastzuwachs führen, während es



Abb. 28: Zusammenhang Niederschläge-Seespiegel-Rutschungen 1) Niederschlagsmengen in mm/Dekade

- 2) in mm/Jahr
- 3) Seespiegelschwankungen in m
- 4) Bewegungsgeschwindigkeit in cm/Tag
- 5) Gesamtbetrag der Beobachtungspunkte in cm im Vajont-Tal (aus KRAUTER, 1994).



Abb. 29: Lage der Grundwasseroberfläche (PRESS & SIEVER, 1994).

bei einem Grundwasseranstieg am Hang- oder Böschungsfuß, durch die Wirkung des Auftriebs zur Verminderung der rückhaltenden Kräfte und somit zur Beschleunigung der Rutschung kommt (KRAUTER, 1995). Quellen und Wasseraustritte können durch aktive Rutschungen verschüttet oder unterbunden werden, so daß es zu einer vermehrten Durchfeuchtung der vorhandenen Gleitfläche kommen kann, wodurch weitere Bewegungen initiiert oder vorhandene Bewegungen beschleunigt werden.



Abb.30: Rutschung im Spanisch Fork Canyon, Thistle, Utah, im April 1983. Die Rutschung erfolgte nach dem Abschmelzen einer außerordentlich hohen Schneedecke durch starke Regenfälle, wodurch die steilen Talwände instabil wurden (Foto:R.L.Schuster USGS 1983).

2.5.4 Klimatische Ursachen

Die Einflüsse des Klimas machen sich sowohl permanent, in Form von Verwitterung und Erosion, als auch episodisch, durch anomale Niederschläge, Temperaturen und Frost, bemerkbar. Chemische und physikalische Verwitterung, die durch Wind, Sonneneinstrahlung, Feuchtigkeit etc. ausgelöst werden, können zu einer tiefgreifenden Auflockerung und Entfestigung des Gebirges führen. Extreme Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen können Spannungen im Gestein aufbauen und zu Rißbildungen oder sogar Gesteinssprengung führen, was die Scherfestigkeit herabsetzt. Der jahreszeitliche, in extremen Gebieten auch tägliche Wechsel von Erwärmung und Bodenfrost kann zu einem Kriechen verschieden tiefer Bereiche der Deckschichten bzw. der Felsoberfläche führen, was auch als Solifluktion bezeichnet wird. Die Solifluktion (Abb.31) ist typisch für periglaziale Gebiete, in denen in den Sommermonaten nur die obersten Bodenschichten auftauen. Dabei ist die Verteilung pleistozäner Solifluktionsprozesse in periglazialem Klima stark von der Hangexposition abhängig. In Rheinhessen finden sich deshalb die Reste solcher Prozesse hauptsächlich im Bereich süd- und südostexponierter Hänge (vgl. Kap. 5).



ADD. 31: Solifitiktion tritt dann duf, wenn die oberen Bodenschichten auftauen und die tieferen Schichten noch gefroren sind (PRESS & SIEVER, 1994).

2.5.5 Biologische Ursachen

Biologische Ursachen für Massenbewegungen können zum einen die Vegetationsart und -dichte, zum anderen die Fauna sein. Bodenwühlende Tiere können Steilböschungen untergraben und so Rutschungen auslösen oder durch ihre Wühltätigkeit das Eindringen von Oberflächenwasser in den Hang fördern. Die Überweidung von Hängen in Verbindung mit Viehtritterosion kann zur Zerstörung des Hangbewuchses führen und diesen damit anfällig für Klimaeinflüsse machen (PRINZ, 1997). Bäume können an steilen Felsböschungen durch Wurzelbewegungen aufgrund von Wind zu einer Auflockerung des Gefüges beitragen, wodurch es zu Steinschlägen kommen kann. Deshalb sollten Bäume im Bereich von steinschlaggefährdeten Böschungen gekappt werden. Bei einer Veränderung der Vegetationsart und -dichte eines Hanges, z.B. durch vermehrtes Abholzen oder Sturmschäden, bzw. Waldbränden, kann sich das Hanggleichgewicht drastisch verändern. Zum einen fehlt die stabilisierende Wirkung der Wurzeln, was auch zur Bodenerosion führen kann (Abb.32), zum anderen ändert sich der Wasserhaushalt des Hanges. Auch die Luftverschmutzung und ihre Wirkung auf die Vegetation können in den nächsten Jahren Auswirkungen auf die Stabilität von Hängen, gerade in den Alpen, haben.



Abb.32: Schäden an Vegetation und Wurzelsystemen im Yellowstone-Nationalpark nach einem Waldbrand, der eine "Schwächung" des lockeren Bodenverbandes zur Folge hatte und ihn so für Erosion und Massenbewegungen anfällig machte (Foto: Grant Meyer; aus PRESS & SIEVER 1994).

2.5.6 Anthropogene Ursachen

Hier spielen menschliche Eingriffe in Form von Baumaßnahmen eine Rolle. Durch Bauwerke, Aushübe oder Aufschüttungen kann der Gleichgewichtszustand eines Hanges empfindlich gestört werden (Tab.3 und Tab.4). Das Ausheben oder Abgraben von Material am Hangfuß, z.B. im Straßenbau kann zu einer Entlastung und damit zum Auftrieb des Hangfußes führen. Darüber hinaus kommt es dadurch auch immer zu einer Zunahme der Höhe und zu einer Versteilung, die ein Anwachsen der Schubspannungen bewirkt. Aber auch eine Belastung im oberen Bereich eines Hanges durch Bauwerke kann zu folgenschweren Rutschungen führen.

Der Aufstau von Oberflächen- und Grundwasser durch Rückhalte- und Stauanlagen kann zu einer Veränderung des Wasserhaushaltes führen (=> 2.5.3 Hydrogeologie). Nach KRAUTER (1994) ist der anthropogene Faktor indirekt und ungewollt, d.h. er ist ein Nebenergebnis anderer Zielsetzungen, führt aber zu immer häufiger werdenden Katastrophen in Siedlungsgebieten. Das macht sich besonders in den Ländern der 3.Welt bemerkbar, wo es durch Überbevölkerung und Landflucht in die Metropolen zur unkontrollierten Besiedlung bis in die Hanglagen kommt (Tab.3).



Tab.3: Anthropogene Ursachenfaktoren für die Gefährdung von Siedlungen durch Rutschungen. (Quelle: Dixit 1990; aus KRAUTER, 1994).



Tab.4: Auflistung von Rutschungsursachen (nach HUTCHINSON, 1992; KRAUTER, 1990; POPESCU, 1994).

Als Sanierung werden Maßnahmen bezeichnet, die Rutschungsbewegungen zum Stillstand bringen oder auf ein ungefährliches Maß reduzieren. Im Gegensatz dazu sollen Sicherungsmaßnahmen nur vor den, von einer Rutschung ausgehenden, Gefahren schützen (KRAUTER, 1986). Um eine sinnvolle Sanierung oder Sicherung in rutschgefährdeten Bereichen durchzuführen, ist es notwendig zuerst die ursächlichen Faktoren, die für die Rutschungsgefahr oder die schon aufgetretene Rutschung verantwortlich sind, zu erkennen (Tab.4). Dann können Maßnahmen (Tab.5) vorgeschlagen werden, die durch die Ausschaltung der einzelnen Faktoren das Gleichgewicht wiederherstellen oder die Rutschung stabilisieren (PRINZ, 1997). Da dies in der Regel mit großem Aufwand verbunden ist, muß die Durchführung der Sanierung oder Sicherung immer in Relation zur Notwendigkeit und dem Erfolg der Maßnahme stehen. Für die Methoden, die zur Sanierung oder Sicherung ausgewählt werden, ist letztendlich immer die geologische Situation, die an der Gefahrenstelle vorherrscht, ausschlaggebend, so daß jede Rutschung einen individuellen Fall darstellt (KRAUTER, 1986). Für die Sanierung von gefährdeten Bereichen reicht es oft aus, wenn vorhandene Bewegungen soweit verlangsamt werden, daß sie auf längere Zeit gesehen keine Gefahr darstellen. Eine komplette Ausschaltung der Bewegungen ist in der Regel zu aufwendig und teuer oder nicht realisierbar. Nach PRINZ (1997) sollte als Grundregel zur Sanierung das "Prinzip der kleinsten Massenbewegung" befolgt werden, d.h. die Eingriffe in das Gelände sollten so weit wie möglich minimiert werden.

Typus	Bewegungsart	Gleitfläche	Material, bewegtes	Sanierung
Kriechen	Rotation	keine ausgeprägte	Lockergestein	Entwässerung
Hakenschlagen	Translation	Gleitfläche	bindig	Abflachung
Schuttkriechen			nicht bindig	Vorschüttung
Talzuschub	Geschwindigkeit:		veränderlich	Auskoffern und
Bergzerreißung	quasi konstant		festes Gestein	Bodenersatz
Gleiten	Gleiten	eine oder mehrere aus-	Festgestein	Stützung
		geprägte Gleitfläche(n)	(kohärent)	Verankerung
		quasi-eben		Verdübelung
		gekrümmt		Verfestigung (chem.)
		stufenförmig		Begrünung
				Bepflanzung
Kippen	Rotation	keine ausgeprägte	Festgestein	Abflachung
	Intern	Gleitfläche	(nicht kohärent)	Stützung
	Extern			Verankerung
	Translation			Umgürtung
Fallen	Fallen	kurzzeitiger Kontaktverlust		Verhängung
Felsstürze		zur Unterlage		Versiegelung
Steinschlag				Fangvorrichtung
Fließen	Fließen	Grenze zwischen Bewegtern	Lockergestein	Entwässerung
Schuttströme		und Liegendem scharf	bindig	Stützung
chlammströme			nicht bindig	Verfestigung (chem.)
Oberflächenfließen			veränderlich	Begrünung
			festes Gestein	Bepflanzung

Tab.5: Einteilung der Rutschungen nach geotechnischen Gesichtspunkten (KRAUTER, 1986).

3. Gefahren und Risiken durch Hang- und Böschungsbewegungen

3.1 Einleitung

Rutschungen, Felsstürze und Steinschläge sind Naturgefahren, die nicht nur in unbewohnten Gebieten auftreten, sondern auch im Bereich von Siedlungen und Verkehrswegen. Somit stellen sie auch eine Gefahr für den Menschen und seine Güter da. Um eine höhere Sicherheit für den Menschen zu gewährleisten, muß eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Naturgefahren stattfinden. Dazu ist es notwendig eine genaue Analyse und eine richtige Beurteilung der Gefahr für ein durch Naturgefahren betroffenes Gebiet abzugeben, damit Maßnahmen zur Minimierung des Risikos und ein an die Gefahr angepaßtes Verhalten der betroffenen Menschen erreicht werden kann. Als Grundlage dafür dienen geowissenschaftliche Basisdaten zur Topographie, Geologie, Ingenieurgeologie, Klima, Vegetation, sowie die Berücksichtigung anthropogener Einflüsse.

3.2 Schadensbilanz durch Rutschungen

Die materiellen Schäden und Verluste von Menschenleben, die sich jährlich und weltweit durch Massenbewegungen ereignen, erreichen inzwischen ein beträchtliches Ausmaß (Abb.33-35, Abb.36 & Abb.37). Nach den Angaben der IAEG-Commission on Landslides kamen im Zeitraum von 1973 bis 1979 etwa 19.000 Menschen durch Rutschungen, Erdbeben oder Lawinen ums Leben (KRAUTER, 1994). Allein in Europa sind zwischen 1970 und 1987 etwa 10.756 Menschen bei 58 Rutschungsereignissen ums Leben gekommen. Für den Bereich der USA werden die jährlichen Verluste, die durch Rutschungen entstehen, auf 25-50 Menschenleben und ca. 1-2 Milliarden US\$ Schaden geschätzt (DIKAU, 1992). Eines der am stärksten betroffenen Gebiete ist der Bereich der San Francisco-Bay in Kalifornien, in dem die Zahl der bekannten Rutschungen von 1970 bis 1980 von 12.000 auf 70.000 anstieg. Das Beispiel zeigt sehr gut den Zusammenhang zwischen dem Bevölke-

Land/ Region	Zeitpunkt Zeitraum	wirtschaftli- cher Verlust in Mio. USS
Brasilien/		
Rio de Janeiro	1988-1991	300
Canada	seit 1991	5-10
China	jährlich	1 800
Deutschland/	jährlich	150
Rheinland-Pfalz	jährlich	10
Ecuador	1987	1 500
Frankreich	1983	1634
	1984	640
	1985	635
Himalaya-		
Region	jährlich	1 000
Italien	jährlich	1140
Kolumbien	1974	1 000
Korea	1981-1988	475
Neuseeland	1988	72
Schweden	1950	16
	1957	11
	1977	58
Spanien	1986-2016	6600
(H	ochrechnung)	
Thailand	1988	250
Trinidad und	1979-1986	1.26
Tobago	1985/86	0.96
USA	1987	3 000
	jährlich	1 500

Abb.33: Wirtschaftliche Schäden durch Rutschungen (nach KRAUTER, 1994).



Abb.34: Durch Rutschungen verursachte Schäden an Straßen und Gebäuden in Rheinland-Pfalz.
a) Zerstörter Wirtschaftsweg bei Horrweiler
b) Stark beschädigte B38 bei Bad Bergzabern
c) Stark beschädigtes Haus im Neubaugebiet Sulzbachtal

rungswachstum und der Zunahme von Rutschungsereignissen. Durch die Verdopplung der Bevölkerung im Raum der San Francisco Bay zwischen 1955 und 1982 hat sich auch die Flächennutzung vergrößert, was in den letzten Jahren zu einer verstärkten Bebauung der Hanglagen geführt hat. Inzwischen haben Risiko- und Gefahrenanalysen in dieser Region zu strengen Bebauungsvorschriften geführt, so daß in Teilgebieten nur noch ein Haus pro 16 ha gebaut werden darf (aus DIKAU, 1993; nach ROBINSON & SPEAKER, 1978). Auch in Europa kommt es immer wieder zu katastrophalen Rutschungsereignissen mit vielen Toten und hohen Sachschäden. Eines der spektakulärsten Ereignisse war 1987 ein Felssturz im Veltlintal in Norditalien, bei dem sich 40 Mio. m³Gestein lösten und einen Ort verschütteten, wobei 32 Menschen ums Leben kamen. Hinzu kam die Evakuierung von ca. 30.000 Menschen in talwärts gelegenen Ortschaften aufgrund der Gefahr einer Schwallwelle (aus KRAUTER, 1994; nach GOVI 1989).

Ein Schlammstrom bei Aberfan in Wales im Jahre 1966 führte zur Zerstörung zahlreicher Häuser und kostete 144 Menschen das Leben. In den letzten Jahren stieg vor allem im Bereich der Alpen die Zahl der extremen Massenbewegungen stark an. Der katastrophale Herbst 2000 mit extremen und langanhaltenden Niederschlägen führte in der Schweiz und Norditalien zu hunderten von Rutschungen und Schlammströmen. Trauriger Höhepunkt war die Zerstörung des kleinen walliser Ortes Gondo durch eine Hangrutschung am 14. Oktober 2000, wobei 13 Menschen ums Leben kamen. Zwei Jahre später wurden ebenfalls durch langanhaltende extreme Niederschläge etwa 1000 Rutschungen in der Schweiz ausgelöst, hunderte davon im Bereich der Zentral- und Ostschweiz. Schon seit Jahren läßt sich eine starke Zunahme der Naturkatastrophen, speziell extremer Ereignisse beobachten. Nach dem im Oktober 2004 veröffentlichten "Weltkatastrophenbericht 2004" der Internationalen Rotkreuz- und Rothalbmond-Förderation



Abb.35: Zunahme der Rutschungen am Beispiel Rheinhessen (KRAUTER & MATTHESI-US, 1994).

(IFRC) hat sich die Anzahl von Todesopfern durch Naturkatastrophen weltweit auf 76.800 erhöht, was einer Verdreifachung gegenüber dem Jahr 2002 entspricht. Insgesamt waren ca. 255 Millionen Menschen durch Naturkatastrophen betroffen, wobei die Schäden auf über 44 Milliarden Euro geschätzt wurden. Problematisch ist in dieser Hinsicht aber nicht allein die Zunahme der Naturgefahren, sondern die Verbindung mit einer zunehmenden Besiedlungsdichte (BERZ, 1998) und einer Konzentration von volkswirtschaftlichen Werten, was sich in einem extrem starken Anstieg der volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturkatastrophen widerspiegelt (Abb.36, Abb.37). Selbst in Deutschland sind Milliardenschäden durch Naturereignisse keine Besonderheit mehr. Nach der Münchner Rück Versicherung (1999, 2003) nimmt die Tendenz von volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturgefahren auch in Zukunft weiterhin stark zu (Abb.36). Nach der "Naturkatastrophen Statistik 2003" der Münchner Rück



Abb.36: Die Trendkurve dokumentiert die Zunahme der volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden durch Naturkatastrophen seit 1950 (Münchner Rück, 2003).



Abb.37: Statistik der Naturkatastrophen 2003. Die obere Grafik zeigt die Anzahl der Schadensereignisse und Todesopfer, die untere Grafik die volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden.

liegen die Elementarschadensereignisse im Bereich Erdrutsche bei mehr als 40 Ereignissen und über 400 Todesopfern weltweit. Für Deutschland beträgt der Anteil der Erdrutsche etwa 1% am gesamten volkswirtschaftlichen Schaden durch Naturkatastrophen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß nur einzelne extreme Rutschungsereignisse aufgeführt werden, d.h. durch andere Naturkatastrophen (Stürme, extreme Niederschläge, Erdbeben) ausgelöste Rutschungen, bzw. andere Massenbewegungen (Felssturz, Steinschlag) werden in dieser Statistik nicht berücksichtigt. Es ist also anzunehmen das die weltweiten Schäden durch Hang- und Massenbewegungen wesentlich höher sind. Hauptursache für die zunehmenden Hang- und Massenbewegungen sind hauptsächlich zwei Phänomene. Zum einen die Klimaänderung, die langfristig die Stabilität großer Rutschareale ändert, zum anderen die zunehmende Besiedlungsdichte in durch Naturgefahren gefährdeten Gebieten (Abb.41). Die Klimaänderung zeigt sich vor allem durch die Erwärmung der Atmosphäre. Weltweit konnte im 20. Jahrhundert ein Temperaturanstieg im Mittel von 0,6° beobachtet werden (Abb.38), der in lokalen Bereichen Mitteleuropas mit bis zu 1,5° sogar deutlich über diesem globalen Mittel liegt (BUWAL,



Abb.38: Temperaturentwicklung Die obere Grafik zeigt den Verlauf der Temperatur während der letzten 1000 Jahre, die untere Grafik zeigt die potentielle Temperaturentwicklung bis ins Jahr 2100 (BUWAL, 2002; Quelle: IPCC).

2002). Der Temperaturanstieg führt zu einer für die Hangstabilität gefährlichen Verstärkung des Wasserkreislaufes. Dabei lassen sich mehrere Klimaphänomene beobachten. In den Alpen führt die Erwärmung nicht nur zu einer Verkleinerung der Gletscher, sondern auch zu einem Rückzug der Permafrostgrenze nach oben. Dadurch ergeben sich in Bezug auf Massenbewegungen unterschiedliche Problemstellungen. Durch das Abtauen von Permafrostgebieten werden Schuttmassen freigesetzt, die in Verbindung mit Wasser zu Massenbewegungen führen können (SPRINGMAN, 2003). Anhand von Laborversuchen konnte zudem im Rahmen des Forschungsprojektes "Permafrost and Climate in Europe" festgestellt werden, wie sich die Stabilität von Fels aufgrund von Auftauvorgängen verändert. Das Ergebnis zeigt, daß der Fels die geringste Festigkeit schon bei Temperaturen zwischen -1 und -2° erreicht, so daß schon eine geringe Erwärmung zur Destabilisierung von Felswänden und damit zu einer Gefährdung durch Felsstürze und Steinschläge führen kann. Die Zunahme der Temperatur führt zudem dazu, daß die Form der Niederschläge und die Schneedeckenhöhe sich verändert. Im Winter lassen sich mehr Niederschläge in Form von Regen als von Schnee beobachten, wodurch Wasser, das sonst als Schnee oder Eis gebunden war, nun als Bodenwasser zur Verfügung steht (RAETZO & LATELTIN, 2003). Durch die in den letzten Jahren beobachtete Schwächung, bzw. das komplette Fehlen der Kältehochs über Mitteleuropa, die die atlantischen Sturmtiefs nach Norden oder Süden ablenkten, konnte darüber hinaus mehr feuchte Luft auf das kontinentale Festland geleitet werden. Ähnliches läßt sich im Bereich der Alpen beobachten, wo durch das gelegentliche Ansteigen der 0°-Grenze mehr Luftfeuchtigkeit aus dem mediterranen Raum über die Alpen gelangt. Hinzu kommt für Deutschland eine Zunahme der Starkniederschlagstage, verbunden mit einem



Abb.39: Phasen verschiedener Standsicherheit (η) von Hängen mit Trend zur generellen Standsicherheitsverringerung (aus KRAUTER, 1994; nach THERZAGI, 1950).

Anstieg der Starkniederschlagsmenge und -intensität, die im Winter insgesamt stärker ausfällt (GRIESER & BECK, 2002). Dabei konnten GRIESER & BECK (2002) beobachten, daß im Raum Deutschland die Starkniederschlagsmenge stärker zugenommen hat als die Zahl der Tage mit Starkregenereignissen, d.h. pro Niederschlagstag fallen zwischen 2 und 43% mehr Niederschläge. Gerade langanhaltende Starkniederschlagsereignisse führen zu katastrophalen Hang- und Massenbewegungen. Für die Zukunft (Entwicklung bis ins Jahr 2100) prognostiziert die "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) einen Temperaturanstieg von +1,4 bis +5,8 °C gegenüber dem Jahr 1990, verbunden mit einer grundsätzlichen Zunahme der Niederschläge in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel (PLANAT, 2003), sowie einer steigenden Anzahl starker Niederschlagsereignisse. Die Eintretenswahrscheinlichkeiten werden von der IPCC mit 90-99% angegeben. Das heißt, längerfristig wird mit einer steigenden Anzahl von Hang- und Massenbewegungen und speziell mit Extremereignissen zu rechnen sein. Für Rheinhessen konnte ebenfalls eine Zunahme der Rutschungsereignisse in den letzten 50 Jahren beobachtet werden (Abb.35). So sind inzwischen mehr als 8% der Fläche des Main-





zer Beckens potentiell rutschgefährdet, was einer Fläche von etwa 11.000 von insgesamt 140.000 ha entspricht (KRAUTER & STEINGÖTTER, 1983). Auch in Rheinhessen führt der Anstieg der Wohnfläche/Kopf verbunden mit einer verstärkten Wanderung ins Umland zu einer vermehrten Bebauung von Hanglagen, wobei zum Teil selbst ehemalige Rutschgebiete betroffen sind.

Nach KRAUTER (1994) hat ein Hang, bedingt durch externe Faktoren, verschiedene Phasen von höherer oder niedrigerer Standsicherheit, so daß im Laufe der Zeit der Standsicherheitsfaktor des Hanges gegen η =1 geht (Abb.39). Damit gibt es nach KRAUTER (1994) über längere Zeit gesehen keine stabilen Hänge. Deshalb muß in Zukunft versucht werden, durch die Entwicklung von Risiko- und Gefahrenkarten, in Verbindung mit Risikoanalysen und Gefahrenmodellen, gefährdete Rutschareale zu erkennen und das potentielle Risiko für den Menschen und seine Güter so gering wie möglich zu halten (Abb.40).





3.3 Naturgefahr, Risiko, Gefahrenstelle

Risiko, Gefahr, Schaden, etc. sind Begriffe, die einem im alltäglichen Leben ständig begegnen und mit denen sich die verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen beschäftigen. Dadurch ergeben sich für diese Begriffe oft recht individuelle Definitionen, die unter Umständen weit auseinanderliegen können. Daher ist es wichtig für einen wissenschaftlichen Umgang mit diesen Ausdrücken eine einheitliche Terminologie zu finden, die Mißverständnisse verhindert. Deswegen wurde für diese Arbeit auf die Begriffsdefinitionen zu Naturgefahren nach KIEN-HOLZ, H. & ZEILSTRA, P. & HOLLENSTEIN, K (1998) zurückgegriffen.

Nach VARNES et al. (1984) ist eine Naturgefahr die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Prozesses, z.B. eines Felssturzes, mit einer bestimmten Intensität, innerhalb eines bestimmten Gebietes und Zeitraumes, aus dem ein Schaden entstehen kann. Ist eine solche Naturgefahr, die einen bestimmten Ort (Gefahrenstelle) bedroht, gegeben und zusätzlich die Wahrscheinlichkeit vorhanden, daß sich ein Objekt von bestimmten Wert an diesem Ort befindet, dann besteht ein Risiko. Demnach ist das potentielle Risiko "die Wahrscheinlichkeit mit der ökonomische und soziale Konsequenzen aus einer Naturgefahr entstehen" (VARNES et al., 1984). Das heißt, das Risiko ist das Maß für die Größe und relative Häufigkeit eines potentiellen Schadens durch eine Naturgefahr und ist somit abhängig von dem Ausmaß der Naturgefahr und dem Wert von potentiell vorhandenen Objekten im Bereich der Gefahrenstelle. Dies wird auch mitbestimmt durch die Verletzlichkeit (vulnerability) der Objekte, also der Eigenschaft eines Objektes, Beanspruchungen durch gefährliche Prozesse nicht schadensfrei zu überstehen. Zur Einschätzung und gegebenenfalls auch Quantifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeit und des zu erwartenden Schadens kann eine Risikoanalyse durchgeführt werden, die im Idealfall als Ergebnis das effektive Risiko ermittelt. Da die Risikoanalyse in der Regel aber nur eine Annäherung an die tatsächlichen Begebenheiten darstellt, erhält man meistens nur das ermittelte Risiko. Die Differenz von effektivem- und ermitteltem Risiko fließt mit in das Restrisiko ein, das ein akzeptables Maß an Gefährdung, bzw. zu erwartendem Schaden beinhaltet und in kauf genommen werden kann. Das Restrisiko kann als das Risiko betrachtet werden, das nach der Durchführung aller geplanten Schutz- und Sicherungsmaßnahmen noch übrig bleibt. Es setzt sich zusammen aus bewußt in Kauf genommenen Risiken, falsch beurteilten Risiken und nicht erkannten Gefahren (BUWAL, 1999). Dieser Zustand kann dann auch als relative Sicherheit bezeichnet werden. Eine absolute Sicherheit, bei der jegliche Gefährdung fehlt, ist praktisch nicht möglich.



Abb.42: Beziehung und logische Abfolge der Gefahren- und Risikoanalyse (nach PETAK & ATKISSON, 1982; aus DIKAU, 1992).

Im Gegensatz zur Gefahrenabschätzung, die in der Regel eine rein geowissenschaftliche Arbeit ist, wird die Risikoanalyse stark von ökonomischen und politischen Faktoren geprägt (Abb.42). Unter dem Ausmaß einer Naturgefahr versteht man die Intensität eines Prozesses (Auswirkung einer Rutschung auf die Gefahrenstelle), die allgemeine Größe des stattfindenden Prozesses (Größe der Rutschung), die Dauer (Kriechen oder Fallen), die Bewegungsenergie, die der Prozeß besitzt und gegebenenfalls die mögliche Wirkung (das Ausmaß des Schadens) auf die Gefahrenstelle. Nach KIENHOLZ (1992) kann dabei zwischen drei Arten von Prozessen unterschieden werden. Zum einen kontinuierliche Prozesse, die in der Regel langsam und über größere Zeiträume ablaufen (Talzuschübe, Bodenkriechen), so daß in der Regel für den Menschen keine Gefahr besteht. Trotzdem können diese Prozesse große materielle Schäden verursachen und zusätzlich einmalige Prozesse auslösen. Zum anderen einmalige Prozesse, bei denen es sich um Vorgänge handelt, die sich in einem bestimmten Gebiet nur einmal innerhalb eines größeren Zeitraumes zutragen. Dabei kann es zu dem Problem kommen, daß sich gefährliche Ereignisse nicht immer so einfach zuordnen lassen. So ist ein Felssturz zunächst ein einmaliger Prozeß, da sich an der gleichen Stelle höchstwahrscheinlich kein Gesteinsmaterial mehr lösen kann. Auf eine ganze Felswand bezogen, an der immer wieder Felsstürze abgehen, kann es sich aber durchaus um ein wiederkehrendes Ereignis handeln (KIENHOLZ, 1992). Für die Gefahrenbetrachtung von Rutschungen, Felsstürzen und

Steinschlägen wäre es also wichtig diese Prozesse, bezogen auf einen bestimmten Bereich, nicht als einmalig anzusehen, sondern in die dritte Gruppe der sporadischen und periodischen Prozesse zu stellen. Bei den periodischen Prozessen handelt es sich um nicht kontinuierlich auftretende Ereignisse, die an Regelmäßigkeit grenzend mit statistisch nachvollziehbarer Frequenz immer wieder auftreten. Die Periode zwischen zwei Ereignissen ist dabei keine Konstante, sondern ein statistischer Mittelwert. Im Gegensatz dazu ist ein sporadischer Prozeß ein Ereignis, das in keinster Weise auch nur annähernd regelmäßig ist. Darunter fallen erstmalig auftretende Prozesse, die zwar periodisch sein können, deren Erfassungszeitraum aber zu kurz ist, um dies zu erkennen.

3.4 Gefahrenbeurteilung, Dispositionsmodelle, Prozeßmodelle

Um die Sicherheit von Menschen aber auch von materiellen Werten innerhalb einer Gefahrenstelle zu erhöhen, ist es wichtig umfassende und vor allem richtige Gefahrenbeurteilungen zu treffen. Dabei sollte die Beurteilung nicht nur ein hohes Maß an Genauigkeit enthalten (mit zunehmender Genauigkeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Richtigkeit einer Beurteilung), sondern darüber hinaus auch durchschaubar und nachvollziehbar sein, damit Aussagen und Schlußfolgerungen diskutiert und gegebenenfalls modifiziert werden können. Dies setzt voraus, daß Methoden und Analyseverfahren konkret gewählt und Bewertungskriterien klar umrissen werden. Zusätzlich müssen Zeit- und Kostenaufwand für die Erstellung einer Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden, d.h. die Kosten die anfallen (Materialkosten, Lohnkosten etc.) müssen in Relation zum Ergebnis, also der Gefahrenbeurteilung, stehen. Um eine entsprechende Genauigkeit zu erreichen, müssen die gefährlichen Prozesse, die innerhalb eines bestimmten Gebietes ablaufen könnten, bekannt sein. Dies ist in der Praxis allerdings schwierig, da entsprechende Bewertungen in erster Linie auf analytischen Ansätzen beruhen, die oft schwer zu erfassen sind und hohe Ansprüche an die aufzunehmenden Parameter stellen. Bei Rutschungen würde das im Ideal zur Erklärung der Prozeßmechanik und der damit verbundenen Kräfte führen. Damit ließe sich dann z.B. der Sicherheitsfaktor F berechnen, der die Hangstabilität definiert (der Faktor F bildet das Verhältnis zwischen resistenten und zerstörenden Kräften). Um das zu erreichen, sind detaillierte Analyseverfahren (Bohrungen, detaillierte Geländeaufnahmen, Laborarbeiten) nötig, die erstens teuer und zweitens sehr zeitaufwendig sind. Noch schwieriger wird es, wenn mehrere Einflußparameter kombiniert wirken, da diese dann kaum mehr berechen- oder erfaßbar sind, bzw. die Berechnung zu aufwendig wäre. Schließlich sind da noch die Faktoren Natur und Mensch (menschliche Eingriffe in die Natur), die sich im Laufe der Zeit verändern können und die in der Regel nicht vorhersehbar sind. Letztendlich läßt sich die Richtigkeit, bzw. Genauigkeit einer Gefahrenbeurteilung nur beim Eintritt des Ereignisses überprüfen, weshalb es wichtig erscheint, die in der Vergangenheit und Gegenwart erfolgten Ereignisse auszuwerten und zu analysieren, um damit die Beurteilung kritisch zu hinterfragen. Bei der rückwärtsgerichteten Betrachtung muß allerdings davon ausgegangen werden, daß ein schon mal erfolgtes Ereignis sich in ähnlicher Weise oder in gleicher Form wiederholen kann. Dies ist dann auszuschließen, wenn sich die Bedingungen, die zu den erfolgten Prozessen führten, geändert haben. Es zeigt sich, daß auch die Frage nach der Zeitlichkeit nicht unwichtig ist, denn wie DIKAU (1993) betont, kann eine Zeitreihenanalyse in Verbindung mit den auslösenden Prozeßfaktoren zu zeitlichen Wahrscheinlichkeitsmodellen führen. Dem folgt natürlich auch die grundsätzliche Fragestellung "Was kann passieren ?" und vor allem "Wann ?" unter Berücksichtigung des Ist-Zustandes der Umwelt eines gefährdeten Bereiches (Abb.43). Dabei wird zunächst davon ausgegangen, daß sich der momentane Zustand der vorherrscht in die Zukunft übertragen läßt, d.h. die Abläufe, die an einem bestimmten Ort zu einer Naturkatastrophe führen könnten, sind in der Gegenwart die gleichen wie in der Zukunft. Die Antwort auf das "Was kann passieren ?" ist also im Prinzip nur eine Bestandsaufnahme des Zustandes eines gefährdeten Bereiches (Ort, Ausmaß, Gefahrenprozesse, Prozeßmechanismen, etc.). Schon bei dieser einfachen Fragestellung stößt man auf Schwierigkeiten. Noch problematischer wird es, wenn der zeitliche Aspekt, also die Frage nach dem "Wann ?", hinzukommt. Hier müssen nun auch die mögli-



Abb.43: Sicherheitsfragen zur Risikoanalyse (DIKAU, 1992).

chen auslösenden Prozeßmechanismen und ihre Grenzwerte (Werte bei denen ein vorhandenes Gleichgewicht überschritten wird, so daß sich gefährliche Prozesse in Gang setzen können) berücksichtigt werden. Kaum mehr zu beantworten sind weiterführende Fragestellungen wie z.B. "Was könnte passieren wenn...?" und "Was könnte wann passieren, wenn...?", da hier nun auch mögliche Veränderungen der Umwelt (z.B. Klima, anthropogene Eingriffe, Vegetation) im engsten Bereich eines Gefahreneinzugsgebietes, aber auch weiträumige Veränderungen, mit einbezogen werden. Mit der Umwelt könnten sich auch die Eigenschaften eines Gefahrenbereiches ändern, die direkten Einfluß auf den Ablauf von Prozeßmechanismen haben. Damit tauchen zwei zusätzliche Begriffe auf, nämlich die "Disposition", also die Veranlagung eines Gebietes zu einem gefährlichen Prozeß und das "auslösende Ereignis", das schließlich zu dem gefährlichen Prozeß führt. Bei der Disposition wird die Grunddisposition von der aktuellen Disposition unterschieden. Die Grunddisposition ist dabei über größere Zeiträume mehr oder weniger konstant und wird durch die naturräumlichen Verhältnisse bestimmt (Geologie, Morphologie, Klima). So ist die Gefahr von Rutschungen in Regionen mit tonigen Lockergesteinen größer als in Regionen mit kiesigen Lockergesteinen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der aktuellen Disposition um kurzfristige, vorübergehende Schwankungen der Disposition, die z.B. durch einen hohen Wassergehalt in tonigen Lockergesteinen verursacht werden können (hoher Wassergehalt = hohe Disposition). Das "auslösende Ereignis" ist dann die Ursache, die bei einer aktuellen Disposition zur Auslösung eines gefährlichen Prozesses führt, also z.B. ein Starkregen, der eine Rutschung oder einen Felssturz auslöst. Die aktuelle Disposition ist dann der Maßstab für die Größe und Intensität eines Ereignisses, das vorhanden sein muß, um einen gefährlichen Prozeß in Gang zu setzen. Bei der Gefahrenbeurteilung wird zunächst nur die Grunddisposition berücksichtigt. Wenn aber auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Ereignissen mit einbezogen werden soll, müssen ebenfalls die Veränderungen der aktuellen Disposition, sowie die Häufigkeit von auslösenden Ereignissen berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Grunddisposition können Dispositionsmodelle (statische Modelle) erstellt werden, die die Veranlagung einer Fläche zu einem gefährlichen Prozeß, bzw. zu einer Rutschung ermitteln (KIENHOLZ, 1992). Die Modelle werden zum einen entwickelt aus Kenntnissen über vorhandene physikalische Rahmenbedingungen, die für die Auslösung eines gefährlichen Prozesses verantwortlich sind, also durch einen deterministischen Ansatz, zum anderen aufgrund schon abgelaufener Prozesse, wodurch Charakteristika ermittelt werden können, die physikalisch nicht oder noch nicht geklärt sind (Abb.44). Dies ist oft der Fall, da geomorphologische Prozesse, bzw. ihre

auslösenden Ursachen sehr komplex und oft schwer nachvollziehbar sind. Dispositionsmodelle werden heute häufig in geographischen Informationssystemen (GIS) eingesetzt, die Raumdaten verwalten, kombinieren und in Form von Karten darstellen können. Um die Disposition eines Gebietes zu untersuchen, sind umfangreiche Ausgangsdaten notwendig, die zum einen durch Geländebegehungen ermittelt (Geologie, vorhandene Rutschungen), zum anderen durch computergestützte Methoden berechnet werden können (Hangneigung, Hangform). Durch Überlagerung der Daten mit Hilfe qualitativer oder quantitativer Methoden (Kap.6) kann die Disposition dann flächendeckend bestimmt und eine Gefahrenklassifizierung durchgeführt werden. Eine andere Möglichkeit zur Gefahrenbeurteilung bieten Prozeßmodelle (dynamische Modelle), die gefährliche Prozesse simulieren, um Aussagen über Geschwindigkeit, Energie oder Ausmaß zu bekommen (KIENHOLZ, 1992). Die dazu nötigen Berechnungen müssen entweder mit physikalischen oder aber mit empirischen Modellen durchgeführt werden. Die Modellierung ist allerdings oft sehr schwierig, da die Vorgänge während dem Ablauf gefährlicher Prozesse sehr kompliziert sind und nicht im Detail berechnet werden können. Deshalb behilft man sich mit vereinfachten Modellvorstellungen, oder wenn auch das nicht möglich ist, nur mit empirischen Modellen, die sich zwar an physikalischen Gesetzen

orientieren, aber auf Feldbeobachtungen basieren. Solche Prozeßmodelle können heute mit Hilfe von Computern simuliert und aufgrund ständig steigender Rechnerleistungen sogar dreidimensional dargestellt werden. Beispielhaft dafür sind die heute gängigen Steinschlagsimulationsprogramme, z.B. Rockfall der Firma Rocscience, die Standort, Höhe und Dimensionierung von Fangzäunen berechnen können. Eine andere Möglichkeit Rutschungsprozesse zu simulieren bieten sogenannte fotoplastische Modelle, die aus Gelen auf der Basis von Agar-Agar (Meeresalgenextrakt) bestehen (RYBAR, KOSTAK, MALEK; 1997). Diese physikalischen Modelle wurden entwickelt um den Werdegang tiefgreifender Hangdeformationen zu klären, was in natura nicht immer realisierbar ist. Durch spezielle Techniken, wie das Einfrieren des Spannungszustands in einer Zentrifuge, können zudem auch der Einfluß des Eigenge-



wichts, sowie eine 3D-Belastung auf das Massiv untersucht werden. Ein weiterer Vorteil solcher physikalischen Modelle ist, daß die Untersuchung in realer Zeit durchgeführt werden muß, wodurch der Zeitmaßstab C im fotoplastischen Modell extrem hohe Werte erreicht, so daß Prozesse im geologischen Zeitmaßstab abgebildet werden (RYBAR, KOSTAK, MALEK; 1997). Damit ist die Möglichkeit gegeben auch extrem langsame, tiefgreifende Hangbewegungen oder tektonische Prozesse annähernd naturgetreu zu simulieren und die damit verbundenen Mechanismen zu klären (RYBAR, KOSTAK, MALEK; 1997).

3.5 Gefahrenkarten, Gefahrenhinweiskarten

Um einen verantwortungsvollen Umgang mit Naturgefahren und im Speziellen mit Georisiken (Rutschungen, Bergstürze, Steinschläge, Muren) zu erzielen ist die Erstellung von Gefahrenkarten eine grundlegende Voraussetzung für eine sinnvolle Planung von Schutz- und Sicherungsmaßnahmen (Abb.45). Die Gefahrenkarte stellt die zum Zeitpunkt der Aufnahme vorhandenen Bedrohungen durch Georisiken, sowie deren Ausmaß (Intensität und Ausdehnung) da und ist damit zugleich eine Art Eignungskarte, die Gebiete aufzeigt, die durch



Abb.45: Beziehung zwischen Hangrutschungsforschung, Gefahrenkarten und Gefahrenreduzierung (DIKAU, 1993).

drohende Naturgefahren gar nicht oder nur bedingt nutzbar sind. Sie dient hauptsächlich als wissenschaftliche Grundlage für Fachleute, politische Instanzen, sowie private Grundstückseigentümer, bei der Durchführung raumplanerischer Maßnahmen (Bauvorschriften, Bebauungspläne, Flächennutzungspläne), raumwirksamer Tätigkeiten (Bauvorhaben), sowie zur Planung von Schutzbauten und Sicherungsmaßnahmen (LÜTHI, 2004). Bei der Maßnahmenplanung kann sie als Grundlage zur Schadensminimierung, Gefahrenverringerung und Minimierung des Restrisikos herangezogen werden.

Dabei ist die Grundvoraussetzung zur Gefahrenminderung, daß die Flächennutzung der Gefahr angepaßt wird, d.h. in der Regel ist es kostengünstiger gefährdete Gebiete nicht zu bebauen, als nachträglich für teure Schutz- und Sicherungsmaßnahmen zu sorgen. Nur dort, wo eine anthropogene Nutzung unumgänglich ist, können bauliche Maßnahmen unter strengen Auflagen durchgeführt werden. Daß dies aber heute noch immer keine Selbstverständlichkeit ist, zeigt sich an vielen Beispielen im alpinen Raum. Gefahrenkarten können anhand ihres Maßstabes unterteilt werden in Gefahrenkarten im eigentlichen Sinne und Gefahrenhinweiskarten (Abb. 46). Gefahrenhinweiskarten liegen meist im Maßstabsbereich zwischen 1:10.000 und 1:50.000, wobei oft auf den Maßstab 1:25.000 zurückgegriffen wird. Diese Karten bieten vor allem im regionalen Bereich, Überblick über die vorhandenen oder potentiellen Naturgefahren. Gerade die Ermittlung potentieller Gefährdungen mit Hilfe quantitativer oder qualitativer Methoden (Kap.6) von Hangbereichen, die bis dahin noch nicht auffällig für Hang- und Massenbewegungen waren, ist ein wichtiger Aspekt, da kartierte Naturgefahren in der Regel nicht flächendeckend, sondern nur punktuell vorhanden sind. Im Idealfall sollte die Gefahrenhinweiskarte zum einen die modellierte potentielle Gefährdung für die jeweilige Naturgefahr durch unterschiedliche Farben darstellen, zum anderen die vorhandenen und be-

ANGEMESSENE TIEFE DER GEFAHRENBEURTEILUNG	PLANUN NATIONAL	GS-/UNT REGIONAL	ERSUCHUNG LOKAL	S E B E N E PUNKTUELL
Niveau 1: Übersicht Niveau 2: Hinweise Niveau 3: Gefahrenstufen Niveau 4: Detailaussagen	*			*
KARTENTYP	Gefahren- Übersichtskarte	Gefahren- Hinweiskarte	Gefahrenkarte	Detailplan
korrespondierender Karten- oder Planmassstab	1 : 500000 1 : X Mio	1 : 25000 1 : 100000	1 : 1000 1 : 10000	1 : 100 1 : 500
Beispiel	Lawinengefährdete Gebiete 1:300080 Schweiz	Gefahren- Hinweiskarte 1 : 25000 Gündlischwand	Gefahrenkarte 1 : 10000 7 Grindelwald	z.B. Detailplan für einen bestimmten Rutschhang

Abb.46: Notwendige fachliche Tiefe der Gefahrenbeurteilung in Abhängigkeit von der Planungs- und Untersuchungsebene (KIENHOLZ, 1992).

kannten gefährlichen Prozesse im Sinne eines Inventars aufzeigen. Dabei ist wichtig, daß diese mit entsprechenden Bearbeitungsnummern versehen sind, über die dann aus Datenbanken nähere Information, wie Art, Größe oder Umfeld bezogen werden können. Im Gegensatz dazu sollten Gefahrenkarten kleinere Gebiete, meist angepaßt an den Flächennutzungsplan im Maßstab 1:5.000, abdecken. Aufgrund des kleineren Maßstabs ist es möglich mehr Informationen in die Karte zu packen. Auch hier können Gefährdungsklassifizierungen modelliert werden, um eine flächendeckende Gefahreneinstufung zu bekommen, wobei aufgrund des Maßstabes genauere Modelle (Kap.8), die auch geotechnische Parameter berücksichtigen, angewandt werden können. Darüber hinaus sollten in Gefahrenkarten die beobachteten Ereignisse, d.h. die Art der Massenbewegung, deren Umfang und Wirkungsbereich, sowie Schäden, Abrißkanten mit Höhenangaben, die relative Gleitflächentiefe (flach-, mitteloder tiefgründig), und bei Rutschungen wenn möglich auch die relative Bewegungsgeschwindigkeit (sehr langsam, langsam, aktiv) eingetragen werden (KIENHOLZ, H. & KRUM-MENACHER, B., 1995). Zusätzlich können vorhandene Rammkern- und Rammsondierungen, Dränagen, sowie Schutzbauten und Sicherungsmaßnahmen vermerkt werden. Objekte, die außer ihrer räumlichen Lage noch weitere Informationen in Form von Datenbanken enthalten (z.B. Bohrprofile, Laborversuche) sollten mit Code-Nummern gekennzeichnet werden, um eine eindeutige Zuordnung zu den entsprechenden Daten zu gewährleisten. Hierbei muß beachtet werden, daß Karten im üblichen Sinn, also Papierkarten nur noch ein Nebenprodukt sind, da digitale Raumdatenverwaltung mit Hilfe von Geoinformationssystemen (Kap.4) im Vordergrund steht. Damit lassen sich die entsprechenden Daten zu den jeweiligen Geoobjekten schnell und einfach abfragen. Vorteile bietet auch die Möglichkeit raumbezogene Daten (Geologie, Vegetation, Landnutzung, Gefahren, Infrastrukturen, Landnutzung) auf verschiedenen Layern (Ebenen) zu speichern, um so durch die Layertechnik (Ein- und Ausschalten einzelner Layer) die gewünschte Informationsdichte zu bekommen. Gefahrenhinweiskarten, wie auch Gefahrenkarten sollten zudem als Grundlage Informationen zur Topographie in Form von digitalen Geländemodellen (DGM), Luft- und Satellitenbilder, sowie geologische und geomorphologische Karten beinhalten. Wichtig ist dabei eine standardisierte und möglichst genaue Datenaufnahme, die immer nachvollziehbar und aktuell bleiben muß. Ein wichtiger Aspekt, der oft vernachlässigt wird, ist die Frage nach der Verbindlichkeit von

Gefahrenkarten (LÜTHI, 2004; PLANAT 1998). Es reicht nicht aus Gefahren nur zu lokalisieren und in Form von Karten darzustellen, sondern es müssen auch die Konsequenzen die sich daraus ergeben, sowie der Umgang damit, diskutiert werden. Grundsätzlich besteht in
Deutschland für Gefahrenkarten, bzw. Gefahrenzonierungen, kein rechtlicher Rahmen, wobei die Einführung einer Rechtsverbindlichkeit nur durch größere Gesetzesänderungen über alle politischen Ebenen (Bund, Land, Gemeinde) möglich wäre. Eine Rechtsverbindlichkeit hätte allerdings auch größere Auswirkungen auf kommunaler und privater Ebene, wie bessere Planungssicherheit, Erhöhung der Sicherheit für Leben und Sachwerte, aber auch sinkende Grundstückspreise oder Bauverbote. Umgekehrt führt eine fehlende Rechtssicherheit zur Verunsicherung und mangelnder Gefahrenminimierung. In der Schweiz sind die Behörden durch ein Raumplanungsgesetz schon seit 1979 verpflichtet, bei raumwirksamen Tätigkeiten, Naturgefahren zu berücksichtigen. In den 90iger Jahren kamen entsprechende Gesetze hinzu, die die Kantone, sowie den Bund zur Aufstellung von Gefahrenkatastern, Gefahrenkarten und entsprechenden technischen Richtlinien verpflichten (LÜTHI, 2004; STÖTTER et al., 1998). Aufgrund der gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland besitzt die Gefahrenkarten nur Hinweischarakter und muß nicht zwingend berücksichtigt werden. Dadurch ergibt sich gerade in Bezug auf die steigende Zahl von Naturgefahren und die zunehmende Besiedlung von gefährdeten Gebieten ein intensiver Diskussionsbedarf.

3.6 Gefahrenstufen-Diagramme

Eine weitere Möglichkeit Naturgefahren zu bewerten und zu klassifizieren bieten Gefahrenstufen-Diagramme (Abb.47), die den Grad der Gefährdung mit Hilfe der Intensität und der Wahrscheinlichkeit, in Form von Gefahrenstufen, die in einer Matrix zusammengefaßt sind, darstellen. Die Intensität beschreibt die Stärke und das Ausmaß, sowie die Schadenswirkung in Bezug auf besiedeltes Gebiet, eines gefährlichen Prozesses. Sie kann in drei Stufen unterteilt werden (schwach, mittel, stark) und orientiert sich bei Fallprozessen nach der kinetischen Energie der Sturzmassen und bei Rutschungen nach der Bewegungsgeschwindigkeit.

Die Wahrscheinlichkeit zeigt die Häufigkeit, bzw. die Periode, in der ein gefährlicher Prozeß erneut eintritt, auf. Im Gegensatz zur Intensität sind bei Massenbewegungen die Angaben zur Wahrscheinlichkeit kritisch zu betrachten, da es sich dabei um Vorgänge handelt, die sich normalerweise an Ort und Stelle nicht wiederholen. Ausgenommen davon sind Steinschläge und Muren, deren Wiederkehrperiode in der Regel an auslösende, sich periodisch wiederholende, Wetterereignisse gebunden sind. Darum wird die Wiederkehrdauer auf die Nutzungsdauer eines gefährdeten Objektes bezogen. Die Eintretenswahrscheinlichkeit läßt sich durch die Gleichung 1, die empirisch aufgrund von Steinschlägen, Felsstürzen, Muren und Lawinen erstellt wurde, beschreiben.

$$p = 1 - (1 - \frac{1}{T})^{n} \qquad (Gl.1)$$

P = Eintretenswahrscheinlichkeit

n = betrachtete Nutzungsperiode

T = Wiederkehrperiode des Ereignisses

Die Gleichung zeigt, daß die Eintretenswahrscheinlichkeit, bzw. das Restrisiko, auch dann noch nicht vernachlässigbar ist, wenn die Wiederkehrperiode sehr hoch ist. Die Klassengrenzen der Wiederkehrperiode können dabei als Maß für die Wahrscheinlichkeit betrachtet werden. Mit der Eintretenswahrscheinlichkeit lassen sich also Aussagen über die Sicherheit eines Objektes vor Naturgefahren treffen. Bei Rutschungen ist die Eintretenswahrscheinlichkeit im Prinzip nicht bestimmbar. Allerdings werden Rutschungen oft durch besondere Wetterverhältnisse (länger anhaltende Starkregen, Niederschläge in Verbindung mit Schneeschmelze) ausgelöst, so daß man die Wahrscheinlichkeit von Rutschungen mit der Eintretenswahrscheinlichkeit (für Rutschungen wird nur auf die Intensität zurückgegriffen) kann dann der Gefährdungsgrad bestimmt und in einer Karte farblich dargestellt werden (Abb.47).



Abb.47: Intensitäts-Wahrscheinlichkeitsdiagramme (BUWAL, 1997).

4. Digitale Geländemodelle

4.1 Definition

Als Ausgangspunkt für die Ableitung von Reliefparametern nach reliefanalytischen, bzw geomorphologischen Kriterien, die raumgestützte Berechnung und Analyse, sowie die Visualisierung und Präsentation (3D-Modelle, virtuelle Rundflüge, photorealistische Ansichten, Abb.49), dient das Digitale Geländemodell (DGM), im englischen auch als "digital terrain model" (DTM) bezeichnet. Es stellt die Menge der Höhenwerte als Funktion der Lage ihrer Stützpunkte da (BILL, 1999). Nach der Definition von MOORE, GRAYSON, LADSON (1992) ist ein Digitales Geländemodell (DGM) die Repräsentation einer Geländeoberfläche durch digital abgespeicherte x, y, z Werte, wobei die x, y-Werte die horizontale Position angeben, und z die Höhe (Abb.49 und Abb.50). In neuerer Zeit wird auch oft der Begriff Digitales Höhenmodell (DHM) benutzt, in der englischen Sprache auch "digital elevation model" (DEM) genannt. Dabei wird das DHM als eigentliches Datenmodell verstanden, was durch Interpolationsverfahren aus digitalen Höhendaten berechnet wird und die Höhe einer Oberfläche inklusive aller auf ihr vorhandenen Objekte (Vegetation und Bebauung) wiedergibt (Abb.48). Dementsprechend muss ein DHM nicht zwangsläufig die Erdoberfläche darstellen, sondern kann auch die Vegetations-, Grundwasseroberfläche etc. nachbilden (Abb.48).



Abb.48: DHM mit der Oberflächer der Bebauung und Vegetation (Laserscanning-Daten).

Das DGM hingegen beschreibt, nach der Definition des "Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum" (DFD), nur die topographische Oberfläche der Erde. Nach dem "Hessischen Landesvermessungsamt" enthält das DGM zudem linienhafte Elemente zur zusätzlichen Beschreibung von z.B. Geländekanten, Dämmen, Gräben, Felsausbissen. Man kann das DGM auch als einen Sonderfall des DHM bezeichnen, sozusagen als ein durch Strukturdaten erweitertes DHM der Erdoberfläche. Um bei einer einheitlichen Begriffsbezeichnung zu bleiben und da es sich bei dem Datenmodell für Rheinhessen (Abb.50) um ein Modell handelt, welches die topographische Oberfläche des Geländes wiedergibt, wird in dieser Arbeit nur noch von DGM gesprochen. Wichtigstes Kriterium eines DGM's ist seine Genauigkeit. Ein Geländemodell kann keine höhere Genauigkeit erreichen, als die Dichte der Ausgangsdaten zuläßt. Die Güte eines DGM's wird beeinflußt durch die Ausgangsdaten, die von der Erfassungsmethode abhängig sind, von der Rasterweite und dem für die Berechnung des Modells gewählten Interpolationsverfahren. Grundsätzlich muß die Höhengenauigkeit größer als die Höhendifferenz zweier benachbarter Rasterzellen sein. Natürlich bedeutet ein genaueres DGM auch eine höhere Datendichte und damit verbunden auch einen größeren Speicherbedarf, sowie größere Rechnerleistung. Durch die rasant fortschreitende Computertechnologie mit immer größeren Speichermedien und besserer Rechenleistung, sollte die digitale Verarbeitung hochauflösender DGM's mit Rasterweiten kleiner 10 m auch im großmaßstäblichen Bereich in Zukunft kein Hindernis mehr darstellen. Gerade für die Ableitung von Reliefparametern zur Erstellung von Gefahrenkarten wären Rasterweiten von 10 m und weniger wünschenswert. Hierbei liegt



Abb.49: Fotorealistische 3-dmensionale Ansicht eines DGM.

das Problem nicht bei der Rechnerleistung, sondern bei der Erfassungsmethode und den damit verbundenen Kosten. Speziell die von den Landesvermessungsämtern angebotenen DGM 's sind, in Bezug auf die Erfassungsmethode und Rasterweite, für genauere Analysen nur selten ausreichend. Hinzu kommt das teilweise hohe Alter der Datenbestände.

Das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz bietet zur Zeit (Stand 2004) nur DGM's in zwei Qualitätsstufen mit Rasterweiten von 20 m und 40 m an, wobei das 20 m-Raster wahlweise mit oder ohne Strukturinformationen zu haben ist. Laut Landesvermessungsamt liegt für 94% der Landesfläche das DGM in der Genauigkeitsklasse 1, mit einer Höhengenauigkeit von 0,5 m und für 100% mit einer Höhengenauigkeit von 2 m vor. Für Hessen bietet das hessische Landesvermessungsamt DGM mit Gitterweiten von 50 m und 25 m für das Gesamtgebiet, sowie 5 m für Teilgebiete an. Die Höhengenauigkeit, hier unterschieden zwischen bewuchsfreien, weitgehend gleichförmigen Gebieten und Waldgebieten variiert zwischen +/- 0,5 und 2 m. Die Herstellung der Basishöhendaten für das von den Landesvermessungsämtern angebotene DGM erfolgt in Rheinland-Pfalz, sowie in Hessen durch photogrammetrische Messungen aus Luftbildern im Bildmaßstab 1:13.000 und der Abdigitalisierung von Höhenlinien. Hier sind für die Zukunft preiswertere und höher auflösende Verfahren zur Erfassung von DGM's gefragt. Nur einige Landesvermessungsämter bieten zur Zeit DGM's auf Basis von Laserscanner-Befliegungen an, z.B. Baden-Württemberg, das Ende 2003 ein solches Modell landesweit erstellt hat.

Das in dieser Arbeit verwendete DGM von Rheinhessen liegt dem Verfasser nur in einer Rasterweite von 40 m vor, was gerade im Bereich der Reliefanalyse starke Einschränkungen bedeutet. Die Anschaffung von hochauflösenden DGM's ist noch mit einem hohen Kostenfaktor verbunden. Ein DGM mit Strukturinformationen und einer Rasterweite von 20 m (kleinere Rasterweiten sind zur Zeit nicht erhältlich) kostet in Rheinland-Pfalz 51,13 €/qkm², wodurch auf die Größe von Rheinhessen (etwa 1400 km²) bezogen und abzüglich des Mengenrabatts, Kosten im Bereich von ca. 57.000 € entstehen würden (Information des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz).



Abb.50: Höhenstufen von Rheinhessen (geschummert).

4. 2 Methoden zur Erfassung von Rohdaten

4.2.1 Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie wird das Licht, das von der Geländeoberfläche und allen darauf befindlichen Objekten reflektiert wird, mit einer Kamera aufgenommen und auf einem Film oder Magnetband gespeichert (BILL, 1999). In der Regel werden zur Photogrammetrie Luftbilder herangezogen, wobei die Auswertung aber auch mit terrestrischen oder Satellitenbildern durchgeführt werden kann. Grundsätzlich ist die photogrammetrische Auswertung nur dann möglich, wenn die Bilder als Stereopaare vorhanden sind, d.h. die Bildausschnitte zweier Fotos sich um 60-80 % überlagern. Ist die innere Orientierung der Kamera bekannt und sind die Stereobilder georeferenziert, sowie zueinander orientiert, kann die Auswertung der Luftbilder zur Gewinnung von dreidimensionalen Daten nach dem gleichen Prinzip wie das räumliche Sehen erfolgen, d.h. die Lage eines Objektes im dreidimensionalen Raum kann aus der Parallaxe der Bildpunkte des Objektes in den beiden Stereobildern ermittelt werden (STETS, 1986). Die Auswertung wird mit Hilfe von optischen Auswertestationen durchgeführt. Dabei bewegt der Bearbeiter eine Meßmarke, die in der Höhe einstellbar ist, in xy-Richtung über die Bilder und erfaßt digital die Höhenpunkte. Entweder geschieht das durch Abfahren von Höhenlinien entlang des Geländes oder durch dynamische Profilierung, bei der die Geländeoberfläche in Profilen abgefahren wird. Zusätzlich können auffällige morphologische Strukturlinien digital erfaßt und in die Auswertung integriert werden.

Die Genauigkeit der Photogrammetrie liegt bei etwa einem Promille der Flughöhe (BILL, 1999), wobei es durch Schattenwurf, Bebauung und Bewuchs, besonders bei größeren Waldgebieten, zu starken Ungenauigkeiten kommen kann. Inzwischen gibt es auch vollautomatische, Software basierte Auswerteverfahren, bei denen mit Hilfe der Parallaxe von in den Stereobildern vorkommenden Pixelpaaren die Höhe der Oberfläche ermittelt werden kann. Dabei muß berücksichtigt werden, daß es sich um ein Modell handelt, das die Oberfläche aller sich auf der Geländeoberfläche befindlichen Objekte (Vegetation, Bebauung) abbildet, also kein Geländemodell im eigentlichen Sinne darstellt. Zu Problemen kann es bei sehr dunklen oder extrem hellen Pixeln (Schnee) kommen, da eine Abgrenzung und Zuordnung der Pixel dann nicht mehr möglich ist.

4.2.2 Laserscanning

Beim Laserscanning, auch als Light Detection and Ranging (LIDAR) bezeichnet, handelt es sich um ein aktives Meßverfahren, das entweder terrestrisch (Abb.53) mit stationärem Scanner oder flugzeuggestützt (Airborne Laserscanning, Abb.51) durchgeführt werden kann. Das terrestrische Laserscanning basiert auf einem horizontal und vertikal drehbaren, stationär montierten Scanner (besteht aus Lasermodul und Empfänger), mit dessen Hilfe durch schwenken das Gelände abgetastet werden kann (Abb.53). Gemessen werden die Laufzeiten, sowie die horizontale und vertikale Ausrichtung der Laserimpulse. Die so gewonnenen Daten können dann im postprocessing Verfahren ausgewertet und aus dem polaren Koordinatensystem in ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem überführt werden. Bei einer maximalen Reichweite von etwa 2,5 Km, kann eine Genauigkeit von 2-3 cm und eine Auflösung von ca. 30 cm erreicht werden. Um hohe Genauigkeiten zu erreichen ist es außerdem notwendig zusätzliche Referenzflächen einzumessen. Das terrestrische Laserscanning bietet zwar eine hohe Genauigkeit und schnelle flächendeckende Vermessung, ist aber auch mit hohen Kosten verbunden. Es kann jedoch für die genauere Untersuchung von einzelnen Rutschungen und deren Bewegungsänderungen herangezogen werden (Abb.53). Im Gegensatz zum terrestrischen Laserscanning ist beim flugzeuggestützten Laserscanning der Scanner an Bord eines Flugzeugs montiert. Beim Überfliegen des Geländes werden in regelmäßigen Abständen Laserimpulse ausgesendet, die vom Erdboden, Vegetation, Bebauung etc. reflektiert werden (Abb.51). Mit Hilfe von Laufzeitmessungen kann dann die Entfernung zwischen Sensor und Erdoberfläche, bzw. den darauf befindlichen Objekten bestimmt werden. Zusätzlich werden



Abb.51: Airborne Laserscanning.



Abb.52: Schematische Darstellung von first-pulse und last-pulse.

die Laserimpulse durch einen rotierenden Spiegel quer zur Flugrichtung abgelenkt. Für jeden Laserimpuls muß die Position und Lage des Scanners bekannt sein. Deswegen besteht ein Multisensorsystem nicht nur aus dem Laserscanner, sondern auch aus einem Inertialem Navigationssystem (INS), daß die drei Lagewinkel (omega, phi, kappa) des Flugzeugs und damit dessen Verschwenkung zur Flugrichtung bestimmt, sowie einem GPS mit dem die Position des Scanners ermittelt werden kann (WEVER, 1999). Mit Laserscannern neuerer Bauart ist es zudem möglich sowohl die ersten Reflexionen (first-pulse), wie auch die letzten Reflexionen (last-pulse) zu erfassen (Abb.52). Durch Klassifizierung der Punktgruppen wird es möglich mit Hilfe des first-pulse die Oberfläche der Vegetationsbedeckung, oder Bebauung zu erfassen, während der last-pulse die Geländeoberfläche wiedergibt (Abb.52). Somit kann die Geländeoberfläche auch unter dichter Vegetationsdecke erfaßt werden. Im Übrigen ist das Verfahren unabhängig von Jahres- und Tageszeit, sowie vom Wetter. Die Auflösung, abhängig von der Flughöhe, liegt im Dezimeterbereich mit einer Höhengenauigkeit von ca. 15 cm. Der Kostenaufwand für Airborne Scanning ist insgesamt sehr hoch und rentiert sich nur für große Aufnahmeflächen.



Abb.53: Terrestrisches Laserscanning am Beispiel einer Rutschung bei Schwaz in Tirol (www.riegl.co.at).

4.2.3 Radar-Interferometrie

Bei der Radar-Interferometrie werden Stereopaare von Radarmessungen dreidimensional ausgewertet. Die Erfassung der Daten erfolgt entweder durch 2 Satelliten (z.B. ERS 1 und ERS 2), die zeitversetzt die Erde umlaufen (Repeat-Pass-Interferometrie, Abb.54), oder von einem Space Shuttle aus, das mit zwei Radarantennen ausgerüstet ist (Single-Pass-Interferometrie). Bei der Erfassung wird eine aufzunehmende Geländeoberfläche durch ein "synthetic aperture radar" (SAR) mit Mikrowellen aktiv beleuchtet und die von der Erde reflektierten Signale aufgezeichnet (ÖTTL, 1997). Durch die Überlagerung zweier SAR-Bilder eines Gebietes bei kleinem Abstand der beiden Satellitenflugbahnen, können aus den ge-



rometrie (ÖTTL, 1997).

zu den einzelnen Bildelementen ermittelt werden (ÖTTL, 1997). Dadurch können die aus den Radarechos gewonnenen Radarbilder zu Interferogrammen überlagert werden (Abb.57). Mit Hilfe solcher Interferogramme und der Position des Shuttles oder der Radarsatelliten kann ein DGM abgeleitet werden (Abb.55). Die Auflösung liegt, mit einer Lagegenauigkeit von 20 m, bei etwa 25 m in der Horizontalen und ca. 1 m in der Vertikalen. Durch die aktive Beleuchtung der Erdoberfläche mit Radarwellen können Geländebereiche auch dann erfaßt werden, wenn in dem Gebiet schlechte oder ungünstige Wetterverhältnisse vorherrschen (ungünstiger Sonnenstand, Bewölkung).

Speziell im Bereich der Gefahrenforschung ist die Technik der Radarinterferometrie geeignet um Hanginformationen zu gewinnen, die zuverlässige Aussagen über die Hangmorphologie und topographische Struktur zulassen und zur Rutschungsinventarisierung herangezogen werden können (OESCH, 2001). Außerdem können über zeitversetzte Aufnahmen Bewegungsgeschwindigkeiten und Bewegungsveränderungen von Hang- und Massenbewegungen gemessen werden. Zu erwähnen ist das Projekt MUSCL (Monitoring Urban Subsidence, Cavities, and Landslides by remote sensing) der Europäischen Kommission, das die Methoden und Anwendungsmöglichkeiten der Radarinterferometrie zur Erkundung und Beobachtung von Hang- und Massenbewegungen erforscht. Auch optische satellitengestützte Sensorsysteme (z.B. IKONOS oder SPOT), mit Auflösungen von 5-10 m, werden in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Fernerkundung von Rutschungen und der Erstellung von Gefahrenkarten spielen, wenn ihre Verfügbarkeit und die Kosten im richtigen Verhältnis zum Nutzen stehen. In Tab.6 sind die momentan verfügbaren Satelliten mit ihren Anwendungsmöglichkeiten aufgeführt.



Abb.55: Bewegungen innerhalb einer Rutschung. Die farbigen Felder geben die Bewegungen in mm/Jahr an (ERS-SAR Bildpaar, Zeitspanne von 420 Tagen, http://dude.uibk.ac.at/MUSCL/ap-pldemo/alpinevalleys/index.html).



Abb.56: Bewegungen innerhalb einer Rutschung. Die farbigen Felder geben die Bewegungen in mm/Jahr an (http://dude.uibk.ac.at/MUSCL/appldemo/alpinevalleys/index.html).

System	Status	Observation capabilities	Sample disaster mitigation applications
Weather satellites	Existing	Global day and night observation	Prediction/monitoring of hurricans, typhoons, torna- does, volcanic eruptions
Landsat	Existing	Visual 15-30 meter and multispectral 30-80 meter land observations	Land use, flood extent, environmental monitoring
SPOT	Existing	Visual 10-30 meter land observation	3 dimensional mapping, flood extent, damage assess- ment, crop identification
IRS-1C	Existing	Visual 6-30 meter land and sea observation	3 dimensional mapping, oil spill detection, flood extent, damage assessment
ERS	Existing	All weather 25-500 meter land and sea observation	3 dimensional mapping, oil spill detection, flood extent, damage assessment, night coverage
Radarsat	Existing	All weather 10-100 meter land and sea radar observation	3 dimensional mapping, oil spill detection, flood extent, damage assessment, night coverage
SeaWiFS	Existing	Multispectral 1-4 km sea observation	Oil spill detection, ocean pollution monitoring, algae detection
Cosmos KVR-1000	Existing	Visual 2 meter land observation (not near-real-time)	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis
CTA Clark	Program postponed	Visual 3 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis
QuickBird	Launch scheduled for 1999	Visual 1 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis
Ikonos-1	Lost during launch	Visual 1 meter and multispectral 4 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis
Orb-View-3	Launch scheduled for 2000	Visual 1 & 2 meter and multispectral 4 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis, crop identification
Ikonos	Existing	Visual 1 meter and multispectral 4 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis, crop identification
Orb-View-4	Launch scheduled for 2000	Visual 1 meter and multispectral 4 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis, crop identification
EROS-A	Launch scheduled for 1999	Visual 1.8 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis
SPOT 5A	Launch scheduled for 2002	Visual 5 meter land observation	High-resolution mapping, infrastructure identificati- on, terrain analysis, crop identification

Tab.6: Sensorplattformen	(CEAS Workshop	on International Coop	peration in Space,	, Frascati, Italy, May 1996)
--------------------------	----------------	-----------------------	--------------------	------------------------------



Abb.57: Prinzip der Erstellung eines DGM aus Radarbildern (ÖTTL, 1997).

4.2.4 Satellitengeodäsie

Die Satellitengeodäsie ermöglicht mit Hilfe der Signale mehrerer Satelliten eine weltweite dreidimensionale Positionsbestimmung. Zur Zeit existieren 2 Positionierungssysteme, zum einen das amerikanische NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System => daher auch der Begriff GPS), zum anderen das russische GLO-NASS (Global Navigation Satellite System) dessen Funktionstüchtigkeit wegen Geldmangels eingeschränkt ist. Beide Systeme sind ursprünglich militärische Entwicklungen, die aus jeweils 24 Satelliten bestehen. Beim GPS sind die Satelliten in 20.000 km Höhe, gleichmäßig auf 6 Umlaufbahnen verteilt (HARTL, P.; THIEL, K.H., 1996). Im Jahr 2008 kommt das System GALILEO hinzu, ein ziviles europäisches Navigationssystem, das 2002 von den Verkehrsministern der Europäischen Union endgültig verabschiedet wurde. Im Gegensatz zur amerikanischen und russischen Konkurrenz funktioniert GALILEO mit 30 Satelliten und soll eine höhere Genauigkeit erreichen.



Abb.58: Positionsberechnung per GPS. Die eigene Position (E) ergibt sich durch den Schnittpunkt der Kugeln, deren Radius die Entfernung zu den Satelliten (S) ist. Es ergeben sich dadurch zwei mögliche Punkte von denen einer ausgeschlossen werden kann, da er nicht auf der Erdoberfläche liegt (HARTL & THIEL, 1996).

Die Positionsbestimmung erfolgt durch Laufzeitmessungen der ausgesendeten Satellitensignale (die Signale beinhalten die Satellitenidentifikation, Daten zur Umlaufbahn, die Atomzeit) von Satelliten mit fest vorgegebenen Umlaufbahnen, die um den Mittelpunkt eines geozentrischen, dreidimensional rechtwinkligen Koordinatensystems kreisen (Abb.58). Zur Bestimmung der genauen Position im Raum ist der Empfang von mindestens vier Satelliten notwendig. Über die Laufzeitmessungen der Signale können die Entfernungen der Satelliten zum Empfänger bestimmt und durch Verschneidungen die Position des Empfängers ermittelt werden. Über Koordinatentransformationen kann die Position dann in geographische Koordinaten auf das WGD84-Ellipsoid (World Geodetic System 1984) übertragen werden. Um die Genauigkeit des System zu steigern wird meistens mit zwei Empfängern gearbeitet (Einzelgeräte erreichen Genauigkeiten im Bereich von ca. 10 m horizontal und 20 m vertikal), d.h. die Position des ersten Empfängers (Rover) wird in Relation zu dem zweiten Empfänger (Basisstation) bestimmt, dessen fester Standort bekannt sein muß. Der Rover kann dabei stationär sein oder sich bewegen, z.B. an Bord eines Fahrzeugs. Inzwischen gibt es in Deutschland ein flächendeckendes Netz von GPS-Stationen, z.B. SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung, Abb.59) deren Daten über das Internet oder UKW empfangen werden können. Die Auswertung erfolgt entweder im postprocessing-Verfahren oder in Echtzeit als RTK-GPS (Real-Time-Kinematic GPS). Für Rheinland-Pfalz gibt es zur Zeit 17 SAPOS-Stationen, deren EPS- (Echtzeit-Positionierungsservice, Genauigkeit 1-3 m) oder HEPS-Daten (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungsservice, Genauigkeit 1-5 cm) über den Sender SWR 1 und.über GSM (Global Standard for Mobile Communication) empfangen, oder für Postprocessing als GPPS (Geodätischer Präziser Positionierungs-Service, Genauigkeit 1 cm) oder GHPS (Geodätischer Hochpräziser Positionierungs-Service, Genauigkeit unter 1 cm) über das Internet bezogen werden können.

Die GPS-Vermessung eignet sich weniger für die großräumige Erstellung von DGM, als vielmehr für die Vermessung von kleinräumigen Objekten und Strukturen. Sie bietet ein probates Mittel für die detaillierte Vermessung von Rutschungen, bzw. von Rutschungsanzeichen wie Wulste, Dellen und Abrisse und deren genaue Darstellung in einem DGM.



Abb.59: Übersicht der SAPOS-Stationen in Rheinland-Pfalz.

4.3 Interpolationsverfahren

Für die flächendeckende Darstellung einer Geländeoberfläche ist zunächst die Auswahl eines geeigneten Datenmodells von großer Wichtigkeit. Die beiden meist benutzten Modelle sind zum einen das Rastermodell (Abb.61), zum anderen das "Triangular Irregular Network" (TIN, Abb.60). Das Rastermodell besteht aus einem gleichmäßigen Gitter mit in der Regel quadratischen Gitterzellen (auch als Rasterzellen oder Stützpunkte bezeichnet), dessen Maschenweite der Auflösung des DGM entspricht (BARTELME, 1994; Abb.61). Die Wahl der Auflösung richtet sich nach dem Zweck des zu berechnenden Modells, der Speicherkapazität und Rechnerleistung der Hardware, sowie der Art und Genauigkeit der Vermessung (ein DGM kann nicht genauer sein als seine Ausgangsvermessung).



Abb.60: Triangular Irregular Network in perspektivischer Ansicht und in der Draufsicht.

Da nur die Gitterzellen einen Wert (z.B. Höhenwert) enthalten, durch die eine Höhenlinie verläuft oder für die ein Vermessungswert bekannt ist, müssen durch Interpolationsverfahren Höhenwerte für alle Rasterzellen ermittelt werden, die keine Höheninformationen besitzen. Das heißt, die Interpolation kann als mathematische Funktion betrachtet werden, die fehlende Höheninformationen durch Einbeziehung bekannter Höhenstützpunkte ergänzt und zu einer flächendeckenden Oberfläche verknüpft. Da eine Geländeoberfläche aus vielen komplexen Formen besteht, die sich nicht durch eine einheitliche mathematische Funktion ausdrücken lassen, ist die Wahl des richtigen Interpolationsverfahrens für die Genauigkeit des DGM von großer Bedeutung (BARTELME, 1994). Dabei ist Wahl des Interpolationsverfahrens auch abhängig von der Art und der Verteilung der vorhandenen Vermessungsdaten (z.B. digitalisierte Höhenlinien oder Laserscanning-Daten). Eine Interpolation ist außerdem dann notwendig, wenn die Auflösung eines DGM geändert werden soll (z.B. Generalisierung einer Oberfläche) oder das Datenmodell gewechselt wird (Raster <=> TIN).

Innerhalb der unterschiedlichen Interpolationsverfahren gibt es zwei verschiedene übergeord-



Abb.61: Gleichmäßiges Gitter in perspektivischer Ansicht und in der Draufsicht.

nete methodische Ansätze. Zum einen globale Verfahren, bei denen die vorhandenen Höhenwerte der gesamten zu berechnenden Oberfläche in die Interpolation mit einfließen (BULLINGER, 2000). Nachteil bei diesen Verfahren ist die Tatsache, daß kleinräumige Geländestrukturen herausfallen können, weil sie bei der Berechnung als Fehler erkannt und gefiltert werden (BARTELME, 1994). Unter globale Interpolationsmethoden fallen u.a. Klassifikationsverfahren, Fouriertransformationen und Regressionsmethoden.

Im Gegensatz zu den globalen Verfahren gehen die lokalen Methoden von der Annahme aus, daß Gitterzellen die noch keinen Höhenwert besitzen ähnliche Höheneigenschaften haben wie vermessene Stützpunkte in ihrer Nachbarschaft (BULLINGER, 2000). Es werden also nur die Rasterzellen in der unmittelbaren Umgebung eines zu ermittelnden Stützpunktes für die Berechnung herangezogen. Die Interpolation erfolgt in einzelnen, sich überlappenden Teilbereichen, die im DGM zusammengefügt werden. Die Größe der einzelnen Teilbereiche ist, je nach Interpolationsverfahren, durch einen Suchradius oder die Anzahl der zu verwendeten Nachbarzellen variierbar. Die lokalen Methoden lassen sich weiter in distanzgewichtete, statistische und auf Elastizität beruhende Verfahren unterteilen.

Im Folgenden werden nur einige der häufig benutzten Interpolationsmethoden vorgestellt, die standardmäßig in den gängigsten Geoinformationssystemen integriert sind.

4.3.1 Inverse distance weighted (IDW)

Bei der Interpolation mittels IDW erfolgt die Berechnung der Oberfläche durch inverse Gewichtung der gemessenen Höhenwerte in Bezug zu deren Entfernung zu dem zu ermittelnden Höhenwert. Das heißt, der Einfluß eines Höhenmeßwertes nimmt mit seiner Entfernung zu dem zu interpolierenden Stützpunkt ab. Die Abnahme der Gewichtung muß nicht linear erfolgen, sondern kann durch einen Entfernungsexponenten p (power) gesteuert werden, der aber in der Regel den Wert 2 besitzt (quadratische Gewichtung). Mit Zunahme des Exponenten nimmt auch die Gewichtung der näher gelegenen Nachbarpunkte zu (SCHMIDT & BILL, 2000). Die in die Interpolation einer Gitterzelle einfließenden benachbarten Höhenwerte können entweder über einen Suchradius, oder über eine vorgegebene Anzahl bestimmt werden. Die Berechnung (SCHMIDT & BILL, 2000) erfolgt nach der Gleichung (2) :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Zi}{(di)^{p}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(di)^{p}}}$$
(Gl.2)

Z= gesuchter Wert

zi= gemessener Wert am Nachbarpunkt iBeschriftungsfeld

di= Entfernung zum Gitterpunkt

p= Power

Bei IDW handelt es sich um eine exakte Interpolationsmethode, da die interpolierte Oberfläche durch alle vermessenen Höhenpunkte verläuft. Dadurch ergibt sich die Schwierigkeit, daß Geländestrukturen nur dann modelliert werden, wenn diese durch Vermessungspunkte oder linienhafte Elemente gekennzeichnet sind. Außerdem kann es bei einem gehäuften Auftreten von Datenpunkten, wie es bei der Digitalisierung von Höhenlinien üblich ist, zu einer Überbewertung dieser Bereiche kommen, während die Zwischenräume der Höhenlinien nicht berücksichtigt werden. Dabei spielt auch eine Rolle, daß in die Interpolation nur die Entfernung, nicht aber die Richtung der benachbarten Rasterpunkte mit einfließt. Deshalb ist anzunehmen, daß sich IDW nur zur Interpolation von relativ gleichmäßig verteilten Vermessungspunkten eignet, bei denen keine größeren Punktanhäufungen auftreten.

4.3.2 Triangulated irregular network (TIN)

Bei einem TIN handelt es sich um ein aus Dreiecken bestehendes Netzwerk, dessen Eckpunkte aus Datenpunkten (Vektordaten) bestehen, die eine geschlossene Oberfläche bilden (Abb.60). Für jedes dieser Dreiecke werden mit Hilfe einer bivariaten Funktion die fehlenden Höhenwerte der jeweiligen Eckpunkte des Dreiecks berechnet. In Abhängigkeit von der bivariaten Funktion kann die Interpolation linear oder nicht-linear erfolgen, wobei letzteres Verfahren in der Regel zu glatten und besser unterscheidbaren Oberflächen führt (BULLINGER, 2000). Um eine Generalisierung von Geländestrukturen zu vermeiden, müssen diese durch entsprechende Stützpunkte abgebildet werden. Strukturlinien können dabei als Dreieckskanten wiedergegeben werden. Durch die Anpassungsfähigkeit des TIN an unterschiedliche Datendichten, und die Fähigkeit der sequentiellen Verarbeitung, die durch die Aufgliederung der Oberfläche in einzelne Dreiecke möglich wird, können durch entsprechende Aufteilung der Geländeoberfläche, auch größere Datenmengen schnell und problemlos bearbeitet werden. Als Nachteil erweist es sich, daß TIN's innerhalb flacher Geländeabschnitte dazu tendieren horizontale Dreiecke auszubilden. Gerade bei hydrologischen Modellierungen ist dies problematisch, da auf horizontalen Dreiecken keine Fließrichtung mehr bestimmbar ist und der entsprechende Fließalgorithmus dadurch abgebrochen wird. Dementsprechend sollte bei der Auswertung von hydrologischen Parametern auf andere Interpolationsverfahren zurückgegriffen werden.

4.3.3 Kriging

Beim Kriging-Verfahren, das zu den geostatistischen Methoden zählt, fließen räumliche Abhängigkeiten der vorhandenen Datenpunkte in die Interpolation mit ein, indem die Anzahl der Vermessungspunkte, ihre Verteilung und Variation, berücksichtigt wird. Entwickelt wurde das Verfahren in den 60iger Jahren von Krige, einem südafrikanischen Bergbau-Ingenieur, basierend auf der Theorie der "Regionalisierten Variablen" von MATHERON (1971). Ausschlaggebend ist, daß neben einer zufälligen Komponente jedes Merkmal im Raum auch eine ortsbezogene Komponente besitzt, die bei der Gewichtung der gemessenen Höhenwerte, die als regionale Variablen betrachtet werden können, berücksichtigt wird. Die differierende Varianz zweier Höhenwerte wird dann nur noch durch deren Entfernung zueinander begründet, was als räumliche Abhängigkeit zu betrachten ist. Die Reichweite dieser räumlichen Abhängigkeit, bzw. die Varianz, wird mit Hilfe von Variogrammen ermittelt. Alle Vermessungspunkte die außerhalb dieser Reichweite liegen, werden bei der Interpolation nicht mehr berücksichtigt. In den Variogrammen wird die Hälfte der Varianz der Inkremente von zwei Höhenwerten (Semivarianz) gegen einen Entfernungsvektor aufgetragen (SCHMIDT & BILL, 2000). Das empirische Variogramm wird ermittelt aus Gleichung (3):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x+h) - z(x))^2]$$
 (Gl.3)

E=Erwartungswert von z

h= Abstandsvektor

z= Meßwert

An dieses empirisch ermittelte Variogramm wird nach Vorgabe eines Modelltyps (exponential, gaussian, linear, quadratisch oder sphaerisch) eine mathematische Funktion angepaßt, an die die weitere Gestaltung der räumlichen Abhängigkeit der Datenpunkte in Bezug zu ihrer Entfernung gebunden ist. Mit Hilfe des Diagramms kann der Gewichtungsfaktor λi bestimmt werden (SCHMIDT & BILL, 2000). Für die Schätzung eines Höhenwerts ergibt sich dann Gleichung (4):

$$z(x0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i \ z(xi) \tag{Gl.4}$$

4.3.4 Spline

Bei den Spline-Interpolationsverfahren wird eine lokal angepaßte Oberfläche erstellt, die durch die Höhenpunkte oder dicht an diesen verläuft und minimale Krümmung aufweist. Je nach Spline-Verfahren (tension = "gespannt", oder regulized ="geglättet") kann die Oberflächenspannung verändert werden. Im extremsten Fall entspricht die Oberfläche einer, an den Datenpunkten eingehängten Gummioberfläche (SCHMIDT & BILL, 2000).

Die Spline-Verfahren eignen sich in der Regel nicht für linear strukturierte Datensätze (z.B. digitalisierte Höhenlinien) da durch die Punktanhäufungen entlang von Höhenlinien keine sinnvolle Oberfläche mehr interpoliert werden kann.

4.4 Auswahl des Interpolationsverfahrens

Um für die Reliefanalyse und die Erstellung der Gefahrenkarten für das Testgebiet Wißberg eine möglichst gut an die Realität angepaßte Geländeoberfläche zu erhalten, wurden verschiedene Interpolationsverfahren auf den vorhandenen Höhendatensatz angewendet. Da es für den Wißberg in Rheinhessen keine flächendeckenden, genaueren Vermessungen gab, aus denen ein hochauflösendes DGM hätte interpoliert werden können, wurden vom Verfasser die Höhenlinien aus den entsprechenden Grundkarten digitalisiert. Die Ergebnisse der angewendeten Interpolationsverfahren konnten dann verglichen und das beste Verfahren bestimmt werden. Zusätzlich wurde ein zweiter Interpolationstest mit einem Datensatz mit gleichmäßig verteilten Höhenwerten durchgeführt, um die Abhängigkeit der Verfahren von der Verteilung der Ausgangsdaten hervorzuheben.

4.4.1 Interpolation digitalisierter Höhenlinien

Für die Durchführung der Versuche wurde ein Testdatensatz aus den vorhandenen Höhendaten des Wißbergs extrahiert, der Teile des Südhangs umfaßt. Um die Qualität der berechneten Geländemodelle zu bestimmen, wurde der Testdatensatz aufgespalten in einen Teil mit dem die Interpolation durchgeführt wurde und einen Teil der als Referenzdatensatz diente. Für den Referenzdatensatz, der in ein Raster umgewandelt werden mußte, wurden Höhenlinien herausgenommen, die bei der Interpolation keine Berücksichtigung fanden und deshalb als Vergleichshöhenlinien genutzt werden konnten. Eine Verfälschung des Ergebnisses durch Ausreißer konnte verhindert werden, indem jedes Interpolationsverfahren 10 mal durchgeführt wurde, wobei bei jedem Durchgang andere Höhenlinien als Referenz dienten. Das Referenzraster muß dann vom jeweils interpolierten Testraster subtrahiert werden.

Differenzraster = Testraster - Referenzraster

Dadurch entsteht ein Differenzraster, daß die Abweichungen zu den Referenzhöhenlinien anzeigt. Um die Interpolationsverfahren vergleichen zu können, werden aus dem Differenzraster die maximale, sowie die minimale Abweichung, die Beträge der Abweichungen, die Bereichsschwankungen, die Standardabweichung (Gl.5) und der mittlere quadratische Fehler (Gl.6) ermittelt.

Standsrdabweichung:
$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (Testraster - Referenzraster)^2}$$
 (Gl.5)

mittlerer quadratischer Fehler:
$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$
 (Gl.6)

Für die Durchführung der jeweiligen Interpolationsverfahren wurden die Programme ArcView 3.2, Surfer 7.0 und LISA 3.1 verwendet, die in Tab.7 mit den entsprechenden RMS-Fehlern, aufgeführt sind. Den geringsten RMS-Fehler mit 41,5 cm lieferte das Höhenlinieninterpolationsverfahren der Software LISA. Am ungeeignetesten erscheinen die Verfahren "nächster Nachbar" von Surfer und IDW (nächster Nachbar), sowie Ordinary Kriging von ArcView, die sich mit RMS-Fehlern von über einem Meter deutlich von den anderen Verfahren abheben (Abb.62). Für die Erstellung des Wißberg-DGM wurde das Interpolationsverfahren des Geoinformationssystems LISA benutzt.

Software	Verfahren	mittlere Abweichung	Min. Abweichung	Max. Abweichung	Range	mittlerer quadr. Fehler	rel. Fehler
	IDW (fixed radius)	0.749	-9.900	4.244	14.144	0.771	0.581
	IDW (nächster Nachbar)	0.913	-9.900	5.000	14.900	1.051	0.708
Arc View	Spline (regulized)	0.680	-9.900	4.229	14.129	0.743	0.527
	Spline (tension)	0.669	-9.900	4.175	14.075	0.650	0.519
	Kriging (ordinary)	2.205	-3.538	12.228	15.766	2.314	1.709
	IDW Surfer	0.680	-9.900	4.634	14.534	0.722	0.527
	nächster Nachbar	1.097	-8.900	5.000	13.900	1.240	0.850
	Kriging (linear)	0.679	-9.900	5.704	15.604	0.583	0.526
Queder	Krig (guadratisch)	0.880	-9.900	5.000	14.900	0.866	0.682
Surrer	Kriging (exponential)	0.870	-9.900	4.995	14.895	0.851	0.675
	Kriging (gauss)	0.876	-9.900	5.000	14.900	0.862	0.679
	Kriging (sphaerical)	0.879	-9.900	5.000	14.900	0.866	0.681
	TIN	0.665	-9.900	5.338	15.238	0.575	0.515
LISA	Höhenlinieninterpolation	0.470	-9.900	1.869	11.769	0.415	0.365

Tab.7: Abweichungen der verschiedenen Interpolationsverfahren in Meter.

4.4.2 Interpolation von annähernd gleichmäßig verteilten Vermessungsdaten

Der Versuch wurde nochmals mit einem Testdatensatz wiederholt, der aus dem DGM von Rheinhessen extrahiert wurde. Dazu wurde die vom Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz durchgeführte Interpolation als Vorlage genutzt und in einen Datensatz mit scheinbar regelmäßig verteilten Punktkoordinaten umgewandelt. Um den Testdatensatz zu erhalten, wurde ein 5 x 5 km großer Bereich im südlichen Teil von Rheinhessen aus dem vorhandenen DGM des Landesvermessungsamt RLP ausgeschnitten. Da dieser Ausschnitt aus einem gleichmäßigen Raster von Höhendaten bestand, wurde in einem ersten Schritt zunächst jeder zweite Höhenpunkt, in einem zweiten Schritt dann nochmal 25 % der



Abb.62: Abweichungen der einzelnen Interpolationsverfahren.

Höhenpunkte durch ein Zufallsverfahren herausgefiltert. Als Ergebnis entstand ein Testdatensatz mit annähernd gleichmäßig verteilten, aber nicht regelmäßigen Höhenwerten. Ähnlich wie im ersten Versuch wurde der original Datensatz (Interpolation durch das Landesvermessungsamt RLP) von den jeweiligen Interpolationsergebnissen des Testdatensatzes subtrahiert und miteinander verglichen. Zum Vergleich wurde wieder der RMS-Fehler herangezogen. Die geringsten Fehler, mit 83,5 cm lieferten in diesem Versuch die Verfahren Kriging (linear) des Programms Surfer, sowie Kriging (ordinary) des Moduls SAGA (Abb.63, Tab.8). Der größte Fehler mit über 3 m wurde durch das IDW-Verfahren von ArcView erreicht.

4.4.3 Genauigkeit von Reliefparametern in Abhängigkeit der DGM-Auflösung

Da die Auflösung des DGM eine wichtige Voraussetzung für die Genauigkeit von daraus resultierenden Folgeprodukten ist, wurde untersucht, in wie weit sich eine steigende Rasterweite gerade auf Reliefparameter auswirkt, die durch die 2. Ableitung bestimmt werden. Dazu wurde durch Resampling das für den Bereich Wißberg erstellte DGM in verschiedene Rasterweiten umgewandelt (5 m, 10 m, 20 m und 40 m) und dann jeweils die Hangneigung und die Exposition ermittelt. Die Ergebnisse konnten dann für jede berechnete Rasterzelle miteinander verglichen und statistisch ausgewertet werden. Für die Hangneigung zeigt sich, daß mit zunehmender Rasterweite, d.h. auch mit zunehmender Generalisierung des



Abb.63: Abweichungen der einzelnen Interpolationsverfahren.

Software	Verfahren	mittlere Abweichung	Min. Abweichung	Max. Abweichung	Range	mittlerer quadr. Fehler	rel. Fehler
	IDW (fixed radius)	0.373	-26.987	22.639	49.626	3.516	1.975
	IDW (nächster Nachbar)	-0.382	-21.500	21.810	43.310	1.848	1.123
Arc View	Spline (regulized)	-0.314	-20.100	22.490	42.590	1.727	0.954
	Spline (tension)	-1.921	-9.940	9.951	19.891	1.723	0.885
	Kriging (ordinary)	-1.715	-9.970	9.984	19.954	1.888	0.999
	IDW Surfer	-0.840	-9.900	9.876	19.776	0.937	0.228
	nächster Nachbar	0.070	-9.900	9.999	19.899	2.096	0.729
	Kriging (linear)	-0.772	-9.900	9.821	19.721	0.835	0.196
Curtan	Krig (quadratisch)	-0.697	-9.900	9.995	19.895	2.022	0.621
Surier	Kriging (exponential)	-0.697	-9.900	9.995	19.895	2.022	0.621
	Kriging (gauss)	-0.697	-9.900	9.995	19.895	2.022	0.621
	Kriging (sphaerical)	-0.697	-9.900	9.995	19.895	2.022	0.621
	TIN	-0.801	-9.800	9.899	19.699	0.934	0.227
SAGA	IDW	-0.851	-9.900	9.989	19.889	1.182	0.312
	nächster Nachbar	-0.169	-9.900	9.999	19.899	2.104	0.728
	Kriging (ordinary)	-0.764	-9.900	9.841	19.741	0.835	0.196

Tab.8: Abweichungen der verschiedenen Interpolationsverfahren in Meter.

Reliefs, die mittlere Neigung abnimmt (um ca. 0,2°), also das Modell verflacht, wobei der mittlere quadratische Fehler zunimmt (vgl. Tab.9). Im Gegensatz dazu steigt die mittlere Exposition mit zunehmender Rasterweite an, so daß sich Abweichungen zwischen dem 10 m und dem 40 m-Raster von fast 2° ergeben (vgl. Tab.10). Daraus resultiert, daß die Genauigkeit und damit auch die Aussagekraft von primären (Hangneigung, Exposition, Wölbung), aber auch von zusammengesetzten Reliefparametern (z.B. TWI), mit zunehmender Rasterweite stark abnimmt. Gerade bei flachem Relief kann es dadurch bei Abflußberechnungen zu großen Abweichungen der Fließrichtung kommen.

Rasterweite [m]	mittlere Neigung [°]	mittlere Abweichung [°]	mittlerer quadr. Fehler	rel. Fehler [%]
5	4,69	0,00	0,000	0,00
10	4,66	0,03	0,001	3,50
20	4,61	0,09	0,004	4,19
40	4,46	0,26	0,014	5,22

Tab.9: Auswirkung der Rasterweite auf die Hangneigung.

Rasterweite [m]	mittlere Nei- gung [°]	mittlere Abweichung [°]	mittlerer qua- dr. Fehler	rel. Fehler [%]
5	187,78	0,00	0,00	0,00
10	189,86	-2,16	0,10	4,62
20	190,31	-2,15	0,26	11,96
40	191,19	-4,59	0,61	13,21

Tab.10: Auswirkung der Rasterweite auf die Exposition.

4.4.4 Ergebnis

Es zeigt sich, daß die Interpolationsfehler bei den Höhenmodellen aus Vermessungspunkten etwas geringer sind als bei denen aus digitalisierten Höhenlinien. Da der Interpolationsfehler wahrscheinlich auch abhängig von dem absoluten Höhenunterschied des zur Interpolation benutzten Gebietes ist, wurde zum besseren Vergleich für beide Versuche noch der relative Fehler berechnet, indem die jeweilige Höhendifferenz des bearbeiteten Gebietes berücksichtigt wurde (Gl.7).

$$rel. Fehler = \frac{Fehler}{H\"ohendifferenz \ des \ Testgebiets} \cdot 100 \qquad (Gl.7)$$

Das Ergebnis zeigt zum einen, daß es keine pauschale Antwort darauf gibt, welches das beste Verfahren zur Erstellung eines DGM ist, da die Interpolation vom jeweiligen Testgebiet, der Art der Höheninformationen und deren Verteilung abhängig ist. Zum anderen scheint die Interpolation von Höhenlinien grundsätzlich größere Fehler zu produzieren, so daß man nur dann darauf zurückgreifen sollte, wenn keine anderen Vermessungsmethoden zur Verfügung stehen.

5. Ermittlung modellrelevanter Parameter

Die Ermittlung von modellrelevanten Parametern soll es ermöglichen, im regionalem Maßstab, Daten verschiedenster Faktoren zu erheben, die die Entstehung von Rutschungen oder den Rutschungsprozeß beeinflussen, und die mit Hilfe von Geoinformationssystemen leicht zu erstellen, verwalten und auszuwerten sind. Unter solchen Parametern werden reliefbedingte (Hangneigung, Exposition, etc.), geologische (Geologie, Tektonik, etc.) oder vegetative Faktoren (Landnutzung) verstanden. Auch Faktoren wie die Nähe zu Gewässern, Straßen oder Bebauung können berücksichtigt werden. Grundsätzlich sollten, in einem vernünftigen Zeit/Kosten-Verhältnis, möglichst viele Daten erhoben werden, um einen Gesamtüberblick über die Situation im Untersuchungsgebiet zu bekommen. Trotzdem sollten nur die Faktoren in das Gefahrenmodell einbezogen werden, die aus ingenieurgeologischer und statistischer Sichtweite, den größten Einfluß auf den Rutschungsprozeß besitzen, da die Modellgüte nicht unbedingt mit der Anzahl der Faktoren steigt. Oftmals können einfache, durch wenige Faktoren gekennzeichnete Modelle die Realität besser wiedergeben.

5.1 Digitale Reliefanalyse

Das Relief, als Ergebnis von endogenen und exogenen geomorphodynamischen Prozessen, beschreibt die Form der Erdoberfläche und kann als Grenzfläche zwischen Pedos-/Lithosphäre und Atmos-/Hydrosphäre betrachtet werden. Damit ist es ein wichtiger prozeßregelnder Faktor, der natürlich stattfindende Abläufe steuert und beeinflußt (LESER, 1997). Als Umschlagsfläche für die solare Strahlung und die Wasserbilanz ist es Regler für das Verhältnis von Abfluß und Versickerung, die Bodenfeuchteverteilung, die Bodenbildung, den Stofftransport, sowie das lokale Mikroklima und trägt damit als ein wichtiger indirekter Standortfaktor zur räumlichen Verteilung der Vegetation und zur Differenzierung der Landschaft bei. In Bezug auf Hang- und Massenbewegungen stellt das Relief einen wichtigen Faktor da, der Art, Größe und Bewegungsgeschwindigkeit von Rutschungen beeinflußt. Im Relief werden Rutschungsmerkmale durch Abrisse, Wulste, Dellen, Mulden und Buckel abgebildet. Wichtige Reliefparameter, die bei Massenbewegungen eine Rolle spielen, sind die Hangneigung, die Wölbung und die Exposition. Eine besondere Funktion hat dabei die reliefbedingte Verteilung des, durch Niederschläge auf die Erde gelangten, Wassers, welches als auslösender Faktor für Rutschungen eine große Rolle spielt und auf das in dieser Arbeit noch näher eingegangen wird. Für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten ist neben der gelände- und computergestützten Auswertung von schon erfolgten Rutschungen, dem Untersuchen und Beschreiben deren steuernden Faktoren, die Reliefanalyse eine wichtige Methode zur Auswertung und zum Erkennen von potentiell rutschungsgefährdeten Hangbereichen. Gerade die digitale Reliefanalyse, in Verbindung mit modernen Geoinformationssystemen, ermöglicht dem Anwender Reliefparameter, speziell der Relieftopologie (z.B. Einzugsgebietsgröße oder Fließweg) darzustellen, die ansonsten nur schwer oder gar nicht aus topographischen oder morphographischen Kartenwerken zu extrahieren sind. Dabei ist die Qualität der Datengrundlage einer solchen Analyse, das Digitale Geländemodell (DGM), eine wichtige Voraussetzung (Kapitel 4).

Die digitale Reliefanalyse setzt zunächst eine Parametrisierung des Reliefs voraus, die einen beliebigen Punkt im Gelände (oder eine Rasterzelle im Modell) in Bezug zu seinen Nachbarpunkten (Nachbarzellen) beschreibt. Dabei ist es sinnvoll die Geländeoberfläche in kleinste Reliefeinheiten aufzuteilen, die bei der digitalen Reliefanalyse in der Regel der Rasterzelle als kleinste Flächeneinheit entsprechen. Somit ist der Maßstab der lokalen Reliefbetrachtung von der Auflösung des DGM abhängig. Parameter, die das Relief in seiner Form (Reliefgeometrie) oder Lagebeziehung (Relieftopologie) zu anderen Reliefeinheiten beschreiben, werden nach SPEIGHT (1974) auch als primäre Parameter bezeichnet (Tab.11). Diese können direkt aus den Höhenwerten eines DGM abgeleitet werden (Hangneigung, Hangexposition). Die Ableitung erfolgt in der Regel mit Hilfe einer 3 x 3 Matrix (Fenstertechnik) in deren Mitte sich die jeweils betrachtete Rasterzelle befindet (TARBOTON, 2003). Die einzelnen Zellen der Matrix enthalten die Höhenwerte Z₁-Z₉, wobei der horizontale Abstand zwischen den Zellen durch die Rasterweite gegeben ist (Abb.64). Damit läßt sich für die zentrale Rasterzelle die Lagebeziehung zu ihren 8 Nachbarzellen und damit ihre Reliefattribute bestimmen. Sekundäre Reliefparameter (Feuchteindex, LS-Faktor) setzten sich aus der Kombination verschiedener primärer Parameter zusammen und können darüber hinaus auch externe Daten enthalten. Die Reliefanalyse ist für die faktorengestützte Berechnung von Gefahrenhinweiskarten ein probates Mittel, um flächendeckend Daten für große Gebiete zu erhalten. Da gerade für den Maßstabsbereich der Gefahrenhinweiskarten (1: 25.000 und größer) geotechnische und ingenieurgeologische Untersuchungen zu zeit- und kostenintensiv wären, ist es sinnvoll auf die Beschreibung reliefabhängiger Faktoren zurückzugreifen, zumal einzelne dieser Faktoren Hang- und Massenbewegungen stark beeinflussen (Hangneigung). Selbst bei rechnerischen Ansätzen im Hangmaßstab werden Faktoren wie Hangneigung und Hangwölbung berücksichtigt (infinite-slope-model, FEM-Methode).

Für die Durchführung der digitalen Reliefanalyse wurde die aus einzelnen Modulen aufgebaute Analysesoftware SAGA-LiTe verwendet. Die damit erstellten reliefgeometrischen und topologischen Parameter konnten dann in das ESRI Arc/Info-Grid Format exportiert und als reliefabhängige Faktoren für die Berechnung der Gefahrenhinweiskarten benutzt werden. Aus den ermittelten Reliefparametern wurden entsprechend ihrer Qualität und Aussagekraft einzelne ausgewählt und in verschiedenen Faktorenkombinationen in die Gefahrenmodelle integriert. Ziel war es dabei, mit möglichst wenigen Faktoren, die höchstmögliche Modellanpassung zu erreichen. Im Folgenden werden die einzelnen für Rheinhessen ermittelten Reliefparameter, ihr Bezug zu Hangbewegungen und ihre Verbreitung im Untersuchungsgebiet dargestellt, wobei auch solche aufgeführt werden, die in den Gefahrenmodellen keine Berücksichtigung finden, da sie trotzdem wichtige Informationen zur Reliefform und -gestalt liefern und zu einem besseren Gesamtbild beitragen.



Abb.64: 3x3 Matrix mit der zentralen Rasterzelle Z_5 und der Rasterweite λ ..

Reliefparameter	Definition	Bedeutung
Reliefgeometrie		
Höhe	Höhe über NN	Klima, Vegetation, potentielle Energie
Hangneigung	Neigungswinkel in Richtung des stärksten Gefälles	Abflußrate, Fließgeschwindigkeit, Verdunstung, Vegetation, Bodenfeuchte
Exposition	Neigungsrichtung (Richtung des stärksten Gefälles)	Abflußrichtung, Sonneneinstrahlung, Evapotranspiration, Verteilung der Vegetation
Vertikalwölbung	Wölbung in Richtung des stärksten Gefälles (erste Ableitung der Hangneigung)	Abflußbeschleunigung, Erosions- und Akkumulationsrate
Horizontalwölbung	Wölbung entlang der Höhenlinien	Konvergenz/Divergenz des Abflusses, Bodenfeuchteverteilung
Relieftopologie		
Einzugsgebietsgröße	Größe des Gebietes, das auf dem Weg zu einer Vorflut, durch eine betrachtete Rasterzelle entwässert	Abflußmenge
Spezifisches Einzugsgebiet	Genormte Einzugsgebietsgröße (Einzugsgebietsgröße pro Länge einer Höhenlinie über die dräniert wird)	Abflußmenge
Einzugsgebietsneigung	Mittlere Hangneigung des Einzugsgebietes	Abflußgeschwindigkeit, Zeit der Abflußkonzentration
Einzugsgebietshöhe	Mittlere Höhe des Einzugsgebietes	Potentielle Energie
Fließweglänge	Entfernung die der Abfluß bis zur betrachteten Rasterzelle zurückgelegt hat	Erosions-/Sedimentationsrate, Beschleunigung des Abflusses

Tab.11: Primäre Reliefparameter (nach SPEIGHT, 1974).

5.1.1 Reliefgeometrie

Die Reliefgeometrie einer Rasterzelle auf einer Oberfläche wird definiert durch deren Neigung, der Exposition (die Richtung ihrer Neigung zu Norden), sowie der Wölbung, die sich in die Komponenten Horizontal- und Vertikalwölbung aufteilen läßt. Die direkte Parameterableitung der Reliefgeometrie erfolgt mit Hilfe einer 3 x 3 Matrix, wobei die Beziehung der mittleren Rasterzelle zu ihren 8 Nachbarzellen betrachtet wird (Abb.1). Mit der Höheninformation, die jede Rasterzelle besitzt und dem horizontalen Abstand, der durch die Rasterweite des Gitters gegeben ist, lassen sich die entsprechenden reliefgeometrischen Parameter ermitteln.

5.1.1.1 Hangneigung

Die Hangneigung ist definiert als die Neigung eines Hanges in Bezug zu einer horizontalen Ebene, bzw. als größtes Gefälle zwischen dem zentralen Rasterpunkt einer 3 x 3 Matrix und seinen tieferliegenden Nachbarn. Die Berechnung erfolgt in Richtung des Gefälles, so daß sich für die Neigung negative Werte zwischen 0 und 90° ergeben (das Vorzeichen entfällt dann aber in der Regel). Als einfachste Variante kann die Neigung einer zentralen Rasterzelle zu einer ihrer 8 Nachbarzellen mit der Gleichung (8) berechnet werden.

$$N i = \arctan\left(\frac{\Delta Zi}{\Delta Li}\right) \tag{Gl.8}$$

Mit dem Index i werden die 8 Nachbarrasterzellen im Uhrzeigersinn, im Norden beginnend, durchnummeriert. Z kennzeichnet die Höhendifferenz und L die horizontale Entfernung jeder Zelle zur zentralen Rasterzelle (entspricht der Rasterweite des DGM, bei diagonalen Richtungen ergibt sich für die Entfernung $\sqrt{2}L$). Weiterführende Verfahren berechnen, ebenfalls basierend auf der 3 x 3 Matrix, zur Flächenapproximation die erste oder zweite Ableitung der Höhendaten. Die in der vorliegenden Reliefanalyse durchgeführte Hangneigungsbestimmung wurde nach dem Verfahren von ZEVENBERGEN & THORNE (1986, Polynom



Abb.65: Ausschnitt aus der Hangneigungskarte von Rheinhessen.

2. Grades) durchgeführt (Abb.65). Die Hangneigung ist einer der wesentlichen Faktoren zur Entstehung von Rutschungen und darüber hinaus der einzigste über den Hang- und Massenbewegungen auch ausgeschlossen werden können, nämlich dann, wenn der Neigungswinkel nahe bei, oder 0° ist. Die Hangneigung ist außerdem eine Komponente der Hangabtriebskraft, sowie der Scherspannung, die als "treibende Kräfte" das Hanggleichgewicht beeinflussen. Dies gilt sowohl für Fließ- und Gleitbewegungen in flachen, als auch für Steinschläge und Felsstürze in steilen Hangbereichen. Betrachtet man also den Zustand eines intakten Hanges als Gleichgewicht zwischen "rückhaltenden" und "treibenden" Kräften, bedeutet dies im einfachsten Fall, daß der Reibungswinkel (rückhaltende Kraft) größer (stabil) oder gleich (labil) der Hangneigung (treibende Kraft) ist (Abb.66 und Gleichung 9).

$$\eta = \frac{G \cdot \cos(\beta) \cdot \tan(\varphi)}{G \cdot \sin(\beta)} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\beta)}$$
(Gl.9)

Deshalb wurde die Hangneigung als wichtigster Parameter neben der Geologie, was die statistische Auswertung ebenfalls belegt, grundsätzlich in das Gefahrenmodell integriert. Darüber hinaus zeigt sich, daß selbst Modelle, die nur die Faktoren Hangneigung und Geologie berücksichtigten, schon brauchbare Ergebnisse über die Verteilung der potentiellen Rutschungsgefährdung zulassen.



Abb.66: Grenzgleichgewicht eines einzelnen Blocks.

Hangneigungsverteilung im Untersuchungsgebiet

Die Hangneigung als Reliefattribut stellt im Untersuchungsgebiet einen der wichtigsten Faktoren für die Entstehung von Rutschungen da. Zum einen ergab die für Rheinhessen durchgeführte Diskriminanzanalyse (vgl. Kapitel 6), daß der Faktor Hangneigung in Verbindung mit dem Faktor Geologie auch statistisch den größten Anteil an der Verbreitung von Rutschungen innerhalb Rheinhessens besitzt, zum anderen zeigte die statistische Auswertung der Rutschungsdatenbank, daß die bekannten Rutschungen zum größten Teil innerhalb eines begrenzten Neigungsbereiches vorkommen. Um das Verhältnis der Hangneigungsverteilung innerhalb der Rutschareale mit der Hangneigungsverteilung im DGM besser vergleichen zu können, wurde zusätzlich die Failure-Rate (ANIYA 1985) berechnet. Dazu wird die relative Häufigkeitsverteilung eines Faktors, hier der Hangneigung (HN_R), in Bezug zur Verteilung im Gesamtgebiet (HN_G) gesetzt (Gleichung 10). Failure-Rates die im Bereich > 1 liegen deuten darauf hin, daß der Faktor einen Einfluß auf den Rutschungsprozeß hat.

$$FR = \frac{(HN_R)}{(HN_G)} \tag{Gl.10}$$

Zusätzlich wurde die Hangneigung in Anlehnung an LESER & STÄBLEIN (1975) in vier Hangneigungsklassen aufgeteilt, wobei zu berücksichtigen war, daß die einzelnen Klassen zum einen in Bezug zur Hangneigungsverteilung im Gesamtgebiet, zum anderen zur Vertei-



Abb.67: Hangneigungsverteilung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.

lung innerhalb der Rutschareale, sinnvoll gewählt wurden (Tab.12). Nach STEINGÖTTER (1983) finden sich die Klassengrenzen als kritische Winkel im Gelände wieder.

So kommen in Hangbereichen $< 3^{\circ}$ keine Gleit- oder Fließbewegungen mehr vor, der Winkel der Restscherfestigkeit liegt häufig bei 7° und Hangbereiche $>15^{\circ}$ kommen im Untersuchungsgebiet nur noch geringfügig vor.

Klasse	Hangneigung [°]
Klasse 1	< 3
Klasse 2	3 – 7
Klasse 3	7 – 15
Klasse 4	> 15

Tab.12: Klassengrenzen der Hangneigung.

Die Auswertung der Hangneigungsverteilung für das gesamte Untersuchungsgebiet zeigt, daß die Hangneigungsklasse 1 (Flächen unter 3°) mit 70,6 % den größten Teil des Gesamtgebietes ausmacht. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die flachen Bereiche der Rhein- und Naheterrassen, sowie der Hochplateaus. Für die Klasse 2 ergibt sich eine relative Häufigkeit von 20,7 %, wobei hier hauptsächlich die flachen Unterhänge zusammengefaßt sind. Die Klasse 3 mit einer Häufigkeit von 7,8 % tritt schon stark hinter den Klassen 1 und 2 zurück. Sie umfaßt die Mittel- und Oberhänge der Schichtstufen. Bereiche mit Hangwinkeln >15° (Klasse 4) finden sich bei den Schichtstufen nur noch innerhalb der oligozänen Schichten, wobei hier die maximal Werte bei ca. 33° liegen. Steilere Hangbereiche bis maximal 40° treten nur in den Randbereichen des Untersuchungsgebietes auf, die aber geologisch zum Rotliegenden oder zum Rheinischen Schiefergebirge gehören und deshalb in der Gefahrenhinweiskarte keine Berücksichtigung mehr finden.

Die Hangneigungsverteilung der Rutschungsflächen zeigt eine Normalverteilung, wobei der Schwerpunkt im Bereich der Hangneigungsklasse 3 liegt, in die 68,2 % aller durch Rutschungen betroffenen Flächen einzuordnen sind. Innerhalb dieser Neigungsklasse zeigt sich darüber hinaus eine Konzentration von Rutschungen im Bereich zwischen 7 und 10°. Betrachtet man sich den von STEINGÖTTER (1983) in den Peliten ermittelten Wert der Scherfestigkeit mit einem Winkel der inneren Reibung von 16°, bei MATTHESIUS (1994) sogar 17,45°, muß davon ausgegangen werden, daß wie schon KRAUTER et al. (1983) vermutet hat, die innere Reibung zusätzlich durch einen Wasserfilm auf der Gleitfläche reduziert wird.

Der Klasse 2 $(3 - 7^{\circ})$ konnten 29,0 % der durch Rutschungen betroffenen Flächen zugeordnet werden. Der Neigungsklasse 1 (Hangwinkel < 3°) noch 1,07 %, wobei hier die Tendenz zur "Verflachung" im 40m-Raster berücksichtigt werden muß.

Für die Hangneigungsklasse 4 ergibt sich eine relative Häufigkeit der Rutschungen von 1,7 %, wobei keine Rutschungen mehr in Hangbereichen mit Neigungswinkeln über 20° vorkommen (Tab.13).

Hangneigungs -klasse	Neigung [°]	Fläche DGM [%]	Fläche Rutschungen [%]	Verteilung Rutschungsdatenbank [%]	Failure- Rate
Klasse 1	< 3	70,6	1,1	0,0	0,0
Klasse 2	3 - 7	20,7	29,0	6,4	1,4
Klasse 3	7 - 15	7,8	68,2	85,5	8,7
Klasse 4	> 15	0,9	1,7	8,1	1,9

Tab.13: Verteilung der Neigungsklassen im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.

Betrachtet man sich die berechneten Failure-Rates (Tab.13) der einzelnen Hangneigungsklassen, zeigt sich auch hier der Schwerpunkt bei Klasse 3 (FR=8,7). Da sich die Häufigkeitsverteilungen der Hangneigungen von Gesamtgebiet und Rutschungen stark unterscheiden, (Abb.67) kann davon ausgegangen werden, daß die Neigungsklassen 2 und 3 innerhalb der Rutschungen überrepräsentiert sind, und somit der Faktor Hangneigung einen größeren Einfluß auf das Auftreten von Hang- und Massenbewegungen in Rheinhessen hat.

5.1.1.2 Exposition

Unter der Exposition eines Hanges versteht man die horizontale Lage der Hangneigung zur Himmelsrichtung (0-360°), die sich aus der Richtung der Nachbarzellen mit der stärksten Neigung zur zentralen Rasterzelle in einer 3 x 3 Matrix ergibt. Die Exposition beeinflußt, in Verbindung mit der Hangneigung, die Strahlungsbilanz und Temperaturverteilung der Hangoberfläche, die Richtung des Abflusses, die Verdunstung, die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Damit kann die Exposition auch Auswirkungen auf die Verteilung von Hang- und Massenbewegungen haben. So zeigt sich in den Alpen, daß südexponierte Felshänge stärker zu Steinschlägen neigen als beispielsweise Nordhänge, da zum einen das "Auftauen" der Felshänge in den Sommermonaten zu einer Destabilisierung führt, zum anderen größere Temperaturunterschiede an Südhängen im Winter zu Frostsprengungen führen können. Für Rheinhessen konnte ebenfalls eine Abhängigkeit der Rutschungsverteilung von der Exposition festgestellt werden. Speziell an süd- und südwestexponierten Hängen treten häufiger Massenbewegungen auf (Abb.68). Dabei muß berücksichtigt werden, daß eine der Hauptursachen für das Auftreten von Hangbewegungen in Rheinhessen die Reaktivierung fossiler Rutschungen pleistozäner Zeit ist. Die Verteilung pleistozäner Solifluktionsprozesse in periglazialem Klima durch Auftauvorgänge ist aber stark von der Hangexposition abhängig (FRIEDRICH, 1996). Hinzu



kommt, daß große Teile des Untersuchungsgebietes mit mächtigen Deckschichten, vorwiegend Löß und Lößlehm, bedeckt sind, die stabilisierend wirken und Rutschungen verhindern (KRAUTER & STEINGÖTTER, 1984). Diese Deckschichten finden sich hauptsächlich an ost- und nordostexponierten Hängen, da der Löß im Pleistozän aus Osten, von den großen Sander- und Schotterflächen, angeweht wurde und sich im Lee-Bereich der Hänge ablagerte. Entsprechend weisen nordost- und ostexponierte Hänge den geringsten Anteil an Rutschungen auf (Abb.68).



Abb.69: Ausschnitt aus der Expositionskarte von Rheinhessen.

Da in Bezug auf die Rutschungsdisposition weniger die Exposition einer Rasterzelle, sondern vielmehr die Exposition eines Hangbereiches von Wichtigkeit ist, wurde deshalb die mittlere Exposition des Einzugsgebietes ermittelt. Als Problem erweist sich dabei, daß bei der Exposition die Nordabweichung in einem Wertebereich von 0-360° ermittelt wird, d.h. 0° und 360° liegen zwar in ihren Werten weit auseinander, repräsentieren aber die gleiche Exposition. Da dies in weiterführenden mathematischen Berechnungen zu Schwierigkeiten hätte führen können, wurde eine Cosinustransformation der Exposition durchgeführt. Die Hauptrichtung Norden erhält den Wert 1, die Gegenrichtung Süden -1. Alle Richtungen dazwischen bekommen Werte zwischen 1 und -1 zugeordnet (HÖRSCH, 2001). Um die Hauptrichtung, entsprechend der in Rheinhessen vorkommenden Häufigkeiten, nach NE zu verschieben, müssen von der Exposition zusätzlich 45° abgezogen werden (Gleichung 11).

$$x = \cos(Exposition - 45) \tag{Gl.11}$$

Für die statistische Auswertung und zur besseren Veranschaulichung war es zudem notwendig die Expositionen in 8 Klassen zu unterteilen. Die Klassen entsprechen den 8 Hauptrichtungen (N, NE, E, SE, S, SW, W und NW). Für die Auswertung des DGM mußte eine 9. Klasse hinzugefügt werden, in die alle ebenen Flächen mit der Hangneigung 0° zusammengefaßt wurden (Abb.69). Bei diesen Flächen handelt es sich hauptsächlich um Gewässeroberflächen.



Abb.70: Häufigkeitsverteilung der Hangexpositionen im DGM und innerhalb der durch Rutschungen betroffenen Flächen.
Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung der Exposition im DGM von Rheinhessen ergibt eine annähernd gleichmäßig absteigende Verteilung von Nordosten nach Nordwesten (5,0% - 18,7%, Abb.70). Den größten Anteil mit über 28,6% der Fläche besitzen die nordexponierten Hänge.

Bei den Rutschungen divergierte die Verteilung der einzelnen Richtungen stärker (Abb.70). Die meisten Rutschungen traten an südlichen (24,8%) und westlichen (14,7%) Hanglagen auf, gefolgt von südwest- (13,5%) und südostexponierten Hängen (12,1%). Die berechneten Failure-Rates der Expositionen zeigen ebenfalls eine deutliche Gewichtung der süd-, west-, und südwestlichen Hanglagen und deuten auf eine stärkere Rutschungsgefährdung hin (Tab.14). Im Gegensatz dazu treten die Hangrutschungen an ost- und nordostexponierten Hängen stark zurück, was wie oben schon erwähnt auf die mächtigeren Deckschichten von Löß und Lößlehm zurückzuführen ist.

Hangneigungs -klasse	Fläche DGM [%]	Fläche Rutschungen [%]	Verteilung Rutschungsdatenbank [%]	Failure- Rate
flach	0,0	0,0	0,0	0,0
Ν	28,7	10,1	7,2	0,4
NW	5,0	10,1	8,8	2,0
W	6,5	14,7	3,3	2,3
SW	7,4	13,5	14,4	1,8
S	8,7	24,8	21,0	2,8
SE	10,9	12,1	18,8	1,1
Е	14,1	7,6	13,8	0,5
NE	18,7	7,0	12,7	0,4

Tab. 14: Verteilung der Hangexpositionen im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.

5.1.1.3 Wölbung

Die Wölbung ist ein aus der 2. Ableitung der Höhe berechneter Faktor, der die Hang-, bzw. Oberflächenform beschreibt. Das Maß für die Wölbungsstärke ist gekennzeichnet durch den Wölbungsradius in Meter, der als der Radius des Kreises definiert ist, der sich in die gewölbte Fläche einfügen läßt (KLEEFISCH & KÖTHE, 1993; Abb.71). Dabei beschreiben negative Wölbungsradien konkave (Hohlformen) und positive Wölbungsradien konvexe (Vollformen) Oberflächenformen. Da die Extrema, also stark konkave und konvexe Formen, mit kleinen Wölbungsradien im Wertebereich dicht beieinander liegen, ist es für die statistische Auswertung sinnvoller die Wölbungsradien in die Wölbung oder Krümmung (1/m) umzuwandeln FRIEDRICH (1996). Bei der Wölbung tendieren die Extrembereiche dann gegen -1 (konkav)



Abb.71: (a) vertikale Wölbungsradien, (b) horizontale Wölbungsradien (KLEEFISCH&KÖTHE 1993).

bzw. 1 (konvex) und die gestreckten Hangformen gegen 0. Die Wölbung ist ein zusammengesetzter Parameter, der aus einer vertikalen (Vertikalwölbung) und einer horizontalen Komponente (Horizontalwölbung) besteht. Auf die in manchen Arbeiten verwendete Queroder Tangentialwölbung soll hier nicht weiter eingegangen werden.

Die Wölbung sollte kritisch betrachtet werden, da sie stark von der Rasterweite und Qualität des DGM, insbesondere von der Höhengenauigkeit, abhängig ist. Konkave Formen, im Gelände als Dellen, Mulden oder Senken erkennbar, sind meist durch Akkumulation von Feinmaterial gekennzeichnet und weisen höhere Bodenfeuchtewerte auf als konvexe oder gestreckte Hangbereiche (Abb.71). Im Gegensatz dazu sind konvexe Formen (Sättel, Hang-



Abb.72: Vertikalwölbung verschiedener Hangbereiche am Beispiel des Wißbergs (Profil überhöht).

rücken, Buckel) durch den Abfluß von Oberflächenwasser Bereiche, an denen verstärkt Erosion auftreten kann. In hochauflösenden DGM's können auch durch Rutschungen entstandene großflächige Oberflächenstrukturen wie Wulste, Mulden, Bodenwellen oder Dellen abgebildet, und in Verbindung mit Luftbildanalysen als Rutschgebiete erkannt werden.

Für Rheinhessen zeigt sich, daß viele der aufgenommenen Rutschungen in konkaven Hangbereichen auftreten.

Vertikalwölbung

Die Vertikalwölbung beschreibt die Wölbung in Richtung des stärksten Gefälles (Abb.73), bzw. die Winkeländerung der Hangneigung mit der Entfernung und kann als Maß für die Abflußbeschleunigung und damit auch für die Erosions- und Akkumulationsrate betrachtet werden (Abb.72). Da in Rheinhessen, durch das flachwellige Relief und die großen Plateauflächen, überwiegend gestreckte, bzw. schwach gewölbte Hangformen vorhanden sind, wurden zu deren besseren Gliederung die berechneten Wölbungen mit einer Transferkonstante angepaßt (FRIEDRICH, 1996). Dadurch konnten große Wölbungsradien gestaucht und eine bessere Reliefgliederung ermöglicht werden (Gleichung 12).

$$f(w) = \frac{w}{(|w| + 0,000666)} \tag{Gl.12}$$



Abb.73: Ausschnitt aus der Karte der Vertikalwölbungen von Rheinhessen.

Die Transferkonstante ist stark abhängig vom Relief des untersuchten Gebietes und muß dementsprechend gewählt werden. Angelehnt an FRIEDRICH (1996) hat sich für Rheinhessen eine Transferkonstante von 0,000666 (Wölbungsradius ca. 1500 m) als sinnvoll erwiesen.



Abb.74: Häufigkeitsverteilung der Vertikalwölbung...

Die statistische Auswertung der Vertikalwölbung zeigt, daß mit 80,3 % zum größten Teil gestreckte Hangformen im Untersuchungsgebiet vorhanden sind. Im Gegensatz dazu treten konvexe (9,4 %) und konkave (10,3 %) Oberflächenformen stark zurück.

Für die Rutschungen ergab die statistische Auswertung, daß 55,3 % der betroffenen Flächen in gestreckten, 26,5 % in konkaven und 18,3 % in konvexen Hangbereichen liegen (Tab.15 und Abb.74). Die Failure-Rate zeigt, daß die konkaven Flächen innerhalb der durch Rutschungen betroffenen Hangbereiche überproportional vertreten sind (FR=2,6), wohingegen die gestreckten Flächen zurücktreten (FR=0,7). Der relativ hohe Anteil von Rutschungsflächen in konvexen Hangbereichen läßt sich nur schwer erklären, wird aber durch die in der Rutschungsdatenbank gespeicherten Geländebeobachtungen bestätigt (Tab.15). Vermutlich werden Großrutschungen, die sich über ganze Hangbereiche erstrecken, in der Statistik gegenüber kleinen Rutschungen zu stark gewertet, so daß für zukünftige Untersuchungen eine sinnvolle Vorauswahl der Rutschungen getroffen werden sollte.

Wölbung	Fläche DGM [%]	Fläche Rutschungen [%]	Verteilung Rutschungsdatenbank [%]	Failure- Rate
Konvex	9,4	18,3	30,7	2,0
gestreckt	80,3	55,3	26,5	0,7
konkav	10,3	26,5	42,8	2,6

Tab.15: Häufigkeitsverteilung der Vertikalwölbung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.

Horizontalwölbung

Die Horizontalwölbung beschreibt die Formänderung eines Hanges in Richtung der Isohypsen und entspricht der Expositionsänderung pro Längeneinheit (Abb.75). Damit lassen sich Rückschlüsse auf die Art des Abflusses (divergent oder konvergent) und die reliefbedingte, relative Verteilung des Wassers im Boden ziehen, d.h. es ist ein potentiell höherer Bodenwasserzufluß in konkaven (Hangmulden) und ein erhöhter potentieller Abfluß in konvexen (Hangrücken) Hangbereichen zu erwarten. Deshalb finden sich die meisten Rutschungen Rheinhessens entsprechend innerhalb oder im Bereich von Hangmulden, da das Hangwasser und dessen Verteilung, als auslösender Faktor von Rutschungen, unter anderem durch das Herabsetzen der Scherfestigkeit, eine große Rolle spielt.



Abb. 75: Ausschnitt aus der Karte der Horizontalwölbung.

Die statistische Auswertung für das Untersuchungsgebiet zeigt, daß die "geraden" Hangbereiche mit 60,7 % stark überwiegen, wohingegen konvexe und konkave Hangformen (Tab.16 und Abb.76) mit etwa 20 % deutlich weniger vorhanden sind. Hierbei sollte berücksichtigt werden, daß die geraden Hangbereiche nicht nur natürlichen Ursprungs sind, sondern auch durch Bewirtschaftung oder Flurbereinigung entstanden sein können.

Für die Auswertung der Horizontalwölbung innerhalb der Rutschgebiete ergibt sich eine umgekehrte Verteilung, bei der die konkaven und konvexen Hangbereiche gegenüber der geraden Hangform leicht überwiegen (Tab.16 und Abb.76). Dementsprechend zeigen die konkaven Hangbereiche die höchste Failure-Rate (FR=2,1) und stützen die Beobachtung, daß die meisten Rutschungen in Hangdellen auftreten.

Wölbung	Fläche DGM [%]	Fläche Rutschungen [%]	Verteilung Rutschungsdatenbank [%]	Failure- Rate
Konvex	20,8	35,1	30,7	1,7
gestreckt	60,7	26,5	26,5	0,4
konkav	18,5	38,4	42,8	2,1

Tab.16: Häufigkeitsverteilung der Horizontalwölbung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.



Abb.76: Häufigkeitsverteilung der Horizontalwölbung im DGM und innerhalb der Rutschgebiete.

5.1.1.4 Divergenz/Konvergenz-Index

Der Divergenz/Konvergenz-Index nach KÖTHE & LEHMEIER (1993) basiert auf den Expositionsabweichungen der Nachbarzellen einer 3 x 3 Matrix zur zentralen Rasterzelle, ohne dabei die Reliefparameter Hangneigung und Wölbung zu berücksichtigen. Die summierten Abweichungen aller Nachbarzellen in Prozent geben Auskunft über Konvergenz oder Divergenz, wobei die Richtungsvektoren der Nachbarzellen dementsprechend zur zentralen Rasterzelle hin- oder weggerichtet sind (-100% = konvergent / + 100% = divergent). Bei 0 % verlaufen die Richtungsvektoren aller Rasterzellen parallel. Der Index zeigt ähnlich der Wölbung die Oberflächenform auf und gibt einen Überblick darüber, wo reliefbedingt ein Zufluß oder Abfluß von Oberflächenwasser stattfindet (Abb.77).



Abb.77: Ausschnitt aus der Karte des Konvergenzindexes nach KÖTHE & LEHMEIER (1993).

5.1.2 Relieftopologie

Die Relieftopologie beschreibt die relative Lage einer Rasterzelle auf der Geländeoberfläche, bzw. die Lage zu ihren Nachbarzellen. Die Ableitung der topologischen Reliefparameter beruht hauptsächlich auf dem Abflußgeschehen (angenommener Oberflächenabfluß) des zu untersuchenden Geländeabschnittes. Dabei wird angenommen, daß die räumliche Abflußverteilung vom Relief (Hangabtriebskraft) bestimmt wird. So liegen z.B. alle Zellen die in eine zentrale Rasterzelle entwässern, topologisch höher als diese. Umgekehrt befinden sich alle Zellen in die eine zentrale Rasterzelle entwässert, topologisch tiefer. Mit dieser Annahme kann zudem der Gesamtzufluß, also die Gesamtzahl der Zellen, die in eine Rasterzelle entwässern, bestimmt werden (BAUER, ROHDENBURG & BORK, 1985). Der entsprechende Reliefparameter wird auch als Einzugsgebietsgröße bezeichnet und darf nicht mit dem hydrologisch geprägten Begriff "Einzugsgebiet" verwechselt werden. Die Berechnung wurde mit Hilfe des parallelen Verfahrens durchgeführt, bei dem das DGM von der höchsten zur tiefsten Rasterzelle abgearbeitet wird. Dabei wird ermittelt wie sich der Abfluß einer Rasterzelle auf die jeweils tiefer gelegenen Zellen verteilt. Um möglichst realistische Bedingungen zu erhalten, wurde als Berechnungsmodell die Multiple Flow Direction Methode nach FREEMAN (1991) benutzt, da sie im Gegensatz zu der in den meisten Programmen verwendete Deterministic 8 Methode (besser geeignet zur Berechnung des linearen Abflusses) auch einen gewichteten Abfluß in mehrere Zellen zuläßt (TARBOTON, 1997).

Als Problem bei der Ermittlung von topologischen Reliefparametern erweisen sich sogenannte "sinks", lokale Minima der Höhe (abflußlose Senken), bei denen alle Nachbarzellen höher liegen und die für die Abflußmodellierung eine bedeutende Fehlerquelle darstellen. Da es für eine solche Zelle keine tieferliegenden Nachbarzellen gibt, an die der Abfluß weitergeleitet werden kann, bricht der Algorithmus an dieser Stelle die Berechnung ab. Die "sinks" entstehen bei der Interpolation von DGM's durch Generalisierung der Höhendaten und müssen vor der Ermittlung von topologischen Reliefparametern korrigiert werden.

5.1.2.1 Einzugsgebietsgröße

Die Einzugsgebietsgröße ist definiert als die Größe (Anzahl der Rasterzellen) eines Gebietes, von dem eine Rasterzelle Oberflächenabfluß bzw. oberflächennahen Abfluß erhält und stellt einen wichtigen Faktor für die Berechnung von sekundären Reliefparametern und Erosionsvorgängen da (Abb.78). Da bei der Ermittlung der Einzugsgebietsgröße das Ergebnis in der Regel in Anzahl der Zellen ausgegeben wird, muß dieser Wert mit der Rasterweite multipliziert werden, um die tatsächliche Flächengröße des Einzugsgebietes zu erhalten. Wie schon oben erwähnt, darf die Einzugsgebietsgröße nicht mit dem Einzugsgebiet im hydrologischen Sinne verwechselt werden, da es sich hierbei nur um die Größe des Abflusses in eine Zelle und nicht in einen Vorfluter (in der Regel mehrere Zellen) handelt. Da die Einzugsgebietsgröße proportional zum Abfluß ist, erhält man über die hangaufwärts gelegenen Zellen die potentiell zu erwartende Zuflußmenge, die in die betrachtete Rasterzelle entwässert. Damit lassen sich zudem auch Aussagen über die potentielle Erosion machen, da mit zunehmender Einzugsgebietsgröße auch die für erosive Prozesse verfügbare Wassermenge der Rasterzelle zunimmt.

Für die Berechnung zusammengesetzter, sekundärer Reliefparameter (z.B. TWI), welche die Einzugsgebietsgröße enthalten, ist es von Vorteil diese zu normieren. Dazu wird die Einzugsgebietsgröße durch die Länge der Isohypse dividiert, über die der Abfluß erfolgt, wobei als Ergebnis das sogenannte "spezifische Einzugsgebiet" entsteht. Dadurch werden, als Voraussetzung für die Berechnung sekundärer Reliefparameter, unterschiedliche Einzugsgebietsgrößen miteinander vergleichbar. Die Berechnung der Einzugsgebiete erfolgte mit Hilfe des Multiple Flow Direction-Algorithmus nach FREEMAN (1991).

Im Zuge der Berechnung von Einzugsgebiet und spezifischem Einzugsgebiet wurden zusätzlich noch folgende Reliefparameter ermittelt:

- Einzugsgebietshöhe : Zeigt die mittlere Höhe des Einzugsgebiets an und läßt Rückschlüsse auf die potentielle Energie des Einzugsgebiets zu.
- Einzugsgebietsneigung: Beschreibt die durchschnittliche Neigung des Einzugsgebiets und kann zur Bestimmung von Abflußgeschwindigkeit und -konzentration benutzt werden.
- Einzugsgebietsexposition: Bestimmt die mittlere Exposition und damit die Richtung des Abflusses.
- Fließlänge: Gibt die maximale Länge des Abflusses zur betrachteten Rasterzelle an und kann auch als Hanglänge bezeichnet werden.

Außerdem konnte mit Hilfe des Einzugsgebiets das Gewässernetz, sowie die hydrologischen Einzugsgebiete mit den dazugehörigen Wasserscheiden modelliert werden.



Abb. 78: Einzugsgebietsgröße für jede Rasterzelle in Anzahl der Rasterzellen.

5.1.3 Sekundäre Reliefparameter

Sekundäre Reliefparameter setzen sich aus mehreren primären Reliefparametern zusammen und können durch mathematische Gleichungen und weitere nicht reliefbedingte Daten ergänzt werden.

5.1.3.1 Bodenfeuchteindex (TWI)

Der Bodenfeuchteindex oder topographic wetness index (TWI) nach BEVEN & KIRKBY (1979) ist ein Maß für die potentielle Durchfeuchtung des Bodens und geht von der Annahme aus, daß die Geländeform (Topographie) die Bodenfeuchteverteilung in einem Einzugsgebiet beeinflußt, d.h. die Divergenz/Konvergenz (Konvergenzindex) des oberflächennahen Bodenwasserflusses und die Hangneigung bestimmen die räumliche Verteilung des Bodenwassers. Damit zeigt der TWI in welchen Bereichen bei Niederschlägen zuerst Sättigung und damit ein Oberflächenabfluß auftritt und kann nach WILSON & GALLANT (2000) auch als Langzeit-Bodenfeuchte-Index betrachtet werden. Der TWI setzt sich aus der logarithmischen Verknüpfung von spezifischem Einzugsgebiet und Hangneigung einer betrachteten Rasterzelle, sowie der Transmissivität T (Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) x Mächtigkeit (M) des Aquifers) zusammen (Gleichung 15). Die Einzugsgebietsgröße kann als proportional zu der, die betrachtete te Rasterzelle durchfließenden Wassermenge angesehen werden. Die Hangneigung ist ein

Maß für die Abflußgeschwindigkeit des oberflächennahen Bodenwassers.

Die Annahme des TWI ist nur gültig, wenn der laterale Fluß einen größeren Anteil am Gesamtabfluß des Einzugsgebietes besitzt. Es ist jedoch anzunehmen, da die Durchlässigkeit in den meisten Böden mit der Tiefe exponential abnimmt, daß sich beim Auftreten eines hydraulischen Gradienten, auch ein lateraler Fluß bildet. Dieser setzt sich zusammen aus der Hangneigung und der Transmissivität, bzw. der Bodendurchlässigkeit, die als Funktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit und der Tiefe zu einem Stauwasserspiegel betrachtet werden kann (WILSON & GALLANT, 2000; Gl.14). Nimmt man innerhalb des Untersuchungsgebietes eine gleichmäßige Grundwasserneubildungs-, bzw. Infiltrationsrate an, so setzt sich der Bodenwasserfluß q aus dem Produkt von spezifischem Einzugsgebiet und Grundwasserneubildungsrate bzw. Infiltration zusammen (Gl.13).

$$q = R \cdot A_{s} \tag{Gl.13}$$

$$q = T \cdot \tan \beta \tag{Gl.14}$$

Für die logarithmische Darstellung ergibt sich dann für den TWI die Gleichung (16).

$$w = \ln\left(\frac{As}{T \cdot \tan\beta}\right) \tag{Gl.16}$$

Q = Abfluβ A_s = spezifisches Einzugsgebiet β = Hangneigungs T = Transmissivität

Bezogen auf den "Wasserwirtschaftlichen Rahmenplan Rheinhessen" (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN, RHEINLAND-PFALZ, ABTEILUNG WASSERWIRT-SCHAFT) in dem die Durchlässigkeitsbeiwerte in den oberen Bodenschichten für Rheinhessen im Bereich von 10⁻⁵ - 10⁻⁶ m/s liegen und bei der Annahme einer konstanten Mächtigkeit, wurde die Transmissivität als annähernd konstant betrachtet. Dementsprechend kann ausgehend von einheitlichen Bodeneigenschaften die Transmissivität (T) in der Gleichung (16) wegfallen (da T=1 angenommen), so daß sich Gleichung (17) ergibt, in der nur noch Reliefattribute zur Berechnung vorhanden sind.

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{\tan\beta}\right) \tag{Gl.17}$$

Es zeigt sich damit, daß hohe Bodenwassergehalte im Bereich von konvexen, flachen Hangbereichen zu erwarten sind, wohingegen divergierende Geländeformen in steilen Bereichen mit kleinem spezifischen Einzugsgebiet eine geringere Bodenfeuchte erwarten lassen.

Nach SCHMIDT (2003) erreicht der TWI nur dann Gültigkeit, wenn für ein Einzugsgebiet folgende Annahmen zutreffen:

- Gleiche Grundwasserneubildungsrate, sowie homogener vertikaler Fluß.
- Homogene Bodendurchlässigkeit.
- Exponentielle Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe.
- Piezometrische Druckhöhe verläuft parallel zur Geländeoberfläche.
- Das Gleichgewicht des oberflächennahen Zu- und Abflusses hat sich in jedem Punkt eingestellt.
- Gleiche Infiltrationsrate.

Der TWI, speziell der vereinfachte, sollte kritisch betrachtet und nicht undokumentiert angewandt werden, da damit die Bodenfeuchte nur stark generalisiert dargestellt werden kann. Da der Gleichgewichtszustand von Zu- und Abfluß einer Rasterzelle, in der Realität meist nicht gegeben ist, wurde der quasi-dynamic-wetness Index (BARLING et al., 1994) eingeführt, der aufgrund einer zeitlichen Begrenzung des Abflusses die Größe des potentiellen Einzugsgebietes einer Zelle bestimmt. Der quasi-dynamic-wetness Index wurde nur für das Testgebiet Wißberg angewandt (Kap.8). Für den gesamten Untersuchungsraum Rheinhessen wurde auf den vereinfachten, nur auf Reliefattributen basierenden TWI zurückgegriffen (Abb.79).



Abb. 79: Topographischer Bodenfeuchte-Index.

5.1.3.2 Faktoren zur Beschreibung der räumlichen Erosionsgefährdung

Die Erosion, also die Prozesse von Abtrag, Transport und Ablagerung von Boden, speziell durch Wasser, stellt auch in Bezug auf Rutschungen ein erhöhtes Risiko für die Hangstabilität da. Gerade die Weinberge an den Plateaurändern Rheinhessens sind durch heftige sommerliche Niederschlagsereignisse von starker Bodenerosion gekennzeichnet, durch die jährlich hohe Kosten entstehen (KRIETER, 1977). Durch plötzliche Schneeschmelze in Verbindung mit Regen auf gefrorenem Untergrund, sowie langanhaltenden Niederschlägen oder kurzfristigen Starkregenereignissen, die die Infiltrationskapazität des Bodens überschreiten, steigt die Erosionsgefährdung an. Bei Niederschlägen spielt darüber hinaus die kinetische Energie und die Größe der Regentropfen eine Rolle, die beim Aufprall die Bodenaggregate zerstören und zur Verschlämmung der Oberfläche führen. Da die Erosion durch Wasser (Winderosion wird nicht berücksichtigt) ein permanent wirkender Faktor ist, der das Hanggleichgewicht stört und eine Ursache für Rutschungen sein kann, wurde versucht mit Hilfe von entsprechenden Relieffaktoren die potentielle räumliche Verteilung der Erosionsgefährdung von Rheinhessen darzustellen und mit der Häufigkeit von in erosionsgefährdeten Gebieten auftretenden Rutschungen zu vergleichen. Dazu wurde für Acker- und Weinbergsflächen der Length-Slope-Faktor (LS-Faktor), sowie für das Gesamtgebiet der Stream-Power-Index (SPI) berechnet.

LS-Faktor

Der LS-Faktor wurde der allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) entnommen und setzt sich aus dem Hanglängenfaktor L und dem Hangneigungsfaktor S zusammen. Er beschreibt den Einfluß des Reliefs auf den Prozeß der flächenhaften Erosion, wobei davon ausgegangen werden kann, daß mit zunehmender Hangneigung, sowie Hanglänge die Erosion ansteigt, da sich die Fließgeschwindigkeit, die Abflußbeschleunigung und die Ablußmenge erhöhen. Der Faktor ergibt das Verhältnis des Bodenabtrages durch Erosion des untersuchten Hanges zu dem Standardhang mit 22,1 m Länge und 9% Hangneigung. Für die Berechnung ergibt sich die Gleichung (18).

$$LS = \left(\frac{l}{22,13}\right)^{m} \cdot \left(\frac{\sin\beta}{0,0896}\right)^{n} \tag{Gl.18}$$

 $\begin{array}{l} l=L \ddot{a}nge \ des \ betrachteten \ Hanges \\ \beta= \ Hangneigung \ des \ betrachteten \ Hanges \\ m \ und \ n = \ Hangl \ddot{a}ngen- \ und \ Hangneigung sexponenten \end{array}$

Für die Exponenten werden bei Hängen mit Hanglängen < 100 m und Hangneigungen < 14° als Grundwerte für m=0,4 und n=1,3 angegeben (MOORE & WILSON, 1992).

Um zusätzlich die Konvergenz, bzw. Divergenz der Oberfläche zu berücksichtigen, wurde von MOORE & WILSON (1992) die Hanglänge durch das spezifische Einzugsgebiet ersetzt, so daß sich für die Ermittlung des LS-Faktors die Gleichung (19) ergibt.

$$LS = (m+1) \cdot \left(\frac{As}{22,13}\right)^m \cdot \left(\frac{\sin\beta}{0,0896}\right)^n \qquad (Gl. 19)$$

Zum LS-Faktor muß angemerkt werden, daß die Berechnung über die Gesamthanglänge erfolgt. Nach der ABAG wird aber nur die erosive Hanglänge berücksichtigt, die in der Regel kleiner ist, da sie von Straßen, Wegen und anderen Hindernissen begrenzt wird.

Verteilung des LS-Faktors im Untersuchungsgebiet

Die Ermittlung des LS-Faktors wurde nur für Acker- und Weinbergsflächen durchgeführt, da die Erosion auf diesen Flächen am größten ist. Als Maximalwert wurde ein Faktor von 25 erreicht, der auf steilere Weinbergslagen zurückzuführen ist, auf das Gesamtgebiet gesehen aber keine Rolle spielt. Für die potentielle Verteilung der Erosionsgefährdung anhand des Reliefs wurde folgende Einteilung gewählt (Tab.17).

LS-Faktor	potentielle Erosionsgefährdung
< 4	gering
4-10	mittel
> 10	hoch

Tab.17: Klassifizierung des LS-Faktors.

Die Flächen mit Faktorwerten < 4 finden sich hauptsächlich auf den Plateauflächen, in Tälern und an den Unterhängen der Plateauränder. Die Mittelhänge und Teile der Oberhänge sind durch mittlere Faktorwerte zwischen 4 und 10 gekennzeichnet, während sich hohe Werte > 10 meist im Bereich der steileren Oberhänge und Schichtstufen finden (Abb.80). Für die Verteilung des LS-Faktors ergab sich ein ähnliches Bild wie für die Verteilung der Hangneigung. Den größten Anteil an den untersuchten Acker- und Weinbergsflächen haben mit 31,8 %, Flächen mit einem LS-Faktor < 1. Faßt man alle Flächen mit LS < 4 zusammen, entspricht das 81,9 % der untersuchten Fläche (Tab.18 und Abb.81). Für Faktoren zwischen 4 und 10 ergeben sich noch 15,4 %, während der Flächenanteil bei Faktoren > 10 mit 2,7 % stark zurückgeht. Die LS-Faktoren innerhalb der Rutschgebiete zeigen mit 68,7 % einen Schwerpunkt zwischen 4 und 10, und erreichen bei Werten über 10 immer noch 13,8 % der Rutschungsflächen. Entsprechend nimmt die Failure-Rate ab einem Faktor von 4 stark zu (Tab.18 und Abb.81), wobei der Schwerpunkt bei Faktoren zwischen 6 und 10 liegt.



Abb.80: Karte mit der Darstellung des LS-Faktors.



Abb.81: Häufigkeitsverteilung des LS-Faktors im DGM und innerhalb der Rutschflächen.

LS-Faktor	DGM	Rutschungen
< 4	81,9	17,5
4 - 10	15,4	68,7
> 10	2,7	13,8

 Tab.18: Häufigkeitsverteilung des LS-Faktors im DGM und innerhalb der Rutschflächen.

Stream-Power-Index (SPI)

Der SPI ist der zweite Index der Aussagen über die räumliche Verteilung der Bodenerosion durch abfließendes Niederschlagswasser zuläßt. Im Gegensatz zum LS-Faktor zeigt der SPI das räumliche Muster der linienhaften Erosion, also die Verteilung von potentiellen Erosionsrinnen, über die bei Starkregenereignissen das Oberflächenwasser abfließt und ein Bodenabtrag aufgrund der Wasserschleppkraft stattfindet (Abb.82).



Abb.82: Kartenausschnitt des Stream-Power-Index.

5. 2 Landnutzung

Die Landnutzung ist ein wichtiger Faktor hinsichtlich der Rutschungsgefährdung von Hängen in Rheinhessen und wurde deshalb auf seine Verwendung und Gewichtung als Faktor für die Modellierung von Gefahrenmodellen untersucht. Dazu wurde mit Hilfe eines Satellitenbildes (Landsat TM 7), verschiedener Luftbilder von Rheinhessen und anhand von Karten in verschiedenen Maßstäben, die Landnutzung für Rheinhessen digitalisiert. Als Ergebnis entstanden 11 Landnutzungsklassen (Abb.83), die zum einen auf ihre statistische Verteilung im betrachteten Gesamtgebiet und zum anderen auf ihre Verteilung innerhalb der bekannten Rutschareale untersucht wurden.

Die Vegetationsbedeckung kann unter bestimmten Voraussetzungen stabilisierend wirken und sowohl als "Erosions-" wie auch als "Rutschungshemmer" fungieren. Je nach Vegetationsart entsteht ein wirkungsvoller Schutz gegen Erosion durch fließendes Wasser und Rutschungen, der nicht nur auf den Wurzelraum beschränkt ist. Größere Waldflächen sind in der Lage bis zu 20% des Jahresniederschlages durch ihr Blattwerk zurückzuhalten (Interzeption/Evapotranspiration). Außerdem reduzieren die Blätter die Aufprallgeschwindigkeit der Tropfen, so daß eine Bodenschädigung vermindert werden kann. Durch Aggregatbildung und Auflockerungen im Boden aufgrund von Wurzelbildungen und -ausscheidungen wird eine verbesserte Infiltrationsleistung erreicht und durch Pflanzentranspiration dem Boden zusätzlich Wasser entzogen, was einer Bodensättigung und damit Oberflächenabfluß entgegenwirkt. Zusätzlich werden Abflußbeschleunigung und Fließgeschwindigkeit durch oberirdische Pflanzenteile, die



Abb.83: Häufigkeitsverteilung der Landnutzungsklassen.

die Oberflächenrauigkeit erhöhen, herabgesetzt. In Bezug auf Rutschungen haben Pflanzenwurzeln eine zusätzliche stabilisierende Wirkung, die in der Erhöhung der "rückhaltenden Kräfte" eines Hanges liegen. Hier spielt hauptsächlich die Erhöhung des Reibungswinkels eine Rolle, unter anderem hervorgerufen durch die Armierung des Bodens durch Pflanzenwurzeln und durch die Erhöhung der Saugspannung aufgrund von Wasserentzug (TOBIAS, 2001). Durch die Wurzelarmierung kommt zudem eine Erhöhung der Kohäsion hinzu. Dabei ist allerdings Voraussetzung, daß die Pflanzen, bzw. deren Wurzelraum innerhalb des Wirkungsbereiches des stattfindenden Rutschungsprozesses liegen. Hinzu kommt, daß die Auflockerung und Verwitterung von Locker- und Festgesteinen durch geschlossene Vegetationsdecken gemindert werden kann.

Für Rheinhessen ergab die statistische Auswertung der Landnutzung, daß Ackerflächen mit 48,3%, gefolgt von Weinanbauflächen (23,6%), den größten Anteil an der Gesamtfläche besitzen (Tab.19). Rechnet man den Flächenanteil der Sonderkulturen (Obstanbau), die hauptsächlich im Bereich der Rheinterrassen zwischen Heidesheim und Ingelheim, sowie auf dem Plateau im Bereich Lerchenberg, Drais und Finthen zu finden sind, hinzu, so macht die landwirtschaftliche Nutzfläche ca. 78,3% der untersuchten Gesamtfläche aus, was die landwirtschaftliche Prägung des Untersuchungsgebietes unterstreicht (Tab.19). Mit etwa 4% treten Waldflächen innerhalb Rheinhessens stark zurück. Größere zusammenhängende Waldgebiete finden sich nur bei Mainz (Gonsenheimer Wald, Ober-Olmer Wald), bei Bad Kreuznach, sowie im Bereich der "Rheinhessischen Schweiz".

Landnutzung	Prozent DGM	Prozent Rutschungen	Failure-Rate
bebaute Flächen	13,9	2,9	0,2
Gewässer	0,1	0,0	0,0
Auen	0,2	0,0	0,0
Gartenkulturen	0,3	0,0	0,1
Wald	4,0	0,5	0,1
Acker	48,3	7,4	0,2
Sonderkulturen	6,3	1,0	0,2
Weinanbau	23,6	85,5	3,6
Wiese, Feuchtwiese	0,8	0,2	0,2
Brachflächen	2,2	2,5	1,1
Sonstige Nutzung	0,2	0,0	0,0

 Tab.19: Häufigkeitsverteilung der Landnutzung im DGM und innerhalb der Rutschflächen.

Bebaute Flächen, d.h. Stadt- und Ortsbereiche, Industrie- und Gewerbegebiete sowie klassifizierte Straßen machen ca. 13,9% der Gesamtfläche der untersuchten Bereiche Rheinhessens aus. Die Siedlungsflächen finden sich in der Regel im Bereich der Flußtäler (Rhein, Nahe, Selz), sowie an den Quellhorizonten des Mainzer Beckens wieder. Durch die vorhandene hohe Stadt- und Ortsdichte innerhalb Rheinhessens (Abb.84), speziell in den Verdichtungsräumen Stadt Mainz, Mainz-Bingen, Nieder-Olm, Stadt Bingen und Stadt Worms geht die Tendenz dazu über auch die Hangbereiche der rheinhessischen Plateaus zu bebauen (z.B. Nieder-Olm, Gau-Bischofsheim) und damit die Gefahr des Auftretens von Rutschungen zu begünstigen. Hierbei sollte die zukünftige Entwicklung der Raum- und Siedlungsstruktur für Rheinhessen beachtet werden.

Durch das steigende Bevölkerungswachstum, für 2005 wird die Bevölkerung Rheinhessens nach Angaben des Erläuterungsberichtes (Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Rheinhessen) des Ministeriums für Umwelt und Forsten auf 638.000 Einwohner geschätzt, der Zunahme der Privathaushalte, dem Anstieg der Wohnfläche pro Kopf, sowie der verstärkten Wanderung ins Umland, ist ein steigender Flächenbedarf zu erwarten, der in Zukunft eine verstärkte Nutzung, bzw. Bebauung der Hanglagen erforderlich machen wird. Um eine Aussage über die topographische Verbreitung der einzelnen Landnutzungsklassen zu bekommen, wurden diese mit



Abb.84: Besiedlungsdichte der Verbandsgemeinden und Kreisfreien Städte.

den 4 Hangneigungsklassen verschnitten. Dabei zeigt sich, daß der Anteil der Ackerflächen mit steigender Hangneigung stark zurückgeht (Abb.85). Hier spielt sicherlich die maschinelle Bearbeitung der Äcker eine Rolle, die nur bis etwa 10° Hangneigung sinnvoll ist. Die steileren Hangbereiche (Hangneigungsklasse 4) der Plateauränder sind ausschließlich durch Weinbauflächen oder Brachflächen bedeckt, mit Ausnahme im Bereich der "Rheinhessischen Schweiz", wo in den Steillagen noch Waldflächen hinzukommen. Die Landnutzungsklasse "bebaute Fläche" liegt erwartungsgemäß mit 68,1 % zum größten Teil im Bereich von Hangneigungen < 3°, was auf die Verdichtungsräume entlang des Rheintals (Bingen, Mainz, Worms) sowie des Nahetals (Bad Kreuznach) und Selztals (Nieder-Olm, Alzey) zurückzuführen ist. Immerhin noch 6 % der bebauten Fläche liegt in Hangbereichen mit Neigungen über 7° (Abb.85).

Die Auswertung der Häufigkeitsverteilung der Landnutzung innerhalb der digitalisierten Rutschflächen zeigte, daß 85,5 % der durch Rutschungen betroffenen Flächen in Weinbergen und 7,4 % innerhalb von Ackerflächen liegen. Gerade die steilen Weinbergsflächen sind erosions- und rutschungsanfällige Bereiche da hier meist eine durchgehende, stabilisierend wirkende Vegetationsdecke fehlt. Dadurch kann es gerade in den trockenen Sommermonaten zur schnelleren Austrocknung des Bodens und der Ausbildung von Trockenrissen kommen, über die bei Niederschlagsereignissen Wasser auch in tiefere Bodenbereiche gelangen kann. Oberflächenwasser kann ungehindert abfließen, was sich in rheinhessischen Weinbergen oft an den



Abb.85: Verteilung der Landnutzungsklassen auf die Hangneigungsklassen.

typischen Erosionsrinnen und der Ablagerung von angeschwemmtem Feinmaterial in den unteren Bereichen erkennen läßt. Versuche die Erosionsgefährdung durch Mulchen oder Bestockung quer zu den Höhenlinien zu minimieren, zeigten nur geringen Erfolg oder warfen neue Probleme auf (KRIETER, 1977).

5.3 Geologie

Neben der Hangneigung und der Kenntnis über vorhandene Rutschungen stellt die Geologie im Untersuchungsgebiet den wichtigsten Faktor zur Modellierung einer Gefahrenhinweiskarte für Hang- und Massenbewegungen da. Auch hier ergibt sich die Problematik, daß in der Regel geologische Karten nur in größeren Maßstäben (ab 1 : 25.000) vorhanden sind und genauere geologische Untersuchungen oder Kartierung nur für kleine Teilbereiche existieren. Für Rheinhessen, bzw. das linksrheinische Mainzer Becken ergab sich darüber hinaus die besondere Problematik, daß zwar für das gesamte Untersuchungsgebiet Karten im Maßstab 1 : 25.000 vorhanden sind, die Karten von ihrem Erstellungsdatum aber teilweise mehr als 80 Jahre auseinander liegen. Dadurch gab es zum einen keine einheitliche Einteilung der geologischen Einheiten unter den Kartenblättern, zum anderen gab es bei den älteren Karten zeitliche und inhaltliche Einordnungen geologischer Einheiten, die nach neueren stratigraphischen und paläontologischen Gesichtspunkten nicht mehr sinnvoll sind. Bei der digitalen Erfassung der 9 geologische Einheiten sehr unübersichtlich und nur schwer zu handhaben sind.



Abb.86: Häufigkeitsverteilung der geologischen Schichten von Rheinhessen innerhalb der Rutschgebiete.

Deshalb wurde vom Verfasser versucht, eine Neugliederung und Zusammenfassung der in den vorhandenen Karten vorkommenden geologischen Einheiten durchzuführen. Dadurch konnte die Anzahl der vorkommenden Schichten in einer geologischen Übersichtskarte (siehe Anhang) auf 34 Einheiten zusammengefaßt werden.

Geologische Einheit	Klasse
Abschwemm-Massen, arvernensis-Schotter, Auensedimente, Dinotheriensande, Flugsand, Freinsheim-Schichten, Lokalschotter, Löß & Lößlehm, Oberer Meeressand, Pliozäne Kiese und Sande, Sedimente des Urrheins, ungegliedert, Terrassensedimente, Unterer Meeressand	1
Corbiculaschichten, Hydrobienschichten, Kalktertiär (ungegliedert)	2
Bohnerzton, Cerithienschichten, Das weiße Oberpliozän, Eozäner Basiston, Gehängeschutt/Gehängelehm	3
Cyrenenmergel, Mittlere Pechelbronn-Schichten, Rupelton, Rutsch- Massen, Schleichsand, Süßwasserschichten, Untere Cerithien- und Süßwasserschichten	4

Tab.20: Klasseneinteilung der geologischen Einheiten.

Die daraus entstandene "Geologische Übersichtskarte von Rheinhessen" im Maßstab 1 : 25.000 setzt sich aus 9 geologischen Kartenblättern des Landesamtes für Geologie und Bergbau zusammen, wobei die Kartenübergänge teilweise stark variierten und vom Verfasser nicht immer aneinander angepaßt werden konnten. Hinzu kamen 5 Karten des Hessischen



Abb.87: Häufigkeitsverteilung der geologischen Schichten im DGM.

Geologischen Landesamtes, von denen jeweils nur die rheinhessischen Gebiete digitalisiert wurden.

Zur weiteren Bearbeitung mußten die geologischen Einheiten bezüglich ihres Einflusses auf den Rutschungsprozeß klassifiziert werden. Dazu wurde versucht die Schichten anhand ihrer geotechnischen Eigenschaften in 4 unterschiedlich gewichtete Klassen zu unterteilen (Tab. 20), die dann als Faktor Geologie in die zu berechnenden Gefahrenhinweismodelle integriert werden konnten. Schichten des Rotliegenden, sowie des Devon wurden bei der Klassifizierung nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurden die geologischen Einheiten hinsichtlich ihrer Verbreitung im Untersuchungsgebiet statistisch ausgewertet, um einen Überblick über die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Schichten zu bekommen (Abb.86 und Abb.87).

5.4 Rutschungen

Die wichtigste Voraussetzung für die Erstellung von, auf Hang- und Massenbewegungen basierenden Gefahrenhinweiskarten, ist die Kenntnis über schon vorhandene Rutschungen. Nur wenn eine statistisch relevante Zahl von Massenbewegungen bekannt ist und diese geologisch, geotechnisch, morphologisch und statistisch ausgewertet sind, können mit Hilfe dieses Expertenwissens sinnvolle Gefahrenhinweis- oder Gefahrenkarten erstellt und Risikobewertungen durchgeführt werden. Im einfachsten Fall kann schon eine Rutschungsinventarkarte zur Gefahrenbewertung herangezogen werden. Bei der Auswertung eines Rutschungsinventars steht der Gedanke im Vordergrund, Informationen über Ursachen, Wirkungen, bzw. Auswirkungen und beteiligte Faktoren an einer Rutschung zu sammeln, um dann mit Hilfe dieses Expertenwissens durch Vergleiche die potentielle Rutschungsgefährdung für solche Gebiete aufzuzeigen, für die noch keine Massenbewegungen bekannt sind. Dabei gilt zu berücksichtigen, daß in dem zu untersuchenden Gebiet möglichst gleiche geologische und geomorphologische Verhältnisse vorherrschen.

Um für diese Arbeit eine möglichst gute Grundlage an vorhandenen Rutschungen zu bekommen, wurde auf das Rutschungsinventar des Landesamtes für Geologie und Bergbau zurückgegriffen, das im Frühjahr 1982 von KRAUTER & STEINGÖTTER (1982) erstellt wurde. Das Rutschungsinventar beinhaltet ca. 200 Rutschungen, die sich im Winter 1981/1982 ereigneten. Da das Rutschungsinventar nur in Papierform vorlag, mußte vom Verfasser zunächst eine digitale Datenbank angelegt und die vorhandenen Rutschungen eingegeben werden. Dazu wurde in Anlehnung an das von STEINGÖTTER (1984) entwickelte Aufnahmeblatt, ein entsprechendes elektronisches Aufnahmeformular entworfen. Für die Auswertung wurde allerdings auf die im Aufnahmeblatt gemachte Unterscheidung zwischen Kern- und Randgebiet der Rutschung verzichtet, da eine sinnvolle Abgrenzung nicht immer nachvollziehbar war.

Die für die Rutschungen vorhandenen Lagepläne im Maßstab 1:1000 wurden ebenfalls entsprechend digitalisiert und wie die Rutschungsdatenbank in das Geoinformationssystem integriert. Darüber hinaus wurde die Rutschungsdatenbank durch nach 1982 aufgetretene Rutschungen ergänzt und kann auch für die Zukunft durch neue Rutschungen erweitert werden. Von der Forschungsstelle Rutschungen e.V ist außerdem geplant die Rutschungsdatenbank auf ganz Rheinland-Pfalz auszuweiten und in ein GIS zu integrieren.

Über die Bearbeitungsnummer der einzelnen Rutschungen können verschiedenste Datenbankabfragen und Auswertungen durchgeführt und über die Rechts- und Hochwerte in Karten dargestellt werden. Die statistische Auswertung der Rutschungen erfolgte zum einen anhand der Datenbank zum anderen über die digitalisierten Rutschflächen, die in Rasterdateien umgewandelt wurden, so daß die Auswertung der einzelnen Faktoren auch für jede, durch Rutschungen betroffene Rasterzelle durchgeführt werden konnte.

Für die statistische Auswertung wurde zunächst versucht die aufgenommenen Rutschungen aufgrund der Tiefenlage ihrer Gleitfläche zu unterscheiden. Die Auswertung der maximalen Gleitflächentiefe zeigt, daß die Gleitflächen der meisten untersuchten Rutschungen (88,2 %) im Bereich zwischen 2 m und 6 m Tiefe liegen (Abb.88).

Nach Angaben von LATELTIN (1997) werden Rutschungen mit Gleitflächen in einer Tiefenlage < 2 m als flachgründig, mit 2-10 m als mittelgründig und mit > 10 m als tiefgründige Rutschungen bezeichnet. Dadurch lassen sich auch Unterscheidungen in Bezug auf Entstehung, Prozeßgeschwindigkeit und Auswirkungen durchführen (Tab.21).

flachgründige Rutschungen	mittel- und tiefgründige Rut- schungen
Tiefe < 2 m	Tiefe 2-10 m / Tiefe > 10 m
- Hohe Rutschaktivität bei geringer Dauer	- Rutschaktivität meist im Bereich von cm bis
(Minuten bis Monate)	dm im Jahr
- kleinflächig (< 0,5 ha)	- großflächig (> 0,5 ha)
- oft charackteristische Ausbruchsnischen	- Rutschprozeß über Jahre andauernd, mit
alter Rutschflächen	Phasen unterschiedlicher Aktivität

Tab.21: Merkmale von flach- und tiefgründigen Rutschungen.



Abb.88: Verteilung der max. Gleitflächentiefe und der Rutschungstiefe.

Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung von flach- und tiefgründigen Rutschungen bietet das D/L-Verhältnis. Dabei wird das Verhältnis von der Gleitflächentiefe zur Länge der Rutschung (D/L-Verhältnis) ermittelt. Bei Werten < 0.1 handelt es sich um flachgründige, bei Werten > 0.1 entsprechend um tiefgründige Rutschungen. Nach diesem Schema handelt es sich bei 79,4 % der ausgewerteten Massenbewegungen um flachgründige Rutschungen (Abb.89), die in der Regel zu den Translationsrutschungen zu zählen sind. Bei den tiefgründigen Rutschungen mit Gleitflächentiefen > 10 m handelt es sich nach STEINGÖTTER (1984) zumeist um Rutschungen mit Gleitflächen, die schon im Pleistozän angelegt wurden.

Als weiteres Kriterium zur Unterscheidung der Massenbewegungen wurde das Verhältnis zwischen Länge und Breite der Rutschungen (L/W-Verhältnis) ermittelt. Dabei zeigt sich, daß es sich bei den meisten rheinhessischen Rutschungen (53,9 %) um Rutschkörper mit großer Breite handelt (L/W-Verhältnis \leq 1), die nach STEINGÖTTER (1984) in der Regel an Quellhorizonte gebunden sind, während Rutschungen mit L/W-Verhältnissen > 1 (46,1 %) meist Serienrutschungen sind (Abb.89). Zusätzlich wurden die absoluten Längen- bzw. Breitenangaben der einzelnen aufgenommenen Rutschungen in einem Graphen dargestellt, um einen besseren Eindruck von der tatsächlichen Größe der jeweiligen Rutschungen zu bekommen (Abb.90).



Abb.89: D/L- und *L/W-Verhältnis* der aufgenommenen Rutschungen.

Um einen besseren Eindruck über die Rutschungsverteilung zu bekommen, wurde zusätzlich die relative Rutschungsdichte pro km² berechnet. Die dazu angewandte quantitative Analyse kann auch zum einfachen Abschätzen der Rutschungsgefährdung herangezogen werden. Bei der Berechnung werden jeweils nur die Rasterzellen innerhalb des Zählkreises registriert die Rutschungen aufweisen. Für die Durchführung wurde ein Zählkreis mit einer Fläche von 1 km² gewählt, damit als Ergebnis die Rutschungsdichte pro km² entsteht. Aufgrund der festgelegten Flächengröße des Zählkreises besitzt dieser auch dementsprechend einen festen Radius, der bei der benutzen Flächengröße bei ca. 564 m liegt. Dadurch wurde für die Überlappung der Zählkreise in horizontaler, wie in vertikaler Richtung eine Entfernung von 250 m gewählt, da die Schrittweite kleiner als der Radius des Zählkreises sein sollte (SÜZEN, 2002). Die Qualität des Ergebnisses ist stark von der Größe des Zählkreises und der Schrittweite abhängig. Mit zunehmender Größe des Zählkreises wird die Auflösung geringer, wodurch die Generalisierung der Daten größer wird und im schlimmsten Fall dann kein brauchbares Ergebnis mehr liefert (SÜZEN, 2002). Aber auch ein zu kleiner Zählkreis ist problematisch, da er eine Genauigkeit des Ergebnisses vortäuscht, die so nicht vorhanden ist. Die Bewegungsrichtung des Zählkreises erfolgte von links nach rechts und von oben nach unten. Für die Durchführung



Abb.90: Längen-/Breitenverhältnis von 156 ausgewählten Rutschungen in Rheinhessen. Jeder Punkt stellt eine Rutschung mit zugehöriger Länge und Breite da.

wurde die Software CrimeStat benutzt, ein Programm zur statistischen Berechnung von Kriminalitätsschwerpunkten, das sich aber auch gut für die Berechnung der relativen Rutschungsdichte eignet. Als Eingangsdatensatz wurden die digitalisierten Rutschungen genommen. Als Ergebnis bekommt man ein Grid, daß die relative Rutschungsdichte pro km² in Prozent anzeigt (Abb.91). Das Ergebnis bestätigt die durch die statistische Auswertung gewonnenen Erkenntnisse. Weiterhin kann eine einfache Gefahrenabschätzung durchgeführt werden, indem alle Verkehrswege und Ortschaften identifiziert werden, die im Bereich hoher Rutschungsdichten liegen.



Abb.91: Die Grafik zeigt die berechnete relative Rutschungsdichte für den Bereich Rheinhessen.

6. Modelle zur Erstellung von Gefahrenkarten

6.1 Methoden

Um die Hanggefährdung durch Massenbewegungen zu beschreiben, können Gefahren-, bzw. Gefahrenhinweiskarten erstellt werden, die räumliche Vorhersagen über das Auftreten und die Verteilung von Rutschungen ermöglichen. Dazu gibt es verschiedene Ansätze, die von der Art der Massenbewegungen und der vorhandenen, bzw. zu erstellenden Daten, abhängig sind. Grundsätzlich werden dabei qualitative- von quantitativen Methoden unterschieden (ALEO-TTI & CHOWDHURY, 1999).

6.1.1 Qualitative Methoden

Qualitative Methoden basieren in der Regel auf Expertenwissen, d.h. eine Bewertung der vorliegenden Hangsituation erfolgt aufgrund der subjektiven Eindrücke und geotechnischen Erfahrungen des Bearbeiters (Abb.1). Das können "vor Ort" durchgeführte geologische, bzw. geotechnische und geomorphologische Geländeanalysen sein, die auf einer vergleichenden Untersuchung beruhen (KIENHOLZ, 1978), bei der die Gefährdung anhand bekannter Rutschungen mit gleichen äußeren Bedingungen (Relief, Geologie, Landnutzung) bestimmt wird. Eine weitere Möglichkeit bietet die Verschneidung von Parameterkarten, die entsprechend ihrer Bedeutung am Rutschungsprozeß, gewichtet und überlagert werden. Als Ergebnis bekommt man durch die mathematische Kombination der einzelnen Faktoren eine Indexkarte, die die Hanggefährdung darstellt.

6.1.2 Quantitative Methoden

Bei den quantitativen Methoden können statistische- und geotechnische Verfahren, sowie Methoden der künstlichen Intelligenz unterschieden werden (Abb.92). Bei den statistischen Methoden wird die zu klassifizierende Hangsituation mit der von aktiven und historischen Rutschungen durch bi- und multivariate statistische Verfahren verglichen (JÄGER, 1997; CARRARA et al., 1995). Im Gegensatz dazu basieren geotechnische Verfahren auf konkreten Standsicherheitsberechnungen im Hangmaßstab. Dazu ist in der Regel eine gute Kenntnis der Prozeßmechanismen, sowie eine ausreichende Datengrundlage, die auf Sondierungen, Bohrungen oder anderen ingenieurgeologischen Verfahren aufbaut, notwendig. Deswegen sind diese Methoden mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden und eignen sich nur für kleine Untersuchungsgebiete.

Bei den Methoden der künstlichen Intelligenz kann zwischen Neuronalen Netzen und Fuzzy

Logik unterschieden werden. Bei der Auswahl der Methoden zu Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für Rheinhessen, mußte zunächst die Größe des Untersuchungsgebietes, bzw. der Untersuchungsmaßstab, sowie die Datenlage berücksichtigt werden. Dementsprechend konnten geotechnische Ansätze nur für ein kleines Teilgebiet im Bereich des Wißbergs durchgeführt werden. Für die Berechnung der Gefahrenhinweiskarte wurde deshalb zum einen auf statistische Methoden, zum anderen auf die Fuzzy Logik zurückgegriffen. Die mit beiden Methoden erzielten Gefahrenkarten konnten dann miteinander verglichen und die Vor-, bzw. Nachteile des jeweiligen Verfahrens herausgestellt werden.



Abb.92: Methoden zur Erstellung von Gefahrenkarten (ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999).

6.2 Statistische Methoden

Die Statistik bietet für die Betrachtung von Naturgefahren, ihre räumliche Verteilung, sowie die daraus resultierende Gefährdung für Mensch und Sachwerte, ein probates Mittel, mit dessen Hilfe gefahrenrelevante Parameter deskriptiv ausgewertet, verglichen und Vorhersagen für die Gefährdung getroffen werden können. Dabei werden bivariate Methoden mit einer abhängigen und einer unabhängigen Variable und multivariate Methoden mit einer abhängigen und mehreren unabhängigen Faktoren unterschieden. Die statistischen Methoden zur Erstellung von Gefahrenkarten eignen sich besonders für größere Gebiete im regionalen Maßstab, bei denen eine genaue Feldkartierung der einzelnen Faktoren oder geotechnischen Parameter nicht mehr möglich ist, oder vom Zeit- und Kostenaufwand nicht mehr sinnvoll erscheint. Es zeigt sich in der Praxis, daß es selbst innerhalb kleiner Untersuchungsgebiete schwierig ist, flächendeckend Daten, wie Grundwasserstände oder Schichtmächtigkeiten, zu erheben. In solchen Fällen ist es dann durchaus sinnvoll, punktuell vorhandene Parameter mit statischen Methoden auf das Gesamtgebiet zu interpolieren. Statistische Ansätze helfen also empirische Phänomene in der Wissenschaft zu erkennen, darzustellen und zu erklären und zwar so, daß diese Informationen bei gleicher Kenntnis- und Datenlage von jedem anderen Wissenschaftler nachvollzogen und bewertet werden können (BAHRENBERG et al., 1999). Dabei sollte aber auch kritisch betrachtet werden, daß eine statistische Auswertung nur dann erfolgreich sein kann, wenn eben diese Nachvollziehbarkeit gegeben ist, der Bearbeiter sich also zum einen an die Regeln der einzelnen statistischen Methoden hält und zum anderen die Transparenz wahrt. Gerade bei der Klasseneinteilung von Parameterkarten wie Hangneigung oder Geologie, bzw. der Gefahrenklassifizierung der Endprodukte, muß der Bearbeiter subjektiv, entscheiden welche Klassifizierung die beste für den entsprechenden Fall ist. Die Einteilung in Klassen kann entweder ebenfalls nach statistischen oder aber nach fachspezifischen Aspekten erfolgen. So kann die Hangneigung als relevanter Faktor nach statistischen Aspekten (z.B. nach der Percentile-Methode) oder aber nach geomorphologischen Aspekten (z.B. Mittelgebirgsklassifikation der Hangneigung) klassifiziert werden. Damit zeigt sich aber auch, daß die Reproduktion mit Hilfe von Statistik erstellter Gefahrenkarten unter verschiedenen Bedingungen limitiert, bzw. nur schwer möglich ist.

Die praktische Anwendung von statistischen Methoden bei der Erstellung von Gefahrenkarten beruht auf dem Prinzip, daß vorhandene Rutschungen auf die Verteilung ihrer Faktorenkombinationen die in der Vergangenheit zu Massenbewegungen führten untersucht werden und dadurch eine quantitative Vorhersage auch für die Gebiete getroffen werden kann, die bis dato noch keine Rutschungen aufweisen. Das heißt, es ist anzunehmen, daß Gebiete mit gleichen Parameterkombinationen wie in nachgewiesenen Rutschgebieten ebenfalls zu Massenbewegungen tendieren, also eine potentielle Rutschungsgefährdung besitzen. Die einfachste Art der Auswertung wäre dementsprechend ein Vergleich der Verteilung eines Parameters innerhalb der bekannten Rutschareale mit seiner Verteilung im Gesamtgebiet. Als Datengrundlage können dazu die einzelnen Parameterkarten mit der Rutschungshöffigkeitskarte, die die digitalisierten Rutschareale enthält, verschnitten werden. Mit weiterführenden multivariaten Analysen (Faktorenanalyse, Diskriminanzanalyse, logistische Regression) lassen sich zudem die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Faktoren untereinander überprüfen und Wahrscheinlichkeiten für die Rutschungsgefährdung berechnen.

6.2.1 Bivariate Statistik

Mit Hilfe der bivariaten Statistik kann eine unabhängige Variable (z.B. Hangneigung oder Geologie) in Bezug zu einer abhängigen Variablen (Rutschungen) auf die Verteilung, den Zusammenhang und die Abhängigkeit untereinander untersucht werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse können als Datenbasis für weiterführende multivariate Verfahren dienen. In dieser Arbeit wurde zunächst versucht die Wichtigkeit einzelner Parameter, bzw. Parameterklassen in Bezug auf die Rutschungsanfälligkeit mit Hilfe einfacher bivariater Methoden herauszustellen. Zudem konnte mit einer Korrelationsanalyse der Zusammenhang zwischen den einzelnen Reliefparametern und dem Faktor Rutschungen untersucht werden. Dazu mußten die einzelnen Parameterkarten zunächst in verschiedene Klassen unterteilt werden. Die Klassifizierung erfolgte mit zwei verschiedenen Methoden. Zum einen wurde eine Unterteilung der Faktoren anhand fachspezifischer Aspekte durchgeführt (z.B. Hangneigung nach der Mittelgebirgsklassifikation der GMK 25), zum anderen mit Hilfe der Percentile-Methode (SÜZEN, 2002). Bei dieser Methode erfolgt die Klassifizierung in 10%-Schritten

		Höhe	rel. Höhe	Hangneigung	Exposition	Hor-Wölbung	Ver-Wölbung	Konvergenz	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS
Anzahl n		3.225	3.225	3.225	3.225	Hor-Wolbung Ver-Wolbung Konvergenz Einzugsgebiet TWI SPI 3.225 3.225 3.225 3.225 3.225 3.225 3.225 3.225 -0.01 0.00 0.70 23.313.93 7.63 86,34 -0.02 0.00 0.00 9.957.00 7.39 80,00 0.54 0.02 16.25 63.144.70 1.32 68,77 0.30 0.00 264.14 3.987.253.478.10 1.74 4.729,68 1.84 0.11 140.61 987.562.00 11.48 317,00 -0.91 -0.05 59.18 1.600.00 5.36 1,00 0.93 0.06 81.43 987.562.00 16,84 318,00 -0.71 -0.02 -17.39 3.340.80 6.31 9,00 -0.60 -0.02 +2.77 4.911.60 6.64 23,00 -0.46 -0.01 -5.01 6.521.20 6.91 35,00 -0.31 -0.01		3.225				
Mittelwert		190,65	37,03	8,67	191,84	-0,01	0,00	0,70	23.313,93	7,63	86,34	7,95
Median		189,38	34,28	8,92	188,89	-0,02	0,00	0,00	9.957,00	7,39	80,00	7,69
Std. Abweic	hung	33,45	22,42	3,34	89,72	0,54	0,02	16,25	63.144,70	1,32	68,77	4,22
Varianz		1.118,62	502,87	11,14	8.050,35	0,30	0,00	264,14	3.987.253.478,10	1,74	4.729,68	17,85
Klassenbrei	te	208,60	108,80	20,97	359,29	1,84	0,11	140,61	987.562,00	11,48	317,00	40,70
Minimum		81,00	0,00	0,15	0,60	-0,91	-0,05	-59,18	1.600,00	5,36	1,00	0,00
Maximum		289,60	108,80	21,12	359,89	0,93	0,06	81,43	987.562,00	16,84	318,00	40,70
	10	149,56	9,12	3,82	58,17	-0,71	-0,02	-17,39	3.340,80	6,31	9,00	2,79
	20	164,90	16,04	6,28	116,42	-0,60	-0,02	-9,27	4.911,60	6,64	23,00	4,90
0	30	174,38	22,74	7,46	152,87	-0,46	-0,01	-5,01	6.521,20	6,91	35,00	6,00
Ē	40	182,10	28,17	8,21	169,30	-0,31	-0,01	-2,55	8.187,40	7,15	43,00	6,80
Lec .	50	189,38	34,28	8,92	188,89	-0,02	0,00	0,00	9.957,00	7,39	80,00	7,69
ere	60	196,26	40,81	9,56	217,69	0,23	0,00	2,68	12.174,60	7,65	103,60	8,50
<u> </u>	70	203,90	48,10	10,27	243,84	0,43	0,01	5,84	15.657,40	7,96	119,00	9,50
	80	213,86	57,60	11,14	276,48	0,58	0,01	10,22	22.211,80	8,37	135,00	10,69
	90	232.04	68.88	12.52	315.83	0.72	0.02	18.90	38 029 00	9 10	178.00	12 69

Tab.22: Durch Percentile ermittelte Klassengrenzen.

anhand der kumulativen Häufigkeit der Parameter innerhalb der Rutschgebiete, so daß für jeden Faktor jeweils 10 Klassen mit unterschiedlicher Klassenweite aber gleicher Rutschungsdichte entstehen. Die Klassengrenzen ergeben sich dementsprechend durch die jeweiligen Percentile (10%-Grenzen der kumulativen Häufigkeit) und können dann für jeden Parameter auf das Gesamtgebiet angewendet werden. Daß alle Faktoren die gleiche Anzahl von Klassen besitzen, erweist sich bei der Auswertung ebenfalls von Vorteil. Die Klassengrenzen konnten für jeden Faktor mit dem Statistikpaket SPSS automatisiert ermittelt und an ArcView übergeben werden. Ausgenommen davon wurden nur die nominalskalierten Faktorenkarten Geologie und Landnutzung, die aufgrund ihrer Datenstruktur nicht weiter bearbeitet werden mußten. Zusätzlich wurden für jeden Parameter Mittelwert, Median, Standardabweichung, Varianz, Klassenbreite, Minimum und Maximum berechnet (Tab.22). Die so klassifizierten Parameterkarten konnten dann jeweils mit der Karte der digitalisierten Rutschareale überlagert und die Ergebnisse in einer Kreuztabelle ausgegeben werden. In einem nächsten Schritt konnten damit zwei verschiedene Typen von Rutschungsdichten, die normale Rutschungsdichte und die flächenbezogene Rutschungsdichte, als Gebietsdichte bezeichnet, für die einzelnen Parameterklassen berechnet werden (SÜZEN, 2002).

Rutschungsdichte (absolut)

	Höhe	rel. Höhe	Hangn.	Expo.	Hor-Wölb.	Ver-Wölb.	Konverg.	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS
10	0,12	0,14	0,07	0,38	0,19	0,28	0,58	0,35	0,62	0,10	0,07
20	0,41	0,39	0,30	0,30	0,17	0,17	0,31	0,24	0,11	0,39	0,32
30	0,76	0,50	1,08	0,89	0,31	0,27	0,50	0,69	0,23	1,18	2,23
40	0,96	0,68	2,15	1,16	0,48	0,47	0,37	0,48	0,39	0,84	3,30
50	1,10	0,70	2,88	0,95	1,48	0,45	0,50	0,53	0,93	0,35	2,79
60	1,24	0,78	4,70	0,23	0,89	0,70	0,52	0,51	1,32	1,23	3,26
70	1,22	0,86	4,10	0,26	0,62	0,93	0,44	0,68	1,73	1,11	1,07
80	1,25	0,84	5,25	0,97	1,17	1,17	0,70	0,61	1,99	1,12	1,57
90	0,69	0,95	4,87	0,50	1,83	1,49	0,52	0,59	2,60	1,08	3,03
100	0,28	0,52	2,38	0,92	1,78	1,07	0,49	0,49	2,63	0,86	1,76

	Rutschungsdichte (relativ)										
	Höhe	rel. Höhe	Hangn.	Expo.	Hor-Wölb.	Ver-Wölb.	Konverg.	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS
10	1,52	2,18	0,24	5,80	2,18	3,96	11,83	6,72	4,94	1,19	0,36
20	5,16	6,09	1,06	4,54	1,95	2,42	6,33	4,70	0,90	4,76	1,66
30	9,49	7,91	3,88	13,58	3,46	3,83	10,06	13,39	1,84	14,25	11,49
40	11,95	10,74	7,76	17,64	5,34	6,75	7,50	9,28	3,12	10,17	16,99
50	13,63	11,04	10,37	14,43	16,63	6,44	10,13	10,24	7,37	4,26	14,36
60	15,47	12,28	16,92	3,53	10,03	9,99	10,61	9,85	10,50	14,94	16,80
70	15,12	13,48	14,77	4,03	6,98	13,36	8,88	13,14	13,82	13,40	5,52
80	15,50	13,16	18,91	14,82	13,08	16,68	14,12	11,72	15,88	13,56	8,11
90	8,61	14,89	17,52	7,57	20,47	21,25	10,57	11,44	20,70	13,06	15,63
100	3.54	8.24	8.57	14.05	19.90	15.32	9.98	9.51	20.93	10.40	9.09

Tab.23: Dichteverteilung der Rutschungen innerhalb der Parameterklassen.

Die normale Rutschungsdichte wird ausgedrückt durch die Zahl der Rasterzellen mit Rutschungen in einer Parameterklasse, in Beziehung zur Gesamtzahl der Rasterzellen einer Klasse K_i, multipliziert mit 100 um das Ergebnis in Prozent zu erhalten (Tab.23).

$$D = \frac{N(K_i)_{Rutsch}}{N(K_i)} \cdot 100 \quad [\%] \tag{Gl.20}$$

N (K_i)_{Rutsch} = Anzahl der Rasterzellen mit Rutschungen innerhalb der Klasse K_i N (K_i) = Anzahl der Rasterzellen innerhalb der Klasse K_i

Dementsprechend kann die Gebietsdichte ausgedrückt werden als die Zahl der Rasterzellen mit Rutschungen pro km², bezogen auf die Gesamtfläche einer Parameterklasse K_i (Tab.24).

$$G = \frac{N(K_i)_{Rutsch}}{F(K_i)} \cdot 10^6 \quad [\text{Anzahl/km}^2] \quad (Gl.21)$$

Damit lassen sich erste Aussagen über die Verteilung der Rutschungen innerhalb der Klassen eines Parameters machen. Um die Beziehung zwischen relativer Häufigkeit der Rutschungen in einer betrachteten Parameterklasse mit der in der Grundgesamtheit zu vergleichen, kann die Failure-Rate Methode angewandt werden (ANIYA, 1985). Die Failure-Rate ist eine Form der Häufigkeitsanalyse und kann bei großen Grundgesamtheiten als Wahrscheinlichkeitsvertei-

	Gebietsdichte (absolut)											
	Höhe	rel. Höhe	Hangn.	Expo.	Hor-Wölb.	Ver-Wölb.	Konverg.	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS	
10	0,76	0,86	0,42	2,37	1,21	1,73	3,62	2,16	3,85	0,62	0,43	
20	2,58	2,41	1,84	1,86	1,08	1,05	1,94	1,51	0,70	2,45	2,01	
30	4,73	3,13	6,67	5,52	1,92	1,67	3,08	4,30	1,44	7,27	13,63	
40	5,95	4,25	13,18	7,15	2,96	2,94	2,30	2,98	2,44	5,21	19,95	
50	6,77	4,36	17,50	5,87	9,13	2,80	3,10	3,29	5,73	2,19	16,95	
60	7,68	4,85	28,05	1,45	5,54	4,34	3,25	3,17	8,13	7,62	19,74	
70	7,51	5,32	24,64	1,65	3,87	5,78	2,72	4,22	10,66	6,84	6,62	
80	7,69	5,19	31,20	6,02	7,21	7,20	4,32	3,76	12,22	6,92	9,68	
90	4,30	5,87	29,01	3,09	11,20	9,15	3,24	3,67	15,83	6,67	18,40	
100	1,77	3,26	14,53	5,71	10,90	6,62	3,06	3,06	16,00	5,33	10,83	

	Gebietsdichte (relativ)										
	Höhe	rel. Höhe	Hangn.	Expo.	Hor-Wölb.	Ver-Wölb.	Konverg.	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS
10	1,53	2,19	0,25	5,83	2,20	3,99	11,83	6,73	5,01	1,20	0,37
20	5,19	6,11	1,10	4,57	1,97	2,44	6,34	4,71	0,91	4,79	1,70
30	9,51	7,92	3,99	13,57	3,49	3,85	10,07	13,38	1,87	14,22	11,53
40	11,96	10,75	7,89	17,58	5,39	6,78	7,51	9,29	3,17	10,19	16,87
50	13,62	11,04	10,48	14,41	16,60	6,47	10,13	10,24	7,44	4,29	14,34
60	15,44	12,28	16,79	3,55	10,07	10,02	10,61	9,86	10,56	14,90	16,69
70	15,09	13,46	14,75	4,05	7,03	13,36	8,88	13,12	13,84	13,39	5,60
80	15,46	13,14	18,68	14,80	13,09	16,65	14,09	11,71	15,86	13,54	8,19
90	8,64	14,85	17,36	7,60	20,36	21,13	10,57	11,44	20,56	13,05	15,56
100	3,56	8.25	8,70	14.04	19.81	15,30	9,98	9,51	20,78	10.42	9,16

Tab.24: Verteilung der Gebietsdichte innerhalb der Parameterklassen.

lung gedeutet werden. Sie kann beschrieben werden als Verhältnis zwischen relativem Anteil eines Parameters an den Rutscharealen zum relativen Anteil des Parameters im Gesamtgebiet.

$$FR = \frac{(P_R)}{(P_G)} \tag{Gl.22}$$

 P_R = relativer Anteil einer Parameterklasse an den Rutscharealen

 P_G = relativer Anteil der Parameterklasse im Gesamtgebiet

Die Failure-Rate zeigt also, in wie weit ein Faktor innerhalb von Rutschgebieten, bezogen auf das Gesamtgebiet, über- oder unterrepräsentiert ist, wobei Werte über 1 einen deutlichen Einfluß des Faktors auf den Rutschungsprozeß zeigen (Tab.25).

Fallure Rate											
	Höhe	rel. Höhe	Hangn.	Expo.	Hor-Wölb.	Ver-Wölb.	Konverg.	Einzugsgebiet	TWI	SPI	LS
10	0,26	0,29	0,14	0,81	0,41	0,59	1,24	0,74	1,32	0,21	0,15
20	0,88	0,82	0,63	0,63	0,37	0,36	0,66	0,52	0,24	0,84	0,68
30	1,62	1,07	2,29	1,89	0,66	0,57	1,05	1,47	0,49	2,50	4,74
40	2,04	1,45	4,58	2,46	1,01	1,00	0,79	1,02	0,83	1,79	7,01
50	2,33	1,49	6,12	2,01	3,15	0,96	1,06	1,13	1,97	0,75	5,93
60	2,64	1,66	9,99	0,49	1,90	1,48	1,11	1,08	2,80	2,62	6,93
70	2,58	1,82	8,72	0,56	1,32	1,99	0,93	1,44	3,69	2,35	2,28
80	2,65	1,78	11,17	2,07	2,48	2,48	1,48	1,29	4,24	2,38	3,34
90	1,47	2,01	10,34	1,06	3,88	3,16	1,11	1,26	5,52	2,29	6,45
100	0,60	1,11	5,06	1,96	3,77	2,28	1,05	1,04	5,58	1,83	3,75

Failure Rate

Tab.25: Verteilung der Failure Rate innerhalb der Parameterklassen.

6.2.1.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse hat die Aufgabe die Stärke des Zusammenhanges zweier Variablen zueinander zu beschreiben. Dabei wird ihre gemeinsame Variation innerhalb der betrachteten Raumeinheiten, bzw. der Stichprobe beobachtet und der Zusammenhang durch den Korrelationskoeffizienten C beschrieben. Im Falle der Gefährdungsanalyse sollte der Faktor Rutschungen mit den 11 Reliefparametern, sowie der Geologie und der Landnutzung verglichen und mögliche Zusammenhänge herausgestellt werden. Für metrisch skalierte Daten wird normalerweise auf spezielle Korrelationsverfahren (z.B. Produktmoment-Korrelationskoeffizient nach Pearson) zurückgegriffen. Da einige der Faktoren (Rutschungen, Geologie, Landnutzung) allerdings nur nominal skaliert vorlagen, wurden die metrisch vorliegenden Reliefdaten auf nicht-metrisches Niveau durch Klassenbildung herabskaliert und der Korrelationskoeffizient nach Pearson für nominal skalierte Daten berechnet. Dazu wurde zunächst eine r x s-Kontingenztafel nach BAHRENBERG et al. (1999) für die beiden zu untersuchenden, nominal skalierten Parameter mit r, bzw. s Parametern erstellt (Abb.93).

X\Y	1	2	j	s	Summe
1	H_{11}	H_{12}	H_{1j}	H_{1s}	$\sum_{j=1}^{s} H_{1j}$
2	H_{21}	H ₂₂	H_{2j}	H _{2s}	$\sum_{j=1}^{s} H_{2j}$
i	H _{i1}	H _{i2}	H _{ij}	H _{is}	$\sum_{j=1}^{s} H_{ij}$
r	H_{r1}	H _{r2}	H _{rj}	H _{rs}	$\sum_{j=1}^{s} H_{rj}$
Summe	$\sum_{i=1}^{r} H_{il}$	$\sum_{i=1}^{r} H_{i2}$	$\sum_{i=1}^r H_{ij}$	$\sum_{i=1}^{r} H_{is}$	$\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s H_{ij} = n$

Abb.93: Kontingenztafel (Quelle BAHRENBERG et al. 1990).

Dabei wird angenommen, daß die Randverteilungen, also die Summen der Zeilen und Spalten, in Bezug zur Gesamtanzahl n, als Schätzungen für die Wahrscheinlichkeit betrachtet werden können, das X und Y den entsprechenden Wert j, bzw. i annehmen. Dementsprechend soll geprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen X und Y besteht, wobei die Nullhypothese lautet, daß X und Y von einander stochastisch unabhängig sind. Die so aufgestellte These kann überprüft werden, indem die beobachtete Häufigkeitsverteilung mit der theoretisch zu erwartenden Häufigkeitsverteilung verglichen wird. Dazu muß die χ^2 -verteilte Prüfgröße (Gl. 23) mit dem kritischen Wert der χ^2 -Verteilung für die entsprechende Anzahl von Freiheitsgraden verglichen werden (BAHRENBERG et al., 1999).

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{s} \frac{(H_{ij} - TH_{ij})^{2}}{TH_{ij}}$$
(Gl.23)

 TH_{ij} = theoretisch zu erwartende Häufigkeit

Die in Gleichung (23) enthaltene theoretische Häufigkeit TH_{ij} kann für n Stichprobenelemente nach Gleichung (24) abgeschätzt werden.

$$TH_{ij} = n \cdot \frac{\sum_{i=1}^{r} H_{ij}}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{s} H_{ij}}{n} \qquad (Gl.24)$$

Für die Stärke des Zusammenhangs zwischen X und Y muss C', das Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, berechnet werden (Gl.25). Setzt man C' in Bezug zum Maximalwert von C' (Gl.26), ergibt sich der Kontingenzkoeffizient C (Gl.27) für die Stichprobe. Dieser Koeffizient kann also demnach als Maß für den Zusammenhang zweier Variablen X und Y betrachtet werden. Dabei kennzeichnen hohe Kontingenzkoeffizienten (C geht gegen 1) einen starken Zusammenhang, während ein niedriger Wert (gegen 0) auf keine oder nur eine geringe Korrelation schließen läßt (BAHRENBERG et al., 1999).

$$C' = +\sqrt{\frac{\chi^2}{n+\chi^2}}$$
 (Gl.25) und $C'_{max} = \sqrt{\frac{k-1}{k}}$ (Gl.26)
 $k = min (r, s)$

= Kontigenzkoeffizient:
$$C = \frac{C'}{C'_{max}} = \sqrt{\frac{k \cdot \chi^2}{(k-1)(n+\chi^2)}}$$
 (Gl.27)
 $k = min (r, s)$

Die in Tabelle 26 abgebildeten Korrelationskoeffizienten sind alle signifikant auf dem 99,9%-Niveau. Den stärksten Zusammenhang mit dem Faktor Rutschungen zeigen die Reliefparameter Höhe (0,913) und Landnutzung (0,907). Bei der Höhe als Reliefparameter zeigt sich, daß

Nr.	Faktor	С	Nr.	Faktor	С
1	Höhe	0,913	8	TWI	0,568
2	Landnutzung	0,907	9	Einzugsgebiet	0,156
3	LS	0,823	10	Exposition	0,076
4	Hangneigung	0,818	11	VertWölbung	0,073
5	Geologie	0,819	12	HorWölbung	0,013
6	relative Höhe	0,797	13	Konvergenz	0,030
7	SPI	0,616			

Tab.26: Zusammenhang der Reliefparameter mit dem Faktor Rutschungen.
die Rutschungen überwiegend an den Mittel- und Oberhängen der Plateauränder auftreten, also in annähernd gleichen Höhenbereichen, was auch auf den Reliefparameter relative Höhe zutrifft. Bei der Landnutzung, die in nur vier Gruppen klassifiziert wurde, zeigt sich der hohe Flächenanteil den Acker- und Weinanbauflächen, die zu einer Klasse (rutschungsanfälligste Landnutzungsklasse) zusammengefaßt sind, einnehmen. Ähnliches gilt für den LS-Faktor, der nur auf die Landnutzungsklasse 4 (Acker- und Weinanbauflächen) angewandt wurde. Erwartungsgemäß hohe Ladungen bildeten auch die Faktoren Hangneigung (0,818) und Geologie (0,819), wobei ein hoher Zusammenhang wischen diesen Faktoren und den Rutschungen schon durch die deskriptive Statistik (Kap.4) erkennbar war und nun durch die Korrelationsanalyse bestätigt wurde. Faktoren mit Korrelationskoeffizienten kleiner 0,5 zeigen kaum noch signifikante Zusammenhänge mit dem Faktor Rutschungen. Trotzdem wurden die darunter fallenden Parameter der Wölbungen und der Exposition in den Berechnungen der Gefahrenhinweiskarten berücksichtigt, wobei Faktoren mit höheren Ladungen, die auf signifikante Zusammenhänge schließen lassen (z.B. SPI) nicht berücksichtigt wurden. Das kann zum einen damit erklärt werden, daß sich sekundäre Reliefparameter wie TWI oder SPI aus primären Parametern (Hangneigung, Wölbung etc.) zusammensetzen und diese beeinflussen, zum anderen sollte ein prinzipielles Modell zur Berechnung von Gefahrenhinweiskarten erstellt werden, weshalb es sinnvoll erschien die Relieffaktoren nicht nur nach statistischen, sondern auch nach fachspezifischen Aspekten auszuwählen. Gerade die Reliefparameter der Wölbungen und der Exposition haben einen Einfluß auf die Rutschungen im Untersuchungsgebiet, was sich auch durch die deskriptive Statistik zeigt. Deshalb wurde im weiteren Verlauf dieser Arbeit neben der Hangneigung und der Geologie auf die Wölbungen (Horizontal- und Vertikalwölbung) und die Exposition zurückgegriffen.

6.2.2 Multivariate Statistik

Die multivariate Statistik kann als Erweiterung der bivariaten Statistik betrachtet werden, da hier eine abhängige Variable in Verbindung mit mehr als zwei unabhängigen Variablen betrachtet wird, d.h. die abhängige Variable wird durch mehrere unabhängige Variablen erklärt. Mit Hilfe der multivariaten Statistik kann also der Einfluß der einzelnen Faktoren (Hangneigung, Geologie etc.) auf die Rutschungsgefährdung innerhalb einer definierten Raumeinheit untersucht werden. Als kleinste Raumeinheit kann z.B. die Rasterweite des verwendeten DGM benutzt werden. Alternativ kann auch auf morphometrische Einheiten, oder auf Einzugsgebiete als Basiseinheit zurückgegriffen werden. Die gewählten Raumeinheiten können dann auf An- oder Abwesenheit von Rutschungen untersucht werden. Durch Verschneidung der einzelnen Faktorenkarten mit der Karte der digitalisierten Rutschungen kann dem entsprechend eine Kontingenztabelle erstellt werden, die für jede einzelne Raumeinheit eine Parameterkombination beinhaltet. Mit Hilfe von multivariaten Verfahren wie Diskriminanzanalyse oder logistische Regression kann dann anhand der Kontingenztabelle für jede Raumeinheit die Wahrscheinlichkeit das eine Rasterzelle zu Rutschungen neigt, abgeschätzt werden.

Für die multivariate Analyse der Faktorenkarten wurde nach folgendem Schema vorgegangen:

- Erstellen und Klassifizieren von Faktorenkarten.
- Gegebenenfalls Konvertierung der Daten in für die statistische Analyse relevante Datenformate.
- Verschneidung der einzelnen Faktorenkarten und Speicherung der daraus resultierenden Kontingenztabelle im Datenbankformat (DBF).
- Import der Kontingenztabelle in die benutzten Statistikprogramme.
- Berechnung der Rutschungsveranlagung für jede Rasterzelle mit Hilfe von logistischer Regression und Diskriminanzanalyse.
- Übergabe der berechneten Ergebnisse in das GIS.

6.2.2.1 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse ist Teil der Faktorenanalyse und gibt Aufschluß über den Zusammenhang der Reliefparameter zur Erklärung der Standortverhältnisse von Rutschungen. Zusätzlich erfolgt eine Reduktion vieler Parameter auf eine kleine Auswahl signifikanter, stochastisch unabhängiger Faktoren, die Aufschluß über die Zusammenhänge zwischen den Reliefparametern geben. Im Prinzip werden mehrere Variablen von denen nicht bekannt ist wie sie miteinander Zusammenhängen, in Gruppen aufgeteilt. Die Ausgangsdaten werden einer Hauptkomponententransformation unterzogen, bei der die erste Koordinatenachse in Richtung der größten Streuung gedreht wird, wobei die anderen Achsen dazu senkrecht liegen. Es werden schließlich die Faktoren gesucht, die die gesamte Variation der Datenmatrix reproduzieren können, so daß jede Variable sich als Linearkombination der Faktoren darstellen läßt (BAHRENBERG et al., 1992). Diese Faktoren werden auch als Hauptkomponenten bezeichnet. Das Ergebnis dieser Transformation ist die Eigenmatrix, die Auskunft über die Korrelation zwischen den Hauptkomponenten und den Variablen zuläßt. Der Eigenwert, der den Anteil der entsprechenden Hauptkomponente an der Varianz der Ausgangsdaten angibt, ergibt sich aus der Summe der quadrierten Ladungen einer Hauptkomponente. Nach dem Kaiserkriterium werden nur solche Hauptkomponenten extrahiert, deren Eigenwert größer als 1 ist, da die Hauptkomponente dann einen größeren Einfluß hat als jede der Variablen. Die Qualität des Ergebnisses der Hauptkomponentenanalyse kann mit verschiedenen Verfahren getestet werden. Im vorliegenden Fall wurde der KMO und Bartlett-Test auf Sphärizität durchgeführt, bei dem zum einen das Kaiser-Mayer-Olkin-Maß (KMO) für Stichproben-Adäquatheit, zum anderen der Bartlett-Test auf Sphärizität durchgeführt wurde. Das KMO-Maß bezieht sich auf die Varianz und zeigt bei hohen Werten (KMO gegen 1), daß die partiellen Korrelationskoeffizienten sehr klein sind und die Variablenauswahl für das Faktorenmodell geeignet ist (BAH-RENBERG et al., 1999). Im Gegensatz dazu zeigen Werte kleiner 0,5 (KMO gegen 0), daß die Auswahl der Variablen nicht geeignet ist, da die partiellen Korrelationskoeffizienten sehr groß sind.

Beim Bartlett Test auf Sphärizität wird geprüft, ob die in der Stichprobe beobachteten Korrelationen sich zufällig ergeben haben, wobei eine niedrige Signifikanz (<0,005) für eine gute Korrelation spricht (POSPESCHILL, 2001).

Da die Hauptkomponentenanalyse für kategoriale Daten nicht geeignet ist, wurden bei der Berechnung die Faktoren Geologie und Landnutzung nicht berücksichtigt. Die Analyse wurde mit zehn Reliefparametern durchgeführt, wobei nur solche Rasterzellen in die Berechnung einflossen, die mit einer Rutschung belegt sind.

Das in der Berechnung erreichte KMO-Maß von 0,609 (Tab.27) bestätigte die Eignung der Variablenauswahl für das Faktorenmodell, ebenso wie der Bartlett-Test auf Sphärizität mit einem kleinen Wert zeigte, daß signifikante Beziehungen zwischen den Variablen bestehen (Tab.27).

Die Tabelle der Erklärten Gesamtvarianz (Tab.28) zeigt insgesamt vier Faktoren, deren Eigenwerte größer 1 sind und die einen Gesamtanteil an der Varianz von 74 % besitzen. Um eine bessere Trennung zwischen den Faktoren zu erreichen, wurde die angezeigte Komponenten-

KMO und Bartlett-Test			
Kaiser-Meyer-Olkin Maß für Stich	0,609		
Bartlett-Test auf Sphärizität	Approx. Chi-Quadrat	15228,21	
	df	45	
	Sig.	0,000	

Tab.27: Zusammenfassung des KMO und des Bartlett-Tests.

	Anfängliche Eigenwerte		Summen von quadrierten			Rotierte Summen von quadrierten			
	Allia	Ignone Eigen	werte	Faktorla	dungen für E	xtraktion	Faktorladungen		
Faktor	Gesamt	% der	Kumulierte	Gesamt	% der	Kumulierte	Gesamt	% der	Kumulierte
		Varianz	%		Varianz	%		Varianz	%
1	3,174	31,742	31,742	2,916	29,160	29,160	1,984	19,840	19,840
2	1,715	17,153	48,895	1,494	14,944	44,104	1,933	19,328	39,168
3	1,357	13,573	62,468	1,028	10,280	54,384	1,417	14,170	53,339
4	1,186	11,858	74,326	0,703	7,033	61,417	0,808	8,078	61,417
5	0,857	8,566	82,893						
6	0,592	5,917	88,810						
7	0,570	5,704	94,514						
8	0,327	3,267	97,781						
9	0,151	1,515	99,296						
10	7,04E-02	0,704	100						

Tab.28: Erklärte Gesamtvarianz der Hauptkomponentenanalyse.

matrix, in der die Koeffizienten der Faktoren angegeben werden, rotiert und als rotierte Komponentenmatrix ausgegeben (Tab.29). Es zeigt sich, daß für den ersten Faktor hauptsächlich die Reliefparameter hohe Ladungen bilden, die die Hangform beschreiben (Horizontalwölbung, Vertikalwölbung, Konvergenz), also Zu- oder Abfluß bestimmen. Der zweite Faktor wird durch die Reliefparameter SPI (0,961) und Einzugsgebiet (0,945) bestimmt, Parameter die die Abflußmenge beschreiben, die durch eine Rasterzelle abfließt. Für den dritten Faktor bilden die Hangneigung und der TWI die höchsten Ladungen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Hangneigung einen großen Einfluss auf die Berechnung des TWI einnimmt (Kap.5). Der vierte und letzte Faktor wird im Prinzip ausschließlich durch den Reliefparameter Höhe gebildet.

Zusätzlich wurde die Anti-Image-Korrelationsmatrix erstellt (Tab.30), deren Diagonale das Maß der Stichprobeneignung jeder Variable anzeigt, ein Maß für die Qualität der Stichprobe. Auch hier sollten die Werte für ein geeignetes Modell gegen 1 gehen, wobei Variablen mit Werten < 0,5 aus dem Modell gestrichen werden. Im vorliegenden Fall wurden die Faktoren Hangneigung (0,366) und Exposition (0,474) aus dem Modell herausgenommen (Tab.30) und eine neue Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Wie das höhere KMO-Maß zeigt (0,683) konnte dadurch eine etwas bessere Modellanpassung erreicht werden (Tab.31). Die in der

	Faktor				
	1	2	3	4	
Höhe	0,163	-0,053	0,165	0,774	
Exposition	0,029	0,001	0,122	-0,200	
Konvergenz	0,806	-0,138	0,159	0,089	
SPI	-0,116	0,961	-0,086	-0,039	
relative Höhe	0,252	-0,043	0,327	0,349	
TWI	-0,483	0,296	-0,746	-0,017	
Einzugsgebiet	-0,062	0,945	-0,108	-0,041	
Hangneigung	-0,106	-0,048	0,814	-0,014	
HorWölbung	0,810	-0,036	0,064	-0,070	
VertWölbung	0,571	-0,025	-0,043	0,175	

Tab.29: Rotierte Komponentenmatrix (vier extrahierte Komponenten)

Tabelle der Erklärten Eigenvarianz aufgeführten drei Faktoren mit Eigenwerten über 1 machten insgesamt 73,8 % an der Gesamtvarianz aus (Tab.32). Auch im zweiten Durchlauf der Hauptkomponentenanalyse wurde zur besseren Trennung der Faktoren die Komponentenmatrix durch eine Rotation transformiert, so daß sich drei Hauptfaktoren ergaben. Bei dem ersten der drei Faktoren entfällt die höchste Ladung (0,951) auf den Reliefparameter SPI, der Auskunft über die lineare Abflußverteilung gibt. Der Konvergenzindex, auf den die höchste Ladung des zweiten Faktors entfällt, beschreibt die Hangform und die flächenhafte Abflußverteilung, während der dritte Faktor durch die Parameter Höhe und relative Höhe gebildet wird. Es zeigt sich also, daß zwei Faktoren durch Reliefparameter bestimmt werden, die die Abflußverteilung wiedergeben, während der dritte Faktor (Tab.33) durch die Höhe bestimmt wird.

		Höhe	Exposition	Konvergenz	SPI	relative Höhe	TWI	Einzugsgebiet	Hangneigung	HorWölbung
	Höhe	0,794	0,173	-5,17E-02	2,61E-03	-0,205	2,05E-02	2,12E-04	-1,09E-02	7,64E-02
nc	Exposition	0,173	0,946	-1,44E-02	7,23E-03	-4,30E-02	3,39E-02	-1,22E-02	-1,31E-02	2,91E-02
arie	Konvergenz	-5,17E-02	-1,44E-02	0,336	-1,99E-03	-8,58E-02	0,164	-4,01E-03	0,174	-0,187
Ň	SPI	2,61E-03	7,23E-03	-1,99E-03	0,133	-6,22E-04	-2,56E-02	-0,123	-3,13E-02	5,19E-03
0	relative Höhe	-0,205	-4,30E-02	-8,58E-02	-6,22E-04	0,739	9,76E-03	-9,77E-04	-9,80E-02	6,19E-02
ag	TWI	2,05E-02	3,39E-02	0,164	-2,56E-02	9,76E-03	0,269	-4,05E-03	0,242	1,76E-02
Ę.	Einzugsgebiet	2,12E-04	-1,22E-02	-4,01E-03	-0,123	-9,77E-04	-4,05E-03	0,137	1,28E-02	-1,17E-02
ţ	Hangneigung	-1,09E-02	-1,31E-02	0,174	-3,13E-02	-9,80E-02	0,242	1,28E-02	0,444	-2,29E-02
4	HorWölbung	7,64E-02	2,91E-02	-0,187	5,19E-03	6,19E-02	1,76E-02	-1,17E-02	-2,29E-02	0,481
	VertWölbung	-9,71E-02	-2,45E-03	7,80E-04	2,87E-03	-0,107	2,98E-02	-4,85E-03	9,56E-02	-0,203
	Höhe	0,698	0,2	-0,1	8,02E-03	-0,267	4,44E-02	6,41E-04	-1,83E-02	0,124
ы	Exposition	0,2	0,474	-2,56E-02	2,03E-02	-5,14E-02	6,72E-02	-3,40E-02	-2,02E-02	4,32E-02
lati	Konvergenz	-0,1	-2,56E-02	0,615	-9,38E-03	-0,172	0,546	-1,87E-02	0,451	-0,466
rre	SPI	8,02E-03	2,03E-02	-9,38E-03	0,569	-1,98E-03	-0,135	-0,912	-0,129	2,05E-02
ů	relative Höhe	-0,267	-5,14E-02	-0,172	-1,98E-03	0,762	2,19E-02	-3,07E-03	-0,171	0,104
ge	TWI	4,44E-02	6,72E-02	0,546	-0,135	2,19E-02	0,634	-2,11E-02	0,7	4,91E-02
ma	Einzugsgebiet	6,41E-04	-3,40E-02	-1,87E-02	-0,912	-3,07E-03	-2,11E-02	0,568	5,18E-02	-4,54E-02
÷.	Hangneigung	-1,83E-02	-2,02E-02	0,451	-0,129	-0,171	0,7	5,18E-02	0,366	-4,96E-02
An	HorWölbung	0,124	4,32E-02	-0,466	2,05E-02	0,104	4,91E-02	-4,54E-02	-4,96E-02	0,71
	Vert -Wölbung	-0.132	-3.05E-03	1.63E-03	9.50E-03	-0.15	6.95E-02	-1 59E-02	0 174	-0.354

Tab.30: Anti-Image Matrix der Hauptkomponentenanalyse.

KMO und Bartlett-Test			
Kaiser-Meyer-Olkin Maß für Stichp	0,683		
Bartlett-Test auf Sphärizität	Approx. Chi-Quadrat	12440,90	
	df	28	
	Sig.	0,000	

Tab.31: Zusammenfassung des KMO und des Bartlett-Tests.

	Anfär	Anfängliche Eigenwerte		Summen von quadrierten		Rotierte Si	ummen von g	uadrierten	
Faktor	Gesamt	% der	Kumulierte	Gesamt	% der	Kumulierte	Gesamt	% der	Kumulierte
		Varianz	%		Varianz	%		Varianz	%
1	3,093	38,665	38,665	2,763	34,537	34,537	1,974	24,678	24,678
2	1,687	21,093	59,759	1,506	18,821	53,358	1,911	23,887	48,566
3	1,125	14,067	73,826	0,621	7,762	61,120	1,004	12,555	61,120
4	0,735	9,183	83,008						
5	0,611	7,634	90,642						
6	0,393	4,909	95,551						
7	0,285	3,558	99,109						
8	0,071	0,891	100,000						

Tab.32: Erklärte Gesamtvarianz der Hauptkomponentenanalyse.

	Faktor				
	1	2	3		
Höhe	-0,05772	1,09E-01	0,512		
Konvergenz	-0,150	0,740	0,313		
SPI	0,951	-0,107	-8,21E-02		
relative Höhe	-0,04628	1,70E-01	0,666		
TWI	0,347	-0,470	-0,377		
Einzugsgebiet	9,59E-01	-0,05777	-0,07883		
HorWölbung	-0,036	9,17E-01	-9,58E-03		
VertWölbung	-0,01179	4,96E-01	2,14E-01		

Tab.33: Rotierte Komponentenmatrix (drei extrahierte Komponenten).

6.2.2.2 Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse ist eine multivariate statistische Analyse, mit deren Hilfe die Werte einer gegebenen Variable, verschiedenen Gruppen zugeordnet werden können. Die Aufgabe der Diskriminanzanalyse ist es die Koeffizienten der Diskriminanzfunktion zu schätzen, die eine Gruppeneinteilung ermöglichen. Dabei wird versucht eine abhängige, zu erklärende Variable durch mehrere unabhängige Variablen vorherzusagen, wobei die Werte der abhängigen Variablen im Ergebnis nur eine Gruppenzugehörigkeit angeben. Um dies zu erreichen wird zunächst die Diskriminanzfunktion berechnet, damit dann die Klassifizierung der abhängigen Variable durchgeführt werden kann. Die Diskriminanzfunktion ist eine Funktion der Form:

$$D = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n \quad (Gl.28)$$

b_i = Koeffizienten mit denen die Variablen in die Diskriminazfunktion eingebunden sind

 x_i = erklärende, unabhängige Variablen

Um eine deutliche Unterscheidung der Werte der einzelnen Gruppen zu erreichen, werden die Koeffizienten so berechnet, daß der Quotient aus der Quadratsumme zwischen den Gruppen und der Quadratsumme innerhalb der Gruppen maximal ist (POSPESCHILL, 2001). Danach kann eine Zuordnung der Werte der abhängigen Variable in die verschiedenen Gruppen erfolgen. Das Ergebnis kann dann für eine erste Güteabschätzung des Modells mit der tatsächlichen Gruppenzugehörigkeit verglichen werden.

Zudem können zwei weiter Testverfahren durchgeführt werden, um die Güte der Diskriminanzfunktion abzuschätzen. Zum einen ist das die Kanonische Korrelation, die ein Gütemaß für die Stärke des Zusammenhangs zwischen den Funktionswerten der Diskriminanzfunktion und den verschiedenen Gruppen ist, also die Trennkraft der Diskriminanzfunktion bewertet. Die Kanonische Korrelation mißt den Anteil der Streuung zwischen den Gruppen an der Ge-

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation		
1	3,234	100	100	0,874		
Test der	Wilks	Chi Quadrat	df	Signifikanz		
Funktionen	Lambda	Gin-Quadrat	u	Signifikatiz		
1	0,236	9301,875	5	0		

Tab.34: Eigenwerte (oben) und Wilks-Lambda (unten) der Funktion 1.

samtstreuung, wobei der entsprechende Korrelationskoeffizient Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Der kanonische Korrelationskoeffizient wird ermittelt mit Hilfe des Eigenwertes γ_k der jeweiligen Diskriminanzfunktion durch die Formel (BAHRENBERG et al., 1999):

$$C_{k} = \sqrt{\frac{\gamma_{k}}{1 + \gamma_{k}}} \qquad (Gl.29)$$

Ein hoher kanonischer Korrelationskoeffizient (C_k geht gegen 1) weist auf eine große Streuung zwischen den Gruppen, aber auf eine kleine Streuung innerhalb der Gruppen hin und bedeutet eine gute Trennung der Gruppen. Aber auch der Eigenwert, der sich als Quotient der Quadratsumme zwischen den Gruppen und der Quadratsumme innerhalb der Gruppen beschreiben läßt, ohne daß dabei die Freiheitsgrade berücksichtigt werden, kann als Gütekriterium für die Diskriminanzfunktion genutzt werden. Ein hoher Eigenwert deutet dabei auf gute Trennung der Gruppen hin, da das eine große Streuung zwischen und eine kleine Streuung innerhalb der Gruppen impliziert. Bei nur zwei Gruppen ist der Eigenwert identisch mit dem Pearsonschen Korrelationskoeffizienten (POSPESCHILL, 2001).

Ein weiteres Gütemaß ist Wilks-Lamda, der den Anteil der Streuung innerhalb der Gruppen an der Gesamtstreuung vergleicht. Er berechnet sich aus dem Quotienten der Quadratsumme innerhalb der Gruppen mit der Gesamtquadratsumme, kann aber auch, wie beim kanonischen Korrelationskoeffizienten mit Hilfe des Eigenwertes γ_k bestimmt werden (Gl.30).

$$L_k = \frac{1}{1 + \gamma_k} \tag{Gl.30}$$

Ein kleiner, gegen null gehender Wilks-Lamda deutet auf eine gute Trennung der Gruppen durch die Diskriminanzfunktion hin. Wilks-Lamda und der quadrierte kanonische Korrelationskoeffizient müssen addiert zusammen 1 ergeben. Die Berechnung der Diskriminanz-

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation			
1	1,191	100	100	0,737			
Test der Funktionen	Wilks Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz			
1	0,456	5004,793	5	0,000			

Tab.35: Eigenwerte (oben) und Wilks-Lambda (unten) der Funktion 2.

funktion wurde zweimal mit jeweils verschiedenen unabhängigen Variablen durchgeführt, so daß im Ergebnis zwei, durch Diskriminanzanalyse berechnete Gefahrenhinweiskarten entstanden. Für die erste Diskriminanzfunktion wurden die mit der Percentile-Methode klassifizierten Reliefparameter benutzt, während für die Berechnung der zweiten Funktion auf die mit Hilfe fachspezifischer Aspekte klassifizierten Reliefparameter zurückgegriffen wurde (vgl. Kap.5). Ziel war es zu überprüfen, in wie weit die verschiedenen Methoden zur Klassifizierung der Reliefparameter, die Ergebnisse beeinflussen. Dazu wurde zunächst die abhängige Variable erstellt, indem die Karte mit den digitalisierten Rutschungen in ein Grid umgewandelt wurde, wobei alle Rasterzellen die eine Rutschung beinhalten mit einer 1 und alle Rasterzellen ohne Rutschung mit einer 0 gekennzeichnet wurden, so daß zwei Gruppen (mit und ohne Rutschung) entstanden. Dementsprechend sollte mit Hilfe der Diskriminanzfunktion für jede Rasterzelle die Gruppenzugehörigkeit in mit oder ohne Rutschung abgeschätzt werden. Bei der Berechnung der Diskriminanzfunktion 1 ergaben sich für den Eigenwert (3,234), sowie für den kanonischen Korrelationskoeffizienten (0,874) relativ hohe Werte, die auf eine gute Trennung der Gruppen schließen lassen (Tab.34). Dies wird auch durch den kleinen Lamda-Wert (0,236) bestätigt. Für die Berechnung der Diskriminanzwerte ergab sich folgende Funktion:

D = (Hangneigung x 1,121) + (Geologie x 0,651) + (Exposition x 0,102)+ (Vertikalwölbung x 0,028) + (Horizontalwölbung x (-0,026)) - 4,012(Gl.31)

Die für jede Rasterzelle berechneten Diskriminanzwerte (Tab.36) konnten dann in Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit zu einer Gruppe umgerechnet und in der Karte farbig dargestellt werden (Abb.94).

	Funktion
	1
Hangneigung	1,121
Geologie	0,651
Exposition	0,102
VertWölbung	0,028
HorWölbung	-0,026
(Konstante)	-4,012

	Funktion
	1
Geologie	0,591
Hangneigung	0,226
HorWölbung	0,064
VertWölbung	0,044
Exposition	0,004
(Konstante)	-2,797

Tab.36: Koeffizienten der Diskriminanzfunktion 1.

Tab.37: Koeffizienten der Diskriminanzfunktion 2.

Für die Berechnung der zweiten Diskriminanzfunktion wurde die gleiche abhängige Variable benutzt, während für die unabhängigen Variablen zwar die gleichen Reliefparameter wie oben benutzt wurden, allerdings mit anderer Klassifizierung (Kap.5). Hier zeigten sich für den Eigenwert, den Kanonischen Korrelationskoeffizienten, sowie für Wilks-Lamda (Tab.35) Werte, die auf eine akzeptable Trennung der Gruppen hindeuten, die aber insgesamt schlechter ausfallen als bei der Diskriminanzfunktion 1.

Dadurch ergab sich für die zweite Diskriminanzanalyse folgende Funktion zur Berechnung der Diskriminanzwerte:

D = (Hangneigung x 1,121) + (Geologie x 0,651) + (Exposition x 0,102)+ (Vertikalwölbung x 0,028) + (Horizontalwölbung x (-0,026)) - 4,012(Gl.32)

Wie in der ersten Diskriminanzanalyse wurden auch hier die Diskriminanzwerte (Tab.37), bzw. die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu der Gruppe der Rutschungen in farbige Gefährdungsstufen umgewandelt, so daß für jede Rasterzelle die Wahrscheinlichkeit zur Rutschungsveranlagung farbig dargestellt wird.

Beide Gefahrenhinweiskarten zeigen ähnliche Ergebnisse, wobei die durch Diskriminanzanalyse 1 berechnete Gefahrenhinweiskarte die bessere Modellanpassung, sowie visuell auch das bessere Ergebnis liefert.



Abb.94: Durch Diskriminanzfunktion 1 erstellte Gefahrenhinweiskarte mit 4 Gefährdungsstufen.

6.2.2.3 Logistische Regression

Die logistische Regression ist eine Methode der multivariaten Statistik, bei der anhand von unabhängigen Variablen, die als Vorhersageparameter fungieren, eine bestimmte Eigenschaft einer abhängigen Variable geschätzt wird, z.B. ob bei einer vorgegebenen Rasterzelle aufgrund der Konstellation ihrer Reliefparameter (der Risikofaktoren) die Wahrscheinlichkeit für eine Rutschung gegeben ist oder nicht. Dabei muß die abhängige Variable dichotom sein, d.h. sie kann nur zwei Zustände annehmen, also Rasterzelle "mit" oder "ohne" Rutschung. Ähnlich wie bei der Diskriminanzanalyse werden auch bei der logistischen Regression Koeffizienten zur Erstellung einer Funktion gesucht, mit deren Hilfe die Quotientenverhältnisse jedes unabhängigen Parameters im Modell geschätzt werden können. Damit kann gezeigt werden, um wieviel bei einer bestimmten Faktorenkombination, innerhalb einer Rasterzelle, die Wahrscheinlichkeit zur Rutschungsanfälligkeit steigt, als bei einer anderen Disposition, bzw. Faktorenkombination. Im vorliegenden Fall werden also aufgrund von Risikofaktoren (den Reliefparametern) für jede Rasterzelle die potentielle Veranlagung zu einer Rutschung vorhergesagt. Dabei kann die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Rutschung, bzw. die potentielle Rutschungsveranlagung einer Rasterzelle im Modell berechnet werden durch (POSPESCHILL, 2001):

$$p = \frac{1}{(1 + e^{-z})} \tag{Gl.33}$$

Das im Zähler auftretende z ergibt sich aus einer Linearkombination der Werte der unabhängigen Variablen und der zu schätzenden Koeffizienten (Gl.34).

$$z = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n + a \qquad (Gl.34)$$

b_n = zu schätzende Koeffizienten
 x_n = Werte der unabhängigen Variablen
 a = Konstante

Treten im Ergebnis Wahrscheinlichkeiten mit p < 0,5 auf, kann angenommen werden, daß die entsprechende Rasterzelle keine Veranlagung zu Massenbewegungen besitzt, also dort keine Rutschungen auftreten (POSPESCHILL, 2001). Die Schätzung der Parameter erfolgt bei der logistischen Regression mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode, bei der die Koeffizi-

a)			
Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R- Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	395,965	0,301	0,798
b)			
Schritt	-2 Log-Likelihood	Cox & Snell R- Quadrat	Nagelkerkes R-Quadrat
1	55,472	0,367	0,973

Tab.38: Modellzusammenfassung der a) Regression 1b) Regression 2.

enten so gewählt werden, daß sie die Wahrscheinlichkeit der beobachteten Ergebnisse maximieren. Diese kann auch als Güte für die Anpassung des Modells verwendet werden, was durch die Likelihood-Funktion erfolgt. Da die Likelihood in der Regel einen sehr kleinen Wert ergibt, wird meist -2 mal der Logarithmus der Likelihood (-2LL) als Kriterium für die Modellanpassung verwendet, wobei eine kleine -2LL auf ein gut angepaßtes Modell schließen läßt (BAHRENBERG et al., 1992).

Wie bei der Diskriminanzanalyse wurden auch bei der logistischen Regression zwei Gefahrenhinweiskarten berechnet, die auf den gleichen Reliefparametern mit jeweils unterschiedlichen Klasseneinteilungen basieren.

Die erste Berechnung (Regression 1) erfolgte mit den in vier Gruppen klassifizierten Reliefparametern, die zweite (Regression 2) mit den in zehn Gruppen unterteilten.

Anhand der für beide Regressionen berechneten Log-Likelihood (-2LL) zeigte sich, daß die Regression 2, mit der geringeren -2LL die bessere Modellanpassung liefert (Tab.38). Mit Hilfe der ermittelten Regressionskoeffizienten (Tab.39) konnte die Wahrscheinlichkeit für die Rutschungsveranlagung für jede einzelne Rasterzelle berechnet werden. Diese Wahrscheinlichkeit, die zwischen 0 und 1 liegt, konnte dementsprechend in Gefährdungsstufen unterteilt

a)				
		Regressions- koeffizient	Standard- fehler	р
	Hangneigung	1,850	0,0743	0,0000
	Geologie	1,578	0,0609	0,0000
Schritt 1	Exposition	0,283	0,0769	0,0002
Schnur	VertWölbung	0,079	0,0823	0,3389
	HorWölbung	-0,086	0,0984	0,3852
	Konstante	-8,613		
b)				
		Regressions-	Standard-	n
		Regressions- koeffizient	Standard- fehler	р
	Geologie	Regressions- koeffizient 2,992	Standard- fehler 0,2336	р 0,0000
	Geologie Hangneigung	Regressions- koeffizient 2,992 0,822	Standard- fehler 0,2336 0,0297	p 0,0000 0,0429
Cobritt d	Geologie Hangneigung Exposition	Regressions- koeffizient 2,992 0,822 -0,122	Standard- fehler 0,2336 0,0297 0,3240	p 0,0000 0,0429 0,1183
Schritt 1	Geologie Hangneigung Exposition VertWölbung	Regressions- koeffizient 2,992 0,822 -0,122 0,060	Standard- fehler 0,2336 0,0297 0,3240 0,0357	p 0,0000 0,0429 0,1183 0,0000
Schritt 1	Geologie Hangneigung Exposition VertWölbung HorWölbung	Regressions- koeffizient 2,992 0,822 -0,122 0,060 -0,051	Standard- fehler 0,2336 0,0297 0,3240 0,0357 0,0289	P 0,0000 0,0429 0,1183 0,0000 0,0000

Tab.39: Regressionskoeffizienten der a) Regression 1 b) Regression 2.

und farblich in einer Karte dargestellt werden. Die so erstellten Gefahrenhinweiskarten sind erwartungsgemäß sehr ähnlich und unterscheiden sich hauptsächlich durch unterschiedliche Gefährdungseinstufungen einzelner Rasterzellen. Dabei zeigt sich, daß bei der durch die Regression 2 berechneten Gefahrenhinweiskarte, die p-Werte der einzelnen Rasterzellen in der Regel etwas niedriger ausfallen. Insgesamt zeigt die durch die Regression 2 berechnete Gefahrenhinweiskarte nicht nur die bessere Modellanpassung (Tab.38), sondern auch visuell und auf die vorhandenen Rutschungen bezogen, das bessere Ergebnis. Deshalb wurde im weiteren Verlauf dieser Arbeit die durch die Regression 1 berechnete Gefahrenhinweiskarte nicht mehr berücksichtigt.



Abb.95: Mit Hilfe der logistischen Regression 2 erstellte Gefahrenhinweiskarte.

6.3 Fuzzy Logik

6.3.1 Einleitung

"Es ist das Merkmal eines gelehrten Geistes, mit dem Grad an Präzision zufrieden zu sein, den die Natur zuläßt, und nicht vollständige Genauigkeit zu suchen, wenn nur eine Näherung der Wahrheit möglich ist", Aristoteles.

Das Zitat von Aristoteles zeigt, daß in den modernen Naturwissenschaften die präzise Lösung eines Problems nicht notwendigerweise auch das optimalste Ergebnis liefert. Oft steht der Naturwissenschaftler vor dem Problem, in der Natur auftretende Prozesse zu beschreiben und in mathematische Modelle zu übertragen. Gerade bei komplizierten Prozeßvorgängen in der Natur wird man dabei aber schnell an die Grenzen stoßen, sowohl was die mathematische Prozeßmodellierung, als auch die verfügbare Rechenleistung betrifft. Die klassische Mathematik berücksichtigt bei der Modellierung natürlicher Prozesse in der Regel nur eine "Wahrheit", d.h. das Ergebnis kann entsprechend der Bool'schen Logik nur "wahr" oder "falsch" sein. Die Logik kann als die präziseste Wissenschaft betrachtet werden, auf der die Mathematik und die Informatik aufbauen. Dennoch ist die Bool'sche Logik bei all ihrer Schärfe nicht in der Lage menschliche Denkmuster zu simulieren, in denen partielle und multiple Wahrheiten erlaubt sind. Eine kontinuierliche, nichtlineare Logik, die dem menschlichen Denkmuster entgegenkommt, kann durch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) erreicht werden. Unter künstlicher Intelligenz können Methoden wie Neuronale Netzwerke (KNN), Fuzzy Logik (FL) und Genetische Algorithmen zusammengefaßt werden. Dabei müssen wissensbasierte Systeme wie Fuzzy Logik, die vorhandenes Wissen voraussetzen, von nicht wissensbasierten, modellfreien Systemen, wie Neuronalen Netzwerken, die ihr "Wissen" durch Lernprozesse erzielen, unterschieden werden (BRATZ, 2001).

Bei Neuronalen Netzwerken (KNN) handelt es sich um informationsverarbeitende Systeme, die aus einer Vielzahl kleinster Einheiten, sogenannten Neuronen, bestehen, die sich Informationen über gerichtete Verbindungen zusenden. Durch mathematische Veränderung der Gewichtung der Neuronenverbindungen kann ein gezieltes Lernen der Informationsverarbeitung erreicht werden (BRATZ, 2001). Ziel ist es dabei eine Optimierung zu erreichen, die es den Neuronalen Netzen ermöglicht, auch bei unbekannten Prozessen möglichst realitätsbezogen zu reagieren, wobei das Training von Datensätzen im Vordergrund steht. Die in der Informatik und der Neurobiologie schon eingesetzten Neuronalen Netzwerke, bieten auch für die Geowissenschaften nutzbare Möglichkeiten, natürliche Prozesse nachzubilden (FERNANDEZ- STEEGER, 2002). Gerade das Erkennen und Klassifizieren von Naturgefahren als Aufgabe von Neuronalen Netzen steht dabei im Vordergrund und sollte auch in Zukunft unter Zusammenarbeit von Informatikern und Geowissenschaftlern durch entsprechende Forschungsarbeiten interdisziplinär untersucht werden. Im Gegensatz zu den Neuronalen Netzen (KNN) handelt es sich bei den Fuzzy Logik-Systemen (auf die Genetischen Algorithmen soll hier nicht weiter eingegangen werden) um wissensbasierte Expertensysteme, die ein Vorhandensein von Grundwissen voraussetzen (INFORM GmbH, 2001). Unter einem Expertensystem wird der Ansatz verstanden, das Wissen von Fachleuten (Experten), das in der Regel auf Erfahrungen beruht, im Computer nachzubilden und reproduzierbar zu machen, also Wissen zu verarbeiten. Der menschliche Experte setzt dazu seine Modellvorstellungen aus genauen Einzelkenntnissen zusammen, die in der richtigen Anordnung, Lösungsstrategien aufzeigen, wie mit dem vorhandenen Wissen Probleme gelöst werden können. Dazu muß das Wissen des Experten formalisiert und im Computer wiedergegeben werden, was durch Regelsysteme wie Fuzzy Logik erreicht werden kann. Wichtig ist dabei zu verstehen, daß mit Experte nicht unbedingt der Wissenschaftler gemeint ist, sondern der "Experte" im praktischen Umgang mit dem Prozeß, da bei einem wissensbasierten System der Prozess nicht wissenschaftlich analysiert, sondern nur sein Verhalten möglichst realistisch beschrieben werden soll (BRATZ, 2001). Hinzu kommt, daß ein Expertensystem in der Lage sein muß, Wissen durch entsprechende Fakten und Regeln zu interpretieren und daraus Schlußfolgerungen zu ziehen.

6.3.2 Fuzzy Logik

Die Fuzzy Logik wurde in den sechziger Jahren von Prof. Lotfi Zadeh (ZADEH, 1965; ZADEH, 1978), einem Elektroniker und Systemtheoretiker an der Universität von Kalifornien in Berkeley/USA, entwickelt und wird heute hauptsächlich in der Regelungstechnik (Steuerung von Maschinen, Kränen, Industrierobotern, etc.), der Sensorik und der Qualitätskontrolle eingesetzt (HINTZE, 2002). Viele Dinge des alltäglichen Lebens, wie Autos (Airbags, ABS), Haushaltsgeräte, Heizungen, werden durch Fuzzy Logik geregelt oder gesteuert. Auch in den Geowissenschaften wird die Fuzzy Logik schon seit längerem zur Bearbeitung von Satellitenbildern in der Fernerkundung verwendet. Wie oben schon erwähnt besteht Expertenwissen meist aus Regeln, die "wahr" oder "falsch" sein können. In der klassischen Mengenlehre bedeutet das, daß ein Element nur einer Menge angehören kann und zwar nur komplett, d.h. es gibt keine teilweisen Zugehörigkeiten. Solche scharf abgegrenzten Intervalle entsprechen aber weder menschlichem Denken und Empfinden noch natürlichen Prozessen. Hier bieten sich unscharfe Mengen, sogenannte Fuzzy-Sets an, in denen Elemente auch nur bis zu einem gewissen Grad (zwischen 0 und 1) vorhanden sein können. Die Fuzzy (engl. verschwommen, unscharf) Logik kann also als Umgang mit unscharfen Wertemengen durch Verknüpfungslogik betrachtet werden, wobei die in der Regel verwendeten Verknüpfungsoperatoren UND, ODER, MINIMUM und MAXIMUM der klassischen Bool'schen Logik entnommen wurden (INFORM GmbH, 2001). Dadurch erlaubt die Fuzzy Logik auch partielle oder multiple Wahrheiten, was menschlichen Denkmustern und natürlichen Prozessen entgegenkommt. Verstärkt wird das noch dadurch, daß die Wertebereiche der Variablen in linguistische Terme umgewandelt werden, so daß die Prozeßbeschreibung durch die "Alltagssprache" erlaubt wird. Diese Umwandlung konkreter Daten mit Hilfe unscharfer Mengen in linguistische Variablen wird auch als Fuzzifizierung bezeichnet (INFORM GmbH, 2001). Die Fuzzy-Terme erhalten dann Bezeichnungen wie "hoch", "mittel", "niedrig" oder "kalt", "warm", "heiß", so daß damit Regeln aufgestellt und durch Operatoren verknüpft werden können (WENN Geschwindigkeit = "hoch" UND Abstand zu vorausfahrendem Auto = "gering" DANN Bremskraft = "hoch"). Als Beispiel soll auf das menschliche Empfinden zurückgegriffen werden. Möchte man sich zum Baden Wasser in eine Wanne einlassen, so würde man eine Wassertemperatur wählen, die man als "angenehm" empfindet. Nach der klassischen Mengenlehre könnte diese Temperatur als ein gegebenes Intervall zwischen 24 °C und 32 °C betrachtet werden (Abb.96). Die Temperaturen, die außerhalb dieses Intervalls liegen, würden somit als "zu kalt" oder "zu warm" eingestuft. Dementsprechend würde eine Wassertemperatur von 23,7 °C von einem solchen "scharfen" System als "unangenehm" gewertet werden, was aber nicht menschlichem Empfinden entspricht. Bei der Fuzzy Logik können Elemente nun aber auch nur zum Teil zu einer Menge gehören, so daß z.B. die Wassertemperatur 23,7 °C nur mit dem Zugehörigkeitsgrad 0,3 zum Temperaturbereich "warm" gehört (Abb.97). Ein regelbasiertes Fuzzy Logik System setzt sich normalerweise aus 3 Schritten zusammen, die im Laufe der Systemdurchführung der Reihe nach abgearbeitet werden:

- Fuzzifizierung → konkrete Eingangsdaten werden in linguistische Größen, definiert durch die unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets), umgewandelt.
- Inferenz → Definition von WENN-DANN Regeln, die die linguistischen Variablen verbinden und das Vorgehen des Reglers bestimmen.
- Defuzzifizierung → Umwandlung der durch die Inferenz gewonnenen Ergebnisse von linguistischen Beschreibungen in konkrete, weiterverarbeitbare Daten.

6.3.2.1 Fuzzifizierung

Die Fuzzifizierung kann als die Ermittlung der Zugehörigkeitsgrade von konkreten Daten zu unscharfen Mengen betrachtet werden. Bei der Erstellung eines Fuzzy-Systems müssen zunächst die "scharfen" Eingangsdaten in linguistische Werte, in der Fuzzy Logik als Terme bezeichnet, umgewandelt werden (BRATZ, 2001). Für jeden Parameter, z.B. die Geschwindigkeit eines Autos, können mehrere Terme definiert werden, die Namen enthalten, wie "hohe Geschwindigkeit", "mittlere Geschwindigkeit" und "geringe Geschwindigkeit". Jeder linguistische Term wird durch ein eigenes Fuzzy-Set in einem Graphen dargestellt, wobei der Grad der Zugehörigkeit konkreter Werte zu einem Term durch eine Funktion bestimmt wird (Abb.99). Diese Funktion wird in der Fuzzy Logik auch als Zugehörigkeitsfunktion (Membership-Function = MBF) bezeichnet und gibt dementsprechend die Zugehörigkeitswerte der Eingangsdaten an (GORSEVSKI et al., 2003), die zwischen 0 und 1 liegen können, wobei 1 absolute Zugehörigkeit zu einer Menge (einem Term) bedeutet, während ein Zugehörigkeitswert von 0 ausdrückt, daß die Variable außerhalb der Menge liegt (INFORM GmbH, 2001). Für die Durchführung der Fuzzifizierung kann auf verschiedene Standardfunktionen (Z-, Pi-, λ - und S-Typ) zurückgegriffen werden (Abb.98; INFORM GmbH, 2001). In der Regel werden die technischen Größen (Eingangsdaten) auf der x-Achse und der Zugehörigkeitsgrad auf der y-Achse des Graphen dargestellt. Weil in einem Fuzzy System die Umwandlung der Eingangsdaten in linguistische Terme einer der wichtigsten Schritte ist, sollte die Auswahl und Zuordnung der Funktionen zu den Termen möglichst präzise durchgeführt und nach mehreren Systemdurchläufen gegebenfalls angepaßt werden, da die Form und die Überlappung der Funktion starken Einfluß auf das gesamte System hat. Zur Konkretisierung kann man wieder auf das oben erwähnte Auto-Beispiel zurückkommen. Möchte man einen einfachen Bremskraftregler entwickeln, könnte man von zwei Eingangsvariablen ausgehen. Diese wären die Geschwindigkeit des Autos und dessen Abstand zum vorausfahrenden Wagen (Abb.100). Ist



Abb.96: "Scharfe" Darstellung der Temperaturbereiche.



die Fuzzifizierung abgeschlossen, müssen die erstellten Fuzzy-Sets durch Regeln miteinander verbunden werden.

Abb.97: "Unscharfer" Temperaturbereich mit mehreren Zugehörigkeiten.

6.3.2.2 Inferenz

Im nächsten Schritt, der Inferenz werden Regelblöcke mit WENN-DANN Regeln erstellt, die die Eingangsvariablen miteinander verknüpfen und das Vorgehen des Reglers bestimmen, wobei zu beachten ist, daß die Regeln die wesentlichen Merkmale des Systems beschreiben. Dazu muß zunächst eine Regelbasis für die Verbindung der Fuzzy-Sets erstellt werden. Meistens werden dafür Produktregeln eingesetzt, die aus einer Maßgabe, die durch eine WENN-Verknüpfung gekennzeichnet ist, und einer Folgerung (DANN-Teil) bestehen. Der WENN-Teil der Regelbasis kann darüber hinaus aus mehreren Bedingungen bestehen, die durch Operatoren wie UND oder ODER miteinander verknüpft werden können (Abb.101). Im Falle des Bremskraftreglers könnte eine Regel lauten: "WENN Geschwindigkeit = "hoch" UND Abstand = "gering" DANN Bremskraft = "hoch". Bei der Verknüpfung durch den Begriff UND wird der Zugehörigkeitsgrad der Bedingung durch das Minimum der Zugehörigkeitsgrade der Eingangsdaten bestimmt, während bei der ODER-Verknüpfung das Maximum der fuzzifi-

zierten Eingangsgrößen gebildet wird (Abb.102; BRATZ, 2001). Beide Operatoren, MIN und MAX werden auch als Implikationsoperatoren bezeichnet (BRATZ, 2001). Der WENN-Teil beschreibt die Prozeßsituation, in der die Regel gelten soll, der DANN-Teil gibt die Reaktion darauf wieder. Die Ermittlung des WENN-Teils wird auch Aggregation oder Aggregation für die linke Seite kurz "AggOpLS" genannt (BRATZ, 2001). Im Anschluß daran erfolgt die Kompo-



Abb.98: Zugehörigkeitsfunktionen.



Abb.99: Fuzzy-Set mit linguistischen Termen und Zugehörigkeitsfunktionen.

sition, d.h. die Berechnung des DANN- Teils. Dazu wird dem linken Teil der Regel, also dem WENN-Teil, ein Ergebnis auf der rechten Seite der jeweiligen Regel, dem DANN-Teil, unter zu Hilfenahme des entsprechenden Implikationsoperators (ImpOp), zugeordnet und eine Gesamtzugehörigkeitsfunktion aus den verschiedenen Regeln gebildet (BRATZ, 2001). Zur besseren Optimierung der Regelbasis kann zusätzlich auf eine erweiterte Inferenzmethode, die Fuzzy Associative Map Inferenz (FAM) zurückgegriffen werden. Bei dieser Methode wird ein Plausibiltätsgrad eingeführt, der die Wichtigkeit jeder einzelnen Regel durch Werte zwischen 0 und 1 (0=unwahr / 1=wahr) definiert und der mit dem Erfüllungsgrad des WENN-Teils multipliziert wird. Damit können Regeln, deren Bedingungen unsicher erscheinen oder ungenau sind, innerhalb eines Fuzzy-Systems geringer bewertet werden. Als Ergebnis der Inferenz erhält man auf der DANN-Seite eine Aneinanderreihung von Flächen, die eine unscharfe Ausgabeinformation darstellen und die im nächsten Schritt, der Defuzzifizierung, wieder in kon-krete Ausgangsdaten umgewandelt werden (INFORM GmbH, 2001).



Abb.100: Mögliche Eingangsvariablen eines "Bremskraftreglers. oben: Geschwindigkeit des Fahrzeugs unten: Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug

W	ENN		DANN
Abstand	Geschwindigkeit	DoS	Bremskraft
gross	gering	1.00	niedrig
gross	mittel	1.00	niedrig
gross	hoch	1.00	mittel
mittel	gering	1.00	niedrig
mittel	mittel	1.00	mittel
mittel	hoch	1.00	hoch
gering	gering	1.00	mittel
gering	mittel	1.00	hoch
gering	hoch	1.00	hoch

Abb.101: Regelbasis eines Bremskraftreglers.

6.3.2.3 Defuzzifizierung

Die Defuzzifizierung ist dafür zuständig, die unscharfen Ergebnisse der Inferenz aus einer linguistischen Beschreibung in scharfe, konkrete Werte umzuwandeln. Dabei kann die Defuzzifizierung in zwei Schritten zusammengefaßt werden. Zum einen die Ermittlung scharfer Werte für alle bestehenden Terme durch die Gesamtzugehörigkeitsfunktion, zum anderen die Bestimmung des besten Kompromisses als Ausgabeinformation, der aus den vorhandenen Ergebnissen ermittelt wird. Da in der Regel mehrere Ausgangsterme als wahr angesehen werden können, muß ein Kompromiß gefunden werden, der die beste Mittelung der Ergebnisse darstellt. Dazu gibt es, je nach Anwendungsart verschiedene Methoden wie z.B. die Center-of-Maximum Methode (CoM) bei der ein Ausgangswert als gewichtetes Mittel der Maxima der Zugehörigkeitsfunktionen ermittelt wird (INFORM GmbH, 2001). Die am häu-



Abb.102: Logische Verknüpfung linguistischer Werte.
 a) UND-Verknüpfung entspricht Minimum der Zugehörigkeitsgrade der Eingangsgrößen.
 b) ODER-Verknüpfung entspricht Maximum der Zugehörigkeitsgrader der Eingangsgrößen.

figsten benutzte Methode ist die Center-of-Area-Methode (CoA), die gelegentlich auch als Center-of-Gravity-Methode (CoG) bezeichnet wird (Abb.103; BRATZ, 2001). Bei dieser Methode wird angenommen, daß der repräsentativste scharfe Wert einer Flächeanreicherung unter dem Schwerpunkt dieser Fläche liegt. Dazu wird rechnerisch der Flächenschwerpunkt bestimmt. Als Endergebnis erhält man schließlich einen diskreten Wert, bzw. eine technische Größe, die zur Regelung oder Beschreibung eines Prozesses weitergegeben werden kann. Im Beispiel des Bremskraftreglers könnte der scharfe Wert dementsprechend eine negative Beschleunigung sein, die das Auto abbremst (Abb.102).



Abb.103: Prinzip der Ermittlung des "scharfen" Ausgangswertes durch die Center-of-Area-Methode (nach REIF, 2000).

6.3.3 Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit Hilfe von Fuzzy-Logik

Die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Rutschungsgefährdung in Rheinhessen mittels Fuzzy Logik wurde mit Hilfe der Software fuzzyTech 5.5 durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Programm zur Steuerung von Maschinen und Prozessen, mit dem sich komplette Fuzzy-Systeme erstellen lassen. Kontingenztabellen mit den Eingangsdaten lassen sich entweder direkt über DDE (Dynamic Data Exchange), das unter Windows zur Verfügung steht, einbinden oder können als csv-Dateien importiert und in das System integriert werden. Die Daten Ausgabe erfolgt ebenfalls über DDE-Schnittstelle oder durch Export der Daten in andere Dateiformate. Die Software bietet außerdem die Möglichkeit über Schieberegler die verschiedenen Eingangsvariablen zu verändern und damit eine Modellsimulation in Echtzeit durchzuführen (Abb.104). Dadurch wird die nachträgliche Optimierung des Systems durch Variation der Eingangsdaten ermöglicht.

Als Eingangsvariablen wurden im ersten Durchlauf, wie auch bei den durch statistische Methoden berechneten Gefahrenhinweiskarten, wieder die Geologie, Hangneigung, Exposition und die Wölbung benutzt. Da sich dabei zeigte, daß bei der Kombination von sechs Parametern die Regelbasis recht groß wird, wurde in einem zweiten Durchgang die Anzahl der Eingangsvariablen auf drei reduziert und die beiden Ergebnisse verglichen. Die für das Fuzzy-System notwendige Kontingenztabelle wurde wieder durch Verschneidung der einzelnen Parameter-Grids in ArcView erstellt. Von Vorteil ist dabei, daß die digitalisierten Rutschungen nicht im Fuzzy-System berücksichtigt werden (dementsprechend auch nicht in der Kon-

tingenztabelle vorhanden sind), so daß ein direkter Vergleich der vorhandenen Rutschgebiete mit der durch Fuzzy Logik erstellten Gefahrenhinweiskarte möglich ist. Damit lässt sich eine Güteabschätzung der Karte vornehmen, indem die vorhandenen Rutschareale mit den als gefährdet eingestuften Gebieten der Karte verglichen werden. Die in ArcView erstellte Kontingenztabelle wurde dann in eine csv-Datei umgewandelt und an fuzzyTech übergeben. Zunächst musste aber entsprechend der einzelnen Schritte in Kapitel 3.2 das Fuzzy-System erstellt werden (Abb.106). Dazu wurden zunächst die Fuzzy-Sets für die Eingangsvariablen gebildet, um damit dann die Eingangsdaten der



Abb.104: Interaktiver Debug-Modus der Software fuzzyTech 5.5. Die Ergebnisse der einstellbaren Eingangsvariablen (unten) lassen sich im Graphen der Gefährdung (Ausgangsvariable) direkt überprüfen.

Kontingenztabelle in linguistische Größen umzuwandeln (Abb.105). Für die linguistischen Terme wurden immer die Begriffe "hoch" und "niedrig", bzw. bei drei Termen auch "mittel" benutzt. Als problematisch erwies sich die Zuordnung der nominal skalierten Variablen (Geologie und Landnutzung), die dann aber mittels ihrer Failure-Rates in metrisch skalierte Variablen umge-wandelt werden konnten. Die Eingangsvariablen mit ihren entsprechenden Fuzzy-Sets sind in Abbildung 14 dargestellt. Die Ausgangsvariable wurde als Gefährdung in Prozent definiert, wobei 0 % keine Gefährdung bedeutet, während bei 100 % eine absolute Rutschungsgefährdung vorliegt. Mehrere Durchläufe zeigten aber, daß weder 0 % noch 100 % erreicht werden konnten, was letztendlich auch natürlichen Begebenheiten entspricht. Der Grad der Gefährdung wurde durch vier linguistische Terme festgelegt (niedrige Gefährdung, mittlere Gefährdung, hohe Gefährdung und keine Gefährdung). Der vierte Term "keine Gefährdung" hat dabei die Aufgabe kleine Gefährdungseinstufungen im Bereich von weniger als 25% deutlicher als ungefährdet darzustellen, als das mit den drei Einstufungen "niedrig", "mittel" und "hoch" möglich wäre. Bei ersten Modelldurchläufen mit drei linguistischen Termen zur Klassifizierung zeigte sich gerade in flachen Gebieten mit als "mittel" eingestuften geologischen Schichten eine Überbewertung der potentiellen Gefährdung, die durch Einführung einer vierten Klasse beseitigt werden konnte. Dabei ist es vorteilhaft, daß die mittleren und hohen Klassifizierungsbereiche davon ausgenommen bleiben.



Abb.105: Terme und Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsvariablen.

In einem nächsten Schritt wurde die Regelbasis erstellt. Hier zeigte sich, daß die Software bei einer Auswahl von sechs Eingangsvariablen automatisiert schon über 200 Regeln erstellt, die Regelbasis also nicht sehr übersichtlich ist. Durch gezielte Auswahl und Bewertung jeder einzelnen Regel konnte das Regelwerk schließlich auf 66 Regeln begrenzt werden. Trotzdem waren mehr als 70 Modelldurchläufe notwendig um eine, der Realität möglichst nahe kommende Gefahrenhinweiskarte zu erstellen. Die Feinabstimmung einzelner Regeln konnte mit Hilfe des Interaktiv-Modus des Programms durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um eine Echtzeitsimulation bei der die Werte der Eingangsvariablen einfach durch Schieberegler gesteuert, und die kontinuierliche Veränderung des Ausgabewertes (Gefährdungsgrad) beobachtet werden kann (Abb.104).



Abb.106: Darstellung des entwickelten Fuzzy-Systems zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit 6 Eingangsvariablen.

Zusätzlich wurde eine zweite Karte durch Fuzzy Logik erstellt, bei der nur drei Eingangsvariablen (Hangneigung, Geologie und Vertikalwölbung) berücksichtigt wurden (Abb.108), um zu überprüfen, in wie weit eine stark vereinfachte Regelbasis, die in diesem Fall auf 11 Regeln (Abb.107) begrenzt werden konnte, die Gefährdungseinstufung beeinflußt. Es zeigt sich, daß die Verringerung der Eingangsvariablen grundsätzlich die Übersicht über die Regelbasis und somit auch die Erstellung eines Fuzzy-Systems erleichtert, während sich das Ergebnis trotzdem noch in einem akzeptablen Bereich bewegt. Dadurch könnte es sinnvoll sein ein Fuzzy-System zunächst nur mit wenigen, dominanten Eingangsvariablen aufzubauen und erst bei sinnvollem Ergebnis und den natürlichen Prozeß gut beschreibender Regelbasis, das Fuzzy-System zur Feinanpassung durch weitere Variablen zu erweitern.

Nachdem die Fuzzy-Sets und die Regelbasis ertstellt waren, wurde die Kontingenztabelle mit den Eingangsvariablen als Datenbasis in ArcView erstellt. Dazu wurden die entsprechenden Reliefparameterkarten zu einem multiplen Grid kombiniert, so daß für jede Rasterzelle die je-

	WENN			DANN	
Hangneigung	Geologie	Landnutzung	DoS	Gefaehrdung	
niedrig	niedrig		1.00	keine	
niedrig	hoch	niedrig	1.00	niedrig	
niedrig	hoch	hoch	1.00	mittel	
mittel	niedrig	niedrig	1.00	niedrig	
mittel	niedrig	hoch	1.00	niedrig	
mittel	hoch	niedrig	0.70	hoch	
mittel	hoch	hoch	0.90	hoch	
hoch	niedrig	niedrig	1.00	niedrig	
hoch	niedrig	hoch	1.00	mittel	
hoch	hoch	niedrig	0.90	hoch	
hoch	hoch	hoch	1.00	hoch	

Abb.107: Regelbasis des Fuzzy-Systems bei Berücksichtigung von nur drei Eingangsvariablen.

weiligen Reliefparameter vorlagen. Die aus dem Grid extrahierte Kontingenztabelle konnte in eine Textdatei umgewandelt und an das Fuzzy-System übergeben werden. Nach der Berechnung der Gefährdungsgrade konnte dann im umgekehrten Verfahren, die durch die Gefährdungsgrade ergänzte Kontingenztabelle zurück an ArcView übergeben und die Gefährdungsgrade jeder einzelnen Rasterzelle in der Karte farbig dargestellt werden.



Abb.108: Darstellung des entwickelten Fuzzy-Systems zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit 3 Eingangsvariablen.

6.3.4 Ergebnis

Um zum einen die Güte der beiden durch Fuzzy Logik erstellten Gefahrenkarten zu überprüfen und zum anderen die Karten miteinander zu vergleichen, wurden die fertigen Gefahreneinstufungen mit der Karte der digitalisierten Rutschgebiete verschnitten, um den prozentualen Anteil der Rutschareale an den jeweiligen Gefahrenstufen zu ermitteln. Die Einteilung der Gefahrenklassen richtete sich dabei nach den Termen der Ausgangsvariable des Fuzzy-Systems und erfolgte deshalb in anderen Stufen als bei der statistischen Auswertung. Die Einstufung "keine Gefährdung" umfaßte alle Werte im Bereich kleiner 25%, während die anderen Gefährdungsklassen sich daran in 25% Schritten anschließen. Im Ergebnis zeigt sich, daß die durch sieben Eingangsvariablen erstellte Gefahrenhinweiskarte, die bessere Anpassung an die tatsächlichen Begebenheiten liefert. Insgesamt 69,78% der bekannten Rutschflächen liegen innerhalb der Klasse "hohe Gefährdung", während noch 14,30% auf den Bereich "mittlere Ge-

fährdung" entfallen (Tab.40). Auf die Gefährdungsstufe "geringe Gefährdung" entfallen etwa 7% der durch Rutschungen gekennzeichneten Rasterzellen. Immerhin 9,12% aller Rutschflächen liegen außerhalb von als gefährdet klassifizierten Hangbereichen. Diese Zellen wurden vom System falsch zugeordnet, wobei aber zu berücksichtigen ist, daß zum einen darunter Rutschungen fallen, die entlang der Autobahndämme, an Böschungen aufgetreten sind und in einem solchen Modell nicht bewertet werden können, zum anderen können Rutschungen aufgrund ihrer Größe im Fußbereich auch auf ungefährdete Bereiche übergreifen. Hinzu kann eine geringe Verschiebung der Rutschareale kommen, die durch die Vektor/Raster-Wandlung entsteht. Betrachtet man die mittlere und hohe Gefährdungsklasse zusammen, werden etwa 84% der Rutschungsflächen richtig klassifiziert. Bei der durch drei Eingangsvariablen erstellten Gefahrenhinweiskarte ergibt sich für die Klasse "hohe Gefährdung" ein ähnliches Ergebnis, daß sich nur durch einen geringfügig kleineren Anteil (ca. 4%) von richtig zugeordneten Rutschflächen unterscheidet (Tab.41). Der Hauptunterschied zeigt sich bei den mittleren und niedrigen Gefährdungsgraden, d.h. insgesamt werden die einzelnen Rasterzellen niedriger klassifiziert als bei der anderen Karte. Gerade in diesen Bereichen macht sich die genauere Einteilung und die bessere Optimierung des Systems durch zusätzliche Eingangsvariablen bemerkbar. Durch die insgesamt geringere Bewertung der einzelnen Rasterzellen durch das Fuzzy-System werden hier wesentlich mehr Rasterzellen (9%) in die unterste Klasse ("keine Gefährdung") eingestuft, bzw. falsch klassifiziert (Tab.41). Es zeigt sich also, daß es durchaus sinnvoll ist, möglichst viele Variablen in ein Fuzzy-System aufzunehmen, soweit die Regelbasis noch überschaubar und justierbar bleibt. Da die meisten Programme den Anwender dabei aber durch Automatisierung und Echtzeitüberprüfung des Systems unterstützen, sollten auch größere Regelwerke, die besser in der Lage sind Naturprozesse zu beschreiben, verarbeitbar sein.

Klasse	Anzahl Zellen	Prozent
< 25%	292	9,12
25% - 50%	218	6,81
50% - 75%	458	14,30
> 75%	2235	69,78
Gesamt	3203	100,00

Tab.40: Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Gefährdungsstufen bei 6 Eingangsvariablen.

Klasse	Anzahl Zellen	Prozent
< 25%	573	17,89
25% - 50%	299	9,33
50% - 75%	240	7,49
> 75%	2091	65,28
Gesamt	3203	100.00

Tab.41: Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Gefährdungsstufen bei 3 Eingangsvariablen.

6.4 Zusammenfassung

Bei der Erstellung der Gefahrenhinweiskarten zeigte sich, daß sowohl die statistischen Methoden, als auch die Fuzzy Logik, Ergebnisse liefern, die die potentielle Rutschungsgefährdung für Rheinhessen gut wiedergeben. Für die anhand statistischer Methoden erstellten Gefahrenhinweiskarten, wurde die Modellgüte hinsichtlich der Klassifizierung in Gefährdungsgrade auf dieselbe Art geprüft wie das in Kapitel 6.3.4 für die Fuzzy Logik erfolgte, nur mit dem Unterschied, daß diesmal nicht alle Rutschungsflächen berücksichtigt wurden, sondern nur die, die nicht in die Modellberechnung mit eingeflossen sind. Es zeigt sich, daß die Diskriminanzanalyse die schlechteren Ergebnisse liefert als die logistische Regression (Tab.43). Gerade im Bereich der Klasse "hohe Gefährdung" liegt der Anteil der Rutschflächen bei der logistischen Regression um 16% höher als bei der Diskriminanzanalyse. Ein ähnlich großer Unterschied findet sich im Bereich "geringe Gefährdung" der bei der Diskriminanzanalyse um etwa 10% größer ist. Insgesamt scheint die Diskriminanzanalyse die Rutschungsgefährdung der Rasterzellen eher niedriger einzustufen. Für die durch logistische Regression berechnete Karte lag der Anteil der Rutschflächen an der höchsten Gefährdungsstufe bei 77,67%, was als gutes Ergebnis betrachtet werden kann. Nimmt man wieder die mittlere Gefährdungsstufe hinzu ergibt sich sogar ein Anteil von 88% richtig klassifizierter Rasterzellen, d.h. die logistische Regression liefert bei gleichen Ausgangsbedingungen das bessere Ergebnis (Tab.43).

Um die Vor- bzw. Nachteile der einzelnen Berechnungsmethoden herauszustellen, war es notwendig eine Möglichkeit zu finden, die einzelnen Karten miteinander zu vergleichen. Dabei

Logistische	Regression	
Klasse	Anzahl Zellen	Prozent
< 40%	293	9,09
40% - 60%	88	2,73
60% - 80%	339	10,51
> 80%	2505	77,67
Gesamt Diskriminanz	3225 analyse	100,00
Gesamt Diskriminanz Klasse	3225 analyse Anzahl Zellen	100,00
Gesamt Diskriminanz Klasse < 40%	3225 analyse Anzahl Zellen 325	100,00 Prozent 10,08
Gesamt Diskriminanz Klasse < 40% 40% - 60%	3225 analyse Anzahl Zellen 325 450	100,00 Prozent 10,08 13,95
Gesamt Diskriminanz Klasse < 40% 40% - 60% 60% - 80%	3225 analyse Anzahl Zellen 325 450 480	100,00 Prozent 10,08 13,95 14,88
Gesamt Diskriminanz Klasse < 40% 40% - 60% 60% - 80% > 80%	3225 analyse Anzahl Zellen 325 450 480 1970	100,00 Prozent 10,08 13,95 14,88 61,09

Tab.42: Prozentualer Anteil der digitalisierten Rutschflächen an den einzelnen Gefährdungsstufen bei logistischer Regression und Diskriminanzanalyse.



Abb.109: Kreuztabelle der klassifizierten Rasterzellen.

sollte zum einen eine Bewertung zwischen den durch logistische Regression und Diskriminanzanalyse erstellten Karten, also den statistischen Methoden untereinander, zum anderen ein Vergleich zwischen statistischen Methoden und der Fuzzy-Logik durchgeführt werden. Dazu wurden zunächst die Karten der logistischen Regression und der Diskriminanzanalyse umklassifiziert, indem die Gefährdungsklassen bei der ersten Gefahrenhinweiskarte von 1-4 durchnummeriert wurden, während bei der zweiten Karte die Durchnummerierung in 10er Schritten von 10-40 erfolgte. Die so umklassifizierten Karten wurden dann addiert und das Ergebnis in einer Kreuztabelle (Abb.109) zusammengefaßt, so daß daraus ersichtlich wird, wieviel Rasterzellen der beiden Karten unterschiedlich eingestuft werden und in wie weit die entsprechenden Fehleinschätzungen noch akzeptabel sind. Das Ergebnis zeigt, daß in 81,31% aller Fälle eine Rasterzelle in beiden Karten die gleiche Einstufung bekommen hat und 14,96% zwar unterschiedlich eingestuft wurden, diese Differenz aber als noch akzeptabel anzusehen ist. Das heißt, es wurden letztendlich nur 3,73% aller Rasterzellen komplett falsch eingestuft, wobei die Diskriminanzanalyse zu geringeren Gefährdungseinstufungen der Rasterzellen neigt als die logistische Regression (Abb.110). Zwar stimmen die beiden Karten relativ gut überein und liefern ähnlich brauchbare Ergebnisse, trotzdem sollte in diesem Fall die logistische Regression aufgrund der besseren Modellanpassung bevorzugt werden. Deshalb wurden nur die Ergebnisse der logistischen Regression mit der durch Fuzzy Logik ermittelten



Abb.110: Anteil der richtig klassifizierten Flächen an der im Modell berücksichtigten Gesamtfläche (Diskriminanzanalyse/log. Regression).



Abb.111: Kreuztabelle der klassifizierten Rasterzellen.

Gefahrenhinweiskarte verglichen. Da beide Gefahreneinstufungen unterschiedliche Klassengrenzen der Gefährdungsgrade besitzen, mußten diese zunächst aneinander angepaßt werden. Beide Karten wurden dann addiert und die Ergebnisse als Kreuztabelle dargestellt. Immerhin wurden fast 77% der Rasterzellen in beiden Karten gleich eingestuft, lieferten also dieselben Ergebnisse. Von den falsch eingestuften Rasterzellen konnten noch 17% als akzeptabel klassifiziert werden, d.h. die Einstufung der Rasterzellen lag weniger als eine Klassenbreite auseinander, so daß sich für die richtig bzw. mit geringer Abweichung klassifizierten Rasterzellen eine Übereinstimmung von mehr als 90% (94,38%) ergibt (Abb.111).

Das Ergebnis zeigt, daß letztendlich alle in dieser Arbeit angewendeten Methoden zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten brauchbare Ergebnisse für die Gefährdungseinstufung lieferten. Bei den statistischen Methoden bietet die logistische Regression die beste Modellanpassung. Auch im Vergleich mit der Fuzzy Logik hat sie scheinbar den höheren Anteil an richtig klassifizierten Rutschungen. Dabei muß aber auch bedacht werden, daß bei der Güteabschätzung des Modells nur die Rutschungen berücksichtigt wurden, die nicht mit in die logistische Regression eingegangen sind. Bei der Fuzzy Logik hingegen fließen die digitalisierten Rutschungen nicht in das Modell mit ein, können also demnach komplett zur Überprüfung der Modellanpassung benutzt werden, da nur das Expertenwissen über den Prozess der Rutschung, nicht aber die einzelne Rutschung selbst eine Rolle spielt. Grundsätzlich bietet die Fuzzy Logik also die besseren Möglichkeiten zur Erstellung von Gefahrenhinweiskarten in den Naturwissenschaften, da sie zum einen das Expertenwissen über die Prozeßabläufe verarbeiten kann, zum anderen eine flexible Regelbasis bietet, die fortwährend weiterentwickelt und optimiert werden kann. Hier können auch neuronale Fuzzy-Systeme in Zukunft eine Rolle spielen, eine Kombination aus Fuzzy-Systemen und neuronalen Netzwerken, die durch ihre Lernfähigkeit die Regelbasis und die Zugehörigkeitsfunktionen durch ständige Datenzufuhr halbautomatisch optimieren können.

7. Gefahren- und Risikoanalyse für Rheinhessen

7.1 Einführung

Eine wichtige Voraussetzung für raumplanerische Maßnahmen hinsichtlich Hang- und Massenbewegungen im Bereich von Hügellandschaften, Mittelgebirgen und Gebirgen ist die Erstellung von Gefahrenkarten. Dadurch soll im Idealfall schon im Verlauf von Planfeststellungen das Schadenspotential minimiert und ein verantwortungsvoller Umgang mit Naturgefahren erreicht werden. Gefahrenkarten richten sich dabei hauptsächlich an Fachleute, politische Instanzen, sowie private Grundstückseigentümer. Wie schon in Kapitel 3 und 6 beschrieben, bieten sich je nach Anforderungen und Datenbestand unterschiedlichste Methoden zur Beschreibung von Rutschungsgefahren an, die von einfachen Rutschhöffigkeitskarten bis zu Karten reichen, die die Gefährdung auch für noch nicht auffällige Hangbereiche einstufen (Kap. 6). Hinzu kommen Karten, die vorhandene Schutzbauten und deren Wirkungsgrad darstellen, sowie Risikokarten, die Auskunft über potentielle menschliche Verluste und Sachwerte geben. Der Begriff "Karte" ist dabei allerdings irreführend, da die Karte in Papierform nur noch als Nebenprodukt zur Veranschaulichung der jeweiligen Problemstellung dient. Gerade die Begrenzung der Informationsdichte von Papierkarten stellt hinsichtlich der Darstellung von Gefahren ein Problem da, das durch computergestützte Verfahren gelöst werden kann. Im Vordergrund steht dabei die Sammlung verschiedenster Daten, die in ein Informationssystem eingebunden sind, das dem Nutzer auf einfache und schnelle Weise ermöglicht, die benötigten Informationen zu bekommen. Im Bereich von räumlichen Fragestellungen bietet sich die Verwendung von Geoinformationssystemen (GIS) an, die die einfache Kombination von Sach- und Raumdaten ermöglichen. Es zeigt sich, daß die Gefahrenkarte, bzw. Gefahrenhinweiskarte im Prinzip ein komplexes Konzept ist, das man als umfassendes Gefahrenhinweissystem bezeichnen kann. Für den Planer ist es nicht nur wichtig das Endergebnis, also eine Gefahreneinschätzung zu bekommen, sondern er muß auch die Möglichkeit haben unterschiedlichste Ausgangsdaten abfragen und kombinieren zu können. Hieraus ergibt sich also die Notwendigkeit einer Unterscheidung zwischen computergestütztem Gefahrenhinweissystem und der, als ein Ergebnis daraus resultierenden, Gefahren-, bzw. Gefahrenhinweiskarte.

7.2 Aufbau eines Informationssystem auf der Gefahrenhinweis-Ebene

Wie beschrieben ist das Ziel dieser Arbeit nicht nur die Erstellung einzelner Gefahrenkarten, sondern die Entwicklung eines ganzen Gefahreninformationssystems, in dessen Vordergrund die Berechnung und Darstellung der Hangdisposition in Bezug auf Rutschungen steht. Die aufgenommenen, digitalisierten und berechneten Daten aus den vorherigen Kapiteln sollten in einem leicht abzufragenden und übersichtlichen Informationssystem zusammengefaßt und dargestellt werden. Als Grundlage dient das DGM von Rheinhessen im 40 m-Raster, sowie die topographischen Karten von Rheinhessen im Maßstab 1:25.000. Als Grundmaßstab für das Informationssystem wurde, angelehnt an die digitalisierten topographischen- und geologischen Karten, ebenfalls der Maßstab 1:25.000 gewählt. Als GIS-Plattform wurde die Software ArcView der Firma ESRI gewählt, da sie leicht zu erlernen ist und sie durch selbst programmierbare Skripte im Funktionsumfang beliebig erweitert werden kann und sich damit auf die gewünschte Modellsystematik anpassen läßt. Die Datenbestände der jeweiligen Geoobjekte wurden in einzelne Datenbanken zusammengefaßt, die zu speziellen Auswertungen auch durch Statistik- oder Tabellenkalkulationsprogramme abgefragt werden können. Die Datenbestände der aufgenommenen und digitalisierten Rutschungen wurden in einer externen relationalen Datenbank zusammengefaßt und können über eine ODBC-Verbindung aus dem GIS abgefragt werden. Um eine Abfrage der Rutschungsdatenbank zu erleichtern, wurde zum einen die Ausgabemaske der Rutschungsdatenbank in Form des von STEINGÖTTER (1986) entwickelten Aufnahmebogens (Abb.112) angelegt, zum anderen wurde jede Rutschung durch eine eindeutige Inventarnummer gekennzeichnet, die sich aus den Anfangsbuchstaben der ent-



Abb.112: Ausschnitt aus dem Hauptdatenblatt der Rutschungsdatenbank von Rheinhessen.

sprechenden Gemeinde, auf deren Gebiet sich die Rutschung ereignete und einer Kennzahl zusammensetzt. Durch die Eintragung eines Rechts- und Hochwertes für jede Rutschung in die Datenbank, können diese auch räumlich in Form einer Rutschungshöffigkeitskarte dargestellt werden. Jede Art von Geoobjekten wurde in einer eigenen Informationsebene (Layer) abgelegt, die je nach gewünschter Informationsdichte ein- oder ausgeschaltet werden können (Abb.113). Dementsprechend können die verschiedensten thematischen Karten erstellt und ausgedruckt werden. Darüber hinaus können zu jedem Geoobjekt zusätzliche Informationen wie Fotos, Luftbilder oder Texte (Gutachten) gespeichert und eingesehen werden. Als relevante Datenebenen für das System, wurden die topographischen Karten, das DGM, sowie die digitalisierten Verkehrswege, die politischen Grenzen, das Gewässernetz, die bebauten Flächen, die Landnutzung, die Geologie, die berechnete Rutschungsdispositionen und die digitalisierten Rutschungen integriert. Die Integration weiterer Datenebenen ist darüber hinaus problemlos möglich.



Abb.113: Verschiedene in ein GIS integrierte Datenebenen (Layer), die teilweise eingeschaltet sind (Gefahrenhinweissystem Rheinhessen).

7.3 Ausarbeitung einer Gefahrenhinweiskarte

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2 beschriebenen Informationssystems sollte zusätzlich eine Gefahrenhinweiskarte für den Druck angelegt werden. Als Kartenmaßstab wurde 1:50.000 gewählt, da die Größe zum einen noch eine vernünftige Darstellung der Hanggefährdung als Übersicht zuläßt, zum anderen eine flächendeckende Darstellung von Rheinhessen, bzw. dem ganzen Untersuchungsgebiet noch möglich ist. Als Informationsebenen sollten zur besseren Übersicht nur die in Kapitel 6 berechnete Disposition, sowie die digitalisierten Rutschungen mit entsprechenden Inventarnummern mit einfließen. Im Vordergrund sollte die Vorhersage und Abgrenzung mittels Gefahreneinstufung der potentiellen Rutschungsgefährdung noch nicht betroffener Bereiche, sowie die Darstellung vorhandener Rutschungen stehen (Abb.114). Dabei ist die Zielsetzung der Gefahrenhinweiskarte die Identifikation potentieller und vorhandener Hanggefährdungen durch Rutschungen. Fallen als gefährdet klassifizierte Gebiete mit zur Bebauung freigegebenen Bereichen zusammen, sollten dafür Gefahrenkarten im Maßstab 1:5000 erstellt werden, die eine genauere Abgrenzung der gefährlichen Bereiche ermöglichen und aus denen sich gegebenenfalls ein Bebauungs- bzw. Nutzungsverbot ergibt. Ist eine Bebauung in Rutschungsgefährdeten Bereichen unumgänglich, sollten zumindest detaillierte Gutachten durch Fachleute beauftragt und empfohlene Schutz- und Sicherungsmaßnahmen durchgeführt werden (BUWAL, 1997). Die Maßnahmenplanung sollte also passive Maßnahmen zur Minimierung des Schadens (der Gefährdung angepaßte Bebauung), als auch aktive Maßnahmen zur Verringerung der Auftrittswahrscheinlichkeit (punktuelle bauliche Maßnahmen, z.B. Entwässerungen) umfassen. Für alle vorhandenen Rutschungen wurde die Hangdisposition, falls sie nicht so berechnet wurde, auf die höchste Stufe (100%) heraufgesetzt. Als Hintergrund wurde die topographische Karte hinterlegt. Für die farbliche Darstellung der Gefährdungsgrade wurde zur besseren Wahrnehmung der Rutschungsgefährdung und zur Signalwirkung auf die "Ampelfarben" rot, gelb (aus Darstellungsgründen wurde orange benutzt) und grün zurückgegriffen, die am besten dem menschlichen Sicherheitsempfinden entsprechen. Auf alternative Farben (z.B. blau), die für Gefahrenkarten einiger schweizer Kantone benutzt werden (BUWAL & BWG, 1995), soll aufgrund der mangelnden Signalwirkung verzichtet werden. Damit wird eine geringe Gefährdung durch grün, eine mittlere Gefährdung durch orange und eine hohe Gefährdung durch die Farbe rot gekennzeichnet. Alle untersuchten Bereiche die keine Gefährdung aufweisen, können zusätzlich durch ein dunkleres weiß von den nicht untersuchten Gebieten (weiß) abgegrenzt werden. Zunächst mußte aber noch eine Definition für die einzelnen Gefährdungsgrade erstellt werden. Die in Kapitel 6 durchgeführte Klassifizierung der potentiellen Gefährdung in 4 Gefahrenstufen reicht als Gefahrenbewertung alleine nicht aus und muß durch eine Begriffsdefinition, die einen Maßnahmenkatalog für die einzelnen Gefährdungsgrade beinhaltet, ergänzt werden. Der Nutzer erhält dadurch nicht nur eine Gefahrenbeurteilung für den ihn interessierenden Bereich, sondern auch eine erste Abschätzung darüber, welche Maßnahmen zur Gefahrenminimierung bei Bauvorhaben unter Umständen notwendig sind und mit welchem Kostenaufwand dadurch zu rechnen ist. Im Folgenden sind die einzelnen Gefahrenklassen mit den jeweiligen Definitionen und Vorschlägen zur Gefahrenminimierung aufgeführt (BUWAL, 1997).

Keine oder vernachlässigbare Gefährdung (< 25%):

- > Es ist mit keinen Bewegungen zu rechnen.
- Gebäudeschäden, sowie Schäden an Infrastrukturen aufgrund von Rutschungen, sind nicht zu erwarten.
- Keine Einschränkungen von Bautätigkeiten oder Flächennutzungen in Bezug auf Massenbewegungen.
- Mit Kosten f
 ür Schutz- oder Sicherungsma
 ßnahmen mu
 ß nicht gerechnet werden.

Geringe Gefährdung (25 – 50%):

- > Meist gebunden an die flach auslaufenden Unterhänge.
- > Es muß mit schwachen Hangbewegungen gerechnet werden.
- Es muß mit geringen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen (kleine Risse, geringe Deformationen) gerechnet werden.
- > Keine Einschränkungen in Bezug auf die Flächennutzung.
- Vor einer Bautätigkeit ist der Bauherr auf die mögliche Gefährdung hinzuweisen.
- Bei der Durchführung von Bautätigkeiten sollte vorher ein ingenieurgeologisches Gutachten eingeholt werden.
- Durch entsprechende Bauma
 ßnahmen kann eine vorhandene Gef
 ährdung zus
 ätzlich verringert werden.
- Es ist keine oder nur eine geringe Schädigung von Sachwerten durch Rutschungen zu erwarten.
- > Personenschäden durch Rutschungen sind nicht zu erwarten.

Mittlere Gefährdung (50 – 75%):

- > Meist an Mittel- und Oberhänge gebunden.
- > Es muß mit Hangbewegungen gerechnet werden.
- Es muß mit Schäden an Gebäuden (Risse, verstellte Fenster und Türen, Setzungen) und Infrastrukturen (deformierte Straßen, Leitungen und Dränagen), welche die Wohnqualität und Funktionalität beeinträchtigen, gerechnet werden.
- Die Flächennutzung kann eingeschränkt werden (eingeschränkter Anbau von Sonderkulturen in der Landwirtschaft, Freizeitanlagen).
- > Eine Schädigung von Sachwerten durch Rutschungen ist zu erwarten.
- > Eine Schädigung von Personen durch Rutschungen ist nicht zu erwarten.
- bei der Durchführung von Bautätigkeiten (Neubau, Umbau) muß vorher ein geologisches Gutachten erstellt werden; vom Gutachter vorgeschlagene Schutz- und Sicherungsmaßnahmen sind auszuführen; der Gutachter sollte die Bauausführung der Schutz- und Sicherungsmaßnahmen überwachen.
- > Die Hanggefährdung sollte durch bauliche Maßnahmen verringert werden:
 - Ungünstige Hanganschnitte und Auflasten durch Bebauung sind zu vermeiden.
 - Abführen von anfallendem Wasser durch Dächer, versiegelte Flächen und Zufahrtsstraßen in die Kanalisation, das Eindringen von Wasser in den Hang sollte verhindert werden, keine Versickerungsanlagen in Hangbereichen.
 - Dränagerohre sollten nicht in Hangbereichen verlegt werden, die sich aktiv bewegen oder in der Vergangenheit bewegt haben, da Schäden an Rohren zu einer ungewollten Bewässerung des Hanges führen können. Wenn Dränagen erforderlich sind, müssen sie unterhalb der Gleitfläche verlegt werden.
 - Wenn notwendig sollte eine Absenkung des Bergwasserspiegels erfolgen.
 - Wenn notwendig sollten Hangvernagelungen zur Erhöhung der Hangstabilität (die Vernagelung sollte bis unter die Gleitfläche reichen) durchgeführt werden.
- Vor einer Bebauung sollten gegebenenfalls Ma
 ßnahmen zur Bodenverbesserung durchgef
 ührt werden.
- Geplante Gebäude sollten möglichst auf einer durchgehenden Bodenplatte (Stahlbeton) gegründet werden.
- Wenn möglich sollte die Gründung (durchgehende Fundamente) von Gebäuden unter der Gleitfläche erfolgen.
- > Wenn möglich sollte grundsätzlich auf eine Bebauung verzichtet werden.

Hohe Gefährdung (> 75%):

- > In der Regel an die Mittel- und Oberhänge gebunden.
- Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, daß es bei länger anhaltenden ungünstigen Witterungsverhältnissen zu Rutschungsereignissen kommt.
- > Es muß mit starken Hangbewegungen gerechnet werden.
- > Es ist mit starken Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen zu rechnen.
- Es muß mit einer Schädigung von Personen und/oder erheblichen Sachschäden gerechnet werden.
- Die Flächennutzung kann eingeschränkt werden (eingeschränkter Anbau von Sonderkulturen in der Landwirtschaft, Verbot von Freizeitanlagen).
- > Eine Bebauung sollte grundsätzlich vermieden werden.
- Eine Bebauung ist mit hohen Anforderungen und großem Kostenaufwand verbunden.
- Wenn eine Bebauung notwendig ist, muß vorher ein ingenieurgeologisches Gutachten eingeholt werden; ansonsten gelten für eine Bebauung die gleichen Voraussetzungen wie bei der mittleren Gefährdung.

Die oben angeführten Gefahreneinstufungen und Maßnahmen zur Gefahrenminimierung sind Vorschläge, die Aufzeigen sollen, daß in dem untersuchten Gebiet mit einer Gefährdung zu rechnen ist und wie dann bei einer Bebauung oder intensiven Flächennutzung damit umgegangen werden kann. Die Ausweisung einer potentiellen Rutschungsgefährdung für ein betrachtetes Gebiet bedeutet aber letztendlich nicht, daß diese Gefahr auch tatsächlich vorhanden ist und die oben erwähnten Maßnahmen zur Gefahrenminimierung notwendig sind. Deshalb sollten gefährdete Bereiche vor einer Bautätigkeit grundsätzlich von Fachleuten untersucht und die Ergebnisse in Form von Gutachten dargestellt werden.



Abb.114: Ausschnitt aus der Gefahrenkarte für Rheinhessen.

7.4 Ermittlung einer Risikokarte

Die Gefahrenhinweiskarte aus Abschnitt 7.3 zeigt die potentielle Gefährdung in Bezug auf Rutschungen, die von den betrachteten Hängen ausgeht, bzw. beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein Hang potentiell rutschungsgefährdet ist. Nun stellt aber nicht jeder rutschungsgefährdete Hang auch tatsächlich eine Gefahr für Personen oder Sachwerte da. Es erscheint deshalb sinnvoll, die ermittelten Gefahrenbereiche in Verbindung mit der Flächennutzung zu betrachten, da eine Rutschung die eine Straße bedroht, eine höhere Priorität besitzt, als eine durch Massenbewegungen betroffene Brache. Umgekehrt ist zu erwarten, daß ein potentieller Schaden durch Rutschungsereignisse an einer kaum befahrenen Kreisstraße geringer ausfällt, als an einer stark befahrenen Hauptverkehrsachse. Dabei kann zwischen Personenschäden (bei Rutschungen aufgrund der Bewegungsgeschwindigkeit eher unwahrscheinlich), Sachschäden (an Gebäuden, Industrie- und Gewerbestandorten, Verkehrsanlagen, Leitungen) und Folgeschäden (z.B. durch Straßensperrungen entstandene Verluste des Einzelhandels durch Ausbleiben von Kunden) unterschieden werden. Um mit geringem Aufwand die größtmöglichste Sicherheit zu erlangen, ist es notwendig eine Risikoanalyse durchzuführen (BUWAL, 1999). Die Risikoanalyse geht der Frage nach "Was kann passieren ?" und kann als Funktion der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Rutschung und dem daraus folgenden potentiellen Schaden betrachtet werden (vgl. Kap.3). Sie quantifiziert also ein vorhandenes Risiko in Hinsicht auf seine Eintretenswahrscheinlichkeit und sein Ausmaß. Anhand der Ergebnisse der Risikoanalyse kann eine Risikobewertung durchgeführt werden (BUWAL, 1999), die die vorhandenen Risiken beurteilt und abschätzt was akzeptabel ist und wo Risiken



Abb.115: Für die Berechnung des Schadensausmaßes verwendete Layer.

durch Maßnahmen minimiert werden sollten. Die sich daran anschließende Risikominimierung und das Auswählen von gezielten Maßnahmen wird als Risikomanagement bezeichnet. Im Vordergrund des Risikomanagements steht also die effizienteste Methode zur Minimierung eines Risikos, d.h. mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand. In der Praxis ist die

Zu erwartender Schaden	Schadensmaß
Kein Schaden	0-0,2
Geringer Schaden	0,2-0,4
Mittlerer Schaden	0,4-0,6
Hoher Schaden	0,6-0,8
Sehr hoher Schaden	0,8-1,0
Tab.44: Ermitteltes Scl	hadensmaß.

Beurteilung eines Risikos allerdings nicht unproblematisch, da es sich dabei um eine unscharfe Größe handelt, d.h. die Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeit, sowie des zu erwartenden Schadens ist nicht einfach und in der Regel nur ungenau zu bestimmen (BU-WAL, 1999). Hinzu kommt, daß im vorliegenden Fall aufgrund der Datenlage eine Risikoanalyse für das Gesamtgebiet nur im Maßstab 1:25.000 durchgeführt werden konnte, d.h. die Ungenauigkeit durch den großen Maßstab noch verstärkt wird. Da aber nur versucht werden sollte eine grundsätzliche Risikotendenz des untersuchten Gebietes aufzuzeigen, bzw. besonders risikobehaftete Gebiete hervorzuheben, schien die Vorgehensweise akzeptabel. Zunächst wurde als Untersuchungseinheit wieder die Rasterzelle gewählt, d.h. es sollte das Objektrisiko für jede einzelne Rasterzelle (als kleinste Einheit) bestimmt werden. Zur Berechnung sollte die in Kapitel 6 ermittelte Rutschungsdisposition als Funktion des zu erwartenden Schadens betrachtet werden, so daß sich dadurch Gleichung (36) ergibt (BUWAL, 1999).

$$R = G x S \tag{Gl.36}$$

R = Risiko

G = potentielle Gefährdung

S = zu erwartender Schaden

Die potentielle Gefährdung wurde der berechneten Gefahrenhinweiskarte entnommen, wobei die Gefährdung auch als zeitliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines potentiellen Rutschungsereignisses betrachtet werden kann. Für die Ermittlung des zu erwartenden Schadensausmaßes wurden zunächst die digitalisierte Flächennutzung, die Verkehrswege und die Ortschaften, bzw. bebauten Flächen herangezogen (Abb.115). Für jede Nutzungsart, bzw. für jede Straße und jeden Ort wurde ein Schadensmaß festgelegt, daß zwischen 0 und 1 liegen kann (Tab.44). Bei den Verkehrswegen (Straßen und Bahnlinien) wurden z.B. Verkehrszählungen der Landesstraßen Ämter berücksichtigt, um die höhere Priorität wichtiger Hauptverkehrsachsen herauszustellen (Abb.116). Bei Orten und bebauten Flächen wurde zusätzlich die jeweilige Bevölkerungsdichte herangezogen, da in ländlichen Gebieten geringere Schäden zu erwarten sind als in Ballungsräumen. Am höchsten wurden Industrie- und Gewerbegebiete (S=1,0) bewertet. Bei der Flächennutzung wurde berücksichtigt, daß z.B. innerhalb von Weinanbauflächen (S=0,35) mit höheren Schäden durch Ertragsausfall oder Wiederherstellungskosten zu rechnen ist als bei Ackerbauflächen (0,15). Die so ermittelten Schadenswerte wurden dann mit der berechneten Rutschungsdisposition multipliziert und das so ermittelte Risiko in einer Karte farbig dargestellt. Das Ergebnis



Abb.116: Streckenbelastungen im Schienenverkehr (LSV, 2003).

zeigt nur geringe Unterschiede in der Darstellung und hebt potentielle Risikoherde kaum hervor. Um eine Verbesserung des Ergebnisses zu erreichen, wurde versucht eine Risikokarte mit Hilfe der Fuzzy Logik zu erstellen, die sich hier anbietet, da es sich bei einem Risiko ebenfalls um eine unscharfe Menge handelt. Als Ausgangswerte wurden wieder die Rutschungsdisposition und der Schadenswert benutzt (Abb.117 und Abb.118). Beide Variablen wurden in linguistische Werte umgewandelt und mit Hilfe eines Regelwerkes berechnet (Abb.119). Danach wurden die unscharfen linguistischen Terme wieder in konkrete Werte zurückverwandelt, in fünf Risikoklassen (kein, geringes, mittleres und hohes Risiko) eingeteilt und farbig in einer Karte dargestellt (Abb.120). Das Ergebnis erscheint diesmal differenzierter und zeigt besser das Risiko in Ortslagen und an Straßen auf (Abb.120). Die Risikoeinstufung



Abb.117: Berechnung der Risikokarte durch Fuzzy Logik mit zwei Eingangsvariablen.



Abb.118: Fuzzy Logik-Systemstruktur zur Ermittlung des Risikos.

"gering" findet sich hauptsächlich im Bereich der Weinanbauflächen bei denen mit geringen Kosten durch zerstörte Pflanzen, Wiederherstellung der Weinberge und Ernteausfall zu rechnen ist. Mittlere- und hohe Risikoeinstufungen sind hauptsächlich an Ortslagen und stärke befahrene Bahn-, bzw. Straßenabschnitte gebunden. Insgesamt hebt die Risikokarte ganz gut gefährdete Bereiche mit einem zu erwartenden Schaden an Gebäuden und Infrastrukturen hervor und ermöglicht damit eine gezielte Sicherungs- und Sanierungsplanung.

WENN		DANN
Gefaehrdung	Schaden	DoS Risiko
niedrig	kein	1.00 kein
niedrig	niedrig	1.00 kein
niedrig	mittel	1.00 gering
niedrig	hoch	0.70 gering
niedrig	sehr_hoch	1.00 mittel
keine	kein	1.00 kein
keine	niedrig	1.00 kein
keine	mittel	1.00 kein
keine	hoch	1.00 kein
keine	sehr_hoch	1.00 kein
mittel	kein	1.00 kein
mittel	niedrig	1.00 gering
mittel	mittel	1.00 mittel
mittel	hoch	0.80 hoch
mittel	sehr_hoch	1.00 hoch
hoch	kein	1.00 kein
hoch	niedrig	1.00 gering
hoch	mittel	1.00 mittel
hoch	hoch	0.90 hoch
hoch	sehr_hoch	1.00 hoch

Abb.119: Regelbasis des Fuzzy Logik-Systems zur Ermittlung des Risikos.



Abb.120: Karte mit dem berechneten Risiko für Rheinhessen.

7.5 Ergebnis der Gefahren- und Risikoanalyse

Um mehr über die Verteilung der potentiellen Gefährdungsbereiche zu erfahren, wurden die aus den vorherigen Kapiteln gewonnenen Ergebnisse der Gefahrenanalyse einer deskriptiven statistischen Auswertung unterzogen. Dabei zeigt sich, daß bezogen auf die Größe des Untersuchungsgebietes von ca. 1026 km², etwa 4,8% der Fläche eine potentiell hohe Gefährdung (> 80%) in Bezug auf Massenbewegungen aufweist (Tab.45). Bezieht man dazu noch die Klasse der "mittleren Gefährdung" (60-80%) mit ein, ergibt sich für das gesamte Untersuchungsgebiet sogar ein Flächenanteil von 12,6%, d.h. fast 130 km² des untersuchten Gebietes sind potentiell rutschgefährdet (Tab.45). Um einen Überblick über die Verteilung der Gefahren-

Gefährdung	Zellen	Fläche [km ²]	relativ [%]	
< 40%	470863	753,38	73,38	
40 - 60%	89732	143,57	13,98	
60 - 80%	50005	80,01	7,79	12.62
80 - 100%	31060	49,70	4,84	12,03
Gesamt	641660	1026,66	100,00	

Tab.45: Flächenanteil der Gefährdungsklassen am untersuchten Gesamtgebiet.

klassen innerhalb der einzelnen Hangneigungsklassen zu bekommen, wurden diese zu einer Kreuztabelle zusammengefaßt und die relativen Flächenanteile (Tab.46), sowie die Failure Rates (Tab.47) für die einzelnen Klassen berechnet. Die Failure Rate hebt in diesem Fall den Einfluß der einzelnen Klassen in Hinsicht auf das Gesamtgebiet deutlicher hervor. Wie erwartet zeigt sich, daß der überwiegende Teil der als ungefährdet klassifizierten Gebiete im Bereich der Hangneigungsklasse <3° liegt (57,62%, Tab.46), die die Talebenen (hauptsächlich Rheinebene) und die Plateauflächen in Rheinhessen umfaßt. Im Gegensatz dazu fallen die Gefährdungsstufen "mittlere Gefährdung" und "hohe Gefährdung" hauptsächlich mit der Hangneigungsklasse 7° - 15° zusammen, die die Mittelhänge prägt. Die Klasse "geringe Gefährdung" findet sich hauptsächlich im Bereich der Unter- und Mittelhänge (3°-7° und 7°-15°) wieder. Insgesamt nimmt die Gefährdung wie erwartet mit der Hangneigung zu, wobei im Bereich der Steilstufen (>15°) die Gefährdung wieder leicht abnimmt, was auf die kompakten, stufenbildenden Kalksteine, die wenig rutschgefährdet sind, zurückzuführen ist. Grundsätzlich entspricht die Verteilung der Gefahrenstufen innerhalb der Hangneigungsklassen dem Ergeb-

Gefährdung	< 3°	3° - 7°	7° - 15°	> 15°	Gesamt
< 40%	57,62	14,32	1,10	0,37	73,41
40 - 60%	3,41	7,69	2,72	0,16	13,97
60 - 80%	0,12	5,02	2,47	0,19	7,79
80 - 100%	0,01	0,79	3,98	0,06	4,83
Gesamt	61,15	27,81	10,26	0,77	100

Tab.46: Relativer Flächenanteil der Gefahrenklassen an den Hangneigungsklassen.

Gefährdung	< 3°	3° - 7°	7° - 15°	> 15°
< 40%	1,28	0,70	0,15	0,66
40 - 60%	0,40	1,98	1,89	1,47
60 - 80%	0,02	2,32	3,09	3,11
80 - 100%	0,00	0,59	8,03	1,48

Tab.47: Failure Rates der Gefahrenklassen in Bezug zu den Hangneigungsklassen.

nis der statistischen Auswertung der digitalisierten Rutschungen aus Kapitel 5. Eine weitere interessante Fragestellung ist die Gefährdung bebauter Orts-, bzw. Stadtbereiche durch Hangund Massenbewegungen. Dazu wurden alle digitalisierten Orts- und Stadtlagen mit der Gefährdung verschnitten. Es zeigt sich, daß insgesamt 12,6% des Gesamtgebietes von insgesamt 1026 km² Fläche bebaut ist (Tab.48). Davon liegen 91% innerhalb ungefährdeter Bereiche, während etwa 3% in Gebieten liegen, die durch die Klassen "mittlere Gefährdung" oder "hohe Gefährdung" gekennzeichnet sind (Tab.48). Betrachtet man die Gefährdungsklassen in Hinsicht auf die Flächennutzung, so bestätigt sich das Ergebnis, daß sich durch Auswertung der digitalisierten Rutschungen ergab. Der Hauptanteil (ca. 86%) der mit "hohe Gefährdung" klassifizierten Bereiche liegt innerhalb von Weinanbaugebieten, gefolgt von landwirtschaftlichen Nutzflächen (Tab.49). Dabei spielt auch eine Rolle, daß mit zunehmender Hangneigung der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche abnimmt, während der Anteil von Weinanbaugebieten zunimmt. Alle anderen Flächennutzungen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die Auswertung der Risikoanalyse zeigt, daß fast 80% der Gesamtfläche kein potentielles Risiko in Hinsicht auf Rutschungen aufweist (Tab.50). Ein "geringes Risiko" findet sich bei immerhin fast 20% der untersuchten Fläche, wobei die Risikoklassen "mittleres Risiko" und "hohes Risiko" mit jeweils weniger als 1% an der Gesamtfläche nur gering sind (Tab.50). Der Hauptanteil der Klasse "geringes Risiko" entfällt auf die Weinanbaugebiete, da hier die Sanierung von Rutschungsschäden mit einigen Kosten verbunden ist, oder zur kompletten Aufgabe eines Weinberges führen kann. Von den bebauten Flächen der Ortslagen weisen 84% kein Risiko auf, während 12% ein geringes Risiko in Bezug auf Massenbewegungen besitzen. Immerhin noch 2,89% sind sogar durch ein mittleres potentielles Risiko betroffen (Tab.50). In

Disposition	Zellen bebaut	Fläche [km²]	Fläche [%]	Fläche [%] Gesamtgebiet
keine Disposition	73934	118,29	91,28	11,52
geringe Disposition	4352	6,96	5,37	0,68
mittlere Disposition	1793	2,87	2,21	0,28
hohe Disposition	914	1,46	1,13	0,14
	80993	129 59	100 00	12 62

Tab.48: Verteilung der Gefährdungsklassen innerhalb bebauter Flächen.

der Regel handelt es sich dabei um Ortslagen, die sich an den Hängen der Plateauränder befinden, wie die Orte Gau-Algesheim, Gau-Bischofsheim, Ober-Olm und Nieder-Olm.

	keine Disposition	geringe Disposition	mittlere Disposition	hohe Disposition
Gewässer	0,15	0,02	0,01	0,00
Auen	0,27	0,00	0,00	0,00
Gartenkulturen	0,35	0,22	0,09	0,04
Wald	2,61	1,26	1,73	0,67
Landwirtschaftl. Nutzfläche	55,12	43,94	27,60	9,68
Sonderkulturen	7,86	4,68	2,25	1,23
Weinanbau	12,62	41,83	62,15	83,26
Wiese, Feuchtwiese, Weide	0,84	0,50	0,27	0,27
Brachflächen	2,36	1,68	1,60	1,56
Bebaute Fläche	16,51	4,78	3,45	2,86
sonstige	1,32	1,08	0,85	0,43
Gesamt	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab.49: Verteilung der Gefährdung innerhalb der Landnutzungstypen.

a)) b)				
Risiko	Fläche [km ²]	Fläche [%]	Risiko	Fläche [km ²]	Fläche [%]
kein Risiko	815,56	79,44	kein Risiko	109,75	84,69
geringes Risiko	204,13	19,88	geringes Risiko	15,88	12,25
mittleres Risiko	6,57	0,64	mittleres Risiko	3,75	2,89
hohes Risiko	0,40	0,04	hohes Risiko	0,21	0,16
Gesamt	1026,66	100,00	Gesamt	129,59	100,00

Tab.50: Verteilung der Risikoklassen im a) Gesamtgebiet und b) innerhalb der bebauten Fläche.

8. Testgebiet Wißberg

Die in Kapitel 6 erstellte Gefahrenhinweiskarte von Rheinhessen deckt mit einem Maßstab von 1:50.000 fast ganz Rheinhessen (ca. 1300 km²) ab. Dementsprechend und aufgrund der Art ihrer Berechnung kann sie nur potentielle Gefahrenstellen aufzeigen, sie dient also zur Gefahrenübersicht, kann aber nicht auf einzelne gefährdete Bereiche näher eingehen. Dazu kann für ausgewählte und als gefährdet klassifizierte Bereiche der Gefahrenhinweiskarte, die aus planerischen Gründen näher zu untersuchen sind, als logische Konsequenz eine Gefahrenkarte im Maßstab 1:5000 erstellt werden. Der Maßstab bietet den Vorteil, daß er zum einen der Deutschen Grundkarte (GK 5000) entspricht, die flächendeckend vorhanden ist, zum anderen, daß sich damit Gebiete im Bereich von 10-20 km² übersichtlich darstellen lassen und einzelne Rutschareale, Sicherungsmaßnahmen, Dränagen, etc. eingetragen werden können. Dementsprechend sollte der Ermittlung der Gefährdungsgrade zunächst die Erstellung einer Bestandskarte vorausgehen, die außer den Rutschungen auch alle sonstigen Informationen (Untersuchungsergebnisse, Sicherungsmaßnahmen, Entwässerungsmaßnahmen) beinhaltet. Aufgrund der ausgiebigen Untersuchungen am Wißberg Ende der 80iger und Anfang der 90iger Jahre, wurde der Wißberg bei Sprendlingen als Testgebiet ausgewählt. Es konnte für diese Arbeit auf Daten zurückgegriffen werden, die von MATTHESIUS (1994) und STEIN-GÖTTER (1984) infolge eines DFG geförderten Forschungsprojektes am Südhang des Wißbergs aus Rammkernsondierungen (RKS) und schweren Rammsondierungen (DPH), sowie Laborversuchen gewonnen wurden. Hinzu kamen Rammkernsondierungen (RKS) und Rammsondierungen vom Westhang des Wißbergs, die im Zuge einer Diplomarbeit (BARTHEL, 1989) durchgeführt wurden.

8.1 Lage und Geographie des Wißbergs

Der Wißberg liegt bei Sprendlingen, ca. 20 km südwestlich von Mainz, im westlichen Bereich des Mainzer Beckens und ist Teil des "Rheinhessischen Hügel- und Tafellandes" (Abb.121). Er ist eingerahmt von den Orten Gau-Bickelheim im Süden, Sprendlingen im Westen, St. Johann im Norden, sowie Gau-Weinheim im Osten, zu denen auch politisch der größte Teil der Fläche des Wißbergs gehört. Einzige Ausnahme ist der Nordhang, der zur Gemeinde Wolfsheim gehört, die an dem sich nördlich anschließenden Plateaurand liegt. Der Wißberg kann als tafelförmiger Zeugenberg betrachtet werden (BRÜNING, 1975), der durch die eiszeitliche Zerstörung der Kalkhochfläche entstanden ist (Abb.122). Da an seinem nordwestlichen Ende noch eine Verbindung zum Westrheinhessischen-Plateau besteht, müßte er jedoch korrekter



Abb.121: Lage des Wißbergs in Rheinhessen (Satellitenbild).

Weise als Auslieger bezeichnet werden (BRÜNING, 1975). Der Wißberg hat eine Höhe von 272 m ü.NN und umfaßt eine Fläche von ca. 10 km². Die Hänge des Wißbergs lassen sich in flache, schwach geneigte ($< 5^{\circ}$) Unterhänge, mäßig geneigte ($5^{-10^{\circ}}$) Mittelhänge und steilere Oberhänge ($>10^{\circ}$), die im Bereich der Schichtstufe Hangneigungen von über 20° erreichen, unterteilen. Dementsprechend äußert sich auch die Landnutzung, so daß sich im Bereich der flachen Unterhänge hauptsächlich Acker- und Weinanbauflächen finden. Mit zuneh-mender Hangneigung erfolgt nur noch Weinanbau, der teilweise bis in die Steilstufe hineinreicht. Der größte Teil der Schichtstufe besteht jedoch aus Brachflächen oder dicht bewachsenen, geschützten Flächen (z.B. Streuobstwiesen). Das Plateau wird zum größten Teil durch einen Golfplatz belegt, nur im südwestlichen Bereich finden sich Weinanbauflächen.



Abb.122: Höhenmodell des Wißbergs. oberes Bild: Reliefbild unteres Bild: Reliefbild mit überlagerten Luftbildern

8.2 Geologie des Wißbergs

Der Wißberg gehört geologisch zum nördlichen Teil des Mainzer Beckens, einem tertiären Senkungsfeld am nordwestlichen Ende des Oberrheingrabens, in dem es seit Beginn der Absenkungen im Eozän, zur Ablagerung mächtiger Sedimentfolgen kam (siehe Kap.1). Die am Wißberg vorhandenen und teilweise auch aufgeschlossenen, fast horizontal liegenden stratigraphischen Einheiten (Abb.123 und 125), die in direkter Verbindung mit den aufgetretenen Hangrutschungen stehen, beginnen mit dem im Verlauf des Unter Oligozän (Rupelium) abgelagerten Schleichsand. Dabei handelt es sich um ein brackisch-marines Flachseesediment der Beckenfazies, das aus einer Wechselfolge (horizontal und vertikal) von Tonmergeln, feinsandigen Mergeln und Feinsanden mit einem hohen Anteil von Glimmer (Muskovit) und quellfähigen Tonmineralen besteht (ROTHAUSEN & SONNE, 1984). Dadurch und aufgrund von wasserführenden Feinsandeinschaltungen treten im Schleichsand des Mainzer Beckens häufig Hangrutschungen auf, was darüber hinaus auch in seinem Namen (von "Schleichen") zum Ausdruck kommt. Der Schleichsand, der weite Teile der Unter- und Mittelhänge des Wißbergs bedeckt, erreicht Mächtigkeiten von 50-70 m. Darüber folgt mit einer Mächtigkeit von

10-15 m der Cyrenenmergel, ein blaugrauer bis grünlichgrauer Tonmergel mit eingeschalteten limnischen Lagen und geringmächtigen Kohleflözen (Rothausen & Sonne, 1984). Der Feinsandanteil nimmt, im Gegensatz zum Schleichsand, deutlich ab. Im Anschluß an den Cyrenenmergel treten am Wißberg 60-65 m mächtige Ober-Oligozäne (Chattium) Süßwasserschichten auf, die aus grauen, schluffigen und feinsandigen Tonmergeln bestehen, die durch ocker-farbene Flecken gekennzeichnet sind. Größere wasserführende Sandlinsen, die durch Kluftwasser der darüberliegenden Kalksteine gespeist werden, sind Hauptursache für das Auftreten von Hangrutschungen innerhalb der Süßwasserschichten. Die markante Steilstufe des Wißbergs wird aus den harten, Unter-Miozänen (Aquitanium) Kalken (Plateaubildner) der Oberen Cerithienschichten gebildet (Abb.124).



Neben den litho- und bioklastenreichen Kalken treten auch graue, grauweiße und grünliche Tonmergel auf (ROTHAUSEN & SONNE, 1984). Am Wißberg erreichen die Oberen-Cerithienschichten eine Mächtigkeit von ca. 15 m. Die darauf folgenden Corbiculaschichten (Aquitanium), die aus brackisch-limnischen Tonmergeln und Kalken bestehen, sind am Wißberg nur geringmächtig ausgebildet (0,6-1 m). Im Bereich des Wißberg-Plateaus finden sich zum Teil geringmächtige Lagen von pliozänem Bohnerzton (0,5 m), der aus dunkelbraunen,



Abb.124: Obere-Cerithienschichten am Top des Wißbergs.

teilweise feinsandigen Tonen mit Bohnerzen besteht, sowie Ober-Miozänen fluviatilen Dinotheriensanden. Der größte Teil des Plateaus und Teile des Westhangs sind von einer bis zu 2,5 m mächtigen und teilweise verlehmten Lößschicht bedeckt.



Abb.125: Geologische Karte des Wißbergs.

8.3 Hydrogeologie des Wißbergs

Die unteren stratigraphischen Einheiten der oligozänen Schichten (Mergeltertiär) am Wißberg können als Grundwassernichtleiter betrachtet werden, mit Ausnahme der Feinsandlagen innerhalb des Schleichsandes und der Süßwasserschichten, die lokale Grundwasservorkommen aufweisen, aber für eine Grundwassergewinnung in der Regel zu gering sind (FÜRST & FRITSCHE, 1990). Die sich über den Süßwasserschichten mit den Oberen Cerithien- und Corbiculaschichten anschließenden Karbonatfolgen des Miozäns (Kalktertiär), bilden aufgrund der starken Klüftung und der teilweisen Verkarstung gute Kluftaquifere, durch die Niederschlagswasser bis auf die oligozänen Tonmergel dringen kann. Dementsprechend ist der hydraulische Kontakt, bzw. die Schichtgrenze zwischen den impermeablen Süßwasserschichten, durch einen Quellhorizont geprägt (Abb.126). Der Quellhorizont findet sich am Wißberg in einer Höhenlage von ca. 220 m ü.NN und weist Quellaustritte und Vernässungszonen auf. Die damit verbundene Bewässerung der Tonmergel ist eine der Ursachen für das Auftreten von



Abb.126: Skizze des Quellhorizontbereiches am Wißberg (nach WELLING, 1984).

Rutschungen am Wißberg. Hinzu kommt, daß Teile des, durch die Klüfte der Kalke versickernden Kluftwassers, in die Feinsandlagen der Süßwasserschichten eindringt und die Scherparameter herabsetzt. An Oberflächengewässer gibt es nur den Wiesbach im Süden, der auch als Vorfluter für das vom Wißberg, durch unterirdische Dränagen oder gefaßte und ungefaßte Gräben abgeführte Wasser dient. Im Westen und Osten übernehmen diese Funktion angelegte Entwässerungsgräben, die nur saisonal Wasser führen. Als Problem erweist sich die Funktionsuntüchtigkeit der Entwässerungsgräben. Viele der mit u-förmigen Betonteilen eingefaßten Dränagegräben im Bereich des Südhanges, die anfallendes Niederschlagswasser vom Plateaurand und aus dem Bereich des Quellhorizonts abführen sollen, sind durch Hangbewegungen verschoben oder zerstört (Abb.127), bzw. durch fehlende Wartung zugeschlämmt



Abb.127: Defekter, bzw. zerstörter Entwässerungsgraben.



Abb.128: Zugewachsener und zugechlämmter Entwässerungsgraben.

(Abb.128) und deswegen nicht mehr funktionstüchtig. Besonders problematisch ist dabei der Eintrag von Wasser in die oligozänen Mergel im Bereich von undichten oder zerstörten Dränagen. Auch die ungefaßten Entwässerungsgräben sind zum Teil nicht mehr funktionstüchtig, da sie zugeschlemmt sind. Am oberen Südhang befindet sich im Bereich eines kleineren Rutschareals eine durch Hangbewegungen zerstörte unterirdische Dränage (PVC-Rohr), die in die Rutschung entwässert (Abb.129), was als Naßstelle im Bereich der davor gelagerten Böschung erkennbar ist. Am Westhang wurden Anfang des 20. Jahrhunderts Dränagen aus Tonröhren verlegt, die das anfallende Wasser aus dem Niveau des Quellhorizontes ableiten sollten. Mit einer Einbautiefe von 0,5 - 1,0 m unter GOK liegen sie aber über den Gleitflächen der vorhandenen Rutschungen und bilden eine Gefahr wenn es bei Hangbewegungen zu einem Bruch und dadurch zu einer Bewässerung der Rutschungen kommt. Darüber hinaus sollten für neu zu verlegende Dränageleitungen PVC-Rohre benutzt werden, da sie flexibler als Tonröhren sind und leichte Hangbewegungen ausgleichen können.



Abb.129: Durch Hangdeformationen beschädigtes Dränagerohr am Südhang des Wißbergs.

8.4 Rutschungen am Wißberg

Am Wißberg konnten insgesamt 15 aktive Rutschungen durch Luftbildanalysen und Feldbegehungen (Ground-Check) ingenieurgeologisch aufgenommen werden (Abb.130), die aufgrund von Abrißkanten, Verstellungen, Wulsten und Dellen im Gelände klar zu erkennen waren. Begünstigt wurde die Aufnahme dadurch, daß die meisten der von Rutschungen betroffenen Flächen nicht mehr für Weinanbau genutzt werden und dementsprechend auch keine Planierung der Flächen stattgefunden hat. Der größte Teil der Rutschareale, bei denen es sich zum Teil um Sekundärrutschungen handelt, befindet sich innerhalb der Süßwasserschichten im Bereich des Quellhorizontes. Diese Rutschungen sind auf die Bewässerung der Tonmergel durch die darüber lagernden Kalksteine in Verbindung mit Entlastungs- und Verwitterungsvorgängen zurückzuführen. Die Gleitflächen liegen bei flachgründigen Rutschungen zwischen 2 m und 5 m, bei tiefgreifenden Bewegungen zwischen 8 m und mehr als 20 m. Im oberen Teil des Südhangs finden sich über einer Breite von 1 km mehrere Abrißkanten, die wahrscheinlich von pleistozänen Massenbewegungen stammen. Im südöstlichen Teil des Hangfußes befindet sich eine fossile Kalksteinscholle. Die fossilen Rutschungen dürften aufgrund des im Pleistozän vorherrschenden Periglazialklimas entstanden sein. Rutschungen aus neuerer Zeit sind seit dem ausgehenden 17. Jahrhundert dokumentiert, wobei es gerade nach der Flurbereinigung von 1955 zu mehreren größeren Rutschungsereignissen kam, die Ver-



Abb.130: Die blauen Flächen kennzeichnen die am Wißberg aufgenommenen aktive Rutschungen..

schiebungsbeträge von bis zu 60 m erreichten. Ebenfalls stark von Rutschungsereignissen betroffen war der Wißberg im Winter 1981/82, in dem eine große Anzahl von Rutschungen verzeichnet werden konnte, die insgesamt ein Ausmaß von fast 70 ha erreichten. Ein Beispiel für die starken Hangbewegungen am Wißberg ist die kleine Kirche am Südhang, die in den 80iger Jahren des 18. Jahrhunderts wegen schwerer Rutschungsschäden abgerissen und erst zwischen 1904 und 1911 wieder aufgebaut wurde.

8.5 Luftbildanalyse

Für die ingenieurgeologische Erkundung des Wißbergs und seiner näheren Umgebung wurde als Grundlage eine Luftbildanalyse durchgeführt. Dazu wurden 10 Luftaufnahmen vom 11.08.1997, die im Maßstab 1:13.000 vorliegen und den gesamten Bereich des Wißbergs, sowie die Randbereiche mit den Ortschaften Gau-Bickelheim, St. Johann und Gau-Weinheim umfassen, stereoskopisch ausgewertet. Der Vorteil der Luftbildauswertung liegt zum einen in der schnellen Aufnahme von Strukturen (Lineare, Buckel, Dellen) die auf Rutschungen, bzw. Rutschhänge hinweisen zum anderen ermöglicht sie einen guten Gesamtüberblick über das zu untersuchende Gebiet. Gerade längere tektonische Strukturen, die im Gelände oft nicht direkt zu erkennen sind, können im Luftbild gut herausgearbeitet werden. Die Luftbildanalyse erfordert eine abschließende Geländebegehung (Ground-Check) zur Überprüfung der aus den Luftbildern gewonnenen Ergebnisse (KRAUTER & HÄFNER, 1980). Die Überhöhung des Stereomodells, das durch zwei leicht versetzt (in der Regel 60% Überlappung in der Aufnahmerichtung) aufgenommene Luftbilder entsteht, ermöglicht auch das Erkennen kleinräumiger Reliefstrukturen und Geländeformen. Für die ingenieurgeologische Interpretation der



Abb.131: Richtungsrose der aus den Luftbildern digitalisierten Lineare.

Luftbilder wurden Lineare, sowie flächenhafte Bildelemente kartiert. Bei den linearen Bildelementen konnten morphologische Lineare (Geländerippen, Bruchkanten), das Gewässernetz (Bäche, Entwässerungsgräben), Vegetationslineare (linienförmige Anordnung von Pflanzengruppen aufgrund unterschiedlicher Bodendurchfeuchtung) und Grautonlineare (unterschiedliche Durchfeuchtung entlang von Trennflächen oder Störungszonen) unterschieden werden. Rutschungen werden oft von Linearen begrenzt oder weisen besonders hohe Lineardichten auf. An flächenhaften Bildelementen wurden nur Vernässungszonen aufgenommen. Die aus den Luftbildern aufgenommenen fotogeologischen Lineare wurden digitalisiert und mit Hilfe der Software GEOrient 9.0 statistisch ausgewertet und in Form einer Richtungsrose dargestellt (Abb.131). Die Linearkarte des Wißbergs zeigt insgesamt eine hohe Lineardichte, die besonders im oberen Bereich des Südhangs sehr stark ist (Abb.132). Dabei läßt sich im Bereich des Plateaurandes eine etwa 1 km lange, west-ost verlaufende Abrißnische erkennen, die wahrscheinlich auf eine pleistozäne Rutschung zurückzuführen ist. Die miozänen Kalksteine sind im Luftbild durch eine auffallende Geländeversteilung im Bereich des Oberhanges und mehreren durch Abrisse entstandenen Aufschlüsse erkennbar. Im Bereich des Quellhorizontes an der Grenze zwischen Oberen Cerithienschichten und Süßwasserschichten konnten mehrere Vernässungszonen auskartiert werden. Die in der Richtungsrose dargestellten Streichrichtungen der 2728 aufgenommenen Lineare ergaben Maxima in N-S, SW-NE und W-E Richtung (Abb.131).



Abb.132: Linearkarte des Wißbergs.

8.6 Erstellung einer Bestandskarte für den Bereich Wißberg

Um einen besseren Überblick über die Situation im Untersuchungsgebiet zu bekommen, wurde eine Inventarkarte erstellt, in die alle im Gelände aufgenommenen Rutschflächen, Abrißkanten, sowie alle sonstigen Informationen die für eine Gefahrenbeurteilung relevant sind, eingetragen wurden (Abb.133). Als Maßstab für die Bestandskarte wurde 1:5000 gewählt, in Anlehnung an die benutzten Grundkarten und weil der Maßstab eine ausreichende Genauigkeit zuläßt. Die Bestandskarte kann auch schon als einfache Gefahrenkarte verstanden werden, wobei jedoch eine Gefahreneinstufung fehlt. Um möglichst viele Informationen über Art und Ausmaß der Hangbewegungen zu erhalten, wurden die aufgenommenen Rutschareale entsprechend codiert. Grundsätzlich kann ein, durch einen Massenbewegungsprozeß betroffenes Gebiet, durch eine umrandete Fläche gekennzeichnet werden. Die Farbe der Fläche gibt dabei die Art des Prozesses an (z.B. Rutschung=orange, Steinschlag=grün). Ist der Bewegungsmechanismus durch die Farbgebung der Rutschfläche gekennzeichnet, kann zusätzlich durch drei Helligkeitsgrade die Bewegungsgeschwindigkeit der Rutschung dargestellt werden (sehr langsam=hellorange, langsam=orange, aktiv=dunkelorange). Durch die Farbgebung der Flächenumrandung kann zwischen bekannter (schwarz) oder unbekannter (rot) Ausdehnung unterschieden werden. Damit lassen sich durch unterschiedliche Farben und Schraffuren sehr übersichtlich viele Informationen in die Bestandskarte integrieren. Zur Rutschungsdarstellung



Abb.133: Ausschnitt aus der Bestandskarte des Wißbergs.

sollten wenn möglich, die Abrisse mit entsprechender Höhe angegeben werden, wobei hier in der linienhaften Darstellung zwischen Abriß nachgewiesen (durchgezogene Linie) und Abriß vermutet (gestrichelte Linie) differenziert werden kann. Zusätzlich wurden im Untersuchungsgebiet durchgeführte Rammkern- und Rammsondierungen, sowie die Art und der Zustand des Entwässerungssystems eingetragen. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Kennzeichnung nicht mehr wirksamer oberirdischer Entwässerungsgräben (gefaßt und ungefaßt), sowie defekter Dränagen, die potentielle Rutschareale bewässern könnten.

8.7 Infinite-Slope-Stability Modell

Für eine Betrachtung der Hangstabilität kleinerer Untersuchungsgebiete (bis ca. 30 km²) wurde eine geeignete Methode gesucht, die im Maßstabsbereich von Gefahrenkarten (1:5000) genauere Ergebnisse liefert, als das für das Gesamtgebiet Rheinhessen mit statistischen Methoden oder Fuzzy Logik möglich war. Aufgrund der kleineren Größe des Untersuchungsgebietes sollten zudem geotechnische Parameter in die Ermittlung der potentiellen Hanggefährdung mit einfließen. Zusätzlich sollte erreicht werden, die Berechnungsmethode in ein GIS einzubinden und darüber die Kartenerstellung durchzuführen. Dazu wurde als Testgebiet der Wißberg bei Gau-Bickelheim ausgewählt. Der Vorteil dieses Testgebietes liegt bei seiner überschaubaren Größe von ca. 25 km², die im Rahmen dieser Arbeit auch genauere Geländebegehungen und Untersuchungen zuließ. Hinzu kommt, daß im Bereich der dort vorhandenen Rutschareale (etwa 15) in den letzten 20 Jahren schon genauere Geländeunter-



Abb.134: Grenzgleichgewicht auf einer ebenen Fläche.

suchungen (Rammkernsondierungen, Rammsondierungen, Laborversuche und Vermessungen) durchgeführt wurden. Bei der Auswahl der Methode zur Ermittlung der potentiellen Hanggefährdung sollten die vorhandenen geotechnischen Parameter, die geologischen, hydrogeologischen, sowie hydrologischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes mit einfließen. Aufgrund der vorherrschenden geologischen Situation und der notwendigen Vereinfachung der Realität im Modell, wurde auf die Modellvorstellung von Rutschungen auf unendlichen, ebenen Gleitflächen zurückgegriffen. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe des Infinite-Slope-Stability Modells für jede einzelne Rasterzelle des Wißberg-DGM, wobei das Verhältnis der Scherbeanspruchung zur Scherfestigkeit auf die Standsicherheit schließen läßt (RITTER et al., 2004). Als Grundlage wurde auf das Bruchkriterium von Mohr-Coulomb zurückgegriffen (Abb.135), daß die Scherspannung als lineare Funktion der Normalspannung N betrachtet (EISBACHER, 1991).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \qquad (Gl.36)$$

τ: Scherspannung

c: Kohäsion

 σ : Normalspannung

kalisiert werden.

φ: Winkel der inneren Reibung (Reibungswinkel)

Der zu berechnende Sicherheitsbeiwert η ergibt sich aus dem Quotienten der rückhaltenden und der treibenden Kräfte und beschreibt das Grenzgleichgewicht eines Hanges bzw. einer Böschung (PRINZ, 1997).

$$\eta = \frac{\text{rückhaltenden Kräfte}}{\text{treibende Kräfte}} \text{ oder } \eta = \frac{R}{H}$$
(Gl.37)

Grenzgleichgewicht: rückhaltende Kräfte = treibende Kräfte

Übersteigen die rückhaltenden Kräfte die treibenden Kräfte, so liegt der Sicherheitsbeiwert über 1, im konträren Fall unter 1. Dadurch können für jeden Hang 3 mögliche Zustände lo-

$\eta > 1$	Hang 1st stabil
$\eta = 1$	Hang ist labil
$\eta < 1$	Hang ist instabil



Bruchkriteriums mit stabilem und instabilem Bereich, sowie der Mohr'schen Kreise b) die Mohr'sche Umhüllende nimmt bei hohem oder niedrigem Umlagerungsdruck die Form einer gekrümmten Parabel an; (EISBACHER, 1991).

Die hangabwärtsgerichtete, treibende Kraft H, die der Hangabtriebskraft entspricht und in der Geotechnik als Scherbeanspruchung oder Schubspannung bezeichnet wird, ist die hangparallele Kraftkomponente der Schwerkraft und wirkt der Scherfestigkeit vektoriell entgegen und wird beschrieben durch Gleichung (38) (Abb.134 und Abb.136).

$$H = \rho gh \sin \beta \tag{Gl.38}$$

Um die eigentliche Schubspannung zu bekommen, muß die Hangabtriebskraft außerdem durch die zugehörige Fläche $1/\cos\beta$ geteilt werden, so daß sich Gleichung (39) ergibt.

$$H = \rho gh \sin\beta \cos\beta \qquad (Gl.39)$$

Die rückhaltende Kraft R entlang des Hanges entspricht der wirksamen, bzw. effektiven Scherfestigkeit des Bodens und setzt sich aus der Normalspannung N als Komponente der Schwerkraft G, dem Porenwasserdruck A (der der Normalspannung entgegenwirkt), der Kohäsion C, und dem Reibungswinkel φ zusammen. Entsprechend der vektoriellen Kräftedarstellung in Abb.134 ergibt sich für die rückhaltende Kraft folgende Gleichung:



Abb.136: Kräftedreieck der Schwerkraft.

$$R = C + (N - A)\tan\varphi \qquad (Gl.40)$$

Durch Einfügen der Gleichungen (39) und (40) in die Ausgangsgleichung (37) kann diese entsprechend erweitert werden zu:

$$\eta = \frac{R}{H} = \frac{C + (N - A)\tan\varphi}{\rho \,gh\sin\beta\cos\beta} \tag{Gl.41}$$

Betrachtet man die an einer potentiellen Gleitfläche abrutschenden geologischen Schichten als einen Gleitblock mit der Höhe h und unendlicher Länge, so kann die Normalspannung auch entsprechend Gleichung (42) beschrieben werden (Abb.136), wobei die "infinite" Länge des Blockes im Infinite-Slope-Model entfällt. Das Gesamtgewicht der, die Gleitfläche überlagernden Sedimente, kann für eine horizontale Fläche demnach mit G = ρ gh beschrieben werden. Dadurch ergibt sich für einen um den Winkel β geneigten Hang die Gleichung (42).

$$N = \rho \, gh \cos \beta \tag{Gl.42}$$

Auch hier muß die Kraft zunächst noch durch die zugehörige Fläche $1/\cos\beta$ geteilt werden, um die daraus resultierende Normalspannung N, die in Gleichung (43) dargestellt ist, zu bekommen.

$$N = \rho \, gh \cos^2 \beta \tag{Gl.43}$$

Der Porenwasserdruck ist zum einen gekennzeichnet durch das Verhältnis w der Mächtigkeit des wassergesättigten Anteils der Schicht zu deren Gesamtmächtigkeit (Abb.134), zum anderen durch die Hangneigung. Dabei entspricht auf horizontaler Fläche der Porenwasserdruck dem hydrostatischen Druck des Porenwassers innerhalb des, die Gleitfläche überlagernden Sedimentstapels (hydrostatischer Druck = ρ_w ghw), wobei sich für eine geneigte Fläche Gleichung (44) ergibt.

$$A = \rho_w gh w \cos^2 \beta \tag{Gl.44}$$

wobei
$$w = \frac{h_w}{h}$$

Der Sicherheitsbeiwert η läßt sich nun entsprechend durch das Einfügen der Gleichungen (43) bis (44) in die Ausgangsgleichung (41) berechnen. Es ergibt sich dadurch für das Verhältnis von rückhaltenden und treibenden Kräften:

$$\eta = \frac{C + (\rho gh \cos^2 \beta - \rho_w ghw \cos^2 \beta) \tan \varphi}{\rho g h \sin \beta \cos \beta} \qquad (Gl.45)$$

Für die raster-basierte Weiterverarbeitung von Gleichung (45) in einem GIS ist es sinnvoll diese noch zu vereinfachen. Gerade die Bestimmung der Tiefe der potentiellen Gleitfläche ist schwierig und sollte daher aus der Formel genommen werden. In einem ersten Schritt kann die scheinbare Mächtigkeit h der überlagernden Sedimente durch deren tatsächliche Mächtigkeit M ersetzt werden. Durch Einfügen von $M = h \cos \beta$ in Gleichung (45) und dem Auflösen der Gleichung kann eine Vereinfachung durchgeführt werden, so daß sich daraus ergibt:

$$\eta = \frac{C + (\rho - \rho_w w) g M \cos \beta \tan \varphi}{\rho g M \sin \beta}$$
(Gl.46)

Durch einfache Division der Kohäsion C mit der Dichte und Mächtigkeit des überlagernden Sedimentpakets (pgM) kann relativ zur Schichtmächtigkeit ein dimensionsloser Kohäsionsfaktor C' ermittelt werden, so daß für C die Gleichung (47) angenommen werden kann.

$$C = C' \rho \, gM \tag{Gl.47}$$

Weiterhin können die Dichten des auflagernden Sediments ρ und des Wassers ρ_w zum Dichteverhältnis r zusammengefaßt werden (Gl.48).

$$r = \frac{\rho_w}{\rho} \tag{Gl.48}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (47) und (48) in die Formel zur Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes η (Gl.46) und entsprechender mathematischer Umformung, ergibt sich die dimensionslose Form des Infinite-Slope-Stability Modells zur Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes η .

$$\eta = \frac{C' + \cos\beta \tan\varphi(1 - wr)}{\sin\beta} \tag{Gl.49}$$

Die Berechnung des Sicherheitsbeiwertes η in einem Raster-GIS mit Gleichung (49) gestaltet sich aber durch den Faktor w (Verhältnis der Mächtigkeit des wassergesättigten Anteils der Schicht zu deren Gesamtmächtigkeit) schwierig, da dazu für das gesamte Gebiet ein dichtes Netz von Grundwassermessungen notwendig wäre. Um diese Problematik zu umgehen, wurde auf den Feuchtigkeitsindex (vgl. Kapitel 5) zurückgegriffen. Unter der Annahme, daß der Grundwasserspiegel parallel zur Geländeoberfläche verläuft und sich ein Gleichgewicht zwischen oberflächennahem Zu- und Abfluß eingestellt hat, kann der Bodenwasserflux q als Produkt der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_f zur Tiefe h_w des Stauwasserspiegels und zur Geländeneigung β betrachtet werden (Gl.50).

$$q = K_f h_w \sin\beta \tag{Gl.50}$$

Unter der Annahme einer homogenen Grundwasserneubildung kann der Flux q auch als Produkt von Versickerungsrate R und spezifischen Einzugsgebiet A_s angesehen werden (Gl.51).

$$q = RA_s \tag{Gl.51}$$

Nach WILSON und GALLANT (2000) kann die Tiefe des Stauwasserspiegels durch Kombination der Gleichungen (50) und (51) ermittelt werden.

$$h_{w} = \frac{RA_{s}}{K_{f}\sin\beta} \tag{Gl.52}$$

Da die Mächtigkeit der wasserführenden Schichten und damit die Transmissivität im Bereich des Wißbergs nur schwer zu ermitteln ist und der Fehler insgesamt relativ gering ist, wurde zur Vereinfachung h_w als konstant mit dem Wert 2 angenommen und im weiteren Verlauf der Berechnungen mit dem Durchlässigkeitsbeiwert (K_f-Wert) der Schichten gearbeitet. Dadurch ergibt sich für den Faktor w die Gleichung (53).

$$w = \frac{RA_s}{K_f \sin\beta} \tag{Gl.53}$$

Der Faktor w kann demnach als relative Feuchtigkeit betrachtet werden, die sich als Tiefenverhältnis des Grundwasserspiegels zur betrachteten Schicht definieren läßt. Dadurch kann w nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei bei dem Maximalwert 1 ein Wasserüberschuß angenommen wird, so daß ein Überlandabfluß möglich wäre. Durch Implementierung der relativen Feuchtigkeit in die Gleichung (49) ergibt sich dementsprechend zur Berechnung der Standsicherheit:

$$\eta = \frac{C' + \cos\beta \tan\varphi (1 - (\frac{R_i A_s}{K_f \sin\beta})r)}{\sin\beta}$$
(Gl.54)

Für die Berechnung der Standsicherheitsbeiwerte mußte zunächst eine Kontigenztabelle (Tab.50) erstellt werden, die die minimal und maximal Werte der in das System einzugebenden Daten enthält. Für die erste Berechnung sollte der worst-case (konservativste

Schicht	Kf-Wert	C' min	C' max	∳ min	∳ max
Abschwemm-Massen	5,0 E-7	0,10	0,75	27,00	30,00
Bohnerzton	1,0 E-7	0,26	1,30	20,00	25,00
Corbiculaschicht	5,0 E-5	0,80	1,20	38,00	52,00
Cyrenenmergel	7,0 E-6	0,05	0,25	7,00	17,00
Dinotheriensande	5,0 E-4	0,00	0,00	30,00	38,00
junge Auffüllungen der Talrinne	5,0 E-7	0,10	0,75	27,00	30,00
Kalktertiär	5,0 E-5	0,80	1,20	38,00	52,00
Löß & Lößlehm	5,0 E-6	0,10	0,20	23,00	27,00
Lokalschotter	5,0 E-4	0,00	0,00	30,00	38,00
Rupelton	7,0 E-6	0,05	0,25	7,00	17,00
Rutsch-Massen	7,0 E-6	0,05	0,25	7,00	17,00
Süßwasserschich	7,0 E-6	0,05	0,25	7,00	17,00
Schleichsand	7,0 E-6	0,05	0,25	7,00	17,00
Terrassensedimente	5,0 E-4	0,00	0,00	30,00	38,00

Tab.50: Kontigenztabelle der in die Berechnung einfließenden Schichten.

Annahme) angenommen werden, d.h. Kohäsion und Reibungswinkel wurden als minimal, die Versickerungsrate (50 mm/Monat) als maximal betrachtet. Als Reibungswinkel wurden für die oligozänen Mergel Restreibungswinkel von 7° angenommen, die durch Rückrechnungen von KRAUTER & STEINGÖTTER (1984) bestimmt wurden (Abb.138). Das Ergebnis zeigt, daß ca. 21% des untersuchten Gebietes unter den angenommenen Versuchsbedingungen als nicht standsicher betrachtet werden kann ($\eta < 1$) (Abb.137). Immerhin 3% der untersuchten Fläche kann als labil angenommen werden ($\eta = 1$), während etwa 9,2% der Fläche Standsicherheitsbeiwerte zwischen 1 und 1,4 aufweisen. Der n-Wert 1,4 entspricht dem in DIN 1054 angegebenen Sicherheitsbeiwert für den Lastfall 1. Dementsprechend können 66,8% des Untersuchungsgebietes als standsicher angesehen werden. In einem zweiten Versuch wurden ideale Bedingungen angenommen, d.h. Kohäsion und Reibungswinkel wurden als maximal für den trockenen Zustand (w=0) berechnet. Das Ergebnis zeigt, daß unter den angenommenen Bedingungen nur 2,0% der Fläche als instabil und 1,7% als labil betrachtet werden können. Immerhin 11,1% des untersuchten Gebietes besitzten Sicherheitsbeiwerte kleiner 1,4. Aus den am Wißberg aufgenommenen Rutschungen und den Geländeuntersuchungen kann geschlossen werden, daß die Bedingungen in diesem Versuch als zu günstig angenommen wurden. Da die Auslösung von Rutschungen am Wißberg meist an länger anhaltende Niederschlagsphasen gebunden ist, kann der unter "trockenen" Bedingungen durchgeführte Versuch

	Reibungswinkel					
F	17°	12°	7 °			
< 1	2,0	8,9	21,0			
=1	1,7	4,0	3,0			
1-1,4	11,1	10,6	9,2			
> 1,4	85,2	76,5	66,8			
Gesamt	100,0	100,0	100,0			

Abb.137: Ergebnis der Standsicherheitsberechnung.



Abb.138: Sicherheitsbeiwert F unter verschiedenen Bedingungen.

- a) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 17°
- b) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 12°
- c) Versickerungsrate 50 mm/Monat, Reibungswinkel 7°
- d) Versickerungsrate 1 mm/Monat, Reibungswinkel 7° e) Versickerungsrate 10 mm/Monat, Reibungswinkel 7°

als unrealistisch betrachtet werden. In einem dritten Versuch wurden die Rahmenbedingungen (Kohäsion und Infiltrationsrate) von Versuch 1 übernommen, außer dem Reibungswinkel, der in diesem Beispiel auf 12° gesetzt wurde. Das Ergebnis zeigt, daß ca. 8,9% der untersuchten Fläche instabil ($\eta < 1$) und 4% labil ($\eta = 1$) sind. Etwa 76,5% der Fläche können als stabil betrachtet werden. Im Vergleich mit den digitalisierten Rutschungen zeigt das Ergebnis zwar schon eine gute Übereinstimmung, allerdings scheint der Reibungswinkel für die oligozänen Mergel immer noch als zu hoch angenommen.

In zwei weiteren Versuchen wurde der Restreibungswinkel wieder auf den von KRAUTER & STEINGÖTTER zurückgerechneten Wert (7°) gesetzt und nur jeweils die Infiltrationsrate geändert um den Einfluß auf die Standsicherheit zu untersuchen (Abb.138). Zunächst wurde von einer Infiltrationsrate von 10 mm/Monat ausgegangen. Dabei zeigt sich, daß 15,2% der Fläche Sicherheitsbeiwerte unter 1 und 3,4% von genau 1 aufweisen. Reduziert man die Infiltrationsrate von 10 auf 1 mm/Monat, so besitzen immerhin noch 12,9% der untersuchten Fläche Sicherheitsbeiwerte unter 1, bzw. 3,3% mit genau 1. Das Beispiel und die Felduntersuchungen zeigen die starke Abhängigkeit der Hangstabilität, bzw. der Rutschungen von den saisonalen Niederschlägen.

Bei der Betrachtung des Bodenwasserflusses wurde davon ausgegangen, daß sich ein Gleichgewicht zwischen oberflächennahem Ab- und Zufluß eingestellt hat (steady-state). Das ist aber gerade bei Gebieten mit flachem Relief wie in Rheinhessen aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit relativ selten, so daß ein Geländepunkt nur durch einen kleinen Teil seines Einzugsgebietes drainiert wird und damit dort ein Ungleichgewicht zwischen Zu- und Abfluß herrscht. Um das zu berücksichtigen, kann auf den quasi-dynamic wetness index zurückgegriffen werden (BARLING et al., 1994), der durch eine Abflußzeit-Begrenzung gekennzeichnet ist. Basierend auf dem Gesetz von Darcy kann der eindimensionale Fluß beschrieben werden als:

$$\frac{Q}{F} = -K \cdot \frac{dH}{dx} \tag{Gl.55}$$

Das minus Zeichen vor der hydraulischen Leitfähigkeit signalisiert, daß der Abfluß in Richtung des abnehmenden Potentials erfolgt. Unter der Annahme, daß der Stauwasserspiegel par-

Q = Wassermenge [m³/s] welche die Fläche F durchfließt

K = hydraulische Leitfähigkeit [m/s]

H = hydraulische Druckhöhe

x = Fließlänge über die sich die Druckhöhe ändert

allel zur undurchlässigen bzw. geringdurchlässigen Schicht verläuft und eine Geländeneigung vorhanden ist, kann Gleichung (55) auch geschrieben werden als:

$$q = K_f \tan \beta \qquad (Gl.56)$$

Nach BARLING at al. (1994) kann daraus die Porenwassergeschwindigkeit v abgeleitet werden (Abb.139).

$$v = \frac{q}{p'} = \frac{K_f}{p'} \tan \beta \qquad (Gl.57)$$

q = Abflußrate [m/s] p' = effektive Porosität

Die Zeit, die notwendig ist, um mit der Porenwassergeschwindigkeit v und dem spezifischen Einzugsgebiet A_s einen Gleichgewichtszustand zwischen Zu- und Abfluß zu erreichen, kann geschätzt werden mit Hilfe der Gleichung:

$$t_i = \frac{A_s}{v} \tag{Gl.58}$$



Abb.139: Berechnete Porenwassergeschwindigkeit v.



Die Gleichung zeigt, daß die Größe des potentiellen Einzugsgebietes einer Rasterzelle von der Abflußzeit abhängig ist und solange ansteigt, bis die Maximalzeit t erreicht ist, bei der der Gleichgewichtszustand eintritt. Nur bei der Zeit t_i entspricht das spezifische Einzugsgebiet



Abb.141: Größenänderung des Einzugsgebietes mit zunehmenden Niederschlagstagen. Linkes Bild: nach 15 Tagen Rechtes Bild: nach 30 Tagen

auch dem potentiellen Einzugsgebiet der Rasterzelle (Abb.140). Für jede andere Zeit t<t_i nimmt das potentielle Einzugsgebiet der Rasterzelle die Größe a(t) an, wobei a(t)<a_i ist (ASSERUP & EKLÖF, 2000). Dementsprechend kann durch Umformen von Gleichung (58) für jede Rasterzelle das potentielle Einzugsgebiet zur Zeit t berechnet werden (Abb.141). Ein anderer interessanter Punkt ist die Abschätzung der Infiltrationsmenge R_i, die bei Niederschlagsereignissen notwendig ist, um eine Sättigung des Bodens am Geländepunkt i zu erreichen. Das kann durch Umformung von Gleichung (53) erreicht werden, indem w gleich null gesetzt und die Gleichung nach R_i aufgelöst wird:

$$R_i = \frac{K_f \sin \beta}{A_s} \tag{Gl.59}$$

In Abb.142 ist die Verteilung des potentiell notwendigen Wassereintrags in den Boden zum Erreichen von Sättigung dargestellt. Die blauen Bereiche kennzeichnen Rasterzellen, die nur eine geringe Infiltration und damit auch geringere Niederschlagsmengen benötigen und die in der Regel im Bereich von Hangdellen, bzw. konkaven Hangbereichen liegen. Die flach- und



Abb.142: Berechnete Versickerungsrate R [mm/Monat] für jede Rasterzelle, die notwendig ist um Sättigung zu erreichen (die hellen Flächen kennzeichnen die digitalisierten Rutschungen).

mittelgründigen Rutschungen liegen fast alle im Bereich von Rasterzellen die nur wenig Wassereintrag zur Sättigung benötigen. Im Gegensatz dazu liegen die Bereiche, die einen großen Wassereintrag in den Boden brauchen im Bereich von Hangrücken oder konvexen Hangformen, bzw. im Bereich der Steilstufe mit den Oberen-Cerithienschichten. Weiterhin wäre es interessant zu wissen, ab welchen potentiellen Infiltrationsraten der Standsicherheitsbeiwert die Grenzsituation von 1 erreicht, der Hang sich also im Übergang vom labilen zum instabilen Zustand befindet. Dazu kann in der Gleichung (54) der Standsicherheitsbeiwert auf 1 gesetzt und die Gleichung nach R_i aufgelöst werden.

$$R_{i} = \frac{K_{f} \sin \beta}{A_{s} r} \left(1 - \left(\frac{\sin \beta - C'}{\cos \beta \tan \Phi} \right) \right) \qquad (Gl.60)$$

Dadurch erhält man die potentiell kritischen Grenzinfiltrationsraten, bzw. die Grenzniederschlagssummen, ab denen eine potentielle Gefährdung in Bezug auf Hangrutschungen auftreten kann (Abb.143). Da nicht alle Rasterzellen die eine Wassersättigung erreichen auch tatsächlich Sicherheitsbeiwerte kleiner 1 aufweisen (z.B. die Talebenen), wurde das Ergebnis zusätzlich mit dem Grid der berechneten Standsicherheit verschnitten und alle Rasterzellen mit



Abb.143: Versickerungsrate R [mm/Monat] für jede Rasterzelle, die notwendig ist um einen Sichersbeiwert von 1 zu erreichen (die hellen Flächen kennzeichnen die digitalisierten Rutschungen).

Sicherheitsbeiwerten über 1 ausgeschaltet. Das Ergebnis zeigt, daß längere Niederschlagsphasen mit hohen Niederschlagssummen zu einer kritischen Hangsituation in Bezug auf die Stabilität führen können und daß bei länger anhaltenden Niederschlagsphasen von mehreren Monaten, mit vermehrtem Auftreten von Rutschungen zu rechnen ist. Insgesamt ist also nicht die Niederschlagsmenge pro Niederschlagsereignis wichtig, sondern die Länge des Zeitraums, in dem Niederschläge, bzw. mehrere Niederschlagsereignisse aufeinander folgen. Das heißt, nur durch länger anhaltende Infiltration kann das potentielle Einzugsgehiet einer Rasterzelle

nur durch länger anhaltende Infiltration kann das potentielle Einzugsgebiet einer Rasterzelle sich dem entsprechenden spezifischen Einzugsgebiet annähern, so daß sich ein Gleichgewicht zwischen Ab- und Zufluß bilden kann. Je länger also die Niederschlagsphasen sind, um so wahrscheinlicher wird sich ein Gleichgewicht einstellen, bzw. um so mehr Rasterzellen erreichen einen Zustand der Wassersättigung, wobei damit auch die Hangrutschungsgefährdung steigt. Grundsätzlich sollte angemerkt werden, daß es sich dabei nur um eine Schätzung des notwendigen Wassereintrages handelt, da viele wichtige, die Bewegung des Bodenwassers betreffende Parameter, wie z.B. die Feldkapazität (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1984) nicht berücksichtigt werden.

8.8 Standsicherheitsbetrachtung nach JANBU

Um die in Kapitel 8.6 gewonnenen Ergebnisse der Rutschungsmodelle zu überprüfen, wurde zusätzlich eine Standsicherheitsbetrachtung nach JANBU (1954) als Plausibilitätsprüfung durchgeführt. Die zweidimensionale Berechnungsmethode nach JANBU (1954) basiert wie viele andere Methoden ebenfalls auf der Annahme von Bruchflächen im Grenzgleichgewicht, wobei ältere Methoden (Fellenius, Taylor) die Summe der rückhaltenden Kräfte in Bezug zu der Summe der treibenden Kräfte setzen (vgl. Kap.8.6), während neuere Verfahren (Bishop, Janbu) den Sicherheitsbeiwert als Verhältnis von Scherfestigkeit zur wirksamen Schubspannung definieren. Die Standsicherheitsberechnung erfolgt mit der Lamellenmethode für polygonale Gleitflächen nach JANBU (1954; Abb.144), bei dem ein vorgegebener Gleitkörper in mehrere, möglichst gleichbreite Lamellen unterteilt und für jede einzelne Lamelle die haltenden und treibenden Kräfte berechnet werden (PRINZ, 1997). Das heißt, daß der Sicherheitsbeiwert nicht nur für den Gesamtkörper berechnet wird, sondern für jede einzelne Lamelle des zu untersuchenden Gleitkörpers, woraus dann der Sicherheitsbeiwert für das Gesamtsystem ermittelt wird. Dabei gilt es zu berücksichtigen, daß durch die Betrachtung der einzelnen Gleitgewichte der Lamellen sich insgesamt höhere Gleitsicherheiten ergeben als bei anderen Methoden, die nur von einem Gesamtgleitgewicht ausgehen (Fellinius). Die Berech-
nung des Gleitkörpers, bzw. der über den Gleitkörper definierten Lamellen erfolgt bei JANBU nach der vereinfachten Gleichung (61):

$$\eta = \frac{\sum T_i + \sum H_s}{\sum G_i \tan \theta_i + \sum H}$$
(Gl.61)

wobei für T_i gilt:

$$T_{i} = \frac{(G_{i} - (u_{i} + \Delta u_{i})b_{i})\tan\phi + c_{i}b_{i}}{\cos^{2}\theta_{i}(1 + \frac{1}{\eta}\tan\phi_{i}\tan\theta_{i})}$$
(Gl.62)

G_i : Eigenlast der einzelnen Lamelle.

T_i: Für die einzelnen Lamelle vorhandene widerstehende tangentiale Kraft des Bodens in der Gleitfläche.

θi : Tangentialwinkel der betreffenden Lamelle zur Waagerechten.

b_i: Breite der Lamelle.

φ_i: Für die Lamelle maßgebender Reibungswinkel nach Abschnitt 8 (DIN 4084).

ci: Für die Lamelle maßgebende Kohäsion nach Abschnitt 8 (DIN 4084).

ui : Für die Lamelle maßgebende Porenwasserdruck.

Grundsätzlich sollte auch die Standsicherheitsbetrachtung nach dem Lamellenverfahren nur als Näherungsmethode betrachtet werden, da der Hangaufbau, die auslösenden Faktoren einer Rutschung, sowie die mechanischen Wechselwirkungen der beteiligten Kräfte mathematisch nur schwer zu erfassen sind.

Für den Standsicherheitsnachweis von Hängen und Böschungen gilt in Deutschland die DIN 4084 und 4084-100 Baugrund; Böschungs- und Geländebruchberechnung, bzw. DIN 1054-100 Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Da nach der aktuellen DIN 4084 nur noch der Reziprokwert $1/\eta$, der auch als Ausnutzungsgrad bezeichnet wird, Verwendung findet, wurde zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse auf die alte DIN 4084 zurückgegriffen.

Für die Berechnung der Standsicherheit wurde das Programm Boesch der Firma GGU benutzt, bei dem durch Eingabe der Wichte γ , dem effektiven Reibungswinkel ϕ' und der effektiven Kohäsion, für jede Lamelle eines vorgegebenen Gleitkörpers, der entsprechende Sicherheitsbeiwert η für das Gesamtsystem berechnet wird. Die Wichte, sowie die Kohäsion wurden immer als konstant betrachtet, während der Reibungswinkel in den verschiedenen



Abb.144: Untersuchung der Standsicherheit eines natürlichen Hanges mit gestreckter Gleitfläche nach JANBU (nach DIN 4084, Beibl.2; aus PRINZ, 1997).

Versuchen variiert wurde. Die Berechnung wurde für drei verschiedene Fälle durchgeführt. Der erste Fall sollte mit dem durch Scherversuche für die oligozänen Peliten ermittelten Reibungswinkel von 17° durchgeführt werden. In einem zweiten Versuch wurde der Reibungswinkel auf 12° herabgesetzt, was der unteren Grenze der in den Scherversuchen ermittelten Reibungswinkeln entspricht. Im dritten Fall wurde der von KRAUTER & STEIN-GÖTTER (1983) durch Rückrechnung an vergleichbaren Rutschungen ermittelte Restreibungswert von 7° zur Ermittlung der Standsicherheit eingesetzt. Die Berechnung erfolgte für ein ca. 900 m langes Profil am Südhang des Wißbergs, das durch alle dort vorhandenen oligozänen Schichten geht und das repräsentativ für die Plateauränder in Rheinhessen betrachtet werden kann (Abb.145 und 146). Zusätzlich wurden 10 Rammkernsondierungen und Rammsondierungen genutzt (Anhang A1), die entlang dieses Profils durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung (Anhang A2). Bei der Annahme eines Reibungswinkels von 17° konnte ein Sicherheitsbeiwert von 1,32 berechnet werden, d.h. der Wert liegt im stabilen Bereich. Die in Kap.8.6 ermittelten η -Werte für den gleichen Hangbereich liegen zwischen 1,0 und 1,2, zeigen also eine ähnliche Tendenz. Für einen auf 12° herabgesetzten Reibungswinkel konnte ein F-Wert von 0,91 ermittelt werden, d.h. der Sicherheitsbeiwert sinkt unter 1 ab. Auch hier erhält man eine relativ gute Übereinstimmung mit der in Kap.8.6 angewandten Methode zur Bestimmung der Hangstabilität, bei der sich in diesem Hangabschnitt Ergebnisse zwischen 0,83 und 0,92 ergaben. Im dritten Fall mit einem angenommenen Restreibungswinkel von 7° wurde mit Hilfe der Lamellenmethode ein Sicherheitsbeiwert von 0,53 berechnet, wobei nach der Berechnungsmethode in Kap.8.6 nur im oberen Bereich der Süßwasserschichten am Quellhorizont ähnliche Ergebnisse erzielt werden konnten. Im unteren Bereich des Hangprofils liegen die F-Werte im Bereich von 0,85 - 0,95, also etwa über dem nach JANBU berechneten Wert.



Abb.145: Profil für die Standsicherheitsberechnung mit den aufgenommenen RKS und DPH (rote Punkte). Blickrichtung nach Norden.



Abb.146: Für die Standsicherheitsberechnung benutztes Profil des Südhangs.

Zusätzlich ermöglicht die Standsicherheitsbetrachtung nach JANBU (1954) eine Abschätzung der Grenzwerte der Scherfestigkeitsparameter bei denen Rutschungen ausgelöst werden. Dazu wurden in zwei Meßreihen alle Standsicherheiten für Reibungswinkel zwischen 5° und 20°, mit einer angenommenen Kohäsion von c = 0 KN/m² (Meßreihe 1) und c = 5 KN/m² (Meßreihe 2) ermittelt und in einem Diagramm dargestellt (Abb.147). Bei der Standsicherheitsberechnung konnten unter Annahme eines lokal vorhandenen Hangwasserspiegels Sicherheitsbeiwerte von \leq 1 erreicht werden, wenn bei einer Kohäsion von c = 0 KN/m² der Reibungswinkel auf ca. 13° herabgesetzt wurde. Die durch Rückrechnung ermittelten Restreibungswinkel liegen bei $\varphi_r = 6^\circ$ - 8° (KRAUTER & STEINGÖTTER, 1980) und zeigen, daß die anhand der Standsicherheitsberechnung nach JANBU ermittelten kritischen Reibungswinkel recht gute Ergebnisse liefern.



Abb.147: Nach JANBU ermittelte Standsicherheitsbeiwerte für verschiedene Reibungswinkel und Kohäsionen..

9. Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung und Entwicklung verschiedener Methoden zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte, in Hinsicht auf Hang- und Böschungsbewegungen, für den Raum Rheinhessen (linksrheinisches Mainzer Becken). Der Schwerpunkt lag dabei auf der Auswahl von Methoden, mit denen im regionalen Maßstab auch solche Hänge klassifiziert werden können, die noch nicht durch Massenbewegungen auffällig geworden sind. Potentiell rutschgefährdete Bereiche können dann in einer Gefahrenkarte farblich herausgestellt werden.

In einer ersten Phase wurden dazu alle vorhandenen Unterlagen der in Rheinhessen aufgetretenen Rutschungen gesichtet und in einer neu erstellten Rutschungsdatenbank gesammelt. Als Datenblattschablone wurde zur vereinfachten Datenerhebung, wie auch zur vereinfachten Dateneinsicht das von KRAUTER & STEINGÖTER (1983) entwickelte Formblatt zur Aufnahme von Rutschungen verwendet. Die Rutschungsdatenbank wurde so ausgelegt, daß sie als Basis eines Fachinformationssystems dient und zur räumlichen Darstellung und Analyse der Daten in ein Geoinformationssystem eingebunden werden kann. Des Weiteren kann sie als Grundlage zur Registrierung in Zukunft auftretender Rutschungen genutzt werden, wobei eine Datenerhebung auch auf andere Regionen möglich ist. Insgesamt 199 Rutschungen konnten so in die Datenbank integriert und ingenieurgeologisch, sowie statistisch ausgewertet werden. Von 112 Rutschungen waren zusätzlich Lagepläne im Maßstab 1:1000 vorhanden, die digitalisiert und als ArcView Shape-Dateien mit der Rutschungsdatenbank verknüpft wurden. Daraus konnten grundlegende Erkenntnisse über Bewegungsart, Prozeßablauf und auslösende Faktoren von Rutschungen im linksrheinischen Mainzer Becken (Rheinhessen) gewonnen werden. Im Vordergrund stand dabei die Idee aus den aufgenommenen Rutschungen des Winters 1981/82 eine Kombination von rutschungsrelevanten Parametern (Lithologie, Hangneigung, Hangexposition, etc.) zu extrahieren und mit den Parametern solcher Hänge zu vergleichen, die noch keine Massenbewegungen aufweisen, um damit auf eine potentielle Rutschungsgefährdung zu schließen.

Deshalb wurden in einem zweiten Schritt alle modellrelevanten Faktoren gesucht, die die Entstehung von Rutschungen oder den Rutschungsprozeß beeinflussen. Dies sind die Geologie (Lithologie), das Relief und die Landnutzung. Die Geologie wurde durch digitalisieren und vereinheitlichen der vorhandenen geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 eingebunden. Bei Verschneidung der Geologie mit den digitalisierten Rutschungen zeigte sich, daß die Rutschungen wie erwartet in der Regel innerhalb von Schichten liegen, die durch ingenieurgeologische Feld- und Laborauswertungen als stark rutschungsanfällig betrachtet werden können. Für die Ermittlung rutschungsrelevanter Reliefparameter wurde eine digitale Reliefanalyse durchgeführt. Dazu wurde versucht möglichst viele Reliefparameter zu berechnen, um daraus weitere Informationen über das räumliche Auftreten von Rutschungen zu bekommen. Durch qualitative und quantitative Analysen wurden davon die wichtigsten herausgestellt und in das Dispositionsmodell integriert. Als wichtigster Reliefparameter mit dem größten Einfluß auf die Hangstabilität erwies sich dabei die Hangneigung.

Für die eigentliche Ermittlung der Hanggefährdung wurden drei verschiedene Berechnungsverfahren, zwei statistische (Diskriminanzanalyse und Logistische Regression) und ein Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (Fuzzy Logik) ausgewählt, mit denen jeweils eine Gefahrenhinweiskarte erstellt wurde. Um einen besseren Eindruck der Ergebnisse zu bekommen wurden alle Gefahrenhinweiskarten mit den digitalisierten Rutschgebieten verschnitten und der jeweilige Anteil der Rutschungen an den einzelnen Gefahrenklassen berechnet. Das Ergebnis zeigt, daß alle drei Berechnungsverfahren brauchbare Gefahrenhinweiskarten liefern. Der Gesamtanteil der Rutschungen an der höchsten Gefahrenklasse lag bei allen Karten zwischen 60 und 77%, wobei das beste Ergebnis mit der Logistischen Regression erzielt werden (77,67%) konnte, während die Diskriminanzanalyse (61,09%) die schlechteste Anpassung lieferte. Die durch Fuzzy-Logik berechnete Gefahrenhinweiskarte hat zwar im Bereich der höchsten Gefahrenklasse eine etwas geringere Übereinstimmung als die der Logistischen Regression, zeigt aber insgesamt das bessere Ergebnis. Dabei ist von Vorteil, daß bei der Fuzzy-Logik nur das Wissen über den Rutschungsprozeß und die Rutschungsverteilung berücksichtigt wird, nicht aber die Rutschungen selber. Darin und in der Möglichkeit das System durch kontinuierliches "Lernen" zu verbessern und an die Realität anzupassen, liegen die Vorteile gegenüber den statistischen Methoden. Hier ist für die Zukunft weiterer Forschungsbedarf gegeben, gerade im Hinblick auf die Einbindung von klimatischen und hydrologischen Parametern in Fuzzy Logik-Systeme.

Zum besseren Verständnis der Gefahrenhinweiskarte schien es zudem notwendig für die einzelnen Gefahrenklassen möglichst genaue Schadensdefinitionen zu erstellen und diese mit einem Maßnahmenkatalog zu verbinden der dem Anwender nicht nur einen Überblick über zu erwartende Schäden gibt, sondern auch mögliche Wege zur Gefahrenminimierung aufweist. Um neben der bekannten Hangrutschungsgefährdung noch das vorhandene Risiko in Hinsicht auf Massenbewegungen zu beschreiben, wurde auf Basis der Gefahrenhinweiskarte eine Risikoanalyse für Rheinhessen durchgeführt, in die neben der Rutschungsgefährdung noch die Landnutzung und die vorhandenen Infrastrukturen eingebunden wurden. Als Ergebnis konnte eine Risikokarte für Rheinhessen erstellt werden, die anhand von vier Risikoklassen Bereiche ausweist, in denen eine Rutschungsgefährdung von Orten oder Verkehrswegen mit zu erwartenden Personen- und Sachschäden gegeben ist. Die Gefahren- und Risikoanalyse zeigt, daß ein Bedarf an Gefahren- und Risikokarten für Rheinhessen gegeben ist. Immerhin 12% der Fläche Rheinhessens (etwa 130 km²) hat eine Rutschungsdisposition die über 60% liegt und ca. 15% der Fläche besitzt ein geringes bis mittleres Risiko in Bezug auf Massenbewegungen. Unter der Berücksichtigung, daß in die Berechnung der Rutschungsdisposition und des Risikos auch die flachen bis horizontalen Flächen der Rheinebene und der Plateaus mit einfließen, die einen großen Teil des Untersuchungsgebietes ausmachen, müssen die Zahlen wesentlich kritischer betrachtet werden.

Ein gänzlich anderer Weg zur Erstellung von Gefahrenkarten wurde für das Testgebiet Wißberg gewählt. Aufgrund der geringen Fläche des Testgebietes von nur 25 km² wurde versucht eine Gefahrenkarte im Maßstab 1:5000 zu erstellen, die auf einem Gefahrenmodell basiert, in das sowohl geotechnische, als auch klimatische Faktoren integriert wurden. Als Grundlage diente dazu das Infinite-Slope-Stabiliy Modell, das von Gleiten auf einer hangparallelen, ebenen Gleitfläche ausgeht. Anhand dieses Modells konnte für jede Rasterzelle der Sicherheitsbeiwert η berechnet werden. Darüber hinaus wurde versucht hydrologische und hydrogeologische Faktoren in das Modell zu integrieren, um zum einen über die ermittelten Fließgeschwindigkeiten Informationen zur Verteilung der relativen Wassersättigung zu bekommen, zum anderen um damit den Wassereintrag in den Boden abzuschätzen, der notwendig ist, damit die Standsicherheit < 1 wird. Damit lassen sich für verschiedene klimatische Situationen (trockene Sommer, feuchtes Frühjahr) die Standsicherheit, bzw. die Änderung der Standsicherheit ermitteln. Schon die einfache Betrachtung, ohne die Berücksichtigung klimatischer Begebenheiten zeigt Ergebnisse, die gut mit den im Gelände gemachten Beobachtungen und den digitalisierten Rutschungen übereinstimmen. Besonders nach langanhaltenden Feuchteperioden gehen auch die flachen Unterhänge vom stabilen in den instabilen Zustand über und erlangen ein Gefährdungspotential. Die hydrologischen und hydrogeologischen Betrachtungen zeigen, daß langanhaltende Feuchteperioden schon nach zwei bis drei Monaten kritische Bodenfeuchtewerte erreichen können, besonders wenn die Jahre zuvor schon überdurchschnittlich naß waren. Dies bestätigen die Untersuchungen zu den Rutschungsereignissen der Jahre 1880/81, 1939-41 und 1981/82, denen ebenfalls sehr feuchte Jahre vorausgegangen sind.

Das Beispiel Rheinhessen zeigt, daß in Zukunft die Notwendigkeit von Gefahren- und Gefahrenhinweiskarten im Hinblick auf Massenbewegungen, aber auch für andere Naturgefahren, für eine sinnvolle Raumplanung und eine Gefahrenminimierung, gerade in Ballungsräumen, gegeben ist. Dabei sollte Berücksichtigt werden, daß die Gefahrenkarte keinen Ersatz für geotechnische und ingenieurgeologische Untersuchungen einzelner Hangbereiche darstellt, sondern als regionale Planungs- und Entscheidungshilfe für einen richtungsweisenden Umgang mit Naturgefahren dient. Dies macht eine interdisziplinäre Betrachtungsweise nötig, in die die unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen eingebunden werden müssen. Gerade bei der Bewertung der Risiken, die durch Naturgefahren entstehen, ist über die naturwissenschaftliche Betrachtung hinaus, die Einbindung von Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern wichtig, um die individuelle Risikowahrnehmung und -akzeptanz des Einzelnen, bzw. der Bevölkerung zu untersuchen und daraus Konsequenzen für ein soziologisch, wie ökonomisch verträgliches Risikomanagement zu ziehen. Weiterer Forschungsbedarf besteht besonders in Bezug auf eine Verbesserung der Methoden zur Identifizierung räumlicher Naturgefahren und potentiell gefährdeter Gebiete. Zudem wäre eine Vereinheitlichung der Methotik zur Erstellung von Gefahrenmodellen, zumindest aber der Gefahrenklassifikation, auf nationaler und internationaler Ebene sinnvoll, um zum einen die Aussagekraft von Gefahrenkarten für den Nutzer zu erhöhen, zum anderen um mögliche Rechtsgrundlagen zu schaffen.

Literaturverzeichnis

- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999): Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives.- Bull. Eng. Geol. Env., 58, S.21-44, Springer Verlag.
- Aniya, M. (1985): Landslide-susceptibility mapping in the Amahata River basin, Japan.-Annals of the Association of American Geographers 75, S. 102-114.
- Asserup, P. & Eklöf, M. (2000): Estimation of the Soil Moisture Distribution in the Tamne River Basin, Upper East Region, Ghana.- Seminarrieppsatser Nr.67, Lunds Universitets Naturgeografiska Institution, Lund (Sweden).
- Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie Band2: Multivariate Statistik.- Teubner Studienbücher Geographie (Stuttgart).
- Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie Band 1: Univariate und bivariate Statistik.- Teubner Studienbücher Geographie (Stuttgart).
- Barling, R:D: & Moore, I.D. & Grayson, R.B. (1994): A quasi-dynamic wetness index for charackterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content.- Water Resources Research 30 (4). S.1029-1044.
- Bartelme, N. (1994): Geoinformatik Modelle, Strukturen, Funtionen.- Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Barthel, F. (1989): Ingenieurgeologische Untersuchungen von Massenbewegungen im Rahmen einer geplanten Flurbereinigung am Wißberg/Rheinhessen/TK 25 Blatt 6114
 Wörrstadt.- Diplomarbeit Universität Aachen (unveröffentl.), Aachen.
- Bauer, J. & Rohdenburg, H. & Bork, H.-R. (1985): Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse.- Parameteraufbereitung für deterministische Gebiets-Wassermodelle, Grundlagenarbeiten zur Analyse von Agrar-Ökosystemen, Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, H.10, S.1-15

- Berz, G. (1998): Naturkatastrophen Auffangnetz Rückversicherung.- Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S.101-104.
- Beven, K.J. & Kirkby, M. (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology.- Hydrological Sciences Bulletin 24, S.43-69.
- Bill, R. (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- Band 1: Hardware, Software, Daten. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bill, R. (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Brabb, E. (1984): Innovative approaches to landslide hazard risk mapping.- Proceed. 28th Int. Sympos. On Landslides, Vol. 1, Toronto, S.307-323.
- Brabb, E. (1993): The San Mateo County California GIS project for predicting the consequences of hazardous geologic processes.- Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards (CARRARA, A. & GUZZETTI, F.), Dordrecht (Kluwer), S.299-334.
- Bratz, E. (2001): Fuzy-Logik, wie funktioniert das ?- Skript zur Vorlesung technische Chemie, TU München.
- Brünning, H. (1975): Paläographisch-Ökologische und Quartärmorphologische Aspekte im Nördlichen und Nordöstlichen Mainzer Becken.- Mz. Naturw. Arch., 14, 5-91, Mainz.
- Brünning, H. (1977): Die Oberflächengenese im zentralen Mainzer Becken.- Mainzer Geographische Studien 11, 227-243, Mainz.
- Bullinger, A. (2000): Vergleich von Interpolationsverfahren und digitalen Geländemodellen für Wattgebiete – GIS-gestützte Untersuchungen am Beispiel der morphologischen Modellierung von Tidebecken in Schleswig-Holstein.- Diplomarbeit am Fachbereich Geographie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

- Buß, J. (1999): Böschungsbruchberechnung mit Kreisgleitflächen und polygonalen Gleitflächen nach DIN 4084, DIN 4084-100 und EC 7.- Handbuch BOESCH, GGU (Braunschweig)
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1999): Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren – Methode, Fallbeispiele und Daten.- BUWAL Umweltmaterialien Vol. 107/I und 107/II, Bern.
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2002): Das Klima in Menschenhand
 neue Fakten und Perspektiven.- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BU-WAL, Hrsg.), Bern.
- Carrara, A., Cardinalli, M., Guzzetti, F. & Reichenbach, P. (1995): GIS Technology in Mapping Landslide Hazard.- A. Carrara and F. Guzzetti, Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, S.135-175, Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- Chi, K.-H. & Lee, K. & Park, N.-W. (2002): Landslide Stability Analysis and Prediction Modeling with Landslide Occurences on KOMPSAT EOC Imagery.- Korean Journal of Remote Sensing, Vol.18, No.1, S.1-12
- Dikau, R. (1992): Hangrutschungen Verbreitung und Auftreten im Rahmen der Naturgefahren- und Risikoabschätzung. - DFG-Rundgespräch "Naturgefahren und Risikoabschätzung" am 23./24. November 1992, Bonn.
- DIN 1054-100 (1995): Zulässige Belastung des Baugrundes Sicherheitsnachweise im Erdund Grundbau.
- DIN 4022 (1987): Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Teil 1 und 2.
- DIN 4023 (1984): Baugrund- und Wasserbohrungen, zeichnerische Darstellung der Ergebnisse.
- DIN 4094 (1980): Ramm- und Drucksondiergeräte, Anwendung und Auswertung.

Eisbacher, G.H. (1991): Einführung in die Tektonik.- Enke Verlag (Stuttgart).

- Fein, W. & Häfner, F. (1984): Massenbewegungen im Rotliegenden der Nordpfalz, dargestellt am Beispiel des Meßtischblattes Lauterecken.- Mainzer geowiss. Mitteilungen, 13, S.19-36, Mainz.
- Fernández-Steeger, T.M. (2002): Erkennung von Hangrutschungssystemen mit Neuronalen Netzen als Grundlage für Georisikoanalysen.- Dissertation, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, Universität Karlsruhe.
- Freeman, T.G. (1991): Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid.- Computers and Geosciences, Bd.17, Nr.3, S.413-422.
- Friedrich, K. (1996): Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten.- Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D, Physische Geographie, Bd.21, Frankfurt.
- Fürst, M. & Fritsche, G. (1990): Die hydraulischen und geochemischen Verhältnisse zwischen Mainz und Bingen.- Mainzer geowiss. Mitt., 19, S.263-296, Mainz.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E, Jankowski, P. (2003): Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard.- Journal of Geographical Systems, S.223-251, Springer Verlag.
- Grieser, J. & Beck, C. (2002): Extremniederschläge in Deutschland Zufall oder Zeichen?-Klimastatusbereicht 2002, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach.
- Hartl, P. & Thiel, K.H. (1996): Sallitengestützte Ortung und Navigation.- Spektrum der Wissenschaft 1/1996, S.102-106.
- Hintze, T. (2002): Fuzzy-Logik.- Seminararbeit zum Seminar: Methoden der Chaosforschung, Dr. W. Eberl, FH München.

- Hölting, B. (1992): Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Stuttgart (Enke).
- Hörsch, B. (2001): Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz.-Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- INFORM GmbH (2001): fuzzyTech 5.5 Benutzerhandbuch.- Handbuch für alle fuzzyTech 5.5 Editionen, INFORM GmbH.
- Jäger, S. (1997): Fallstudien zur Bewertung von Massenbewegungen als geomorphologische Naturgefahr.- Heidelberger Geographische Arbeiten, Heft 108, Heidelberg.
- Janbu, N. (1954): Application of Comosite Slip Surfaces for Stability Analysis. Proc. Europ. Conf. Stability Earth Slopes Stockholm, 3, S.43
- Kienholz, H. (1978): Maps of Geomorphology and natural Hazard of Griendelwald, Switzerland, scale 1:10.000.- Arctic and Alpine Research, 10, S.169-184.
- Kienholz, H. (1992): Naturgefahren Gefahrenkarten.- DFG-Rundgespräch "Naturgefahren und Risikoabschätzung" am 23./24. November 1992 in Bonn.
- Kienholz, H. & Krummenacher, B. (1995): Empfehlungen Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene.- Mitteilungen des Bundesamtes für Wasser und Geologie Nr.6;
 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG, Hrsg.), Bern.
- Kienholz, H. & Zeilstra, P. & Hollenstein, K. (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen:
 Geomorphologie Naturgefahren Forstwesen Sicherheit Risiko.- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) & Eidg. Forstdirektion (Hrsg.), Bern.

- Klaer, W. (1977): Grundzüge der Naturlandschaftsentwicklung von Rheinhessen.- Mainzer Geogr. Studien 11, S.211-225, Mainz.
- Kleefisch, B. & Köthe, R. (1993): Wege zur rechnergestützten bodenkundlichen Interpretation digitaler Reliefdaten.- Geologisches Jahrbuch, Bd.27, S.59-122.
- Klengel, K. J. & Pasek, J. (1974): Zur Terminologie von Hangbewegungen.- Z. f. Angew. Geol., 20: 128-132, Berlin (Akademie Verlag).
- Köthe, R. & Lehmeier, F. (1993): SARA Ein System zur Automatischen Relief-Analyse.-Köln.
- Krauter, E. (1973): Bewegungen an Felshängen im Rheinischen Schiefergebirge (BRD, Rheinland-Pfalz).- Veröffentl. Univ. Innsbruck, 86: S. 217-236, Innsbruck
- Krauter, E. (1980): Möglichkeiten der Klassifizierung und Sanierung von Rutschungen.- Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Heft 3, Erd- und Grundbautechnik im Straßenbau, Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau" am 29./30. Mai in Koblenz, Bonn-Bad Godesberg.
- Krauter, E. (1986): Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen.- In: U. Smoltcyk (Hrsg.): Grundbautaschenbuch, 3, S.1-46, Berlin.
- Krauter, E. (1994): Hangrutschungen und deren Gefährdungspotential für Siedlungen.- Geographische Rundschau, Jahrgang 46, Heft 7-8, S. 422-428.
- Krauter, E. (1995): Geologische Ursachen von Hang- und Böschungsrutschungen.
- Krauter, E. & Häfner, F. (1980): Die Bedeutung der Luftbildanalyse und ihre Bedeutung für die Baugrunderkundung.- Vortr. Baugrundtagung Mainz. DGEG, S.201-222, Essen.

- Krauter, E. & Steingötter, K. (1980): Kriech- und Gleitvorgänge natürlicher Böschungen im Tertiär des Mainzer Beckens (Bundesrepublick Deutschland).- 6. Donau-Europäische Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, Sektion 3, 153-164, Varna (Bulgarien).
- Krauter, E. & Steingötter, K. (1983): Die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens.- Geol. Jb., C34, 3-31, Hannover.
- Krieter, M. (1977): Standortökologische Untersuchungen in Rheinhessischen Weinbaukulturen.- Mainzer Geogr. Studien 11, S.309-313.
- Lateltin, O. (1997): Empfehlungen 1997 Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten.- Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern.
- Leser, H. (1997): Landschaftsökologie.- Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Leser, H. & Stäblein, G. (1975): Geomorphologische Kartierung Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten 1:25.000.- Berliner Geographische Abhandlungen, Sonderheft, Berlin.
- LSV, Landesbetrieb Straßen und Verkehr Rheinland-Pfalz (2003): Analyse der Verkehrsentwicklung in Rheinland-Pfalz.- Bereicht 2003, Landesbetrieb Straßen und Verkehr Rheinland-Pfalz, Koblenz.
- Lüthi, R. (2004): Rechtliche Aspekte im Zusammenhang mit der Gefahrenkarte.- PLANAT (Hrsg.), PLANAT Reihe 4/2004, Biel (Schweiz).
- Massonnet, D. (1997): Radar-Interferometrie zur Messung der Erdkrustendynamik.- Spektrum der Wissenschaft 9/1997, S.56-60.
- Matheron, G. (1971): The Theory of Regionalized Variables and its Applications.- Les Cahiers du Centre de Morphologic Mathematique de Fontainebleau, No.5, Paris.

- Matthesius, H.J. (1994): Entwicklung eines Geotechnischen Informationssystemes zur Kontrolle von Hangrutschungen.- Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.
- Ministerium für Umwelt und Forsten (1998): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan RHEINHESSEN – Kartenband.- Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hg.), Abteilung Wasserwirtschaft, Mainz.
- Ministerium für Umwelt und Forsten (1998): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan RHEINHESSEN – Erläuterungsbericht.- Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hg.), Abteilung Wasserwirtschaft, Mainz.
- Ministerium für Umwelt und Forsten (1998): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan RHEINHESSEN – Tabellen und Abbildungen.- Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hg.), Abteilung Wasserwirtschaft, Mainz.
- Moore, I. D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. (1992): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications.- Hydrological Processes, Bd.5, S.7-35.
- Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft (1999): Naturkatastrophen in Deutschland Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale.- Veröffentlichung der Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, München.
- Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft (1999): Weltkarte der Naturgefahren.- Veröffentlichung der Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, München.
- Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft (2003): Topics geo Jahresrückblick Naturkatastrophen 2003.- Veröffentlichung der Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, München.
- Oesch, D. (2001): Fernerkundung und Naturgefahren Bericht der Gruppe für Fernerkundung der Universität Bern.- Geographisches Institut der Universität Bern.

- Öttl, H. (1997): Kartierung der Erde mit Radar-Interferometrie.- Spektrum der Wissenschaft 9/1997, S.65-68.
- Petzold, B., Reiss, P. & Stössl, W. (1999): Laser Scanning surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital elevation models.- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, S.95-104.
- PLANAT (1998): Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur PLANAT die nationale Plattform Naturgefahren stellt sich vor.- Bern.
- Pospeschill, M. (2001): SPSS Durchführung fortgeschrittener statistischer Verfahren.-RRZN Hannover.
- Press, F. & Siever, R. (1995): Allgemeine Geologie.- Heidelberg-Berlin-Oxford (Spektrum Akademischer Verlag).
- Prinz, H. (1982): Abriß der Ingenieurgeologie.- Stuttgart (Enke).
- Prinz, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie mit Grundlagen der Boden- und Felsechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien.- Enke Verlag (Stuttgart).
- Raetzo, H. & Lateltin, O. (2003): Massenbewegungen: Rutschungen, Fels- und Bergstürze.-Extremereignisse und Klimaänderung, Bericht, Zürich.
- Ritter, J.B. (2004): Landslides and Slope Stability Analysis Using an Infinite Slope Model to Delineate Areas Susceptible to Translational Sliding in the Cincinnati, OH Area.-Script, Computational Science Module, Department of Geology Wittenberg University, Ohio.
- Rothausen, K. & Sonne, V. (1984): Das Mainzer Becken.- Sammlung geologischer Führer, Bd. 72, Berlin.

- Rybar, J. & Kostak, B. & Malek, J. (1997): Geomechanische Modelle zur Erforschung von Rutschungen.- Geotechnik, 20, S.266-272, Essen (DGEG).
- Scheffer, F. & Schachtschabel, F. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde.- Enke Verlag (Stuttgart).
- Schmidt, F. (2003): Hochgenaue Digitale Geländemodelle Untersuchungen zur Erstellung, Analyse und Anwendung in der Landwirtschaft.- Dissertation an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock, Rostock.
- Schmidt, F. & Bill, R. (2000): Digitale Geländemodelle in der Landwirtschaft.- ArcView GIS, GIS-Arbeitsbuch, S.189-208, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Speight, J.G. (1974): A parametric approach to landform regions, Special Publication Institute of British Geographers, Bd.7, S.213-230.
- Springman, S. (2003): Slope Stability Challenges in Unsaturated and Frozen Soils.- Vortrag; Earth, Economics & Society.
- Steingötter, K. (1984): Hangstabilitäten im linksrheinischen Mainzer Becken- Ingenieurgeologische Untersuchungen und kartenmäßige Darstellung.- Dissertation Universität Mainz.
- Stets, J. (1992): Geologie und Luftbild.- Clausthaler Tektonische Hefte 21, Verlag Sven von Loga, Köln.
- Stötter et al. (1998): Konzeptvorschlag zum Umgang mit Naturgefahren in der Gefahrenzonenplanung – Herausforderung an Praxis und Wissenschaft zur interdisziplinären Zusammenarbeit.- Beiträge zum Innsbrucker Jahresbericht 1997/98, S.30-59, Innsbruck.
- Stötter, J. (1999): Unterlagen zur Vorlesung Fernerkundung am Institut für Geographie der Universität Insbruck, SS 1999.

- Styles, K.A. & Hansen, A. (1989): Geotechnical Area Studies Programs Territory of Hongkong.- Geotechnical Control Office, Hongkong GASP Paper XII, 3508.
- Süzen, M.L. (2002): Data driven Landslide Hazard Assessment using Geographical Information Systems and Remote Sensing.- Dissertation an der "Graduate School of Natural and Applied Sciences" an der "Middle East Technical University", Ankara.
- Tangestani, M.H. (2003): Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran.- Disaster Management, Map India Conference 2003.
- Tarboton, D. (1997): A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models.- Water Resources Research, 33(2). S309-319.
- Tarboton, D. (2003): Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology.- Vortrag, 23. ESRI International Users Conference, July 2003, San Diego (California).
- Tobias, S. (2001): Landnutzung, Landentwicklung II, Prozeßmodelle.- ETHZ D-BAUG, Geomatikingenieurwissenschaften, ETH (Zürich).
- Tobias, S. (2003): Einführung in die Ingenieurbiologie.- Skriptum, Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (1993): Multilingual Landslide Glossary; The Canadian Geotechnical Society; BiTech Publishers Ltd., Richmond, Canada.
- Varnes, D.J. And Commission on Landslides and other Mass-Movements-IAEG (1984): Landslide hazard zonation – a review of principles and practice.- The Unesco Press, Paris.

- Welling, M. (1984): Nachweis von Luftildlineationen durch Bodengasmessungen und ihr Zusammenhang mit Rutschungen in Rheinhessen (Mainzer Becken).- Diplomarbeit (unveröff.), Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- Wilson, J.P. & Gallant, J.C. (2000): Terrain Analysis. Principles and Applications.- John Wiley, New York.
- Zadeh, L.A. (1965): Fuzzy sets.- Information and Control 8, S.338-353.
- Zadeh, L.A. (1978): Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility.- Fuzzy Sets and Systems 1, S.3-28.
- Zaruba, Q. & Mencl, V. (1961): Ingenieurgeologie.- Berlin (Akademie Verlag).
- Zaruba, Q. & Mencl, V. (1969): Landslides and their control.- Amsterdam (Elsevier), Prag.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R. (1986): Quantitative analysis of land surface topography.-Earth Surface Processes and Landforms, Bd.12, S.47-56.

Anhang



A1 - Lage der für die Standsicherheitsberechnung benutzten Rammken- und Rammsondierungen

A2 – Profilschnitt vom Südhang des Wißbergs mit Rammkern- und Rammsondierungen





A3 – Profile der Rammkern- und Rammsondierungen



RKS 1 + DPH Ansatzpunkt: 126,18 mNN



RKS 2 + DPH Ansatzpunkt: 135,77 mNN

0.90m	A A A A A A A A	Auffüllung
1.40m		Schluff, tonig, feinsandig weich bis steif, dunkelbraun
1.80m		Schluff, tonig, feinsandig Kalkbröckchen D, dunkelbraun
1.50110		Schluff, tonig, feinsandig weich bis steif, hellbraun Schluff, tonig
2.70m		i Rostflecken
2.90m		Schluff, tonig, stark feinsandig weich bis steif, ocker
3.90m		 Schluff, tonig, feinsandig weich bis steif, ocker
4.50m		Schluff, stark tonig Rostflecken halbfest
4.85m 5.00m,	0° 0°	Schluff, tonig, feinsandig Rostflecken weich bis steif
Indtiefe		Steine (Kalkbröckchen)



RKS 3 + DPH Ansatzpunkt: 140,07 mNN



RKS 4 + DPH Ansatzpunkt: 151,95 mNN

58

		Anzahl	Schläge je 10 cm Ein	Idringung
0.00m		0 10	20 30	40
	Schluff, tonig, feinsandig weich		*****	
1.40m	Schluff, stark tonig, feinsandig steif, dunkelbraun			
2.30m	Schluff, tonig, feinsandig dunkelbraun	2		
2.60m	Schluff, tonig, feinsandig	_ ₽		3
3.30m	Schluff, stark tonig steif bis halbfest, grüngrau	_ ;		
3.45m	Schluff, tonig, feinsandig Gleitfläche/Gleitzone weich, dunkelbraun	_ =	_	
4 30m	Schluff, stark tonig	4		
5.00m	Schluff, stark tonig			
5.20m	Schluff, tonig, feinsandig steif, graugrün Schluff, tonig, stark feinsandig nass weich ocker		-	
6.20m	Schluff, stark tonig steif, graugrün	6	₹	
6.60m	Feinsand, schluffig nass, breiig bis weich, graugrün			
7.20m	Ton, schluffig, schwach feinsandig stelf bis halbfest	1	₹	
7.64m	Schluff, feinsandig nass, graugrün			
8.20m	Ton, schluffig Gleitfläche/Gleitzone (7,93-7,95m) halbfest, grau	8	▦ <u></u> ┤	
8.50m	Schluff, feinsandig weich, ocker bis dunkelbraun		,	1
10.20m	Ton, schluffig, feinsandig halbfest, grau	9		,
Endtiefe				Ē.
		11		44 51 54

12;

RKS 5 + DPH Ansatzpunkt: 162,95 mNN

0.00m		0 10
Mu — Mu 0.60m Mu	Mutterboden, Schluff, tonig	
1 70m	Schluff, tonig, feinsandig steif, graubraun	
2.30m	Schluff, tonig, feinsandig weich, grau fleckig	2 H
	Schluff, tonig, stark feinsandig weich, graugrün	
4.200	Schluff, tonig, feinsandig sehr weich,	三三
4.90m	Feinsand, schluffig \weich bis steif, graugrün	, E
5.30m 200 200 200 200 200 200 200 200 200 2	Schluff, tonig, feinsandig weich bis steif	
5.75m	weich bis stelf braun schlierin	
8.45m	Schluff, tonig Gleitfläche/Gleitzone weich bis steif, dunkelbraun Schluff, stark tonig	
7.20m 7.30m	Schlift topic	
7.75m	sehr weich, ocker bis grau	i
8.20m	halbfest Feinsand, schluffig	
8.70m	steif, ocker bis rostbraun Ton, schluffig halbfest	
9.20m	Schluff, tonig, feinsandig weich, graugrün	9
Enudele	Schluff, tonig, stark feinsandig graugrün	
	VIUN SCHUMO PERSANDIO	

RKS 6 + DPH Ansatzpunkt: 177,98 mNN



Anzahl Schläge je 10 cm Eindringung

00m			0 10	20	30	4
A	A		0 <u>+ </u>			
	~					
A	A		7			
A	A					
A	A		1 =			
Δ	Δ.		H			
17	~		F			
A	A	Auffüllung	÷ 1			
A	A		4			
A	A		2			
Δ	A		8			
	~		E. I			
A	~					
A	A					
A	A		° 🗖			
A 100	Δ		÷ i			
85m		Ediscond application application				
00111	= \$	weich his steif graugnin				
	•• 8	Cableff tasia				
	- 8	schluft, tonig	4			
36m	- V	nass, gradgran				
65m		Feinsand, schluffig				
-		Top schluffig				
00m 📒	- 1	 stelf graugerin his braun 	5 			
	<u>*</u>					
		 Feinsand, schlung, tonig Gleitfläche/Gleitzope 				
		breija bis weich, graugrün				
/5m	- 44	Cable# Annia				
00m	-	Schlurt, tonig				
	3	Feinsand schluffin tonin		_		
42m	- Ŭ	 nass, breiig bis weich 		<u> </u>		
58m		Feinsand, schluffig		<u> </u>		
78m	-	dicht gelagert, graubraun		<u> </u>		
00m		_} Schluff, tonig	7-		1	
32m	1	steif, graubraun			<u> </u>	
	Ξŕ	Feinsand, schluffig			<u> </u>	-
	-	Sahuff feineandia				-
-		weich grau			<u> </u>	
	-	Schluff tonig	8			
20m	- 4	steif bis halbfest,		_	_	-
		Schluff, tonig				ц.
63m	= 4	🛌 nass, weich bis breiig, graubraun				
1/m	- == >	ר Schluff, tonig		_		
D0m/		Steif, graubraun	9	_		-
10		Feinsand, schluffig		_		2
40m		Weich bis stell, grau		_		7
60m/		Top, schliffig				
00-		steif bis halbfest				
dtiefe		Mittelsand, feinsandig	10			
usere		Schluff, tonig				
		steif				
		Feinsand, schluffig				
		dicht gelagert, grau				
			11			

RKS 7 + DPH Ansatzpunkt: 201,72 mNN

A			
Ä 🔒	Auffüllung, Schluff, tonig, feinsandig		
1.00m A	Ton, schluffig, feinsandig weich bis steif, graugrün		
1.55m	Ton cohluffia faincandia		
2.50m	halbfest, grau		
2.95m	Ton, schluffig, feinsandig steif bis halbfest, grün	_ , T	
u	Schluff, tonig, feinsandig nass, weich, grau		
3.65m	Ton, schluffig, feinsandig	- "E	
4.50m	Feinsand, schluffig nass, weich, grau		
	Schluff, tonig, stark feinsandig steif, grau	₃ ₽	_
5.20m	Schluff, tonig, feinsandig		
		_ ; B	_
	Ton, schluffig, feinsandig steif (ab 6,5m weich)		
	\$, 2	_
7.20m	Schluff, tonig, feinsandig Gleitfläche/Gleitzone		
7.90m	\sehr weich, ocker Ton, schluffig, feinsandig	- :=	_
	Feinsand, schluffig, tonig steif, grau		
9.00m	Schluff, tonig, feinsandig Gleitfläche/Gleitzone (sehr weich, ocker	₃ 且	_
9.50m	Ton, schluffig, feinsandig halbfest, graugrün Schluff, tonio, feinsandig		
- 700	weich bis breiig, ocker Ton, schluffig, feinsandig	- 11	
0.20m	halbfest, grau		
			-
s / 535970 s			
(1997).			
,			
, 1515			
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			

RKS 8 + DPH Ansatzpunkt: 215,75 mNN



15-

RKS 9 + DPH Ansatzpunkt: 230,18 mNN



### RKS 10 + DPH Ansatzpunkt: 230,18 mNN



# A4 – Profile der Standsicherheitsberechnungen










## **Benutzte Karten:**

Folgende Karten, Rasterdaten und Luftbilder des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz wurden zur Auswertung und als Plangrundlagen für die erstellten Karten verwendet:

## Karten und Rasterdaten:

- Topographische Karte Blatt 6013 Bingen
- Topographische Karte Blatt 6014 Ingelheim a. Rhein
- Topographische Karte Blatt 6015 Mainz
- Topographische Karte Blatt 6113 Bad Kreuznach
- Topographische Karte Blatt 6114 Wörrstadt
- Topographische Karte Blatt 6115 Undenheim
- Topographische Karte Blatt 6213 Kriegsfeld
- Topographische Karte Blatt 6214 Alzey
- Topographische Karte Blatt 6215 Gau-Odernheim
- Übersichtskarte 1:100.000 Blatt Süd
- digitales Geländemodell von Rheinhessen (40 m-Raster)

## Luftbilder: Befliegung 30/97 (11.08.1997); Maßstab 1:13.000

- Bild 0444
- Bild 0445
- Bild 0446
- Bild 0447
- Bild 0448
- Bild 0449
- Bild 0450
- Bild 0452
- Bild 0453
- Bild 0454

## Folgende Karten des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz wurden zur Auswertung und als Plangrundlagen für die erstellten Karten verwendet:

- Geologische Karte Blatt 6013 Bingen
- Geologische Karte Blatt 6014 Ingelheim a. Rhein
- Geologische Karte Blatt 6015 Mainz
- Geologische Karte Blatt 6113 Bad Kreuznach
- Geologische Karte Blatt 6114 Wörrstadt
- Geologische Karte Blatt 6115 Undenheim
- Geologische Karte Blatt 6213 Kriegsfeld
- Geologische Karte Blatt 6214 Alzey
- Geologische Karte Blatt 6215 Gau-Odernheim



