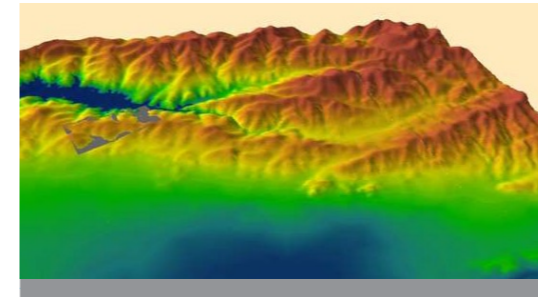


Im Elbursgebirge im Iran treffen eine Vielzahl an Faktoren ein, welche Massenbewegungen begünstigen, z.B. Steilheit des Reliefs, karge Vegetationsbedeckung oder Hangunterschneidungen durch Straßen oder Flüsse. Die Region ist durch eine intensive Umgestaltung der Naturlandschaft überprägt worden, vor allem durch Entwaldung, Beweidung und Anbau von Nutzpflanzen. Dass Massenbewegungsschäden und menschliche Nutzung eng miteinander verknüpft sind, wird an vielen Stellen ersichtlich. Auf der einen Seite handelt es sich in der Abbildung rechts und auf der Titelseite bei der gesamten Bergform um eine sehr alte große Rutschungsmasse, die landwirtschaftlich genutzt wird. Auf der anderen Seite sind die Schäden an der Vegetationsdecke durch Übernutzung deutlich zu erkennen, sie begünstigen Erosion und Massenbewegungen.



Massenbewegungen im Elbursgebirge, Iran



Alexander Fekete

Massenbewegungen im Elbursgebirge, Iran

- im Spannungsfeld zwischen natürlicher Stabilität und anthropogener Beeinflussung

Inhalt

1	Rahmen der Arbeit	4	6	Die Erstellung des Geländemodells	46
1.1.	Einführung	5	7	Aufgenommene Massenbewegungen im Testgebiet	56
1.2.	Forschungsstand	6	8	Faktoren für die Anfälligkeit gegenüber Massenbewegungen und deren Auswirkungen	60
1.3.	Vorgehensweise und Zielsetzung	8	8.1	Untergrundmaterial	61
2	Massenbewegungen – Begriffswahl und Inhalt	10	8.1.1	Geologie	61
2.1	Definitionen von Massenbewegung	11	8.1.2	Zersatzhorizont und Bodendecke	66
2.2	Die Einteilung von Massenbewegungen – ein Versuch	11	8.2	Tektonik	71
2.3	Klassifikationen	14	8.2.1	Erdbeben	72
2.4	Gefahrenerkennung	15	8.2.2	Tektonische Störungen	72
2.5	Häufigkeiten	16	8.3	Relief	76
2.6	Auslaufstrecke	17	8.3.1	Hangneigung	76
2.7	Ausmaß	17	8.3.2	Exposition	80
2.8	Gegenmaßnahmen	18	8.3.3	Wölbung und Krümmung	81
3	Vorstellung von Untersuchungsgebiet und Testgebiet	20	8.3.4	Höhenstufe	82
3.1	Naturraum und Lage	22	8.4	Klima	82
3.2	Abgrenzung des Untersuchungsgebietes	22	8.4.1	Niederschlag	83
3.3	Abgrenzung des Testgebietes	24	8.4.2	Niederschlag in fester Form	86
4	Die Region im Spannungsfeld zwischen Naturgefahren und Landnutzung	26	8.4.3	Temperatur	86
4.1	Erdbebengefahr und Massenbewegungen	27	8.5	Hydrologie	90
4.2	Für das Auftreten von Massenbewegungen relevante Landnutzung	29	8.5.1	Abflusscharakteristik	90
5	Datengrundlagen	34	8.5.2	Einzugsgebiet	91
5.1	CORONA	35	8.6	Anthropogene Einflüsse	93
5.2	LANDSAT	37	8.6.1	Veränderung der Vegetationsbedeckung	93
5.3	Karten	39	8.6.2	Infrastruktur	96
5.4	Klimadaten	40	9	Ergebnisse und Bewertung der Methodik	98
5.5	Bodenproben	41	9.1	Zusammenfassung und Qualitätsbeschreibung der Methodik	99
5.6	GPS-Punkte	41	9.2	Validierung	100
5.7	Digitale Geländemodelle	42	9.3	Bewertung der Faktoren	101

11	Ausblick	112
12	Dank	114
	Verwendete Abkürzungen	116
	Abbildungsverzeichnis	117
	Literatur	122
	Technische Daten	130
	Anhang	130
	Begriffssammlung zu Massenbewegungen: Formen- und Prozessansprachen	132

Anschrift des Autors:

Alexander Fekete
Griesäckerstr. 24
97078 Würzburg
alexander.fekete@mail.uni-wuerzburg.de

Webversion in 150 dpi

Rahmen der Arbeit

قسطین لار

(Ghasteijn Lār)



Abb.1: Photo 04250042: Intensiv anthropogen genutzte Landschaft bei Ghasteijn Lār

1.1 Einführung

Der Begriff Massenbewegungen bezeichnet von der Schwerkraft verlagertes Boden- oder Gesteinsmaterial, zum Beispiel Erdbeben, Schlammlawinen oder Steinschlag. Massenbewegungen sind ein bedeutender Faktor bei der Formung des Reliefs, insbesondere in steilerem Relief wie an Hügeln oder in Gebirgen.

In zunehmendem Maße sind menschliche Siedlungsaktivitäten davon betroffen. Die Medien- und Darstellung hat Erdbeben und Schlammlawinen ins Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt. Massenbewegungen werden von der Wissenschaft und von der Versicherungsbranche zum Bereich der sogenannten Naturkatastrophen gezählt. Zu dieser Einordnung führen enorme finanzielle Einbußen, Verluste an Existenzgrundlagen und Todesopfer. Massenbewegungen sind häufig Nebeneffekte anderer Naturkatastrophen wie Erdbeben oder heftiger Stürme. Während Ereignisse wie Erdbeben in ihrer Bedeutung und Tragweite allgemein bekannt sind, gehören Massenbewegungen zu den noch wenig bekannten und verstandenen Phänomenen. Ähnlich der Überflutungsschäden bei Hochwassern ist die Problematik häufig eine anthropogen beeinflusste. Die Fragen, wo man Siedlungen und Straßen baut und wie der Mensch in den Naturhaushalt eingreift, haben grundlegende und direkte Auswir-

kungen auf das Auslösen von Massenbewegungen. Phänomene wie Massenbewegungen erfordern ein Zusammenwirken von Untersuchungen der menschlichen Aktivität wie auch der natürlichen Faktoren.

Im Rahmen eines Forschungsaufenthaltes im Elbursgebirge im Nordwesten Irans ergab sich die Gelegenheit, Massenbewegungen und deren Auswirkungen zu untersuchen. Die Region ist durch eine intensive Umgestaltung der Naturlandschaft überprägt worden, vor allem durch Entwaldung, Beweidung und Anbau von Nutzpflanzen. Als Naherholungsziel, aber auch als Siedlungsareal erfährt die Region eine erhebliche Beanspruchung, was anhand der innerhalb weniger Jahrzehnte enorm expandierten nahe gelegenen Millionenstädte Teheran und Karaj zu erkennen ist. Der Iran ist als ein von Erdbeben in besonderem Maße betroffenes Land bekannt, auch die Region um Teheran ist davon stark gefährdet. Der kritische Gleichgewichtszustand der Region machte eine Untersuchung der Stabilitäts- und Risikofaktoren des Reliefs reizvoll. Ziel war es, ein Gebiet auf seine natürliche Stabilität in Bezug auf menschliche Nutzungsbeanspruchung zu untersuchen. Aufgrund der Bandbreite dieses Themas konzentrierte sich diese Untersuchung auf eine einzelne »natural hazard«:

– Massenbewegungen



Abb. 1 & 2: Photos i15-02-14 (links) & 04250029 (ganz links), GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: intensive Zerstörung von Kulturlandschaft durch Erosion und Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet. Der Zusammenhang zwischen Stabilität des Naturraumes und seiner anthropogenen Beanspruchung zeigt sich an der schütterten, intensiv bearbeiteten Vegetationsdecke, an den Viehtrittspuren durch Beweidung und an dem tobelartigen Rutschungsabriss am Feldweg links im Bild. Der gesamte Berghang ist selbst das Produkt einer riesigen Rutschung. Nutzung und Bedrohung von Massenbewegungen stehen in wechselseitiger Beziehung.

1.2 Forschungsstand

In der gegenwärtigen Forschung nehmen Datenintegration in rechnergestützte Systeme und Datengewinnung durch Fernerkundungsmethoden eine zunehmende Bedeutung ein, wenn Aussagen über Ursachen und Verbreitung von Massenbewegungen getroffen werden sollen. Der Zugewinn an Daten und der Fortschritt mittels Synergieeffekten durch Datenintegration müssen sich hierbei an herkömmlichen Methoden der Geländeaufnahme und Gefahrenbewertung messen. Noch sind Datenintegration in ein Geographisches Informationssystem (GIS) und die Methoden der trägergestützten Fernerkundung relativ neue Anwendungen in der Untersuchung von Massenbewegungen. Die aktuelle Literatur liegt hierzu vorwiegend in Form von Veröffentlichungen in Zeitschriften vor.

Innerhalb der Forschungsarbeiten lassen sich verschiedene Stadien der Untersuchung an Massenbewegungen unterscheiden. Die erste Stufe ist die Aufnahme von Massenbewegungen, in der zweiten Stufe werden die Faktoren einbezogen, welche Massenbewegungen bedingen. In der dritten Stufe folgt eine Risikoanalyse bzw. Gefahren einschätzung und in der vierten Stufe wird die Ausweisung von Gefahrenzonen versucht, bzw. eine Vorhersage von Wahrscheinlichkeiten des Auftretens. Dieser beobachtete Stufenaufbau ist weder allgemeingültig noch überall vorhanden. Die Aufnahme von Massenbewegungen geschieht zum einen ganz klassisch im Gelände (*on-ground*) durch Datenaufnahme und *monitoring* in Form von Boden- und Gesteinsanalysen, Vermessungen und Kartierung. Zum anderen erfolgt die Aufnahme von Massenbewegungen häufig durch trägergestützte Aufnahmesysteme (*off-ground*). Dazu gehören Fernerkundungsarten, ob Scanner oder photographische Aufnahme, von Satelliten oder Flugzeugen aus. Feinere räumliche Auflösung, Radar und Laserhöhenvermessung versprechen in den kommenden Jahren eine weitere Entwicklung innerhalb der Analyse von Massenbewegungen (HERVÁS et al. 2003, MCKEAN & ROERING 2004). Fernerkundungsmethoden sind ein wichtiges Instrument zur Auswertung und zum *monitoring* von Massenbewegungen (MANTOVANI et al. 1996, RAUTELA & LAKHERA 2000). Kontrastbearbeitung, spektrale Unterscheidungsmöglichkeiten von Gesteinsoberflächen (JAYASEELAN & SANJEEVI 2002),

und Erkennung von Vegetation bzw. entfernter Vegetation als Hinweis auf Massenbewegungen (HONDA et al. 2002) werden häufig eingesetzt. Teilweise kann das *monitoring* automatisiert werden, durch *'change detection'* und Klassifizierungsmethoden (HERVÁS et al. 2003), womit temporale Vergleichsstudien möglich werden. Die Objekterkennungstechnologie wird aktuell weiterentwickelt, um Massenbewegungsformen genauer aus Fernerkundungsdaten zu erkennen (GÄRTNER et al. 2001).

Die Datenintegration erfolgt entweder in Form von Datenbanken oder in einem System mit graphischer Ausgabereinheit, einem GIS. Im GIS ist es möglich, Daten sowohl einzeln, als auch in Überlagerung mit anderen Ebenen darzustellen. Einzelne Elemente hiervon können miteinander verschnitten werden (*overlay technique*). Auch die Verarbeitung dreidimensionaler Daten in *Personal Computers* ist inzwischen durch die Leistungssteigerung der Prozessoren möglich geworden. Die Integration von dreidimensionalen Geländemodellen (DEM, DGM, TIN, etc.) hat eine große Bedeutung bekommen, da Massenbewegungen insbesondere von Faktoren abhängen, die durch Bearbeitung zweidimensionaler Daten allein nicht untersuchbar sind, z.B. die Abflussbahn in Abhängigkeit von der Hangneigung.

Die Gefahreinschätzung wird in verschiedenen Ansätzen verfolgt, die meistens eine Analyse, Modellierung oder eine Simulation beinhalten. Gemein ist den Ansätzen vor allem ihre Varietät. Dies zeigt sich sowohl in der jeweiligen Nomenklatur der Begriffe Gefahr und Risiko als auch im jeweiligen Ansatz und seiner Abgrenzung. Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, sämtliche Definitionen aufzuführen und zu klassifizieren. Die englischsprachige Fachliteratur orientiert sich an einigen wenigen Einteilungsvorschlägen (CRUDEN & VARNES 1996, SCHUSTER & KOCKELMANN 1996, WU et al. 1996), wengleich es eine Reihe anderer internationaler Einteilungsversuche gibt (z.B. DIKAU et al. 1996).

Die Analysemethoden lassen sich ihrerseits unterscheiden (ZINCK et al. 2001, DAI & LEE 2002) in Faktorenübereinanderlegung, statistische Modellierungen und geotechnische Prozessmodelle. Die Faktorenübereinanderlegung (*factor overlay*) erfolgt oft qualitativ (PALLÁS et al. 2004) und ist damit stark subjektiven Entschei-

dungen unterworfen. Statistische Modellierungen bedienen sich oft einer Quantifizierung jeglicher, auch qualitativer Parameter. Benutzte statistische lineare Modelle sind z.B. *logistic regression*, *multiple regression analysis* und *discriminant analysis*. Geotechnische Prozessmodellierungen verfolgen eine kausale Erklärung und Vorhersage, z.B. von Materialeigenschaften in rein quantitativer Art (AU 1998, CHEN & LEE 2002, IWAHASHI et al. 2001). Dies bedingt jedoch häufig eine starke Simplifizierung oder eine Aufspaltung des Problemkomplexes und eine Spezialisierung bei der Bearbeitung von Einzelfaktoren (BASILE et al. 2003, CALCATERRA et al. 1998, CHEN & WAN 2004, CHLEBORAD 1998, 2000, OKAMOTO et al. 2004, PLA SENTÍS 1997, VAN ASCH et al. 1996).

Ein typischer Ansatz ist zum Beispiel eine Modellierung der *slope instability* (ATKINSON & MASSARI 1998, DAI & LEE 2002, PALLÁS et al. 2004, PAUDITS & BEDNARIK 2002, PEROTTO-BALDIVIEZO et al. 2004, ROWBOTHAM & DUDYCHA 1998, TEMESGEN et al. 2001). Ausgangspunkt ist die Annahme, dass das Vorkommen vergangener Massenbewegungen das Potential zukünftiger Massenbewegungen anzeige. Dazu werden die physikalischen Parameter identifiziert und in ein GIS übertragen. Dort werden die Rasterinformationen mit einer Reklassifizierung verglichen. Die Reklassifizierung besteht aus Flächen, die einen quantitativen Gefahrenwert erhalten haben, der vorher durch statistische Bewertung, z.B. in einem *logistic multiple regression model*, erstellt wurde. Die Suszeptibilität, also die Empfindlichkeit der Region, ist hoch, wenn die gleiche Kombination an Instabilitätsfaktoren auftritt. Die Gefahrenklassen können ihrerseits im GIS dargestellt werden als Bereiche unterschiedlicher Gefährdung in einer Gefahrenkarte. Gefahrenkarten werden begrifflich unterschiedlich definiert (TEMESGEN et al. 2001), man versucht damit die Karten, die lediglich bereits geschehene Massenbewegungen ausweisen, von Gefahrenpotentialkarten zu unterscheiden.

Einer der wenigen für das Untersuchungsgebiet unmittelbar relevanten in Englisch verfassten Aufsätze zu Massenbewegungen befasst sich mit einem statistischen Ansatz zur Auswertung von übereinandergelegten Gefahrenfaktoren. Über 140 Massenbewegungen im Einzugsgebiet des Alamutflusses wurden mittels einer multiplen Regressionsanalyse ausgewertet (PEZHAM et al. 1998). Untersuchte Faktoren

waren Höhe, geologische Störungen, Hangneigung, Lithologie und Hangexposition. Die Faktoren wurden als unabhängige Variablen linear quantifiziert. Mittels eines multiplen Regressionsmodells wurde ein *slope stability index* gebildet. Gefahrenzonen wurden hieraus ausgewiesen und eine *landslide hazard zonation map* im Maßstab 1:50.000 erstellt.

Selbst wenn terminologisch bereits stark untergliedert wird zwischen Wahrscheinlichkeit, Häufigkeit, Suszeptibilität, Gefahr und Risiko, sind Gefahrenpotentialkarten häufig das einzige, was bislang zur Vorhersage von Massenbewegungen besteht. Einige Simulationen versuchen, einen Schritt weiter zu gehen und eine übertragbare Modellierung sowie ein Vorhersageinstrument zu entwickeln (PACK et al. 1998, GUZZETTI et al. 2002, OKURA et al. 2000 [2], WIECZOREK et al. 1998). Aufgrund der hohen mathematischen Komplexität sind sie bislang noch sehr simplifizierend (CROSTA et al. 2004, GUZZETTI et al. 2002, CHEN & LEE 2002, MEIßL 2001) oder nur auf einzelne Massenbewegungsprozesse beschränkt und auch darin noch sehr stark vereinfachend. Dennoch wird die Simulation weiterhin an Bedeutung gewinnen und stellt schon heute vielversprechende Ansätze in Aussicht. Die Anwendung von Simulationsmodellen wie die der zellulären Automaten ist dabei nur ein Beispiel (z.B. D'AMBROSIO et al. 2003, CLERICI & PEREGO 2000, di GREGORIO et al. 1999). Häufig basieren die Simulationen und Modelle auf der Anwendung digitaler Höhenmodellen, aus deren dreidimensionaler Information Aussagen über Wegverlauf von Massenbewegungen abgeleitet werden können (DAMOKLES PROJECT 2002, DYMOND et al. 1999).

Die technischen Erkenntnisse über das Verhalten von Massenbewegungen münden häufig in planerische Konzepte des *hazard management* oder der *hazard mitigation*. Ziele sind Gefahrenkarten, Maßnahmenkataloge und Risikomanagement-Strategien (AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY 2000, CARRARA et al. 1995, CHALERMPOONG 2002, COE et al. 2000, GARATWA & BOLLIN 2002, HAMILTON 2000, ISDR 2002, OESCH 2001).

1.3 Vorgehensweise und Zielsetzung

Diese Arbeit hat zum Ziel, einen pragmatischen Ansatz zur Untersuchung von Massenbewegungen zusammenzustellen. Transparente und umsetzbare Aussagen sollten zudem in einem zeitlich und finanziell begrenzten Rahmen

Pragmatisch wird dabei im Sinne von anwendungs- handlungs- und sachbezogenen verstanden. Pragmatismus ersucht durch die Reflexion logischer rund experimenteller Methoden den Aufbau gesicherter Erkenntnis. Es galt, aus einer Fülle von Daten und Methoden ein Instrumentarium zur sachlichen und effizienten Analyse der Problemstellung „Massenbewegungsgefährdung“ zu entwickeln.

getroffen werden. Massenbewegungen wurden in diesem Ansatz als Determinante und Symptom der Stabilität eines Landschaftsausschnitts verstanden. Zur Erstellung und Überprüfung eines methodischen

Aufbaus wurde ein Testgebiet für eine Fallstudie ausgewählt, in welcher sich Massenbewegungen beobachten lassen. Während der Feldarbeiten im Iran 2002 und im anschließenden Zeitraum wurden aussagekräftige Informationen gesammelt und zur Datenverarbeitung vorbereitet. Fernerkundungsdaten erlaubten im Vergleich zu den Feldaufenthalten und Laboruntersuchungen zeitliche und finanzielle Einsparungen. Die Einsatzmöglichkeiten der Satellitendaten hingen allerdings von der technischen Art und ihrem Alter ab. In der Herangehensweise wurde aus den vorhandenen erprobten Methoden ein für den Zeitrahmen sinnvoller Modus operandi zusammengestellt. Stabilitätsfaktoren und Auslöser von Massenbewegungen sollten untersucht werden, um eine Aussage über die Anfälligkeit des Testgebietes zu treffen. Für auf das Ergebnis aufbauende wünschenswerte weitere Untersuchungen und die Übertragbarkeit auf andere Regionen sei auf Kapitel 11. (Ausblick) verwiesen.

Im April 2002 waren Herr Prof. Dr. Detlef Busche, Herr Ulf Siefker und der Autor, als studentische Hilfskraft im Rahmen des Projekts DRYSATMAP im Iran. Das Projekt, BMBF-Vorhaben 55EE0042, war aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) und der Universität Würzburg finanziert. Im Kern ging es um eine geomorphologische Kartiermethodik, in welcher aus Fernerkundungsdaten gewonnene Oberflächenformen im Gelände verifiziert und validiert wurden. Dabei konnten auch Geländebegehungen in der Gebirgsregion des Testgebietes dieser Arbeit mit Entnahme von

Bodenproben, GPS-Koordinatenaufnahme und Photodokumentation verwirklicht werden. Im Rahmen des Projekts standen nach dem Geländeaufenthalt Kartenmaterial, Satellitendaten, Niederschlagsdaten, Hardware und Softwareausstattung zur Verfügung. Weitere Niederschlagsdaten und Satellitendaten konnten teilweise über das Internet bezogen werden. Zusätzlich zu den LANDSAT-Daten wurden räumlich höher auflösende CORONA-Daten kostengünstig erworben. Digitale Höhenmodelle wurden auf Grundlage der Topographischen Karten 1:50.000 erzeugt. In den Programmen ESRI ArcGIS 8.3 und ArcInfo Workstation 8.3, ERDAS Imagine 8.6, GRASS 5 sowie einer Vielzahl anderer Programme wurden die Daten integriert und bearbeitet. Wünschenswert wäre als anschließender methodischer Schritt eine deterministische Modellierung gewesen, aus der man eine Simulation hätte entwickeln können. Ein deterministischer Ansatz möchte Abtragungsphänomene durch die Mechanik des Prozesses erklären, also den geomorphologisch wirksamen Vorgang aus der Materialzusammensetzung ableiten. Dazu wären jedoch grundlegende geotechnische Untersuchungen anzustellen, die den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten. Zudem ist der deterministische Zusammenhang in der Forschung bislang schwierig technisch in die Modelle einzubinden. Dies liegt an der Komplexität des vielschichtigen Stabilitätszustandes und der beteiligten Prozesse bei Massenbewegungen. Diese Arbeit schließt sich deswegen dem gängigen Ansatz einer heuristischen Vorgehensweise in der Analyse der Massenbewegungen an. In einer Arbeitshypothese werden Faktoren, die Massenbewegungen bedingen, untersucht und kategorisiert. Hypothetische quantitative und qualitative Werte zur Abgrenzung der Einflussweite dieser Faktoren werden aus eigenen Beobachtungen im Vergleich mit der Literatur bestimmt. Mittels einer Faktorenüberlagerung werden sie anschließend integriert und dargestellt. Ziel ist eine Aussage über die Tragweite und Relevanz der getroffenen Faktoren und deren Einflusstiefe hinsichtlich einer anwendungsbezogenen Nutzung der Ergebnisse z.B. für Siedlungs- oder Infrastrukturplanungen.



Abb. 3: Photo i25-02-10: Gebirgspass nördlich von Karaj. Im Untersuchungsgebiet treffen eine Vielzahl an Faktoren zusammen, welche Massenbewegungen begünstigen, z.B. Steilheit des Reliefs, karge Vegetationsbedeckung oder Hangunterschneidung durch Straßenbau und Flüsse.

Kapitel 2.

Massenbewegungen – Begriffswahl und Inhalt



Abb. 4: Photo i15-02-15: tobelartiger Rutschungsabriss auf dem wenig konsolidierten Materialverband einer großen Rutschungsmasse

Massenbewegungen gehören zu den reliefbildenden und reliefformenden Prozessen und Skulpturformen der Erdoberfläche. Im Überlagerungsbereich von Lithosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Atmosphäre laufen sie in einem komplexen Wirkungsgefüge unter dem hauptsächlichlichen Einfluss der

Schwerkraft ab. Im Fokus dieser Untersuchung stehen die subaerischen Formen und prozessualen Faktoren von Feststoffen. Subhydrische Massenbewegungen sowie der submikroskopische Bereich und auch reine Schneelawinen oder Eisbewegungen werden hierbei nicht betrachtet.

2.1 Definitionen von Massenbewegungen

Bei der Beschäftigung mit Massenbewegungen präsentiert sich ein Definitionswirrwarr der Begriffe. Viele Termini, gerade in der deutschsprachigen Literatur, sind traditionell manifestiert und existieren parallel nebeneinander - Felsschlag oder Steinschlag, Erdschlipf, Bergschlipf, Felsschlipf, Bergsturz, Gleitung, etc. Selbst Lehrbücher fassen mitunter Sturz-, Gleit- und Rutschbewegungen unter den Begriffen Bergsturz oder Bergschlipf zusammen, dem Talzuschub werden manchmal auch Gleitungen und Sackungen zugeordnet (FISCHER 1999). Die Massenbewegung vom Mont Toc in den Stausee von Vaiónt erfuhr eine Einordnung als Rutschung, Gleitung, Sackung oder Bergsturz. Hier gilt, dass eine komplexe Betrachtung mehrerer Formen und Prozesse realitätsnäher ist und deswegen die Ansprache 'komplexe Massenbewegung' richtiger wäre. Beim Vergleich der Begriffe in anderen Sprachen wird die Übertragbarkeit noch unklarer. Innerhalb der Fachliteratur ist häufig der Wunsch nach einer Vereinheitlichung der Begriffe zu lesen (DIKAU et al. 1996, FISCHER 1999). Daher gibt es Vorschläge zu einer, auch internationalen, Vereinheitlichung der Definitionen von Massenbewegungen (DIKAU et al. 1996, CRUDEN & VARNES 1996). Der Begriff Massenbewegung wird in der deutschen Literatur meist (z.B. LESER et al. 1997, KUGLER & SCHAUB 1997) wie folgt verwendet:

1. in den Geowissenschaften wird er als Materialbewegung im weitesten Sinne verstanden,
2. in der Geomorphologie dagegen wird er weiter unterteilt, und zwar in Bewegungsformen (gleitend, rutschend, stürzend) von nahezu sämtlichem Material (Boden, Hangschutt, Gesteinsmaterial), aber unter ausdrücklich ausschließlichem Einfluss der Schwerkraft auf geneigten Hängen. Der englischsprachige Ausdruck *landslides* subsumiert in etwa alle

Prozesse und Formen von Massenbewegungen als Oberbegriff, wird jedoch nicht einheitlich verwendet.

3. Diese gravitative Massenbewegung bewirkt Denudation und wird vom Massentransport unterschieden. Dies gilt auch für die englischsprachige Literatur.
4. Beim Massentransport wird der Transport hauptsächlich durch ein bewegtes Agens, wie z.B. Wasser, Eis oder Wind übernommen (z.B. durch Flusswasser, Gletschereis, Meeresströmungen, Wind).

In dieser Arbeit wird der Begriff Massenbewegungen als Oberbegriff für alle Formen und Prozesse verwandt, da eine Orientierung an der englischsprachigen Literatur zum Begriff Hangrutschungen zwänge, was jedoch zu Irritationen führte, wenn man darunter auch Steinschlag und Felssturz einordnete.

2.2 Die Einteilung von Massenbewegungen – ein Versuch

Eine theoretische Einteilung der Begriffe kann nach einer Definition der Formen wie auch der Prozesse erfolgen, in der Realität jedoch sind sie kaum unabhängig voneinander zu behandeln. Es empfiehlt sich ein systematisches Gerüst, in dem man Massenbewegungen in verschiedene Stadien aufteilt. Nach Auffassung des Autors könnte man versuchen, diese Stadien in vorläufige »Testbegriffe« zusammenzufassen, und zwar wie folgt:

vorbereitende Faktoren – Auslöser – Verlauf – Formen und Prozesse – Auswirkungen.

Vorbereitende Faktoren

Gravitative Massenbewegungen entstehen an einer Neigung, in einem Relief. Dort gelten insbesondere exponierte Hangbereiche als Ausgangspunkt. Vorbereitend wirken Hangneigung und Schwerkraft über die Zug- und Druck-Komponenten im Kräftegleichgewicht. Die Hangwölbung steuert die Statik, Gesteinsklüfte und Schichtflächen wirken als Schwächezonen des Gesteins wie auch als Leitbahnen für eindringendes Wasser. Durchwitterung wie auch Gesteinszusammensetzung mit Materialien wie Ton und Schluff verursachen Gleitflächen als Wasserstauer einerseits und wirken als Schmiermittel andererseits. Zu weiteren Faktoren, die Massenbewegung vorbereiten, gehört die Wassersättigung, welche durch Oberflächenspannung und Kohäsionskräfte Partikel zusammenhält. Dies gilt solange, wie die Durchlässigkeit des Gefüges, abhängig von der Korngröße, Wasser in Poren zurückhalten kann. Bis zu einem gewissen Grad stabilisiert der Wassergehalt z.B. einen Sandhaufen, bei zuviel Wasser jedoch schwimmen die Partikel auf und der Sandhaufen zerfließt. Die Korngröße steuert die Steilheit des Böschungswinkels und das Material selbst kann noch unterschiedliche Festigkeit besitzen, je nachdem, ob es unverfestigt oder durch Bindemittel mineralisch verfestigt ist. Auch das Klima und die Exposition verursachen unterschiedliche Aufbereitungsmöglichkeiten durch Einstrahlung, Schattenbildung, Durchfeuchtung, Bewuchs, et cetera. Somit sind regionale Differenzierungen der Gefährdung und eine Einschätzung der Wahrscheinlichkeit von Massenbewegung möglich.

Zu **Umgebungen**, welche die Schaffung von Massenbewegungen vorbereiten (HUTCHINSON 2001), zählen zum einen das Periglazial und vergleichbare Umwelten. Dort bereitet Bodenrost mit Auftauvorgängen und Frostsprengung mit einer Zerrüttung und Aufarbeitung des betroffenen Substrates Massenbewegungen vor. Aber auch glazial betroffene Gebiete gehören hierzu - durch glaziale Erosion, Versteilung von Talflanken, und, nach Rückzug des Eises, durch Entfernung des talausfüllenden Widerlagers. Je nach Relief- und Klimageschichte lassen sich in unterschiedlich geprägten Regionen, z.B. in Umgebungen ehemaliger Eiszeiten, verschiedene Massenbewegung ausmachen. Umgekehrt stellen auch Massenbewegungen Indikatoren für vergangene Paläoumgebungen dar (vgl. z.B. BUSCHE 2001). Vegetationsarme aride, semiaride sowie subarktische Bereiche sind weniger massenbewegungsgefährdet. Weitere Umgebungen sind etwa Küsten-

regionen, an denen marine Erosion angreift, sowie Flüsse und menschlich genutzte Regionen, die ebenfalls durch einschneidende Maßnahmen Erosion und Massenbewegung verursachen. Der menschliche Eingriff in den Naturhaushalt ist erheblich, nicht nur die Freilegung schützender Vegetationsdecke, sondern auch die Landschaftsumgestaltung durch Baumaßnahmen ist gewaltig: 600 Millionen Tonnen jährlich bewegten Materials durch natürliche Prozesse stehen nach einigen Berechnungen (PRESS & SIEVER 1998) in den USA 800 Millionen Tonnen jährlich bewegten Materials allein für Gebäude und Verkehrsbau entgegen.

Auslöser

Der Begriff Auslöser (*trigger*) wird unscharf verwendet, viele der in der Literatur zu findenden Beispiele für Auslöser oder auslösende Faktoren gehören auch zu den vorbereitenden Faktoren. Im Deutschen könnte man eine weitere Unterteilung nach den Begriffen Auslösen und Bewirken versuchen. Eine Trennung zwischen diesen Begriffen wäre nur durch eine Festlegung auf eine Zeitspanne möglich, innerhalb derer Massenbewegungen auf die Faktoren reagieren. Erschütterungen wie durch ein Erdbeben oder eine Sprengung, auch Viehtritt oder Verkehr, können Massenbewegung auslösen. Wesentlich sind auch andere statische Aspekte wie z.B. eine Freilegung von Vegetation, die Verwitterungsangriffsflächen schafft, oder eine neue Auflage von Material auf den Hang, sei es Schnee, Eis, Sturzmaterial oder auch anthropogener Auftrag und, vor allem, der Wegfall eines Widerlagers am Fuße eines Hanges. Dieses Widerlager kann z.B. durch Unterschneidung eines Flusses oder durch einen Anschnitt im Straßenbau beseitigt werden, der Hang verliert eine Stütze und rutscht ab. Das Klima steuert durch unterschiedliche jahreszeitliche Auftauperioden wie auch durch Niederschlagsmaxima eine gehäufte Auslösung gravitativer Prozesse. Hierzu gehört der klimabedingte Schwund von Permafrost, welcher den Materialverband vorher zusammengehalten hatte. Als weitere auslösende Faktoren gelten fluvialerosive Hangversteilung, Grundwasserfluss, Zerstörung stabiler Gefügeformen durch Erschütterung (Thixotropie) oder Entsalzung. Auch künstliche Massenanhäufungen (z.B. Halden) auf bisher standfesten Böschungen können durch die Auflast und die Zug- und Druckkomponente der Schwerkraft auslösend für Massenbewegung wirken.

Verlauf

Dieses Stadium ist zeitlich wie visuell schwierig zu erfassen, da es mikroskopische physikalische Vorgänge beinhaltet. Festkörperbewegungen gibt es mit oder ohne gegenseitige Beeinflussung wie Anstoßen und Abbremsen, z.B. bei lawinenartigen oder dünenartigen Bewegungen. Zusätzlich gilt es, die Einwirkung von Wasser, Eis, Korngrößen, Materialbeschaffenheit, Scherflächen, Bewegungsvektoren zu berücksichtigen, des Weiteren die Anlage der Abflussbahnen in ihrem Querschnitt, Fläche, und Volumenbereitstellung. Es bestehen zwei Modelle (KUGLER & SCHAUB 1997) zur Erklärung des Fließverhaltens von Muren, basierend auf zwei Ansätzen der Rheologie (Teilverflüssigung). Im einen Fall werden die schlammstromartigen Murgänge (*mudflows*) als Gemisch von Wasser und Feinmaterial betrachtet. Es wird viskoplastisches Fließverhalten angenommen. Im zweiten Fall der granularen Murgänge (*debris flows* oder *stony debris flows*) geht man davon aus, dass das Fließverhalten von den größeren Steinen bestimmt wird.

Eine stark in den Prozess involvierte Ursache für den Verlauf einer Massenbewegung, die Geschwindigkeit und Ausbreitungsmuster modifiziert, ist das sogenannte **Schmiermittel** (*lubrication*). Diverse Materialien eignen sich als Schmiermittel an der Basis von massenbewegtem Material, meist handelt es sich bei den möglichen Schmiermaterialien um Luft, Erde, zerkleinerten Fels, Feuer und Wasser. Die Forschung hat gezeigt (ERISMANN 2001), dass viele der mutmaßlichen Schmiermittel in der Realität Massenbewegungen wohl nicht unterstützen. Dazu trägt auch die schwierige Beobachtbarkeit einer Massenbewegung bei, die Verfolgung von Schmiermittel ist aufgrund der quantitativ schwer zu erfassenden Entweichung und Verflüchtigung dieser Materialien im Vorgang selbst problematisch. Feldbefunde von dissoziiertem Karbonat sind sehr selten, ob Wasser beteiligt war, lässt sich im Nachhinein noch seltener beweisen. Herkömmliche Vorstellungen, Kissen aus hochkomprimierter Luft oder aus hochenergetischem Staub könnten größere Felsmassen tragen, haben sich als unwahrscheinlich erwiesen (ERISMANN 2001). Gerutschte Landmassen, wie man sie vom Mond kennt, lassen deduktive Vergleichsschlüsse zu, da dort keine Luft, also Atmosphäre, vorhanden ist. Luft entfällt unter diesen Bedingungen als Schmiermittel. Wie in mathematischen Modellen bestätigt, entweicht Luft viel zu schnell, wohingegen Wasser, auch wenn es sehr niedrigviskos ist, nicht

schnell genug entweichen kann. Favorisiert wird durch Reibungswärme thermisch veränderter Fels in geschmolzenem oder chemisch dissoziiertem Zustand. Ebenso denkbar ist aus dem Talboden gepresstes Wasser als Agens der Schmierung, des Weiteren eingebundener Schnee, Eis oder Salz. Die bereitgestellte Masse des Schmiermittels wie auch seine Verflüchtigungsmöglichkeiten beeinflussen den Vorgang. Für das Problem der Vorhersage des *runouts*, also der Länge der Auslaufbahn einer Massenbewegung, ist das Schmiermittel sicherlich eine wichtige Erklärungskomponente.

Formen und Prozesse

Die Beschreibung von Formen wird in der Literatur zahlreich behandelt, nicht zuletzt, weil die Formen einfach zu beobachten sind. Nichtsdestotrotz gibt es inzwischen kaum noch Begriffe und Beschreibungen, die frei von Erklärungen mittels der Prozesse sind.

In der 'Lehrbuchauffassung' werden die Massenbewegungen sogar oft durch die Prozesse gegliedert (EISBACHER & KLEY 2001, KUGLER & SCHAUB 1997, LESER 1997). Gravitative Massenbewegung geschieht demnach als Sturz, Gleiten, Fließen, Kippen, Kriechen und vor allem in der Realität als Kombination mehrerer Prozesse.

Sturz (Felssturz, Bergsturz, Blocksturz, *fall*): beinhaltet eine starke vertikale Fallkomponente von Fels oder Lockermaterial. Meist an steilen Hängen, z.B. im Hochgebirge, begünstigt durch wenig Bewuchs, steile Neigung, Vorbereitung durch Frost-/ Salzsprengung und Auslösung z.B. durch Erdbeben oder anderen Erschütterungen wie Verkehr, Tritt, etc. Ergebnis ist im Idealfall eine parallel zurückverlegte Steilwand mit am Fußpunkt ansetzenden Schutthalde.

Gleiten, Rutschen (Rutschung, Erdrutsch, Felsrutsch, *slide*): die Bewegung erfolgt entlang einer ebenen oder konkaven Gleitfläche, die Gleitmasse zerlegt sich dabei in mehrere blockartige Gebilde, der Material- oder Gesteinsverband bleibt jedoch in sich konsistent. Oft sind hierbei Wasser und Tone als Schmiermittelagens beteiligt. Ergebnis sind im Idealfall komplexe Hangformen ähnlich eines zusammengeschobenen Teppichs mit einem charakteristischen Querschnitt, der sich von seiner Abrissnische bis zum Fuß vielfältig gliedern lässt.

Fließen (*flow*): die Einzelkomponenten können sich hier im Gegensatz zum Gleiten durchaus gegeneinander verschieben, wobei die

Abb. 5:
Photo 04250012:
murähnliche Massen-
bewegung, bei der die
Beteiligung von Wasser
am Transport bereits
einen Grenzfall der
üblichen Definitionen
von Massenbewegungen
darstellt



Einheit des bewegten Materials jedoch erhalten bleibt (d.h. keine Vermischung mit Fremdmaterial). Am besten lässt sich die Konsistenz mit einer breiartigen Masse vergleichen.

Kriechen (Erdkriechen, Solifluktion): kennzeichnend sind hierfür die langsame Bewegungsgeschwindigkeit sowie das 'Hakenwerfen' von geologisch vorgezeichneten Schichten und an der Oberfläche erkennbaren Wuchsform-Krümmungen, z.B. von Bäumen.

Gelifluktion oder Solifluktion bezeichnet hangabwärtige langsame Massenbewegungen von wassergesättigtem Lockermaterial, das von frostodynamischen Prozessen mit Expansions- und Kontraktionsbewegungen sowie durch die Gravitation bewirkt wird. Voraussetzung sind Feinmaterial mit entsprechendem Speicherwasser im Regolith, sowie Hangneigungen von mindestens zwei bis drei Grad (SCHULTZ 2002).

Es gibt eine Vielzahl weiterer Begriffe und Prozesse, wie z.B. das Kippen oder Rotieren, die aber als Unterformen eingeordnet werden können. Die bislang dargestellten Prozesse lassen sich grob unterscheiden nach: rein gravitativ, mit oder ohne Wassereinfluss, und nach ihrer Geschwindigkeit. Bei allen Prozessen und Formen gilt es jedoch zu beachten, dass die Einteilungen und Begriffe höchst artifiziell und vereinfacht voneinander getrennt werden – in der Realität kommen Massenbewegungen meist in komplexer Kombination vor.

Auswirkungen

Als Auswirkungen gibt es zum einen die Massenbewegungen als Vollform in der Landschaft an sich und des Weiteren Folgeaktionen, die durch Massenbewegungen ausgelöst werden. Folgeaktionen sind z.B. Flutereignisse, die durch plötzliche Verdrängung von Wassermassen in einem See, Fluss oder Meer katastrophenartig noch weit entfernte Landstriche und Siedlungen verwüsten können (z.B. KORUP 2002, WEIDINGER 2002). Die Form, also die Vollform einer Massenbewegung, gestaltet die Umwelt um; ob dies positiv in Form von der Neuschaffung von Biotopen oder negativ in Form von Zerstörungen 'katastrophal' wirkt, ist lediglich eine menschliche Sichtweise (HORN & MACDONALD 1975, KOENIG & HEIERLI 1994, LAMPING & LAMPING 1995, MÜLLERMERZ & DECROUEZ 1997).

2.3 Klassifikationen

Die Anwendung einer Klassifikation wäre für eine übertragbare und einheitliche Ansprache der Massenbewegungen wünschenswert. Bemühungen um eine gewünschte einheitliche Klassifikation gibt es in der Fachliteratur bereits. Die Klassifikation nach DIKAU (1996) und dem EPOCH Projekt (EPOCH Projekt: The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community, Contract no 90 0025, 1991-93, wie vorgestellt in DIKAU 1996, S. 2) unterteilt *landslides* (dieser Begriff wird in etwa synonym für Massenbewegung benutzt) nach dem Element des „Mechanismus des Hangversagens“. Die Typen heißen *fall*, *topple*, *slide*, *lateral spreading*, *flow* oder *complex*. *Fall* entspricht hier dem Sturz, *topple* enthält dagegen eine Drehbewegung und erlebt an seiner Basis in der Regel keine vollständige Separation – es entspricht der Felskippen oder Kippung im Lockersubstrat. *Slide* ist mit Rutschung zu übersetzen, bei DIKAU (1996) wird noch zusätzlich unterschieden zwischen *slide rotational* und *slide translational*, was sich mit dem Unterschied zwischen einer konkaven Rutschungsfläche im ersten Fall und einer Blockgleitung auf ebenem Untergrund im zweiten Fall erklären lässt. *Lateral spreading* steht für Felsdriften oder laterale Bewegung von Felsmassen und bezeichnet eine mehrseitig gerichtete Massenbewegung. *Flow* ent-

spricht der Mure oder dem Murengang und enthält eine starke Komponente von Verflüssigung, sei es durch Wasser oder Luft. *Complex* kennzeichnet lediglich alle Typen aus einer Kombination zweier oder mehrerer oben beschriebener Massenbewegungen. In der Realität sind die meisten Massenbewegungen komplex zusammengesetzt.

Das nächste Gliederungselement ist das entsprechende Substrat, also *rock*, *debris* oder *soil*. Danach erfolgt die weitere Unterteilung nach der betroffenen Ausgangsfläche, und nach dem Zustand, in dem sie sich nach einer Massenbewegung präsentiert. Es folgt die Klassifikation der verursachenden Prozesse nach den Kriterien: äußerer Prozess-Einfluss (Verwitterung, Erschütterungen, Wind, Wasserregime, etc.), kausaler Prozess (Entlastung, Auflast, Bewegung horizontal oder vertikal, etc.), Beschreibung (Relief, Substrat, Morphologie, etc.) und Einfluss auf die Stabilität des Hangsystems. Daran schließt sich noch eine Art Vorschlagsliste an für Indikatoren eines *landslides*, gegliedert nach: Ablagerungen, aktiven und inaktiven Bewegungen.

Einige Autoren schlagen eine Trennung der Klassifikationen von Massenbewegung vor, und zwar in eine Klassifikation a): morphologisch, rein beschreibend – zur Ansprache, Erkennbarkeit und zum Ideenaustausch – und in b): eine geotechnische Klassifikation, die sich mehr um die quantitative Erfassung und Möglichkeiten zur technischen Stabilisierung kümmert. Klassifikation a) bemüht hierbei die klassischen Begriffe wie *fall*, *topple*, *slide*, etc., b) dagegen den Porenwasserdruck, Drainage, Reaktivierung und Vorhandensein von Rissen als Indikatoren für Massenbewegung.

Andere, englischsprachige Autoren schlagen eine Klassifizierung nach drei Punkten vor (PRESS & SIEVER 1998): - nach dem Material, ob es verfestigter Fels oder unverfestigtes Lockermaterial ist, – nach der Geschwindigkeit der Massenbewegung, und – ob sich das Material im Verband als Einheit oder wie eine Flüssigkeit vermischend bewegt. In Japan werden laut IWAHASHI et al. (2001) *landslide* Zonen generell in drei Typen klassifiziert: *fracture type*, *volcanic type* und *Tertiary type*. Hangbewegungen wurden in fünf Kategorien klassifiziert: *landslide scarp*, *landslide mass*, *collapse scarp*, *crack* und *stable slope*. Die Einteilung der über 10000 *landslides* von IWAHASHI et al. (2001) in drei Klassen erfolgte für *landslides* mit einer Hauptachsenlänge bis 200 m als klein, von 200 m bis 1 km als mittel (meist

kamen Längen zwischen 300 m und 700 m vor) und für *landslides* über 1 km Länge als groß. Klassifikationen, wie auch die populäre von CRUDEN & VARNES (1996) enthalten eine Kombination aus Material und Bewegungsmechanismen. Die Vorstellung der Terminologie der hier vorgestellten Klassifikationen ist notwendig für das Verständnis des in dieser Arbeit verwendeten Fachvokabulars. Gerade hinsichtlich der Übertragbarkeit des methodischen Ansatzes ist eine Vergleichbarkeit mit internationalen Begriffen unerlässlich.

2.4 Gefahrenerkennung

Möglich ist Massenbewegung bei bestehenden Massenbewegungsformen, erkannt werden kann sie bei beginnender Hangbewegung in Regionen potentieller Gefährdung. Grundlegend erscheint dabei eine Aufnahme von Indikatoren beobachtbarer Veränderungen, *monitoring* von Geländemarken und die Erfassung in Karten. Messungsmöglichkeiten von Massenbewegung bieten:

- Beobachtung, graphische Dokumentation, Luftbilder, Satellitenbilder
- Geodäsie, Inklinometer, Vermessung mittels Messmarken oder GPS
- Messungen geomechanischer Strukturen wie z.B. Spalten, Verformungen; geophysikalische Methoden wie z.B. Gravimetrie, Seismik, Refraktionsseismik, Reflexionsseismik und geoelektrische Verfahren wie z.B. Gleichstromverfahren, Elektromagnetik, Geo-Radar-Echosondierung (BRÜCKL & ROCH 2001).

Gefahrenkarten untersuchen sowohl tiefgründige, Festgestein angreifende Formen als auch flach- bis mittelgründige Formen von Massenbewegung in Lockergestein. Sie versuchen die Faktoren, welche diese auslösen, in Zonen auszuweisen und mit einem erhöhten Gefährdungspotential zu kennzeichnen. Zu den zu markierenden Gebieten auf einer Gefahrenkarte gehören aber nicht nur die Gebiete einer potentiellen Auslösung, sondern auch die eventuell betroffenen Gebiete des Auslaufs einer Massenbewegung. Grundsätzlich gelten jedoch keine allgemeingültigen Regeln für den Inhalt von Gefahrenkarten. Allein in Bezug auf Rutschungen wird eine Einteilung der Gefahrenkarten vorgeschlagen, und zwar

in: Vielweckkarten, Gefahrenzonenkarten, *landslide-susceptibility-maps*, Hangstabilitätskarten, Rutschungspotentialkarten, Risikokarten, geotechnische Karten und ingenieurgeologische Karten. Ingenieurgeologische Zonenkarten ziehen Schlüsse auf Instabilitäten durch die Beobachtung von Neigungsverhältnissen, hydrologischen Verhältnissen und festigkeitsmechanischen Angaben (MOSER 2001). Diese Feingliederung hat ihre Berechtigung, herrscht doch zum einen ein ähnlicher Wirrwarr der Begrifflichkeiten wie auch bei dem Begriff Massenbewegung. Auch die Legendengebung ist, ähnlich vergleichbarer Karten, z.B. geomorphologische Kartierungen, bei der Signaturgebung über das Empfehlungsstadium noch nicht hinaus gekommen (vgl. KNEISEL et al. 1998). Zum anderen ist es notwendig, den Begriff der Gefahr gegenüber den Begriffen Risiko und Risikogefährdung zu definieren. Nach einer UNO-Tagung (KRAUTER 2001, S. 137) versteht man unter dem Begriff Gefährdung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Naturphänomens, unter Risiko dagegen den erwarteten summarischen Verlust (Anzahl von Toten wie von Wertverlust) und unter Risikoabschätzung eine Aussage, die aus drei Komponenten getroffen wird: aus Prozessbeschreibung, einem Modell über die Natur des Prozesses und aus Informationen aus diesem Modell. Danach, so wird gefordert, sollten die Arten von Kartendarstellungen zu gliedern sein, z.B. in Karten der Massenbewegungen, Karten der Aktivitätsbereiche, Karten der Gefährdungsbereiche und Karten der verbindlichen Gefahrenzonen (Risikokarten). Schließlich sind noch die Aussagen mit dem Maßstab einer Karte in Relation zu setzen.

2.5 Häufigkeiten

Aufsehen erregen Meldungen in der Presse und im Fernsehen von katastrophentypischen Überflutungen, wie dem Oderhochwasser, von Lawinenauslösungen durch Skifahrer und auch von Schlammströmen in Italien und in anderen Regionen, welche Häuser und Autos wegreißen. Es wird öffentlich die Frage gestellt, ob diese Ereignisse sich in jüngerer Zeit häufen und ob der Mensch oder das Klima oder beides daran mit Schuld tragen. Berücksichtigt werden muss dabei der Anstieg der Informationsverbreitung durch die Medien. Solche Ereignisse wurden

früher der Öffentlichkeit nicht in gleichem Maß wie heutzutage bekannt. Des Weiteren sind durch die Verbesserung wissenschaftlicher Methoden feinste Messungen erst seit jüngerer Zeit möglich, welche zusätzlich Aufmerksamkeit auf das Thema Massenbewegung lenken.

Die **Häufigkeit** von Massenbewegung ist von Tektonik, Klima und menschlichem Eingriff abhängig, insbesondere von der Änderung dieser Faktoren. Charakteristisch ist das unregelmäßige und in ihrem Zeitpunkt nicht genau vorhersagbare Auftreten, sowie die Möglichkeit einer Reaktivierung. Quantitative kalkulierbare Aussagen über Häufigkeiten sind wünschenswerte Größen für Siedlungsplanung und Versicherungen. Doch leider ist dies aufgrund der komplexen Faktoren sehr schwierig zeitlich verlässlich einzuschätzen. Es gibt nur wenige quantitative Aussagen, die zudem stark im regionalen Kontext gesehen werden müssen und kaum übertragbar sind. Zeitlich zeigt sich z.B. für die Alpen, dass nicht alle großen Bergstürze in die bisher angenommene Hauptaktivitätsphase im Spätglazial oder frühen Postglazial einzuordnen sind, sondern sich im einzelnen (in den Bayerischen Alpen) um ca. 2800-3700 BP am Ende des postglazialen Klimaoptimums ereigneten, wobei Permafrostdegradation eine wichtige Rolle gespielt haben dürfte (JERZ 1999). Im Yosemite Valley liegt der Wiederholungszeitraum von Felsstürzen mit Volumina von mehr als 30.000 m³ bei etwa 11 Jahren, die kleineren Steinschläge sind fast jährlich zu erwarten (WIECZOREK 1998). Bei extremen Wirbelstürmen, wie z.B. bei Hurrikan Mitch in Nicaragua, kann die Wahrscheinlichkeit für eine Wiederholung eines solchen Sturmes und der damit einhergehenden Massenbewegungen auf ca. 100 Jahre angesetzt werden (PALLÁS et al. 2004). Diese groben Mittelwerte sind jedoch genauso kritisch zu sehen wie die Angabe durchschnittlicher Niederschlagsmengen in Trockengebieten. Die natürliche Variabilität der Ereignisse (*events*) erschwert die Anwendung solcher exakten Aussagen. Die Häufigkeit kann auch als Frequenz pro Flächeneinheit aufgefasst werden. Sie stellt in diesem Falle einen quantitativen Vergleich zwischen natürlichen und menschlich beeinflussten Gebieten dar, z.B. nach dem Bau einer Straße. So können CALCATERRA et al. (1998) über ein Gebiet in Spanien aussagen, dass nur vier von 15 Fällen von Massenbewegungen pro Quadratkilometer natürlich auftraten, alle anderen waren anthropogen beeinflusst, da sie durch Straßenbau ausgelöst worden waren.

2.6 Auslaufstrecke

Von Simulationsmodellen zu Massenbewegung wird häufig eine Aussage über die Auslaufstrecke (*runout-distance*) erwartet (OKURA et al. 2000[1], OKURA et al. 2000[2]). Für die Modellierung des Vorganges wird der komplexe Ablauf eines Steinschlages simplifiziert: vereinfacht wird der Faktor Hanggeometrie und die bewegte Masse. Letzterer Faktor wird in zwei Ansätzen verfolgt: der *lumped mass* Ansatz und der Ansatz, der nur den Mittelpunkt der bewegten Masse in das Modell einbezieht. Das Problem der bewegten Masse liegt in den komplexen Interaktionen der einzelnen Gesteinspartikel untereinander im Verlauf der Bewegung. Mathematisch sind diese Bewegungen in ihrer Vielzahl an Folgeereignissen so komplex, dass sie in den Bereich der Chaos-Theorie gelangen und herkömmliche Simulationsprogramme überfordern. Das gleiche gilt auch für die Simulation der Hanggeometrie für den Wegeverlauf einer Massenbewegung an einem Hangprofil in drei Dimensionen. Es gibt jedoch bereits empirische Ergebnisse aus vereinfachten Experimenten mit Steinschlagsmassen, welche interessante Korrelationen zwischen Auslaufstrecke und Volumen des Steinschlages ergeben. So nimmt die Auslaufstrecke bei einer Erhöhung des bewegten Volumens einer Masse aus würfelförmigen Granitblöcken zu. Das Gravitationszentrum bewegt sich hingegen bei einer Erhöhung der Anzahl der Granitblöcke weniger weit als bei einer geringeren Granitblockmasse (OKURA et al. 2000[2]). Dieses Ergebnis ist bei Betrachtung der verschiedenen Ansätze zu *lumped mass* oder *gravity center* zu beachten.

Generell nimmt die Länge einer Massenbewegungen, oft gemessen in einem *angle of reach*, mit Zunahme des Volumens einer Massenbewegung zu. Der *angle of reach* verbindet auf einem Schenkel den Abrisspunkt einer Massenbewegungen mit dem Punkt der äußersten zurückgelegten Entfernung der bewegten Masse. Der Winkel nimmt also ab mit zunehmendem Volumen. Auch ein Zusammenhang mit der Breite der Massenbewegungsform ließ sich beobachten, mit zunehmender Breite der bewegten Masse erhöhte sich die horizontal zurückgelegte Strecke (DAI & LEE 2002). Der durchschnittliche *angle of reach* betrug in dieser Studie 27,7°. Jedoch ist diese Methode mit vielerlei Fehlerquellen behaftet, die Einflussnahme anderer Faktoren als dem Hangwinkel



wird vernachlässigt und das Volumen einer massenbewegten Masse ist in der Realität schwer zu schätzen. Bei Murgängen gilt das Problem, dass sie lange Distanzen zurücklegen und häufig in das Drainagesystem münden, in welchem sie in den Einflussbereich des Oberflächenabflusses geraten. Dadurch wird der *angle of reach* verfälscht (vgl. PALLÁS et al. 2004). Ursprünglich war die Untersuchung der Auslaufstrecke ein wichtiges Anliegen der vorliegenden Arbeit. Aussagen über die Auslaufstrecke von Massenbewegungen sind ein wichtiges Element, um das Ausmaß der Auswirkungen auf den Naturraum einschätzen zu können. Aufgrund nicht ausreichender geotechnischer Daten zur Kalibrierung modellhafter Untersuchungen anhand des Digitalen Geländemodells konnte dieses Vorhaben (noch) nicht verwirklicht werden.

2.7 Ausmaß

Beim räumlichen Ausmaß von Massenbewegungen muss zwischen natürlich und anthropogen verursachten Massenbewegungen unterschieden werden. Natürlich ausgelöste Massenbewegungen erreichen in Hochgebirgsregionen teilweise gewaltige Ausmaße, welche allein durch ihre Größe menschliche Siedlungstätigkeit betreffen können. Die spektakulären Auswirkungen sind solche von entweder großer Masse oder aber von schneller Geschwindigkeit, einhergehend mit aufsehenerregender Verwüstung. Sie prägen das Bewusstsein der Öffentlichkeit durch die schlagartige Veränderung der Landschaft und

Abb. 6: ▲ Photo i25-02-24: die zeitlichen Abstände wie auch die Bewegungsgeschwindigkeiten von massenbewegtem Schutt variieren sehr stark. Selten sind die Auslaufstrecken von Massenbewegungen derart einfach einzuschätzen wie in diesem Beispiel am Staudamm bei Karaj.

die Bedrohung der materiellen Güter weitaus stärker als kleinförmige und langsam vonstatten gehende Massenbewegungen. Nur ein Beispiel von vielen ist das so bezeichnete Desaster des Vaíont Dammes in den Italienischen Alpen von 1963, in dem 250 Millionen Kubikmeter Fels das Wasser aus dem Damm in das darunter liegende Tal verdrängte und 2500 Menschen tötete. In den Anden begrub 1970 in Peru (HARJES & WALTER 1999) die Huarascafelawine zwei Städte und 20 000 Menschen unter sich. Hangdeformationen treten in 48% der Fläche des Gesamtgebietes des Handlovská Kotlina Beckens in der Slowakei auf und 1960 zerstörte eine katastrophale Massenbewegung Teile der Stadt Handlová (PAUDITS & BEDNARIK 2002). Auch Italien ist häufig von Massenbewegungen betroffen. 1998 geschahen in Pizzo D' Alvano bei Neapel innerhalb von 8-10 Stunden mehr als 100 Rutschungen in den Andosolen, die das Kalksteinrelief bedeckten, und forderten 161 Todesopfer (BASILE et al. 2003). Wenn – auch in wissenschaftlichen Artikeln – die Rede von einer weltweiten Zunahme katastrophaler Massenbewegungen mit jährlichen wirtschaftlichen Schäden in zweistelliger Milliardenhöhe die Rede ist (KRAU-

TER 2001), muss dabei differenziert werden, dass dies in Beziehung zu menschlicher Siedeltätigkeit zu setzen ist. Mit der Verdopplung der Bevölkerung in der San Francisco-Bay Region in den Jahren 1955-1982 ging auch eine starke Ausweitung baulicher Eingriffe in das Hanggelände einher. 1970 waren 12 000 Hangrutschungen bekannt, 1980 schon 70 000, 1982 wurden durch ein Unwetter allein 18 000 Rutschungen ausgelöst. Eindrucksvoll sind auch Zahlen aus anderen extrem gefährdeten Gebieten – so hat die Türkei einen von potentiellen und aktiven Rutschhängen betroffenen Anteil von 92% der Gesamtfläche, 95% der Bevölkerung sind daher von Rutschungen gefährdet (KRAUTER 2001). Neuseeland ist zu 36% seiner Fläche von historischen oder aktiven Massenbewegungen betroffen. Einige Autoren sprechen von Massenbewegungen als der räumlich am weitest verbreiteten Gefahr auf der Erdoberfläche (ZINCK et al. 2001). Mehr als 95% aller Katastrophen und Todesopfer, die mit Massenbewegungen in Beziehung stehen, entstehen in Entwicklungsländern. Der wirtschaftliche Verlust beläuft sich nach einigen Schätzungen auf zwei bis fünf Milliarden US\$ (wie zitiert in: TEMESGEN et al. 2001).

2.8 Gegenmaßnahmen

Generell sind darunter menschliche Eingriffe zu verstehen, sei es auf administrativer oder technischer Ebene. Es werden darunter Restriktionen der Siedlungs- und Nutzungsentwicklung, der Aufbau eines Frühwarnsystems und die Stabilisierung der betroffenen Gebiete mittels geotechnischer Maßnahmen verstanden (PALLÁS et al. 2004). Konkret gehören hierzu Sperrenbau und jegliche Hangsicherungsmaßnahmen, seien es nun hangparalleles Pflügen, Sperrung von Weideflächen wegen Viehtritt, gezielte Anpflanzungen oder auch Straßentrassensicherungen (MOSER 2002). Bauliche Elemente bei Murganggefährdung wie auch bei Hochwasserschutz in Wildbächen sind Wildbachsperrern, Ablenkdamme, Murbrecher, Rückhaltebecken, Konsolidierungssperren und Geschieberoste (RICKENMANN 2001, EISBACHER & KLEY 2001). Dazu gehören auch Aufforstungsmaßnahmen (ATKINSON & MASARI 1998) zur Verminderung der Erosionsanfälligkeit im oberen Teil der Bäche und an den

Talflanken. Die Drainage der überlagernden Kolluviumschicht wird häufig als eine wirkungsvolle Methode vorgeschlagen, um die Wassersättigung des darunter befindlichen Materialkörpers zu stabilisieren (van ASCH 1996). In Hongkong wird die Flächenversiegelung durch eine anthropogene Bodenpflasterung aufgelockert. Ein Gemisch aus Boden, Kalk und Zement, genannt *chunam*, erhöht die Porenwasserdrainage (AU 1998). Zur Sicherung gegen Massenbewegungen gehören auch Lawinengalerien und Spritzbeton, Stahlmatten und Felsnägel, auch Durchlässe für *interflow* (HARJES & WALTER 1999, ZENKE 1999). Straßenanschnitte an verwitterten mediterranen Schiefen in Spanien wurden im Böschungswinkel auf 13 - 23° verflacht und teilweise mit Drahtnetzen gesichert (CALCATERRA et al. 1998). Auch das Schließen von Steinbrüchen und Flussmauernbau wird als förderlich erachtet (PANIKAR & SUBRAMANYAN 1996). Die Sicherung ist jedoch nur bis zu einer gewissen Ereignisgröße und auch nur zeitlich begrenzt möglich,

z.B. bis zur Auffüllung von Rückhaltebecken. Diese Sicherungsmaßnahmen haben ihren Preis, daher ist eine Ausweisung von gefährdeten Zonen ebenfalls sinnvoll und mitunter der Vorstellung von technischer Bezwingbarkeit jedweder Naturgröße durch den Menschen vorzuziehen.

Fazit

All diese verschiedenen Stadien, Prozesse, Formen und Auswirkungen von Massenbewegungen lassen sich im Untersuchungsgebiet aufdecken und müssen zu einer Gefährdungseinschätzung der einzelnen auslösenden Faktoren von Massenbewegungen in die Analyse einbezogen werden. Nur unter dem Blickwinkel der holistischen Betrachtung aller Einzelelemente einer Massen-Bewegung können die einzelnen beeinflussenden Faktoren entschlüsselt werden. Vorschläge und Bewertungen bezüglich der Faktoren, der Vorhersagemöglichkeit und von eventuellen Gegenmaßnahmen sind in den Kapiteln 8 und 9 enthalten.



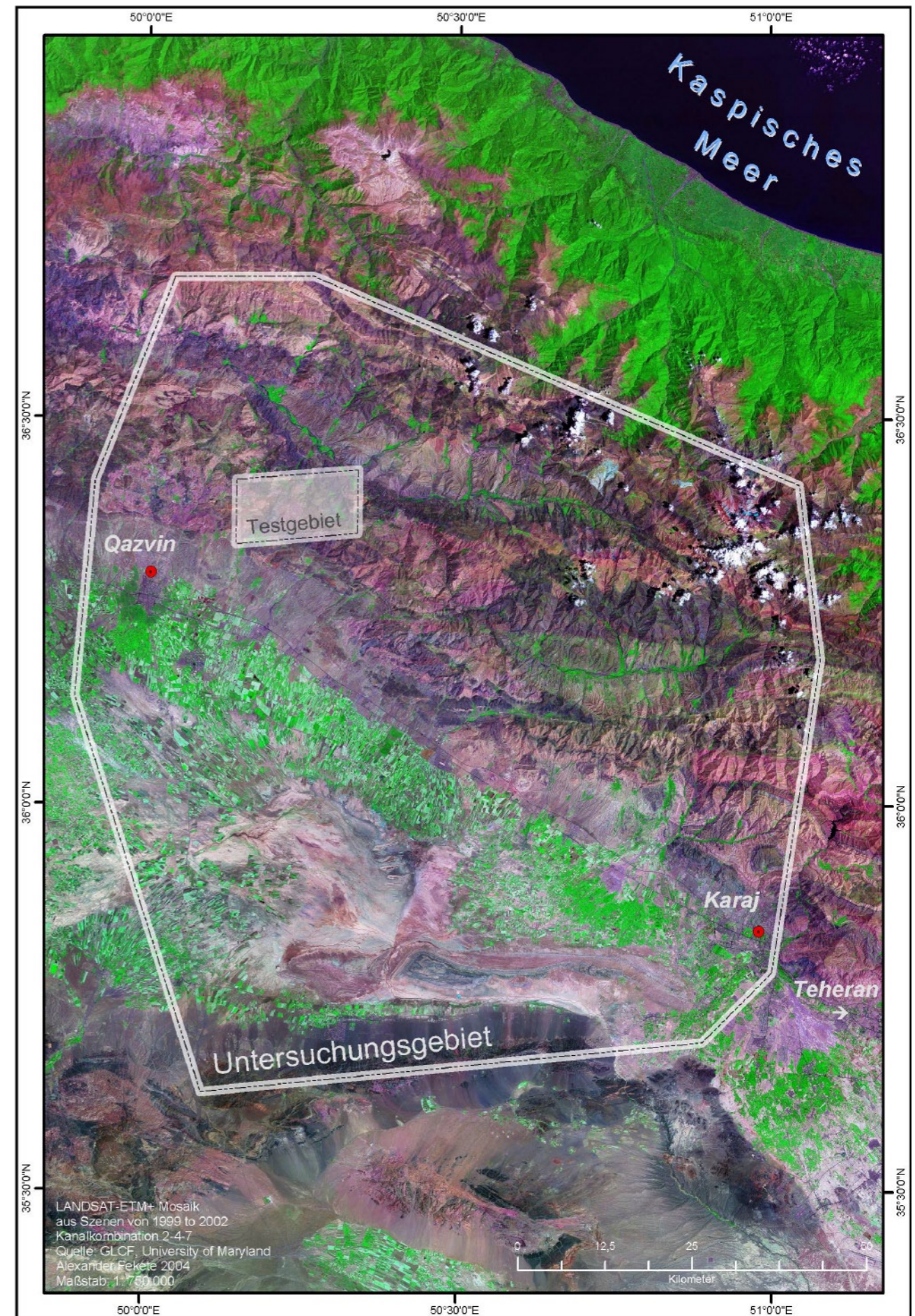
Abb. 7: Photo 04250029: Verlust an nutzbarer landwirtschaftlicher Fläche durch Erosion und Massenbewegung

Kapitel 3.

Vorstellung von Untersuchungsgebiet und Testgebiet



Abb. 8 ▲ & 9: ►
Karten 1 & 2: Lage
von Untersuchungsgebiet und Testgebiet



3.1 Naturraum und Lage

Das Untersuchungsgebiet umfasst einen Ausschnitt aus dem Elburs-Gebirge im Norden des Iran, etwa von 49°30' bis 52°E und von 35° bis 37°N. Das Elburs-Gebirge ist

Begriffsdefinition

Mit den Begriffen „Untersuchungsgebiet“ und „Testgebiet“ werden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche, folgendermaßen definierte Gebiete bezeichnet: das Untersuchungsgebiet stellt einen repräsentativen Ausschnitt aus dem Naturraum des untersuchten Gebirgsgebietes sowie des Gebirgsvorlandes dar. Das Untersuchungsgebiet entspricht dem Arbeitsgebiet des DRYSATMAP Projektes. Das Testgebiet bezeichnet hingegen hiervon einen kleineren Ausschnitt aus dem Gebirgsbereich, wie er für eine Modellierung der Gefährdung durch Massenbewegung sinnvoll erschien.

Teil des alpidisch-himalayischen Gebirgsgürtels, dessen Gebirgsketten im Untersuchungsgebiet etwa von Westnordwest nach Ost-südost verlaufen. Der Alam Kuh ist mit 4860 m der höchste Berg im Untersuchungsgebiet. Südlich läuft die Abdachung des Gebirges in das zentraliranische Hochland aus, das auf 700 m bis 1300 m Höhe NN liegt. Nördlich wird das Gebirge vom Kaspischen Meer gesäumt, mit Höhen bis -27 m NN.

Die Gebirgsregion unterscheidet sich naturräumlich stark von den nördlich und südlich gelegenen Vorlandsgebieten. Diese Vorlandsflächen sind ebenfalls voneinander sehr verschieden. Dies spiegelt sich in der Variabilität des Naturraumes wider. Die sich durch hohe Niederschlagsmengen auszeichnende Kaspische Küstenregion (z.B. Rasht mit 1350 mm) kontrastiert in ihrer üppigen mediterran-subtropischen Vegetation deutlich zu dem südlich gelegenen semiariden bis ariden Hochland, der Dasht-e Qazvin. Ein naturräumlicher Gegensatz ist auch an der Klima-

scheide des Nordkammes des Gebirges zu beobachten. Höhenzonierung sowie niederschlagsbedingte Anpassungen der Vegetation durch die Leelage kennzeichnen den Gebirgsraum. Intramontane Becken innerhalb des Gebirgszuges streichen wie auch die Hauptfaltungachsen von Westnordwest nach Ost-südost und charakterisieren sich als eigenständige kleinere Naturräume (siehe Abbildung rechts und Photo auf nachfolgender Seite).

Hauptentwässerungsachsen folgen häufig dieser Streichrichtung und führen mit den Flüssen Taleqan Rud, Alamut Rud und Shah Rud auch durch die jeweiligen intramontanen Becken. Die Hauptentwässerung erfolgt über den Sefid Rud im Nordwesten nach Norden ins Kaspische Meer. Die Dasht-e Qazvin drainiert über den Rud-i Shur südostwärts in das Zentraliranische Plateau.

3.2 Abgrenzung des Untersuchungsgebietes

Das in dieser Arbeit untersuchte Gebiet betrachtet einen Ausschnitt der südlichen Abdachung des Elburs-Gebirges. Die westliche Begrenzung liegt nordöstlich von Qazvin, die östliche nordwestlich von Teheran. Nördlich lässt es sich durch eine Luftlinie von der Wasserscheide nördlich des Alamutbeckens (50°E, 36°40'E) bis in das Gebirgsland nördlich von Karaj abgrenzen. Südlich wird es durch die Luftlinie Qazvin - Teheran begrenzt. Grund für diese Abgrenzung ist die Homogenität des zu untersuchenden Naturraumes bezüglich der reliefbedingten, klimatischen und anthropogenen Faktoren sowie die Verfügbarkeit an Daten.

Das Relief zeichnet sich durch zahlreiche Flächeneinheiten in unterschiedlichen Niveaus und verschiedenen Graden an Hangneigungen und Höhenstufungen aus. Innerhalb dieser Reliefunterschiede sind qualitative Unterschiede der Stabilitätsbedingungen für Massenbewegungen zu erwarten. Weiterhin liegt das Gebiet in einem relativ homogenen klimatischen Großraum. Er wird durch die nördliche Klimascheide des Elbursanstiegs gegenüber dem Klima der Kaspischen Tiefebene abgegrenzt. Auch die Hauptwasserscheide folgt diesem nördlichen Gebirgskamm, und die hydrologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet sind durch einen gleichartigen Charakter

Abb. 10: ▼ Photo i35-02-0: Luftaufnahme vom südlichen Gebirgs-vorland mit Blick auf das Gewerbegebiet westlich von Teheran

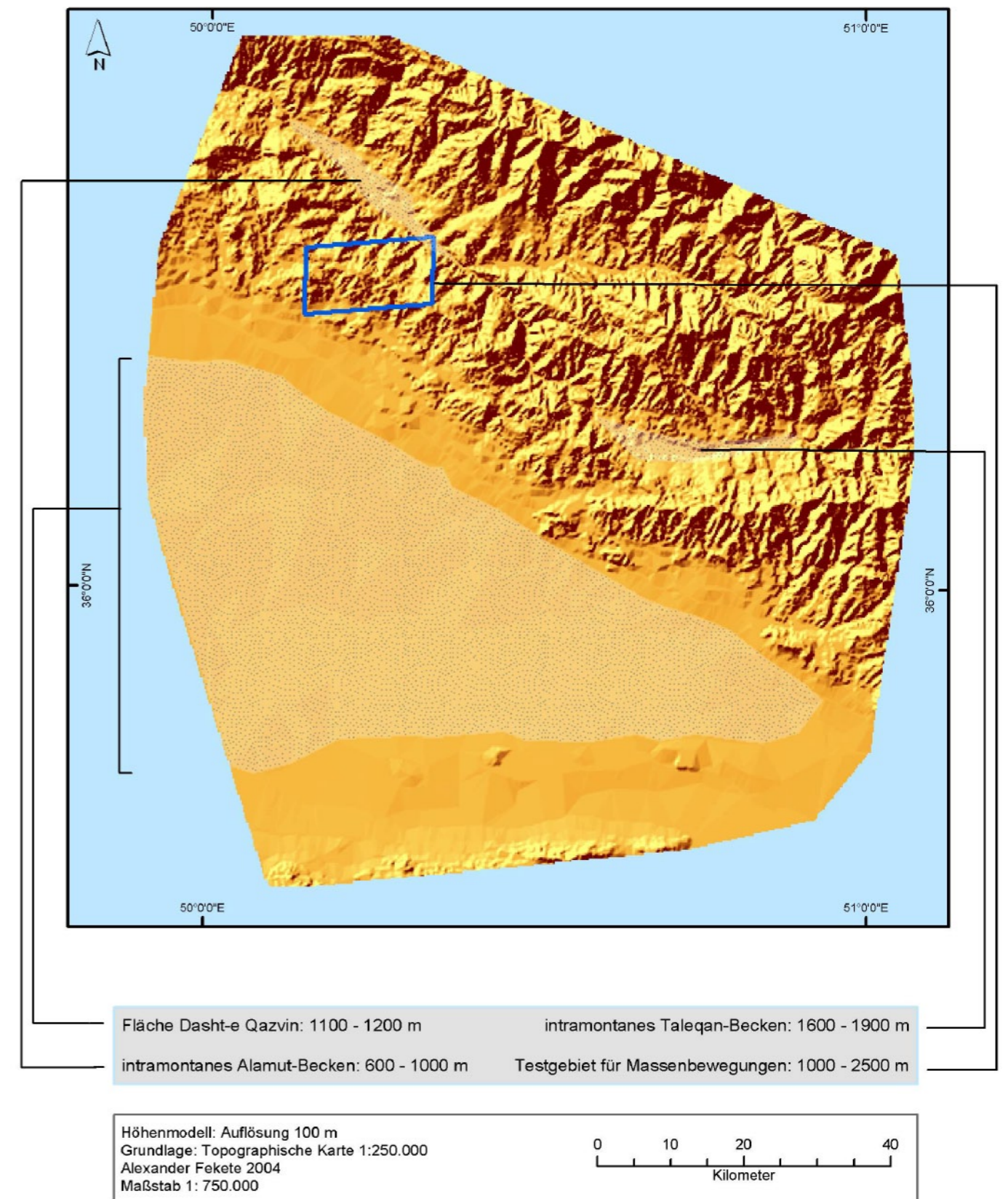


Abb. 11: ▲ Karte 3: Reliefeinheiten von Untersuchungsgebiet und Testgebiet und ihre jeweilige Höhenlage über NN

Abb. 12: ► Photo i16-02-23: Lage von Mo' allem Kalāyeh im intramontanen Alamutbecken an der nördlichen Grenze des Testgebietes



des Flussnetzes gekennzeichnet. Böden, Vegetation, wie Landnutzung unterstreichen in einer kleinräumigen Variabilität, jedoch großräumigen geozonalen Ähnlichkeit, die Homogenität dieses Naturraumes.

3.3 Abgrenzung des Testgebietes

Das kleinere Testgebiet wurde in einem Geländebereich ausgewählt, der durch die ausgebaute Paßstraße ins Alamutbecken gut zugänglich war und in dem ausreichend Daten gewonnen werden konnten. Hohe Reliefenergie herrscht bei Höhen-niveaus von 980 m bis zu 2540 m NN im gesamten Testgebiet vor. Dies führt unter anderem zu allseits hohen Abflussmengen. Die südliche Grenze ist gleichzeitig eine Klimascheide und Wasserscheide am Gebirgskamm gegenüber der südlichen Gebirgsabdachung. Nach Norden folgt

von dort ein klimatisch homogener Gebirgsraum, der sich nur durch seine Höhenstufe weiter gliedert, bis er das Alamutbecken erreicht. Die Exposition dieser nach Norden einfallenden Abdachung bedingt ein eigenständiges homogenes Mikroklima mit vergleichbarem Oberflächenabfluss, Bodenbildungs- und Vegetationsbedingungen. Das Gesteinsmaterial ist von alter wie junger Tektonik gleichermaßen beeinflusst worden. Das gleiche gilt höhenstufungsabhängig für seine klimamorphologische Geschichte. Das Gebiet ist durch die Koordinaten 36°20'13"N/ 50°8'45"E, 36°25'14"N/ 50°8'41"E, 36°26'1"N/ 50°20'10"E und 36°21'5"N/ 50°20'12"E umgrenzt und beinhaltet eine Fläche von ca. 17 km x 9 km.

Abb. 13: ► Bergdorf inmitten landwirtschaftlich genutzter Kulturlandschaft im Testgebiet



Abb. 14: ► Passstraße über den südlichen Gebirgskamm in das Testgebiet

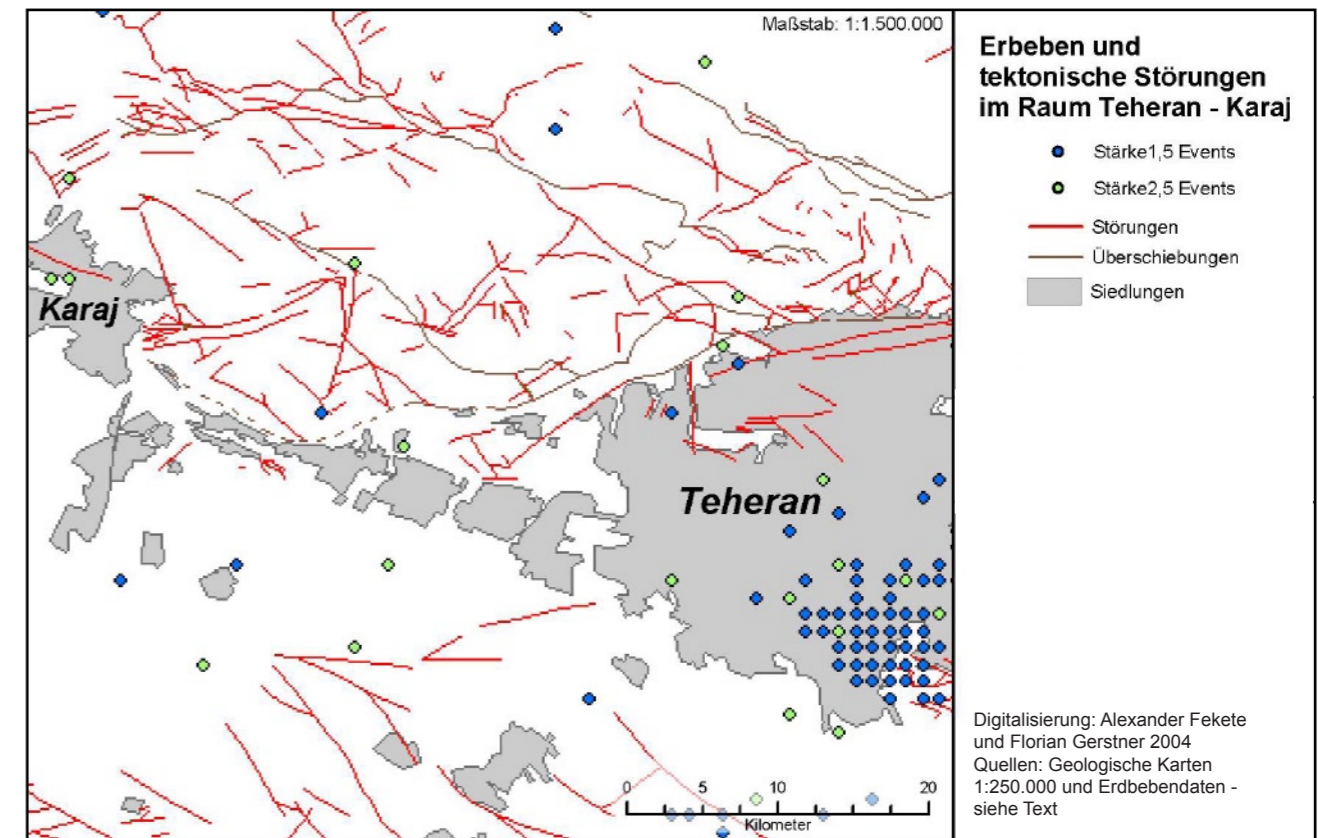
Kapitel 4.

Die Region im Spannungsfeld zwischen Naturgefahren und Landnutzung

Abb. 15: ▶ Photo i14-02-29, GPS-Punkt TRENNI, 1906 m NN: Verlust von Bodenmaterial in intensiv genutzter Landschaft im Testgebiet



4.1 Erdbebengefahr und Massenbewegungen



Das Erdbeben, das die Stadt Bam am 27.12.2003 zerstörte, rief der Weltöffentlichkeit zuletzt ins Bewusstsein, dass der Iran zu den seismisch aktivsten Regionen der Erde zählt. Ähnlich starke Beben erschüttern immer wieder den Elburs und bedrohen die vorgelagerten Millionenstädte Teheran und Karaj (AKASHEH & BERCKHEIMER 1983). Die Region liegt an einem aktiven Gebirgsrand, die Arabische Platte trifft hier auf die Europäische Platte. Allein in Teheran liegen fünf große Störungen innerhalb einer Entfernung von weniger als 20 km, bzw. verlaufen durch die Stadt.

Das Erdbeben von Bam lenkte die Aufmerksamkeit wieder auf Teheran als Hauptstadt, die mit ca. 12-15 Millionen Einwohnern im direkten Umfeld großer Störungzonen einer enormen Bedrohung von Infrastruktur und Menschenleben ausgesetzt ist. Sogar eine Verlegung der Hauptstadtfunktion wird wegen dieser Gefahr diskutiert. Ein starkes Erdbeben wie in Bam würde Untersuchungen zufolge 80% der Gebäude in einigen Stadtteilen Teherans zerstören, ca. 480 000 Gebäude innerhalb des Stadtbereichs, und könnte dabei 380 000 bis 720 000 Men-

schenleben fordern (THE GUARDIAN 29.12.03 & 06.01.04.). Zwar muss man solchen Meldungen aus den Medien mit der nötigen Skepsis begegnen, wenn man die Ergebnisse der Untersuchungen nicht aus erster Hand vorliegen hat. Auch werden die meisten neuen Gebäude durch Stahlskelette erdbebensicher errichtet.

Dennoch sprechen die Erdbebenhäufigkeiten

Abb. 16: ▲ Karte 4: Erdbeben und tektonische Störungen im Raum Teheran - Karaj

Abb.: 17 ▼ Photo i34-02-32: Lage von Teheran am Südrand des Elbursgebirges



Abb. 18: ► Diagramm 1 – Quelle: CRED (Center for Research on the Epidemiology of Disasters): Massenbewegungen stehen im Iran an sechster Stelle der aufgenommenen Naturkatastrophen von 1909 – 2003

	# of Events	Killed	Injured	Homeless	Affected	Total Affected	DamageUS (000's)
Drought	4	0	0	0	62,625,000	62,625,000	9,500,000
ave. per event		0	0	0	15,656,250	15,656,250	2,375,000
Earthquake	78	158,816	146,817	123,555	1,700,026	1,970,398	10,843,366
ave. per event		2,036	1,882	1,584	21,795	25,262	139,018
Epidemic	3	372	0	0	2,500	2,500	0
ave. per event		124	0	0	833	833	0
Extreme Temperature	1	158	0	0	0	0	0
ave. per event		158	0	0	0	0	0
Flood	59	7,538	529	190,620	3,361,501	3,552,650	3,727,220
ave. per event		128	9	3,231	56,975	60,214	63,173
Slides	4	116	44	0	100	144	0
ave. per event		29	11	0	25	36	0
Wild Fires	1	0	0	0	0	0	0
ave. per event		0	0	0	0	0	0
Wind Storm	8	308	85	5,500	3,700	9,285	28,300
ave. per event		39	11	688	463	1,161	3,538

Created on: Mar-23-2004. - Data version: v04.02

Source: "EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, www.em-dat.net - Université catholique de Louvain - Brussels - Belgium"

*Events recorded in the CRED EM-DAT. First Event: Jan/1909, Last Entry: Dec/2003.

*Epidemics included: Diarrhoeal/Enteric(Cholera), Diarrhoeal/Enteric(Acute watery diarrhoeal syndrome).

Abb. 19: ▼ Photo i9-02-12: Stahlskelettbauweise zur Sicherung gegen Erdbebenschäden, Campus der Faculty of Natural Resources in Karaj



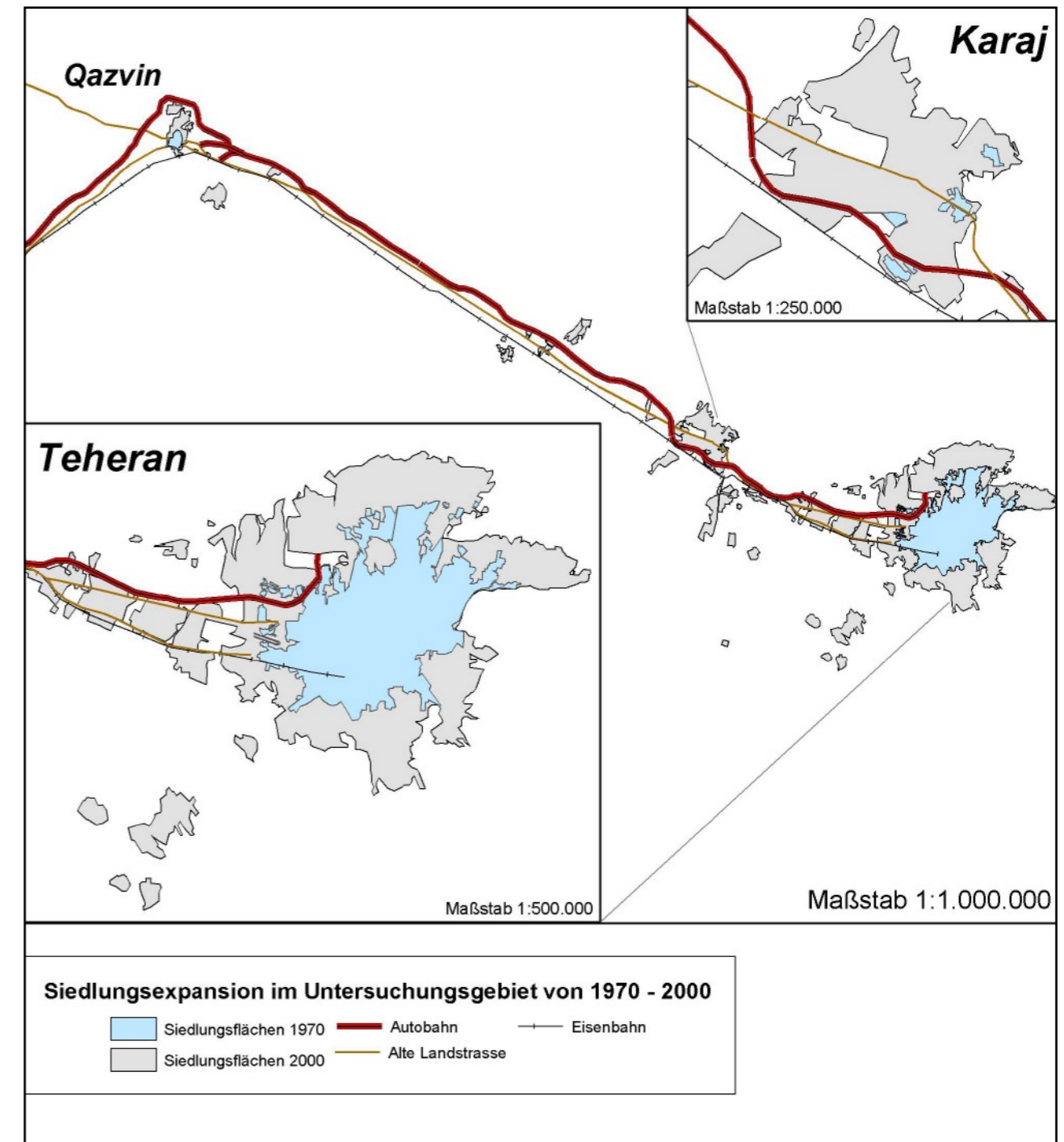
und die tatsächlichen Zerstörungen der letzten Jahrzehnte in dieser Region eine deutliche Sprache. Bei einem Erdbeben der Stärke 7,7 auf der Richterskala kamen am 21.06.1990 im Nordwesten Irans 50 000 Menschen ums Leben, im Juni 2002 zerstörte ein Erdbeben der Stärke 6,3 in den Provinzen Qazvin und Hamedan 10 Dörfer völlig, machte zehntausende Menschen obdachlos und forderte mindestens 216 Menschenleben (SÜDDEUTSCHE ZEITUNG vom 24.06.02). Diese beiden Beispiele aus der direkten Nachbarschaft des Untersuchungsgebietes unterstreichen die Nähe und Präsenz dieser Gefahr. Erdbeben sind einer der Hauptauslöser von Massenbewegungen, welche ihrerseits große Zerstörungen anrichten können, und das auch noch in beträchtlicher Entfernung vom Erdbebenherd (z.B. LIAO & LEE 2000). Damit sind auch Gebiete bedroht, die nicht von Erdbeben direkt betroffen sind.

4.2 Für das Auftreten von Massenbewegungen relevante Landnutzung

Die Hauptimpulse der Siedlungsentwicklung am südlichen Elburstrand gingen seit 1970 verstärkt von Teheran als Millionenstadt mit ihrer Hauptstadtfunktion aus (siehe Karte und vgl. EHLERS 1980). Zum einen wuchsen große Städte wie Teheran, Karaj und Qazvin enorm (vgl. BAHRAMBEYGUI 1976).

Zum anderen stieg auch die Zahl der Verkehrsachsen zwischen diesen Städten. Diese brachte einerseits den Großstädten Wachstumsimpulse, andererseits förderten diese Verkehrsachsen auch das Wachstum von kleineren Siedlungen entlang dieser Hauptverkehrswege. Das flächenintensive Wachstum von Städten wie Teheran und Karaj ist

Abb. 20: ▼ Karte 5: Expansion der Siedlungsfläche im Raum Teheran – Qazvin innerhalb von nur 3 Jahrzehnten



bereits innerhalb des bemerkenswert kurzen Zeitraums von 1970 bis 2000 eindrucksvoll durch die Kartierung anhand von Satellitenbildern nachzuziehen.

Das Wachstum von Karaj ist von den Städten der Region am eindrucksvollsten (siehe Detailkarte). 1970 bestand Karaj noch aus einer Ansammlung kleiner Dörfer, 2000 präsentiert sich die Satellitenstadt in ihrer verkehrsgünstigen Lage in nur ca. 35 km Entfernung zu Teheran als Millionenstadt mit ca. 1,5 Millionen Einwohnern. Gründe für das rasche und flächenintensive Wachstum sind die für Pendler günstige Nähe zu Teheran und die hervorragenden Verkehrsverbindungen durch Autobahn und Schnellbahn. Auch die Fläche und Einwohnerzahl Teherans nahmen stark zu. 2002 schwankten die offiziellen und inoffiziellen Zahlen zwischen 8 bis 16 Millionen Einwohnern (vgl. von BARATTA 2001). Die gesamte Region in unmittelbarer Nähe zur Verkehrsachse von Teheran über Karaj nach Qazvin erhielt starke Wachstumsimpulse, welche anhand der Siedlungsfläche zu verfolgen sind. Diese Haupt-Verkehrsachse bestand 1970 noch aus der Landstrasse und einer Eisenbahnlinie, zwischen 1970 und 2000 kam eine vierspurig bis sechsspurig ausgebaute Autobahn hinzu. Großräumige Bedeutung erhält diese Achse nach Westen

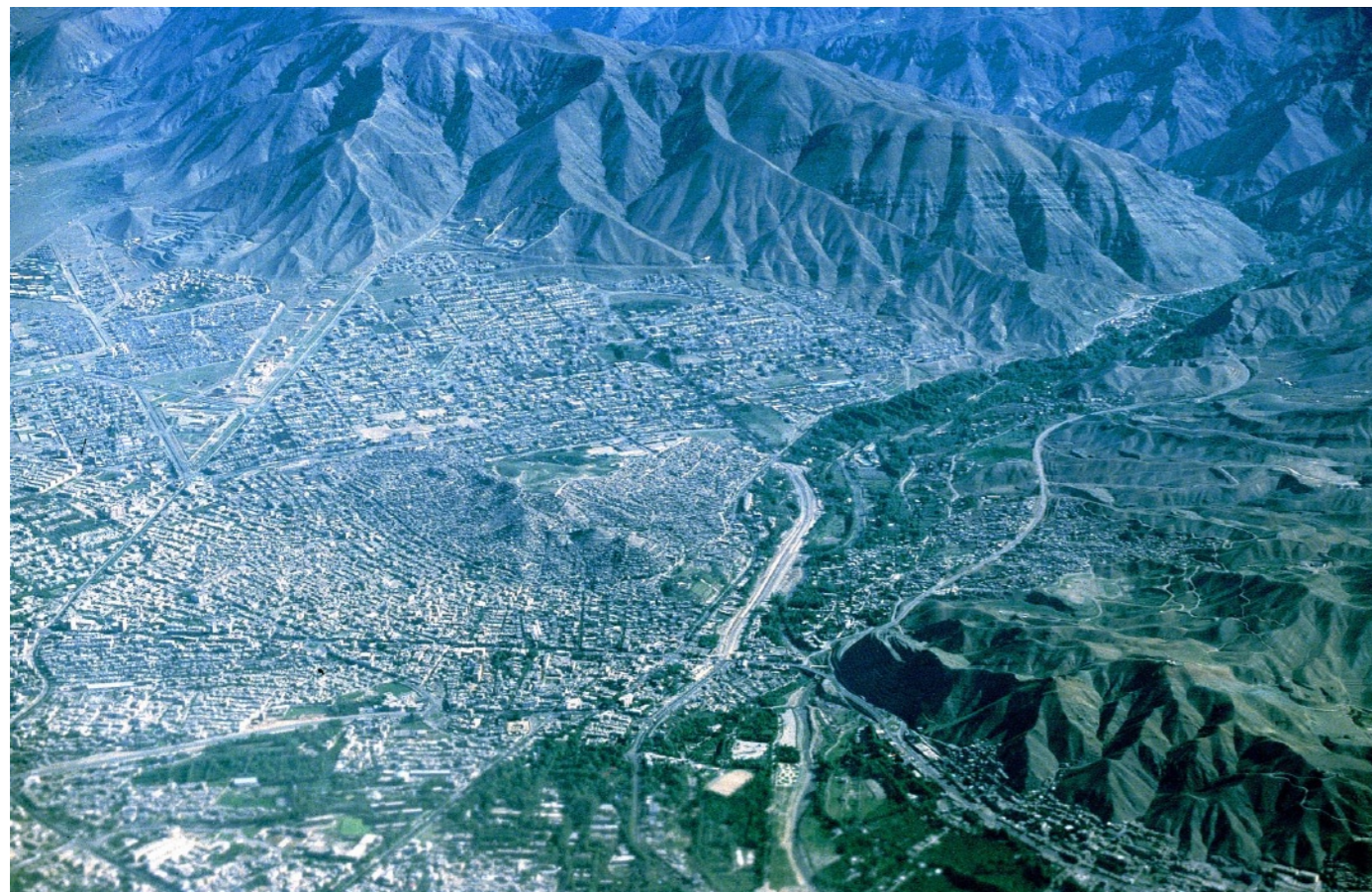
durch den Autobahnanschluss Qazvin-Zandjan, welche den Transitverkehr bis Tabriz erschließt. Nach Osten wirken eine Vielzahl von Verkehrsachsen, welche auf Teheran mit seiner zentralen Bedeutung zulaufen.

Siedlungen unmittelbar südlich der Verkehrsachse existieren kaum, da sich dort eine ebene, vegetationsarme, aride 'Dasht' [phonetische Umschrift des iranischen (Farsi) Ausdrucks für Fläche, Ebene, Wüste] befindet. Nördlich der Verkehrsachse führen nur wenige Straßen in die anschließende Gebirgsregion des Elburs. Die morphologischen und hydrologischen Prozesse des Gebirges schufen die Bedingungen für die Landnutzung des südlichen Vorlandes. Siedlungen entstanden im Vorland bevorzugt auf dem Kern von Schwemmfächern, um den kostbaren peripheren Bereich des Schwemmfächers mit seinen wasserführenden Schichten nicht zu verbauen. Im Satellitenbild deutlich zu erkennen, konzentrieren sich hier Obst- und Getreideanbau.

Abb. 22: ▶ LANDSAT-ETM+ - Satellitenbild: Landnutzung und Besiedlung auf Schwemmfächern bei Karaj



Abb. 21: ▼ Photo i35-02-04: Karaj im Jahr 2002, die Ausdehnung erstreckt sich wie auch in Teheran bereits in den Gebirgsbereich hinein



Im Gebirgsbereich fällt zunächst das Nichtvorhandensein von dichter, tiefwurzelnder Vegetation auf (siehe Kapitel 8.6). Bereits in prähistorischer Zeit wurde der natürliche Waldbestand teilweise entfernt. Das seither durch Erosion verlorengangene Bodenmaterial findet sich im Vorland in datierbaren Kulturschichten prähistorischer Siedlungshügel wieder. Dies konnte im Vorland des Untersuchungsgebietes beobachtet werden.

Abb. 23: ▼ Photo i22-02-33: Siedlungshügel (persisch 'Tappeh') im Südwesten des Untersuchungsgebietes



Auch in historischer Zeit ist der Elburs durch Terrassierung, Regenfeldbau und Entwaldung zur Holzkohlegewinnung intensiv genutzt worden (EHLERS 1980, BOBEK 1952). Die Beweidung mit den Folgen der Vegetationsentfernung und Viehtritt hat ihrerseits zu Abtragungerscheinungen wie Gullybildung beigetragen.

Abb. 24: ▲ Photo i1-02-36, GPS-Punkt D15, 1210 m NN: Gullybildung parallel zu Anbaufurchen im Untersuchungsgebiet südwestlich von Karaj



Abb. 25: ▲ Photo i17-02-19, GPS-Punkt MZ1: Landnutzung im intramontanen Alamutbecken

Heutzutage dominiert der Anbau von Kulturpflanzen wie Mandelbäumen. Sogar Reisanbau ist in den intramontanen Becken, die ein eigenes Mikroklima besitzen, möglich.

In wenigen Gebieten finden erste Aufforstungsversuche statt. Jahrhundertalte Bewässerungsleitungen aus dem Gebirgsinnern sind die Qanate. Sie haben das Vorland mit Wasser versorgt, das in unterirdisch angelegten und aufwändig gewarteten Tunneln floss. Sie stellen eine historische ingenieurtechnische Meisterleistung dar und funktionieren teilweise noch heute. Dieser anthropogene Eingriff hat die Hydrologie verändert. Als Folgen ergeben sich Wassernutzung im Vorland für Anbau und Viehzucht, jedoch auch Änderungen der Abflussmengen und Abflusswege im Gebirgsraum. Im Gebirgsraum wurden die Leitungsbahnen teilweise auch für die Bewässerung terrasserter Hangbereiche verwendet. Sie stellen neben dem Vorzug der Bewässerung aber auch eine Gefahr für Erosion und Massenbewegungen durch die verstärkte Durchfeuchtung des Untergrundes dar. Die wenigen Stra-

ßen durch das Gebiet versorgen die Bergdörfer und dienen als Transitstrecke zum Kaspischen Meer. Wie Flüsse sind auch Straßen Orte, an denen im Untersuchungsgebiet bevorzugt Massenbewegungen auftreten. Neuerrichtete Straßen, z.B. die Verbindung von Hasanabad und Mo'alem Kalayeh im Tal des Shah Rud, waren häufig von rezentem Hangversagen betroffen. Die Besiedlungen der Bergregion befinden sich im direkten Umfeld von Abtragungerscheinungen und Massenbewegungen. Häufig sind Zusam-



Abb. 26: ► Photo i15-02-36, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: Dorf Ghasteijn Lār an der Passstraße, Massenbewegungsschäden am gegenüberliegenden Hang



Abb. 27: ◀ Photo i15-02-17, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: starke Abtragungsschäden



menhänge zu anthropogener Übernutzung durch Beweidung, Trittschäden oder mechanischem Eingriff in die Bodendecke zu vermuten.

Die Bergregion selbst dient als Naherholungsziel für die Teheraner aufgrund der klimatischen Begünstigung im kontinental-heißen Sommerhalbjahr. Viele Ferienhäuser entstehen in den Bergen, teilweise lassen sich größere Siedlungsprojekte erkennen. Sie dehnen sich in stark reliefiertes Gelände aus. Dieses besteht zum Teil

Abb. 28: ► Photo i9-02-07: Rutschung am Hangbereich der Neubausiedlung

aus tiefgründig verwittertem Gesteinsersatz, das mit dem Caterpillar leicht abgetragen werden kann. Kostenaufwändige Sprengarbeiten entfallen, jedoch ist das zersetzte Material als Baugrund besonders anfällig für Abtragungerscheinungen und Massenbewegungen.

Abb. 29: ▼ Photo i9-02-05: Neubausiedlung auf stark zersetztem Untergrundmaterial und Aufforstungsversuche nördlich von Karaj



Datengrundlagen



Abb. 30: Photo
i1-02-13: Darstellung
eines GIS an einer Mauer
in Teheran 2002

Bei einem pragmatischen Ansatz gilt es, die Daten hinsichtlich ihrer Eignung und in der Verhältnismäßigkeit ihres Einsatzes zu bewerten und auszuwählen. Kosten, Beschaffung, Qualitätsmerkmale und Bearbeitungsanforderungen müssen dabei berücksichtigt werden.

Einige Daten waren im Internet bestellbar und konnten teilweise kostenlos heruntergeladen werden. Für andere Daten war ein Geländeaufenthalt erforderlich, der zwar kostspielig, aber für einige Daten unerlässlich ist. Während des Geländeaufenthaltes im Iran konnte auch Kartenmaterial erworben werden, das nicht bestellbar war, sowie eine Reihe anderer Daten und Informatio-

nen. Dazu zählt ein Teil der Niederschlagsdaten, die in Kooperation mit der dortigen Faculty of Natural Resources in Karaj dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt wurden. Leider konnten die bestellten Luftbilder auch nach zwei Jahren nicht geliefert werden, was eine visuelle Auswertung und Validierung des Modells erheblich erschwerte. Ersatzweise wurden CORONA-Daten bestellt, die innerhalb von drei Wochen geliefert wurden. Damit stellten sich für die Eignung der Daten neben der Qualität und der technischen Eigenschaften der Daten die Verfügbarkeit und die Kosten als gewichtiger Faktor dar.

5.1 CORONA

CORONA ist der Name des ersten Photo-Spionage-Satellitensystems der USA, das in mehreren Missionen von 1959 bis 1972 Filmstreifen im Weltraum belichtete und zur Erde zurückbrachte. Das System wurde im Kalten Krieg zur Aufklärung des Sowjetischen Raketenpotentials eingesetzt, 1995 wurden die Daten deklassifiziert und der Öffentlichkeit freigegeben.

Von einer THOR Trägerrakete gestartet, trug die AGENA Kapsel zwei rotierende Stereopanorama-Kameras. Der 70 mm breite panchromatische Film wurde in einzelnen Kapseln an einem Fallschirm zur Erde zurückgesandt. Auf ihrem Weg zur Erde wurden sie noch in der Luft von einem C-119-Flugzeug der US Air Force aufgefangen. Die für diese Arbeit bestellten Szenen gehören zur Mission KH-4B des Kamerasystems Itek von 1970, das aus einer Höhe von ca. 150 km mit einem Objektiv der Brennweite ca. 70 mm die höchste Auflösung dieses Satellitentypes erreichte, mit ca. 2 x 2 Metern pro Pixel. Für die vorliegende Arbeit wurden acht CORONA-Szenen vom 31.05.1970, einer der späteren Missionen der Reihe, beim USGS/EROS Data Center bestellt.

Generell gelten die gleichen systembedingten Einschränkungen wie bei allen Fernerkundungsdaten bezüglich räumlicher und temporaler Auflösung, Schattenwurf und Geometrie. CORONA-Daten sind weltweit erhältlich und haben eine hohe räumliche Auflösung, was aber vom jeweiligen System und der Qualität des jeweiligen Filmstreifens bzw. der käuflichen Kopie abhängig ist.

Daher ist der Abbildungsmaßstab der räumlichen Auflösung von 2 x 2 Metern pro Pixel kaum zu erreichen. Die Daten sind als Filmstreifen (Kopie des Originalstreifens), als transparenter Durchsichtfilm (Dia), als transparenter Negativfilm oder als Papiervergrößerung (Kontaktabzug) erhältlich. Die Abdeckung einer Fläche entsprechend einer LANDSAT-Szene ist mit ca. 205US\$ für 10 Szenen im Vergleich zu anderen Satellitenprodukten sehr kostengünstig. Häufig benötigt man zur Detailauswertung auch nicht alle Szenen, für das DRYSATMAP-Gebiet waren es 8 Szenen, für das Testgebiet nur 2 Szenen. Die Schwierigkeit der Datenauswertung liegt im Format und in der Datenform, in der das Produkt vorliegt. Das Format der Filmstreifen hat ein extremes Verhältnis von Länge zu Breite: es ist ca. 6 cm breit und ca. 76 cm lang und deckt damit eine Fläche von ca. 15,75 km x 216,8 km ab. Eine gute Georeferenzierung erfordert daher sehr viele Passpunkte, um den länglichen Filmstreifen korrekt der Geländeform anzupassen. In Hochgebirgsregionen und dünn besiedelten, z.B. semiariden Gebieten ist es schwierig, genügend Passpunkte finden. Dies ist ein Problem, das sich bei einer Datenintegration in ein rechnergestütztes System stellt. Die nächste Schwierigkeit liegt in der Form, in der die Daten vorliegen. Die Auflösung des Kontaktabzuges reicht für eine visuelle Auswertung bei weitem nicht aus. Von anderen Systemen, ARGON und LANYARD, werden ebenfalls Papierabzüge angeboten. Sie ähneln CORONA sehr und sind in Papierabzügen erhältlich, die

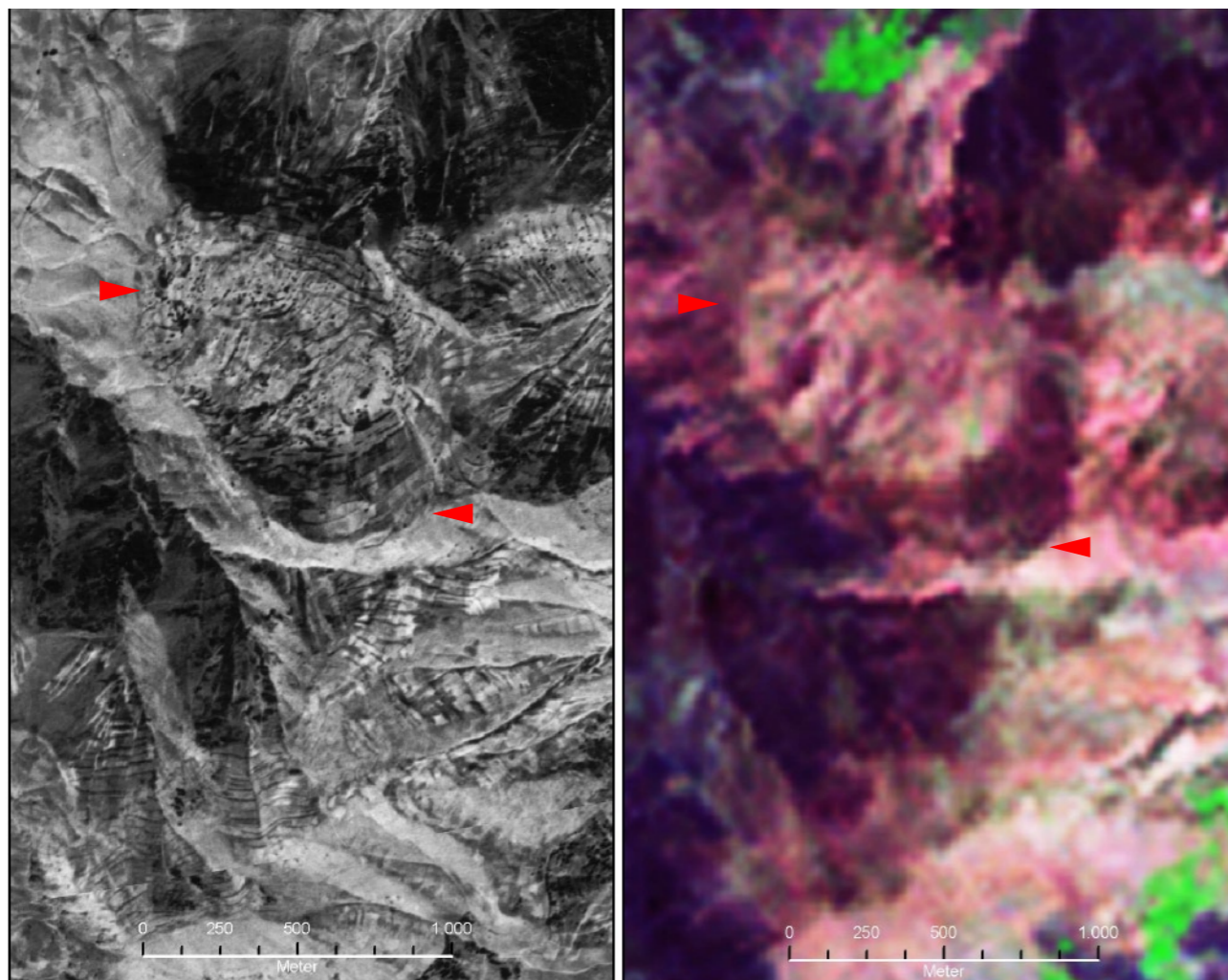


Abb. 31: ▲ Vergleich von CORONA zu LANDSAT, Maßstab 1:25.000, Kanalkombination LANDSAT: 7-4-2. Die runde Vollform in der jeweiligen oberen Bildhälfte ist ein großer Rutschungskörper. Die höhere räumliche Auflösung von CORONA (linkes Bild) erleichtert die visuelle Identifizierung von Massenbewegungen.

aber ebenfalls für eine visuelle Auswertung von Massenbewegungen im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend sind. Der wichtigste zu steuernde Qualitätsfaktor liegt in der Auswertung der CORONA-Negative und damit in der photographisch-chemischen Umsetzung der Vergrößerung des Filmstreifens. Versuche, den Filmstreifen zu scannen, erbrachten auch mit einem trilinearen 90 Mio. Pixel Scanaufsatz für eine Mittelformatkamera keine Ergebnisse, die mit einer einfachen photo-chemischen Papiervergrößerung zu vergleichen wären. Dieser Scanaufsatz wird im Rechenzentrum der Universität Würzburg zur Archivierung wertvoller Bibliotheksbestände verwendet. Ein entsprechend guter Trommelscanner für Filmstreifen dieser Größe war nicht vorhanden, wäre aber einen Vergleich wert. Da in dieser Arbeit jedoch ein Augenmerk auf Anwendungsbezug und Kosten gerichtet werden soll, ist in diesem Fall die relativ kostengünstige Photo-Entwicklung vorzuziehen. Die Abzüge wurden vom Autor im Photolabor des Physikalischen Institutes der Universität Würzburg vorgenommen. Dieses verfügt über einen Leica-Vergrößerer V35 Foco-

mat mit Leitz-Objektiv Focomar 2,8/40 mm, der über eine bessere Abbildungsleistung verfügt als ein vorher getesteter Vergrößerer von Durst, bestückt mit einem Rodenstock Trinar 4,5/75 mm. In handelsüblichem Entwickler Eukobrom von Tetenal wurden auf Ilford Multigrade IV Papier RC De LuxeMGD.44M brauchbare Vergrößerungen bis zum Vergrößerungsmaßstab von 1:52 bei einer Kontraststeuerung durch Filterung mit Grad 3 bei Blende 5,6 und 26 Minuten Belichtungszeit erzielt. Ein Stück Straße, das auf dem Negativstreifen 1 mm lang ist, konnte auf 5,2 cm Länge vergrößert werden. Es wird damit ein Maßstab von ca. 1:8000 erreicht. Die USGS Webseite gibt einen maximalen Vergrößerungsmaßstab von 1:16 an. Objekte wie etwa Feldwege, Terrassierungen und einzelne Bäume können erkannt werden. Ein Gebiet von der Größe des Testgebiets, das nur etwa die Fläche eines Kleinbildnegativs (24x36 mm) auf dem CORONA Filmstreifen ausmacht, benötigt wenig Arbeitsaufwand und Materialverbrauch. Auch das Einscannen auf einem handelsüblichen DIN A4-Flachbettscanner, sowie die dadurch entstehende

Datenmenge sind auf den aktuellen PC Systemen noch gut zu bewältigen. Sollen aber größere Flächen ausgewertet werden, muss der Maßstab der Vergrößerung stark reduziert werden, um Material- und Zeitverbrauch in einem sinnvollen Rahmen zu halten.

Der hohe Kontrastumfang des Filmmaterials machte es in der Praxis der Belichtungssteuerung nicht leicht, ein homogenes Ergebnis zu erzielen. Generell sollten unterschiedliche Reliefseinheiten wie etwa Bergregionen, größere Siedlungen, vegetationsbedeckte oder Gebiete mit schütterer Vegetation und stark reflektierende Flächen wie die Dasht-e Qazvin getrennt voneinander belichtet oder abgewedelt werden. Das visuelle Ergebnis war je nach Kontraststeuerung und insbesondere durch die Wahl der Papiersorte erheblich zu verbessern, ein höherer Aufwand mit einem Feinstkornentwickler hätte sich eventuell gelohnt. Das Ergebnis übertraf deutlich die räumliche Auflösung von LANDSAT-ETM+, kleinere Objekte konnten erkannt werden. Jedoch brachte die monochrome Darstellung, im Gegensatz zu LANDSAT-ETM+, mit dem Verlust an Farbinformation Probleme bei der Interpretation mit sich. Die eindeutige Interpretation von hellen, stark reflektierenden Objekten gestaltete sich ohne Zusatzinformation genauso schwierig wie

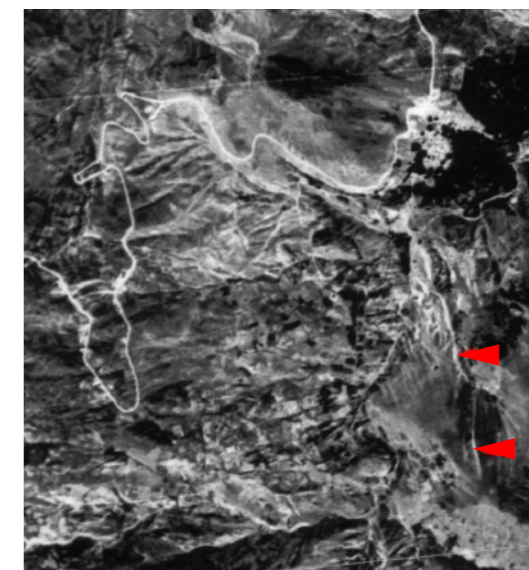


Abb. 32: ◀ CORONA-Detaillausschnitt. Die Pfeile weisen auf die exponierten Bereiche einer komplexen, rutschungsartigen Massenbewegung hin (vgl. Kapitel 8.1)

bei den LANDSAT-ETM+ Daten. An Punkten der Geländebegehung waren Massenbewegungen auch dank der Koordinaten des GPS leicht wiederzufinden. In anderen Gebieten war die Zuordnung von hell reflektierenden Flächen zu Massenbewegungen sehr schwierig, da exponierte oder exhumierte Flächen nicht immer Massenbewegungen repräsentieren, sondern z.B. auch Straßenteile sein können.

5.2 LANDSAT

LANDSAT 7 ist ein Satellitensystem, welches seit 1999 in einer Flughöhe von 705 km in einer Wiederholungsrate von 14 bis 16 Tagen die Erde umkreist und mit 7 Spektralkanälen Streifen der Erdoberfläche von je 185 km Breite und einer Auflösung von ca. 30 x 30 Metern pro Pixel abscannt. Das System ist in Vorgängerversionen schon seit 1972 im Einsatz und eines der gängigsten und erprobtesten Satellitensysteme überhaupt. Mit dem Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) kam ein neuer Sensor mit einem zusätzlichen panchromatischen Kanal hinzu, der eine räumliche Bodenauflösung von ca. 15 x 15 Metern pro Pixel liefert. Diese räumliche Auflösung erhöht die Nutzbarkeit der Daten auch für Vollformen wie Massenbewegungen.

Aus dem DRYSATMAP Projekt stand bereits eine LANDSAT-ETM+ Szene vom 9.9.1999, Path/ Row 165/ 035 zur Verfügung. Diese kostenpflichtige Satellitenszene erschien aus zwei Gründen nicht zweckmäßig für diese Arbeit. Einer-

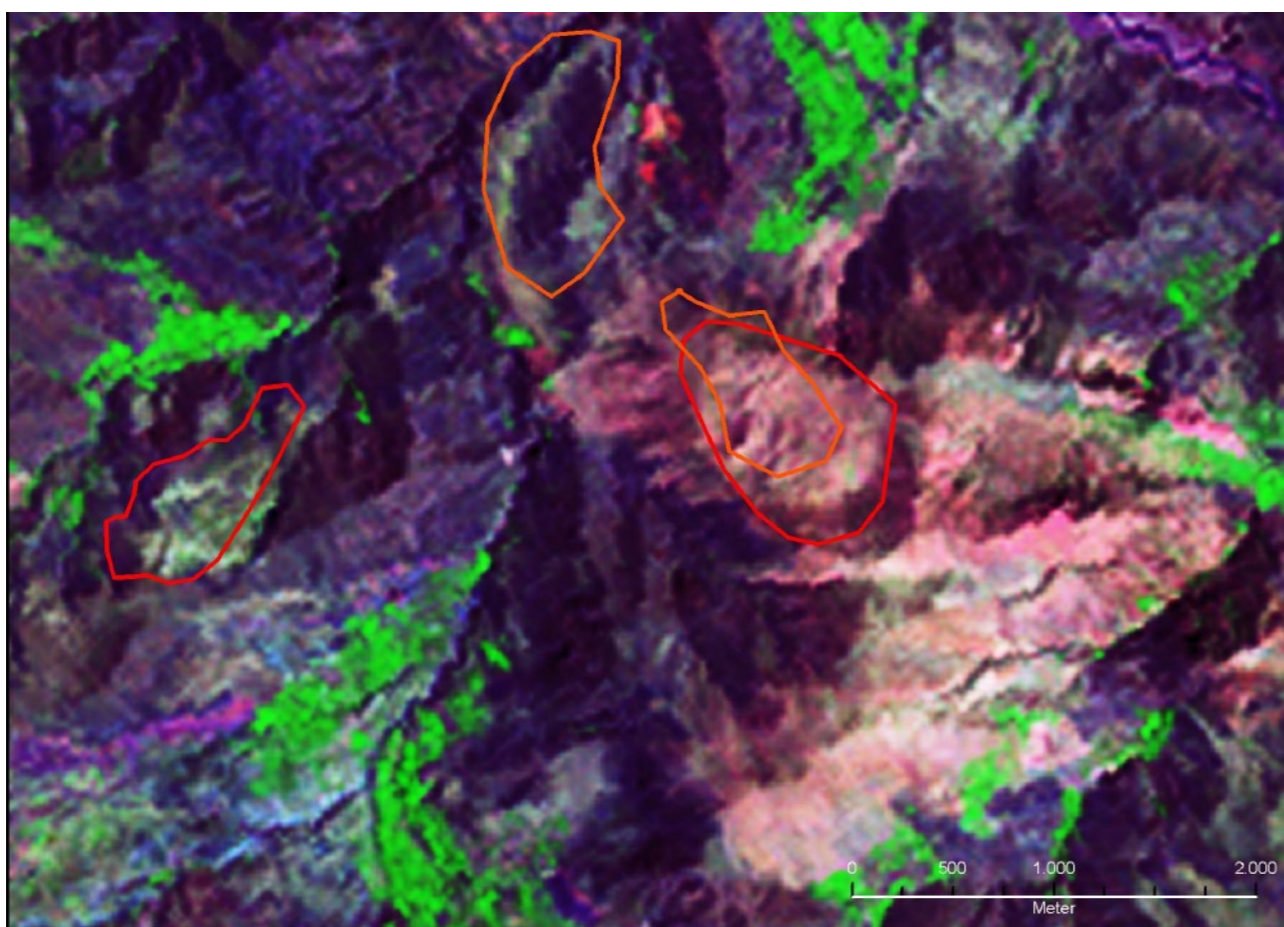
seits sollte ein kostengünstiger Ansatz zur Untersuchung von Massenbewegungen zusammengestellt werden. Andererseits war auch das Gebiet direkt um Teheran von Interesse, das auf der einzelnen Szene nicht enthalten war. Daher wurden zwei LANDSAT-ETM+ Szenen, Path/ Row 164/ 035 vom 18.07.2000 und Path/ Row 165/ 035 vom 25.07.2000, von der Global Landcover Facility (GLCF 2004) über einen Internetserver der University of Maryland, USA kostenlos bezogen. Die Daten sind bereits vorprozessiert und georeferenziert, was einen sofortigen Einsatz mit der entsprechenden Software erlaubt. Die vorprozessierte Umberechnung (*resampling*) der Pixel mittels der Nearest Neighbour Methode wirkt sich durch die Umrechnung in neue, größere Pixel für die optisch-visuelle Bearbeitung nachteilig aus, inzwischen enthalten die LANDSAT Szenen der GLCF jedoch die günstigere *resampling* Methode Cubic Convolution. Die Lagegenauigkeit der Georeferenzierung ist im Testgebiet nicht auffallend

Abb. 33: ▽
 LANDSAT-ETM+ -
 Satellitenbild,
 Kanalkombination
 7-4-2, Maßstab
 1:40.000, Bildbearbei-
 tung mittels Histogram-
 Equalize und Cubic
 Convolution: die
 Markierungen zeigen
 die Umriss großer
 Rutschungskörper, wie
 sie mittels der Geolo-
 gischen Karten und der
 CORONA-Daten kartiert
 wurden.

schlechter als die Lagegenauigkeit der LANDSAT Szene vom 9.9.1999, die durch ca. 60-80 im Gelände gesammelte GPS-Punkte georeferenziert wurde. Damit waren die frei erhältlichen LANDSAT Produkte der GLCF hervorragend für diese Arbeit geeignet.

Bei Massenbewegungen fallen viele Vollformen in ihrer Ausdehnung unter die Grenze von 15 m x 15 m, die ein LANDSAT Pixel abdeckt. Zwar gibt es Überstrahlungseffekte durch sogenannte Mischpixel, die innerhalb einer homogenen Oberfläche, wie z.B. in einer dichten Vegetationsdecke, das Signal eines überstrahlenden stark reflektierenden Objekts, z.B. einer Straße, wiedergeben, obwohl das Objekt Straße kleiner als 15 m x 15 m ist. Dennoch konnten auch hierdurch einzelne exhumierte Oberflächen im Vergleich zu

anderen Objekten wie etwa Ackerflächen nicht zweifelsfrei als Massenbewegungen angesprochen werden. Exhumierte Stellen mit hoher Reflektion stellen im Testgebiet keine eindeutigen Flächen von Massenbewegungen dar. Dieses Vorgehen wird zwar von einigen Autoren angewandt (vgl. JAYASEELAN & SANJEEVI 2002, PETLEY et al. 2002), empfiehlt sich aber allenfalls in anderen Regionen mit schnellwachsender hochstehender Vegetation. Das unruhige Relief von sehr großen Massenbewegungen wie etwa Rutschungen hinterließ im Satellitenbild verschiedenfarbige, sich kleinräumig abwechselnde Pixelwerte, die in bestimmten Kanalfarbkombinationen visuell als Massenbewegungen gedeutet werden konnten (zur Methodik siehe SIEFKER & BUSCHE 2004).



Eine sichere Zuweisung wäre jedoch ohne Zusatzinformation, z.B. aus Karten oder Geländebeobachtungen, nicht eindeutig gewesen. Die Übernahme der LANDSAT-ETM+ Daten in ein dreidimensionales Höhenmodell erleichterte die visuelle Interpretation durch die Anschaulichkeit und den Raumeindruck erheblich. Jedoch beschränkte sich die Erkennung von Massenbewegungen auf großskalige Vollformen, wie sie

unter dem rezenten Klima unwahrscheinlich sind. Für das Ziel dieser Arbeit waren LANDSAT-Daten somit nicht ausreichend, um die rezenten Massenbewegungen zu erkennen. Dennoch stellen sie wertvolle Datengrundlagen für die Kartierung von großen Rutschungsmassen, des geologischen Untergrundes, der Vegetation sowie der Siedlungsentwicklung dar, wie sie in einigen Kapiteln dieser Arbeit angewendet werden konnten.

5.3 Karten

Aus dem DRYSATMAP Projekt lagen flächendeckend Topographische und Geologische Karten des Geological Survey of Iran vor, in den Maßstäben 1:50.000 und 1:250.000 bzw. 1:100.000 und 1:250.000.

Diese Karten vom Iran sind nur vor Ort und je nach Verfügbarkeit zu erhalten. Herr Ulf Siefker konnte jedoch über die Jahre hinweg für das Projekt DRYSATMAP alle benötigten Karten erwerben. Neben den gängigen kartographischen Regeln der Generalisierung und Maßstabsabhängigkeit der Aussagemöglichkeiten entpuppten sich noch andere Punkte als schwierig bei der Umsetzung des geplanten Vorgehens. Aneinanderschließende Blätter entstanden oft in weit auseinanderliegenden Jahren, so dass nicht nur die Auswertungen von Siedlungsentwicklung schwierig in einen Zeitschnitt zu bekommen sind, sondern auch Blattgrenzen oft Grenzen der qualitativen Beurteilung insbesondere der Geologie und Tektonik darstellen. Die fernerkundlichen Daten von CORONA und LANDSAT liefern im Vergleich dazu zwar eine objektivere Beurteilungsgrundlage durch die homogenere Datenkonsistenz, jedoch ist die Auswertung durch die Interpretationsanforderung aufwändiger.

Für das Testgebiet waren die Blätter der Geological Quadrangle Maps of Iran 1:250.000 E3 & E4 Qazvin & Rasht aus dem Jahr 1985 relevant, sowie die Geological Map of Iran 1:100.000, No. 6062 Qazvin (Jahreszahl nicht angegeben, ca. 2000), die Topographischen Karten 1:50.000, Blätter 6062 IV aus dem Jahr 1377 (neue iranische Zeitrechnung, entspricht in etwa 1998) und Mo'alleh Kalayeh 6062 I aus dem Jahr 1356 (entspricht in etwa 1977).

Die Topographischen Karten wurden zur Erstellung eines Digitalen Geländemodells verwendet, sowie zur Digitalisierung von Straßen, Siedlungen, Vegetation, und des Flussnetzes. Die Geologischen Karten wurden für die Untersuchung des Geologischen Untergrundes, die Tektonik und die Kartierung von Massenbewegungen herangezogen. Bei der Genauigkeit der räumlichen Abgrenzung stellten die Fernerkundungsdaten in den meisten Punkten eine bessere Beurteilungsgrundlage dar. Ohne das Kartenmaterial wäre jedoch die sichere Zuweisung der Geologischen Formation oder der flächendeckenden Höheninformation nicht möglich gewesen.

Zur Integration in das GIS wurden die Topographischen Karten 1:50.000, Blätter 6062I und 6062IV, zunächst digitalisiert. Dies geschah mit Hilfe von Herrn Ruf im Rechenzentrum der Universität Würzburg mit einer digitalen Photokamera mit hoher Auflösung (siehe Kapitel 5.1), brachte jedoch eine Verzerrung zu den Rändern der Karten hin mit sich, bedingt durch die Zentralprojektion. Die Georeferenzierung wurde mittels der Software ERDAS Imagine 8.6 durchgeführt. Als *geometric model* wurden die Karten in der Polynomialmethode nach dem Polynom zweiten Grades rektifiziert. Dieses Verfahren wurde angewendet, weil die Karten nicht nur in einer zweidimensionalen Ebene verdreht vorlagen, sondern auch durch die photographische Verzerrung in der dritten Dimension verzerrt lagen und korrigiert werden mussten. Die Projektion der Topographischen Karte ist auf den Karten als *Transverse Mercator* angegeben. Die Projektion *Transverse Mercator* verlangt die Angabe der Einheiten in metrischem Maß, auf der Topographischen Karte sind jedoch nur Gradangaben zu finden. Ohne genaue Angabe des Durchmessers des Rotationsellipsoids und des Bezugsstreifens ist eine Projektion mit Transverse Merkator nicht möglich. Daher wurde als Projektion *Geographic Lat/Long* gewählt, mit Sphäroid Hayford, Datumname Hayford. Die Koordinaten wurden am Gradnetz der Karte abgelesen. Per Tastatureingabe wurden acht GCPs (*Ground Control Points*) gesetzt, der RMS-Fehler (*Route Mean Square*) betrug lediglich 0.022, damit ist die Qualität der erzeugten Georeferenzierung ausreichend. Anschließend wurden die Rasterdaten der Karte mit der *resample* Methode *Nearest Neighbor* umgesetzt und umprojiziert in UTM WGS 84 *North*, UTM Zone 39 S (*Range* 48E-54E).

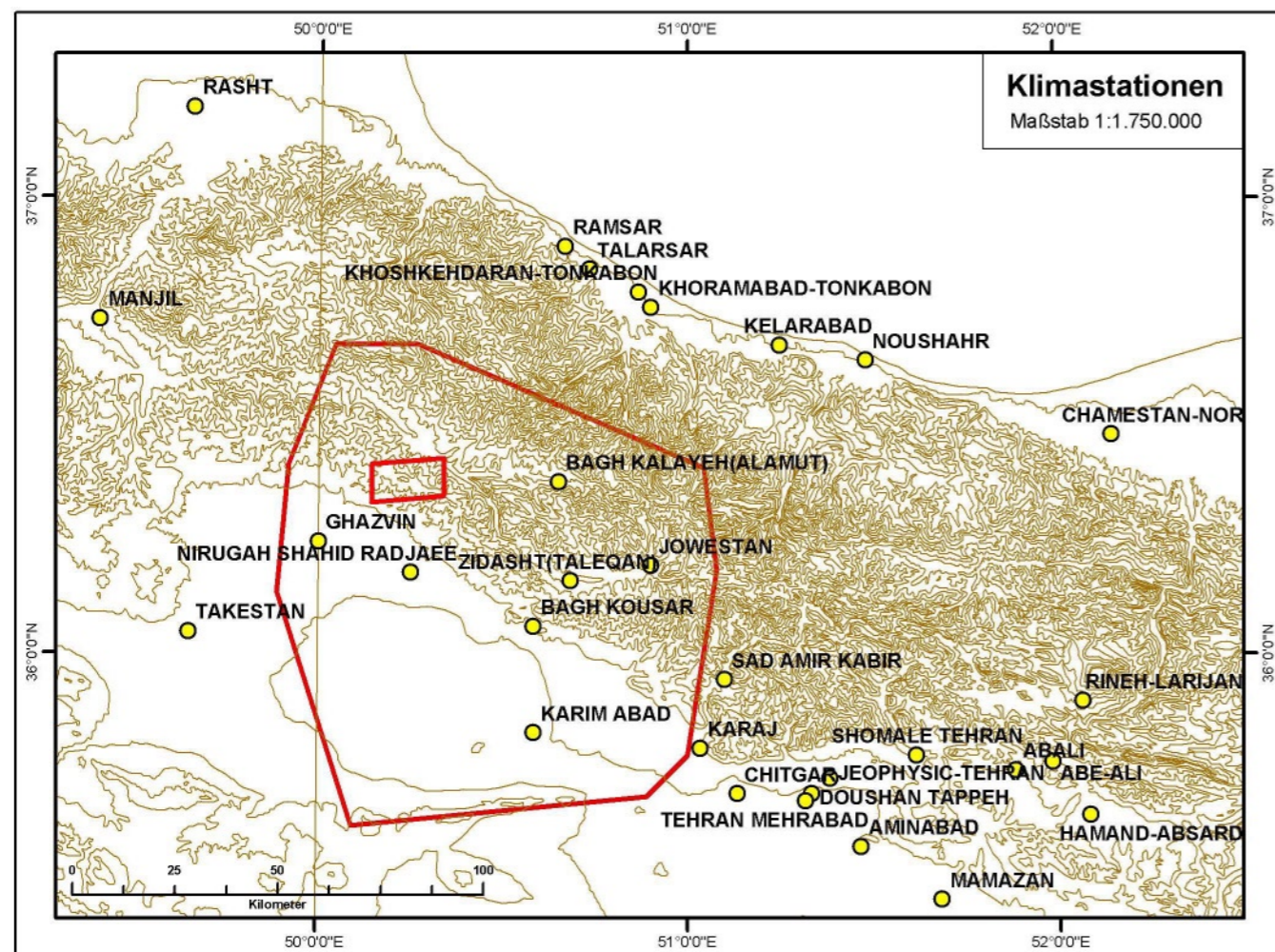
5.4 Klimadaten

Klimadaten liegen als Niederschlags-, Temperatur-, Wind-, und Luftdruckdaten aus Messungen von Klimamessstationen im Iran vor. Diese können in der nötigen räumlichen Auflösung noch nicht in vertretbarem finanziellen Umfang von der Fernerkundung gewonnen werden. Daher standen nur begrenzt flächendeckende Daten zur Verfügung. Die Aufzeichnungen der Klimamessstationen im Testgebiet wurden freundlicherweise von der sehr kooperativen Faculty of Natural Resources in Karaj als Kopien der handschriftlichen Messergebnisse zur Verfügung gestellt. Ergänzende Klimadaten konnten aus dem Internet über das Portal der offiziellen iranischen Meteorologischen Organisation IRIMO (Islamic Republic of Meteorological Organization) heruntergeladen werden. Die handschriftlichen Messergebnisse standen leider

nicht in der gleichen zeitlichen Tiefe wie die Daten der IRIMO (2004) zur Verfügung, so dass Zeitschnitte in ihrer Repräsentativität problematisch zu bewerten sind. Jedoch lieferten diese Messungen aus kleinen Messstationen im Gebirge wichtige Daten, die in den Listen der offiziellen Messstationen nicht enthalten sind. Die Ergebnisse sind im Kapitel 8.4 nachzulesen.

Benutzt werden konnten die Messergebnisse von 49 Stationen im größeren Umfeld, daraus sieben Stationen für das Testgebiet, Karim Abad, Bagh Kusar, Nirugah Shahid Radjaee, Qazvin, Zidasht (Taleqan), Jowestan, Bagh Kalayeh (Alamut), in Höhenlagen von 1160 m bis 2000 m. Der Aufzeichnungszeitraum variiert dabei sehr stark, zwischen 5 und 50 Jahren, für die sieben Stationen des Testgebiets lagen die Aufzeichnungen sogar nur für ein Aufzeichnungsjahr vor.

Abb. 34: Karte 6: Lage der Klimamessstationen



5.5 Bodenproben

Bodenproben wurden während der Geländearbeiten im Iran im DRYSATMAP Untersuchungsgebiet und im Testgebiet als Handschurfe entnommen. Zusätzlich wurden Beschreibungen der Fundsituation und GPS-Koordinaten aufgenommen. Die Bodenproben wurden vorwiegend für das DRYSATMAP Projekt gesammelt, hinsichtlich ihrer Eignung zur Validierung der Objekt- und Spektralinformation der LANDSAT-Daten. Ein gewisser Anteil wurde jedoch auch speziell für das Thema Massenbewegungen im Testgebiet ausgewählt. An einer Massenbewegung wurden exemplarisch sieben Bodenproben zur Auswertung genommen. Eine geotechnische Auswertung überstiege aufgrund des Zeit- und Kostenaufwandes den Rahmen einer kostengünstigen und anwendungsorientierten Untersuchung von Massenbewegungen. Deswegen wurden diese Bodenproben lediglich zur Untersuchung ihres Aussagecharakters, sowie als ergänzende Zusatzinformation gewonnen. Die Probenentnahme wurde entsprechend ausgeführt,

wie sie auch durch die Hände dritter ohne Spezialwissen erwartet werden könnte. Es sollte die Eignung dieser Proben getestet werden, wie sie kostengünstig ohne zusätzliche Gerätschaften und Expertenwissen entnommen und zugesandt werden könnten. Dies beschränkt die Analyse-möglichkeiten, da z.B. der Materialzusammenhang gestört vorliegt und eine Bodendichteuntersuchung nicht durchgeführt werden kann. Dennoch waren wichtige Aussagen über die Materialzusammensetzung und die Anteile prozesssteuernder Größen wie etwa Tongehalt zu erwarten.

Die sieben Bodenproben der Massenbewegung wurden vom Autor unter freundlicher Anleitung von Herrn Sascha König im Geomorphologie-Labor der Universität Würzburg analysiert. Korngrößenanteile, pH-Wert und Karbonatgehalt wurden durch die Analysemethoden Siebung, Schlämmlung, Spannungsübertragung der freien Ionen in Lösung und Salzsäuretest bestimmt. Die Ergebnisse sind im Kapitel 8.1 nachzulesen.

5.6 GPS - Punkte

Das Global Positioning System (GPS), eigentlich NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System), besteht aus 24 Satelliten, die in einer nominellen Entfernung von 20 200 km auf sechs Umlaufbahnen die Erde umkreisen. Es ermöglicht die Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde mit Einschränkungen in Polnähe. Theoretisch ist dies allorts unabhängig von Tageszeit und Wetter möglich. Dazu müssen für ein GPS-Gerät die Signale von mindestens drei der Satelliten zur Bestimmung der Position deutlich zu empfangen sein, zur Erfassung der dritten Dimension, der Höhe, sind mindestens vier Satelliten nötig. Moderne GPS-Navigationsgeräte mit 12-Kanaltechnik können die Signale von 12 Satelliten gleichzeitig empfangen, daraus vier günstig zueinander stehende auswählen (ideal wäre mindestens ein Satellit je Himmelsrichtung) und so die Position des Empfängers optimal berechnen.

In der Praxis ergeben sich deutliche Schwierigkeiten bei dichter Bewölkung, des Weiteren in Gebirgslandschaften wegen des Standes der Satelliten über dem Horizont. Weitere Fehlerquellen stellen die Geometrien der Bahnen der jeweils empfangbaren vier Satelliten dar, sowie die Reflektion und damit Verlängerung der Signalwege an Reflektionsflächen wie z.B. Häusern oder Bergflanken. Auch die Gravitationskräfte des Erdmond-Systems und die Atmosphäre beeinflussen die Genauigkeit des GPS. Jedoch liegen diese Effekte alle in Bereichen von unter 2 m, so dass sie bei einer Positionierungsgenauigkeit von 15 m nicht ins Gewicht fallen. Zur Bestimmung der Koordinaten von interessanten Befunden im Gelände wurden diese in einem handelsüblichen 12 Kanal GPS-Gerät, eTrex Summit von GARMIN, festgehalten, um später im GIS dargestellt werden zu können. Damit sollten Geländebefunde später leichter in den Fernerkundungsdaten lokalisierbar werden sowie Punkte für eine passgenaue Georeferenzierung der Karten bereit-

Digitale Geländemodelle dienen der Visualisierung von dreidimensionalen Bildinformationen durch die Überlagerung von Rasterinformationsebenen (Karten, Satelliten- Luftbilder, Texturinformation, Farbwerte, etc.). Ähnlich dem Überwurf eines Tischtuches auf ein dreidimensionales Objekt werden dem Rasterbild (drape image) die Höhenwerte des Digitalen Geländemodells an der jeweiligen Koordinate übertragen. Der Informationsgewinn für die visuelle Interpretation ist erheblich. In der Bedeutung ist er Stereophotos ähnlich. Der dreidimensionale Effekt ist z.B. zur Auswertung von Geländedepressionen hilfreich. Der Vorteil eines Digitalen Geländemodells ist, dass die optische Nutzung intuitiver erfolgt. Der Nutzen digitaler Geländemodelle erweitert

sich durch unzählige Analysemöglichkeiten. Hangneigungswinkel, Expositionsrichtung, Abflussbahnen, Einzugsgebiete, Blickwinkel, Volumenberechnungen, Schattenwurf und Auslaufzonen von Massenbewegungen sind nur einige Beispiele der gängigsten Anwendungen (z.B. TARBOTON 2002).

Für diese Arbeit und für das DRYSATMAP Projekt wurden diverse Digitale Geländemodelle erstellt, um das Potential und die Anwendbarkeit bezüglich der Analyse von Massenbewegungen zu testen. Da hierfür die methodische Umsetzung einer Erstellung der Digitalen Geländemodelle wesentlich war, soll diese im Methodikkapitel 2.5 eingehender behandelt werden.

Abb. 36: ▽ Vergleich der Datenspeicherung von digitalen Höhenmodellen: links das TIN mit einer Dreiecksvermaschung, rechts das GRID mit Rasterzellen. Der Ausschnitt zeigt das Testgebiet

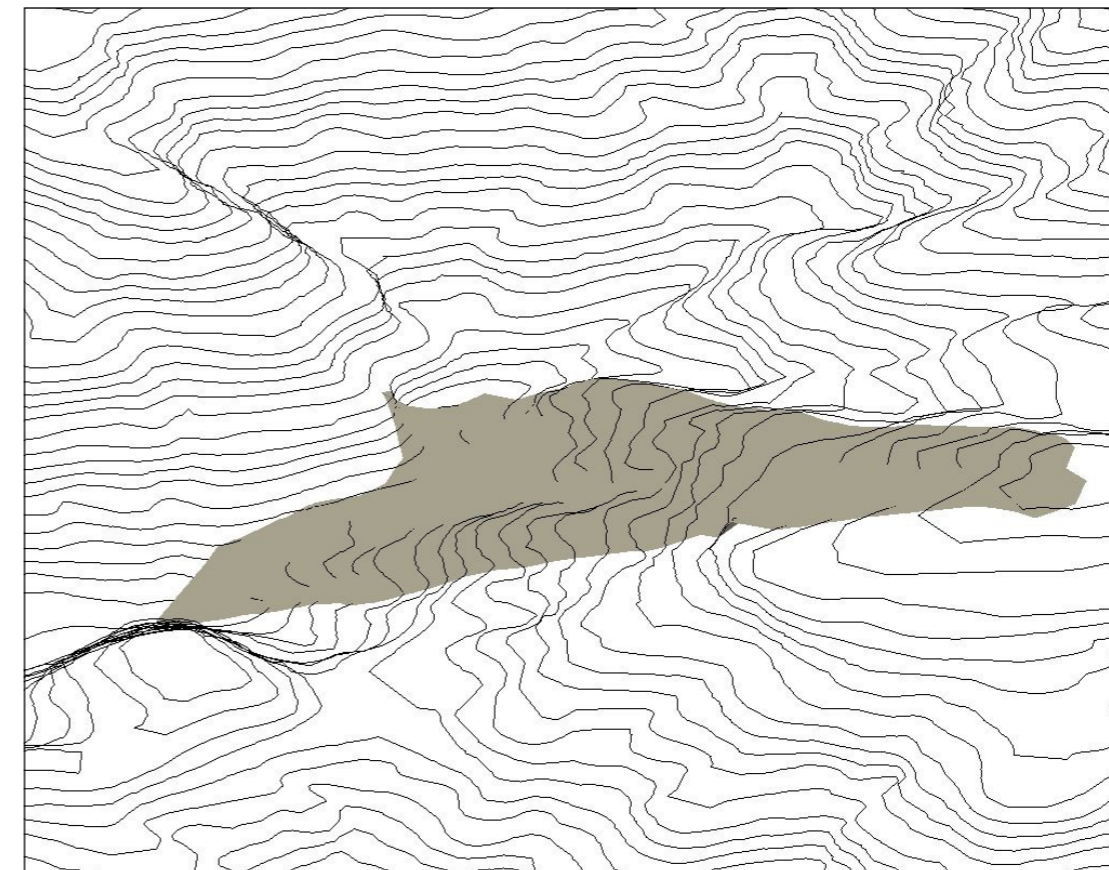
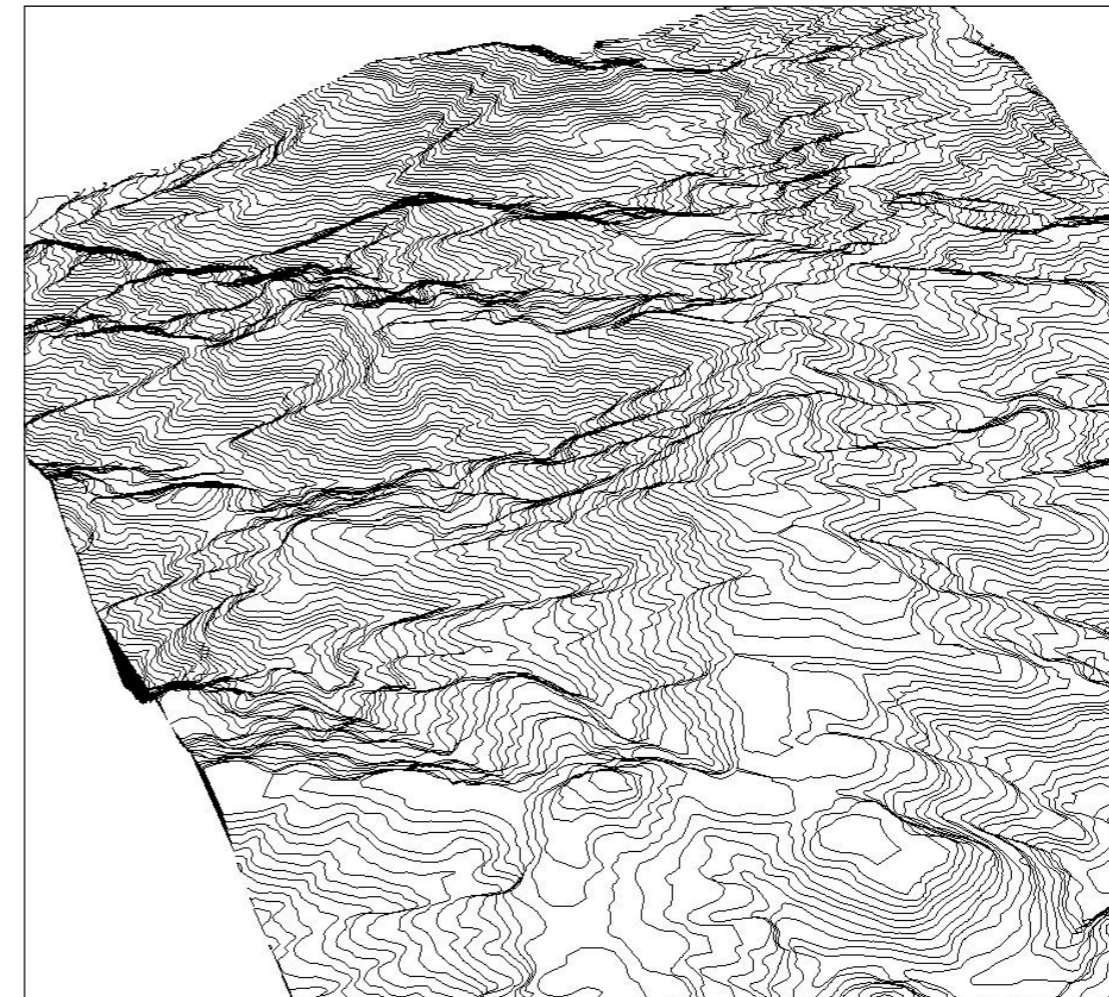
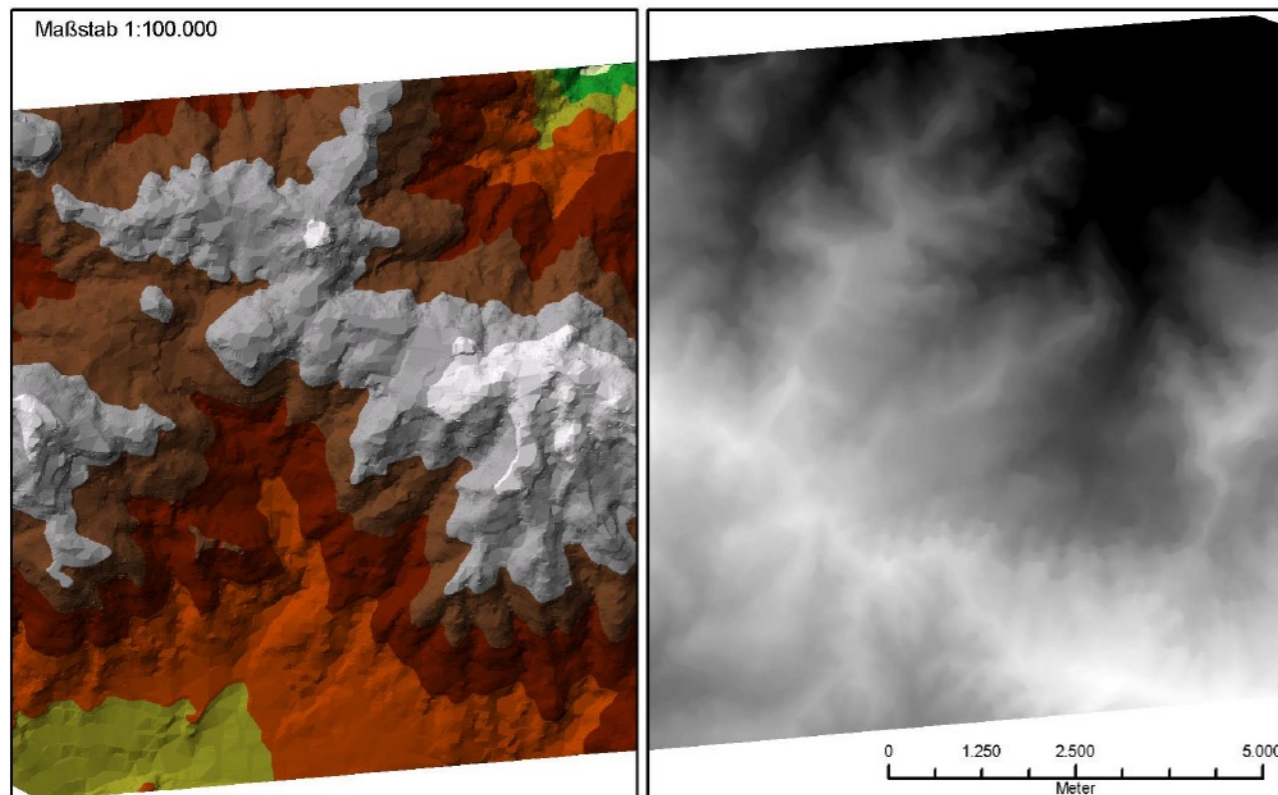


Abb.: 37a ◀ & 37b ▽: Das Digitale Geländemodell bietet z.B. die Möglichkeit der Konturdarstellung des Reliefs durch interpolierte Höhenlinien. Das obere Bild vermag durch diese sogenannten Konturlinien beispielsweise Reliefunterschiede plastisch darzustellen. Deutlich ist der Gebirgskamm zu erkennen, welcher in etwa von NW nach SE durch das Testgebiet verläuft (Blick nach SE). Für Massenbewegungen ist ein unausgeglichenes Profil typisch, welches sich in Deformationsstellen der Konturlinien widerspiegelt (unteres Bild)

Kapitel 6

Die Erstellung des Geländemodells

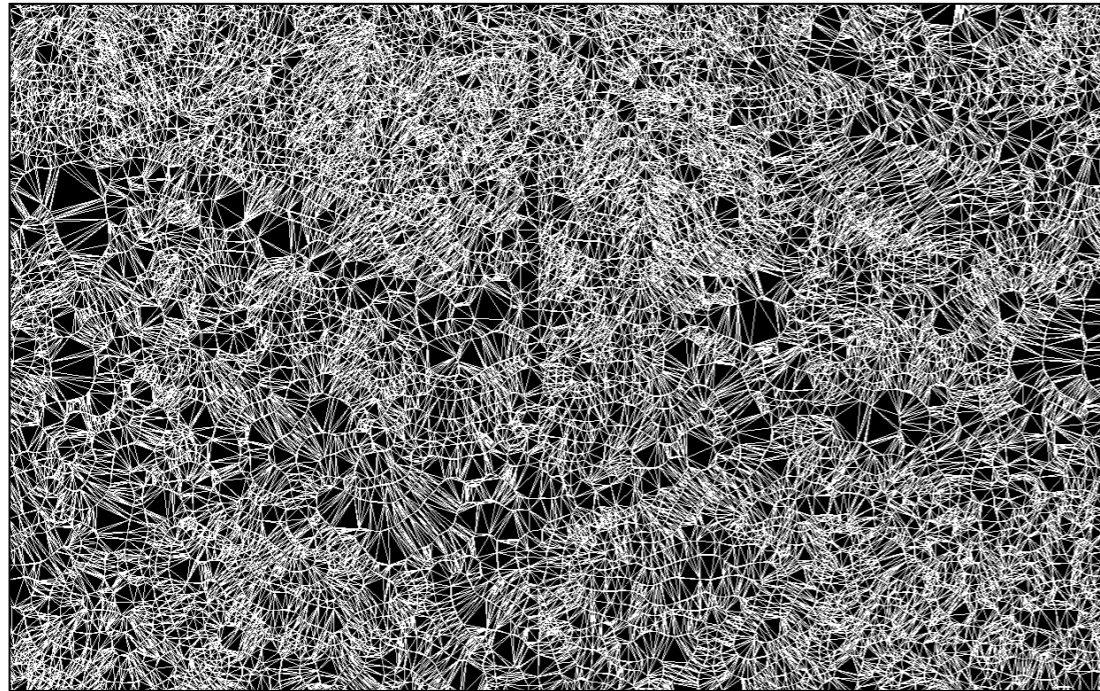


Abb. 38: TIN-Vermaschung der Höhenknotenpunkte aus der Digitalisierung der Höhenlinien des Testgebietes von zwei Kartenblättern der Topographischen Karten 1:50.000 (siehe Text)

Digitale Geländemodelle (DGM) wurden für diverse Analyseschritte im GIS erzeugt, um Faktoren zur Auslösung von Massenbewegungen beurteilen zu können. Die räumliche Auflösung des DGM sollte möglichst den Größenordnungen gerecht werden, in denen Massenbewegungen auftreten. Aufgrund der vorhandenen Daten war keine bessere Auflösung als 20 m zu erzielen, dies resultierte aus den Höhenlinien der Topographischen Karten 1:50.000. Diese stellten die einzigen flächendeckenden Höheninformationen des Testgebietes dar, abgesehen von den GPS-Punkten. Zu den mittels GPS gemessenen Höhenwerten sei angemerkt, dass sie sich auf eine theoretische Höhe des gemittelten Meeresspiegels des WGS 84 Geoids beziehen, also von den in den Karten verwendeten Höhen abweichen können und deswegen nicht zu einer zusätzlichen Z-Werte Eingabe im DGM verwendet wurden. Damit verblieben die Topographischen Karten als Ausgangsdaten. Digitale Höhenmodelle sind zwar auch käuflich zu erwerben, auch gibt es einige Produkte kostenlos, wie z.B. das GTOPO30, das SRTM-DEM und das ASTER-DEM. Jedoch ist entweder deren Auflösung wie beim GTOPO30 mit ca. 1 km, oder beim SRTM-DEM mit ca. 90 m, nicht ausreichend für die Fragestellung, oder die Verfügbarkeit der gewünschten Reliefausschnitte war nicht oder nur teilweise gegeben, wie z.B. beim SRTM-DEM und beim ASTER-DEM. Im Rahmen des DRYSATMAP Projekts wurde ein DGM erstellt, das mit 100 m Auflösung zwar für die Fragestellung von LANDSAT Untersuchungen ausreichend ist, jedoch nicht für die Untersuchung von kleinräumigeren Massenbewegungen. Dennoch stellte es ein interessantes Vergleichsmodell bezüglich der Aussagekraft eines DGM mit 20 m Auflösung dar. Da keine vorprozessierten DGM verfügbar waren, welche die nötigen Anforderungen erfüllten, waren Erstellungsaufwand und Qualität der Erstellung des DGM für den Rahmen einer anwendungsbezogenen pragmatischen und kostengünstigen Untersuchung von Massenbewegungen von großem Interesse. Das DGM des DRYSATMAP Projekts wurde auf Grundlage eingescannter Topographischer Karten im Maßstab 1:250.000 durch manuelles Digitalisieren der Höhenlinien in ESRI ArcView erstellt. Die Schwierigkeiten im Erreichen von Exaktheit liegen bei diesem Vorgehen in der Handhabung der Digitalisierungstools und in der jeweiligen Zoomstufe der Ansicht. Häufig entstehen Fehler, die mit dem bloßen Auge nicht wahrgenommen werden, z.B. *overshoots*, *undershoots*,

spikes und *gaps*. Dies sind im Prinzip alles Fehler in der Verknüpfung der sich aneinander anschließenden Polygone oder Linien (siehe z.B. KAPPAS 2001). Besonders wichtige Faktoren sind dabei sicherlich die Konzentration und die Erfahrung der digitalisierenden Person und die Ermüdung durch die anstrengenden Tätigkeit. Ein kleinerer Maßstab der Kartengrundlage wäre ebenfalls ein Faktor, der durch geringere Verallgemeinerung der Höhenlinien das Endergebnis positiv beeinflusst hätte, jedoch ist dies aufgrund des Arbeitsaufwandes der Digitalisierung nicht zumutbar für die Größe eines Untersuchungsgebietes von ca. 100 km x 100 km Abmessung. Schon die Digitalisierung der 100 m Höhenlinien der Topographischen Karten 1:250.000 bedeutete für die beiden wissenschaftliche Hilfskräfte Thomas Reinfelder und Simone Göbel einen Aufwand von ca. 6-8 Wochen. Die Korrektur der Fehler der Digitalisierung und die Erstellung eines TIN dauerte nochmals so lange. Es war nun von Interesse, diesen enormen Zeit- und Kostenfaktor zu verringern. Dazu wurde ein Verfahren zur automatischen Extraktion von Höhenlinien aus Topographischen Karten untersucht. Es gibt zwar bereits Programme, die z.B. in Behörden dafür eingesetzt werden und deren Funktionalität recht gut ausgereift ist, jedoch sind sie sehr teuer. Für diese Arbeit wurde daher ein zeit- und kostengünstiger Ansatz erstellt, der auf einer Kombination im Internet verfügbarer Freeware und vorhandener GIS-Software basiert. Die Methodik soll nun kurz vorgestellt werden.

Von den Topographischen Karten 1:50.000 wurden Ausschnitte des Testgebietes auf einem handelsüblichen Flachbettscanner Mustek 1200 eingescannt. Dabei wurde der Ausschnitt so gewählt, dass die Gitternetzlinien so enthalten waren, dass eine spätere Georeferenzierung möglich war. Die Qualität der gescannten Vorlage steuert die Weiterverarbeitungsmöglichkeiten bezüglich Differenzierung und Farbtrennbarkeit der Höhenlinien, sowie in der Zoomfähigkeit. Einstellungen von 300 dpi, 600 dpi und 1200 dpi wurden miteinander verglichen und 600 dpi wurden als optimaler Kompromiss zwischen Schärfe, Pixelanzahl, Farbstufenverteilung und der aufkommenden Datenmenge eingestuft. In einem Bildbearbeitungsprogramm, Corel Draw11, wurden die einzelnen DIN A4 Scans zusammengefügt und im Tiff-Format exportiert. Im Bildbearbeitungsprogramm PhotoPaint11 wurden Farbinformationen störender Signaturen wie etwa Vegetation, Hydrologie und

Abb. 39: ▶ Screenshot 1: manuelles Nachdigitalisieren war an Stellen dichter Signaturenüberschneidungen notwendig

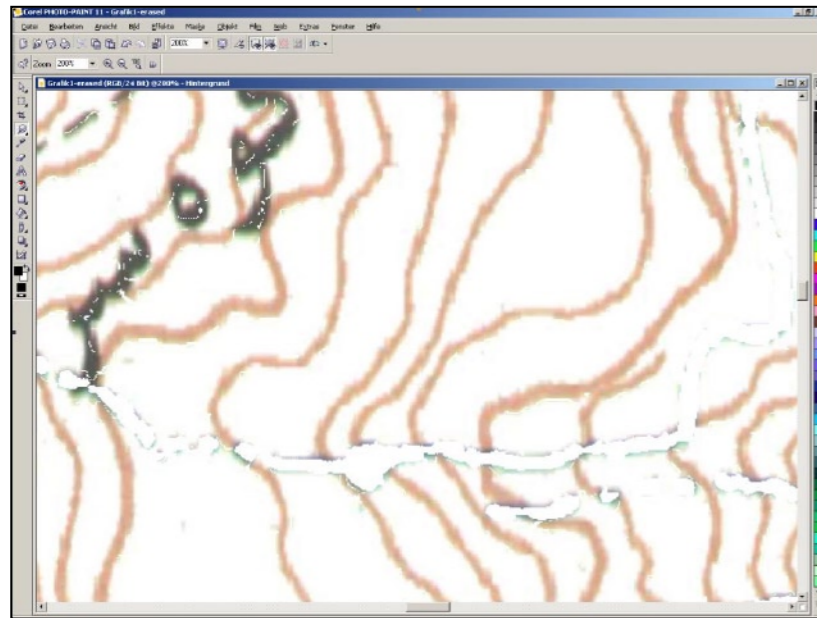
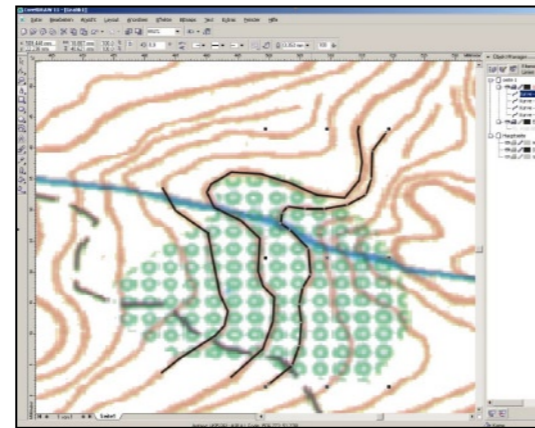


Abb. 40: ▲ Screenshot 2: Arbeitsschritt 'Farben löschen'. Die blaue Farbsignatur eines Flusses wurde gelöscht, das Rotbraun der Höhenlinien bleibt als Information erhalten.

Hintergrundfarben entfernt, um schließlich die Höhenlinien als einzige Rasterinformation auf weißem Hintergrund übrig zu haben. Damit sollten die Höhenlinien vom Vektorisierungsprogramm deutlicher voneinander unterscheidbar sein. Dazu wurde zunächst der Grenzwert des Bildes zu Weiß hin transformiert, d.h. der Hintergrund wurde durch eine Kontrastanpassung einheitlich weiß. Danach konnten einzelne Farbgruppen wie z.B. das Grün der Vegetation, das sich deutlich vom Rotbraun der Höhenlinien unterscheidet, gelöscht werden.

Von den vorhandenen 16 Mio. Farben konnten durch Anpassung des Grenzwertes der zu erfassenden Farbgruppe, in diesem Fall das Grün der Kartensignatur, auch alle ähnlichen grünen Farbwerte erfasst und aus dem Bild entfernt werden. Das dauerte ca. 15 Minuten. Die Farbgruppe Grau-Schwarz der Straßensignatur und der Gitterlinien stellte dabei leider ein Hindernis dar. Die Farbwerte waren denen der Höhenlinien zu ähnlich und mussten per Radiergummi (*eraser*) manuell gelöscht werden, Zeitaufwand hierfür ca. 30 Minuten. Dabei wurden in die Ecken der Gitterpunkt Kreuzungen Markierungen gesetzt, um eine spätere Georeferenzierung zu ermöglichen. Ein weiteres Hindernis stellten Bereiche mit Vegetation dar. Sie konnten nicht wie Bereiche mit einheitlich homogener Hintergrundfarbe entfernt werden, ohne vorher die Höhenlinien an diesen Stellen manuell als eigene Ebene zu digitalisieren. Dies lag an der Überlagerung der Farbformationen an diesen Stellen, die zu einer Zerstörung der Höhenlinien bei Farbwertersetzung



von Grün führt. Der Zeitaufwand für diese, allen anderen Arbeitsschritten vorgezogene, Korrekturarbeit war mit sechs Stunden hoch.

Die Schriftzüge stellten weitere Stellen eng verwobener ähnlicher Farbwerte dar, sie wurden großzügig mit einer relativ groben Radiergummispitze gelöscht, und zwar in einer lediglich 100%-Ansicht, um Zeit zu sparen. Im nächsten Schritt wurde die Rasterinformation des RGB-Bildes durch eine Gamma-Korrektur gefiltert. Sie bewirkt eine extreme Kontrastverstärkung der mittelrotbraunen Höhenlinien im 1bit Modus bei Gamma 0,10 und Grenzwert 100, hin zu einem fast schwarz wirkenden Farbton. Mit dem Filter Gamma wird der Kontrast herausgearbeitet, ohne die Schatten oder Glanzlichter stark zu verändern. Er korrigiert Töne in einem Bild auf der Grundlage der Wahrnehmung des Tonwerts relativ zu den umgebenden Tonwerten. Der Filter Gamma wirkt sich auf alle Bildwerte aus, er basiert jedoch auf einer Kurve, deren Änderungen in Richtung der Mitteltöne tendieren. Dieser Schritt verbessert das Ergebnis durch die Vektorisierungserkennung erheblich, da alle Rasterfarbwerte kontrastreicher und damit leichter zu erkennen sind. Der Filter Kontrast hätte zu stark zwischen hellen und dunklen Farbwerten separiert und damit die für die Struktur von Höhenlinien wichtigen Randbereiche der Linien unterdrückt.

Zur Vorbereitung der Vektorisierung wurden die Höhenlinien im Freeware Programm WinTopo zunächst ausgedünnt, dies erleichterte die Trennung von Höhenlinien an Punkten, an denen die Höhenlinien in der Kartenvorlage sehr eng beieinander lagen. Die Höhenlinien sind zwar optisch für den Betrachter leicht als getrennt auszumachen, nicht jedoch für das Vektorisierungsprogramm, denn der Druckvorgang bei der Kartenherstellung hatte zu Farbübergängen zwischen den Linien auf der Karte geführt. Von den in WinTopo implementierten Ausdünnungs-

methoden erwies sich die Methode nach Zheng & Suen als die relativ beste, um einheitliche geschlossene Linien ohne zu viele offene Enden (*dead ends*) zu erhalten. Ausdünnung ist die Reduktion von mehreren Rasterzellen zu einer einzigen, so dass im Idealfall ein Objekt nur noch durch Linien von der Breite eines einzigen Pixels repräsentiert wird. Im Gegensatz zum methodischen Ansatz, eine Mittellinie der Punktmengen herauszufinden, erwies sich die Reduktion zu sogenannten Skelettpunkten als erfolgreicher, um zusammenhängende komplexkurvige Objekte zu verdünnen. Durch die Reduktion von Stützpunkten konnten speicherintensive zusätzliche Kurvenpunkte entfernt werden. Dadurch wäre aber die Exaktheit des erfassten Kurvenverlaufs geringer geworden, daher wurde ein Kompromisswert eingestellt, der den Standardeinstellungen weitgehend entspricht.

Danach wurde das Bild für eine erste Überprüfung der Linien in PhotoPaint11 geladen. In einer 200% Ansicht wurde das ganze Bild systematisch in einem Raster aus Hilfslinien abgefahren und alle Fehlverbindungen von Linien wurden mit dem Radiergummi gelöscht. Dieser Schritt war zu diesem Zeitpunkt nötig, als das Bild noch als Rasterdaten vorlag, denn die Editierfunktionen nach der Vektorisierung sind in ArcGIS oder WinTopo weitaus weniger komfortabel und beanspruchen mehr Rechenleistung als dies in einem Bildbearbeitungsprogramm wie PhotoPaint gegeben ist. Dieser Schritt dauerte 2 Stunden und 30 Minuten und sparte gegenüber einem vorherigen Versuch, bei dem die Scanvorlage in einer zweiten Ebene als Kontrolle eingefügt worden war und mit einer Maske gearbeitet werden musste, allein durch die geringere Rechenleistung beim Scrollen 10 Stunden Arbeitszeit. Bei zwei Linien, die so eng beieinander lagen, dass beim Verdünnungsvorgang daraus eine Mittellinie entstand, wurde darauf geachtet, dass diese falsche Mittellinie entfernt wurde und beide Linienenden offen blieben. Andernfalls wäre eine in der Natur nicht vorkom-

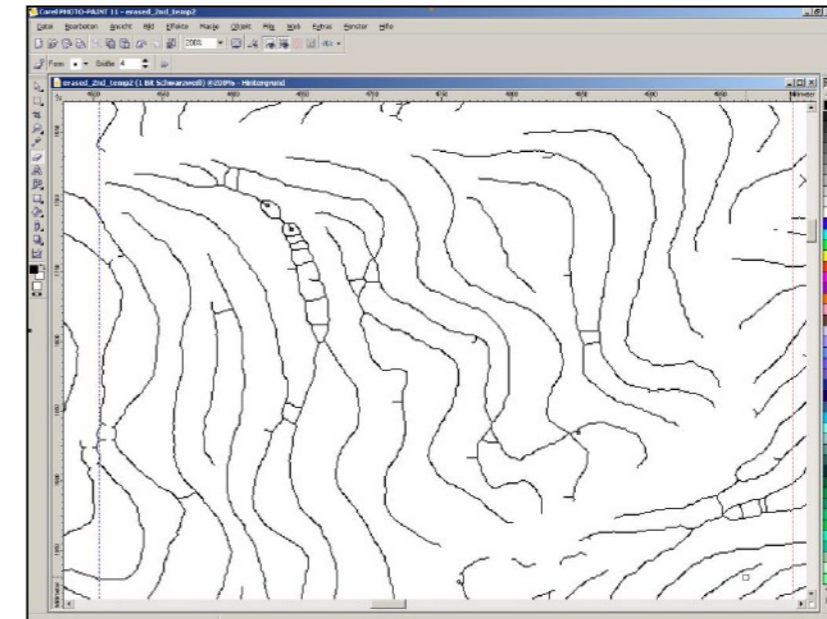


Abb. 41: ◀ Screenshot 3: Ausdünnen zu Linien von nur einem Pixel Breite. Es bilden sich Brücken an Stellen dichter Höhenlinienscharung.

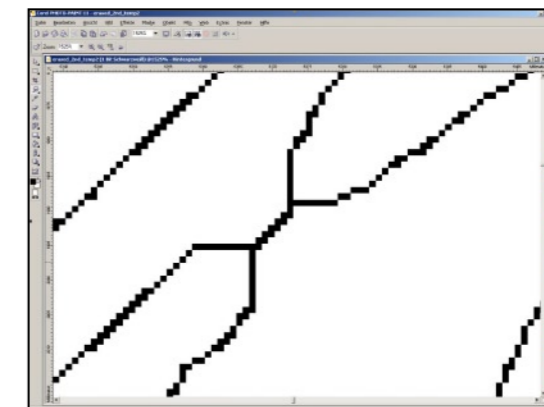
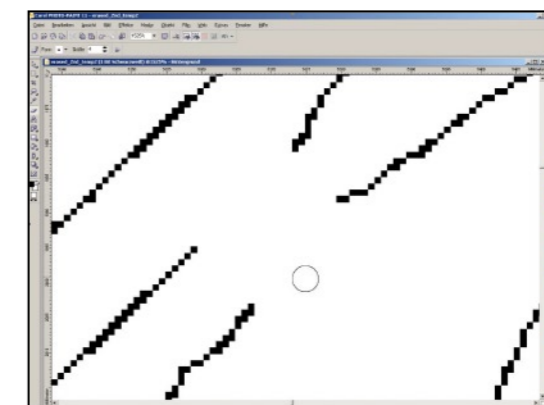
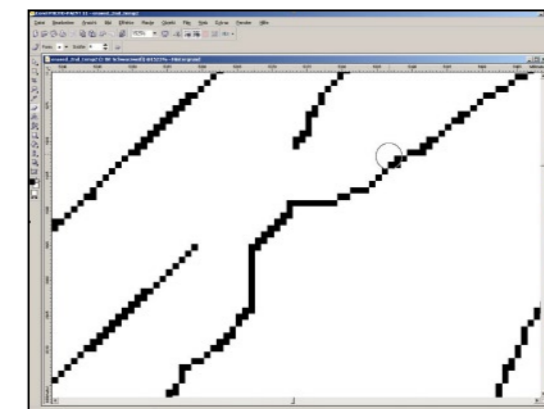


Abb. 42 – 44: ▼ Screenshots 4–6: diese Brücken sind Fehlverbindungen und müssen derart entfernt werden, dass zwei separate Linien mit voneinander unabhängigen Höheninformationen übrigbleiben. Die Brücken müssen dabei vollständig entfernt werden, da sonst später im Geländemodell ein nicht realer Gefällsknick (mittleres Bild) entsteht.



mende Kurve an dieser Stelle entstanden.

An einem neuen Tag wurde mit neuer Konzentration nochmals in 100%-Ansicht nachkorrigiert, was sich als dringend nötig erwies. Der Zeitaufwand betrug in der 100%-Ansicht gegenüber 200%-Ansicht nur noch 20 Minuten. Im darauffolgenden Schritt wurde das Bild in ESRI ArcMap anhand der gesetzten Markierungspunkte der Gradnetz Kreuzungen georeferenziert. Für die Transformation wurde der Polynom ersten Grades mit vier Passpunkten als ausreichend erachtet, denn die Topographischen Karten wurden mit einem Flachbettscanner eingelesen und die Verzerrung blieb damit auf eine Ebene beschränkt.

Die Passpunkte waren anhand der Koordinaten des Gradnetzes auf der Topographischen Karte eindeutig zu bestimmen: x/y : 50,166666/36,333333; 50,166666/36,416666; 50,333333/36,333333; 50,333333/36,333333. Der gesamte RMS Fehler betrug lediglich 0,00002, was für ein sehr gutes Ergebnis mit geringer Verzerrungsunsicherheit spricht. Umgewandelt wurde das Bild mittels der Standardmethode für diskrete Daten, Nearest Neighbour, und die neu aufgebauten Zellen wurden in einer Zellgröße von 0,000016 ausgegeben. Anschließend wurden die Rasterinformationen der Höhenlinien in WinTopo vektorisiert, die Georeferenzierung blieb dabei im Format Tiff Worldfile erhalten. Für die Bearbeitung in ArcGIS wurden die Vektoreninformationen als Shape Datei exportiert. Die Datei wurde in ArcMap geladen und zur visuellen Kontrolle mit der Rasterdatei mit 60% Transparenz unterlegt, um in einem dritten Korrekturschritt den Verlauf der vektorisierten Höhenlinien mit der gescannten Kartengrundlage der Topographischen Karte zu vergleichen, die noch alle Farbinformationen enthielt.

In der Abbildung erkennt man Fehler, die ohne die visuelle Kontrolle des Hintergrund-Scans nicht erkennbar waren. Eine Höhenlinie ist mit einer falschen anderen Höhenlinie verbunden. Diese Fehler sind nun schwierig zu korrigieren, da das Werkzeug Radiergummi aus PhotoPaint oder WinTopo bei Vektoren nicht funktioniert. In vereinzelt Fällen wie diesem kann man mit dem Select-Werkzeug einzelne Arcs auswählen und löschen. Sich berührende Linien wurden sauber getrennt, Lücken konnten verbunden werden. Der jeweils korrekte Linienvorlauf konnte dann eruiert und digitalisiert werden, wenn der Fortlauf der Linien visuell durch die Interpretation des Bearbeiters zu erschließen war. Dies weist die Grenzen der automatisierten Erkennung von Bildinformation auf, Expertenwissen ist auch hierbei nicht völlig zu ersetzen. Jedoch bringt die menschliche Bearbeitung den Nachteil von Aufmerksamkeitsfehlern im Erreichen eines konsistenten, reproduzierbaren Ergebnisses mit sich. Diese dritte Korrektur erbrachte bei Ansicht im Maßstab 1:8600 immer noch viele Flüchtighkeitsfehler und beanspruchte 20 Minuten Arbeitszeit.

Waren bislang Werkzeuge des GIS mit der Software ArcMap benutzt worden, da deren Editierfunktionen intuitiv und praktisch sind, was die Ansicht von Bilddaten angeht, wurde in den folgenden Schritten auf die weitaus umfangreicheren Bearbeitungsfunktionen von ArcInfo zurückgegriffen. Dazu wurde zunächst die Shape Datei in das Format Coverage, welches ArcInfo bearbeiten kann, umgewandelt. Die Vektorenobjekte `line.shp` wurden aus ihrer internen Struktur in die Vektorenobjekte Arc mit eigenen Attributen umgewandelt. Der Nachteil an den Dateiformaten ist, dass sie konvertiert werden müssen und zur Bearbeitung nicht für jedes Programm zur Verfügung stehen. Die Anbindung an bestimmte Softwareprodukte soll damit erreicht werden und die relativ teureren ESRI Produkte (ArcView, ArcGIS, ArcInfo) haben tatsächlich schon eine Art Datenstandard geschaffen. Dies verknüpft den Ansatz dieser Arbeit leider doch durch die Praxisnähe der gängigen Software mit kostenpflichtigen Grundausstattungen. Eine Bearbeitung auf Produkten, die reine Freeware darstellen, wie z.B. GRASS5 unter Linux, wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls untersucht und stellt ebenso erfolgversprechende Lösungen bereit (vgl. GRANDE et al. 2004, NETELER & MITASOVA 2003). Wegen der großen Verbreitung der ESRI Produkte, und aus Übersichtlichkeits- und Zeitgründen wurde jedoch auf eine genauere Darstellung dieser Mög-

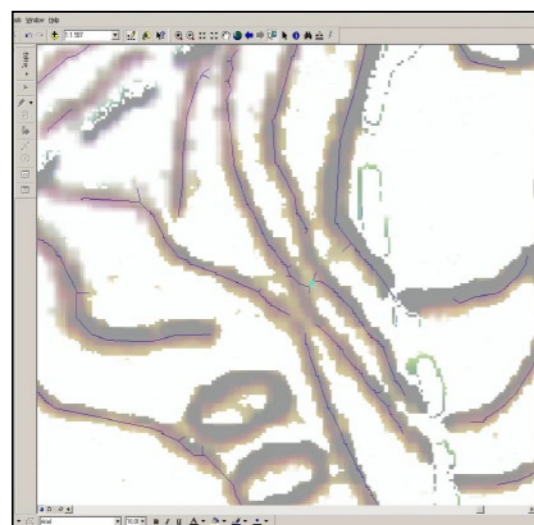


Abb. 45: ► Screenshot 7: Zum visuellen Vergleich des Vektorisierungsergebnisses wurden die gescannten Höhenlinien in einer Transparenzebene den Vektorlinien untergelegt

lichkeiten im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. In ArcInfo Workstation 8.3 wurde im nächsten Schritt in der Kommandozeilebene der Makrobefehl CLEAN auf das Coverage (Höhenlinienvektorendatei) angewandt, er erkennt und beseitigt Überschneidungspunkte von Linien, die Bereiche redundanter Information repräsentieren. Als Vektorenobjekt wurde `line` angegeben, die restlichen Einstellungen verblieben in den Standardeinstellungen (default), erkennbar am Platzhaltersymbol „#“.

```
arc: CLEAN erased _ cov
erased _ clean # # line
```

Danach wurde in ArcInfo das interne Editierprogramm ArcEdit aufgerufen, das eine graphische Darstellungsoberfläche enthält. In ArcEdit wurde das mit CLEAN bearbeitete Coverage im Display dargestellt, denn darin stehen weitere Fehlerbeseitigungswerkzeuge zur Verfügung. Im Folgenden sind die Befehle aufgeführt, die Höhenlinien aufrufen, dann die 317 773 einzelnen Liniensegmente zur Bearbeitung freigeben und redundante Knotenpunkte entfernen:

```
arc: arcedit /ruft das Programm ArcEdit auf
ec: erased _ clean /ruft die Datei auf
de arc /stellt die zu bearbeitende Objektklasse ein
draw /gibt die Datei graphisch aus
ef arc /ermöglicht die Bearbeitung und Veränderung der Höhenlinien
317773 elements(s) for edit feature
ARC /gibt an, wieviele Elemente bearbeitbar sind
sel vertex draw /zeichnet alle enthaltenen Zusatzknotenpunkte (vertex, plural: vertices)
```

Ein Arc ist ein Liniensegment, das in Vektorenform abgespeichert und verwaltet ist. Zudem gibt es in ArcInfo noch Nodes, das sind Anfangs- und Endpunkt eines Arcs, in der folgenden Abbildung als weiße Punkte dargestellt. Ein Arc, also eine Linie, besteht zusätzlich aus vielen Vertices, das sind die Stützpunkte. Sie sind in der folgenden Abbildung als gelbe Punkte dargestellt.

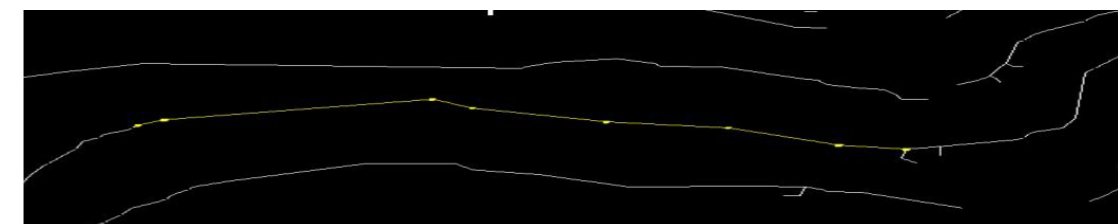


Abb. 46: ◀ Screenshot 8: Knotenpunkte (Nodes) und Stützpunkte (Vertices) definieren den Verlauf einer Höhenlinie

Nachdem nun alle vorhandenen Vertices aufgerufen waren, wurden durch den Makrobefehl UNSPLIT alle Pseudonodes entfernt. Pseudonodes sind redundante Knotenpunkte, die zwar intern als Knotenpunkte gespeichert sind, jedoch nicht die Form eines Linienvorlaufs definieren, da sie exakt auf der Linie liegen. Man kann diese Pseudonodes also entfernen, um die Datenredundanz und damit den Rechenaufwand zu verringern. Dies hat den sehr wichtigen Nebeneffekt, dass die Anzahl der einzelnen Liniensegmente reduziert wird. Dies hat für den Aufwand der manuellen Zuweisung der Höheninformation zu den einzelnen Höhenlinien entscheidende Bedeutung.

Pseudonodes entfernen:

```
sel all /alle Elemente werden ausgewählt
317773 element(s) now selected
unsplit none
```

Nach gut einer Stunde hat ArcInfo 290659 Pseudonodes entfernt, 27114 Elemente bleiben übrig.

27114 Elemente, die einzeln in einem Editierprogramm hätten manuell 'angefasst' werden müssen, hätten immer noch einen nicht vertretbaren Arbeitsaufwand bedeutet. Es galt, all jene Elemente, also Liniensegmente, in eine einzige Linie zu überführen, die jeweils eine Höhenlinie gleicher Höhe, z.B. die 1100 m Höhenlinie, darstellte. Daher wurde ein weiterer Befehl (nach freundlichem mündlichem Hinweis von Dr. Hans Stahl, ESRI Support, Augsburg) angewandt, um die Liniensegmente zu verbinden. Der Makrobefehl BUFFER, der eigentlich Pufferkorridore um Objekte herum aufbaut, wie sie z.B. bei Lärmschutzkorridoren benötigt werden, wurde benutzt, um Pufferkorridore um die Höhenlinien zu schaffen. An den Stellen, an denen Liniensegmente zwar aneinander anschlossen, jedoch eine eigene Identität behielten, überschneiden sich die jeweiligen Pufferkorridore. Da im Makrobefehl BUFFER die Funktion Ebenenüberschneidung (*intersecting, dissolving*) enthalten ist, wurden alle Pufferpolygone, die sich überschneiden, zu einem Polygon zusammengefasst. Es galt, die Toleranzwerte, also

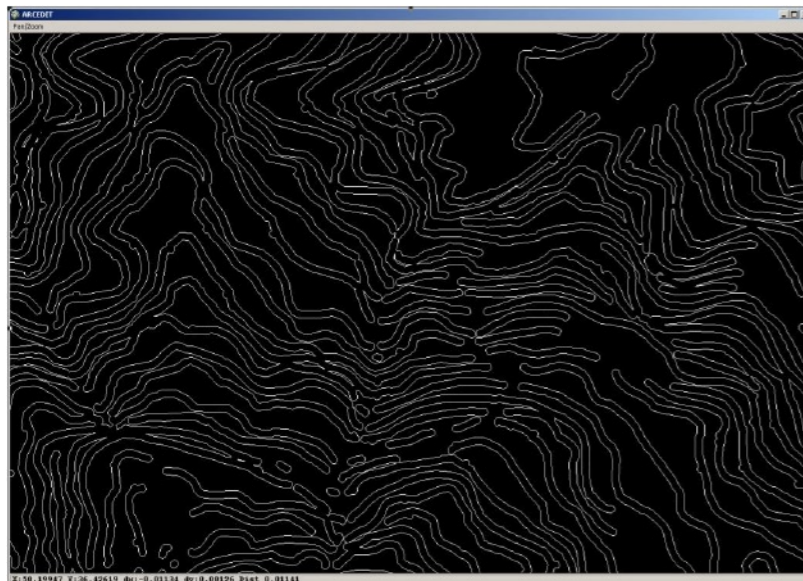


Abb. 47: ▲ Screenshot 9: Durch Polygonpuffer überschneiden sich die ehemals einzelnen Liniensegmente und wachsen zu einer einzigen Höhenlinie zusammen.

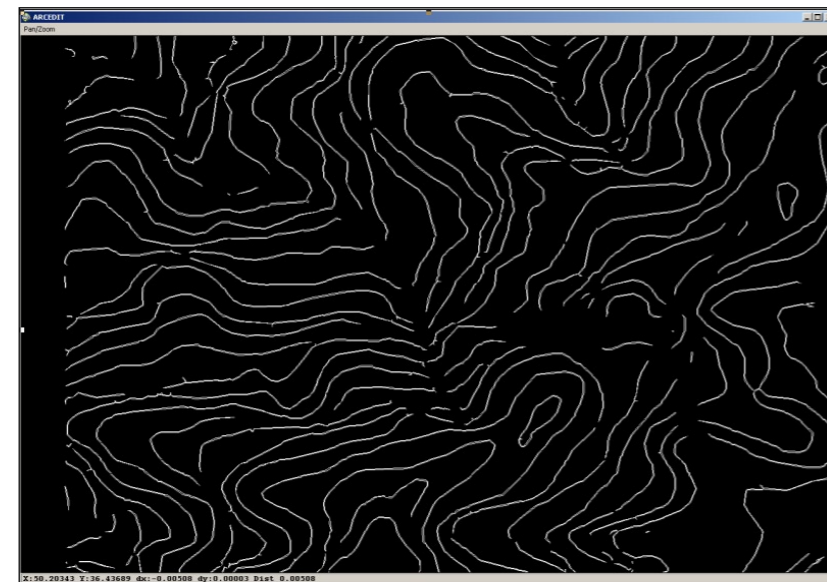
die Werte für die Breite des Pufferkorridors, sowie die *Fuzzy* Toleranz, das ist die Toleranz, innerhalb derer benachbarte Elemente als zusammengehörig erachtet werden, so einzustellen, dass einerseits möglichst wenig Liniensegmente übrigblieben. Andererseits stellte sich heraus, dass die Breite des Pufferkorridors nicht zu groß gewählt werden durfte, da die Liniensegmente sonst die Form von breiten Wülsten (»Regenwürmern«) annehmen und sich dabei an engen Stellen überschneiden. Aus den Linien wurden durch diesen Schritt also eigentlich Polygone, die sehr dünn blieben und dadurch optisch weiterhin wie Linien aussehen.

Buffern

```
arc: buffer erased_clean buffered
# # 0.0001 0.00001 line
```

Die Pufferkorridore werden zu breit, die Wülste überlappen sich an engen Stellen.

Abb. 48: ► Screenshot 10: Die Polygonpuffer überlappen sich mit einer niedrigeren Korridorbreite nicht mehr gegenseitig.



Als Kompromisslösung wurden folgende Werte als zufriedenstellend erarbeitet:

```
Arc: buffer cleaned buff # # 0.00001
0.000001 line
```

Um die Datei fehlerfrei weiter bearbeiten zu können und um eine korrekte Topologie herzustellen, wurde nochmals der Makrobefehl CLEAN angewandt. Danach wurde die Datei im Coverage Format in das Format Shape exportiert, um sie auch in ArcGIS verwenden zu können.

Der nächste Schritt war nun der arbeitsaufwändigste des ganzen Ansatzes, das Zuweisen der Höhenwerte (*line tagging*) zu den einzelnen Höhenlinien. Dazu wurde in ArcMap die in ArcInfo bearbeitete Vektorendatei über den *Scan* der Topographischen Karte als Ebene gelegt, damit die als Zahlen eingetragenen Höhenwerte der Karten, sowie die fettgedruckten Höhenlinien der 100 m Intervalle als visuelle Orientierungshilfe genutzt werden konnten. Mit einem Auswahlwerkzeug wurden die einzelnen Linien selektiert, angefangen wurde häufig bei den Gipfeln als Orientierungshilfe, von dort wurde hangabwärts gearbeitet. In die Attributstabellen wurden dann die entsprechenden Höhenwerte eingetippt. Empfehlenswert war es, nicht den Editor zu starten, sondern direkt, ohne Rückgängigfunktion, in die Attributstabelle zu schreiben, da sonst das Programm immerfort abstürzte. Ebenso hilfreich erwies sich der Arbeitsmodus, zunächst mit der Shifttaste alle Höhenlinien im Fenster mit dem gleichen Höhenwert auszuwählen, um dann mit der Funktion CALCULATE VALUES den Höhenwert nur einmal für alle ausgewählten Linien eintippen zu müssen. Zusätzlich wurde die Labelanzeige aktiviert, damit wurden alle bereits bearbeiteten Höhenwerte angezeigt. Die Höhenlinien im 100 m Intervall wurden zur leichteren optischen Orientierung blau eingefärbt, die unbearbeiteten Höhenlinien rot belassen (mittels *layer properties/ categories/ unique values*). Zuerst wurden die 100 m Höhenlinien fertiggestellt, danach war eine Überprüfung und Orientierung in der Topographischen Karte nicht

mehr nötig und die 20 m Höhenlinien waren nach eigenem Bemessen zuzuordnen.

mehr nötig und die 20 m Höhenlinien waren nach eigenem Bemessen zuzuordnen.

Dieser Bearbeitungsschritt dauerte 18 Stunden und 30 Minuten und stellt damit den Hauptfaktor an Zeitverbrauch für den gesamten Ansatz dar, der insgesamt ca. 32 Stunden benötigt. Sicherlich ist die Art der Höhenwertzuweisung noch zu verbessern, allein durch einen besseren Ansatz als durch das Buffern wären bestimmt enorme Zeiteinsparungen möglich, jedoch verbat der Rahmen dieser Arbeit weitere Untersuchungen hierzu. Ein Zeitpensum von vier Arbeitstagen erscheint aber dennoch im Vergleich zu den geschätzten vier Wochen oder mehr, die man auch mit Übung für ein manuelles Digitalisieren braucht, als deutliche Verbesserung.

Zum Schluss wurden noch alle Linienelemente, die nicht einen Höhenwert hatten, gelöscht. Sie bestanden zum wesentlichen Teil aus sehr kurzen Segmenten, die bei der Ausdünnungsmethode fälschlicherweise entstanden waren. Des Weiteren wurde eine Clipmaske mit einem Polygon erstellt, um die Digitalisierungsränder der Datei für die Berechnung als TIN abzuschneiden (mittels *tools/ geoprocessing wizard/ intersection*), dann wurden die Höhenlinien in ein TIN umgewandelt. Das TIN wurde in ArcToolbox in UTM WGS 84 projiziert und als Überhöhung 0,00001 eingestellt.

Ein Genauigkeitsvergleich der blau eingezeichneten 100 m Höhenlinien mit den roten 20 m Höhenlinien zeigt deutliche Unterschiede in der Genauigkeit auf. Es ist ersichtlich, dass ganz andere Hangformen bei einem 100 m genauen Höhenmodell interpoliert werden. Die 20 m Höhenlinien erzeugen bereits einen deutlich realitätsnäheren Reliefindruck. Man erkennt deutlich den Unterschied zwischen dem Tal im Vordergrund, das auf 20 m genau ist, und dem Umlaufberg wie auch dem Hintergrund, der in der 100 m - Auflösung deutlich gröber zu erkennen ist. Dieser Ansatz der Extraktion von Signaturinformation aus Topographischen Karten lässt sich hervorragend auch auf andere Rastergrundlagen oder andere Signaturen der Topographischen Karte anwenden. Im folgenden Beispiel wurde die gesamte Hydrologie des Testgebietes auf die zuvor beschriebene Weise extrahiert, der gesamte Vorgang dauert hierfür inklusive der Umwandlung in Vektoren lediglich 30 Minuten. Natürlich müssen hier auch die Einschränkungen der Methodikzusammenstellung benannt werden. Eine relativ gute Qualität der Druckvorlage ist Voraussetzung, Topographische Karten arider oder semiarider

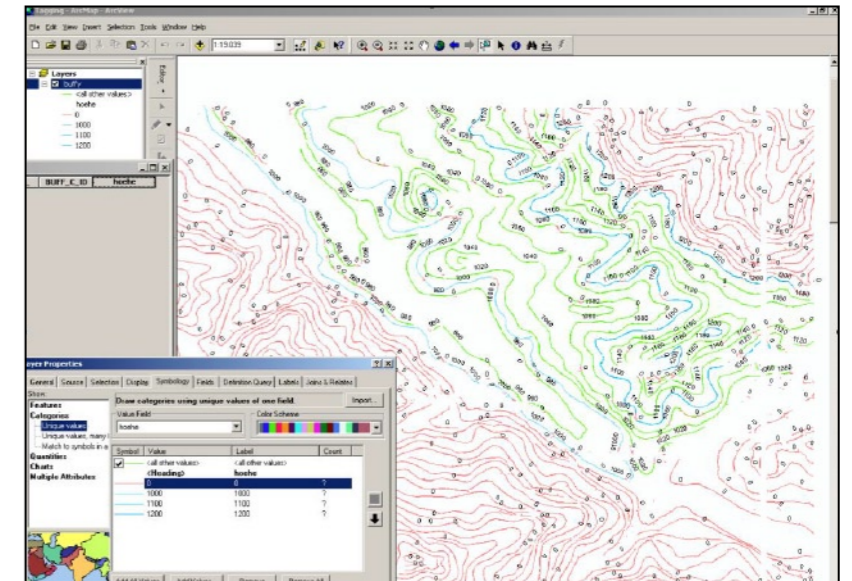
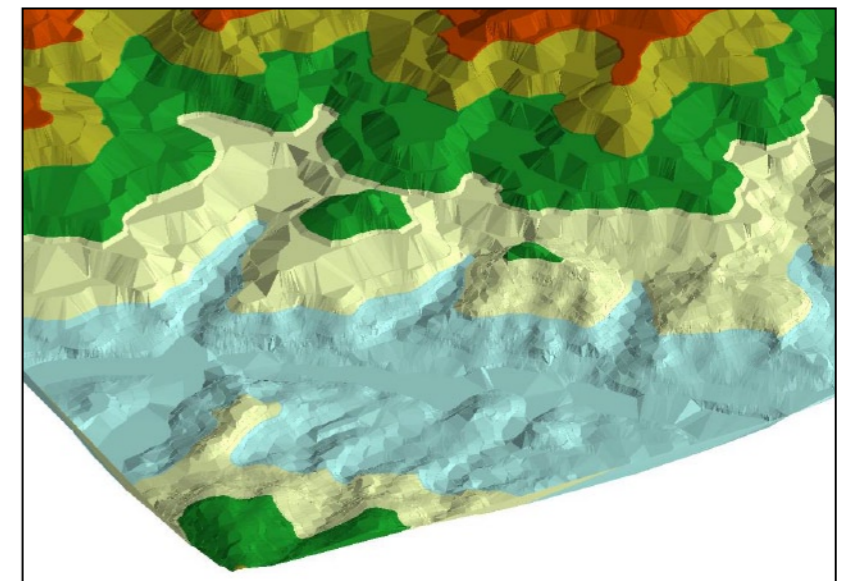


Abb. 49: ▲ Screenshot 11: Die Höheninformationen wurden den einzelnen Höhenlinien in ArcMap zugewiesen und zur Kontrolle des Arbeitsfortschritts farbig kodiert.

der Gebiete sind je nach Druckqualität eventuell einfacher zu handhaben, da die Vegetationssignatur in diesem Beispiel sich als hinderlich herausstellte. Beispiele anderer Versuche von Waldgebieten in Nordamerika haben jedoch ebenso erfolgreiche Resultate ergeben (vgl. www.terrainmap.com). Eine andere Einschränkung für die Praxis stellen die Softwareprodukte von ESRI durch die hohen Kosten dar, jedoch könnte man darauf auch verzichten, benützte man z.B. GRASS5. Auch statt der Bildbearbeitungssoftware von Corel könnte man andere gängige Produkte von z.B. Adobe oder Macromedia benutzen oder aber Freeware wie BLACKART. Die Freewareprodukte haben jedoch vielfach Einschränkungen in der Funktionalität (siehe z.B. die kostenlose Version von WinTopo) oder in der verarbeitbaren Datenmenge (BLACKART). Trotz der Einschränkungen erzielt dieser Ansatz in zwei Punkten wesent-

Abb. 50: ▼ Ein TIN - Geländemodell aus den Höhenlinien. Dem blauen Bereich liegen Höhenlinien im 20 m Abstand zugrunde, den Farbbereichen Grün, Gelb und Rot 100 m - Abstände. Blick nach Süden, "Sonnenstand" im Westen



liche Vorteile gegenüber der Digitalisierung, und zwar in der Genauigkeit und im Zeit- und Kostenaufwand. Auf die Bedeutung der Genauigkeit eines DGM wird auch in der Literatur wiederholt hingewiesen. Der Maßstab von 1:50.000 war beispielsweise in einer Studie zur Erstellung für ein 20 m DEM zu gering (PALLÁS et al. 2004). Durch Kopieren und Digitalisieren entstanden dort maximale horizontale Diskrepanzen von 15 m zwischen Original und digitalisierter Kontour und das führte zu einem Fehler für die Hangneigungswinkel von $\pm 5^\circ$. Damit war die schlechte Qualität des DEM Hauptursache für die Beschränkung der Aussage der Studie.

Abb. 51: ► Screenshot 12:
Weitere Arbeitsschritte lassen sich durch die Vektorenerstellung aus Topographischen Karten enorm erleichtern: das Flussnetz des gesamten Testgebietes stand nach nur einer halben Stunde Gesamtarbeitszeit digital zur Verfügung.

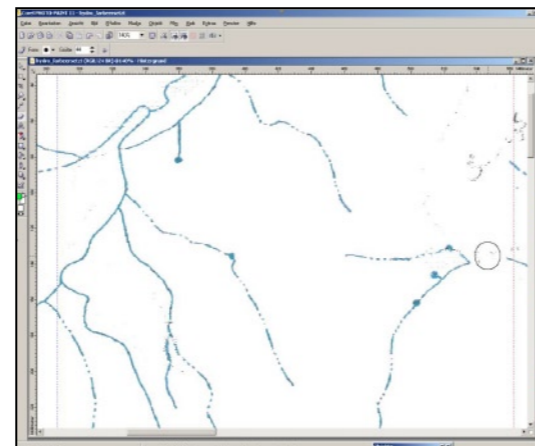
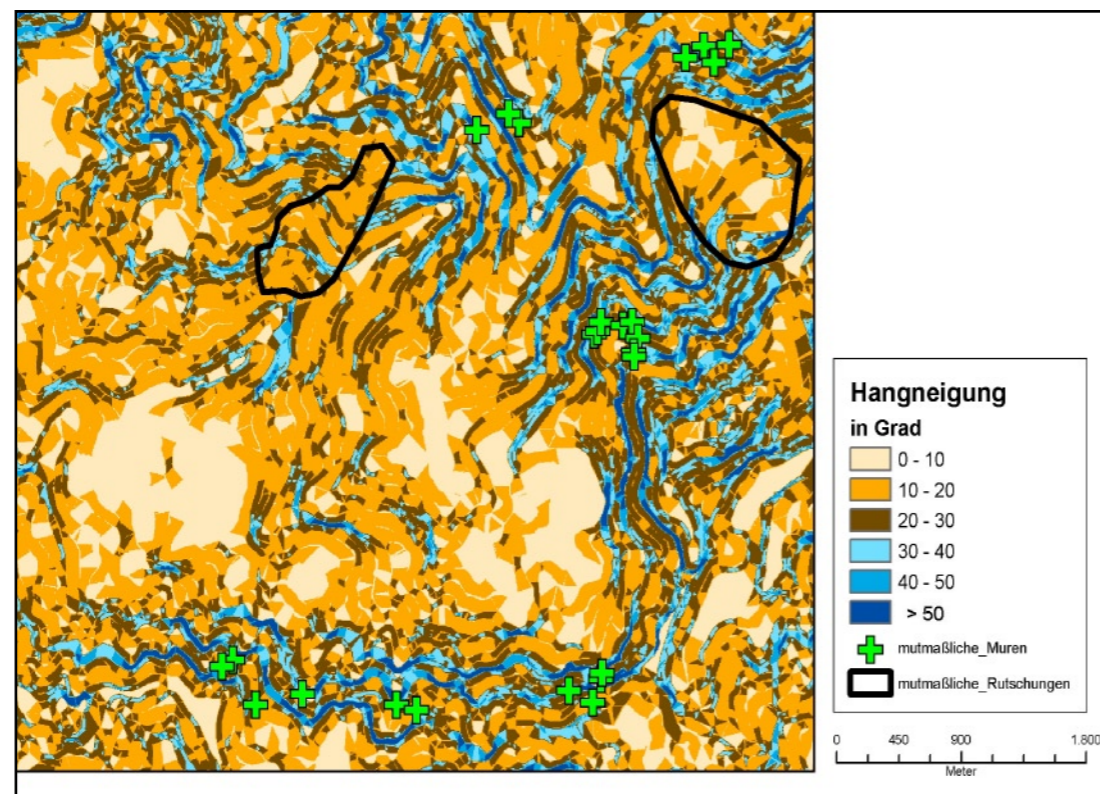


Abb. 52: ▼ Beispiel für die Anwendung des Digitalen Geländemodells: aus der dreidimensionalen Struktur abgeleitete Informationsebenen wie z.B. Hangneigung konnten mit dem Auftreten von Massenbewegungen verglichen werden. Die Lage mutmaßlicher Muren im Testgebiet ließ sich durch die Überlagerung der Datenebenen im GIS mit mittleren bis sehr steilen Hangneigungsgraden korrelieren.



Der Vorteil der Methodikzusammenstellung dieser Arbeit liegt zum einen in der Qualität der exakteren Extraktion der Höhenlinien im Vergleich zum manuellen Nachdigitalisieren. Fehler durch das Nachlassen der Konzentration entfallen, die Notwendigkeit der Beachtung einer einheitlichen Zoomstufe erübrigt sich und der Charakter der Höhenlinien wird exakter erfasst. Ein weiterer Vorteil liegt in der enormen Zeitersparnis, im Gegensatz zu einem arbeitszeitzehrenden wochenlangen manuellen Nachdigitalisieren dauerte die Extraktion der Höhenlinien für das Testgebiet nur vier Tage.

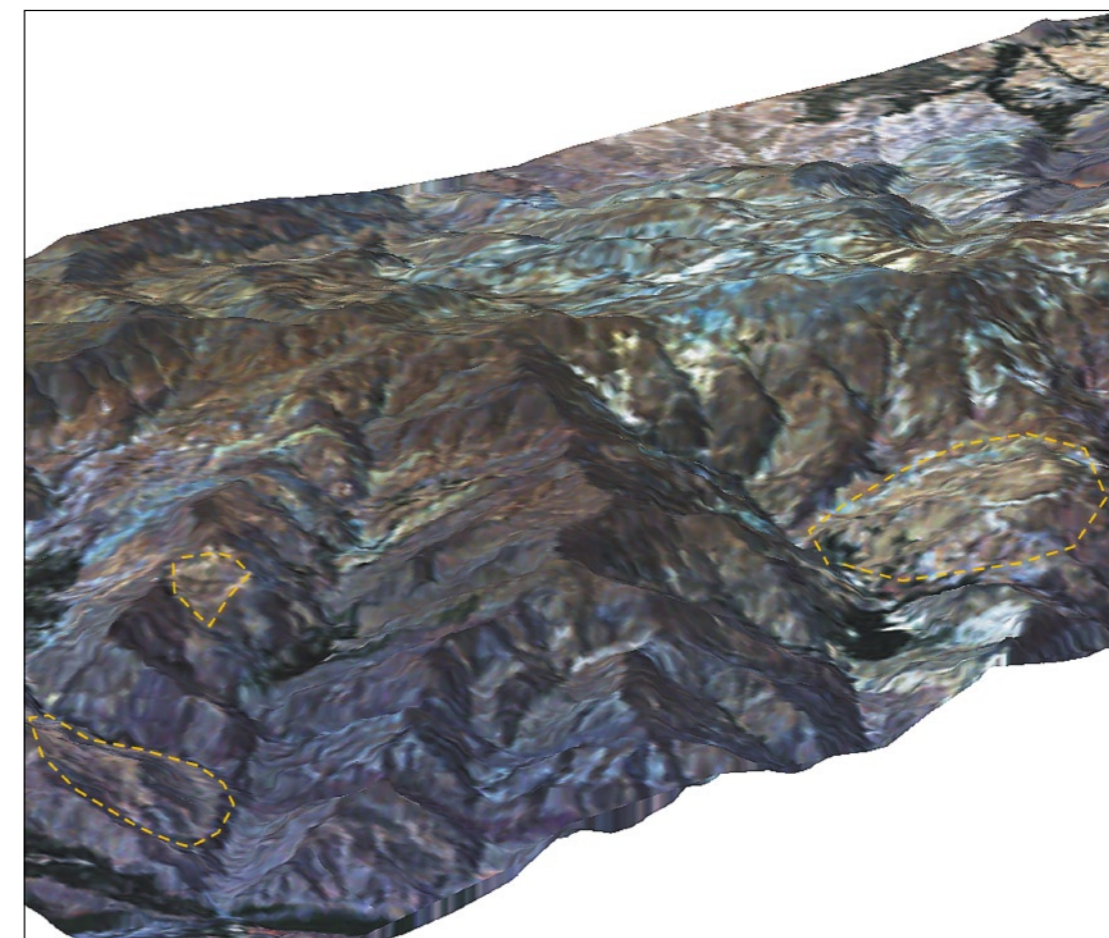
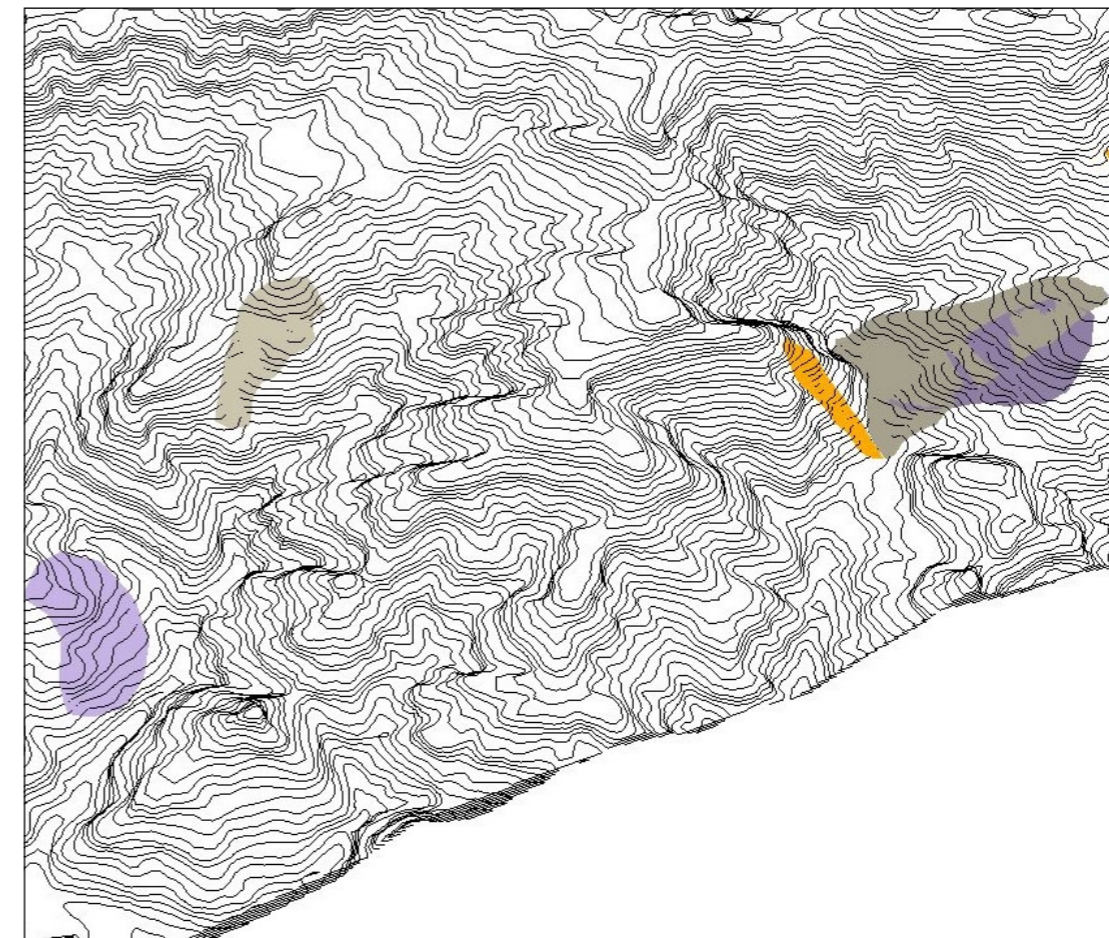


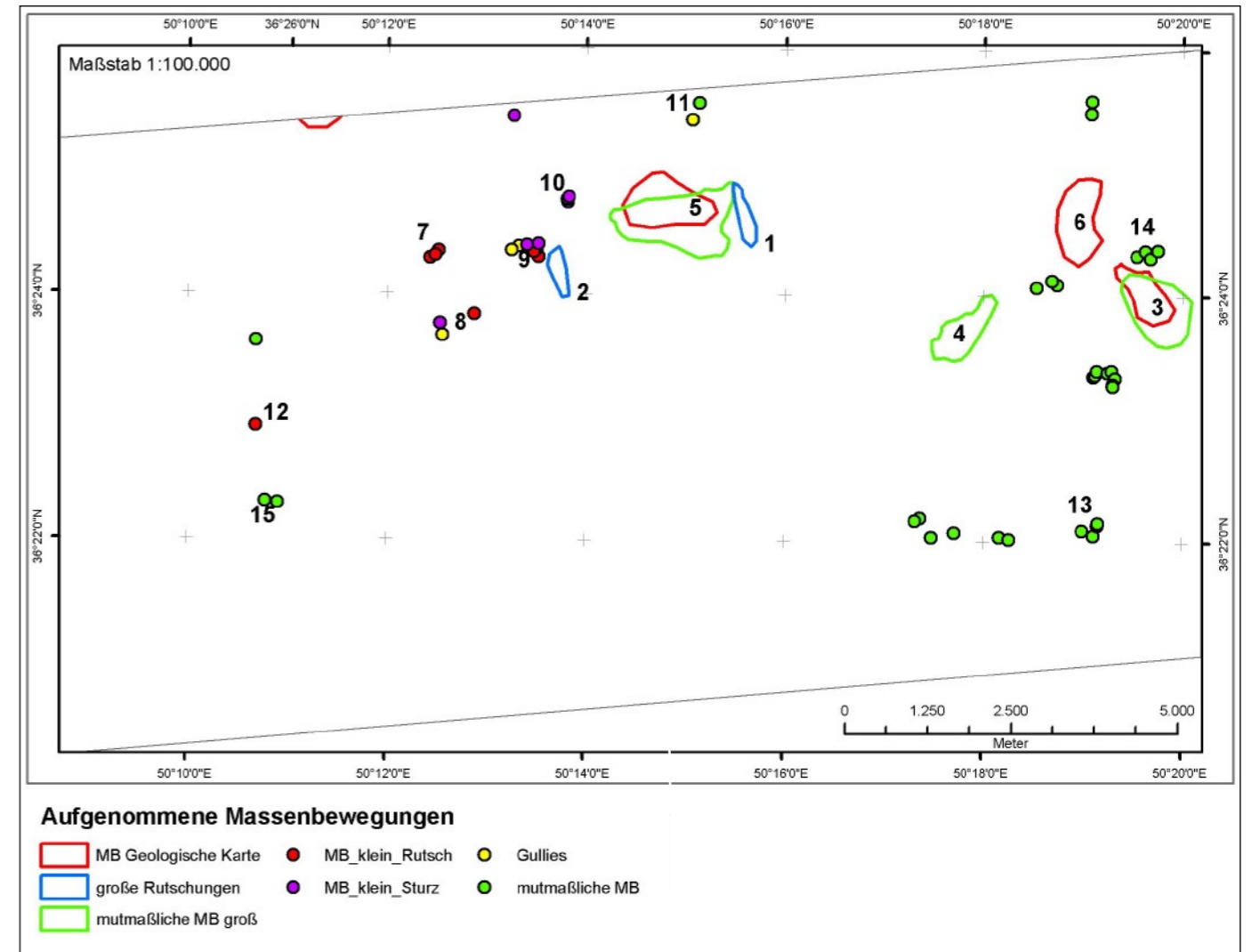
Abb. 53a ◀ & 53b ▼:
Das Digitale Geländemodell unterstützt die visuelle Erkennung von Massenbewegungen. Im oberen Bild können unruhige Geländeoberflächen wie sie z.B. in Folge einer großen Rutschung entstehen durch die Konturliniendarstellung (20 m – Abstand der Konturlinien) sichtbar gemacht werden. Im unteren Beispiel erlaubt die Reliefschattierung zusammen mit dem dreidimensionalen Eindruck eine verbesserte Erkennung von Massenbewegungen in den multispektralen Satellitendaten von LANDSAT, Kanalkombination 3-2-1, Cubic Convolution und Histogramm-Equalize, nachgeschärft

Kapitel 7

Aufgenommene Massenbewegungen im Testgebiet



Abb. 54: ▲ Photo i13-02-18: rutschungsartiger Abriss am südlichen Gebirgskamm des Testgebietes



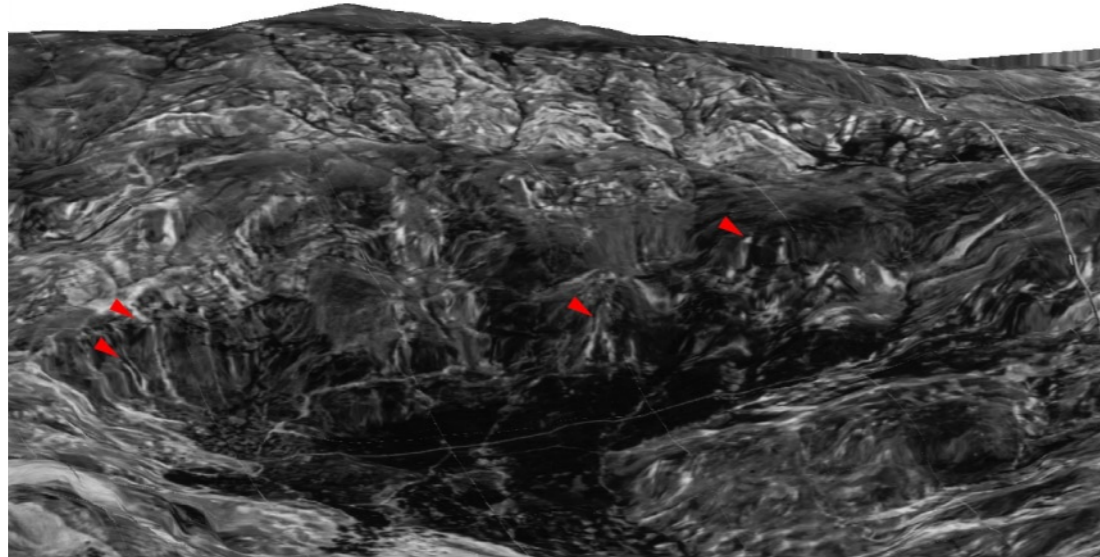
Beobachtungen über die im Testgebiet vorhandenen Formen von Massenbewegungen konnten aus einer Vielzahl von Daten gewonnen werden. Dazu zählen die Geländeaufnahme vor Ort, die Fernerkundungsdaten von CORONA und LANDSAT und das vorhandene Kartenmaterial der amtlichen Topographischen und Geologischen Karten. Die Vielzahl der Datenquellen ermöglichte einerseits das Zusammentragen von Beobachtungen von Massenbewegungen unterschiedlicher Oberflächenform und -größe. Andererseits limitierte die Art der Datenquellen in Form von räumlicher oder spektraler Auflösung und Generalisierung auch die Aussagemöglichkeiten über Massenbewegungen. Die Beobachtungen vor Ort im Gelände des Testgebietes ermöglichten die Aufnahme einer Stichprobe aus der Vielzahl von Massenbewegungsformen. Eine vollständige Kartierung war jedoch im Rahmen des Forschungsaufenthaltes nicht zu bewerkstelligen. Das Spektrum der Verschiedenheit an Massenbewegungsformen, sowie die Aufnahme von mittel- bis kleinskaligen Massenbewe-

Nr. in Karte	siehe Abbildung Nr.	Nr. in Karte	siehe Abbildung Nr.
1	26, 32, 70, 71, 72, 73, 74	8	91, 109
2	118, 119, 120, 134	9	86, 83
3	31, 33	10	58
4	33	11	114
5	1, 2, 4, 7, 27, 37b, 125	12	54
6	33	13	57
7	85		

gungsformen konnte jedoch durch keine andere Datenquelle erreicht werden. Fernerkundungsdaten ermöglichten die Detektion von weitaus größeren Massenbewegungen im Kilometerbereich. Massenbewegungen ab 2 km konnten durch die Umrissform, die linienhaften Elemente wie auch durch die Oberflächenstruktur leichter durch die Satellitenaufnahmen als im Gelände erkannt werden (siehe Kapitel 5.1 & 5.2). Mittlere Massenbewegungen konnten jedoch nur teilweise durch exponierte Oberflächeneinheiten erkannt werden, kleinere Massenbewegungen überhaupt

Abb. 55 ▲▲ und 56 – Tabelle 1 ▲: Lage der erkannten und in die Bewertung aufgenommenen Massenbewegungen im Testgebiet. Die Ziffern verweisen auf die Abbildungen im Text (vgl. Abbildungsverzeichnis).

Abb. 57: ► CORONA-Satellitenbild als „drape image“ mit der dreidimensionalen Höheninformation aus dem DGM. Die Pfeile weisen auf mutmaßliche Murgänge, die sich als exponierte helle Streifen abzeichnen. Der Reliefeindruck durch die dreidimensionale Darstellung erleichterte die Erkennung. Steilheit des Reliefs und Hangform sind weitere Indizien, dennoch sind keine gesicherten Aussagen ohne unterstützende Geländearbeit möglich.



nicht (siehe Kapitel 5.1). Auch die Geologischen Karten stellten eine gute Beurteilungshilfe für die Erkennung von Massenbewegungen größer als 1km dar (siehe Kapitel 8.1). Aus Generalisierungsgründen der Geologischen Karte deckten sich die Umrisse der Massenbewegungen nicht vollständig mit den Geländebefunden oder den Kartierungen aus den Satellitenbildern. Bemerkenswert ist daher einerseits die größenabhängige Erkennung von Massenbewegungen anhand

der Daten und andererseits die Beschränkung auf bestimmte Massenbewegungsformen. Große Rutschungsmassen konnten erkannt werden (LANDSAT, CORONA, Geologische Karte) und mittelgroße Muren und ein größerer Bergsturz (CORONA). Weitere Formen in diesen Maßstäben wie auch kleinere Massenbewegungen konnten jedoch nur durch Geländebeobachtungen erfasst werden. Auch die Exposition nahm Einfluss auf die Erkennung von Massenbewegungen. Auf den CORONA-Daten waren Muren und andere Massenbewegungen, welche eine exhumierte Bodenoberfläche aufweisen, nicht auf den südexponierten Hängen zu erkennen. Grund hierfür ist die starke Reflektion durch den natürlichen Sonnenstand, welcher steile und südexponierte Flanken des Gebirges in der Graustufung genauso hell erscheinen lässt wie auch exhumierte Oberflächen von z.B. Muren. Damit ist zu berücksichtigen, dass die Nordexposition in der Gruppe der kleinen mutmaßlichen kartierten Massenbewegungen eine Bevorzugung erhält, die nicht der Realität entspricht. Auch die Terrassierung erschwert durch die Parzellierung und die sehr helle Graustufendarstellung in den CORONA-Daten die Detektion kleinerer Massenbewegungen. Die vorliegende Karte zeigt die flächenhaft kartierten großen Massenbewegungen, wie sie relativ eindeutig aus den Daten erkannt werden konnten. Ab der mittelskaligen Dimension, unterhalb von 1km, können die kartierten Massenbewegungen nur als Stichproben betrachtet werden.

Abb. 58: ► Photo i14-02-30, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: Beispiel für Felssturz



Abb. 59: ► Massenbewegungen wie diese komplexe Rutschung konnten in den CORONA-Daten nur anhand der exhumierte Abtragungsflächen erkannt werden. Diese hell abstrahlenden Bereiche waren zudem schwer vom Reflexionssignal von Straßen zu unterscheiden (vgl. Abb. 32, S. 37).

Kapitel 8

Faktoren für die Anfälligkeit gegenüber Massenbewegungen



Abb. 60: ▲ Photo i14-02-26, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: Vielfalt und Lagerungsverhältnisse der geologischen Schichten im Testgebiet

Um den komplexen Mechanismus von Massenbewegungen erkennen und bewerten zu können, wurden einzelne Faktoren untersucht, inwiefern sie nach dem Ursache - Wirkungsprinzip Massenbewegungen vorbereiten oder auslösen können. Die Faktoren wurden aufgrund der in vorherigen Kapiteln dargestellten Datengrundlagen kartiert und in das GIS eingebunden. Dort wurden aus den einzelnen Faktoren so bezeichnete Faktorebenen gebildet.

Faktorebenen enthalten die Informationen eines einzelnen Faktors, wie z.B. des geologischen Untergrundes des Testgebietes.

Die Informationen einer Flächeneinheit wurden als einzelne Gruppen klassifiziert, z.B. die Gruppe der Vulkanite. Die numerischen Werte dieser Gruppen wurden anschließend als Flächensignaturen in Form einer Informationsebene in das GIS integriert.

8.1 Untergrundmaterial

Die Materialzusammensetzung ist einer der wichtigsten Faktoren für die Stabilität und die Anfälligkeit gegenüber Massenbewegungen. Die physikalischen Prozesse wirken auf mikroskopischer Ebene und werden durch Einflüsse von außen, z.B. durch Niederschlag, physikalisch wie chemisch modifiziert. Dadurch wird das temporäre Stabilitätsgleichgewicht ständig verändert. Änderungen im Materialverband steuern wesentlich sowohl Auslösung als auch Ablauf von Massenbewegungen. Im für Massenbewegungen relevanten oberflächennahen Teil der Erdkruste wirken endogene und exogene Prozesse auf das Materialgefüge ein. Durch endogene Prozesse wird die gesamte Materialosphäre modifiziert, exogene Prozesse nehmen dagegen in ihrer Auswirkung in die Tiefe hin ab. Daher lässt sich die Materialosphäre in geologischen Untergrund, oberflächennahe Dekompositionssphäre und bedeckende Bodenaufgabe unterteilen. Für die Betrachtung von Massenbewegungen stellte sich diese vertikale Differenzierung als wesentlich für das Verständnis der Einwirkung der Materialkomposition heraus.

8.1.1 Geologie

Geologische Gesamtsituation des Untersuchungsgebietes

Das Elburs-Gebirge gehört zum nördlichen Teil des alpidisch-himalayischen Orogengürtels im westlichen Asien und ist im Zuge der kimmerischen und alpidischen Orogenese entstanden (AXEN et al. 2001, DAVOUZADEH & SCHMIDT 1983, DAVOUZADEH 1997, DAVOUZADEH et al. 1997). Strukturell und stratigraphisch ist es mit dem Zentraliran ver-

bunden. Im Untersuchungsgebiet sind starke Segmentierung der vielphasigen Gesteinsformationen durch Bruchtektonik sowie im Allgemeinen moderate Faltung kennzeichnend (ALAVI 1996, ANNELS et al. 1975).



Abb. 61: ▲ Photo i23-02-32: liegende tektonische Falte nördlich von Karaj

Durch eine Vielzahl parallel verlaufender nordwest gerichteter Verwerfungen sind die Gesteinsschichten verschiedenen Alters gegliedert und häufig nach Süden überschoben. Diese Verwerfungen fallen meist unter einem sehr steilen Winkel ein. Weitere Störungsrichtungen sowie flachere Einfallswinkel sind weit weniger charakteristisch, jedoch für eine zusätzliche deutliche Zergliederung der Gesteinsschichten verantwortlich. Die Orogenese wird gegenwärtig durch die Kompression zwischen Arabischer und Europäischer Platte erklärt, mit der vor etwa 65 Mio. Jahren am Übergang von Oberkreide zu frühem Paläozän eine erste Hebung einsetzte. Die Haupthebungsphase fand im Oligozän statt und führte zu einem Gebirgszug, der das Kaspische Becken

von den neogenen Becken Zentralirans trennte. Die gegenwärtige tektonische Aktivität ist Teil einer Kompressionsphase, die im späten Pliozän einsetzte (MARTINI et al. 1998).

Von Präkambrium bis Trias entstanden vorwiegend Kalksteine und daneben klastische Sedimente (ANNELS et al. 1975). In der späten Trias begann eine Phase von Verwerfungen und lokaler Faltung. Spätestens in der Jüngeren Trias setzte die Bildung mächtiger Sedimenttröge ein, welche die Mächtigkeit und lithologische Varietät der mesozoischen und tertiären Gesteine erklären. Das Jura ist durch tektonische Instabilität und Vulkanismus gekennzeichnet. Die parallel zu den Hauptstreichrichtungen verlaufenden Tröge füllten sich in der Unterkreide mit Vulkaniten. Das Paläogen besteht aus einer dreiphasigen Sequenz von submarinen Tuffen, verschiedenen basischen subaerischen Laven, vermutlich des Oligozäns und die dritte Phase aus amorphen andesitischen Laven mit dazitischen und rhyolitischen Einschaltungen. Das Neogen besteht aus roten klastischen Sedimente mit zwischengelagerten, vermutlich marinen Evaporiten, die Lagen bis zu 3000 m erreichen. Grobkörnige saure Intrusiva entstanden zwischen spätem Paläogen bis zum Ende des Neogen. Das Quartär ist insbesondere innerhalb der Terrassen feiner gegliedert, des Weiteren durch Moränen und einzelne Lavaströme.

Stratigraphie des Geologischen Untergrundes

Von Präkambrium bis Trias herrschen Kalksteine und daneben klastische Sedimente vor (nach: ANNELS et al. 1975). Zu benennen sind für das Untere Karbon der Mobarak Kalkstein, für das Untere Perm die rot-klastische Dorud Formation, für das Obere Perm der Ruteh Kalkstein und die dolomitischen Kalksteine der Elikah Formation. Die Trias besteht vorwiegend aus mächtigen Sedimenten. Diskordant überlagert die Shemshak Formation aus dem Jüngerem Jura die älteren Gesteinsschichten, bestehend aus lokal unterschiedlichen, bis 1000 m mächtigen, Ablagerungen aus Vulkaniten und aufgelagerten kohleführenden klastischen Schichten im Süden und bis zu 3400 m mächtigen Lagen aus grobkörnigen Konglomera-

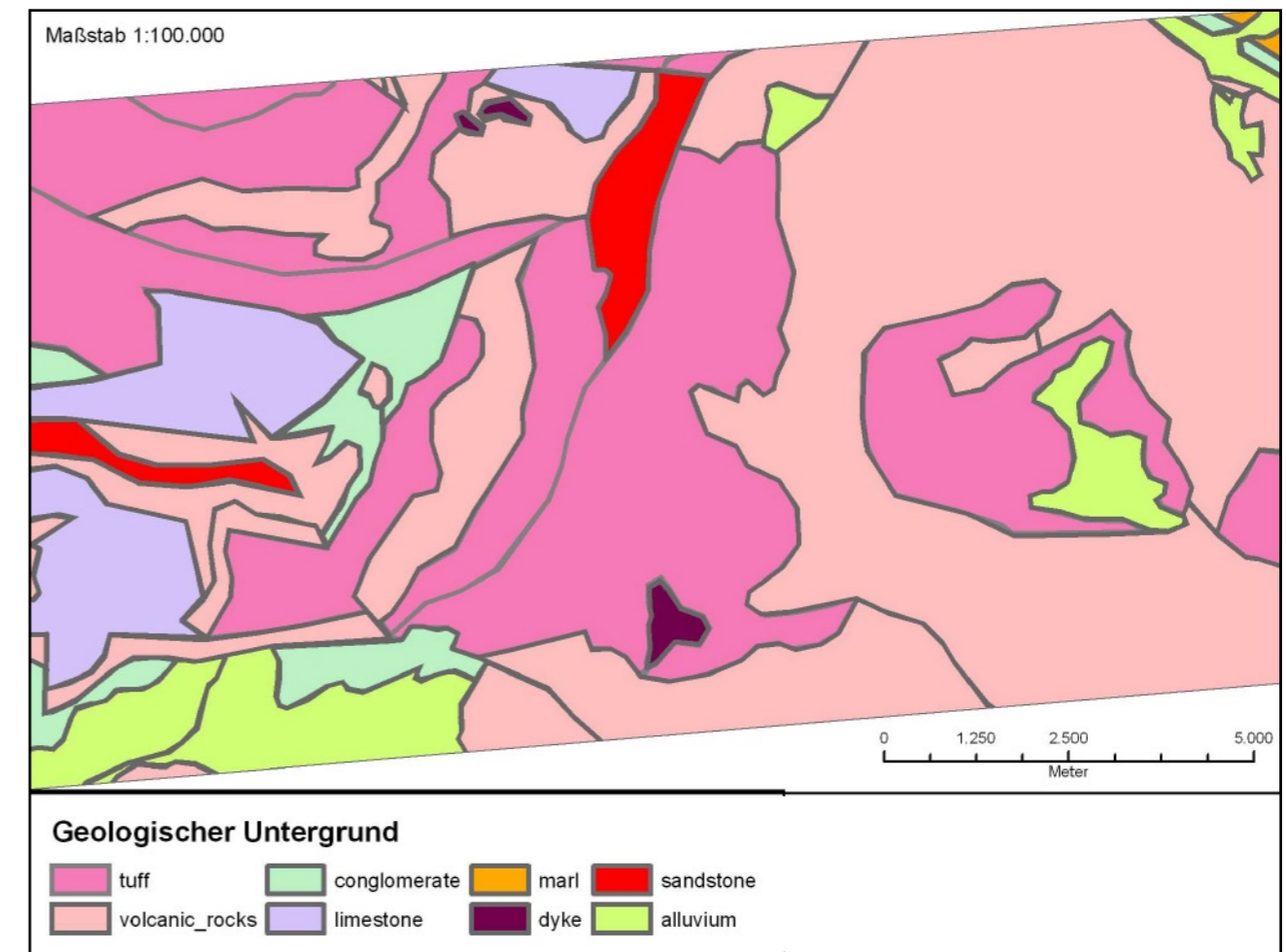
ten, Metasedimenten und Quarzschutt im Nordosten. Im Oberen Jura bildeten sich mächtige Sedimente des Necomian. Die parallel zu den Hauptstreichrichtungen verlaufende Tröge füllten sich in der Unterkreide während des Apt bis Alb und auch während des Senon mit bis zu 1500 m mächtigen Vulkaniten. Sandschüssiger Kalkstein des Maastricht blieb nur lokal im Nordwesten erhalten.

Das Paläogen besteht aus einer dreiphasigen, bis zu 6000 m mächtigen Sequenz, in die eruptive Vulkanite zwischengeschaltet sind. Die erste Phase bildet sich aus submarinen Tuffen, die zweite Phase aus verschiedenen basischen subaerischen Laven, vermutlich des Oligozäns und die dritte Phase aus amorphen andesitischen Laven mit dazitischen und rhyolitischen Einschaltungen. Das Neogen besteht aus roten klastischen Sedimente mit zwischengelagerten, vermutlich marinen Evaporiten, die Lagen bis zu 3000 m erreichen. Grobkörnige saure Intrusiva entstanden zwischen spätem Paläogen bis zum Ende des Neogen. Das Quartär ist insbesondere innerhalb der Terrassen feiner gegliedert, des Weiteren durch Moränen und einzelne Lavaströme.

Untersuchung der Geologie als Faktor für Massenbewegungen

Neben der vertikalen Gliederung des Gesteinsmaterials ist im untersuchten Gebiet des Elbursgebirges auch die horizontale Gliederung wichtig, da das Gesteinsmaterial durch die intensive Orogenese und Tektonik in ein mosaikartiges Puzzle zergliedert wurde.

Auf engem Raum ist eine große Variabilität des Untergrundes gegeben (vgl. Abb. 115, LANDSAT-Satellitenbild). Dies verhindert eine homogene Faktorenverteilung für die Anfälligkeit für Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet. Eine Aussage aus den gesteinsmechanischen Eigenschaften konnte ohne eine eingehende Untersuchung und intensive labortechnische Auswertung nicht bewerkstelligt werden. Daher wird, wie auch im Kapitel 1.2 Forschungsstand erläutert, nicht ein geotechnischer Ansatz, sondern eine Faktorenüberlagerungsanalyse (*factor overlay technique*) vorgenommen. Aus Praktikabilitätsgründen und um einen Vergleichsmaßstab herstellen zu können, wurde ein pragmatischer Ansatz der Auswertung aus Sekundärquellen verfolgt. Massenbewegungen wie sie in der Geologischen Karte verzeichnet sind, wurden ausgewertet nach Häufigkeit pro Gesteinsschicht und eindeutigem Bezug zu Straßen- Fluss- Erzsichten- und Tektoni-



keinfluss. Um den Faktor geologischer Untergrund adäquat bewerten zu können, musste für eine Untersuchung des Einflusses verschiedenartiger Gesteinsschichten ein entsprechend großes Gebiet untersucht werden, um die Stichprobenanzahl der zu bewertenden mosaikartigen Gesteinsschichtenausschnitte zu vergrößern. Insbesondere bei Geologischen Karten übt der Einfluss des subjektiven Expertenwissens der Autoren der Geologischen Karte großen Einfluss auf die Ausweisung der Signaturen auf der Karte aus. Daher wurde ein möglichst großer Ausschnitt gesucht, der eine einheitliche Bearbeitungsgrundlage darstellt. Außerdem galt es, den Maßstab der in Geologischen Karten aufnehmbaren Größenordnung von Massenbewegungen zu berücksichtigen. Beim Doppelblatt Qazvin & Rasht E3 & E5 (ANNELS et al. 1975) mit einem Maßstab von 1:250.000 waren die Homogenitäts- und Verhältnismäßigkeitsforderung an die Bearbeitungsgrundlage erfüllt. Denn die eingetragenen Massenbewegungen liegen in Größenordnungen von ca. 1 bis 5 km vor. Ein Vergleich der Geologischen Blätter untereinander, sei es im Maßstab 1:250.000 oder 1:100.000, erbrachte jeweils zu

große Unterschiede in der Darstellung der Daten. Daher konnten die Blätter 1:100.000 nicht als Zusatzinformation zu den 1:250.000 Blättern genutzt werden. Die Karte Qazvin & Rasht 1:250.000 deckt das gesamte Testgebiet wie auch fast das gesamte Elbursgebiet des DRYSATMAP Untersuchungsgebietes ab. Diese Kartierung von Massenbewegungen wie auch die Ausweisung der Geologischen Schichten ist im Aussagegehalt zurückhaltend zu sehen, da erstens die Kartierung von Massenbewegungen nicht Hauptanliegen einer Geologischen Karte ist. Zweitens können Gesteinsschichtgrenzen in der Geländeaufnahme abweichend bewertet werden durch andere Kartierer bzw. durch unterstützende Satellitenbilddatenauswertung. Drittens entbehrt die Geologische Karte auch flächendeckende Informationen über Tiefe und dritte Dimension, sowohl der Massenbewegungen als auch der Geologischen Schichten. Dies lässt Aussagen über Formen und Prozesse der Massenbewegungen nicht zu, ebenso wenig eine Ableitung des Faktors Geologie als auslösenden Faktor, z.B. durch eine wasserstauende Schichtgrenze, da der Charakter ihres dreidimensionalen Verlaufs nicht bestimmbar, höchstens

Abb. 62: Karte 8: digitalisierte Geologie des Testgebietes mit tektonischen Störungen nach der Geological Map of Iran 1:100.000, No. 6062 Qazvin. Der geologische Untergrund des Untersuchungsgebietes besteht überwiegend aus den am meisten von Massenbewegungen betroffenen Klassen der Tuffen und sonstigen Vulkaniten.

schätzbar bleibt. Analysemethoden, auch fernerkundliche, zur flächendeckenden Erzeugung dreidimensionaler Vermessungen des tieferen Untergrundes gibt es leider noch nicht. Aus all diesen Gründen wird im Folgenden nicht der geologische Untergrund, als vielmehr die bodennahen Schicht untersucht, welche jedoch sehr stark mit dem geologischen Untergrund zusammenhängt. Da Geologische Karten die Erdoberfläche sozusagen 'abgedeckt' untersuchen, wird davon ausgegangen, dass die verzeichneten Massenbewegungen sowohl bodennahe Schicht, als auch den geologischen Untergrund betreffen. Die Auswertung pro kartierte Gesteinsschicht lässt somit lediglich Aussagen über eine horizontale Verteilung der Massenbewegungen zu. Die Einflussnahme des geologischen Untergrundes kann damit nur gemutmaßt werden.

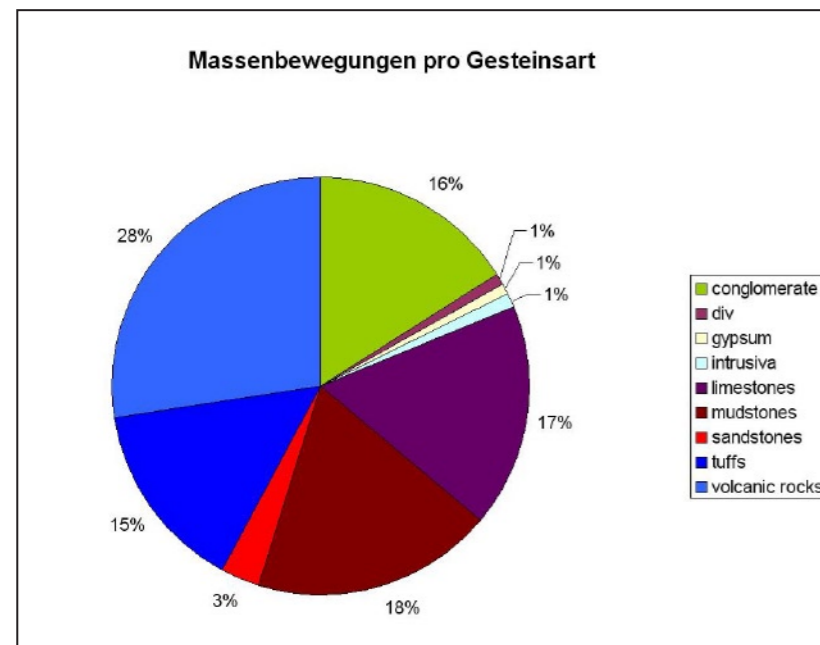
Das Kartenblatt Qazvin & Rasht erfasst ein Gebiet des Elburs samt Kaspischer Tiefebene im Norden und der Dasht-e Qazvin im Süden zwischen 49°30' und 50°E, und 36° und 37°30'N. Von den ausgewiesenen Gesteinsschichten sind nur wenige gar nicht von Massenbewegungen betroffen, dazu zählen einige quartäre Ablagerungen im reliefarmen Vorland des Elburs, sowie nur sehr geringflächige Ausbisse von Gesteinen wie Gabbrointrusiva, einige Perm- und Devonlinsen, zwei lokalen Kreideabteilungen und weitere Unterabteilungen (vgl. auch Tabelle im Anhang). Alle anderen Gesteinsschichten sind von Massenbewegungen betroffen, am häufigsten basische Laven der Karaj Formation (Pgkv, zu 28%), Tonsteine und Mergel mit Lagen aus Sandstein der Shemshak Formation (Js, zu 19%), Konglome-

rate und Brekzien des Neogen (Upper Red und Hezardarreh Formation, Ngc, zu 15%), Tuffe der Karaj Formation (Pgkt, zu 13%) und Kalksteine der Kreide (K11, K21 zu 6%, bzw. 7%).

Als Einschränkung dieser Aussage ist hervorzuheben, dass sich die Angaben nicht in Relation zur Fläche beziehen, in welcher diese Gesteinsschichten im Gebiet auftreten. Die Aussage ist dennoch annäherungsweise korrekt, da die Gesteinsschichtausbissflächen ungefähr gleich verteilt sind und keine Gesteinsschicht überproportional größere Flächeneinheiten als andere bedeckt. Ausgenommen von der Aussagefähigkeit bleiben Gesteinsschichten, die nur geringe Linsen bilden. Für diese kleinen Linsen den Flächenanteil prozentual hochzurechnen wäre aber durchaus problematisch für die Aussagekraft von Anfälligkeit für Massenbewegungen im Gebiet, weil diese Flächen möglicher Anfälligkeit ja gleichzeitig gering sind. Ebenso wird die Stichprobenzahl dann mit nur einer oder zwei verzeichneten Massenbewegungen zu gering, um eine statistisch valide Aussage herbeizuführen. Der Ansatz dieser Auswertung hat auch jenen Vorzug, dass eine äußerst zeitintensive Digitalisierung der Gesteinsflächen entfällt. Deutlich wird eine Bevorzugung bestimmter Materialtypen, betrachtet man die Gesteinsarten. Eine Subsumtion von Gesteinsarten unter Oberbegriffe wie z.B. Sandstein ist sehr problematisch, da eine Unzahl von gesteinsmechanischen Unterschieden wie Bindemittel, Korngrößen etc. hiermit nicht beachtet wird. Die tiefgründige, intensive, flächendeckende Tiefenverwitterung hat jedoch zu einer weitgehend homogenen Auflösung des Gesteinsverbandes geführt, so dass sich in Oberflächennähe gesteinsmechanische Unterschiede innerhalb einer Gesteinsart zumindest angenähert haben. Die in eine Klasse zusammengefassten Gesteinsarten sind mit Rücksicht auf das Bindemittel und Acidität ausgewählt und relativ vergleichbar in ihrem Aufbau. Auffällig ist eine Häufung der Massenbewegungen in Vulkaniten, den größten Anteil haben basische vulkanische Gesteine mit 28% und Tuffe mit 15%. Tonsteine, Kalksteine und Konglomerate bilden mit jeweils ähnlich großen Anteilen von 16 bis 18% die Gruppen von Gesteinsarten, die am zweithäufigsten von Massenbewegungen betroffen sind. Signifikanter ist die Abgrenzung dieser Gruppen zu den nachfolgenden Intrusiva; andere Gesteine, sogar Sandsteine, sind bedeutend weniger häufig von Massenbewegungen betroffen.

Insgesamt wurden auf dem Doppelblatt Qazvin & Rasht 165 Massenbewegungen aufgenommen,

Abb. 63: Diagramm 2: Gesteinsarten, die am häufigsten von Massenbewegungen betroffen sind, in Prozent (vgl. Tabelle 3, Anhang) nach den Geologischen Karten 1: 250.000, siehe Text. Tuffe wurden aufgrund ihres großen Anteils von den Vulkaniten geson-



nur 58 davon fanden begrenzt innerhalb einer einzigen Gesteinsschicht statt, alle anderen betrafen gleichzeitig auch andere Gesteinsschichten. Dies macht bereits eine direkte Verknüpfung der Auslösung von Massenbewegungen mit dem Faktor Untergrund allein weniger wahrscheinlich. Der Untergrund hat vielmehr eine steuernde Beeinflussung in hoher Stärke inne, jedoch sind auch andere Faktoren bedeutsam. Im Folgenden wurden die eingezeichneten Massenbewegungen auf ihr Umfeld hin untersucht. Eindeutige Beziehungen zu Faktoren wie Auslösung durch Flusserosion, tektonische Verwerfungen und Straßenanschnitte wurden über die Kartendarstellung interpretiert. Bei allen Signaturen gilt die Einschränkung der Aussagefähigkeit durch den Maßstab, bei der Tektonik ist noch die subjektive Expertensichtweise der Ausweisung von Störungen zu berücksichtigen. Der größte Anteil an Massenbewegungen (43%) fand sich in direkter Flussumgebung, also an Orten direkter Überdeckung der Massenbewegungen mit der Flusssignature. Auch Flussverläufe am Fuße von Massenbewegungen deuteten auf eine Auslösung durch Durchfeuchtung und Entfernung des Widerlagers hin. Flussnetz wie auch Tektonik sind im gesamten Gebirgsbereich relativ gleich ausgebildet und verteilt. 18% der Massenbewegungen überdeckten sich direkt mit Störungslinien, bei kleinerem Maßstab wäre sicherlich der Einfluss von Störungen noch deutlicher zu beobachten. Immerhin 11% der Massenbewegungen waren in direkter Nachbarschaft von Straßen an ihrem Fuß zu registrieren. Die grobe Verallgemeinerung des Maßstabs der Karte zeichnete kleinere Gebirgsstraßen und Wege nicht aus. Ein größerer Einfluss von Straßenbau auf die Auslösung von Massenbewegungen ist also nicht auszuschließen. Beim Faktor Straßenbau gilt außerdem die Tatsache als einschränkend, dass die Geologische Karte keine zeitliche Aussage bezüglich der Massenbewegungen und der Zeitpunkte des Straßenbaus trifft. Somit ist keine Aussage möglich, ob die Massenbewegungen bereits vorhanden waren (ein Datum 'ante quem'), bevor die Straße gebaut wurde oder alleinig vom Straßenbau ausgelöst wurden. Da die meisten Massenbewegungen jedoch reaktivierbar sind, ist ein Einfluss des Straßenbaus durch Veränderung der Hangstabilität zu vermuten. Nur eine einzige Massenbewegung war konkret mit einer Kohlenlagerstätte zu verbinden, andere Erzlagerstätten zeigten keine Auffälligkeiten. Bedauerlicherweise konnten keine Werte aus der Literatur, die Aussagen über die Anfälligkeit geo-

logischer Schichten für Massenbewegungen enthielten, auf das Elbursgebiet übertragen werden (vgl. TEMESGEN et al. 2001, BASILE et al. 2003, CALCATERRA et al. 1998, DAI & LEE 2002, HERVÁS et al. 2003, MOEYERSON et al. 2004). Nur die Ergebnisse von IWAHASHI et al. (2001) enthalten vergleichbare Aussagen. Die neogenen Sedimente und Vulkanite sind im Gebiet von Higashikubiki in Japan besonders stark von Massenbewegungen betroffen. An Hangbewegungen haben von den Vulkaniten saure vulkanische Brekzien den größten Anteil. Innerhalb der Hangbewegungen konnte noch unterschieden werden, dass Mergel am häufigsten von landslides, Vulkanite dagegen mehr von 'collapsing processes' erfasst werden.

Im darauffolgenden Schritt sollte die Einbindung des Testgebietes in die bisherigen Aussagen überprüft werden. Der ausbeißende geologische Untergrund stellt im Testgebiet nur einen Ausschnitt der Vielfalt der Schichten der Geologischen Karte Qazvin & Rasht 1:250.000 dar. Auf der Geologischen Karte Qazvin & Rasht wird das Gebiet überwiegend von sauren und andesitischen Tuffen (Pgkt) und basischen Laven (Pgkv) der Karaj Formation des Paläogen, sowie neogenen Konglomeraten (Ngm, Ngc) im Anschnitt des intramontanen Alamutbeckens beherrscht. Nur wenige jurassische Linsen aus Tonsteinen und Mergeln (Js) liegen durch Störungen scharf abgegrenzt dazwischen. Von insgesamt 165 Massenbewegungen der Geologischen Karte 1:250.000 liegen drei im Testgebiet, das ca. 1/80tel der Fläche der Geologischen Karte erfasst. Aus eigenen Befunden konnten noch zwei weitere Massenbewegungen dieser Größenordnung der Stichprobe hinzugefügt werden. Dennoch ist diese Stichprobe zu gering, um eine Aussage über die Gesteinsabhängigkeit auf das Testgebiet übertragen zu können. Zieht man die Geologische Karte Qazvin No. 6062 im Maßstab 1:100.000 für einen Vergleich heran, fällt die maßstabsabhängige genauere Differenzierung der Gesteinsschichtenausweisungen und der Störungslinien auf. Dem Zugewinn an Datentiefe durch den Maßstab 1:100.000 steht jedoch kein Zuwachs an Information über Massenbewegungen im Vergleich zum Maßstab 1:250.000 entgegen. Dies liegt sicherlich darin begründet, in welcher Größenordnung Massenbewegungen für Geologische Karten relevant sind und zu welchem Maßstab sie erfassbar und ausweisbar sind. Hangrutschen, Muren, kleinere Rutschungen und Abrisskanten sowie die verstreute Form eines Felssturzes werden

Abb. 64: ▶ Photo i33-02-30, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Bodenprofil mit Zersatzhorizont an der Passstraße im Testgebiet

hier nicht erfasst. Deshalb ist eine Auswertung der Massenbewegungen pro Gesteinsschicht nicht sinnvoll, es können nur die Aussagen aus der weitaus größeren Stichprobenanzahl der Geologischen Karte 1:250.000 als Bemessungsrahmen zu einer gewissen Faktoreneinschätzung herangezogen werden. Zu diesem Ansatz wurden die differenzierter ausgewiesenen geologischen Schichten der Geologischen Karte 1:100.000 zu Gruppen zusammengefasst, die den geologischen Formationen der Geologischen Karte 1:250.000 eingliedert werden konnten.

8.1.2 Zersatzhorizont und Bodendecke

Für die Bewertung der Geologie der oberflächennahen Schichten ist die paläoklimatische Vergangenheit im Untersuchungsgebiet von großer Bedeutung. Diese ist vergleichbar mit der Gesamtsituation der klimamorphologischen Entwicklung in anderen Regionen des Iran (vgl. EHLERS 1980, SARVATI 1976, WEISE 1973). Geologischer Untergrund und aufliegende Schichten sind im Untersuchungsgebiet in enger Weise miteinander verzahnt. Die Eigenschaften des Materials, das dem geologischen Untergrund aufliegt, sind in besonderer Weise wichtig für Erosion, Denudation und Massenbewegungen. Wie auch eine Schneeauflage wirkt die oberste Bodenschicht als Pufferschicht, welche durch Durchlässigkeit, Rückhaltevermögen und Isolationsfähigkeit die darunter folgenden Schichten erheblich beeinflusst. Vertikale wie horizontale Gliederung der Bodenschicht variieren sehr stark und sind durch temporal unterschiedliche Entwicklungsdauer gekennzeichnet. Der Bodenhorizont bildet sich aus dem Untergrundmaterial und auch aus Einträgen von außerhalb. Die darunter folgende Schicht wird unterschiedlich benannt, sie ist grundsätzlich eine Zersatzschicht des darunterliegenden geologischen Ausgangsgesteins. Strukturell ist es durch dieses aufgebaut und in seiner Stabilität von rezenten wie vergangenen endogenen und exogenen Prozessen verändert worden.

Im gesamten Arbeitsgebiet spielt die Zersatzschicht eine entscheidende Rolle. Im Gebirgsbereich herrschen geringmächtige Bodenhorizonte vor, teilweise liegt der geologische Untergrund weitflächig exhumiert vor. Der tiefgründig verwitterte Zersatzhorizont, in einem vergangenen, vermutlich tropisch oder zumindest subtropisch-feuchten Klima entstanden, tritt flächendeckend an der Oberfläche auf oder ist nur von einer geringmächtigen Bodenschicht bedeckt.

Der Zersatzhorizont, auch Dekompositions-



sphäre genannt, wird in der Literatur nicht einheitlich gegliedert in: Regolith als Bezeichnung für die gesamte Verwitterungsdecke und Saprolith für das verwitterte Ausgangsgestein. Dennoch soll im Folgenden versucht werden, diese Einteilung auf den Zersatzhorizont anzuwenden. Eine Anwendung gängiger Klassifikationen zur Einteilung des Zersatzhorizontes in diverse Zersetzungsgrade ermöglicht eine Eingliederung und Vergleichbarkeit der Beobachtungen. Das Hong Kong Geotechnical Control Office (G.C.O.) verwendet ein verbreitetes, sechs Klassen enthaltendes Verwitterungsschema von Gestein (Geotechnical Control Office, 1984, 1988, wie verwendet und zitiert bei: CALCATERRA et al. 1998). Dabei ist die verwitterteste Klasse Nummer VI und steht für völlig verwittertes Material, das z.B. an der Erdoberfläche als Residualboden vorliegt, Stufe V steht für völlig verwitterte Gesteinsmasse, Stufe IV enthält grobkrumige Böden, in der die ursprüngliche Gesteinsstruktur bereits völlig zerstört vorliegt, in Stufe III sind 50% des Materials verwittert bzw. in Bodenmaterial übergegangen, die letzten beiden Klassen folgen entsprechend einer prozentualen Abgrenzung. Numerische Gefahrenklassen daraus zu bilden erwies sich jedoch ohne exakte regionale Detailuntersuchung als problematisch, eine entstandene Faktorenebene Zersatzhorizont mit lediglich geschätzten und ungenauen Klassen hätte zudem nur geringe Aussagekraft.



Eine entscheidende Rolle spielte bei der Bildung des Regoliths wie auch der Bodendecke die klimamorphologische Reliefgeschichte. Neben der tiefgründigen tropischen Saprolithisierung wurde das gesamte Gebiet von Frostverwitterungsvorgängen beeinflusst, die auch noch rezent zu beobachten sind.

In quellfähigen Mergeln und Tonen geschieht im Hochgebirge Irans, im Elburs und Zagros, eine in den Übergangsjahreszeiten besonders aus-



geprägte Solifluktion, die ganze Hänge und deren Vegetation zerrunsen kann (EHLERS 1980). Durch die in semiariden Räumen vorherrschende vertikal aufsteigende Bodenwasserbewegung ist jedoch die rezente Verwitterungswirkung insgesamt (chemische Verwitterung insbesondere) sowie die Bodendurchfeuchtung als begrenzt zu erwarten. Dennoch ist die angesprochene Puffer-

wirkung des Materials ein entscheidender steuernder Faktor zur Beeinflussung der Stabilität des Materialkomplexes und damit ein in vielfältiger Weise vorbereitender Schritt für Massenbewegungen.

Aufbau und Zusammensetzung der Dekompositionssphäre oder des Bodenmaterials sind im Untersuchungsgebiet von großer Bedeutung für die Abtragungsleistung der Niederschläge (vgl. auch RAISSI 1986). Auch die Art der Abtragung, ob lineare Erosion, Denudation (Flächenspülung) oder Massenbewegung, wird hierdurch gesteuert. So tritt Oberflächenabfluss und damit Flächenspülung dann auf, wenn die maximale Infiltrationsrate, also die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens, den Niederschlag aufzunehmen, erreicht ist. Feinanteile setzen die Infiltrationsrate herab, ebenso Bodenverhärtung, insbesondere im Zusammenhang mit Vegetationsarmut. Die Bedeutung des infiltrierten Wasser liegt in seiner Fähigkeit, die Kohäsion zwischen den Feststoffpartikeln zu verringern, im Hangmaterial Porenwasserdruck zu erzeugen, und damit die Mobilität des Bodens zu erhöhen.

Langanhaltende Regenfälle erzeugen Wassergehalte, die einerseits die Lagerungsdichte des Materials (z.B. des Regoliths) und damit seine Masse vergrößern und dieses Material anfälliger gegenüber Rutschungen machen. Andererseits kann es bei der vollständigen Wasserfüllung der



Abb. 65: ◀ Photo i8-02-18: zersetzter Wollsack in Saprolithmatrix

Abb. 66: ◀ Photo i32-02-23, GPS-Punkt AL1, 2380 m NN: Runsenbildung am Straßenschnitt

Abb. 67: ◀◀ Photo i14-02-28, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: rezente Frostsprengung, die Flechten haben die Kluft noch nicht besiedelt

Poren zu hohen Porenwasserdrücken kommen, dies erzeugt dann eher ein Erdfließen.

Zu Zahlenwerten für Infiltrationsraten gibt es wenige Fallbeispiele, die jedoch sehr exemplarisch sind (z.B. VAN ASCH 2001, CHEN & LEE 2002, OKAMOTO et al. 2004). AU (1998) führt neben der Porosität des zersetzten Gesteinsmaterials den Begriff des „sekundären Porositätsystems“ ein. Er bezeichnet damit die Porosität, die durch Störungen und vorangelegte Kluftmuster sowie natürliche Abfluss-/ Subrosionsrinnen geschaffen wurde. Erweitert versteht er darunter auch Hohlräume, wie sie durch Tiergänge oder nach der Entfernung von Baumwurzeln entstehen, auch anthropogen angelegte Schnitte oder Kanal- und Leitungssysteme. Die Kohäsion nimmt ab mit der Zersetzung des Materials. Kohäsionskräfte sind in Kolluvium oder in anderem transportierten Material wie auch in Verfüllungen, in geklüftetem Material oder entlang von Störungsflächen geringer als in einem Gesteinsverband. Diese Aussage gilt nicht generell für sekundäre Verfestigung (AU 1998). Der sogenannte effektive Winkel der inneren Reibung hängt von der Materialart, der Dichte und dem Beanspruchungsgrad ab (Zahlenwerte siehe CALCATERRA et al. 1998). Er nimmt ebenfalls mit dem Zersetzungsgrad bei Saprolith und mit der Varianz der Korngröße wie z.B. bei Kolluvium ab. Sobald eine Wassersättigung die Drainagekapazität übersteigt, sind unverfestigte Füllungen und loses Kolluvium in hohem Maße verdichtbar durch Belastungs- und Scherdrücke. Diese Kompaktion geschieht kollapsartig, bei Sanden ist dies als Treibsandeffect bekannt. Tone können ein ähnlich ablaufendes Stadium durchlaufen, was Thixotropie genannt wird. Bei allen Materialien

ist die Auswirkung eine plötzliche Verminderung des Reibungswiderstandes und eine Mobilisierung, die zu einem Versagen des Materialverbandes führen kann. Die Sättigung des Bodens wird durch Vegetationsentfernung erhöht. Dies geschieht wegen des Verlusts an Bodenbedeckung, Nährstoffen und Wasserspeicherkapazität.

Die im Boden verbleibende Haftwassermenge ist saisonal unterschiedlich, während des Winters werden die Haftwasservorräte angefüllt und in den trockeneren Sommermonaten wieder aufgebraucht, auch die Vegetationsperioden nehmen hierauf Einfluss.

Eine Unterteilung des Testgebietes in Flächen und Tiefen unterschiedlicher Stabilitätsgefährdung und Anfälligkeit für Massenbewegungen ist sehr schwierig, ohne eine eingehende pedologische Untersuchung und geotechnische Analyseschritte. Da dies aus Zeitgründen im Gelände nicht möglich war und eine Bodenkarte in ausreichendem Maßstab nicht vorlag, musste aufgrund der großen horizontalen wie vertikalen Heterogenität der Bodendecke auf eine Faktorebene der Materialanfälligkeit des Bodens im Testgebiet verzichtet werden. Auch in der Literatur gibt es für Bodenentwicklung aus Ausgangsgestein nur wenige Aussagen, die zudem schwierig zu übertragen wären. So seien z.B. tropisch tiefgründig verwitterte Böden und Böden aus vulkanischen Tuffen besonders erosionsgefährdet (ZEPP 2002). Der Tübinger Atlas des Vorderen Orients (TAVO 1977) weist die Böden im Testgebiet als Lithosole aus, die FAO/ UNESCO Bodenkarte (FAO/ UNESCO 1974) verzeichnet sie als Chromic-Luvisol Calcisols. Jedoch ist erstgenannte Karte im Maßstab 1:6.000.000 und zweitgenannte im Maßstab 1:5.000.000 und damit für die Untersuchung des Testgebietes nicht differenziert genug. Die wenigen Beobachtungen zu Bodenprofilen an Straßenanschnitten und auch die Auswertung der wenigen oberflächlichen Bodenproben ließen ebenfalls keine extrapolierte Aussage über flächendeckende Areale des Testgebietes zu. Der hohe Carbonatgehalt und der kaum ausgeprägte B-Horizont sprechen für einen pedocalen Boden. Diesen Eigenschaften können keinesfalls generelle Aussagen über die Stabilität des Bodengefüges entnommen werden. An einer großen und komplexen Massenbewegung wurden sieben Bodenproben genommen (zur Lage siehe GPS-Punkte QA108-112). Die Proben von verschiedenen Bereichen des Hanges spiegeln in der Korngrößenverteilung die für Massenbewegungen typische heterogene Zusammensetzung wider. Keine



Abb. 68: ▼ Photo 04250025: Abrissnische, entstanden durch Straßenanschnitt, mit nachrutschendem Material als Folgeerscheinung. Diese Abrissnischen treten im Testgebiet häufig auf den wenig konsolidierten Materialverbänden großer Rutschungsmassen auf.

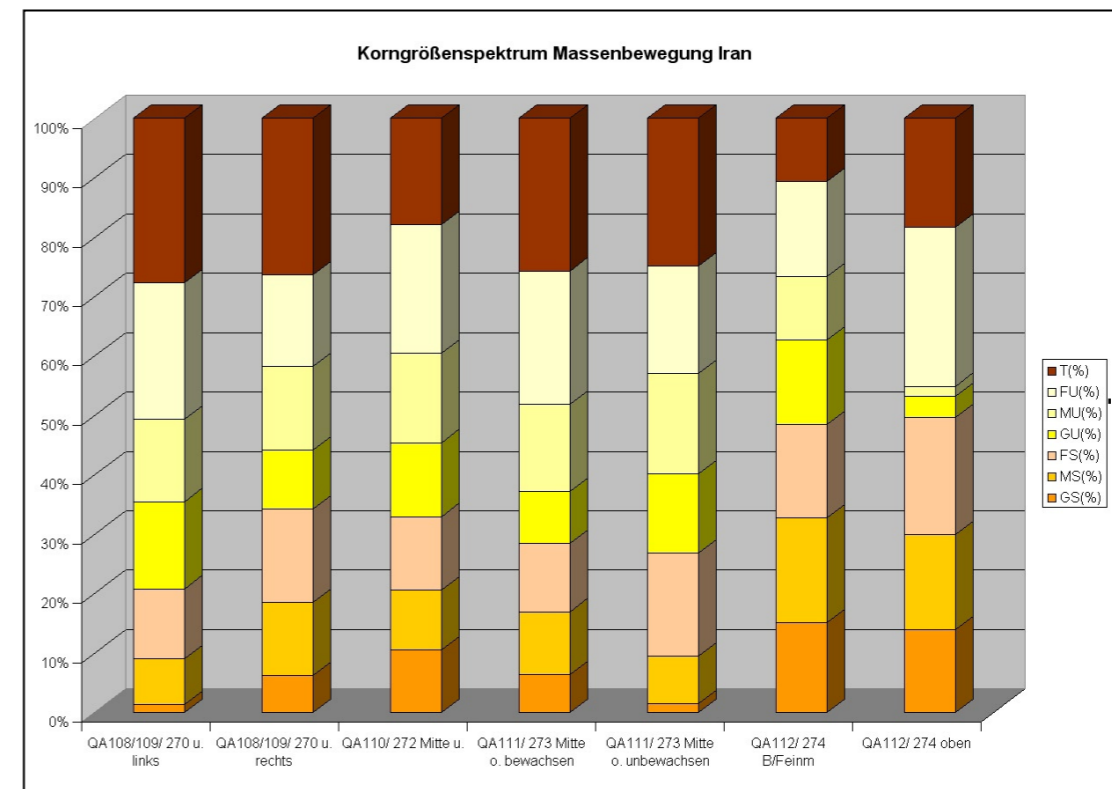


Abb. 69: ▼ Diagramm 3: Korngrößenspektrum der Bodenproben an einer komplexen, rutschungsartigen Massenbewegung. Eigene Messungen siehe Text und vgl. Anhang, Tabelle 4

Abb. 70: ▼ Photo i15-02-05, GPS-Punkt KKRUST, 1719 m NN: komplex zusammengesetzte, rutschungsartige Massenbewegung. Blick von der Passstraße nach Südosten

Abb. 71: ▼ Photo 04250032, GPS-Punkt AL10, 1673m NN: oberer Bereich der Massenbewegung, Reste der zerstörten Terrassierung (roter Pfeil) links oben im Bild. Blick nach Süden

der enthaltenen Korngrößen überwog in ihrem Anteil deutlich, auch war keine deutliche Differenzierung innerhalb der verschiedenen Bereiche vom Fuß bis zum Abrissbereich der Massenbewegungen zu erkennen. Grund hierfür könnte das unbekanntes Alter und der Charakter der komplexen, rutschungsartigen Massenbewegung sein.

Auf eine direkte Anfälligkeit des Materials der Bodenproben für Massenbewegungen kann nicht direkt geschlossen werden. Lediglich die leicht angerundeten Partikel der einzelnen Korngrößenanteile sowie der relativ große Anteil von Schluff und Ton sprechen für eine eventuelle ehemalige

Anfälligkeit des umgelagerten Materials. Zudem deutet es auf eine mögliche Reaktivierbarkeit des Materials hin, wie es für viele komplexe Massenbewegungen typisch ist. Auch die rezente exhumierte Oberfläche der Massenbewegungen spricht für eine Anfälligkeit gegenüber Reaktivierung bzw. Abtragung.

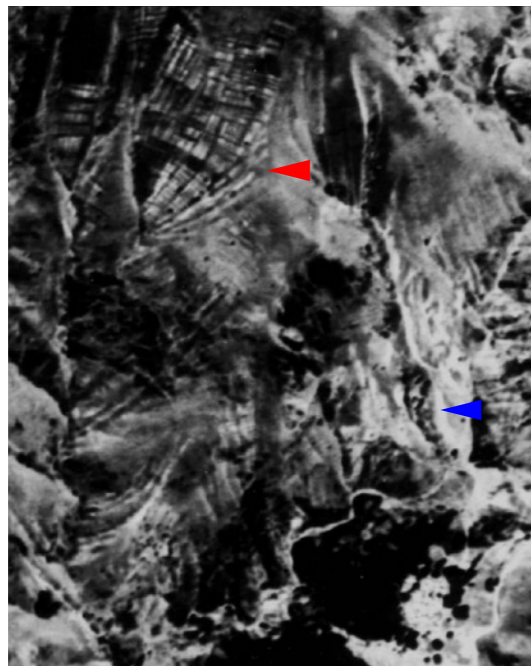
Der Hangbereich ist durch Beweidung insbesondere im unteren Bereich und durch Terrassierung im Umfeld des oberen Bereichs





Abb. 72: ▲ Photo i15-02-22, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: unterer Bereich der komplexen Massenbewegung mit sichtbaren Viehtrittschäden, welche Teile des Hanges weiterhin destabilisieren

Abb. 73: ► CORONA-Satellitenbild: Terrassierungsbereiche, wie sie 1970 noch vorhanden waren. (roter Pfeil). Der blaue Pfeil zeigt (auch im Photo oben) auf exhumierte Hangbereiche, welche zum Gesamtkomplex des Massenbewegungskörpers gehören.



intensiv anthropogen beansprucht worden.

Deutlich erkennt man auf den CORONA-Bildern die Terrassierung und auf den Photos die Viehtrittspuren. Teile der Terrassierung im oberen Bereich, wie sie auf den CORONA-Bildern vom 31.5.1970 noch bestand, sind 2002 (nach freundlicher mündlicher Auskunft von Herrn Ulf Siefker) nicht mehr existent gewesen. Ein Zusammenhang mit der abnehmenden Bedeutung des Anbaus, der sich zunehmend in vorgelagerte Gebirgsrandbereiche verlagerte, ist zu vermuten, aber auch eine durch Abtragung und Flächenverlust erzwungene Aufgabe der menschlichen Nutzung kann nicht ausgeschlossen werden. Aus der erkennbaren vertikalen Gliederung der komplexen Massenbewegungen in drei Teile lässt sich schließen, dass das Längsprofil des Hanges auf die Form der Massenbewegung Einfluss genommen hat.

Die Trennung zwischen oberem und mittlerem Bereich wirkt wie durch eine tektonische Verwerfung hervorgerufen. Reliefform, tektonische wie klimamorphologische Geschichte und anthropogener Einfluss sind mutmaßliche Faktoren bei der Entstehung dieser Massenbewegung. Die Spuren intensiver anthropogener Übernutzung lassen sich überall im Testgebiet beobachten, der Verlust an nutzbarer Fläche ist offensichtlich (siehe Kapitel 8.6). Diese stetige, langsame, massenhafte Abtragung des Materialverbandes ist nicht nur ein deutliches anwendungsbezogenes Phänomen, sondern gleichzeitig auch Auslöser für weitere nachfolgende Verluste an Bodenschicht und Massenbewegungen aller Art.

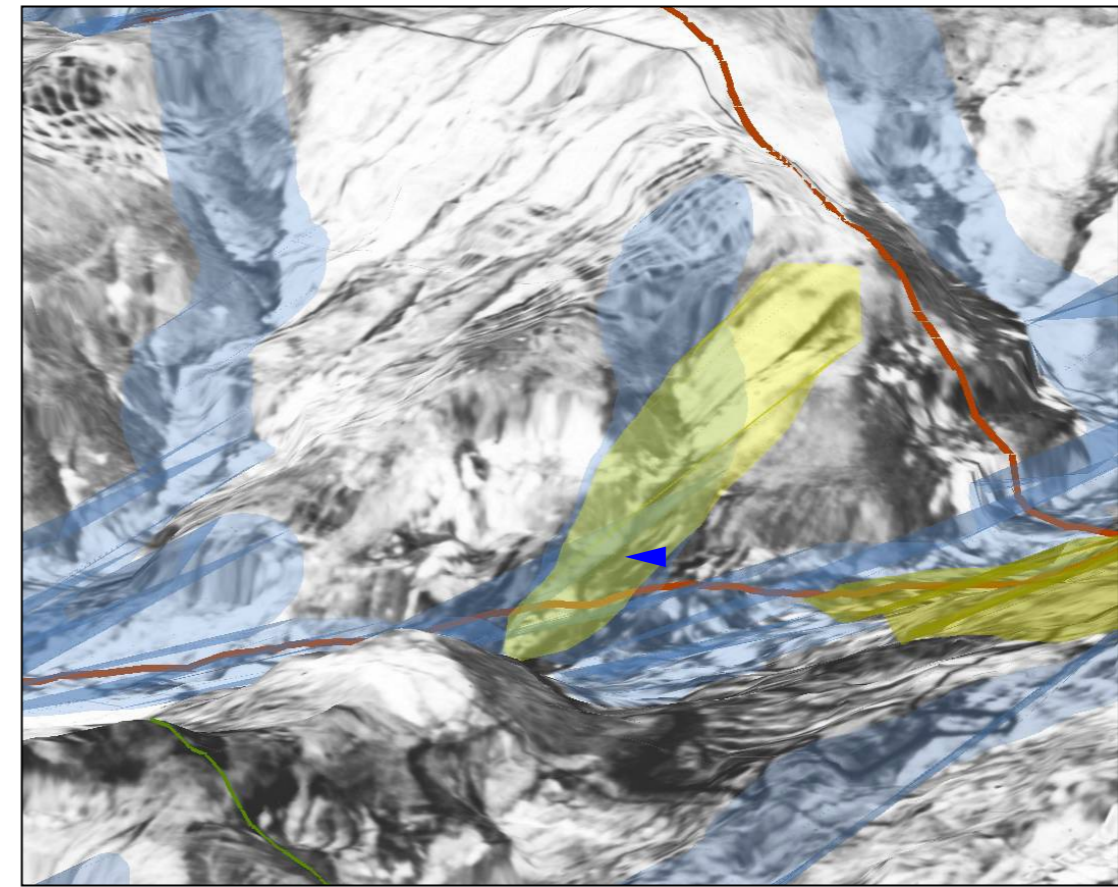


Abb. 74: ◀ CORONA-Satellitenbild im Digitalen Geländemodell (räumliche Auflösung 20 m). Die Signaturen zeigen die tektonischen Störungen und das Flusseinzugsgebiet im Umfeld der komplexen rutschungsartigen Massenbewegung (gelb, blauer Pfeil siehe Abbildungen auf vorheriger Seite). Darstellung als invertierte Graustufen-skala, Bildbearbeitung mit Cubic Convolution und Histogramm-Equalize

8.2 Tektonik

Das Untersuchungsgebiet wurde durch seine tektonische Geschichte stark beeinflusst (ALAVI 1996, ANNELS et al. 1975, DAVOUZADEH et al. 1997). Dies zeigt sich in der Verteilung und im Aufbau des geologischen Untergrundes und in der regionalen Zergliederung des oberflächennahen Materials. Massenbewegungen treten in direkter Folge von Verwerfungen auf (JAYASEELAN & SANJEEVI 2002). Indirekt und zeitlich verzögert wirken tektonische Störungen jeder Größenordnung langfristig auf die Vorbereitung von Massenbewegungen ein (LEE et al. 2002). Alte Verwerfungen sind auch rezent Stellen potentiellen Hangversagens durch den Materialunterschied aneinanderstoßender Gesteinsschichten. Die Reaktivierbarkeit solcher Verwerfungen macht diese Zonen auch zukünftig zu möglichen Auslösern von Hanginstabilität. In der Mikroebene spielen Kluftmuster eine steuernde Rolle für die Stabilität und damit die Anfälligkeit des Materialverbandes für Massenbewegungen.

Störungen und die an ihnen auftretenden Erdbeben sind ruckartige Entlastungsbewegungen und deren Ergebnisse einer aufgebauten Spannung der aneinanderstoßenden Materialverbände. Zwar sind sie durch relativ konstante Bewegungen der Platten induziert, dennoch laufen sie für das menschliche Zeitgefühl plötzlich und ruckar-

Abb. 75: ▼ Photo i16-02-02: Kluftmuster, konserviert in saprolithisiertem Gestein, sichtbar gemacht durch Kalkausfällung



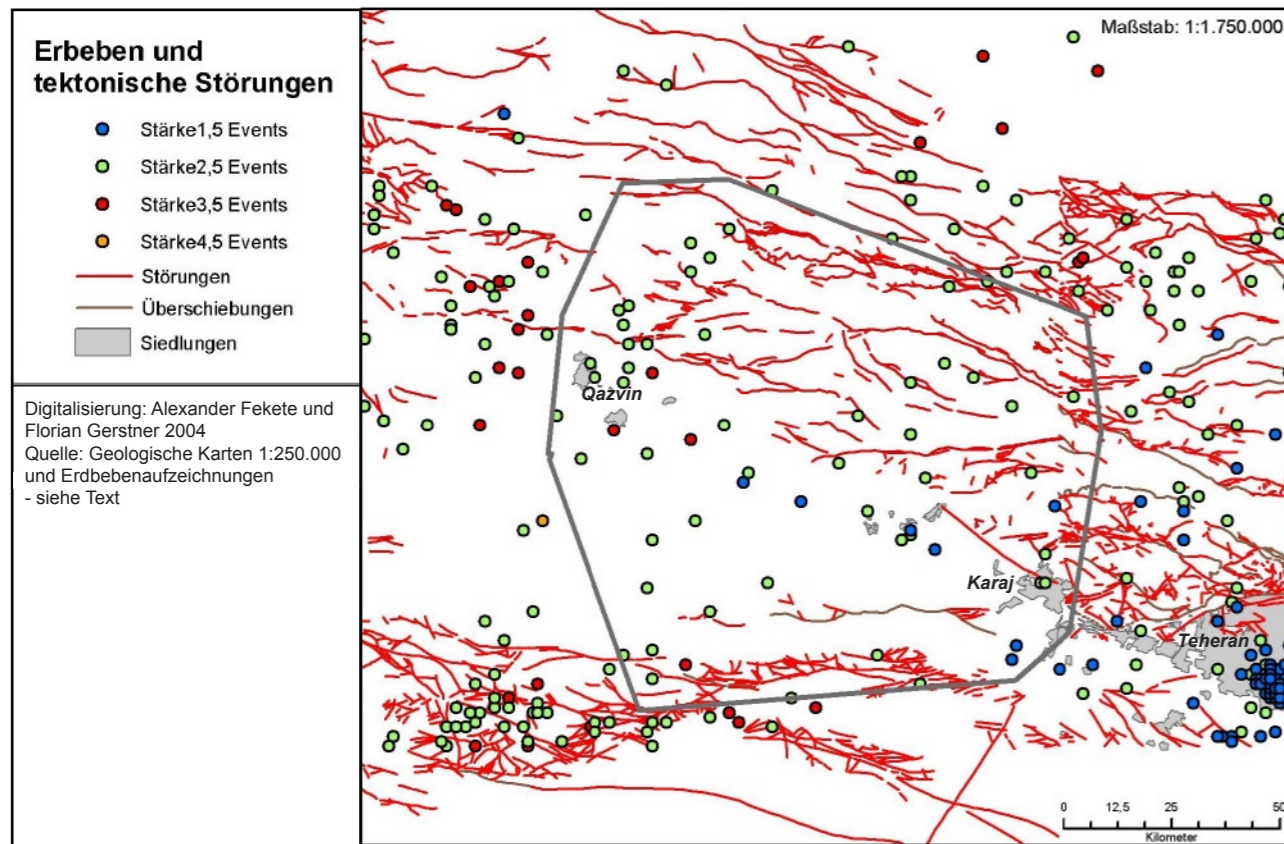


Abb. 76: ▶ Karte 9: tektonische Störungen und Erdbeben im Untersuchungsgebiet (grauer Rahmen)

tig ab, als sogenannte »events«. Daher sind ohne erheblichen Aufwand für das Untersuchungsgebiet keine zeitlich quantifizierbaren Aussagen über die tektonische Initiierung von Massenbewegungen möglich. Stattdessen kann die historische Verteilung von Erdbeben und Störungen größeren Maßstabs räumlich aufgenommen werden. Diese Zonen bereits geschehener Ereignisse können einerseits in Beziehung zu bisher aufgetretenen Massenbewegungen gebracht werden. Andererseits sind sie tektonisch reaktivierbar und damit potentielle Gefahrenbereiche zukünftiger Massenbewegungsereignisse.

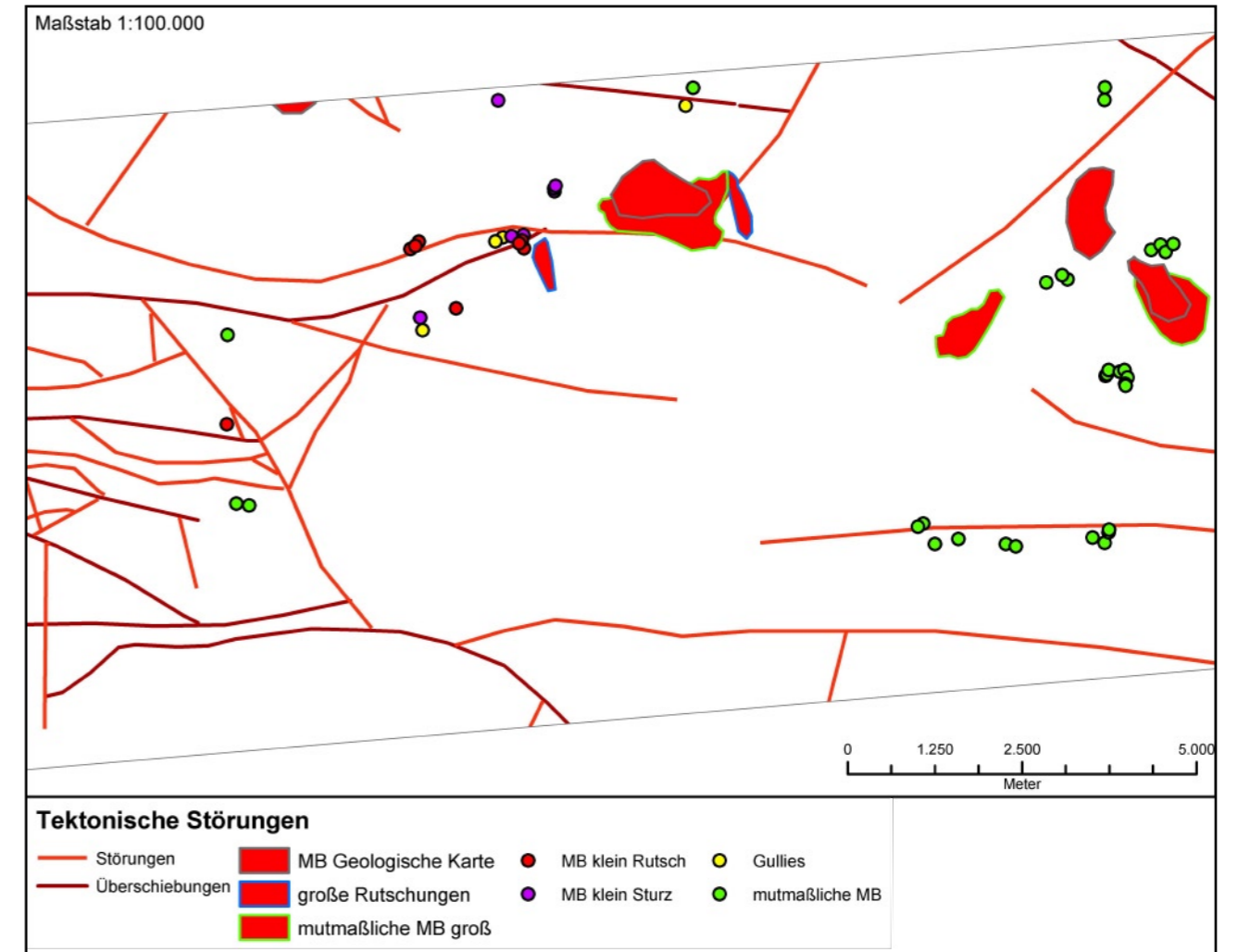
8.2.1 Erdbeben

Die Daten über die Erdbeben stammen aus den offiziellen Listen der Erdbebenaufzeichnungen in der Region, wie sie von der Faculty of Natural Resources in Karaj dem DRYSATMAP Projekt freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden. Sie umfassen den Zeitraum vom 05.01.2000 bis zum 25.04.2002. Die tektonischen Störungen wurden den Signaturen der Geological Quadrangle Maps of Iran 1:250.000, Blätter F4 Amol (1991), E5 Saveh (1984), E3 and E4 Qazvin and Rasht (1985) und F5 Tehran (1987) entnommen. Häufigkeit und räumliche Verteilung deuten wie auch das Verteilungsmuster der Störungen im Untersuchungsgebiet auf eine flächendeckende

Gefahr von Erdbeben und die Auslösung von Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet hin (vgl. auch FISHER 1968 und TEHERAN UNIVERSITY 1969). Die Tiefen von 4.30 km bis 34.60 km der Beben innerhalb des kurzen Zeitschnittes vom 05.01.2000 bis zum 25.04.2002 und Größenordnungen von 0.0 bis 3.6 auf der Richterskala weisen nicht ausreichend auf die Intensität und das Potential der Beben in dieser Region hin. Katastrophale Erdbeben mit schweren Zerstörungen und Verlusten an Menschenleben treten in diesem Raum häufig auf (siehe Kapitel 4.1). Da Erdbeben meist an bereits bestehenden Verwerfungszonen entstehen, ist deren räumliche Lage gleichzeitig eine räumlich abgrenzbare Gefährdungszone.

8.2.2 Tektonische Störungen

Störungen sind räumlich erfassbare Zonen potentieller tektonischer Reaktivierung und Erdbebengefahr. Gleichzeitig sind sie Schwächezonen mit einem großen Instabilitätsfaktor für bestehende Materialverbände. Die Erstellung einer solchen Faktorebene für das GIS ist somit sinnvoll für eine räumliche Abschätzung der Gefährdung. Erstellbar ist diese Ebene durch Erfassung der eingezeichneten Störungslinien in den Geologischen Karten. Auch hier gilt jedoch, dass die subjektive Sichtweise des jeweiligen Experten, der



diese Karte erstellt, zu berücksichtigen ist. Häufig stellen Blattgrenzen auch Grenzen völlig verschiedenartiger Sichtweisen des Geländes dar (siehe Abb. 76, Karte 9, entlang des rechten Randes des Untersuchungsgebietes). Für das Testgebiet wurden die Störungslinien eines einzigen Kartenblattes, der Geologischen Karte 1:100.000 Qazvin No. 6062, digitalisiert.

Eine visuelle Auswertung von Fernerkundungsdaten hinsichtlich der Detektion von Lineamenten wäre wünschenswert und verspräche objektivere Befunde. Versuche zur automatischen Detektion von Störungslinien sind jedoch schwierig und noch in der Entwicklung (z.B. SARAF & CHOUDHURY 1998). Ein Versuch anhand des DGM mittels Filterung in ERDAS Imagine 8.6 betonte zwar je nach Richtung der linienhaften Verstärkung der Filtermaske linienhafte Elemente, jedoch waren diese Elemente unsortiert und Verwerfungen unähnlich, so dass schließlich doch eine visuelle Auswertung vonnöten gewesen wäre.

Aufgrund der unklaren Verteilung der Elemente schien eine visuelle Kartierung auf Grund-

lage des Satellitenbildes erfolgversprechender. Da auch sie jedoch nur mit entsprechendem Zeitaufwand effizient sein kann und abhängig von diversen optisch-visuellen Einstellungen sowie subjektiven Entscheidungen ist, wurde auf die Geologische Karte zurückgegriffen. Berücksichtigt werden müssen auch das enthaltene Expertenwissen und

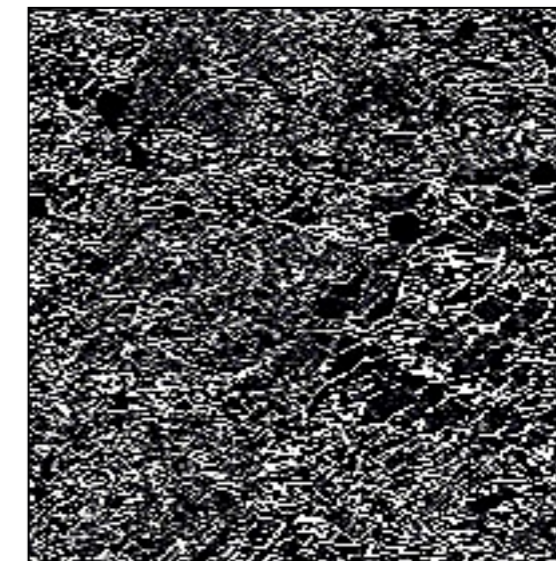
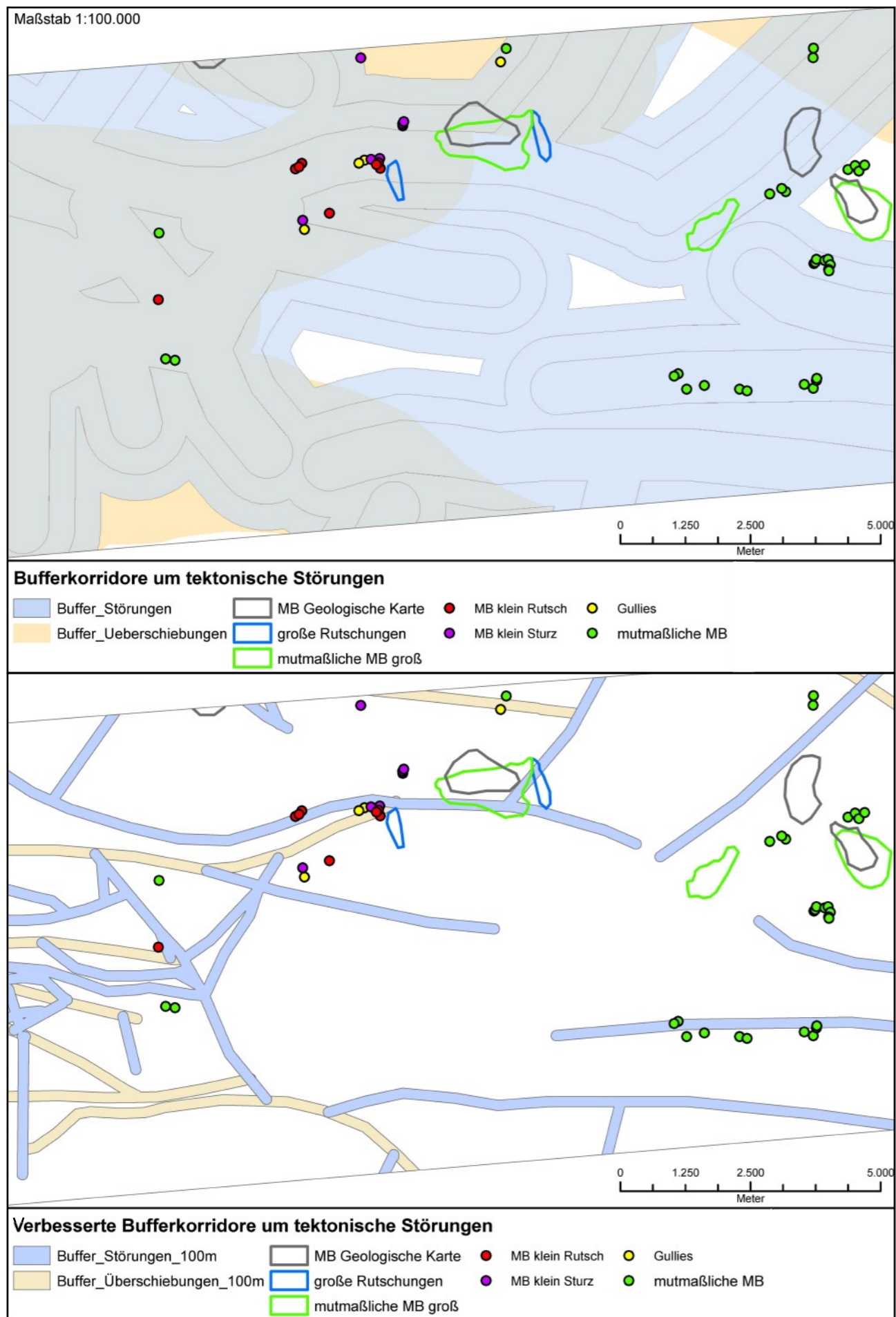


Abb.77: ▲ Karte 10: tektonische Störungen nach der Geologischen Karte 1:100.000 No. 6062, Qazvin, der Ausschnitt zeigt das gesamte Testgebiet

Abb. 78: ◀ Versuch der Hervorhebung linienhafter Elemente durch Filterung mit einem 7x7 Kernel



die flächendeckende Geländeaufnahme der Geologischen Karte. Die Nutzung von Störungsmustern zur Aussage über die Anfälligkeit für Massenbewegungen ist im quantitativen Ausmaß noch relativ unklar (IWAHASHI et al. 2001). Dennoch werden teilweise eindeutige Bezüge beobachtet, so treten z.B. in einer Untersuchung in Uttar Pradesh, Indien, 49,5% der Massenbewegungen innerhalb einer Distanz von 1,5 km von aktiven Verwerfungen auf (PANNIKAR & SUBRAMANYAN 1996). Für die Faktorenebene tektonische Störungen des Testgebietes wurde ein

Pufferkorridor in der Software ArcGIS 8.6 um die digitalisierten Vektorlinienobjekte erzeugt mit Breiten von 0,5, 1 und 1,5 km.

Da diese Korridorbreiten jedoch nahezu das gesamte Testgebiet erfassen, wurde aus Verhältnismäßigkeitsgründen des Maßstabs und der Fläche des Testgebietes eine Pufferbreite von 100 m verwendet (Faktorenebene „verbesserte Bufferkorridore um tektonische Störungen“). Die Faktorenbewertung ist damit strikter in der Ausweisung des Gefährdungsbereichs und realitätsnäher.

Abb. 79: ◀◀ obere Karte 11: Pufferkorridore tektonischer Störungen mit Einflussweiten von 0,5, 1,0 und 1,5 km

Abb. 80: ◀◀ untere Karte 12: Pufferkorridore tektonischer Störungen mit der Einflussweite 100 m. Diese Karte entspricht der Faktorenebene „tektonische Störungen“.



Abb. 81: ◀ Photo 04250010: die enorme tektonische Beanspruchung des Gesteins durch Klüftung weist auf die instabilen Bedingungen aktiver neogener Gebirge hin.

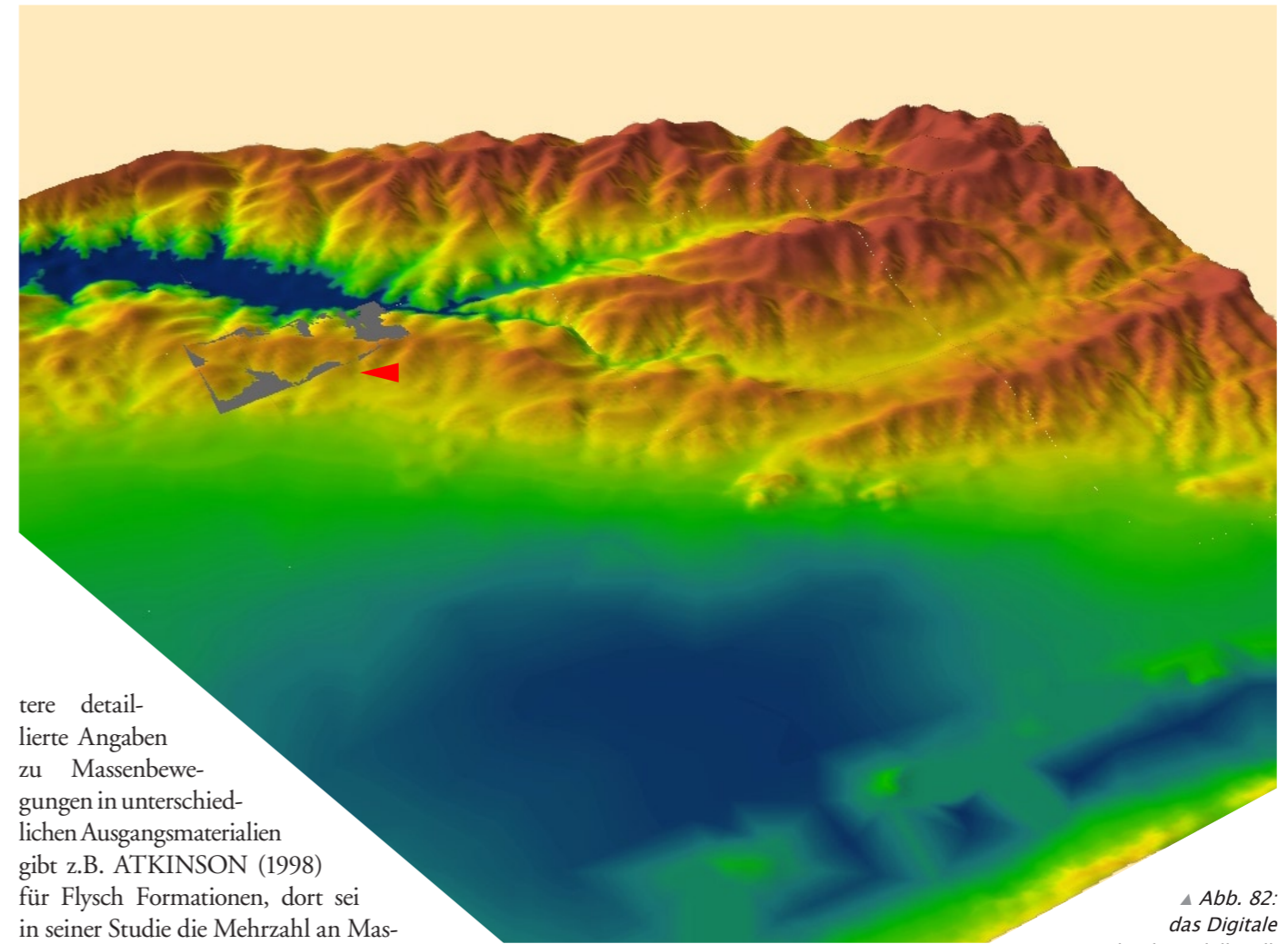
8.3 Relief

Das Relief ist die dreidimensionale Oberflächenform des Feststoffes in einem Gebiet mit Höhenunterschieden. Es beeinflusst in einer Gebirgsregion durch seine Gestalt, Ausrichtung und Dimension das gravitative Abtragungspotential, den Verlauf der Abtragungswege und die Einwirkung der Klimafaktoren. Das Relief ist eine sich in der Reliefgeschichte zeitlich langsam ändernde Vollform, die jedoch durch fortwährende Abtragung und plötzliche Massenbewegungsereignisse sowie Ablagerungen, beständig in der Umformung begriffen ist. Es ist ein bedeutender Faktor in der Vorbereitung, Auslösung und im Ablauf von Massenbewegungen.

8.3.1 Hangneigung

Die Hangneigung (*slope*) bezeichnet mit einem Neigungswinkel das Gefälle eines Hanges über einer gedachten Horizontalfläche. Zusammen mit der Hangneigungsrichtung (*Exposition, aspect*) und der Wölbung ist sie ein wesentlicher steuernder Regler für Massenbewegungen. Sie beeinflusst den Oberflächenabfluss, die Einstrahlung, das Eindringen von Niederschlag und die Hangstabilität durch die Reibungswiderstände sowie die Vegetationsbedeckung. Als Faktor für Massenbewegungen kann Hangneigung nur als potentielle Größe angegeben werden. Es gibt unzählige physikalische Untersuchungen zur Stabilität von Böschungswinkeln, und als ingenieurgeologisches Standardwissen findet es sich in geowissenschaftlichen Lehrbüchern (PRESS & SIEVER 1998). Die Umsetzung auf die in natürlichem Reliefkomplex zusammengesetzten unterschiedlichen Korngrößen und die vielfältigen inhomogenen externen Einflussfaktoren erschweren bislang konkrete Aussagen über Stabilitätsanfälligkeiten. Einige Untersuchungen beschäftigen sich mit einem kausalen Zusammenhang zwischen den Hangneigungen stabiler und massenbewegter Hangformen. Einige davon sind auf Spezialfälle beschränkt, wie z.B. auf homogen aufgebaute Hänge in Taiwan (CHEN & WAN 2004). Einen interessanten Ansatz liefern IWAHASHI et al. (2001) für ein Gebiet in Japan. Sie schlagen hierfür eine Korrelation von Ausgangsgestein und natürlicher Hangform, d.h. Hangneigung, vor. Grundsätzlich kann aus gesteinsmechanischen Eigenschaften nicht einfach auf Böschungswinkel geschlossen werden. Mittelwerte für Hangneigungen an

Hügeln und Bergen liegen in dem von IWAHASHI et al. (2001) untersuchten Gebiet bei 10° bis 20° vor, niedrigere Winkel treten in unkonsolidierten Strata und semikonsolidiertem Gestein auf, ebenso in Tonstein, steilere Winkel in Vulkaniten und Intrusiva. Von Ausnahmen abgesehen ist der Böschungswinkel einer Massenbewegungsmasse flacher als die Ausgangsform im gleichen Gestein am stabilen Hang. Je flacher der Böschungswinkel der stabilen Hangform einer Gesteinsmasse, desto weniger deutlich ist der Unterschied zur Hangform des massenbewegten Materials. Bei Vulkaniten wurden die größten Unterschiede zwischen diesen beiden Hangformen festgestellt: 5-8° Unterschied in der Hangneigung. Als weiteres Kennzeichen einer Massenbewegung wird die Hangform gleichförmiger. Die Variabilität der durchschnittlichen Hangneigung ist bei Massenbewegungsmassen geringer (9-22°) als die der stabilen Hangformen (9-27°). Bei Abrißkanten (*collapse scarps*) anderer Massenbewegungsarten als Rutschungen ergibt sich 30° als ein mittlerer Wert für Hangneigung, dies gilt jedoch nicht für Tonsteine. Bei der Einteilung der Hangneigungen im Testgebiet kann man sich an einer Vielzahl konkreter Zahlen in der Literatur orientieren. Einige Autoren benutzen das Hangklassifikationsschema von Young & Young (1974): 0-5 flach, 5-8 gering, 8-12 mittel, 12-30 mittel-steil, 30-60 steil, 60-100 sehr steil (zitiert nach PEROTTO-BALDIVIEZO et al. 2004). Andere Autoren geben empirische Zahlenwerte für Bereiche an, die besonders von Massenbewegungen betroffen wurden. Zwischen 6° bis 45° Hangneigung war die Gefahr für Massenbewegungen bei PEROTTO-BALDIVIEZO et al. (2004) am größten. In Hongkong waren alle Bereiche oberhalb 30° Hangneigung zu 90% von Massenbewegungen betroffen (AU 1998, DAI & LEE 2002). Gruppen von 10-20°, 30-40° und 0-10° wiesen die jeweils höchste Dichte an Massenbewegungen bei TEMESGEN et al. (2001) auf. Bei CHEN & LEE (2002) waren es Gruppen abnehmender Häufigkeit mit den meisten Massenbewegungen bei 30-40°, dann 30-35°, dann >40°. Bei PANNIKAR & SUBRAMANYAN (1996) waren es Bereiche von 18-30° und 30-45°. In dieser Studie wurde sogar eine Gesteinsabhängigkeit von Massenbewegungen bei Quarziten, Kalksteinen und Schiefen beobachtet. Wei-



tere detaillierte Angaben zu Massenbewegungen in unterschiedlichen Ausgangsmaterialien gibt z.B. ATKINSON (1998) für Flysch Formationen, dort sei in seiner Studie die Mehrzahl an Massenbewegungen bei Neigungswinkeln zwischen 10° und 20° aufgetreten, in Kalkstein hingegen bei weitaus steileren Winkeln. STÄBLEIN (1978, S. 17) weist Hangneigungswinkel ab 8° als anfällig gegenüber Bodenkriechen, ab 21° für Rutschungen und ab 36° für Bergstürze/ Bergstürze aus. Sandige Formationen in der Niigata Präfektur in Japan seien nach IWAHASHI et al. (2001) ab einem Winkel von 10° betroffen und erreichten die größte Häufung bei 14° Hangneigung. Freigelegter Boden (*'bare earth'*) sei an Hängen von 5°-15° und von 15°-25° Neigung potentiell für Muren (*debris flows*) anfällig, meinen HONDA et al. Für Muren im Katalonischen Küstengürtel geben CALCATERRA et al. (1998) Neigungswinkel von 17° bis 30° an, bei *rockslides* beobachteten sie Winkel von größer als 40-45° als Bereich größter Auslösungsdichte. Die Muren im Nordwesten Nicaraguas, die durch Hurrikan Mitch ausgelöst wurden, fanden ab einem Schwellenwert von 20° bis 49° Hangneigung statt, mit einer Häufung zwischen 25-35° (PALLÁS et al. 2004).

Die Gullybildung, die Massenbewegungen zumindest prozessual verwandt ist, aber allein

schon als Abtragungsform starke Relevanz für das Arbeitsgebiet aufweist, sei in den Studien von ZINCK et al. (2001) bei Hangwinkeln zwischen 4-7° am größten und in Alfisols am häufigsten aufgetreten.

Abb. 83: ▼ Photo i33-02-18, GPS-Punkt AL7, 2129 m NN: Gullybildung an der Passstraße



▲ Abb. 82: das Digitale Geländemodell stellt die Reliefverhältnisse des Untersuchungsgebietes dar. Das Testgebiet (roter Pfeil) befindet sich in einem Bereich großer Reliefunterschiede zwischen der Dasht-e Qazvin im Süden und dem Alamutbecken im Norden

Abb. 84: ► CORONA-Satellitenbild: Gullybildung (roter Kreis) an der Passstraße, wie sie auf dem Satellitenbild erkannt werden kann. Terrassierungen (grüner Kreis) sind ein charakteristisches Merkmal anthropogener Nutzung in steilerem Relief.

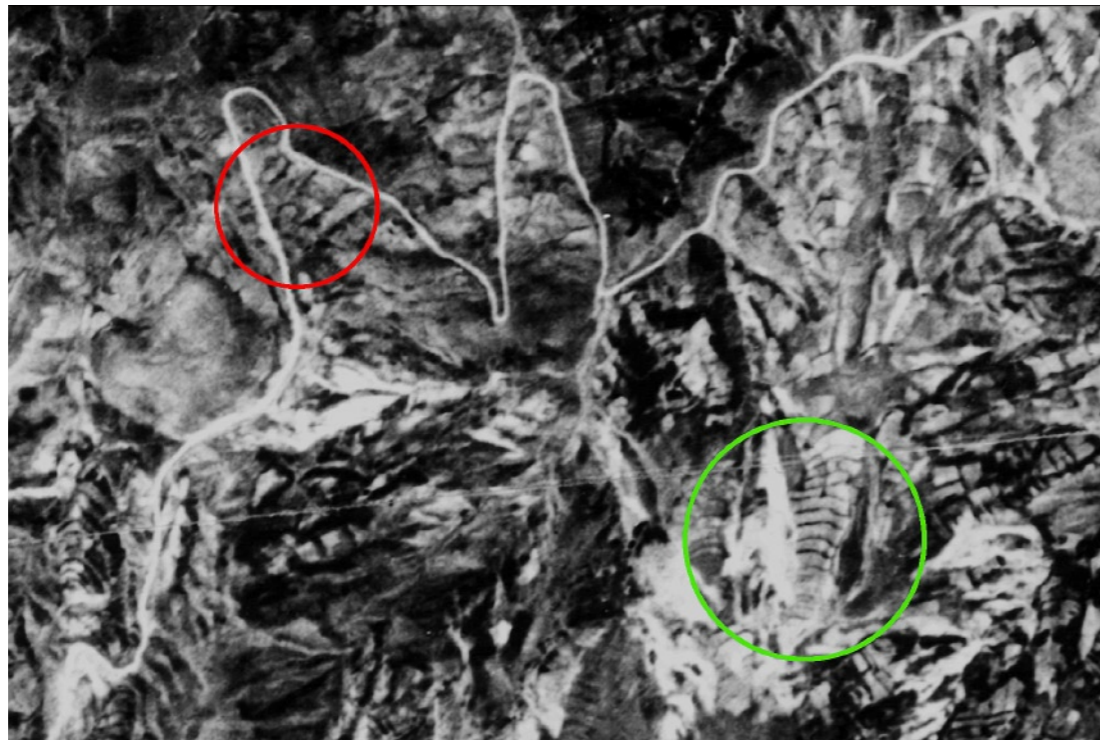


Abb. 85: ► Photo i14-02-05, GPS-Punkt BOD1, 2108 m NN: Abrissnischen im Kontext geringer Vegetationsbedeckung, bevorzugt an steilen Stellen des Reliefs

Zu all diesen Untersuchungen ist die Problematik der Übertragbarkeit zu bemerken, außerdem die Heterogenität der Spektren der Ergebniswerte. Dennoch weisen sie eine Richtlinie für die Einteilung der Hangneigungswinkel für die Faktorebene Hangneigung auf. Die Beobachtungen im Gelände des Testgebietes im Nordwesten Irans scheinen sich mit diesen Werten zu decken, Felsstürze und Steinschlag traten bei sehr hohen Neigungswinkeln auf, Rutschungen und Muren schon bei mittleren Hangneigungen.

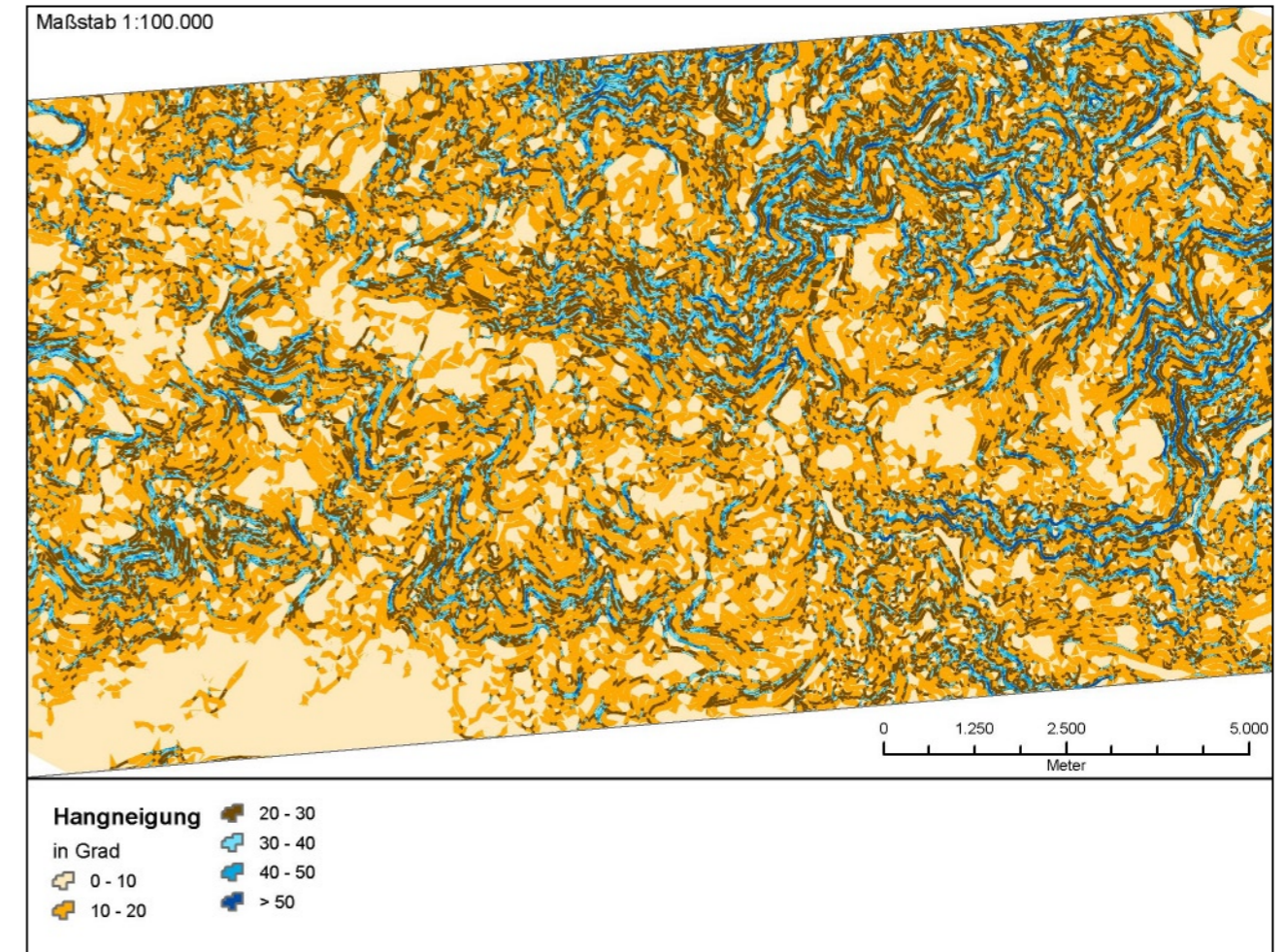


Abb. 86: ▼ Photo i34-02-03, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: murähnlicher Schuttrahmentransport im Relief mittlerer Steilheit



Die Mehrzahl der Massenbewegungen waren komplexe, gering tiefe murenähnliche Massenbewegungen an Hängen relativ geringer Steilheit sowie kleinere Abrisskanten in mittlerer Steilheit. Außerdem kamen einige wenige Rutschungen, auch tiefgründigere Rotationsrutschungen, in etwas steilerem Gelände vor. Die Erfassung der Hangneigungsbereiche in Klassen ergab für alle Massenbewegungsformen nach einer Mittelung aller aus der Literatur aufgefundenen Wertebereiche keine bessere Einteilungsmöglichkeit als in dezimalen Abständen (0-10°, 10-20°, 20-30°, 30-40°, 40-50°, >50°).

Die Karte der Hangneigungsklassen zeigt eine flächenhafte Dominanz der flachen Hangneigungen bis 20°. Ab 20° Hangneigung konzentrieren sich die Rasterflächen auf die steilen Gebirgskämme. Da auch in der dargestellten Literatur die meisten Massenbewegungen ab einer Neigung



von 20° und mehr auftraten, wird dieser Wert zur Ausweisung der Faktorebene Hangneigung

herangezogen. Die Faktorebene Hangneigung enthält alle Hänge, die 20° und steiler sind.

Abb. 87: ▲ Karte 13: Hangneigungen im Testgebiet

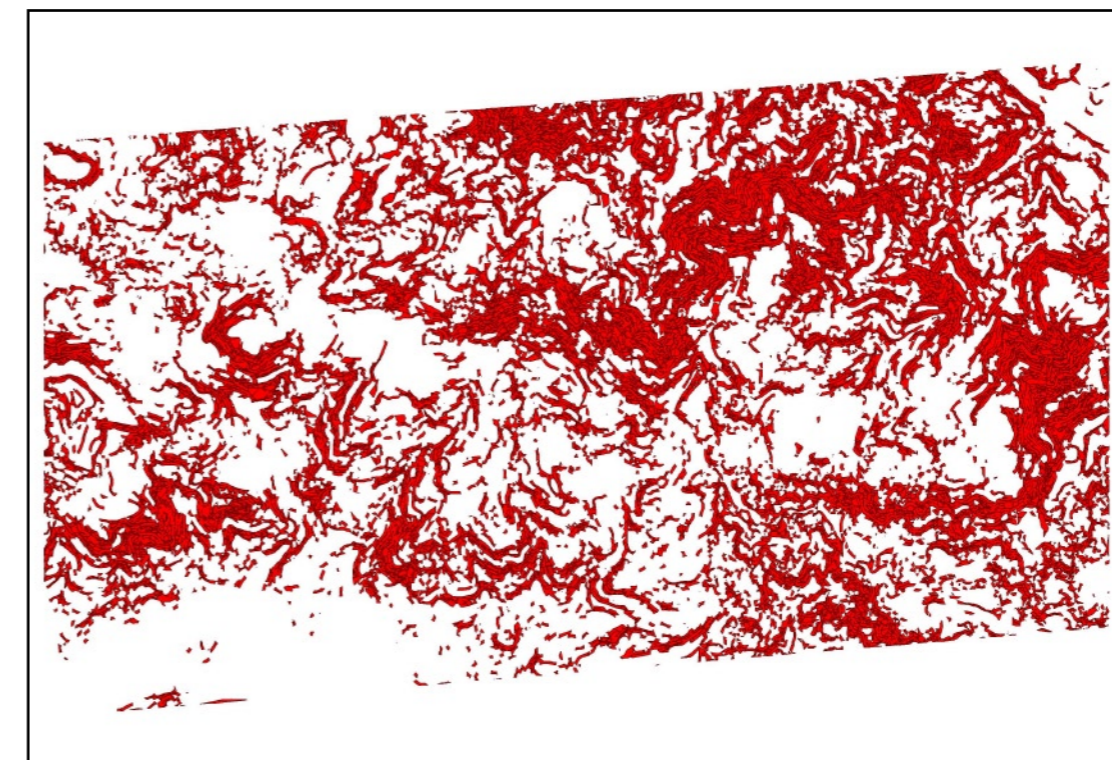


Abb. 88: ▼ Karte 14: Der Inhalt der Faktorebene „Hangneigung“ enthält Polygone mit Hangneigungen ab 20°.

Abb. 89: ▼ Photo i13-02-22, GPS-Punkt AL3, 2324 m NN: Nach Norden exponierte Lagen mit Schneeresten im April 2002

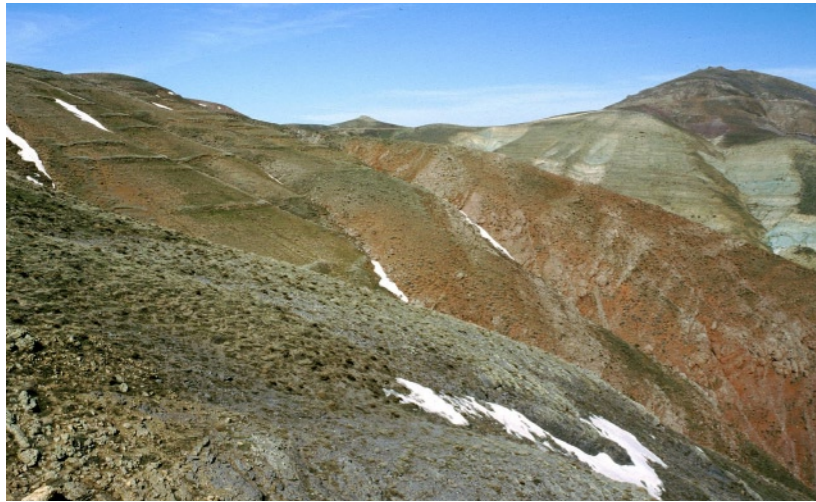


Abb. 90: ▼ Karte 14: Die Faktorenebene „Exposition“ stellt die Ausrichtungen der Hänge nach den Himmelsrichtungen dar.

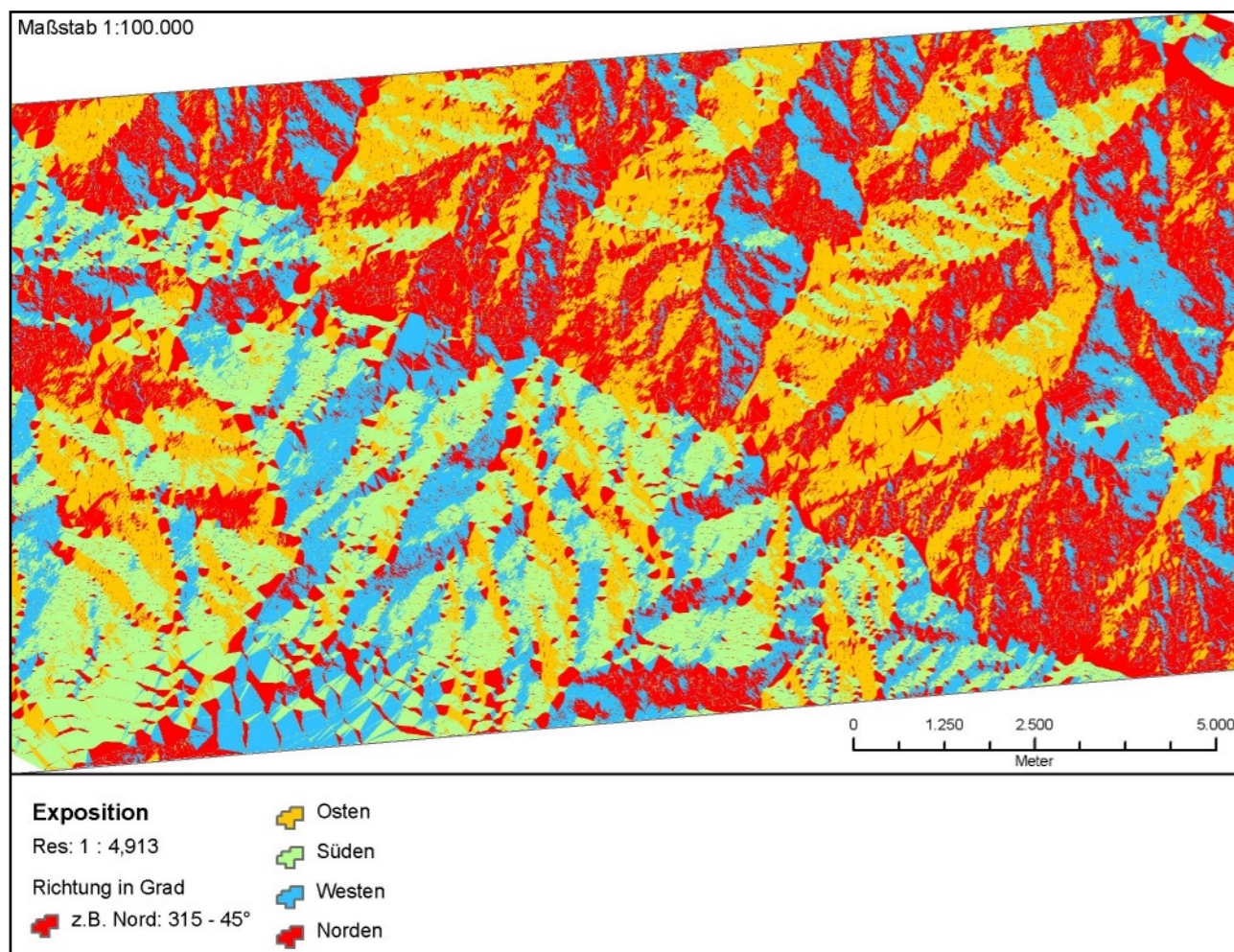
8.3.2 Exposition

Die Exposition (*aspect*) ist die Himmelsrichtung der am steilsten geneigten Fläche in einem Punkt. Das Untersuchungsgebiet liegt in den Subtropen, also zwischen 23,5 und 45° Breite, in einem

und durch die verschärften Strahlungskontraste zwischen Tag und Nacht. Das Maximum an Wirksamkeit im Unterschied von Sonnen- und Schattenseite liegt laut LAUER (1999) zwischen 40 bis 50° Breite. Durch die Exposition werden Vegetation, Feuchtigkeitsrückbehalt, z.B. in der Form von sich länger haltender Schneebedeckung, und auch Niederschlag je nach vorherrschendem Windsystem begünstigt. Dieser Einfluss war im Gelände im Monat April deutlich zu beobachten, Schneereste hielten sich lokal an bestimmten, vorwiegend nördlich orientierten Expositionslagen.

Die Übernahme von Expositionswerten aus der Literatur gestaltete sich schwieriger als bei Hangneigungswinkeln, da regionale Aspekte, insbesondere die Breitenlagen der jeweiligen Studiengebiete, meist stark voneinander abweichen. Auch spielen lokale und breitenkreisabhängige Windsysteme eine große Rolle in der Steuerung der Niederschlagsmengen. Für einen Vergleich seien einige Angaben aus der Literatur aufgeführt. In Lantau Island, Hongkong (ca 12°N, 115°E), liegt das Maximum des Auftretens von Massenbewegungen in Südexposition, ebenso in Uttar Pradesh, Indien (30°15'N, 78°E). Die Autoren (PANNI-

Bereich, der als Charakteristikum extreme Strahlungsexpositionen der Gebirge aufweist. Dies wird bedingt durch die vergrößerte Fläche der gegen den Äquator exponierten Relief-Abdachungen



KAR & SUBRAMANYAN 1996) erklären als mögliche Ursache jedoch mikroklimatische Faktoren. Süd- und Ost-Exposition waren in Honduras (ca. 13°15'N, 87°10'W) bei PEROTTO-BALDIVIEZO et al. (2004) am häufigsten betroffen, als Gründe wurden eine höhere Sonneneinstrahlung und damit trockenere Bodenoberfläche angeführt, sowie Hurrikan Mitch, der aus dem Osten kam. Im Kongo bei nahezu äquatorialer Lage waren Norden und Westen am häufigsten betroffen (TEMESGEN et al. 2001). Die Varietät der Himmelsrichtungen verdeutlicht, dass Sonneneinstrahlung allein nicht über die vorherrschende Exposition entscheidet, welche die Anfälligkeit für Massenbewegungen aufzeigt. Im Arbeitsgebiet herrscht nördlicher Antransport feuchter Luftmassen vor, die an der Gebirgsschwelle im Norden zum Aufstieg und Abregnen gezwungen werden. Aufgrund der mittleren Breitenlage auf der nördlichen Halbkugel sind die Einstrahlungsunterschiede sehr hoch. Mit einer Erstreckung von 35°30' bis 37°N liegen sie nahe am Maximum des Strahlungsexpositionsentzuges sowie in einem Bereich großer Tages- und Nachtzeitenunterschiede (vgl. LAUER 1999). Für alle genannten Einflussfaktoren ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit der Gefährdung von nordexponierten Hängen wegen höherer Niederschlagsmengen durch die Windrichtung und zudem längerer Durchfeuchtung durch strahlungsgeschützte Schneeflächen und verminderter Evapotranspiration. Eine Faktorenebene mit regelmäßigen Intervallen von 90° wurde gebildet, um diese a priori Vermutung zu überprüfen bzw. eine Gefährdungskategorie zu erstellen.

8.3.3 Wölbung und Krümmung

Die Wölbung (*plan curvature*) ist die Veränderungsrate der Exposition, die Krümmung (*profile curvature*) die Veränderungsrate der Neigung in einem Höhenprofil. Hohlformen wie Unterhänge und Geländedepressionen stellen Schattenbereiche dar, in denen bevorzugt Spätfröste auftreten können.

Die Umverteilung des Oberflächenabflusses wird durch die Hangwölbung gesteuert und führt zu qualitativ wie quantitativ unterschiedlichen Prozessen der Abtragung und Akkumulation. Die tägliche Amplitude der Temperatur wird ebenfalls durch die Hangform gesteuert, konvexe Oberflächen verkleinern, konkave Oberflächen wie etwa Täler und Mulden vergrößern den Tagesgang der Temperatur. Die Interflow- / Hangwasserdrainage konzentriert sich an einem konkaven Hang



und erzeugt einen höheren axialen Porenwasserdruck als an den Flanken. Massenbewegungen treten daher häufig an konkaven Hängen auf (z.B.: DAI & LEE 2002). Über die Form von Massenbewegungen lassen sich in Studien sogar Zusammenhänge zwischen Steilheit und Krümmung im Profil beobachten. Bis 29° scheinen Massenbewegungsformen allgemein konkav zu sein, steilere sind konvex. Bei Abrissnischen kehrt es sich um, >30° steile Hänge seien konkav (IWAHASHI et al. 2001). Die Einteilung von Profilen nach Krümmung ist in der Literatur recht umstritten, zudem wirken bisherige Ergebnisse aus diversen Studien noch wenig aussagekräftig, bezüglich der Richtwerte des Einflusses auf Massenbewegungen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit hierauf nicht weiter eingegangen. Es sei nur festgehalten, dass ein Einfluss existiert, der aber schwierig und mit wenig eindeutigen Ergebnisaussichten zu messen wäre.

Abb. 91: ▲ Photo i14-02-20, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Schneerest in Abrissnische, durch Nordexposition und Schattenlage der Wölbung konserviert

Abb. 92: ▼ Photo i16-02-10, GPS-Punkt QA96, 1239 m NN: Moderater Reliefabfall in das Alamutbecken



8.3.4 Höhenstufe

Zum Relief gehört auch die Höhenstufe als Potentialunterschied eines Feststoffes zum angrenzenden Talboden oder der Vorlandshöhe. Die temperaturbedingte Änderung der klimatischen Bedingungen je nach Höhe ist eine steuernde Größe der Höhenstufe. Damit reguliert sie Vegetationsbedeckung und Bodengefrorenis sowie Schneehöhe. In der Literatur gibt es nur wenige Angaben zu einer Beeinflussung von Höhenstufen für die Anlage von Massenbewegungen. In Indien seien z.B. 75% der Massenbewegungen in einem Studiengebiet in Uttar Pradesh unterhalb 1800 m zu finden (PANNIKAR & SUBRAMANYAN 1996). In einer anderen Untersuchung von IWAHASHI et al. (2001) wird ein Zusammenhang zwischen der Höhe eines Hanges und seiner Hangneigung bzw. Hangform eruiert. Danach gäbe es Höhenwerte, ab denen sich der Charakter von stabilen Hängen und massenbewegten Hängen bei bestimmten Gesteinsformationen nicht mehr änderte. Bei sandig-schluffigen Sedimentgesteinen änderte sich ab 160 m Höhe der Hangneigungswinkel nicht mehr signifikant. Bei Tonsteinen änderte sich nur für Massenbewegungen ab einer Höhe von 100 m der Hangneigungswinkel nicht mehr deutlich, bei Vulkaniten werden die Hangneigungswinkel von stabilen Hängen mit der Höhe zunehmend steiler, ab einer

Höhe von 130 m jedoch nimmt der Gegensatz ab. Bei Abrissnischen ist für die meisten Höhen und Gesteine wenig Varianz zu erkennen. Für Höhen zwischen 160 m und 700 m lassen sich jedoch drei Klassen für Hangneigungswinkel feststellen: 16° sind typisch für Massenbewegungsformen, 22° für stabile Hänge und 27° für Abrissnischen (IWAHASHI et al. 2001). Ein Problem bei der Bewertung von anderen Höhen und auch jeweiligen Gesteinsformationen ist der Mangel an ausreichenden Stichproben. Diese Studie wie auch die geringen Angaben anderer Studien ließen jedoch wenig Übertragbarkeit oder Relevanz für das Untersuchungsgebiet im Nordwesten Irans erkennen. Im Bereich des Testgebiets waren aufgrund der relativ geringen Höhenunterschiede von maximal 1500 m bei einer Mindesthöhe von 980 m im intramontanen Alamutbecken und einer Maximalhöhe von 2540 m geringe Auswirkungen der Höhenstufe zu erwarten, da bereits die niedrigsten Bereiche in einem Hochlandbereich liegen. Zudem liegen die höchsten Punkte noch nicht extrem hoch im Vergleich zum Untersuchungsgebiet, in dem der höchste Punkt am Alam Kuh auf 4680 m liegt. Da auch Geländebeobachtungen keinerlei unterstützende Indizien für eine höhenbedingte Zu- oder Abnahme von Massenbewegungen ergaben, wurde auf eine Faktorenebene hierzu verzichtet.

8.4 Klima

Der Elburs liegt in seiner geographischen Breite wie Länge im Bereich der winterfeuchten Subtropen (nach Troll und Paffen 1964, siehe SCHULTZ 2002) und damit im Einflussbereich subtropisch-randtropischer Hochdruckgebiete im Sommer. Prägender für das Niederschlagsgeschehen sind die Winterhalbjahre mit frontengebundenem zyklonalem Wettergeschehen sowie Kaltlufteinbrüchen mit Frösten. Generell dominiert jedoch advektiver Aufgleitregen mit geringem Tagesgang, für den eine maximale Niederschlagsstufe auf einem Niveau von ca. 3500 m typisch ist (LAUER 1999, S.94). Insbesondere die Höhenstufe trägt zu einer Differenzierung des klimatischen Geschehens gegenüber den jeweiligen anschließenden Vorländern bei. Die meist von Nordwesten herangeführten Niederschlagshöchstmenge werden im Bereich des Gebirgsanstiegs südlich des Kaspischen Tieflan-

des aberegnet. Die Niederschlagsverteilung zeigt sich deutlich in der dichten Vegetationsbedeckung des Kaspischen Tieflandes sowie in der höhenbedingten Abnahme der dichten Waldbedeckung. Die Vegetation kann jedoch nur bedingt als Klimaanzeiger fungieren. Zwar sind die Kontraste des zentralen, vegetationsarmen Gebirgsraumes zum Kaspischen Tiefland und dessen Waldgrenzsaum deutlich auszumachen. Gleiches gilt für den Kontrast von der südlichen Abdachung des Elburs hin zur Zentraliranischen Hochlandsebene im Vergleich zum Kaspischen Tiefland (vgl. Karte 9). Dieser Gegensatz ist jedoch über lange Zeiträume sehr stark anthropogen überprägt worden. Das bemerkenswerte Fehlen von höherer natürlicher potentieller Vegetationsbedeckung hat seinerseits bedeutende Auswirkungen auf lokalklimatische Verhältnisse.

8.4.1 Niederschlag

Der Niederschlag wird als eine der Hauptkomponenten beim Bewirken bzw. Auslösen von Massenbewegungen gesehen. Für das Testgebiet im südlichen Bereich des Elbursgebirges gilt eine differenzierte Betrachtung, da durch die Regenschattenlage der größtenteils im Winter von Nordwesten herangeführten Luftmassen und generell geringerer Sturmereignisse als z.B. in Wirbelsturmgebieten eine direkte Auslösung von Massenbewegungen zu bezweifeln ist (vgl. Klimadaten der Messstationen, sowie AIR MINISTRY 1946 und DJAVADI 1966). Ein Bewirken, also eine starke Beeinflussung von Massenbewegungen, kann jedoch postuliert werden, da der Niederschlag, auch als Schnee, klimamorphologische Faktoren wie Erosion und Vegetationsbestand steuert. Typisch für die Niederschläge im Untersuchungsgebiet ist die hohe räumliche und zeitliche Variabilität. Sie drückt sich tageszeitlich, im Jahresgang, in einer Höhenabhängigkeit, in Lokalitätsabhängigkeit, im Intensitätswechsel und regionaler wie temporaler Verzögerung durch den Rückhalt in Form von Schnee aus. Zu beachten ist weiterhin die Evapotranspiration, welche erheblich die abfließende Niederschlagsmenge beeinflusst, insbesondere in den Sommermonaten.

Das Ausmaß von Niederschlagsintensität und Dauer der Ereignisse ist quantitativ in vielen Studien untersucht worden, jedoch mit wenig sich gleichenden Ergebnissen. Regionale Unterschiede sowie die Variabilität von Niederschlägen, insbesondere aber die komplexe Verknüpfung und



Wechselwirkungen mit anderen Faktoren, wie etwa dem Boden, mögen daran Schuld tragen. In Hongkong ergab sich in einer Studie ein eindeutiger Schwellenwert zur Auslösung zahlloser Massenbewegungen bei 70 mm/h (CHEN & LEE 2002). Weniger direkte Abhängigkeiten und größere Zeitspannen wurden in anderen Studien beobachtet. Die kumulative Niederschlagsmenge von 3 Tagen wurde zusammen mit der Summe der Niederschlagsmenge von 15 antezedenten Tagen in einer Studie von CHLEBORAD (2000) als kritischer Schwellenwert zur Auslösung von Massenbewegungen untersucht, und eine Beeinflussung festgestellt. Gegen antezedente Regenfallmengen als auslösenden Faktor sprechen jedoch andere Studien (Degnuatti et al. 2000, wie zitiert in: CHLEBORAD 2000). In einer detaillierten Untersuchung von meteorologischen und hydrologischen Faktoren widersprechen OKAMOTO et al. (2004) der Korrelation einer Periode von 3 oder 10 vorausgegangenen Tagen an erhöhtem Niederschlag mit der Auslösung oder Beeinflussung einer Massenbewegung. Ebenso sprechen auch die anderen Messergebnisse dieser Studie gegen einen Einfluss von Porenwasserdruck, Schneedicke oder Bodentemperatur auf die Ablaufgeschwindigkeit oder Auslösung von Massenbewegungen. Freilich gilt es, die Singularität dieser Studie wie auch ihre spezielle geographische Situation in Norwegen zu berücksichtigen. Eindeutiger liegt der Fall bei tropischen Wirbelstürmen, 98% der Muren im Nordwesten Nicaraguas waren von Niederschlägen durch Hurrikan Mitch ausgelöst worden (PALLÁS et al. 2004).

Von vier der dem Testgebiet nächstgelegenen Messstationen lagen lediglich für den Zeitraum eines einzigen Jahres Klimadaten vor (i.e. 1378

Abb. 93: ▲ Photo i3-02-04: Gebirgsvorland, GPS-Punkt F12, 02.04.2002: einsetzende Erosion nach andauerndem Landregen



Abb. 94: ◀ Photo 03280012: Kanal ('Djub') in Teheran nach stärkerem Regenereignis am 28.03.2002

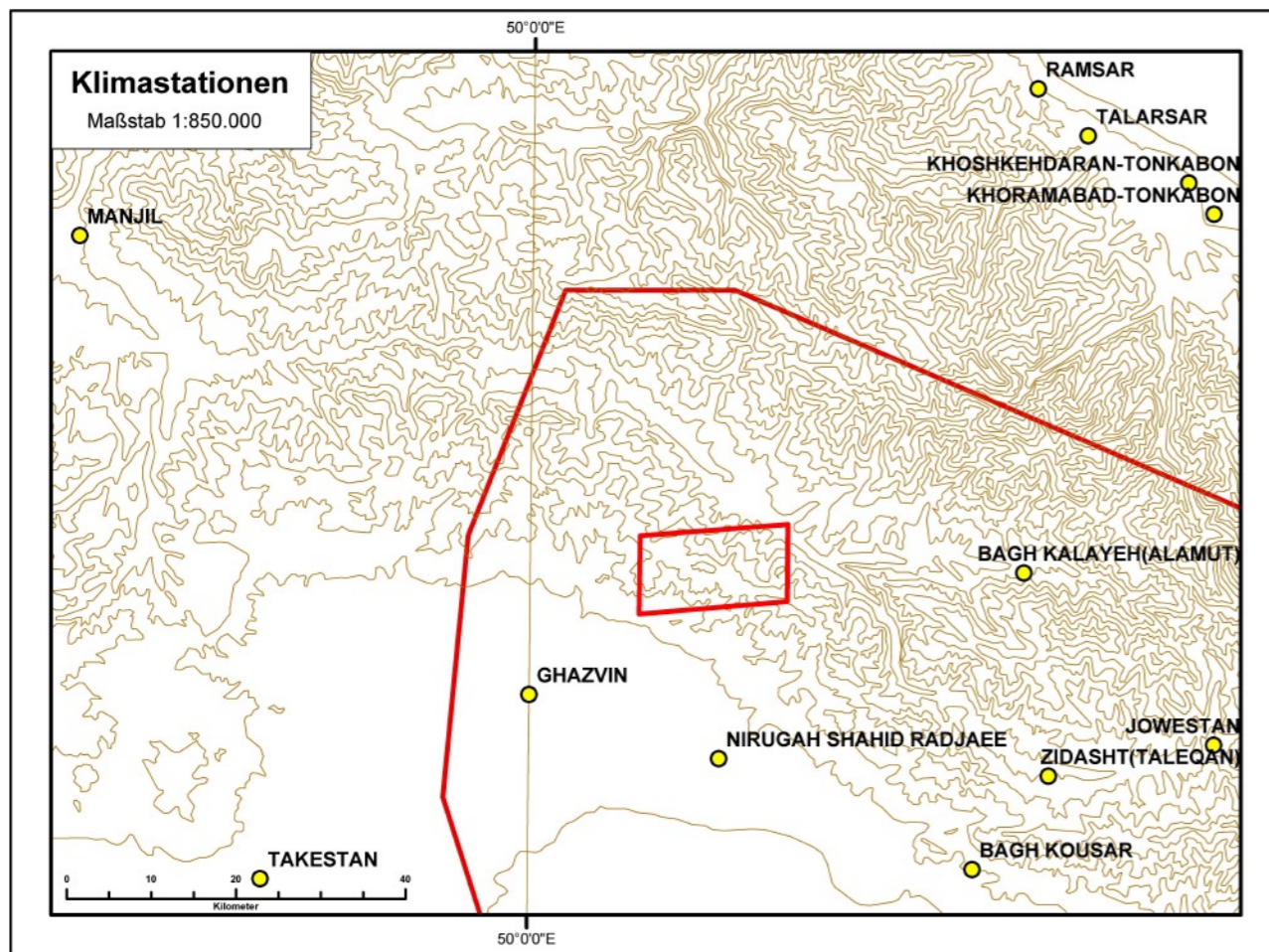
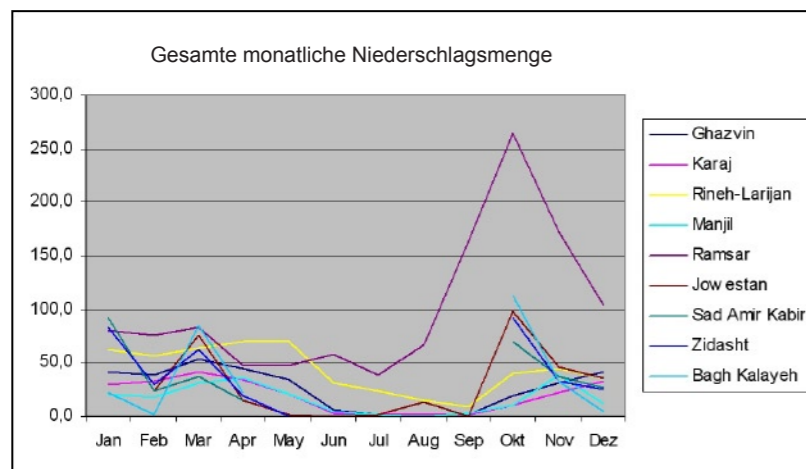


Abb. 95: ▲ Karte 15: Lage der für das Testgebiet relevanten Messstationen

Abb. 96: ▼ Diagramm 4: gesamte monatliche Niederschlagsmenge



und 1379 neuer iranischer Zeitrechnung, der Zeitraum entspricht zwölf Monaten innerhalb der Jahre 2000/ 2001). Um die Aussagekraft, die Übertragbarkeit und die Interpolation zu fundieren, wurden fünf weitere Messstationen aus dem gesamten Bereich des Elburs und seiner Abdachungen ausgewählt, um aus der Charakteristik der Jahresgänge die Übertragbarkeit der Daten abzuleiten. Diese fünf Stationen repräsentieren regional unterschiedliche Bereiche der Kaspischen Tiefebene im Norden (Ramsar), des südlichen

Elburs Vorlandes (Ghazvin, andere Schreibweise für Qazvin; und Karaj, weiter südöstlich), sowie eine innermontane Station im Osten (Rineh-Larjan) und eine intramontane Station (Manjil) im Westen. Diese fünf Messstationen liefern Daten aus Beobachtungszeiträumen von über 29 Jahren, mit Ausnahme der Station Manjil, welche aber ohnehin einen klimatischen Sonderfall durch die extreme intramontane Lage darstellt (Beobachtungszeiträume: Ghazvin 42 Jahre, Karaj 40 Jahre für die meisten Diagramme, sonst, wo ausgewiesen, 8 Jahre, Rineh-Larjan 29 Jahre, Manjil 8 Jahre, Ramsar 46 Jahre). Damit ist für die meisten dieser Stationen ein klimarelevanter Beobachtungsrahmen von annähernd 30 Jahren erstellt, wie er für den Begriff Klima häufig definiert ist (z.B. LAUER 1999).

In einem Vergleich der Messstationen aus dem gesamten Gebiet der Region des Elburs zeigt sich im Diagramm der durchschnittlichen Niederschlagsmengen mehrerer Jahre deutlich der Gegensatz der Messstation am Kaspischen Meer, Ramsar, zu den anderen Messstationen im Gebirgsbereich oder der südlichen Abdachung. Das Niederschlagsmaximum liegt in Ramsar in einem sehr akzentuierten Spitzenwert im Herbst, der

mit Niederschlagsmonatsmengen von 100 bis 270 mm deutlich die Durchschnittswerte aller anderen Monate und auch aller anderen Messstationen übersteigt. Begründet wird dieser auffällige Kontrast durch die orographische Barriere des Elburs, dessen zentralen und südlichen Raum die Niederschlagsmassen nicht mehr oder nur sehr abgeschwächt erreichen.

Die Niederschlagsmaxima der anderen Stationen liegen in einem breiten Band im Winterhalbjahr, unterbrochen von einer signifikanten, teilweise extremen Trockenzeit von Juni bis September. Im Winterhalbjahr werden durchschnittliche Monatsmengen von 80 mm nicht überschritten. Nimmt man vier weitere Stationen (Bagh Kalayeh, Jowestan, Sad Amir Kabir, Zidasht) im engeren Umfeld des Testgebietes hinzu, für die leider nur für den Zeitraum eines Jahres (siehe oben) handschriftliche Aufzeichnungen vorliegen, so zeigt sich ein ähnlicher Niederschlagsjahresgang. Jedoch gibt es bei den höher gelegenen Stationen deutliche Unterschiede mit zwei Niederschlagsmaxima, einem im Herbst von September bis Dezember und einem von Februar bis April. Anfang Januar zeigt sich ein vermeintlich drittes Maxima, jedoch muss dieses aus der Betrachtung entfallen, da es noch zum Einflussbereich des vorangegangenen Jahres hinzuzuzählen ist. Hier zeigen sich deutlich die Grenzen der Aussagefähigkeit und Vergleichbarkeit von nur einem Aufzeichnungsjahr. Dennoch erscheint die zweite Niederschlagsspitze plausibel, da diese in dem höher montanen Bereich für den reliefabhängigen Charakter in direkter Reaktion auf den Übergang von festem zu flüssigem Niederschlag spräche. Insgesamt zeigen sich bei einem Vergleich der weiter entfernt und in tieferen Relieflagen befindlichen Stationen geringfügig geringere und gleichmäßigere Niederschlagsmonatsmengen. Diese um ca. 50 mm niedrigeren Werte können zwar auch an der Niederschlagsvariabilität begründet liegen, andernfalls sind die höheren Monatsmengen aber durch die Korrelation mit der Höhenzunahme des Niederschlages in Bergregionen zu erklären. Dies liefert Hinweise auf die nötige höhenabhängige Interpolation der Daten. Für die Gefahr von Massenbewegungen ist zu vermuten, dass die durchschnittlichen, vergleichsweise niedrigen Monatsdurchschnittsmengen nicht zur Auslösung von Massenbewegungen ausreichen sollten, vergleicht man Werte aus anderen Klimazonen. Jedoch sprechen die beiden Spitzen im Frühjahr und Herbst für interannuelle Varianz und betonen die Gefahrenschwerpunkte der Niederschlagsmengen.

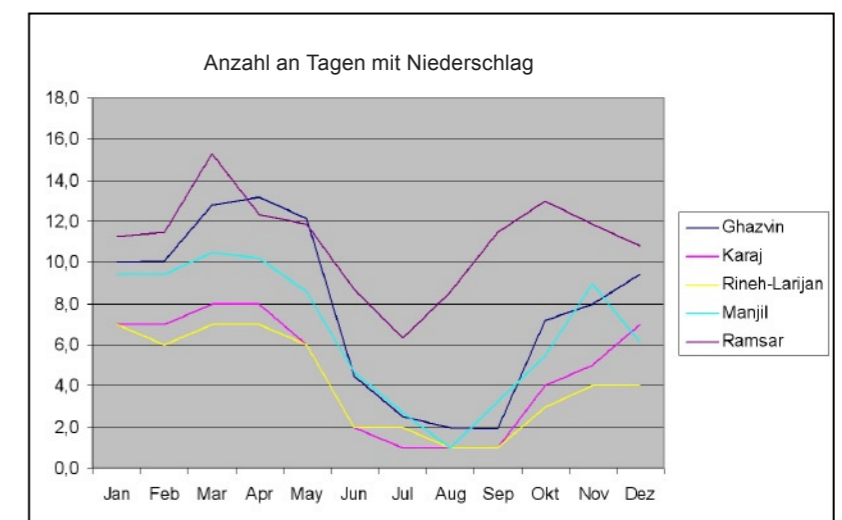
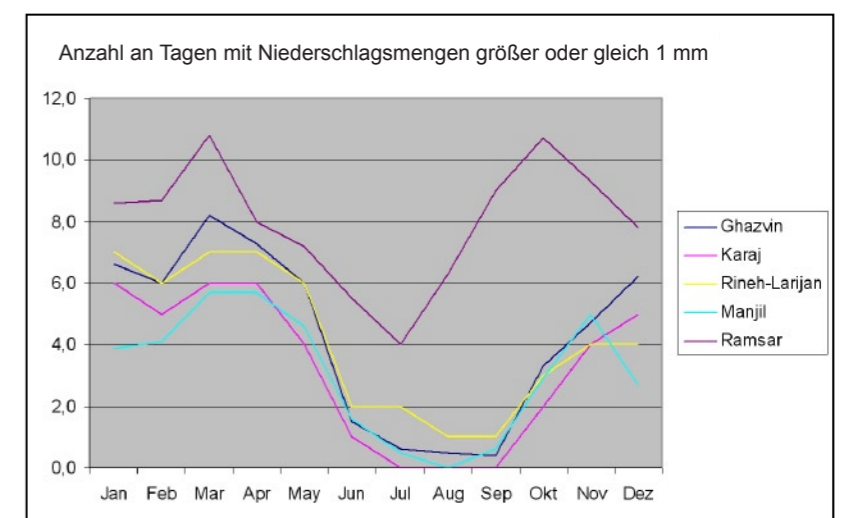


Abb. 97: ▲ Diagramm 5: Anzahl an Tagen mit Niederschlag

Daten für das Diagramm der Anzahl an Tagen innerhalb eines Monats mit Niederschlag sind nur für die umliegenden fünf Stationen der weiteren Region vorhanden. Sie weisen durch einen jeweils sehr ähnlichen Jahresgang auf eine Übertragbarkeit auf das Testgebiet hin. Auffällig ist die höhere Anzahl von Regentagen im Frühjahr gegenüber dem Herbst, obwohl der Kontrast der durchschnittlichen Monatsmengen nicht so deutlich ausfiel. Ähnlich hohe Regenmengen müssen demnach durchschnittlich im Herbst in wenigen Tagen fallen, was auf eine höhere Konzentration der Abflussspitzen und damit der Erosionsgefahr hindeutet.

Vergleicht man hierzu Daten im Diagramm der Anzahl an Tagen mit Niederschlag höher als 1 mm, so zeigt sich ein ähnliches Bild des Jahresganges und des Weiteren, dass noch weniger Tage in einem Monat erosionswirksame Niederschläge bzw. Auslöserereignisse für Massenbewegungen liefern können. Ein beträchtlicher Anteil der Niederschläge tritt vermutlich eher als Fein-

Abb. 98: ▼ Diagramm 6: Anzahl an Tagen mit Niederschlagsmengen größer oder gleich 1 mm



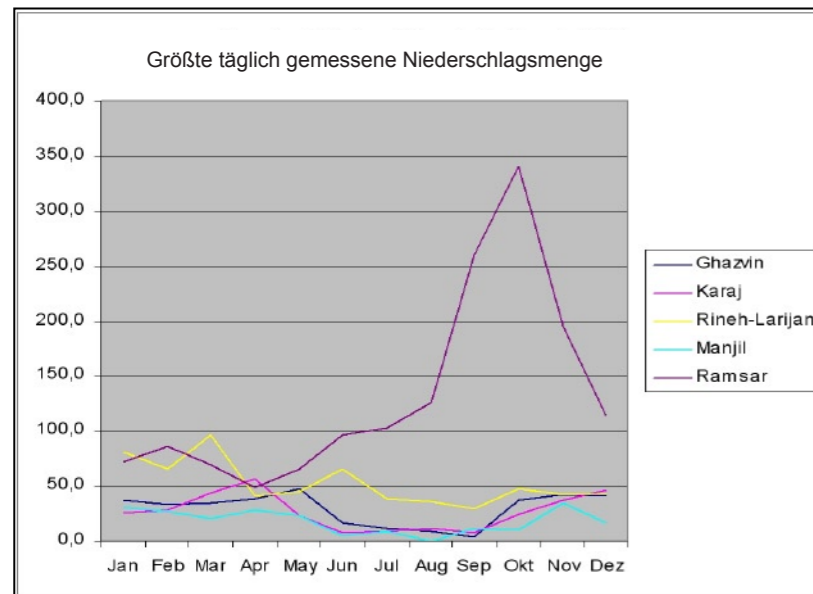
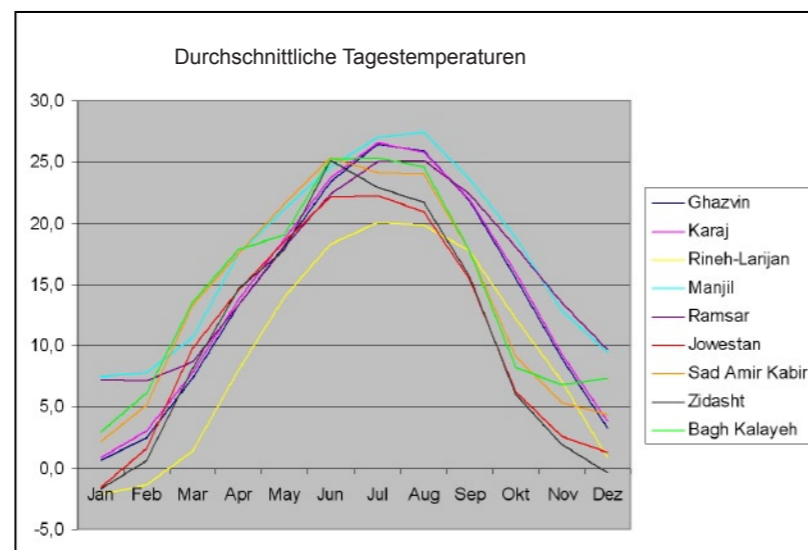


Abb. 99: ▲
Diagramm 7: größte
täglich gemessene
Niederschlagsmenge

gen denn als Starkregen auf.

Das Diagramm der höchsten Niederschläge innerhalb eines Tages zeigt einerseits die extrem hohe Variabilität der Niederschläge in dieser semi-ariden Region. Die durchschnittlichen Monatsmengen können häufig fast an einem einzigen Tag erreicht werden. Andererseits gleichen sich die Spitzen im Jahresgang einander etwas an. In Rineh-Larijan, der Messstation, die im Charakter durch ihre innermontane Lage dem Testgebiet am nächsten kommen dürfte, ist dieser Ausgleich am deutlichsten zu sehen. Das heißt, dass eine Konzentration auf einen Monat, so wie für Ramsar, für das Testgebiet nicht zu erschließen ist. Die Niederschläge können generell zwar Spitzen hoher Varianz erreichen und vegetationsarme Oberflächen sehr wohl beeinflussen, jedoch ist ein direkter Zusammenhang mit dem Auslösen rezenter Massenbewegungen wegen der insgesamt niedrigen Niederschlagssummen und der hohen Variabilität schwierig herzustellen. Weitere Daten zu Häufigkeiten von starken Gewitterereignissen erbrachten ebenfalls keine Auffälligkeiten. Es scheint, als ob Klimabedingungen für Zyklonenbahnen oder Konvektionsbewölkung durch die Reliefbarriere und die Breitenlage nicht gegeben seien.

Abb. 100: ►
Diagramm 8:
durchschnittliche
Tagestemperaturen



8.4.2 Niederschlag in fester Form

Schneefall bedeutet eine Bindung des Niederschlags in fester Form. Liegt er bereits vor, hat er eine Pufferwirkung auf Niederschläge in flüssiger Form. Für Schmelzwasser ist charakteristisch, dass es zeitlich verzögert zum Niederschlagsereignis abfließt. Eine Temperaturzunahme im Frühling bewirkt erhöhte Schneeschmelze und damit erhöhte Abflussspende.

Frost plombiert Oberflächen, und infiltriertes gefrorenes Wasser erzeugt eigene bodenmechanische Eigenschaften. Einerseits verhindert es Wasserzirkulation, andererseits kann die Frostverwitterung wirken. Denudationsprozesse und Erosionsprozesse finden an Stellen statt, die an Schneeflecken gebunden sind. Unterhalb der Schneeflecken treten verstärkt Schmelzwässer aus. Die Durchfeuchtung ist unterhalb der Oberfläche von Schneeflecken größer und anfängliche kleine Hangmulden können sich erweitern. Neben der allgemeinen saisonalen Steuerung des Abflusses können in steilem Relief auch sogenannte 'slush streams' einsetzen. Das sind bei der Schneeschmelze ausbrechende Schnee-Wasser-Gemische, die mit hoher Geschwindigkeit Schutt und Geröll mitreißen. Auch die Vegetationsperiode kann durch Schneeflecken kleinräumig variieren und bis zu mehrere Wochen versetzt eintreten. Dies trägt zur Fragmentierung geschlossener schützender Vegetationsbedeckung bei.

8.4.3 Temperatur

Die Temperatur spielt bei der unmittelbaren Beeinflussung von Massenbewegungen eine eher untergeordnete Rolle. Indirekt nimmt sie jedoch Einfluss auf das Niederschlagsgeschehen durch die Verdunstung, welche für das Untersuchungsge-

biet als hoch angenommen werden kann. Verdunstungsmessungen in Gebirgsräumen sind schwierig, da sie regional sehr unterschiedlich und oft nur auf indirektem Wege z.B. über die Abflussspende zu ermitteln sind. Hierfür liegen jedoch nur wenige Daten vor. Eine Korrelation von Temperaturerhöhung und Massenbewegungen wird von manchen Autoren vermutet, insbesondere dann, wenn dadurch Schneeschmelze ausgelöst werden kann (CHLEBORAD 2000). Frostwechsel wird durch häufige Wechsel zwischen Tauen und Gefrieren und durch rasche Abkühlung unter -5°C gefördert. Dieser Wechsel ist bedeutend für periglaziale und frostwirksame Verwitterungsprozesse, so z.B. für frostbedingte Solifluktion, Schlammfließen oder Kammeisbildung mit entsprechender Auflockerung und Umlagerung des Bodens. Fehlt eine isolierende und schützende Vegetationsdecke, können die Fröste entsprechend tief einwirken.

Die Temperatur steht in Klimadarstellungen häufig als Indikator an erster Stelle der Klimabetrachtung. Sie ist bedeutend einfacher zu messen und flächenmäßig zu interpolieren als Niederschlag. Die Diagramme der durchschnittlichen Tagestemperaturen untermauern durch den sehr ähnlichen Jahresgang aller Stationen die generelle regionale Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der allgemeinen Klimasituation auf das gesamte Testgebiet.

Das ausgeprägte, gleichmäßige und steil ansteigende Sommermaximum weist auf das kontinentale Jahreszeitenklima der Nordhalbkugel hin, mit Tagesdurchschnittstemperaturen zwischen 20 und 25° . Die Tageshöchstwerte können im Höchstfall bis zu 45°C erreichen (Manjil, Juni 1995). Dem gegenüber steht eine starke Abkühlung im Winter auf Durchschnittstemperaturen teilweise unter dem Gefrierpunkt, Tiefsttemperaturen von bis zu -24°C werden erreicht (Ghazvin, Januar 1977).

Die maximale Amplitudenspanne der durchschnittlichen Höchst- und Tiefstwerte verdeutlicht die große jahreszeitliche Varianz der Stationen im Gebirgsraum und im südlichen Vorland. Deutlich ist der weitaus ausgeglichene Verlauf in Ramsar im maritimen Einflussbereich des Kaspischen Meeres. Orographische Effekte scheinen für die ebenfalls gleichmäßigeren Verläufe der Jahresamplituden von Manjil und Rineh-Larijan verantwortlich zu sein.

Die Anzahl der frostwirksamen Tage im Jahresverlauf kann in einem weiteren Diagramm der Anzahl an Tagen mit Tiefsttemperaturen von null

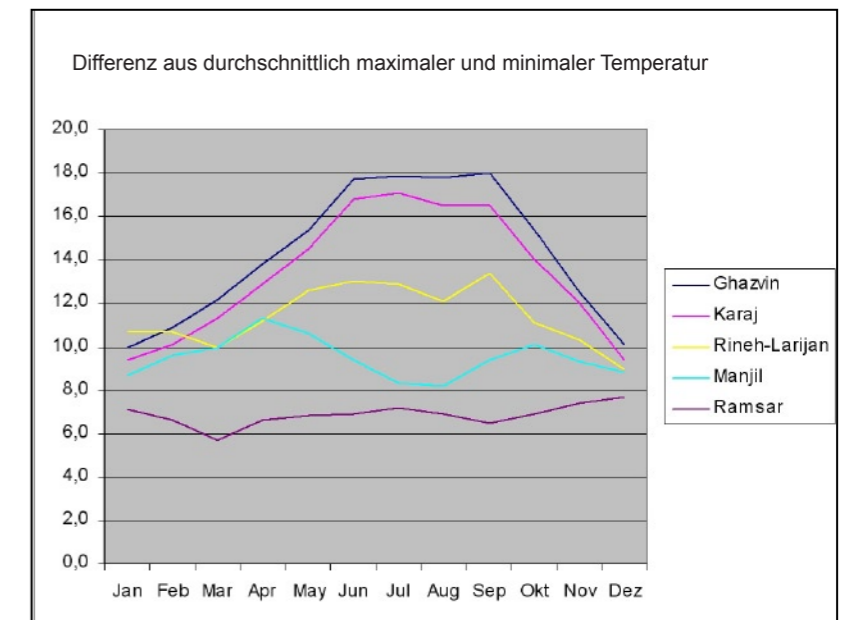
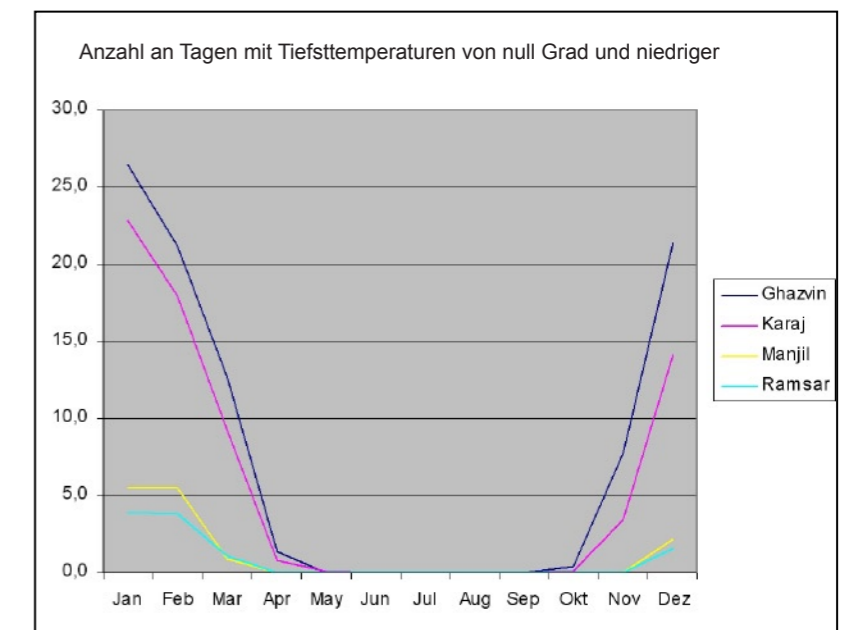


Abb. 101: ▲
Diagramm 9: Differenz
aus durchschnittlich
maximaler und
minimaler Temperatur

Grad und niedriger verdeutlicht werden. Auch sie unterliegen einem starken Jahresgang mit großer Amplitude und ausgeprägt langer Dauer. Lediglich die Sommermonate Ende Mai bis Anfang September beeinträchtigen das Wachstum der Vegetation nicht.

Der hohe Strahlungs- und Temperaturgegensatz der Jahreszeiten wird durch das Diagramm der Anzahl an Tagen mit Höchsttemperaturen von 30 Grad und höher veranschaulicht. Der steile Anstieg und Abfall der Kurve mit Maximum im Juli und August spricht für eine bereits zenitale Beeinflussung der Erhitzung und Abkühlung des Eises und Schnees, sowie des Erdbodens und Gesteins mit wasser- und salzbündigen verstärkten Verwitterungseffekten. Lokal

Abb. 102: ▼
Diagramm 10:
Anzahl an Tagen mit
Tiefsttemperaturen von
null Grad und niedriger



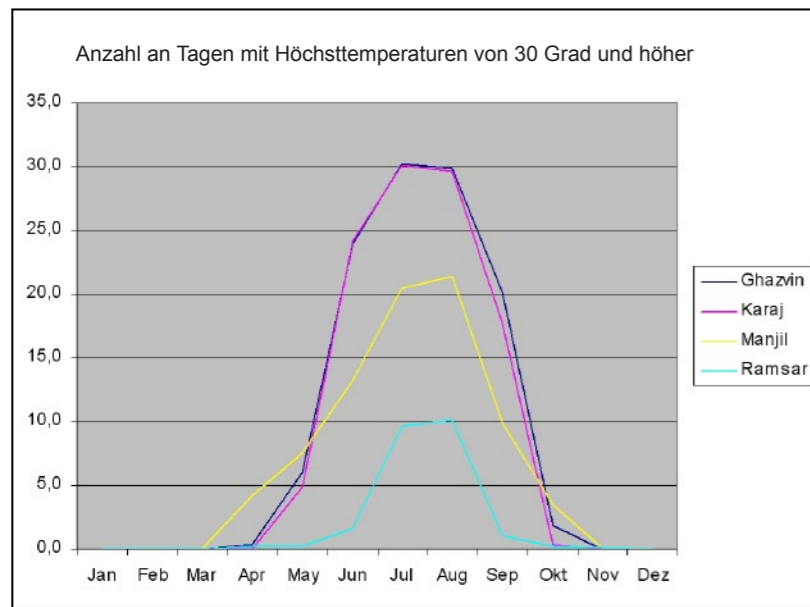


Abb. 103: ▲
Diagramm 11:
Anzahl an Tagen mit
Höchsttemperaturen
von 30 Grad und höher

Abb. 104: ►
Diagramm 12:
monatliche
Sonnenscheinstunden

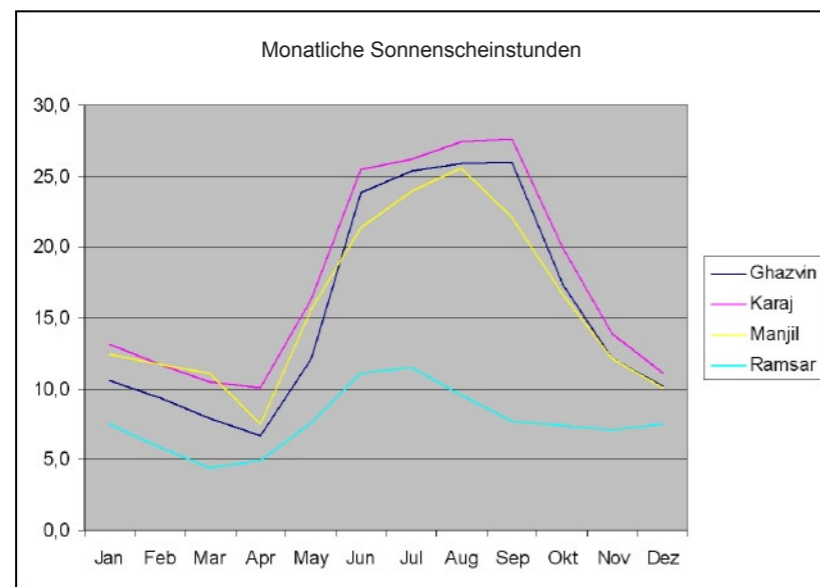
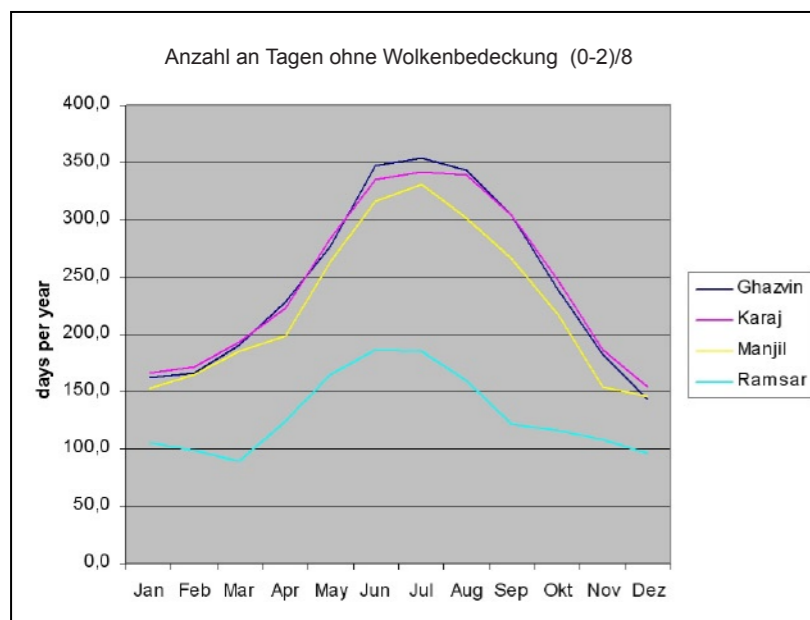


Abb. 105: ▼
Diagramm 13: Anzahl
an Tagen ohne
Wolkenbedeckung
(0-2)/8



werden diese Prozesse je nach Lage der Exposition des Hanges weiter gesteuert, deren Gegensätze sich durch die hohen Amplituden ebenfalls verstärken.

Für die hohe und beständige Wirksamkeit der solaren Einstrahlung spricht auch die hohe Anzahl der monatlichen Tage mit Sonnenschein im Diagramm der monatlichen Sonnenscheinstunden. Die Station Ramsar steht deutlich hinter den anderen Stationen zurück, dies liegt vermutlich am höheren Bewölkungsgrad des küstennahen Bereichs. Es sind sogar Daten zum Grad der Bewölkung vorhanden, sie untermauern den Arititätsgrad des Untersuchungsgebietes und die jahreszeitliche Varianz der wirksamen Sonneneinstrahlung.

Die Wirksamkeit der Sonneneinstrahlung für die Verdunstung und deren Bedeutung für das tatsächliche Niederschlagsangebot lässt sich indirekt aus den Daten über die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit interpretieren. Das Diagramm der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit in Prozent zeigt einen starken Rückgang der relativen Luftfeuchtigkeit der Stationen Ghazvin und Karaj in den Sommermonaten, in denen die solare Einstrahlung und die

Temperaturen ihr Maximum haben. Der ankommende Niederschlag auf der Bodenoberfläche dürfte also durch die hohe Verdunstung noch geringer ausfallen, ebenso kann aufsteigende Bodenwasserbewegung vermutet werden. Die innermontanen Stationen Manjil und Rineh-Larijan weisen hingegen bereits sehr viel ausgeglichener und auch fast durchwegs höhere relative Luftfeuchtigkeiten auf. Eventuell ist das ein Hinweis auf höhere Grade an Wolkenbedeckung und Temperaturabnahme mit der Höhenlage und zunehmender Zentralitätslage im Gebirge.

Wind

Winde sind nicht nur im planetarischen Zirkulationszusammenhang das Medium, das über den Druckausgleich die Verteilung klimawirksamer

Parameter, insbesondere den Niederschlag, steuert. Gerade im Gebirgsbereich wird die lokale Verteilung von Niederschlag durch Hangwinde und Berg-/ Talwinde stark modifiziert. Gleiches gilt für Schneeverwehungen durch lokale Transportwege des Windes. Auch die Exposition spielt hier hinein, durch asymmetrische Hangerwärmung werden auch unterschiedliche Windrichtungen erzeugt - anabatische Hangaufwinde und katabatische Abgleitvorgänge. Auswirkungen sind z.B. Luv- und Leeeffekte der Niederschlagsbildung, sowie eine Verschiebung der Frostgrenze im Tagesverlauf.

Die generell vorherrschenden Windrichtungen einiger Messstationen lassen durch ihre Variabilität und starke Abhängigkeit vom örtlichen Relief kaum Schlüsse auf das Testgebiet zu. Bei einer achteiligen Auswertung der Kompassrose ergeben sich aus vier Stationen (Ghazvin, Karaj, Manjil und Ramsar) starke Häufungen bei 135° und 315°, die Station Manjil schert hierbei völlig aus, sie weist zu allen Monaten Windrichtungen aus 360° auf.

Interpolation

Die Höhenzunahme der Temperatur in Gebirgen muss häufig aufgrund fehlender Daten interpoliert werden. Das Untersuchungsgebiet liegt in den wechselfeuchten Tropen mit jahreszeitlich alternierenden hypsometrischen Gradienten. Typisch sind im allgemeinen sommerliche Gradienten von weniger als 0,5°C/ 100 m und Gradienten in der winterlichen Feuchtzeit von mehr als 0,5°C/ 100 m (LAUER 1999, S.56). Für Colorado und Wyoming werden Standardwerte von -4,5°F pro 1000 Fuß und -5,5°F pro 1000 Fuß für Utah und Nevada verwandt (CHLEBORAD 1998). Diese Werte sind jedoch zusätzlich saisonabhängig und liegen für die Zeit der Schneeschmelze im Frühling zwischen -3,5°F und -5,5°F pro 1000 Fuß.

Auf die bedeutend schwierigere Interpolation des Niederschlags wird in der Literatur hingewiesen (DYCK & PESCHKE 1995, LAUER 1999), insbesondere gilt das für Gebirge. Die Fehlbeiträge der Niederschlagsmessung betragen allein 20 bis 40% durch Windeinwirkung (LAUER 1999, S.83).

Auch nach der Überprüfung der Daten aus den umliegenden Messstationen erweist sich trotz nachgewiesener bedingter Übertragbarkeit eine Interpolation, die den tatsächlichen Verhältnissen gerecht würde, als nicht wissenschaftlich. Dies gilt schon allein, da eine Messstation im Testge-

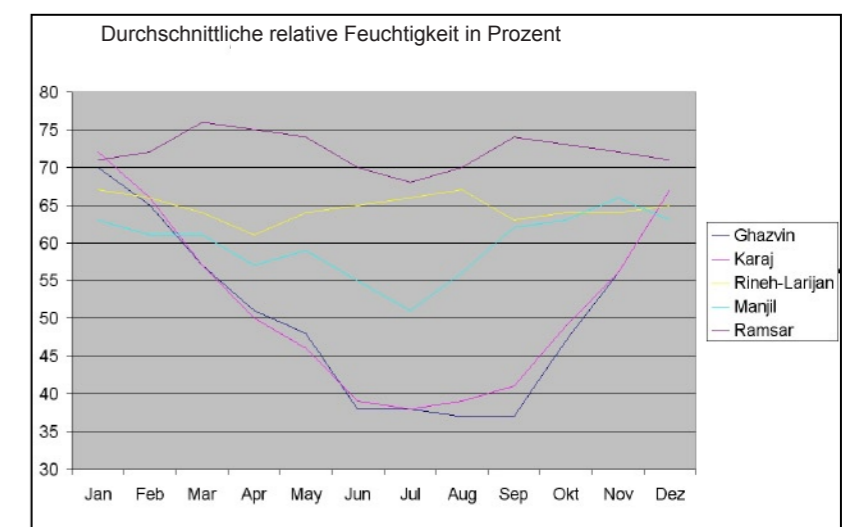


Abb. 106: ▲
Diagramm 14:
Durchschnittliche
relative Feuchtigkeit in
Prozent

biet selbst fehlt. Eine Übernahme der Jahresniederschlagssummen, wie sie im TAVO (1977) und im NATIONAL ATLAS of IRAN (1995) mit ca. 400 mm ausgewiesen sind, ist zum einen aus Maßstabs- und Generalisierungsgründen nicht sinnvoll – die Karte des TAVO ist z.B. im Maßstab 1:8 Mio. Zum anderen sind Jahresniederschlagssummen nicht aussagekräftig genug. Daten über tageszeitliche Niederschlagsmengen wären nötig, da insbesondere starke Regenereignisse (»events«) Massenbewegungen auszulösen vermögen. Es kann allein konstatiert werden, dass starke Sturmereignisse selten, und Tagesereignisse von mehr als 50 mm bis 100 mm im Testgebiet i.d.R. nicht zu erwarten sind. Diese Mengen können zwar wegen der geringen Vegetationsdichte durchaus wirksam werden, um nicht nur Durchfeuchtung zu verstärken, sondern Massenbewegungen auszulösen. Diese Korrelation ist jedoch nicht eindeutig zu postulieren und nur unzulässig grob reliefabhängig interpolierbar. Eine Faktorebene Niederschlag soll folglich ausgespart bleiben.

8.5 Hydrologie

Die Hydrologie behandelt Vorkommen, Zirkulation und Verteilung des Wassers sowie seine Wechselwirkungen mit der Umwelt. Massenbewegungen werden in ihren Formen und Prozessen wesentlich von der Hydrologie beeinflusst, einerseits durch die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wassers, wie es sich mit den Feststoffen verbindet und diese stabilisiert oder destabilisiert, andererseits durch Erosion, welche Massenbewegungen vorbereitet oder auslöst.

Abb. 107: ▼ Photo i33-02-33: lineare Erosion von freigelegtem Feinmaterial

Abb. 108: ▼▼ Photo i16-02-05, GPS-Punkt X01, 1664 m NN: Gullybildung



8.5.1 Abflusscharakteristik

Wasser kann in vielerlei Weise auf oder unterhalb der Grenzfläche von Boden und Luft abfließen. Als linearer, flächenhafter oder zusammengesetz-

ter Oberflächenabfluss, mit oder ohne Mitführung und Abtragung von Oberflächenmaterial. Die Abflussmenge ist eine Funktion der Flächengröße des Einzugsgebietes und dessen Wasserbilanz. Das infiltrierte Wasser kann als Hangwasser im *interflow* oder bei genügender Eindringtiefe und geringer aufwärtsgerichteter vertikaler Bodenwasserbewegung als Grundwasser entwässern. In einer Studie in Lantau Island, Hongkong liegt der Grundwasserspiegel im Bergland entweder gerade noch im leicht bis moderat verwitterten Anstehenden oder im darüberliegenden Saprolith (Franks 1999, wie zitiert bei DAI & LEE 2002). Neigung, Hanglänge und Querschnitt beeinflussen analog zu einem Flussbett auch das Wechselspiel von der Schubspannung eines oberflächlichen Abflusses mit der Scherspannung der Oberflächenrauigkeit. Je länger, flacher und breiter ein Hang ist, desto größer ist der Einfluss der Rauigkeit der Oberfläche und umso flächenhafter kann die Durchfeuchtung bzw. die Abtragung wirken. Dies ist jedoch an hohe Niederschlagsintensitäten gebunden. Deswegen ist der häufigere lineare Abfluss mit intensiver Verstärkung durch steile Neigung, relativ kurzer Hanglänge und relativ engem Querschnitt eine wichtige Steuergröße bei der Durchfeuchtung und Mobilisierung von Hangmaterial.

An bereits vorhandenen Erosionslinien wächst die Gefahr weiterer Abtragung durch Unterspülung und Durchfeuchtung. Auch Gully Erosion begünstigt die Initiation von Massenbewegungen.

Quantitative Aussagen zum Abfluss können in dieser Arbeit nicht präsentiert werden. Dazu wären ein hoher Messaufwand und umfangreiche Berechnungen nötig. Wichtig ist das Verständnis der unterschiedlichen Auswirkungen des Abflusses. Eine Bezugnahme hinsichtlich der Bewertung von Massenbewegungen soll im Kapitel 8.5.2 Einzugsgebiet erfolgen.

Die Auswirkungen von **Infiltration und Kohäsion** auf Massenbewegungen werden wegen der engen Verknüpfung zum Bodenmaterial in Kapitel 8.1.2 behandelt.



8.5.2 Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet bezeichnet das gesamte entwässerte Gebiet eines Flusses und seiner Nebenflüsse. Getrennt werden unterschiedliche Einzugsgebiete durch Wasserscheiden. Das dendritische Flussnetz im Untersuchungsgebiet ist flächenartig gleich verteilt und verzweigt, eine Gewichtung der Anfälligkeit gegenüber Massenbewegun-

gen kann nur nach Rangordnung der Größe der Flüsse vorgenommen werden. Wegen der gleichmäßigen Verteilung und Art des Flussnetzes ist auch die Massenbewegungsanfälligkeit in allen Einzugsgebieten relativ gleichartig.

Der Faktor der Einflussnahme liegt in der Breite des Unterschneidungs- und Durchfeuchtungsbereichs beiderseits eines Flusses begründet. Die Auswirkungsbreite der Durchfeuchtung bestimmt eine Zone beiderseits der linearen Abflussrinnen, in der die Scherfestigkeit des Bodens herabgesetzt ist.

In Übereinstimmung mit diversen Abgrenzungen anderer Autoren wurden Klassen der Auswirkungsbreiten festgelegt und als Pufferkorridore in ArcGIS erzeugt. PANIKAR & SUBRAMANYAN (1996) stellten in ihrer Studie eine Korrelation von 85,1% aller Massenbewegungen in ihrem Untersuchungsgebiet zu einer Entfernung von 200 m zu den Flüssen fest. Ein allgemein höheres Vorkommen von Massenbewegungen verzeichnen PEROTTO-BALDIVIEZO et al. (2004) innerhalb einer 100-500 m Distanz zu Flüssen, sie benutzen Klassen von 100 m Intervallen für ihre Faktorebene. Bei TEMESGEN et al. (2001) entfielen 50 von 63 Massenbewegungen in die Zone von 0-500 m Abstand zu Flüssen, bei DAI & LEE (2002) waren die meisten Massenbewegungen 40 bis 280 m vom Drainagenetz entfernt. Demnach erschien eine Obergrenze von 500 m

Abb. 109: ◀ Photo i32-02-30, GPS-Punkt AL2, 2330 m NN: gullyartige Erosion

Abb. 110: ▼ Karte 16: Flussnetz im Testgebiet

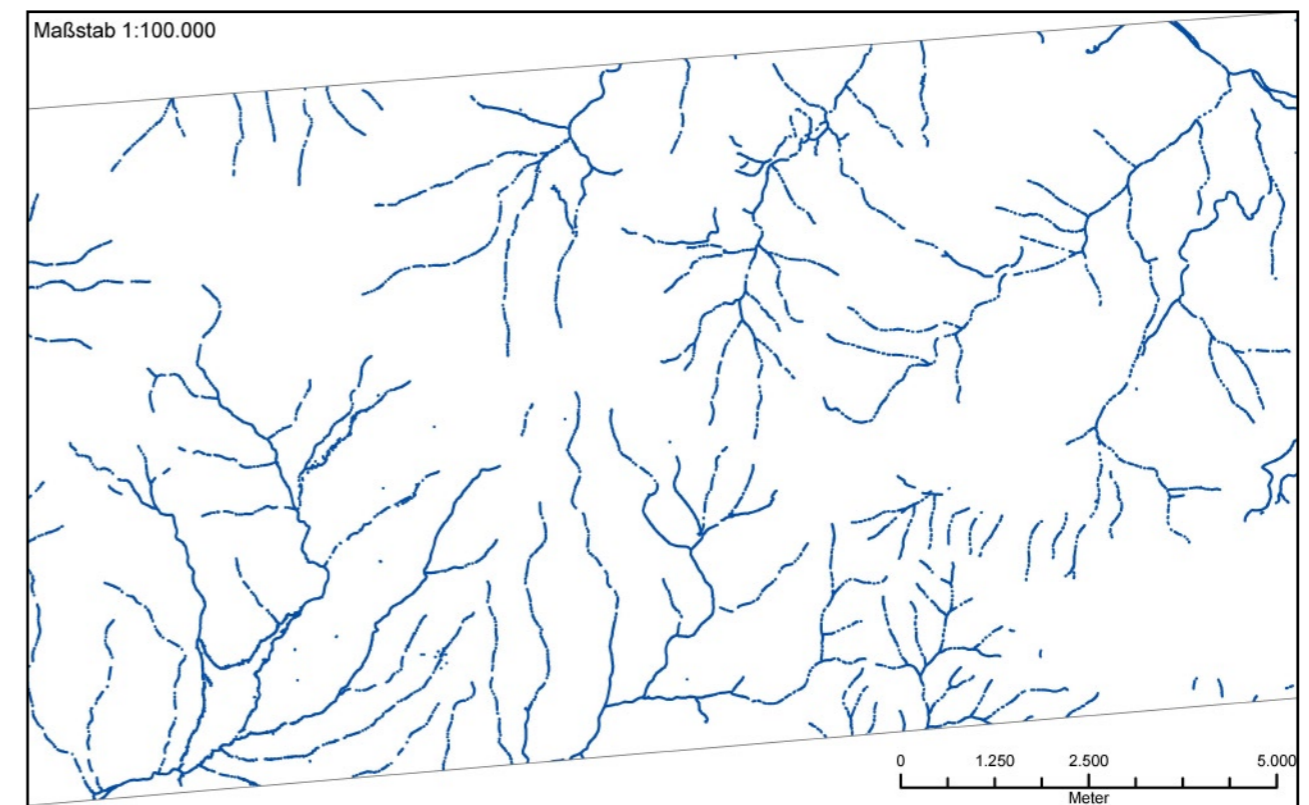
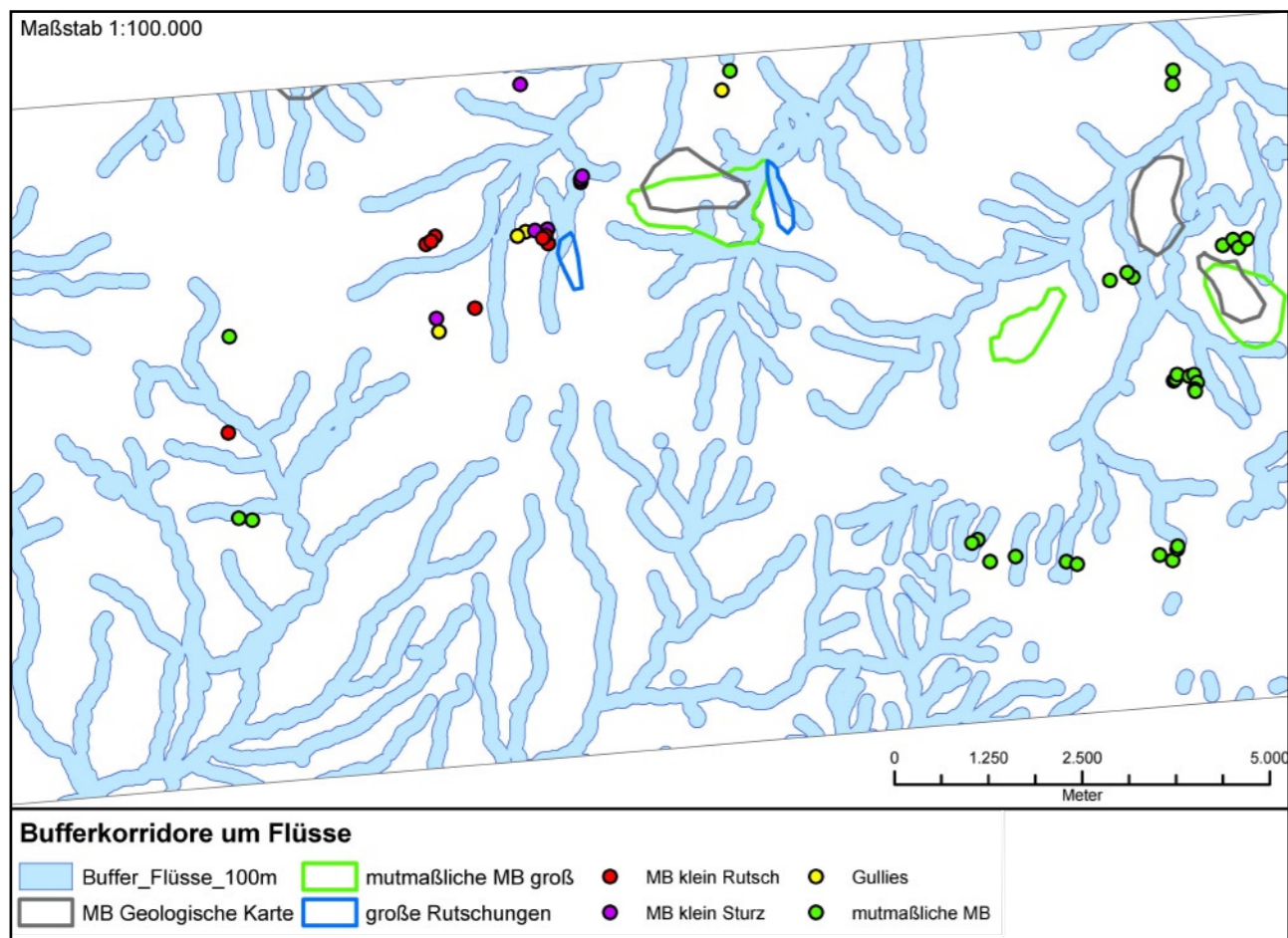




Abb. 111: ▲ Photo i17-02-08, Lage an der Passstraße, zwischen den GPS-Punkten AL10 und QA96: Rotationsrutschung als Folge von Widerlagerentfernung im Abflussbett

als Einflussdistanz als sinnvoll, und die Bildung zweier weiterer Klassen von 100 m und 250 m für vorsichtigere Schätzungen. Damit soll auch der schwierigen Übertragbarkeit der anderen Studien auf das Untersuchungsgebiet Rechnung getragen werden. In Anlehnung an die tektonischen Störungslinien stellte sich die Korridorbreite von 100 m hinsichtlich des Maßstabs und der Fläche des Testgebietes als am sinnvollsten heraus.

Abb. 112: ▼ Karte 17: Faktorenebene „Hydrologie“. Polygone stellen durch Bufferkorridore die Durchfeuchtungszonen der Flüsse im Testgebiet dar.



8.6 Anthropogene Einflüsse



Abb. 113: ▲ Photo i8-02-13: Intensive anthropogene Nutzung durch Entwaldung und Anbau, im Vordergrund Mandelbäume

8.6.1 Veränderung der Vegetationsbedeckung

Die Vegetation ist nicht nur ein ökologischer Anzeiger des Klimas, sondern eine feste Stabilisierungskomponente des abtragungsgefährdeten Materials. Gleichzeitig ist sie ein Bestandteil des Ökosystems, das in besonderem Maße vom Menschen umgestaltet wird. Im Untersuchungsgebiet ist die landschaftliche Umgestaltung durch Entwaldung, Beweidung und Anbau von Kulturpflanzen dermaßen intensiv, dass die ökologische und klimatologische Anzeigerfunktion der natürlichen Vegetation hinter der Indikatorfunktion der anthropogen beeinflussten Agrarvegetation zurücksteht. Daher erfolgt hier die Einordnung der Vegetation als wesentliches Merkmal anthropogener Einflüsse.

Vegetation stabilisiert Hänge sowohl mechanisch als auch hydrologisch (ALTHAUS 2002, NILAWEERA 1994). Die Tiefe, Flächenausdehnung und Intensität der Durchwurzelung binden das Bodenmaterial und verteilen die Durchfeuchtung. Durch Interzeption des Niederschlagswassers steuert die Vegetation die Infiltrationsraten von Oberflächenwasser und damit den Bodenwasserhaushalt. Der Bedeckungsgrad der Phytomasse lenkt die eindringende Niederschlagsmenge und Sonneneinstrahlung. Lückigkeit der

Vegetation und eine dünne Streuauflage verringern die Fähigkeit der Böden zur Wasserabsorption, Splash-Effekte verstärken sich, ebenso der Oberflächenabfluss (*overland flows*). Der Bodenbedeckungsgrad verändert zudem die Albedo und damit das Mikroklima, der Tagesgang der Temperatur ist extremer, je kümmerlicher die Vegetation ist. Besonders gefährdete Oberflächeneinheiten sind neben Brachland kultiviertes Land, spärlich von Vegetation bedeckte Oberfläche und besiedelte Flächen (PANIKKAR & SUBRAMAN-

Abb. 114: ▼ Photo i16-02-0, GPS-Punkt X01, 1664 m NN: Viehgangeln und Gullybildung (roter Pfeil)



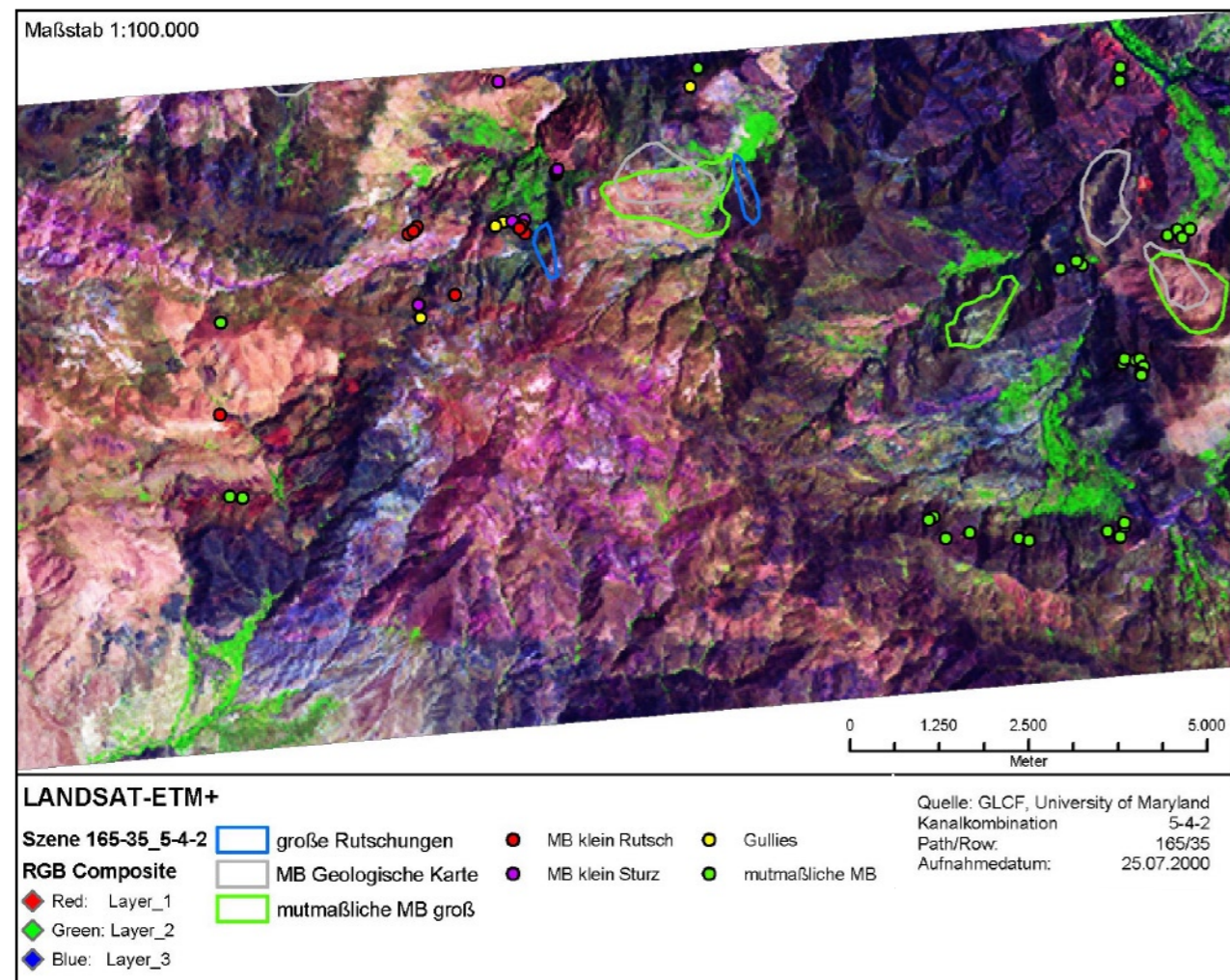


Abb. 115: ▲ LANDSAT-ETM+ -Satellitenbild: Vegetation (grün) im Testgebiet, Kanalkombination 7-4-2, Maßstab 1:40.000, Bildbearbeitung durch Histogramm-Equalize

YAN 1996). Die Degradation durch Viehtritt und Abweidung sind so prägnant, dass Massenbewegungen bereits als typisches Merkmal vergleichbarer Klimazonen, i.e. der mediterranen Subtropen, bezeichnet werden (SCHULTZ 2002).

Dennoch ist die Aufnahme der orohydrographisch engmaschig differenzierten Vegetation ohne Kartierung bzw. Bodenbedeckungskarte nicht realisierbar. Zu Hilfe kann man die LANDSAT-Szene des Testgebietes nehmen. In der Kanalkombination 7-4-2 ist die vorhandene Vegetation im Testgebiet grün eingefärbt. Deutlich erkennbar ist die auf wenige Flussbette konzentrierte Vegetation. In anderen Bereichen existiert Vegetation jedoch auch, nur liegt diese in Stockwerkshöhe und Blattflächenindex in der Art niederer Vegetation von Matten und Flechten oder in dispers verteilter Buschvegetation vor. Damit spiegelt sich diese Vegetation nicht in der Information des hier grün dargestellten Satellitensignals wider. Die Kartierung der Vegetation anhand dieser Kanalkombination allein wäre nicht adäquat für eine Bewertung des Vegetationsbestandes hinsichtlich seiner Auswirkung auf die Bodenstabilisierung.

Die intensive Landnutzung ist jedoch im Satellitenbild zu erkennen. Die Parzellierung und Terrassierung hat die Landschaft intensiv umgestaltet und das Gleichgewicht von Bodenbedeckung und Materialverband verändert. Die Rodung tiefwurzelnder Bäume, Abflusskonzentrationen und Wasserstau sowie Widerlagerentfernungen und Auflagerhöhung an den Terrassierungen

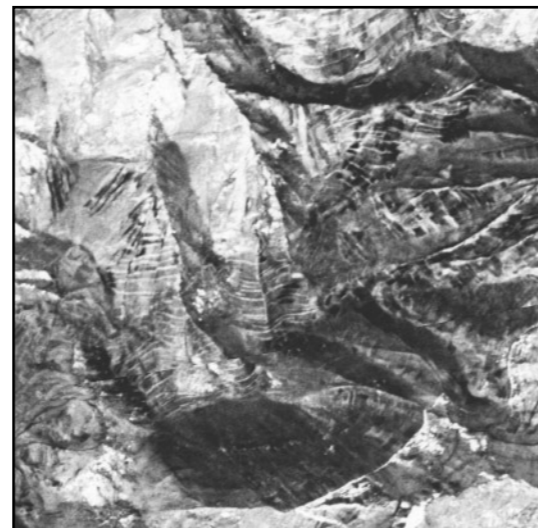


Abb. 116: ► CORONA-Satellitenbild: Terrassierungsbereiche sind leicht durch die Flurgrenzen kartierbar

griffen in die Hangstabilität ein. In den schwarz-weißen Satellitenbildern von CORONA aus dem Jahr 1970 sind die Terrassierungen durch die Flächenstreifung der Feldgrenzen deutlich zu erkennen. Einige dieser Terrassen liegen heute brach, neben wirtschaftlichen Gründen spielen sicherlich auch Degradationserscheinungen eine Rolle für die Aufgabe der Nutzung. Das rezente Ausmaß der Degradation ist im Testgebiet vielfach zu beobachten.

Neben dem Massenverlust an wertvollem Bodenmaterial (vgl. auch Abb. 15, S. 26) sind diese terrassierten Bereiche vermutlich auch verstärkt von Massenbewegungen größeren Ausmaßes bedroht. Große Rutschungen sind andererseits auch Ausgangspunkt für eine anthropogene Nutzung. In Folge einer Rutschung oder eines Bergsturzes verflacht sich der betroffene Hang insgesamt, Material wird zerkleinert und Hohlräume wie Verflachungen werden von Feinmaterialakkumulation bedeckt. Neben einer veränderten Hydrologie mit Quellaustritten stellen vor allem die kleinräumig differenzierten Auflagematerialien landwirtschaftlich leichter nutzbare Regionen dar, gegenüber intakten Felsflächen mit flachgründiger Bodenentwicklung. Jedoch ist gerade die Rutschungsmasse in ihrer kleinräumigen

Varietät der Materialien anfällig für selektive Abtragung und weitere kleinräumige Massenverlagerungen. Im Wechselspiel verstärkter monokultureller Bepflanzung dieser Bereiche mit Abflusereignissen, Quellaustritten, sowie mechanischer Beanspruchung durch Viehtritt sind diese Rutschungsmassen verstärkt weiteren Hanginstabilitäten ausgesetzt.

Die übrige Form der Landnutzung, die in den CORONA-Daten sichtbar wird, ist der kleinparzellierte Anbau, der sich insbesondere in Flussnähe befindet. Grund für die Konzentration von agrarischer Nutzung ist neben den Böden des Schwemmland und der Wasserversorgung in diesem Gebirgsraum die klimatische Begünstigung der tiefer gelegenen breiten Flusstäler. Der Einfluss der anthropogenen Nutzung in diesen

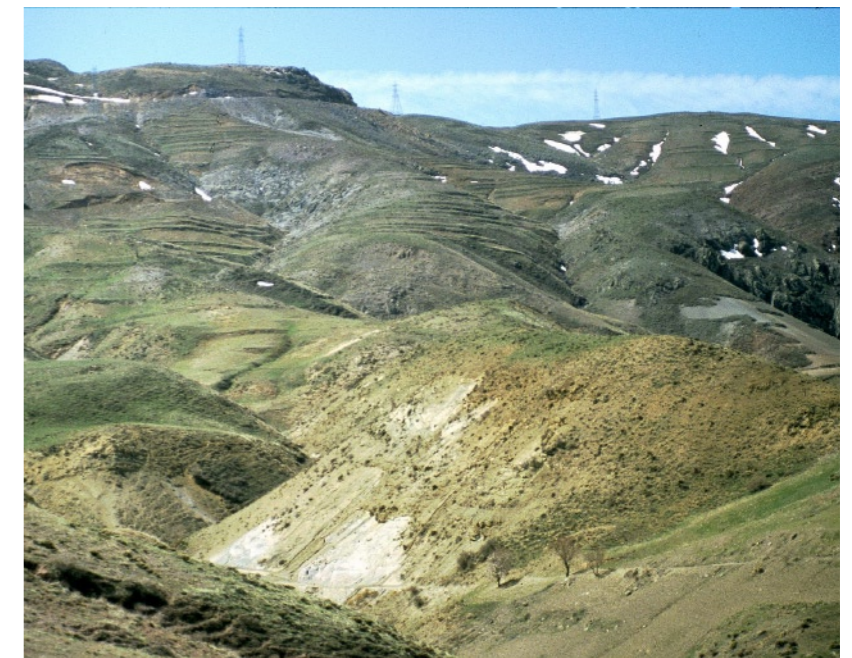


Abb. 117: ▲ Photo i14-02-07, GPS-Punkt AL6, 2107 m NN: brachliegende Terrassen, Viehgangeln und Abrissnischen



Abb. 118: ◀ Photo i32-02-29, GPS-Punkt AL6, 2107 m NN: angepasste anthropogener Nutzung sowie rezente Abtragungerscheinungen auf einem Hang, der aus einem großen Rutschungskörper besteht

flachreliefierten Bereichen ist hinsichtlich Massenbewegungen vermutlich gering.

Abb. 119: ▼ Photo i34-02-02, GPS-Punkt AL9, 2046 m NN: Krümmwuchs auf dem Rutschungskörper und Abrissnischen als Anzeiger für rezente Massenverlagerungen



Abb. 120: ► Photo i34-02-23, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Fuß des Rutschungskörpers im Bereich des Straßenanschnittes. Der Quellaustritt links im Bild und der inhomogene Materialverband sind charakteristisch für Rutschungsmassen.



8.6.2 Infrastruktur

Menschliche Bauten aller Art beeinflussen die Bodenschicht und den Untergrund. Die Hangstabilität wird durch mechanische Belastung, Änderung der Druck- und Zugkomponenten durch Entfernung bzw. Auflage von Material, aus einem quasinatürlichen Gleichgewicht gebracht. Sekundäre Effekte wie die Veränderung des Oberflächenabflusses und des *interflows* durch Versiegelung und Fundamentbau beeinflussen die vorhandene Hydrologie. Auf regionale Stellen konzentrierte Durchfeuchtungen werden durch undichte Versorgungsleitungen erzeugt.

Straßen wirken in ihrer langgestreckten Form auf große Flächen von Hangfußbereichen ein, indem sie wie auch Flüsse das stabilisierende

Widerlager entfernen. Der Einflussbereich von Straßen auf Massenbewegungen ist in der Literatur in seinem Ausmaß noch unklar. Neben den natürlich ausgelösten Massenbewegungen fanden 25% der Massenbewegungen des gesamten Gebietes innerhalb von 200 m Entfernung zu Straßen statt, so eine Studie von PANNIKAR & SUBRAMANYAN (1996) in Uttar Pradesh, Indien. Im katalonischen Küstenbereich waren in einer anderen Studie (CALCATERRA et al. 1998) 15 Fälle von Massenbewegungen pro km² aufgetreten, nur vier pro km² waren natürlich, d.h. ohne Straßenanschnitt entstanden. Auch für das Untersuchungsgebiet wurden bereits Zusammenhänge zwischen der Errichtung neuer Straßen im Gebirge und dem Auftreten von Massen-

Abb. 121 & 122: Photos i34-02-15, i34-02-22, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Wasserleitung an der Passstraße

rechtes Bild: die Wasserleitung führt am Hangfuß entlang, Leitungsschäden führen zu Durchfeuchtung und Destabilisierung des Hanges.

links unten: Detail eines undichten Teils dieser Wasserleitung



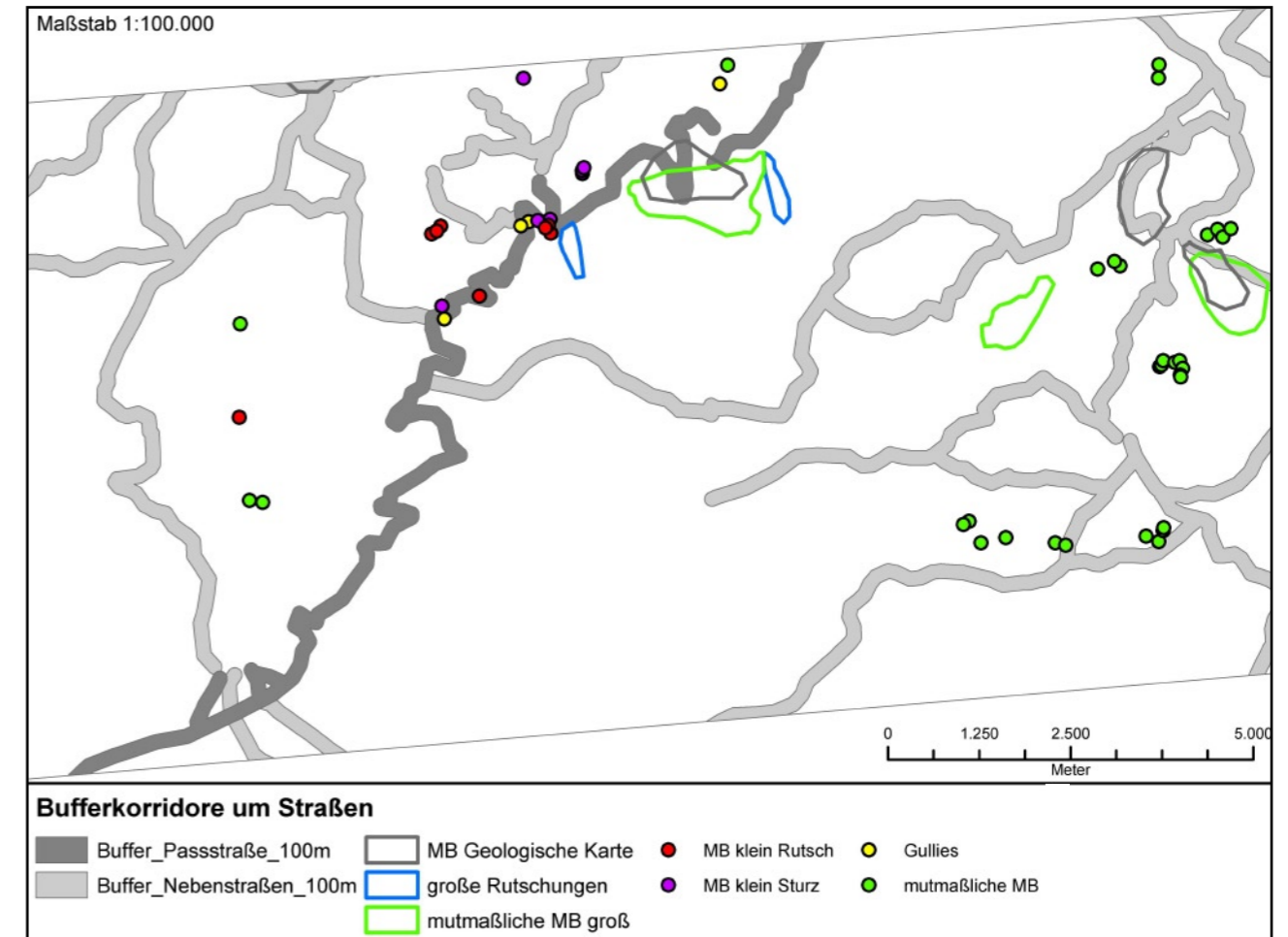
bewegungen festgestellt (ANNELS et al. 1975).

Da in der Geologischen Karte von ANNELS et al. (1975) Massenbewegungen der Größenordnung von 1 km bis 5 km in unmittelbarer Nähe zu Straßen verzeichnet sind, kann ein Einflussbereich in Form eines Korridors mit einer hangseitigen Distanz von unter 5 km Entfernung zur Straße gemutmaßt werden. Dieser Korridor soll durch eine Pufferkorridorerkennung in ArcGIS dargestellt und als Faktorenebene ins GIS übertragen werden. Da der Maßstab der Geologischen Karte von 1:100.000 keine genauere Distanzmessung durch Generalisierung zulässt, muss die Distanzweite des Korridors um die Straßen herum im Kilometerbereich bestimmt werden. Der Einfluss der Entfernung des Widerlagers durch den Straßenbau kann nur geschätzt und aus Vergleichen mit der Literatur festgelegt werden. Für große Massenbewegungen wird eine maximale Distanz von 1 km festgelegt, weitere Klassen für kleinere Massenbewegungen werden mit 500 m und 250 m angesetzt.



Abb. 123: ▲ Photo i16-02-14, Lage zwischen den GPS-Punkten AL10 und QA96: Abrutschung eines destabilisierten Straßenanschnittes in einer Kehre

Abb. 124: ▼ Karte 18: die Faktorenebene „Straßen“ erfasst Bereiche in 100 m Breite entlang der Straßen im Testgebiet



Kapitel 9

Ergebnisse und Bewertung der Methodik



Abb. 125: Photo i15-02-09, nahe GPS-Punkt KKRUST, 1719 m NN: im Testgebiet wird der Zusammenhang zwischen natürlicher Stabilität und anthropogener Nutzung an vielen Stellen ersichtlich. Auf der einen Seite sind im Bild Schäden an der Vegetationsdecke deutlich zu erkennen. Auf der anderen Seite handelt es sich bei der gesamten Bergform um eine sehr alte große Rutschungsmasse, die anthropogen genutzt wird.

Die Terrassierung und der Straßenbau stellen Einschnitte dar, auf welche sukzessive die natürlichen Prozesse der Abtragung einwirken. Neben der Gefahr der Landdegradation drohen insbesondere in steilerem Relief Massenbewegungen. Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Massenbewegungen und Schadensausmaß erhöhen sich, umso mehr gefährdende Faktoren zusammentreffen.

9.1 Zusammenfassung und Qualitätsbeschreibung der Methodik

Integration

Die erstellten Faktorebenen wurden in ein GIS (Geographisches Informationssystem) integriert. Eine wichtige Funktion des GIS ist die Möglichkeit, alle Datenebenen übereinanderzulegen, zu verwalten, zu georeferenzieren und damit in allen Maßstäben vergleichen zu können. Das GIS ähnelt damit nur scheinbar der klassischen Folientechnik, da Informationen nicht nur dargestellt, sondern auch verschnitten, quantitativ ausgewertet und mit Datenbanken verknüpft werden können. Zudem erlaubt die Georeferenzierung der einzelnen graphischen Daten eine mit herkömmlichen Mitteln nicht zu erreichende reliefabhängige und projektionsabhängige Verortungsgenauigkeit, sowie eine relativ maßstabsunabhängige Bearbeitung und Skalierung. Das GIS ermöglichte die Integration von satellitengestützten Positionierungshilfen (GPS) sowie die Einbindung der triangulierten dreidimensionalen Geländedaten (DGM). Bei der Kartenerstellung wurde auf die Verhältnismäßigkeit der betrachteten Maßstäbe von Datengrundlagen und Massenbewegungsformen Rücksicht genommen, die Kartenprodukte wurden einheitlich im Maßstab 1:100.000 erzeugt (Anmerkung: Der Maßstab 1:100.000 ist der gebräuchlichste bei Kartenprodukten aus Fernerkundungsdaten. Auch die geomorphologische Kartierung von DRYSATMAP (BUSCHE & SIEFKER 2004) liegt in diesem Maßstab vor und kann deswegen leicht zu Vergleichsschlüssen herangezogen werden.). Für alle Datenebenen wurde eine einheitliche Projektion gewählt: UTM WGS 1984, Zone 39 Nord.

Methode

Die Vorhersage des Auftretens von Massenbewegungen basiert auf dem GIS und damit den darin enthaltenen Faktoren und dem subjektiven Expertenwissen (*predictive approach*). Da dieser Modellierung keine kausale deterministische Quantifizierung zugrunde liegt, ist keine zeitliche oder räumliche Aussage zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder zur räumlichen Ausdehnung von Massenbewegungen möglich. Auch eine Risikoaussage, ob Massenbewegungen auftreten werden, innerhalb der ausgewiesenen Gefahrenzonen oder

ob nicht, ist nicht möglich wegen des chaotischen Verhaltens der räumlichen Entstehungsmuster. Der Zeitpunkt der Auslösung erfolgt in einer komplexen Ursache-Wirkungs-Beziehung durch Störung oder allmähliche Verschiebung des quasistationären Gleichgewichts des Landschaftssystems.

Zur Bewertung von Massenbewegungen als Naturgefahr erfolgt in dieser Arbeit der Versuch, ein komplexes Natursystem in einzelne Faktoren zu zerlegen. Orte geschehener Massenbewegungen dienen als Indikatoren für gegenwärtige und künftige Massenbewegungsgefährdung. Aussagen über Wesen und Ursache der Massenbewegungen sind Annahmen und gründen auf Beobachtungen im Untersuchungsgebiet. Meist waren an einer Massenbewegung ein bis zwei bedingende oder auslösende Faktoren im Gelände erkennbar. Eine holistische Untersuchung an jeder einzelnen Massenbewegung wäre zur Klärung des tatsächlichen Sachverhalts der Auslösung nötig. Dies ist jedoch im Rahmen begrenzter Zeit und Mittel in einem Gebiet großer Fläche für ein *hazard mapping* schwierig zu bewerkstelligen. Hingegen erlaubt der vorliegende heuristische Ansatz der *overlay technique* von Faktoren im GIS eine rasche und vergleichsweise wenig aufwändige räumliche Ausweisung von Gefährdungsbereichen, sowie eine Abstufung der relativen Gefährdung durch Gefahrenklassen.

Verschneidung

Mittels der *overlay technique* wurden im GIS Flächenverschneidungen (*polygon overlay*) erzeugt. Flächenverschneidungen entstehen durch die Überlagerung von Informationsebenen, die aus einer Serie von sogenannten Faktorebenen bestehen. Diese ergeben thematische Karten mit Informationen aus einer Attribut-Tabelle, z.B. Polygone der digitalisierten Terrassierungen. Die Informationen können integriert und dann kombiniert werden. Zur Erzeugung einer Gefahrenkarte mit Flächen, die als anfällig für oder betroffen von Massenbewegungen ausgewiesen sind, werden alle Informationen möglichst als Polygone erzeugt. Lineare Vektorenobjekte wie z.B. Straßen und Flüsse werden um die Information ihres Gefährdungsbereichs erweitert, was durch Korridorbildung geschieht. Die erzeugten Korridore oder

buffer können als Polygonobjekte mit allen anderen Polygonen der übrigen Faktorebenen verschnitten werden. Das Ergebnis sind kumulative Überschneidungen, deren einfache mathematische Summation Gefahrenklassenpolygone ergeben. Die Gefahrenklassen repräsentieren damit Übereinstimmungsbereiche von Faktoren, die Massenbewegungen vorbereiten (*predictable areas*), oder aber Bereiche geschehener Massenbewegungen (*susceptible areas*). Gründend auf der Annahme, dass diese Massenbewegungsbereiche nicht zufällig

verteilt sind, enthalten die ausgewiesenen Zonen eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Massenbewegungen als Zonen, die nicht durch einen oder mehrere Faktoren überdeckt werden.

Die Qualität des DGM als Grundlage für Methode und Auswertung

Die Modellierung erfasst die horizontale

Verteilung von Massenbewegungen und deren Faktoren. Durch das Digitale Geländemodell (DGM) wird die vertikale Dimension hinzugewonnen, jedoch ist diese Art von Daten nur limitiert verfügbar. Nicht erfasst werden konnten daher Informationen über die Tiefe der Massenbewegungskörper oder der geologischen Schichten. Daten über die oberflächlich sichtbare Vertikalerstreckung wurden dagegen integriert, folglich also das Relief und die daraus ableitbaren Faktoren Hangneigung und Exposition. Ein wichtiger Faktor für ein exaktes Modell im GIS liegt in der Fehlerminimierung bei der Erstellung des DGM. Die Qualität der Ergebnisse aller abgeleiteten und damit verschnittenen Faktorebenen hängt von der räumlichen Auflösung und der Qualität des DGM ab (*overshots, gaps, pseudonodes, vertices, etc.*, siehe Kapitel 6). Viele Ergebnisse anderer Studien wurden durch ein zu ungenau räumlich auflösendes oder fehlerhaftes DGM in ihrer Aussagefähigkeit geschmälert (z.B. PALLAS et al. 2004). Der in dieser Arbeit vorliegende Ansatz zur methodisch schnelleren und exakteren Erstellung von DGM ermöglichte eine qualitativ optimierte Verwendung der für Massenbewegungen wichtigen dritten Dimension des

Reliefs (siehe Kapitel 8.3). Mit einer räumlichen Genauigkeit von 20 m fügt es sich im Maßstabsverhältnis optimal in die Skala der betrachteten Größenordnungen ein. Das DGM hat als Schnittstelle für die anderen Datenquellen eine wichtige Funktion, da viele andere Datenebenen mit dem DGM verknüpft werden. Die CORONA-Daten besitzen eine räumliche Auflösung von ca. 3 - 5 m, LANDSAT-ETM+ - Daten von 15 m, die horizontale Genauigkeit der benutzten GPS-Handgeräte liegt bei durchschnittlich 7 m und die Topographischen und Geologischen Karten liegen in den Maßstäben 1:50.000, 1:100.000 und 1: 250.000 vor.

9.2 Validierung

Die Validierung dient der Überprüfung der Ergebnisse aus der Faktorenverschnidung. Die Gefahrenklassen können mit den Lokalitäten vorhandener Massenbewegungen verglichen werden. Treten die vorhandenen Massenbewegungen tatsächlich innerhalb der postulierten Gefährdungszonen auf, ist das Modell validiert. Ziel war eine möglichst repräsentative Stichprobenanzahl von Massenbewegungen, die als Kartenebene im GIS mit den vorhandenen Faktorebenen überlagert und verglichen werden kann. Um die Massenbewegungen zu kartieren, war - wie auch in den meisten anderen hier betrachteten Studien (siehe Kapitel 1.2) keine vollständige Geländeaufnahme vor Ort möglich. Im Gelände wurden stichprobenartige Befunde entlang der Passstraße in die Validierungsebene übernommen. Zur Validierung des restlichen Geländes dienten Fernerkundungsdaten sowie Topographische und Geologische Karten als Datenquellen.

Die fernerkundlichen Daten lieferten im Vergleich zu den Karten eine objektivere Beurteilungsgrundlage durch ihre homogene Datenkonsistenz und geringere Vorverarbeitung. Die Karten gaben jedoch auch unerlässliche Informationen z.B. über die Höhenlinien, tektonische Störungen oder Massenbewegungen. Die LANDSAT-Daten waren durch die räumliche Auflösung von 15 m zur Erkennung großskaliger Formen von Massenbewegungen im Hunderter-Meter-Bereich begrenzt einsetzbar. Als vorteilhaft erwies sich die multispektrale Information, welche Massenbewegungen durch das Reflektionsverhalten unru-

higer Oberflächen insbesondere von Rutschungen visuell erkennbar macht. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag nicht auf solch großen Formen, da Massenbewegungen dieser Größenordnung kaum rezent in diesem Gebiet zu erwarten sind und vermutlich Vorzeitformen kühlerer Klimaverhältnisse darstellen. Stattdessen sollte die Vielzahl der beobachteten Hangrutschen, Abrissnischen, Rutschungen und murartigen Massenbewegungen aufgenommen werden, wie sie im Gelände auftreten. Für diese Arbeit sollten Luftbilder als Validierungsgrundlage dienen. Da diese aber auch nach Ablauf von über zwei Jahren nach der Bestellung nicht eintrafen, wurden ersatzweise CORONA-Daten geordert. Diese stellen eine kostengünstige und flächendeckende Datenquelle für weite Bereiche der Erde dar. Die phototechnisch erzeugten Abzüge wurden qualitativ optimiert (siehe Kapitel 5.1) und erlaubten eine gute visuelle Auswertbarkeit des Testgebietes bei einer räumlichen Auflösung von ca. 2 - 5 m. Aus Gründen der spektralen Darstellung in Graustufen und der ungenügenden räumlichen Auflösung konnten jedoch Massenbewegungen kleineren Maßstabs nicht detektiert werden. Die Ursache hierfür lag in der Problematik exhumierter Flächen: ein gängiger Ansatz zur Erkennung von Massenbewegungen anhand von Fernerkundungsdaten ist die Kartierung von Flurschäden, also durch Massenbewegungen freigelegte Flächen, im Gegensatz zu dichtem Vegetationsbestand. Zum einen herrscht im Untersuchungsgebiet jedoch das Bild anthropogen völlig entwaldeter Gebirgsräume vor. Zum anderen ist das Reflektionssignal exhumierter Flächen wenig eindeutig und schwer von anderen hellabstrahlenden Flächen wie z.B. Feldwegen oder Geländeverflachungen zu unterscheiden. Der hohe Nutzen der CORONA-Daten lag in ihrem Alter aus dem Jahr 1970, damit war ein temporaler Vergleich zu 2002 möglich, dem Jahr des Geländeaufenthaltes und in Zeitnähe zu den LANDSAT-Daten. Zudem erlaubten die CORONA-Daten eine Kartierung von Terrassierungen und anderer Landnutzung. Zusätzlich zu Daten über Massenbewegungsereignissen aus den Geologischen Karten 1:250.000 und 1:100.000 konnten die Geländebefunde über Massenbewegungen kleinerer Größenordnung in das Modell eingebunden werden. Hilfreich zur Verortung der Befunde im GIS und in den Fernerkundungsdaten erwies sich die GPS-Punktenahme im Gelände. Die Einbindung von GPS-Punkten, Satellitenbildern und des DGM in das GIS ermöglichte auch eine visuelle Analyse der Massenbewegun-

gen in dreidimensionaler Ansicht. Dieser plastische Effekt ist zur Detektion von Massenbewegungen sehr hilfreich, er wird auch in der Stereoskopie häufig zur Auswertung von Massenbewegungen benutzt.

9.3 Bewertung der Faktoren

Die in vorherigen Kapiteln untersuchten Faktoren, für das Auftreten von Massenbewegungen erwiesen sich in unterschiedlichem Maße geeignet zur Bewertung der Gefährdungsgrade von Massenbewegungen. Beim Faktor Geologie zeigte sich, dass eine Bewertung aus den Daten der Geologischen Karte allein schwierig ist, wenn nicht gleichzeitig der Verwitterungsgrad des Materials angegeben ist. Fehlende Information über die Tiefe der Schichtgrenzen verhinderte eine dreidimensionale Analyse möglicher Verschiebungen von ganzen Gesteinskörpern. Dass dennoch der geologische Untergrund als Ausgangsmaterial für die Bodenbildung und den Zersatzhorizont eine Korrelation mit Massenbewegungsereignissen aufweist, zeigte die Untersuchung kartierter Massenbewegungen im Verhältnis zur jeweils betroffenen Gesteinsschicht. Die Häufung von Massenbewegungen auf Tuffen und anderen leicht verwitterbaren Vulkaniten entsprach auch vergleichbaren Studien (PEZHAM et al. 1998 und siehe Kapitel 8.1). Auffällig ist die relative Uneindeutigkeit der Beziehung der Massenbewegungen zu tektonischen Störungslinien, wobei die Neotektonik durch die Verteilung des Reliefs sicherlich einen gewichtigen Faktor darstellt.

Die im Testgebiet meist wenig mächtige Bodenbedeckung konnte mangels Daten nicht in einer Gefährdungsabstufung berücksichtigt werden, ebensowenig die mächtigen Zersatzhorizonte tertiärer Tiefenverwitterung. Beide sind dennoch ein gewichtiger vorbereitender Faktor und gleichzeitig betroffenes Substrat. Durch die nahezu ubiquitäre tiefgründige Verwitterung liegt es nahe, dass sich die Gefährdungsgrade lithologischer Unterschiede einander angleichen. Zumindest kann dies für oberflächennahe Massenbewegungen mit geringer vertikaler Tiefe angenommen werden. Für die Tektonik gilt eine Einschränkung, die auch auf andere Faktoren zutrifft. Die verfügbaren Informationen stammen aus den Geologischen Karten und sind daher skalenabhängig. Die Stö-

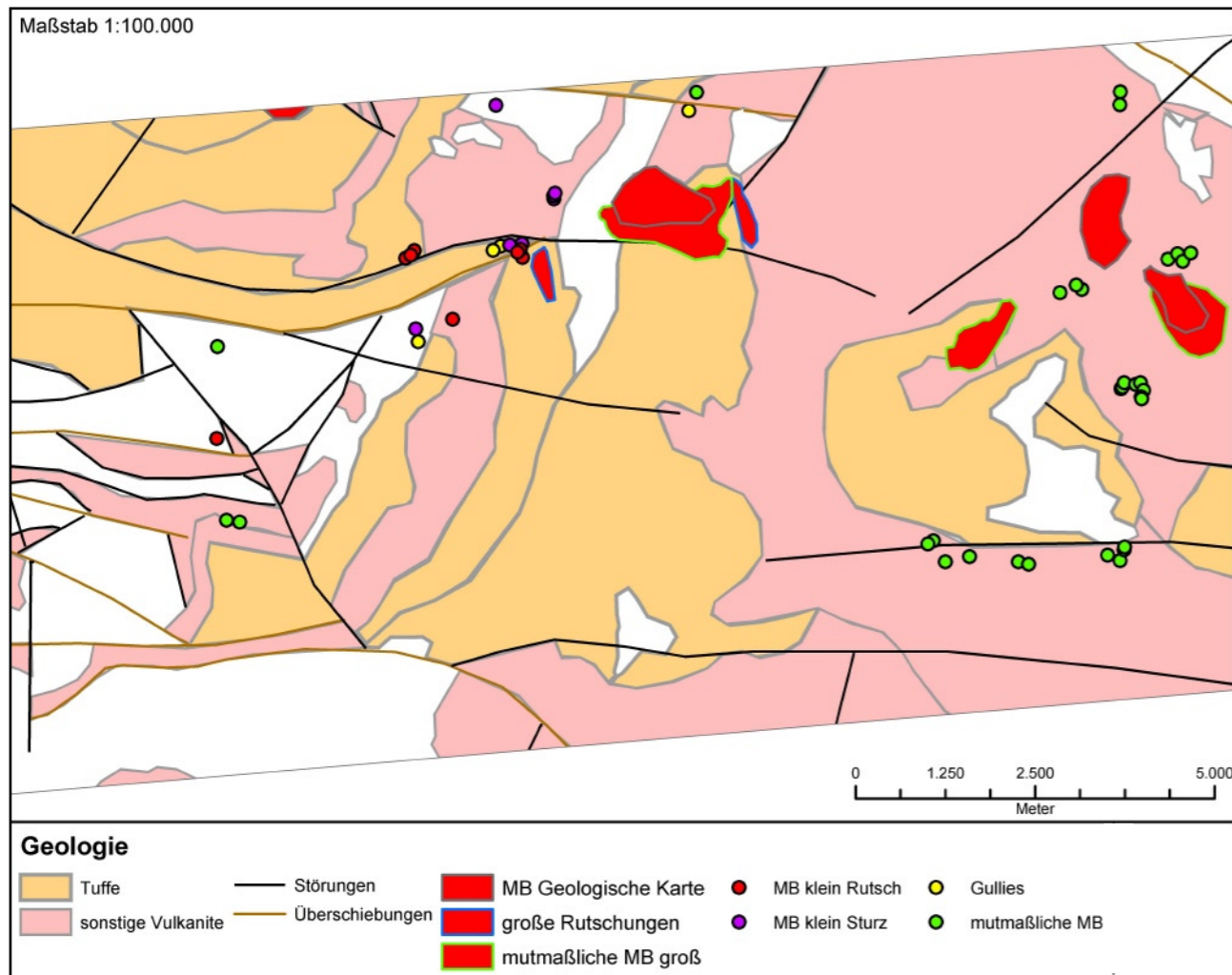


Abb. 126: ▲ Karte 19: das Auftreten von Massenbewegungen innerhalb der geologischen Klassen der Tuffe und der sonstigen Vulkanite

Abb. 127: ►► Karte 20: Hangneigungsklassen und aufgetretene Massenbewegungen

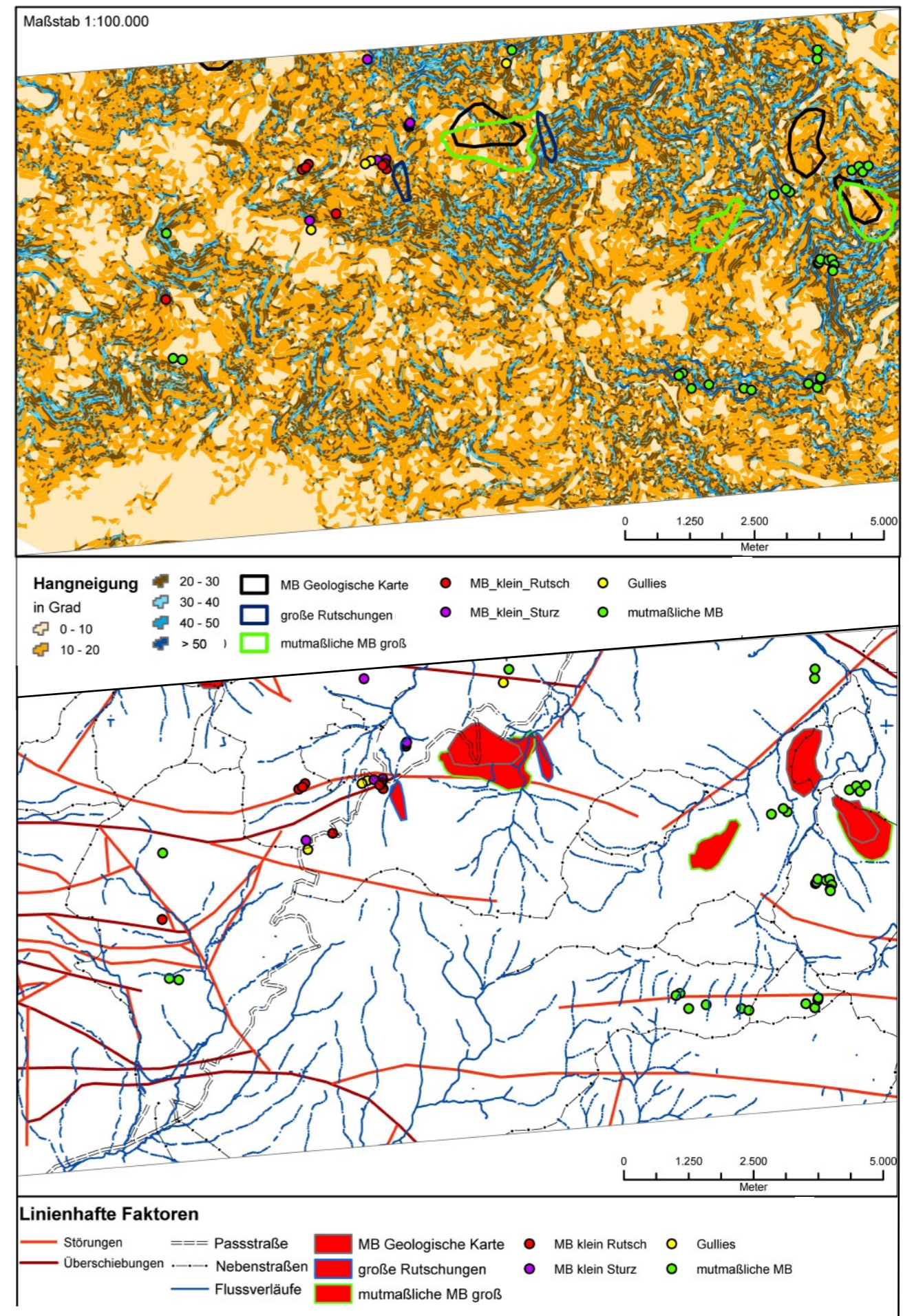
Abb. 128: ►► Karte 21: die Überlagerung von Faktorebenen der Straßen, Flüsse und tektonischen Störungen und die im Testgebiet aufgetretenen Massenbewegungen

rungs- und Überschiebungslinien gehen daher in das Modell ein, Verwerfungen und Klüfte kleineren Maßstabs nicht. Die Anwendung der aus Vergleichen mit der Literatur gewonnenen Einflussbreiten von Flüssen, Straßen oder tektonischen Störungen gestaltete sich als schwierig. Dies lag vor allem an der Verhältnismäßigkeit der jeweils zu betrachtenden Skala. Für das Testgebiet mit einer Fläche von ca. 9 x 17 km sind Korridorbreiten von 0,5 oder 1 km zu breit, um differenzierte lokale Aussagen über Massenbewegungen treffen zu können. Es kann zwar ein Einfluss in dieser Erstreckung vermutet werden, jedoch ergibt sich bei einer Überlagerung aller Faktorebenen dann ein sehr dichtes Kartenbild, in dem im Testgebiet wenige Flächen ohne Bedrohung durch Massenbewegungen verbleiben.

Auf der Karte der Faktorebenen Straßen, Flüsse, tektonische Störungen und Massenbewegungen erkennt man die Einflussnähe dieser Faktoren auf die vorhandenen Massenbewegungen. Bereits ohne Korridore ist die Nähe zu Massenbewegungen und auch die Häufung der Faktoren an den Stellen der Massenbewegungen erkenn-

bar. Die Zonen der Flüsse und Straßen sind die am eindeutigsten gefährdeten Bereiche des Testgebiets. Bei Einbezug der vermuteten Einflusszonen durch die Korridore wird das Ergebnis noch deutlicher (siehe Kapitel 8).

Reliefunterschiede sind ein grundlegender Faktor für das Auftreten von Massenbewegungen. Beim Vergleich mit den fünf großen Massenbewegungen des Testgebietes ergibt sich kein Zusammenhang der großen Rutschungen zu Klassen von steilen Hangneigungen im 20 m DGM. Grund hierfür ist das flachere Relief der gerutschten Masse im Vergleich zu ihrem vormaligen Relief, als der Hang noch intakt war. Die kleineren mutmaßlichen Massenbewegungen, meist Muren, treten dagegen eindeutig gehäuft auf steileren Hängen auf (vgl. auch Abb. 52, S. 54). Diese steilen Hänge bleiben auch nach Murgängen bestehen und stellen damit Bereiche unverändert hoher rezenter Gefährdung dar.



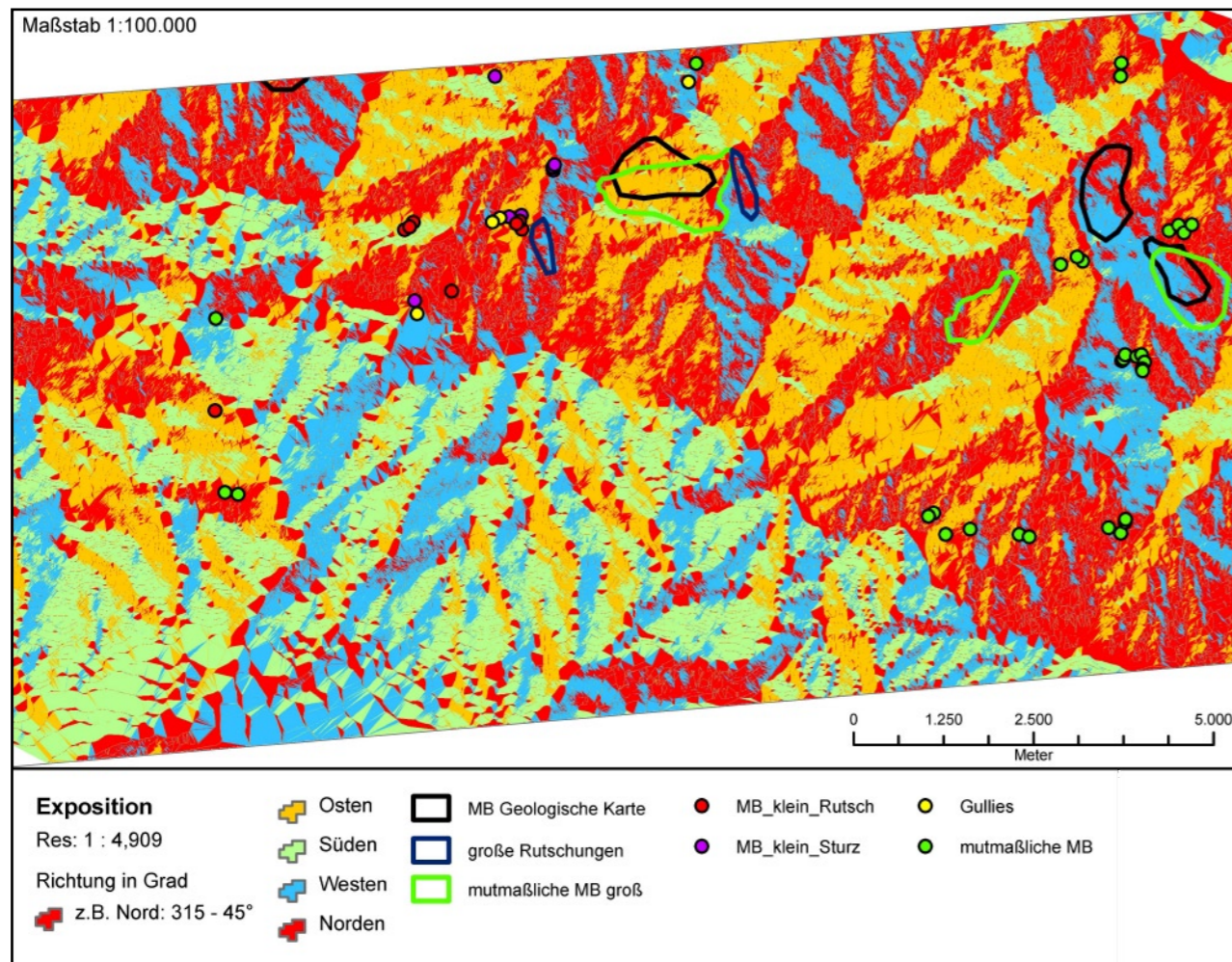


Abb. 129: ▲ Karte: 22 Expositionsrictungen und aufgetretene Massenbewegungen

Beim Faktor Exposition zeigt sich eine Häufung auf west- und nordexponierten Hängen mit nur einer Ausnahme. Dieses Ergebnis stützt die Annahme längerer und intensiverer Durchfeuchtung infolge der i.d.R. aus Nordwest herangeführten feuchten Luftmassen der Westwindströmung. Andererseits könnte hierbei auch der Einfluss der Schattenlage auf längere Frostdauer und Schneebedeckung Auswirkungen zeigen.

Die Windrichtungen Nordwest oder Südost sind in dieser Region vorherrschend. Die Heranführung feuchter Luftmassen erfolgt dabei meist aus Nordwest. Dies unterstützt das Ergebnis, auch wenn in der bestehenden Literatur der Einfluss der Exposition nicht eindeutig bewertet wird. Die Austrocknung der Südhänge beispielsweise kann auch die Anfälligkeit für Massenbewegungen erhöhen (vgl. PEROTTO-BALDIVIEZO et al. 2004).

Die Art der Landnutzung ist neben Flussnähe und Straßenbau der wichtigste zu beobachtende Faktor für Massenbewegungen vor im Untersuchungsgebiet. Der Verlust an Bodenbedeckung und die damit einhergehende Degradation mit Abnahme von Bodenmächtigkeit, Nährstoffgehalt

und Wasserrückhaltekapazität führt zu schnellerer Wassersättigung und damit zu höherer Gefährdung gegenüber gravitativer Erosion. Die Terrassierungen sind die augenfälligsten Veränderungen der Bodenbedeckung und der Hydrologie. Die Bereiche von Terrassierungen überdecken sich zwar mit den aufgetretenen Massenbewegungen, jedoch ist hier die Koinzidenz der Überdeckung anders zu bewerten. Landnutzung ist in diesem Falle eine Folgenutzung auf den Massenbewegungskörpern durch die für den Anbau verbesserte Geländebeschaffenheit (siehe Kapitel 8.6). Dennoch kann ein erheblicher Einfluss der Landnutzung auf die Auslösung von Massenbewegungen kleinerer Größe vermutet werden. Landnutzung anderer Art, wie z.B. Obst- oder Reisanbau, konnte ebenfalls anhand der CORONA-Daten kartiert werden. Diese Objektklasse weist keine Übereinstimmung mit Massenbewegungen auf. Das erklärt sich bei diesem Anbautyp aus dem relativ flachen Relief in Flussnähe; dort sind Massenbewegungen weniger zu erwarten.

Die Veränderungsrate aller Faktoren variiert von gering bis mittelmäßig, d.h. einige ändern sich über lange Zeit nicht, wie z.B. Geologie, andere

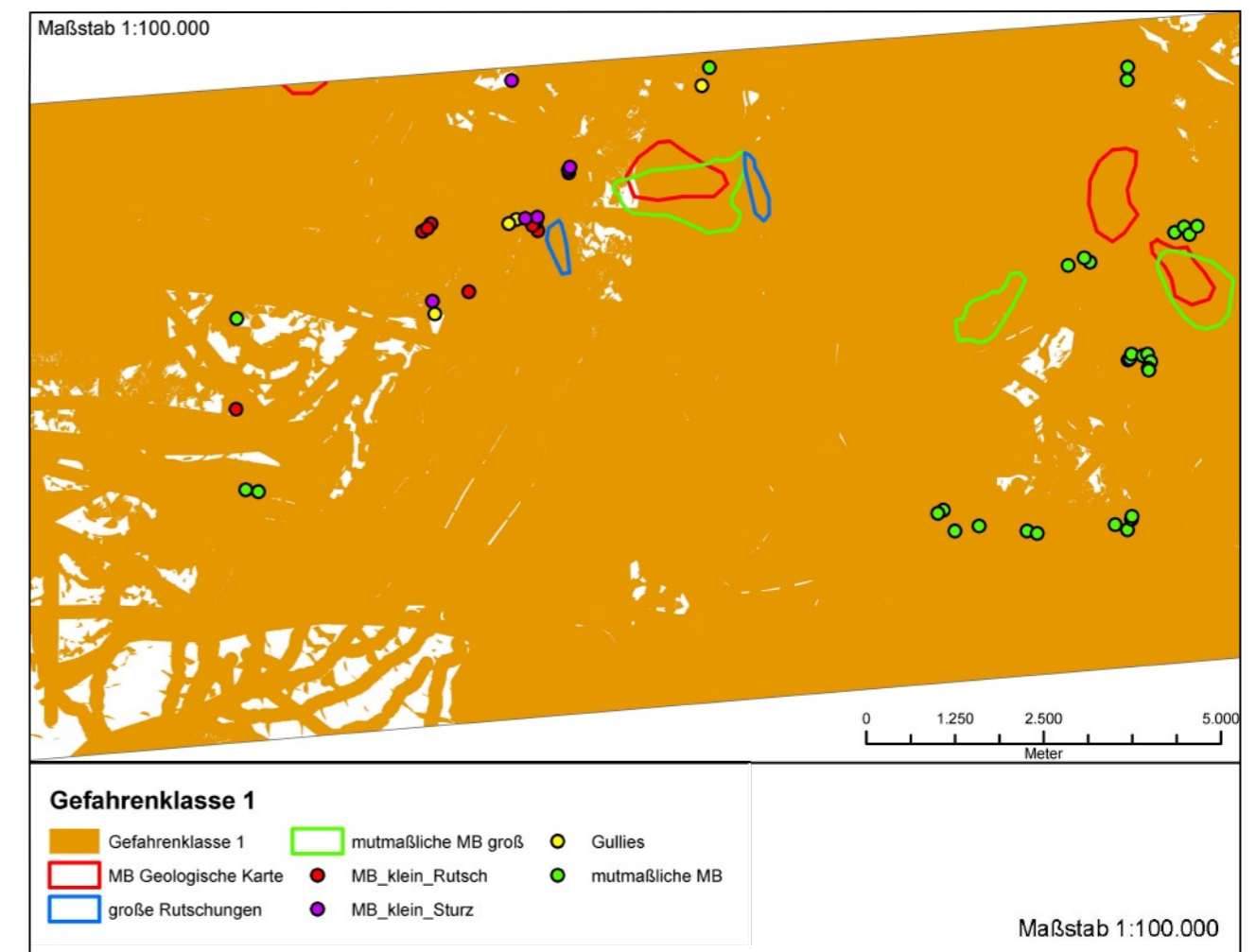
ändern sich relativ rasch, wie z.B. Straßenbau oder Landnutzung. Deswegen sind neben aktuellen auch Daten aus der Vergangenheit wichtig, da z.B. viele Terrassierungen aus den 1970er Jahren aufgegeben wurden und nach wenigen Jahrzehnten im Satellitenbild nicht mehr zu erkennen sein werden.

9.4 Gefahrenklassen

Entsprechend der vorgestellten Methodik wurden Gefahrenklassenpolygone erzeugt. Die Polygone bestehen aus Bereichen, die von Massenbewegung bedroht sind. Sie enthalten Informationen über die Gefährungsgrade jener Flächen gegenüber Massenbewegungen. Die Gefährdung erschließt sich aus den Faktoren, von denen angenommen wird, dass sie Massenbewegung auslösen oder zumindest fördern, so wie sie in Kapitel 8

analysiert wurden. Die Einschätzung der Gefährdung beruht dabei einerseits auf a priori-Vermutungen über Faktoren, wie sie in der Literatur bewertet werden, und andererseits auf der Überprüfung mit den Stichproben der im Testgebiet tatsächlich aufgetretenen Massenbewegungen. Die Gefährungsgrade ergeben sich stufenweise je nachdem, wie viele Faktoren an einer Stelle im Testgebiet gleichzeitig auftreten. Dazu wurden alle Kombinationsmöglichkeiten der Faktoren berechnet, als Polygone dargestellt und schließlich miteinander verschnitten. Die einzelnen Faktoren wurden einfach numerisch gewichtet, d.h. aus qualitativen Faktoren wie etwa der Geologie wurde zunächst eine Klasse an Polygonen erzeugt, die Flächeninformationen über das Vorhandensein von Geologie repräsentieren. Die Gefahrenklassenpolygone stellen also einen einfachen Fall von 0 oder 1 dar, d.h. „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“ an der jeweiligen Stelle. Ausmaß und Ausdehnung der Fläche der Polygone wurden in Kapitel 8 bestimmt. Die qualitative Information von z.B. Geologie wurde Rasterinformationen von Hangneigungen oder Exposition derart gleichge-

Abb. 130: ▼ Karte 23: Gefahrenklasse 1: geringe Gefährdung. Alle ockerfarbenen Flächen enthalten mindestens einen gefährdenden Faktor



	Gefahrenklasse 1	Abkürzung	Gefahrenklasse 2	Gefahrenklasse 3
1	Geologie	Geol	Geol_Strg	Geol_Strg_Hang
2	tektonische Störungen	Strg	Geol_Hang	Geol_Strg_Exp
3	Hangneigung	Hang	Geol_Exp	Geol_Strg_Flue
4	Exposition	Exp	Geol_Flue	Geol_Strg_Str
5	Flüsse	Flue	Geol_Str	Geol_Hang_Exp
6	Straßen	Str	Strg_Hang	Geol_Hang_Flue
7			Strg_Exp	Geol_Hang_Str
8			Strg_Flue	Geol_Exp_Flue
9			Strg_Str	Geol_Exp_Str
10			Hang_Exp	Geol_Flue_Str
11			Hang_Flue	Strg_Hang_Exp
12			Hang_Str	Strg_Hang_Str
13			Exp_Flue	Strg_Hang_Str
14			Exp_Str	Strg_Exp_Flue
15			Flue_Str	Strg_Exp_Str
16				Strg_Flue_Str
17				Hang_Exp_Flue
18				Hang_Exp_Str
19				Hang_Flue_Str
20				Exp_Flue_Str

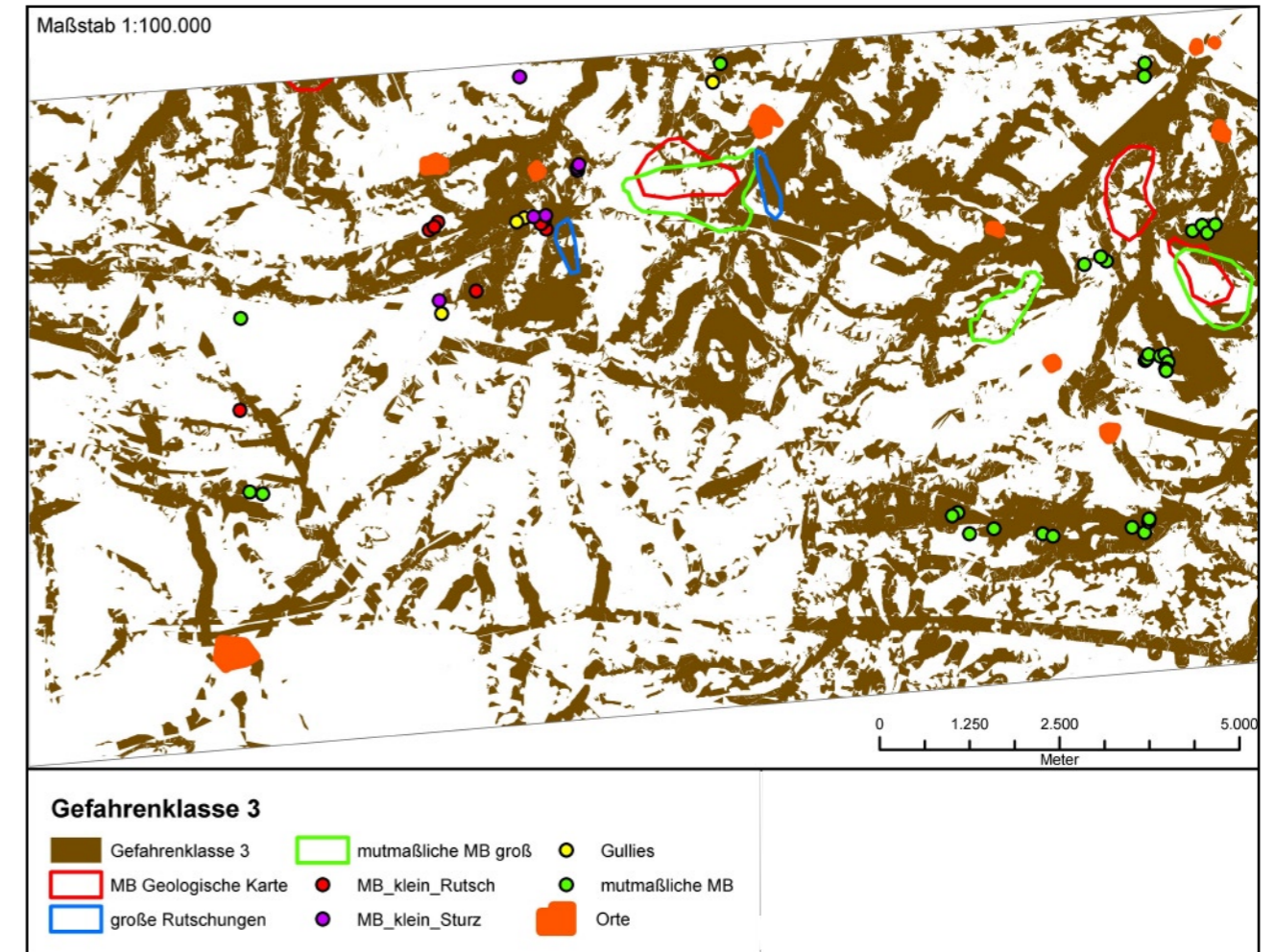
Abb. 131: ▲ Tabelle 2: Bildung der Gefahrenklassentupel. Jede Gefahrenklasse besteht aus allen möglichen Kombinationen von n-Faktoren (hier 1 - 3 Faktoren)

stellt, dass alle Faktoren mit 1 numerisch gewichtet wurden. Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten der Faktorenpaare (Tupel) wurde nach der Formel des Binomialkoeffizienten erstellt:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! \times k!}$$

Die dabei möglichen Kombinationsmöglichkeiten sind in Abb. 131, Tabelle 2 aufgelistet. Eine Gefahrenklasse enthält alle Polygone aller möglichen Kombinationstupel. Gefahrenklasse 1 enthält alle Zonen im Testgebiet, an denen mindestens ein gefährdender Faktor für Massenbewegungen auftritt, Gefahrenklasse 2 enthält alle Zonen, an denen mindestens zwei Faktoren gleichzeitig auftreten und Gefahrenklasse 3 alle Zonen, an denen mindesten drei Faktoren eintreffen.

Von Gefahrenklasse 1 ist fast das gesamte Testgebiet betroffen, lediglich im Südwesten bleibt ein kleiner Bereich 'ungefährdet'. Dort beginnt der flache Reliefabfall in das von Schwemmfächern überdeckte südliche Gebirgsvorland. Die anderen weißen Stellen auf der Karte sind ebenfalls Bereiche geringer Reliefunterschiede. An allen diesen



Lokalitäten sind die Faktoren Hangneigung und Exposition, sowie teilweise der Faktor der tektonischen Störungen, vernachlässigbar. Auch die Faktoren Hydrologie und anthropogene Nutzung führen dort aufgrund des flachen Reliefs weniger zu Massenbewegungsformen als zu Landdegradationsformen. Alle aufgenommenen Massenbewegungen liegen wenigstens teilweise bereits innerhalb dieser ausgewiesenen Zone der Gefahrenklasse 1. Da ein einzelner Faktor zur Auslösung von Massenbewegungen jedoch nur bedingt ausreicht (siehe Kapitel 8), gilt die von Gefahrenklasse 1 betroffene Region als gering gefährdet.

Gefahrenklasse 2 weist bereits größere weiße, d.h. nicht betroffene Flächen auf. Dennoch ist ein Großteil des Testgebietes mittlerer Gefährdung gegenüber Massenbewegungen ausgesetzt. Die kartierten Massenbewegungen liegen mindestens zu einem Teil innerhalb dieser Gefahrenklasse. Dies bestätigt die a priori Vermutung über die Gefährdung, die von den gegebenen Faktoren ausgeht. Die Gefahrenklasse 2 zeigt eine Konzentration der gefährdeten Zonen auf linienhafte Elemente, z.B. auf die der Flussverläufe. Große Rutschungen überdecken auch Bereiche weißer Signa-

tur, dies liegt an der unregelmäßigen Oberfläche dieser Rutschungskörper, welche auch Geländeverflachungen enthalten.

Gefahrenklasse 3 unterstreicht noch stärker die Bedeutung der linienhaften Faktoren - Flussverlauf, Straßen und tektonische Störungen - als Voraussetzung für das Auftreten von Massenbewegungen. Diese Bedeutung erscheint auch gerechtfertigt, da diese Faktoren durch Widerlagerentfernung und ruckartige Erschütterungen auch tatsächliche Auslöser für Massenbewegungen sein können. Die anderen Faktoren - Geologie, Hangneigung und Exposition - sind hingegen eher vorbereitende Faktoren als unmittelbar auslösende. Die kartierten Massenbewegungen befinden sich bis auf wenige Ausnahmen innerhalb der prognostizierten Gefährdungszone der Gefahrenklasse 3. Damit kann die Validierung die vorgestellte Methodik untermauern und die vorliegende Analyse für eine Risikobewertung des Testgebietes empfehlen.

Abb. 133: ▲ Karte 25: Gefahrenklasse 3: hohe Gefährdung. Die braunen Flächen enthalten alle Stellen, an denen mindestens drei Faktoren gleichzeitig auftreten.

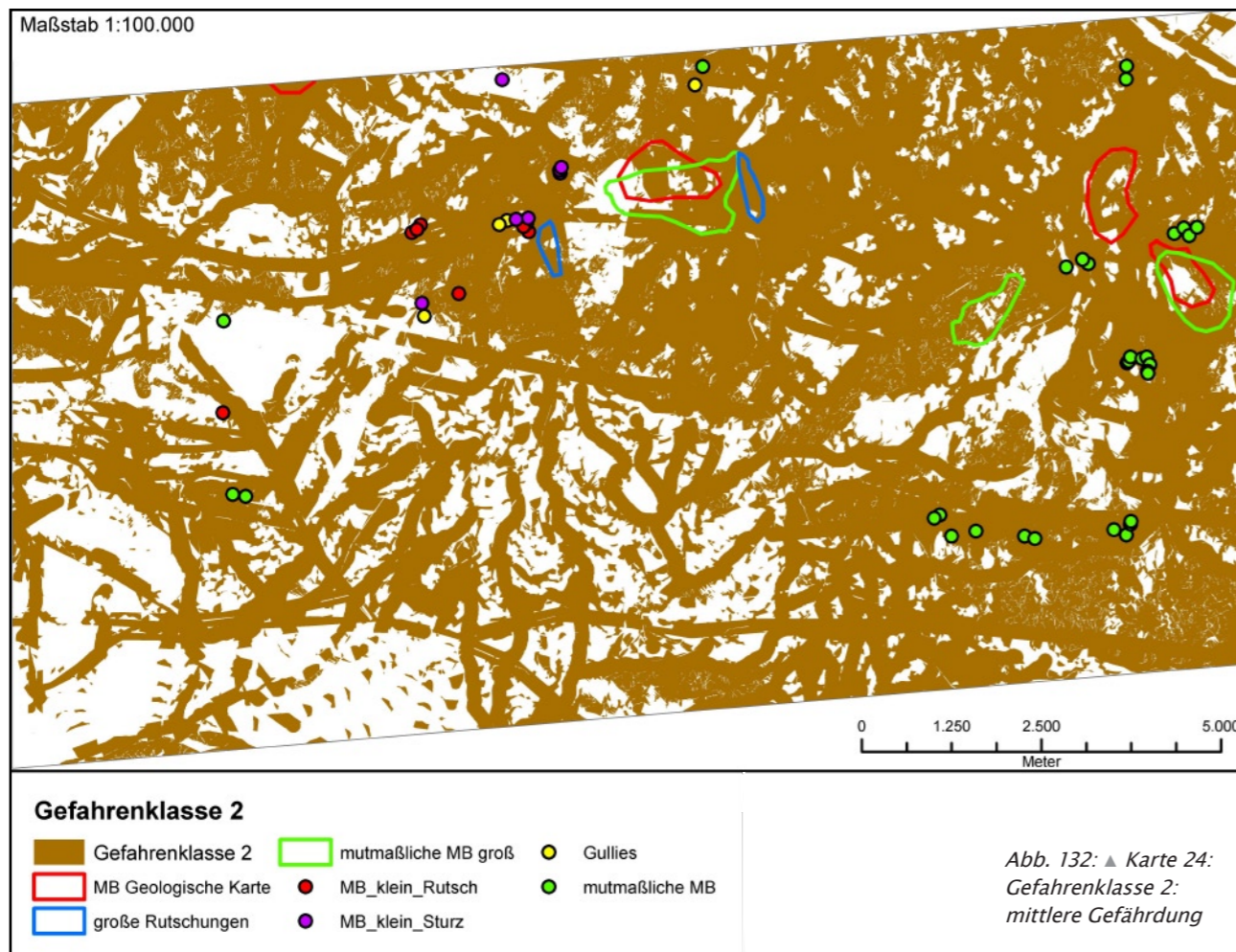


Abb. 132: ▲ Karte 24: Gefahrenklasse 2: mittlere Gefährdung

Hinsichtlich einer Risikoanalyse ist die Bedrohung von Ortschaften durch Massenbewegungen von höchstem Interesse. Sie liegen im direkten Umfeld von den aufgenommenen Massenbewegungen und teilweise sogar innerhalb von Gefahrenzone 3.

Eine Ausweisung von weiteren Gefahrenklassen wäre möglich, und zwar durch die gleichzeitige Kombination von vier, fünf, oder sechs Faktoren. Jedoch verblieben zunehmend fragmentierte Gefahrenklassenpolygone, welche dem Maßstab der betrachteten Datenquellen nicht

mehr ausreichend Rechnung trügen. Zur Gefahr der Akkumulation von Ungenauigkeiten durch unterschiedliche Maßstäbe käme noch der chaotische Charakter des Auftretens von Massenbewegungen hinzu. Damit würden in sechs Klassen differenzierte Gefährungsgrade eine nicht reale Genauigkeit der Risikowahrscheinlichkeit suggerieren. Daher erscheint die Ausweisung von Flächen nach qualitativer, subjektiver a priori Bewertung in die Gefahrenklassen 1 bis 3 am sinnvollsten: von 'geringe Gefährdung' über 'mittlere Gefährdung' bis 'hohe Gefährdung'.

9.5 Ergebnis der Arbeit

Als Ergebnis der Arbeit kann konstatiert werden, dass Massenbewegungen im betrachteten Testgebiet eine rezente Gefährdung des Zustandes der Landoberfläche darstellen. Fast das gesamte Testgebiet ist von Massenbewegungen unterschiedlichen Maßstabs bedroht. Die rezente Aktualität der Gefährdung steht durch die Beobachtungen im Gelände für Massenbewegungen kleineren Maßstabs fest. Die großen Rutschungsmassen wie auch die mittelgroßen Muren sind im Rahmen dieser Arbeit bezüglich ihres Alters und der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zeitlich nicht fassbar gewesen. Ereignisse dieser Größenordnung sind jedoch ohnehin schwierig vorhersagbar; für die großen Rutschungen hat sicherlich das Paläoklima der letzten quartären Kaltzeiten eine wichtige Rolle gespielt. Der Verlust des Materialzusammenhaltes durch Permafrost im Zuge des Holozän hat vermutlich eine ähnlich wichtige Rolle wie in den Alpen gespielt. Das Klima als direkte Einflussgröße konnte aus Mangel an Daten nicht in dieser Untersuchung berücksichtigt werden, jedoch war die paläoklimatische Beeinflussung der Morphologie durch die intensive tertiäre Saprolithisierung eine wichtige Komponente für die Stabilität der Hänge gegenüber Massenbewegungen. Die in den Gefahrenklassen enthaltenen Faktoren stellen das rezente Massenbewegungspotential dar. Betrachtet man dieses Potential hinsichtlich des Begriffes »*natural hazard*«, so ist zwar eine Gefährdung der wenigen kleinen Bergdörfer gegeben. Jedoch sind dort die Gefahren von Massenbewegungen weniger unmittelbar als in anderen Regionen der Erde, welche durch klimatische Extremereignisse bedroht werden. Zeitlich

wie räumlich haben die Massenbewegungen im Testgebiet auch Landdegradationscharakter. Der allmähliche Verlust von nutzbarer Landoberfläche geschieht durch kleinere Hangrutschen, Muren und Rutschungen, sowie durch Massenverlagerungen, und damit dem allmählichen Abtrag der Bodendecke. Steinschlag und Bergsturz beschränken sich auf kleinere Gebiete hoher Steilheit und bedrohen somit nur Straßen unmittelbar. Allerdings wurden im Testgebiet Siedlungen und Landnutzung auch im Gefährdungsbereich von Rutschungen und Muren angelegt.

Die engmaschige Verzahnung von genutzten und gefährdeten Zonen ist im Testgebiet prägnant, z.B. in Form der Landnutzung auf alten Rutschungskörpern. Die Stabilitätsfrage alter Rutschungskörper ist als kritisch zu bewerten, da auf diesen Rutschungsmassen deutliche Folgeereignisse von Massenbewegungserscheinungen kleineren Ausmaßes zu erkennen sind. Quellaustritte und Krummwuchs sind weitere Indikatoren fortschreitender allmählicher Umformung. Werden solche Rutschungskörper zudem am Hangfuß durch Straßenbau oder Wasserverläufe unterbrochen, kann von einer rezenten Gefährdung ausgegangen werden (siehe Photo rechts).

Da insbesondere Rutschungsmassen durch ihr heterogenes Materialgefüge und ihr unausgeglichenes Längsprofil eine instabile Ablagerungsform darstellen, sind sie anfällig für eine Reaktivierung des Rutschungsprozesses bzw. für weitere kleinere Massenbewegungsereignisse. Es sind überall auf dem Rutschungshang auf dem rechten Photo kleinere Abtragungs- und Massenbewegungsformen zu erkennen. Da am Fuße dieser Massenbewegung gleich zwei den Hang destabi-



Abb. 134: ◀ Photo 04250021, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Straßenanschnitt und Wasserleitung (roter Pfeil) am Fuß eines großen Rutschungskörpers

lisierende Hangeingriffe in Form von Straßenanschnitt und Wasserleitung vorliegen, ist dieser Rutschungshang als besonders gefährdet einzustufen.

Technische Gegenmaßnahmen wären im Testgebiet allenfalls für die Straßensicherung sinnvoll. Durch die Terrassierung wurden viele Hänge bereits bezüglich der Hydrologie und im Bodengefüge derart umgestaltet, dass sie durch Nutzungsaufgabe am besten stabilisiert werden könnten. Wiederaufforstung, wo möglich, und ein geringerer bzw. alternativer Viehbesatz gelten in diesem Zusammenhang als empfehlenswerte Maßnahmen.

Das Testgebiet erbrachte als *case study* eine Analyse der Stabilität des Naturraumes, welche auf andere Regionen übertragbar sein sollte. Die Bedrohung dieser Stabilität konnte durch den hier vorgestellten Ansatz der Faktorenüberlagerungsanalyse (*factor overlay technique*) hervorragend dargelegt werden. Die Validierung der Methode anhand der tatsächlich aufgetretenen Massenbewegungen

untermauerte die Anwendbarkeit der Methodik. Die Ergebnisse der Analyse wie auch die Methodik lassen eine Übertragbarkeit auf angrenzende und andere Regionen zu, welche ähnliche Naturausstattungsmerkmale besitzen. Interessant könnten beispielsweise die Ergebnisse der Gefährdungseinschätzung für die angrenzenden Regionen des gesamten und erweiterten Untersuchungsgebietes dieser Arbeit sein. Neubaugebiete auf den Hügeln mit Sicht auf Teheran und Karaj weisen Gefährdungen durch Massenbewegungen auf (siehe Photos und Text in Kapitel 4.2). Ebenfalls betroffen vom potentiellen Risiko sind die vielen Naherholungsziele und Wochenendhäuser, welche die Bewohner der angrenzenden Großstädte nutzen. Auch die Millionenstädte Karaj und Teheran erstrecken sich inzwischen in Bereiche steilen Reliefs der südlichen Abdachung des Elburs. Mit der erhöhten Siedlungsdichte steigt bei der vorhandenen hohen Gefahr durch Erdbeben auch das Risiko von Sekundärgefahren wie Massenbewegungen.

10. Zusammenfassung der Arbeit

Massenbewegungen (in englischer Literatur *landslides*, in französischer Literatur *glissements de terre*) sind das Symptom von Hanginstabilitäten in einem Naturraum. Die Wahl des Überbegriffs Massenbewegungen und die Untergliederung der einzelnen Stadien des Prozessablaufs wurden im Rahmen eines pragmatischen Ansatzes dieser Arbeit neu festgelegt.

Im Untersuchungsgebiet im Elbursgebirge im Norden des Iran stellen Massenbewegungen ein Phänomen dar, welches die Kulturlandschaft bedroht, aber auch durch sie selbst bedingt ist. In dieser Arbeit wurden Abhängigkeitsbeziehungen zwischen menschlichem Eingriff und natürlichem Stabilitätspotential untersucht. In einem heuristischen Ansatz wurden Faktoren analysiert, welche Massenbewegungen bedingen oder auslösen. Faktoren wie geologischer Untergrund, Bodenaufgabe, Hangneigung, Exposition, Hydrologie, Vegetationsbedeckung oder Straßenbau wirken in unterschiedlicher Weise auf die Verursachung von Massenbewegungen ein. Die Analyse der Tragweite und Relevanz dieser Faktoren erfolgte mittels einer Faktorenüberlagerung in einem Geographischen Informationssystem (GIS). Das GIS bildete die Schnittstelle für Fernerkundungsdaten, Kartenmaterial, Geländeaufnahme und das

Digitale Geländemodell (DGM, bzw. DEM). Neben Photos, Beschreibungen, GPS-Punkten und Bodenproben aus der Geländeaufnahme im Iran wurden CORONA- und LANDSAT-ETM+ - Satellitendaten sowie Klimaaufzeichnungen, Topographische und Geologische Karten auf ihre Aussagekraft hin analysiert. Durch Verschneidung der Datenebenen konnten Gefährdungszonen hinsichtlich Massenbewegungen ausgewiesen werden. Die Ergebnisse wurden mit den vorhandenen Befunden über aufgetretene Massenbewegungen überprüft. Die Übereinstimmung der Gefährdungszonen mit der Verteilung vorgefundener Massenbewegungsformen bestätigte die Richtigkeit des methodischen Vorgehens.

Bei der Auswahl und Bearbeitung von Daten und Methodik lagen die Schwerpunkte im Anwendungsbezug und in der Qualitätssicherung. Zur Erstellung des Digitalen Geländemodells wurde ein eigener Ansatz zur Extraktion von Höhenlinien aus Topographischen Karten verfolgt. Das Ergebnis der Arbeit ist ein pragmatischer, kostengünstiger und übertragbarer Ansatz zur Bewertung des Gefährdungspotentials von Massenbewegungen.

technique in a Geographical Information System (GIS). Under the GIS environment, CORONA and LANDSAT-ETM+ satellite images, climatic data, topographical and geological maps, ground truth data and the digital elevation model (DEM) could be integrated. This resulted in a hazard zonation map of mass movements. The hazard zonation map was cross referenced with a sample of real occurrences of mass movements. This step served to validate the derived model for mass movement hazard.

Data and methods were selected and tested on the basis of quality and application ability. Extraction of contour lines from topographical maps was used as a faster and better way of creating the digital elevation model compared to digitalization. All methodical ways resulted into a pragmatic cost-effective and transferable approach of evaluating the hazard of mass movements.

Abstract

Mass movements (in English literature often referred to as landslides, in French literature as *glissements de terre*) are symptoms of instability in natural environments. Within the scope of a pragmatic approach the key word 'mass movements' and its processual steps were newly defined.

Mass movements are a phenomenon in the study area in Alborz mountains, Iran. They threaten human environments while at the same time they display results of human activity. The focus of this paper is directed on interdependences between human impact and areas that are prone to slope instability. In a heuristic approach factors that influence or trigger mass movements were analysed. These determining factors include the geology, soil cover, slope, aspect, hydrology, vegetation cover and roads. Analysis of intensity, extent and relevance was compiled by factor overlay

Resumé

Les glissements de terre sont le symptôme d'instabilités dans un espace naturel. Le choix du terme général des glissements de terre et sa division en différents états de déroulement du processus ont été redéfinis dans le cadre d'une hypothèse pragmatique.

Dans la zone d'exploration de la montagne de l'Elbourz dans le Nord de l'Iran, les glissements de terre représentent un phénomène menaçant la campagne cultivée, mais trouvant également son origine dans cette campagne. Dans ce mémoire, les relations entre les interventions humaines et le potentiel de stabilité naturel par rapport à l'espace naturel ont été examinées. Certains facteurs, capables de favoriser ou de déclencher des glissements de terre, ont été analysés dans une hypothèse heuristique. Les facteurs en question, p. ex. le sol géologique, les agrégats, l'inclinaison, l'exposition, l'hydrologie, la végétation, les constructions de génie civil ou l'exploitation agricole, agissent de différentes façons sur la provocation des glissements de terre. L'analyse de la portée et de l'importance des effets de ces facteurs a été examinée par un chevauchement des facteurs dans un système d'information géographique (GIS). Le GIS sert d'interface pour les données d'exploration à distance, les cartes géographiques, les levées topographiques des terrains et les modèles numériques des terrains (DEM respectivement DTM). En dehors des photographies, descriptions,

points GPS et prélèvements de sol issus des levées topographiques en Iran, les examens portaient également sur les constatations non équivoques des données des satellites CORONA et LANDSAT-ETM+, des enregistrements climatiques et topographiques ainsi que des cartes géographiques. Les recoupages des niveaux des données permirent de constater des zones soumises à un danger de glissements de terre. Les résultats ont été contrôlés à l'aide des faits constatés dans le cadre de glissements de terre, qui ont effectivement eu lieu. La concordance des zones à risques avec les phénomènes de glissements de terre effectivement survenus ont eu pour effet de confirmer l'exactitude de la manière du procédé méthodique.

Une importance particulière a été apportée au rapport avec l'application et à l'assurance qualité en matière de choix des informations et méthodes. Une propre hypothèse pour l'extraction des courbes de niveaux des cartes topographiques a été composée pour l'élaboration du modèle altimétrique numérique. Ainsi, tout ceci a donné naissance à une hypothèse pragmatique et reproductible d'un prix plus avantageux pour l'appréciation des dangers provenant de glissements de terre.

Ausblick

Die Erkenntnisse dieser Arbeit sind hervorragend übertragbar auf jede andere Region der Erde, in der Massenbewegungen auftreten. Im Untersuchungsgebiet wäre eine Untersuchung der Gefährdung von Städten wie Karaj oder Teheran sicherlich sinnvoll, um das Risiko von Verlust an Menschenleben und materiellen Gütern abzuschätzen. Folgende Bilder werfen nur Schlaglichter auf einige Beispiele, an denen der Zusammenhang von Siedlungsplanung und Hangstabilität ersichtlich wird. Die in dieser Arbeit erstellte anwendungsbezogene

methodische Vorgehensweise der Gefährdungsabschätzung könnte auch für diese Städte genutzt werden. Insbesondere Großstädte oder *megacities* geraten immer stärker in den Blickwinkel von *natural hazard mitigation* (PETERSON 2002, SMYTH & ROYLE 2000). Eine Fortführung dieser Arbeit könnte sowohl in der regionalen Übertragung oder Weiterentwicklung der methodischen Werkzeuge münden, oder in der Anwendung für die Siedlungs- und Infrastrukturplanung hinsichtlich der Erstellung von Maßnahmenkatalogen oder Risikomanagement-Strategien.



Abb. 135: Photo i19-02-20: Verlust von Siedlungsfläche in Karaj mit unbekannter Ursache



Abb. 136: Photo i18-02-06: Steil stehende Gesteinsschichten mit Neigung in Richtung eines Neubaus in Karaj



Abb. 137: Photo i8-02-21: Neubaugebiet Dobrar Village in Höhenlage mit Blick auf Teheran



Abb. 138: Die Ausdehnung Teherans im Jahr 2000, LANDSAT ETM+, Kanalkombination 3-2-1. Neben der Erdbebengefahr sind auch Wasserversorgung und Bedrohung von Infrastruktur eine Herausforderung für zukünftige Stadtplanungen und physisch geographische Untersuchungen.

Dank



Photo: Ulf Siefker 2002

Mein herzlicher Dank geht in erster Linie an Ulf Siefker und Herrn Prof. Detlef Busche, dass ich die hervorragende Chance erhielt, am DRYSATMAP Projekt im Iran (BMBF-Vorhaben 50EE0042) und in der nachfolgenden Zeit am Lehrstuhl I des Geographischen Instituts der Universität Würzburg teilzunehmen. In der Zeit im Gelände und auch in der Aufarbeitung danach konnte ich unglaublich viel lernen. Ich danke für die Geduld bei allen Fragen und für die unablässige Unterstützung. Besonders begeistert hat mich, dass auch als studentische Hilfskraft meine Interessen und Fragen immer ein offenes Ohr fanden.

Im Iran wurde ich ganz großartig unterstützt und äußerst gastfreundlich behandelt. Viele Behördengänge, Bewegungsmöglichkeiten im Gelände, Auskünfte und Einsichten in das Land wären mir wohl verwehrt geblieben, ohne die Hilfe von, Sahab Hedjazi, Reza Sarvati, Amir Shejda'i und auch Herrn Reza Echtezazi und seinen Kollegen in Yazd. Der Faculty of Natural Resources in Karaj, insbesondere Herrn Prof. H. Ahmadi danke ich für viele Daten, die Unterbringung und die Ermöglichung der Arbeit im Gelände.

Weiterhin danke ich denjenigen, die ich methodisch in der Zeit am Institut mit Fragen löchern konnte. Ohne den zeitaufwändigen Lernprozess, wie und mit welcher Software die Daten zu verarbeiten sind, hätte diese Arbeit nicht entstehen können. Für die hervorragende und nicht selbst-

verständliche Unterstützung am Lehrstuhl für Fernerkundung und auch für wertvolle Kritik danke ich ganz herzlich Martin Bachmann, Christopher Conrad und ganz besonders Thilo Wehrmann.

Es waren noch viele weitere Personen am Gelingen der Arbeit beteiligt, an vermeintlich kleinen Bausteinen. Damit möchte ich mich z.B. bei Herrn Ruf von Rechenzentrum der Universität Würzburg für das Einscannen der Karten bedanken und bei Sascha König für die einwöchige Zeit im Labor, die er sich für mich nahm. Ich danke Elsbeth Fekete, dass ich das Photolabor des Physikalischen Instituts nutzen konnte, Florian Gerstner für die Digitalisierung der tektonischen Störungen und Erdbeben und bei Dieter Wucher für die Kontaktabzüge. Bei Herrn Prof. Roland Baumhauer möchte ich mich für die Nutzung der Räumlichkeiten im Institut herzlich bedanken.

Ich danke auch allen, die sich die Zeit herausnahmen, mich durch Korrektur, Ratschläge und produktive Kritik meiner Arbeit weiterzubringen. Da man den Wald vor lauter Bäumen oft nicht mehr sieht, waren diese Vorschläge enorm wichtig für mich. Ich bedanke mich hierfür ganz herzlich bei Sonja Habisreitinger-Fekete, Tamas Fekete, Martin Hipondoka, Annegret Kranz, Bernhard Rudloff, Dorothee Schill, Franka Schwellnus, Ulf Siefker, Frau Prof. Barbara Sponholz, Yvonne Walz und John Wedlick.

*"Forty-two", said Deep-Thought, with infinite majesty and calm.
Douglas Noel Adams 1979*

Verwendete Abkürzungen

bit	binary digit	Mio.	Millionen
BP	Before Present	mm	Millimeter
Bsp.	Beispiel	mm/h	Millimeter pro Stunde
bzw.	beziehungsweise	MB	Massenbewegungen
°C	Grad Celsius	N	Norden
ca.	circa	NN	(Meereshöhe über) Normal Null
cm	Centimeter	PC	Personal Computer
CORONA	Codewort, keine Abkürzung	Pixel	Picture Element
DEM	Digital Elevation Model	p.	page
DGM	Digitales Geländemodell	pH	potentia (oder pondus) hydrogenii
d.h.	das heißt	pp.	pages
DHM	Digitales Höhenmodell	Prof.	Professor
DIN	Deutsche Industrie Norm	RGB	Rot Grün Blau
DOM	Digitales Oberflächemodell	RMS	Root Mean Square (error)
dpi	dots per inch	S	Süden
Dr.	Doktor	S.	Seite
DRYSATMAP	Dryland Satellite Mapping	SRTM	Space Radar Topography Mission
DTM	Digital Terrain Model	Tiff	Tagged image file format
E	East = Osten	TIN	Triangular Integrated Network
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System	USGS	United States Geological Service
EROS	Earth Resources Observation Systems (- Data Center)	UTM	Universal Transversal Mercator
ESRI	Environmental Systems Research Institute	vgl.	vergleiche
etc.	et cetera	W	Westen
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus	WGS84	World Geodetic System 1984 zum Beispiel
°F	Grad Fahrenheit	z.B.	
f.	following		
ff.	following <plural>		
GIS	Geographisches Informationssystem		
GLCF	Global Landcover Facility		
GPS	Global Positioning System		
GRASS	GIS Geographical Resources Analysis Support System		
GTOPO30	Global 30-Arc-Second Elevation Data Set		
i.d.R.	in der Regel		
i.e.	id est		
IRIMO	Islamic Republic of Iran Meteorological Organization		
km	Kilometer		
km²	Quadratkilometer		
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite		
Lat/ Long	Latitude/ Longitude		
m	Meter		
m²	Quadratmeter		
m³	Kubikmeter		

Abbildungsverzeichnis

Alle Karten liegen genordet und in der Projektion UTM WGS 84, Zone 39 Nord vor.

Sämtliche Photoaufnahmen wurden im April 2002 vom Autor im Untersuchungsgebiet aufgenommen, soweit nicht anders angegeben

Abb.1: Photo 04250042: Intensiv anthropogen genutzte Landschaft bei Ghasteijn Lār, S. 1

Abb. 1 & 2: Photos i15-02-14 (links) & 04250029 (ganz links), GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: intensive Zerstörung von Kulturlandschaft durch Erosion und Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet. S. 1 & 2

Abb. 4: Photo i15-02-15: tobelartiger Rutschungsabriss auf dem wenig konsolidierten Materialverband einer großen Rutschungsmasse, S. 10

Abb. 5: Photo 04250012: murähnliche Massenbewegung, bei der die Beteiligung von Wasser am Transport bereits einen Grenzfall der üblichen Definitionen von Massenbewegungen darstellt, S. 14

Abb. 6: Photo i25-02-24: die zeitlichen Abstände wie auch die Bewegungsgeschwindigkeiten von massenbewegtem Schutt variieren sehr stark. S. 17

Abb. 7: Photo 04250029: Verlust an nutzbarer landwirtschaftlicher Fläche durch Erosion und Massenbewegung, S. 19

Abb.: 8 & 9: Karten 1 & 2: Lage von Untersuchungsgebiet und Testgebiet, S. 20

Abb.: 10: Photo i35-02-0: Luftaufnahme vom südlichen Gebirgsvorland mit Blick auf das Gewerbegebiet westlich von Teheran, S. 22

Abb.: 11: Karte 3: Reliefeinheiten von Untersuchungsgebiet und Testgebiet und ihre jeweilige Höhenlage über NN, S. 23

Abb.: 12: Photo i16-02-23: Lage von Mo' allem Kalgeh im intramontanen Alamutbecken an der nördlichen Grenze des Testgebietes, S. 24

Abb.: 13: Bergdorf inmitten landwirtschaftlich genutzter Kulturlandschaft im Testgebiet, S. 24

Abb. 14: Passstraße über den südlichen Gebirgskamm in das Testgebiet, S. 25

Abb. 15: Photo i14-02-29, GPS-Punkt TREN1, 1906 m NN: Verlust von Bodenmaterial in intensiv genutzter Landschaft im Testgebiet, S. 26

Abb. 16: Karte 4: Erdbeben und tektonische Störungen im Raum Teheran- Karaj, S. 27

Abb. 17: Photo i34-02-32: Lage von Teheran am Südrand des Elbursgebirges, S. 27

Abb. 18: Diagramm 1 - Quelle: CRED (Center for Research on the Epidemiology of Disasters): Massenbewegungen stehen im Iran an sechster Stelle der aufgenommenen Naturkatastrophen von 1909 – 2003, S. 28

Abb. 19: Photo i9-02-12: Stahlskelettbauweise zur Sicherung gegen Erdbebenschäden, Campus der Faculty of Natural Resources in Karaj, S. 28

Abb. 20: Karte 5: Expansion der Siedlungsfläche im Raum Teheran - Qazvin innerhalb von nur 3 Jahrzehnten, S. 29

Abb. 21: Photo i35-02-04: Karaj im Jahr 2002, die Ausdehnung erstreckt sich wie auch in Teheran bereits in den Gebirgsbereich hinein, S. 30

Abb. 22: LANDSAT-ETM+ - Satellitenbild: Landnutzung und Besiedlung auf Schwemmfächern bei Karaj, S. 30

Abb. 23: Photo i22-02-33: Siedlungshügel (persisch 'Tappeh') im Südwesten des Untersuchungsgebietes, S. 31

Abb. 24: Photo i1-02-36, GPS-Punkt D15, 1210 m NN: Gullybildung parallel zu Anbaufurchen im Untersuchungsgebiet südwestlich von Karaj, S. 31

Abb. 25: Photo i17-02-19, GPS-Punkt MZ1: Landnutzung im intramontanen Alamutbecken, S. 32

Abb. 26: Photo i15-02-36, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: Dorf Ghastejn Lār an der Passstraße, Massenbewegungsschäden am gegenüberliegenden Hang, S. 32

Abb. 27: Photo i15-02-17, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: starke Abtragungsschäden, S. 33

Abb. 28: Photo i9-02-07: Rutschung am Hangbereich der Neubausiedlung, S. 33

Abb. 29: Photo i9-02-05: Neubausiedlung auf stark zersetztem Untergrundmaterial und Aufforstungsversuche nördlich von Karaj, S. 33

Abb. 30: Photo i1-02-13: Darstellung eines GIS an einer Mauer in Teheran 2002, S. 34

Abb. 31: Vergleich von CORONA zu LANDSAT, Maßstab 1:25.000, Kanalkombination LANDSAT: 7-4-2. S. 36

Abb. 32: CORONA-Detailausschnitt. S. 37

Abb. 33: LANDSAT-ETM+ - Satellitenbild, Kanalkombination 7-4-2, Maßstab 1:40.000, S. 38

Abb. 34: Karte 6: Lage der Klimamessstationen, S. 40

Abb. 35: Karte 7: die Lage der aufgenommenen GPS-Punkte im Testgebiet. S. 42

Abb. 36: Vergleich der Datenspeicherung von digitalen Höhenmodellen, S. 44

Abb.: 37a & 37b :Das Digitale Geländemodell bietet z.B. die Möglichkeit der Konturdarstellung des Reliefs durch interpolierte Höhenlinien. S. 45

Abb. 38: TIN-Vermaschung der Höhenknotenpunkte aus der Digitalisierung der Höhenlinien des Testgebietes von zwei Kartenblättern der Topographischen Karten 1:50.000 (siehe Text), S. 46

Abb. 39: Screenshot 1: manuelles Nachdigitalisieren war an Stellen dichter Signaturenüberschneidungen notwendig, S. 48

Abb. 40: Screenshot 2: Arbeitsschritt ‚Farben löschen‘. Die blaue Farbsignatur eines Flusses wurde gelöscht, das Rotbraun der Höhenlinien bleibt als Information erhalten. S. 48

Abb. 41: Screenshot 3: Ausdünnen zu Linien von nur einem Pixel Breite. S. 49

Abb. 42 - 44: Screenshots 4-6: diese Brücken sind Fehlverbindungen und müssen derart entfernt werden, dass zwei separate Linien mit voneinander unabhängigen Höheninformationen übrigbleiben. S. 49

Abb. 45: Screenshot 7: Zum visuellen Vergleich des Vektorisierungsergebnisses wurden die gescannten Höhenlinien in einer Transparenzebene untergelegt, S. 50

Abb. 46: Screenshot 8: Knotenpunkte (Nodes) und Stützpunkte (Vertices) definieren den Verlauf einer Höhenlinie, S. 51

Abb. 47: Screenshot 9: Durch Polygonpuffer überschneiden sich die ehemals einzelnen Linienenden und wachsen zu einer einzigen Höhenlinie zusammen. S. 52

Abb. 48: Screenshot 10: Die Polygonpuffer überlappen sich mit einer niedrigeren Korridorbreite nicht mehr gegenseitig. S. 52

Abb. 49: Screenshot 11: Die Höheninformationen wurden den einzelnen Höhenlinien in ArcMap zugewiesen und zur Kontrolle des Arbeitsfortschritts farblich kodiert. S. 53

Abb. 50: Ein TIN - Geländemodell aus den Höhenlinien. S. 53

Abb. 51: Screenshot 12: Weitere Arbeitsschritte lassen sich durch die Vektorenerstellung aus Topographischen Karten enorm erleichtern: S. 54

Abb. 52: Beispiel für die Anwendung des Digitalen Geländemodells: S. 54

Abb. 53a & 53b : Das Digitale Geländemodell unterstützt die visuelle Erkennung von Massenbewegungen. S. 55

Abb. 54: Photo i13-02-18: rutschungsartiger Abriss am südlichen Gebirgskamm des Testgebietes, S. 56

Abb. 55 und 56 - Tabelle 1 : Lage der erkannten und in die Bewertung aufgenommenen Massenbewegungen im Testgebiet. S. 57

Abb. 57: CORONA-Satellitenbild als „drape image“ mit der dreidimensionalen Höheninformation aus dem DGM. S. 58

Abb. 58: Photo i14-02-30, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: Beispiel für Felssturz, S. 58

Abb. 59: Massenbewegungen wie diese komplexe Rutschung konnten in den CORONA-Daten nur anhand der exhumierten Abtragungsfächen erkannt werden. S. 59

Abb. 60: Photo i14-02-26, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: Vielfalt und Lagerungsverhältnisse der geologischen Schichten im Testgebiet, S. 60

Abb. 61: Photo i23-02-32: liegende tektonische Falte nördlich von Karaj, S. 61

Abb. 62: Karte 8: digitalisierte Geologie des Testgebietes mit tektonischen Störungen nach der Geological Map of Iran 1:100.000, No. 6062 Qazvin. S. 62

Abb. 63: Diagramm 2: Gesteinsarten, die am häufigsten von Massenbewegungen betroffen sind, in Prozent. S. 64

Abb. 64: Photo i33-02-30, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Bodenprofil mit Zersatzhorizont an der Passstraße im Testgebiet, S. 66

Abb. 65: Photo i8-02-18: zersetzter Wollsack in Saprolithmatrix, S. 67

Abb. 66: Photo i32-02-23, GPS-Punkt AL1, 2380 m NN: Runsenbildung am Straßenanschnitt, S. 67

Abb. 67: Photo i14-02-28, GPS-Punkt FLECHa, 1886 m NN: rezente Frostsprengung, die Flechten haben die Kluft noch nicht besiedelt, S. 67

Abb. 68: Photo 04250025: Abrissnische, entstanden durch Straßenanschnitt, mit nachrutschendem Material als Folgeerscheinung. S. 68

Abb. 69: Diagramm 3: Korngrößenspektrum der Bodenproben an einer komplexen, rutschungsartigen Massenbewegung. Eigene Messungen siehe Text und vgl. Anhang, Tabelle 3, S. 69

Abb. 70: Photo i15-02-05, GPS-Punkt KKRUST, 1719 m NN: komplex zusammengesetzte, rutschungsartige Massenbewegung. Blick von der Passstraße nach Südosten, S. 69

Abb. 71: Photo 04250032, GPS-Punkt AL10, 1673m NN: oberer Bereich der Massenbewegung, Reste der zerstörten Terrassierung (roter Pfeil) links oben im Bild. Blick nach Süden, S. 69

Abb. 72: Photo i15-02-22, GPS-Punkt AL10, 1673 m NN: unterer Bereich der komplexen Massenbewegung mit sichtbaren Viehtrittschäden, welche Teile des Hanges weiterhin destabilisieren, S. 70

Abb. 73: CORONA-Satellitenbild: Terrassierungsbereiche, wie sie 1970 noch vorhanden waren. (roter Pfeil). S. 70

Abb. 74: CORONA-Satellitenbild im Digitalen Geländemodell (räumliche Auflösung 20 m). S. 71

Abb. 75: Photo i16-02-02: Kluftmuster, konserviert in saprolithisiertem Gestein, sichtbar gemacht durch Kalkausfällung, S. 71

Abb. 76: Karte 9: tektonische Störungen und Erdbeben im Untersuchungsgebiet (grauer Rahmen), S. 72

Abb.77: Karte 10: tektonische Störungen nach der Geologischen Karte 1:100.000 No. 6062, Qazvin, der Ausschnitt zeigt das gesamte Testgebiet, S. 73

Abb. 78: Versuch der Hervorhebung linienhafter Elemente durch Filterung mit einem 7x7 Kernel, S. 73

Abb. 79: obere Karte 11: Pufferkorridore tektonischer Störungen mit Einflussweiten von 0,5, 1,0 und 1,5 km, S. 75

Abb. 80: untere Karte 12: Pufferkorridore tektonischer Störungen mit der Einflussweite 100 m. Diese Karte entspricht der Faktorenebene „tektonische Störungen“. S. 75

Abb. 81: Photo 04250010: die enorme tektonische Beanspruchung des Gesteins durch Klüftung weist auf die instabilen Bedingungen aktiver neogener Gebirge hin. S. 75

Abb. 82: das Digitale Geländemodell stellt die Reliefverhältnisse des Untersuchungsgebietes dar. S. 77

Abb. 83: Photo i33-02-18, GPS-Punkt AL7, 2129 m NN: Gullybildung an der Passstraße, S. 77

Abb. 84: CORONA-Satellitenbild: Gullybildung (roter Kreis) an der Passstraße, wie sie auf dem Satellitenbild erkannt werden kann. S. 78

Abb. 85: Photo i14-02-05, GPS-Punkt BOD1, 2108 m NN: Abrissnischen im Kontext geringer Vegetationsbedeckung, bevorzugt an steilen Stellen des Reliefs, S. 78

Abb. 86: Photo i34-02-03, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: murähnlicher Schuttransport im Relief mittlerer Steilheit, S. 78

Abb. 87: Karte 13: Hangneigungen im Testgebiet, S. 79

Abb. 88: Karte 14: Der Inhalt der Faktorebene „Hangneigung“ enthält Polygone mit Hangneigungen ab 20°. S. 79

Abb. 89: Photo i13-02-22, GPS-Punkt AL3, 2324 m NN: Nach Norden exponierte Lagen mit Schneeresten im April 2002, S. 80

Abb. 90: Karte 14: Die Faktorebene „Exposition“ stellt die Ausrichtungen der Hänge nach den Himmelsrichtungen dar. S. 80

Abb. 91: Photo i14-02-20, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Schneerest in Abrissnische, durch Nordexposition und Schattenlage der Wölbung konserviert, S. 81

Abb. 92: Photo i16-02-10, GPS-Punkt QA96, 1239 m NN: Moderater Reliefabfall in das Alamutbeken, S. 81

Abb. 93: Photo i3-02-04: Gebirgsvorland, GPS-Punkt F12, 02.04.2002: einsetzende Erosion nach andauerndem Landregen, S. 83

Abb. 94: Photo 03280012: Kanal („Djub“) in Teheran nach stärkerem Regenereignis am 28.03.2002, S. 83

Abb. 95: Karte 15: Lage der für das Testgebiet relevanten Messstationen, S. 84

Abb. 96: Diagramm 4: gesamte monatliche Niederschlagsmenge, S. 84

Abb. 97: Diagramm 5: Anzahl an Tagen mit Niederschlag, S. 85

Abb. 98: Diagramm 6: Anzahl an Tagen mit Niederschlagsmengen größer oder gleich 1 mm, S. 85

Abb. 99: Diagramm 7: größte täglich gemessene Niederschlagsmenge, S. 86

Abb. 100: Diagramm 8: durchschnittliche Tagestemperaturen, S. 86

Abb. 101: Diagramm 9: Differenz aus durchschnittlich maximaler und minimaler Temperatur, S. 87

Abb. 102: Diagramm 10: Anzahl an Tagen mit Tiefsttemperaturen von null Grad und niedriger, S. 87

Abb. 103: Diagramm 11: Anzahl an Tagen mit Höchsttemperaturen von 30 Grad und höher, S. 88

Abb. 104: Diagramm 12: monatliche Sonnenscheinstunden, S. 88

Abb. 105: Diagramm 13: Anzahl an Tagen ohne Wolkenbedeckung (0-2)/8, S. 88

Abb. 106: Diagramm 14: Durchschnittliche relative Feuchtigkeit in Prozent, S. 89

Abb. 107: Photo i33-02-33: lineare Erosion von freigelegtem Feinmaterial, S. 90

Abb. 108: Photo i16-02-05, GPS-Punkt X01, 1664 m NN: Gullybildung, S. 90

Abb. 109: Photo i32-02-30, GPS-Punkt AL2, 2330 m NN: gullyartige Erosion, S. 91

Abb. 110: Karte 16: Flussnetz im Testgebiet, S. 91

Abb. 111: Photo i17-02-08, Lage an der Passstraße, zwischen den GPS-Punkten AL10 und QA96: Rotationsrutschung als Folge von Widerlagerentfernung im Abflussbett, S. 92

Abb. 112: Karte 17: Faktorebene „Hydrologie“. Polygone stellen durch Bufferkorridore die Durchfeuchtungszonen der Flüsse im Testgebiet dar. S. 92

Abb. 113: Photo i8-02-13: Intensive anthropogene Nutzung durch Entwaldung und Anbau, im Vordergrund Mandelbäume, S. 93

Abb. 114: Photo i16-02-0, GPS-Punkt X01, 1664 m NN: Viehgangeln und Gullybildung (roter Pfeil), S. 93

Abb. 115: LANDSAT-ETM+-Satellitenbild: Vegetation (grün) im Testgebiet, Kanalkombination 7-4-2, Maßstab 1:40.000, Bildbearbeitung durch Histogramm-Equalize, S. 94

Abb. 116: CORONA-Satellitenbild: Terrassierungsbereiche sind leicht durch die Flurgrenzen kartierbar, S. 94

Abb. 117: Photo i14-02-07, GPS-Punkt AL6, 2107 m NN: brachliegende Terrassen, Viehgangeln und Abrissnischen, S. 95

Abb. 118: Photo i32-02-29, GPS-Punkt AL6, 2107 m NN: angepasste anthropogener Nutzung sowie rezenten Abtragungerscheinungen auf einem Hang, der aus einem großen Rutschungskörper besteht, S. 95

Abb. 119: Photo i34-02-02, GPS-Punkt AL9, 2046 m NN: Krummwuchs auf dem Rutschungskörper und Abrissnischen als Anzeiger für rezente Massenverlagerungen, S. 95

Abb. 120: Photo i34-02-23, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Fuß des Rutschungskörpers im Bereich des Straßenanschnittes. S. 96

Abb. 121 & 122: Photos i34-02-15, i34-02-22, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Wasserleitung an der Passstraße, S. 96

Abb. 123: Photo i16-02-14, Lage zwischen den GPS-Punkten AL10 und QA96: Abrutschung eines destabilisierten Straßenanschnittes in einer Kehre, S. 97

Abb. 124: Karte 18: die Faktorebene „Straßen“ erfasst Bereiche in 100 m Breite entlang der Straßen im Testgebiet, S. 97

Abb. 125: Photo i15-02-09, nahe GPS-Punkt KKRUST, 1719 m NN: im Testgebiet wird der Zusammenhang zwischen natürlicher Stabilität und anthropogener Nutzung an vielen Stellen ersichtlich. S. 98

Abb. 126: Karte 19: das Auftreten von Massenbewegungen innerhalb der geologischen Klassen der Tuffe und der sonstigen Vulkanite, S. 120

Abb. 127: Karte 20: Hangneigungsklassen und aufgetretene Massenbewegungen, S. 102

Abb. 128: Karte 21: die Überlagerung von Faktorebenen der Straßen, Flüsse und tektonischen Störungen und die im Testgebiet aufgetretenen Massenbewegungen, S. 102

Abb. 129: Karte: 22 Expositionsrichtungen und aufgetretene Massenbewegungen, S. 104

Abb. 130: Karte 23: Gefahrenklasse 1: geringe Gefährdung, S. 105

Abb. 131: Tabelle 2: Bildung der Gefahrenklassentupel. S. 106

Abb. 132: Karte 24: Gefahrenklasse 2: mittlere Gefährdung, S. 106

Abb. 133: Karte 25: Gefahrenklasse 3: hohe Gefährdung. S. 107

Abb. 134: Photo 04250021, GPS-Punkt AL8, 1969 m NN: Straßenanschnitt und Wasserleitung (roter Pfeil) am Fuß eines großen Rutschungskörpers, S. 109

Abb. 135: Photo i19-02-20: Verlust von Siedlungsfläche in Karaj mit unbekannter Ursache, S. 112

Abb. 136: Photo i18-02-06: Steil stehende Gesteinsschichten mit Neigung in Richtung eines Neubaus in Karaj, S. 112

Abb. 137: Photo i8-02-21: Neubaugebiet Dobrar Village in Höhenlage mit Blick auf Teheran, S. 112

Abb. 138: Die Ausdehnung Teherans, LANDSAT ETM+, Kanalkombination 3-2-1. S. 113

Anhang:

Tabelle 3: Auswertung der Geologischen Karte, Doppelblatt Qazvin & Rasht E3 & E5, 1:250.000, bezüglich darin kartierter Massenbewegungen

Tabelle 4: Auswertung des Korngrößenspektrums der im Testgebiet 2002 genommenen Bodenproben, S. 131

Tabelle 5: Koordinaten der im Testgebiet im Jahr 2002 genommenen GPS-Punkte, S. 131

Literatur

- AIR MINISTRY, Meteorological Office (1946): Meteorological Report on West Persia, in: *Aviation Meteorological Report*, No. 33, Teheran
- AKASHEH, B. & BERCKHEIMER, H. (1983): Focal mechanisms of earthquakes in Iran with special emphasis to small shocks in the Teheran region, in: Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran, Final Report, Geol. Survey of Iran, Report No. 51, Teheran
- ALAVI, M. (1996): Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran, *Journal of Geodynamics* Vol. 21, p. 1-33
- ALBERTZ, Jörg (2001): Einführung in die Fernerkundung, 2te Aufl., Darmstadt
- ALTHAUS, Verena (2002): Rezente Hangdynamik am Beispiel der aktuellen Rutschung „Auf dem Ried“ (Landkreis Oberallgäu) sowie rechtliche Auswirkungen von Massenbewegungen, unveröff. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- ANNELS, R.N., ARTHURTON, R.S., BAZLEY, R.A., DAVIES, R.G. (1975): Explanatory text of the Qazvin and Rasht Quadrangles Map 1:250,000, Geological Survey of Iran, Geological Quadrangles Nos. E3, E4
- ATKINSON, P.M. & MASSARI, R. (1998): Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy, *Computers and Geosciences*, Vol. 24, No. 4, pp. 373-385
- AU, S.W.C. (1998): Rain-induced slope instability in Hong Kong, *Engineering Geology* 51, pp. 1-36
- AUSTRALIAN GEOMECHANICS SOCIETY, Subcommittee on Landslide Risk Management (2000): Landslide Risk Management Concept and Guidelines, *Australian Geomechanics*, March 2000, pp. 49-92
- AXEN, Gary J., LAM, Patrick S., GROVE, Marty, STOCKLI, Daniel F., HASSANZADEH, Jamshid (2001): Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics, *Geology*, Vol. 29, No. 6, pp. 559-562
- BAHRAMBEGUI, Houshang (1976): Karaj and its Satellites, *Geography – Journal of the Association of Iranian Geographers*, Vol.1, No.1
- BASILE, Angelo, MELE, Giacomo, TERRIBILE, Fabio (2003): Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998, *Geoderma* 117, pp. 331-346
- BOBEK, Hans (1952): Beiträge zur klima-ökologischen Gliederung Irans, *Erdkunde* 6, 1952, pp. 65-84
- BRÜCKL, E. & ROCH, K.H. (2001): Geophysikalische Erkundung von Massenbewegungen, in: Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München, pp.83f.
- BUSCHE, Detlef (2001): Early Quaternary landslides of the Sahara and their significance for geomorphic and climatic history, *Journal of Arid Environments* 49, pp. 429-448
- CALCATERRA, Domenico, GILI, José A., IOVINELLI, Roberto (1998): Shallow landslides in deeply weathered slates of the Sierra de Collcerola (Catalonian Coastal Range, Spain), *Engineering Geology* 50, pp. 283-298
- CARRARA, Alberto, CARDINALI, Mauro, GUZZETTI, Fausto, REICHENBACH, Paola (1995): GIS-based techniques for mapping landslide-hazard, <http://deis158.unibo.it/gis/chapt1.htm>, visited 12-02
- CHALERMPONG, Patwiet (2002): Guidelines for community management in landslide risk areas of east – coast of the Gulf of Watershed, Thailand, <http://gisdevelopment.net>, visited 11-03
- CHEN, H. & LEE, C.F. (2002): A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes, *Geomorphology*, Article in Press, Corrected Proof
- CHEN, Hongey & WAN, Jui-Pin (2003): The effect of orientation and shape distribution of gravel on slope angles in central Taiwan, *Engineering Geology* 72, pp. 19-31
- CHLEBORAD, Alan, F. (1998): Use of Air Temperature Data to Anticipate the Onset of Snowmelt-Season Landslides, Open-File Report 98-124, USGS
- CHLEBORAD, Alan, F. (2000): Preliminary Method for Anticipating the Occurrence of Precipitation-Induced Landslides in Seattle, Washington, Open-File Report 00-469, USGS
- CLERICI, Aldo & PEREGO, Susanna (2000): Simulation of the Parma River blockage by the Corniglio landslide (Northern Italy), *Geomorphology*, pp. 1-23
- COE, J.A., MICHAEL, J.A., CROVELLI, R.A., SAVAGE, W.Z. (2000): Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance properties as determined from historic records, Seattle, Washington, Open-File Report 00-303, on-line edition, USGS, <http://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr-00-303/>, visited 01-03
- CRED <Center for Research on the Epidemiology of Disasters> (2004): EM-DAT: the OFDA/CRED International Disasters Data Base, <http://www.cred.be>, visited 02-04
- CROSTA, G.B. [Ed.] (2004): Rainfall-triggered landslides and debris flows, *Engineering Geology*, Vol. 73, Iss. 3-4
- CROSTA, G.B., CHEN, H., LEE, C.F. (2004): Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps, *Geomorphology* 60, pp. 127-146
- CRUDEN, David M. & VARNES, David J. (1996): Landslide types and processes, in: Turner, A. Keith & Schuster, Robert L. [Eds.] (1996): Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington
- DAI, F.C. & LEE, C.F. (2002): Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology* 42, pp. 213-228
- D'AMBROSIO, Donato, DI GREGORIO, Salvatore, IOVINE, Giulio, LUPIANO, Valeria, RONGO, Rocco, SPATARO, William (2003): First simulations of the Sarno debris flows through Cellular Automata modelling, *Geomorphology* 54, pp. 91-117
- DAMOKLES PROJECT (2002): Detailed Report of Assistant Contractor for the Fifth Progress Meeting, Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Zaragoza, Spain
- DAVOUZADEH, M. & SCHMIDT, K. (1983): A review of the Mesozoic paleogeography and paleotectonic evolution of Iran, in: Geodynamic Project (Geotraverse) in Iran, Final Report, Geol. Survey of Iran, Report No. 51, Teheran
- DAVOUZADEH, M. (1997): Iran, Sonderdruck aus: Encyclopedia of European and Asian Regional Geology, Moores, E.M. & Fairbridge, R.W. [Eds.], London
- DAVOUZADEH, M., LAMMERER, B., WEBER-DIEFENBACH, K. (1997): Paleogeography, Stratigraphy, and Tectonics of the Tertiary of Iran, *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 205, pp. 33-67
- DE MARTINI, P.M., HESSAMI, K., PANTOSTI, D., D'ADDEZIO, G., ALINAGHI, H., GHAFORY-ASHTIANI, M. (1998): A geologic contribution to the evaluation of the seismic potential of the Kharizak fault (Tehran, Iran), *Tectonophysics* 287, pp. 187-199

- DI GREGORIO, S., RONGO, R., SICILIANO, C., SORRISO-VALVO, M., SPATARO, W. (1999): Mount Ontake Landslide Simulation by the Cellular Automata Model SCIDDICA-3, *Phys. Chem. Earth*, Vol. 24, No. 2, pp. 131-137
- DIKAU, Richard, BRUNSDEN, Denys, SCHROTT, Lothar, IBSEN, Maïa-Laura [Eds.] (1996): *Landslide Recognition*, Chichester
- DJAVADI, Chafi (1966): *Climats de l'Iran*, in: *Monographies de la Météorologie Nationale*, No. 54, Paris
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): *Grundlagen der Hydrologie*, Berlin
- DYMOND, John R., JESSEN, Murray R., LOVELL, Layton R. (1999): Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (JAG)*, Vol.1
- EHLERS, Eckart (1980): *Iran, Grundzüge einer geographischen Landeskunde*, Wissenschaftliche Länderkunden, Band 18, Darmstadt
- EISBACHER, G.H. & KLEY, J. (2001): *Grundlagen der Umwelt- und Rohstoffgeologie*, Stuttgart, pp.188-206
- ERISMANN, T.H. (2001): Lubricants for Rockslides – Air, Granite and what not?, in: *Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen*, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München, pp.41f.
- ERISMANN, T.H. & ABELE, G. (2001): *Dynamics of rockslides and rockfalls*, Berlin
- FAO / UNESCO (1974): *Soil Map of the World*, 1:5,000,000: 10 volumes. UNESCO, Paris
- FISCHER, K. [Ed.] (1999): *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*, Symposium der Kommission für Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, am 24. und 25. November 1995, in: *Relief Boden Paläoklima* 14
- FISCHER, K. (1999): *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential – eine Einführung in die Thematik*, in: *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*, Symposium der Kommission für Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, am 24. und 25. November 1995, in: *Relief Boden Paläoklima* 14
- FISHER, William Bayne [Ed.] (1968): *The Cambridge History of Iran*, Bd. 1, The Land of Iran, Cambridge
- GARATWA, Wolfgang & BOLLIN, Christina (2002): *Disaster Risk Management – Working Concept*, GTZ, Eschborn
- GÄRTNER, Holger, BERGMANN, Andreas, SCHMIDT, Jochen (2001): Object-oriented modeling of data sources as a tool for the integration of heterogeneous geoscientific information, *Computers & Geosciences* 27, pp. 975-985
- GARMIN (2004): GARMIN International Inc., <http://www.garmin.com>, visited 03-04
- GLCF <Global Landcover Facility> (2004): University of Maryland, USA, <http://www.glcf.umd.edu/data/>, visited 03-04
- GRANDE, Antje, KRAUS, Birgit, WIEGAND, Dorothee (2004): Standortbestimmung – Geografische Informationssysteme werden immer wichtiger, *c't*, Heft 10
- GUZETTI, Fausto, CROSTA, Giovanni, DETTI, Ricardo, AGLIARDI, Federico (2002): STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls, *Computers and Geosciences* 28, pp. 1079-1093
- HAEBERLI, W. (1999): Hangstabilitätsprobleme im Zusammenhang mit Gletscherschwund und Permafrostdegradation im Hochgebirge in: *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*, Symposium der Kommission für Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, am 24. und 25. November 1995, in: *Relief Boden Paläoklima* 14

- HAMILTON, Richard (2000): Report on Early Warning Capabilities for Geological Hazards, IDNDR Early Warning Programme, International Decade for Natural Disasters Reduction (IDNDR), United Nations, Washington, D.C.
- HARJES, H.P. & WALTER, R. [Eds.] (1999): *Die Erde im Visier – Die Geowissenschaften an der Schwelle zum 21ten Jahrhundert*, Berlin Heidelberg, pp.131f.
- HERVÁS, Javier, BARREDO, José I., ROSIN, Paul R., PASSUTO, Alessandro, MANTOVANI, Franco, SILVANO, Sandro (2003): Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy, *Geomorphology* 54, pp. 63-75
- HONDA, Kiyoshi; PICTON, Phillips, Guy; YOKOYAMA, Noboru (2002): Identifying the threat of debris flow to major arterial roads using Landsat ETM+ imagery and GIS modeling – an example from Catanduanes Island, Republic of the Philippines, <http://www.gisdevelopment.net>, visited 11-03
- HORN, B. & MACDONALD, S. (1975): *Geological Hazards*, Berlin
- HUTCHINSON, J.N. (2001): Landslides in Britain – Characteristics, Problems and Solutions, in: *Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen*, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München, pp.9f.
- IRIMO <Islamic Republic of Iran Meteorological Organization> (2004): <http://www.irimet.net>, visited 03-04
- ISDR <International Strategy for Disaster Reduction> (2002): *Living with Risk, A global review of disaster reduction initiatives*, United Nations, Geneva
- IWAHASHI, Junko, WATANABE, Shiaki, FURUYA, Takahiko (2001): Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan, *Computers and Geosciences* 27, pp. 851-865
- JAYASEELAN, S. & SANJEEVI, S. (2002): Visible and NIR reflectance spectra of the components of a LANDSLIDE zone in the Nilgiris, South India, <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/hdm/hdm003pf.htm>
- JERZ, H. (1999): Nacheiszeitliche Bergstürze in den Bayrischen Alpen, in: *Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential*, Symposium der Kommission für Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, am 24. und 25. November 1995, in: *Relief Boden Paläoklima* 14, pp.31f.
- KAPPAS, M. (2001): *Geographische Informationssysteme*, Braunschweig
- KNEISEL, C. et al. (1998): *Legende für geomorphologische Kartierungen im Hochgebirge (GMK Hochgebirge) – Trierer Geographische Studien* Heft 18
- KOENIG, Martin Adolf & HEIERLI, Hans [Eds.] (1994): *Geologische Katastrophen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt*, 2. Aufl., Thun
- KORUŞ, Oliver (2002): Recent research on landslide dams – a literature review with special attention to New Zealand, *Progress in Physical Geography* 26,2, pp. 206-235
- KRAUTER, E. (2001): Gefahrenkarten – Möglichkeiten und Probleme, in: *Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen*, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München 2001, pp.135f.
- KUGLER, H. & SCHAUB, D. (1997), in: Hendl, M. & Liedtke, H.: *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*, Gotha, pp.170f.
- LAMPING, Heinrich & LAMPING, Gerlinde [Eds.] (1995): *Naturkatastrophen*, Berlin
- LAUER, Wilhelm (1999): *Klimatologie*, 3te Aufl., Braunschweig

- LEE, Saro, CHWAE, Ueechan, MIN, Kyungduck (2002): Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea, *Geomorphology* 1153
- LESER, H.[Ed.] (1997): Wörterbuch Allgemeine Geographie, Braunschweig
- LESER, H. (1998): Geomorphologie, 8te Aufl., Braunschweig
- LIAO, Hsuan-Wu, LEE, Chyi-Tyi (2000): Landslides Triggered by the Chi-Chi Earthquake, <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts8/hami0007pf.htm>, visited 11-03
- MANTOVANI, Franco, SOETERS, Robert, VAN WESTEN, C.J. (1996): Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe, *Geomorphology* 15, pp. 213-225
- McKEAN, J. & ROERING, J. (2004): Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry, *Geomorphology* 57, pp. 331-351
- MEIßL, Gertraud (2001): Modelling the runout distance of rockfalls using a geographic information system, *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.* 125, pp. 129-137
- MOEYERSONS, J., TRÉFOIS, Ph., LAVREAU, J., ALIMASI, D., BADRIYO, I., MITIMA, B., MUNDALA, M., MUNGANGA, D.O., NAHIMANA, L. (2004): A geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo, *Engineering Geology* 72, pp. 73-87
- MOSER, M. (2001): Die geologisch-geotechnische Erkundung von Großhangbewegungen, in: Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München 2001, pp.61f.
- MÜLLER-MERZ, Edith & DECROUEZ, Danielle [Eds.] (1997): Geologie und Zeit, Schweizerische Geologische Kommission, *Materialhefte Erdwissenschaften heute*, Zürich
- MURAWSKI, Hans & MEYER, Wilhelm [Eds.] (1998): Geologisches Wörterbuch, 10te Aufl., München
- NATIONAL ATLAS OF IRAN (1995): National Atlas of Iran, Teheran
- NATIONAL IRAN OIL COMPANY (1959): Geological Map of Iran 1:2.500.000
- NETELER, Markus, MITASOVA, Helena (2003): Open Source GIS – a Grass GIS approach, Boston
- NILAWEEERA, Nimal Santha (1994): Engineering and Applied Geology. Effects of Tree Roots on Slope Stability: The Case of Khao Luang Mountain Area, Southern Thailand, <http://www.ait.ac.th/AIT/research/1994/doctor.html>, visited 12-02
- OESCH, David (2001): Fernerkundung und Naturgefahren, Web Research – State of the Art, June 2001, Methoden für Risk/ Disaster Management und Humanitäre Einsätze, Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA), Universität Bern, http://www.saturn.unibe.ch/rsbern/publication/fulltext/deza_bericht/bericht_DEZA_WWW/DEZA_bericht.html, visited 03-03
- OKAMOTO, Takashi, LARSEN, Jan Otto, MATSUURA, Sumio, ASANO, Shiho, TAKEUCHI, Yoshitsugu, GRANDE, Lars (2004): Displacement properties of landslide masses at the initiation of failure in quick clay deposits and the effects of meteorological and hydrological factors, *Engineering Geology* 72, pp. 233-251
- OKURA, Y., KITAHARA, H., SAMMORI, T. (2000)[1]: Fludization in dry landslides, *Engineering Geology* 56, pp. 347-360
- OKURA, Yoichi, KITAHARA, Hikaru, SAMMORI, Toshiaki, KAWANAMI, Akiko (2000)[2]: The effects of rockfall volume on runout distance, *Engineering Geology* 58, pp. 109-124

- PACK, Robert T., TARBOTON, David G., GOODWIN, Craig N. (1998): The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping, 8th Congress of the International Association of Engineering Geology in Vancouver
- PALLAS, Raimon, VILAPLANA, Joan Manuel, GUINAU, Marta, FALGAS, Esther, ALEMANY, Xavier, MUÑOZ, Angélica (2004): A pragmatic approach to debris flow hazard mapping in areas affected by Hurricane Mitch: example from NW Nicaragua, *Engineering Geology* 72, pp. 57-72
- PANNIKAR, Sambhu V. & SUBRAMANYAN, V. (1996): A geomorphic evaluation of the landslides around Dehradun and Mussoorie, Uttar Pradesh, India, *Geomorphology* 15, pp. 169-181
- PAUDITS, P. & BEDNARIK, M. (2002): Using GIS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovská kotlina basin, [http://dionysos.gssr.sk/ig_home/exchange/ppaudits/p2002_Praha\(Handlova, Paudits-Bednarik\).pdf](http://dionysos.gssr.sk/ig_home/exchange/ppaudits/p2002_Praha(Handlova, Paudits-Bednarik).pdf), visited 01-03
- PEROTTO-BALDIVIEZO, H.L., THUROW, T.L., SMITH, C.T., FISHER, R.F., WU, X.B. (2004): GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Article in Press 2004
- PETERSON, Greg (2002): Colorado Springs: Living with landslides, in: When Cities Face Geological Forces, *Geotimes*, Oktober 2002, p. 30
- PETLEY, David N., CRICK, Wiliam D.O., HART, Andrew B. (2002): The use of satellite imagery in landslide studies in high mountain areas, <http://www.gisdevelopment.net>, visited: 11-03
- PEZHAM, M.R., JAFARI, Shariat M., FEIZNIA, S., AHMADI, H. (1998): A statistical approach for logical modeling of landslide hazard zonation, 8th international IAEG congress, Balkema, Rotterdam
- PLA SENTIS, Ildenfonso (1997): a soil water balance model for monitoring soil erosion process and effects on steep lands in the tropics, *Soil Technology* 11, pp. 17-30
- PLATE, Erich J. & MERZ, B. [Eds.] (2001): Naturkatastrophen – Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge, Stuttgart
- POSCHINGER & STÖTTER [Eds.] (2001): Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München
- PRESS, F. & SIEVER, R. (1998): Understanding Earth, Second Edition, New York, pp. 264f.
- PROVINCE OF BRITISH COLUMBIA (1997): Terrain Stability Mapping in British Columbia, Resources Inventory Commitee, <http://srmwww.gov.bc.ca/risc/pubs/earthsci/terrain2/terrain-06.htm>
- RAISSI, Farhad (1986): Der Rohstoff Boden und die agrarsozio-ökonomischen Gesichtspunkte als Grundlage für die ländliche Entwicklung Irans, Univ., Diss., Hannover
- RAUTELA, Piyoosh & LAKHERA, Ramesh Chandra (2000): Landslide risk analysis between Giri and Tons Rivers in Himachal Himalaya (India), *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (JAG)*, Vol. 2, Issue 3/4, pp. 153ff.
- RICKENMANN, D. (2001): Zum Fließverhalten von Murgängen, in: Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München 2001, pp.161f.
- ROWBOTHAM, David N. & DUDYCHA, Douglas (1998): GIS modelling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal, *Geomorphology* 26, pp. 151-170

- SARAF, A.K. & CHOUDHURY P.R. (1998): Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, No. 10, pp. 1825-1841
- SARVATI, Reza Mohammad (1986): Geomorphologische Untersuchungen in der Region Kashmar NE/Iran, *Würzburger Geographische Arbeiten*, Würzburg
- SCHULTZ, Jürgen (2002): Die Ökozonen der Erde, 3te Aufl., Stuttgart
- SIEFKER, Ulf & BUSCHE, Detlef (2004): Endbericht zum BMBF-Vorhaben 50EE0042 DRYSATMAP, Entwicklung einer neuen, anwendungsorientierten geomorphologischen Kartiermethode für Trockengebiete mittels hochauflösender Satellitendaten, unveröff.
- SMYTH, Conor G. & ROYLE, Stephen A. (2000): Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niterói, Rio de Janeiro State, Brazil, *Applied Geography* 20, pp. 95-117
- STÄBLEIN, Gerhard (1978): Geomorphologische Detailaufnahme, Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm, *Berliner geographische Abhandlungen* 30, Berlin
- SUWA, Hiroshi, WASSMER, Patrick, OKUNISHI, Kazuo [Eds.] (2004): Hazards of Mass Movements, in: *Geomorphology*, Vol. 61, Iss. 1-2
- TAVO <Tübinger Atlas des Vorderen Orients> (1977): Tübinger Atlas des Vorderen Orients, Wiesbaden
- TARBOTON, David G. (2002): Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM), <http://moose.cce.usu.edu/taudem/taudem.html>, visited 03-04
- TEHERAN UNIVERSITY, The Institute of Geophysics (1969): Report on the Seismological Activities in Iran, Pub. No. 60, Teheran
- TEMESGEN, B., MOHAMMED, M.U., KORME, T. (2001): Natural Hazards Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia, *Physical Chemical Earth*, Vol. 26, No. 9, pp. 665-675
- TURNER, A. Keith & SCHUSTER, Robert L. [Eds.] (1996): Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council, Washington
- VAN ASCH, Th.W.J., HENDRIKS, M.R., HESSEL, R., RAPPANGE, F.E. (1996): Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps, *Engineering Geology* 42, pp. 239-251
- VON BARATTA, Mario [Ed.] (2002): Der Fischer Weltatlas, Frankfurt am Main 2001
- WEIDINGER, Johannes Thomas (2002): 13 Jahre Bergsturzforschung auf drei Kontinenten – Rückblick und Analyse, in: Gmundner Geostudien 1, geologisch angewandt interessant, Geo-Workshop "Stürzende Berge", 26.-27. Oktober 2002, Gmunden, Österreich, S. 7-28
- WEISE, Otfried (1973): Zur Hangentwicklung und Flächenbildung im Trockengebiet des iranischen Hochlandes, Univ., Habil.-Schr., Würzburg
- WELSCH, W.M. (2001): Geodätische Möglichkeiten und Überlegungen zur Erfassung von Hangrutschungen, in: Grundlagen, Erfassung und Darstellung von Sturz-, Rutsch- und Murprozessen – Vorträge im Rahmen des Münchner Forums Massenbewegungen, *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* Heft 33, München, S.105ff.
- WIECZOREK, Gerald, F., MORRISSEY, Meghan M. IOVINE, Giulio, GODT, Jonathan (1998): Rock-fall Hazards in the Yosemite Valley, Open-File Report 98-467, USGS, <http://pubs.usgs.gov/of/1998/ofr-98-0476/>, visited 12-02
- ZENKE, B. (1999): Gefahrenpotentiale durch Lawinen, in: Massenbewegungen und Massentransporte in den Alpen als Gefahrenpotential, Symposium der Kommission für

Geomorphologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, am 24. und 25. November 1995, in: *Relief Boden Paläoklima* 14, pp.41f.

ZEPF, Harald (2002): Grundriß Allgemeine Geographie: Geomorphologie, Paderborn

ZINCK, J. Alfred, LÓPEZ, Jaime, METTERNICHT, Graciela I., SHRESTA, Dhruva P, VÁZQUEZ-SELEM, Lorenzo (2001): Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (JAG)*, Volume 3, Issue 1, pp. 43-53

Weiterführende Internetseiten

DRYSATMAP Projekt:
<http://www.DRYSATMAP.de>

Internetseiten zu CORONA:

<http://edc.usgs.gov/products/satellite/corona.html> 23.03.04

<http://www.fas.org/spp/military/program/imint/corona.htm>, Implemented by Christina Lindborg, 1997 Scoville Fellow, Updated Friday, December 19, 1997 9:44:11 AM, visited 23.03.04

Internetseiten zu GPS:

<http://www.kowoma.de/gps/>, Anja Köhne und Michael WößnerBrünnlirain 94125 Riehen, visited 03-04

Internetseite zur Extraktion von Höhenmodellen aus Topographischen Karten:

<http://www.terrainmap.com>

Technische Daten

Technische Daten der CORONA Szenen:

Aufnahmedatum 1970/05/31, Missionsnummer 1110-2, Filmrollennummer 5921, Aufnahmen 38 – 45, Identitätsnummern DS1110-2170DF038 – F45

Technische Daten der LANDSAT-ETM+ Szenen:

Referenz-Datum WGS84, Referenz-Ellipsoid WGS84, Kartenprojektion UTM, Resampling Nearest Neighbour, Zone +39, Ausgabe Format Geotiff, Grid Zellgröße 28.500, Grid Zellgröße Pan 14.250, Grid Zellgröße THM 57.000.

Path/Row 164-35, Aufnahmedatum 18.07.2000, Azimuth 118.3, Sonnenhöhe 63.7, Wolkenbedeckungsgrad 0.

Path/Row 165-35, Aufnahmedatum 25.07.2000, Azimuth 120.5, Sonnenhöhe 62.7, Wolkenbedeckungsgrad 70

Anhang

Tabelle 3: Auswertung der Geologischen Karte, Doppelblatt Qazvin & Rasht E3 & E5, 1: 250.000, bezüglich darin kartierter Massenbewegungen

	A	B	C	D	E	F
1	Geolog Schicht	Gesteinsart	MB darin	Klasse	zusammengefasste Klasse	MB darin
2					conglomerate	35
3	Q1al	alluvium	3	c	div	2
4	c	conglomerate	4	c	gypsum	2
5	aga	conglomerate	1	c	intrusiva	2
6	Jsc	conglomerate	3	c	limestones	38
7	Ngc	conglomerate, breccia	24	c	mudstones	40
8	Pd,r	Permian rocks	2	div	sandstones	7
9	gy	gypsum	2	g	tuffs	32
10	g	Granite	1	i	volcanic rocks	60
11	im	Monzonite	1	i		
12	Pr	limestone	6	l		
13	Jd,l	limestone	1	l		
14	K2l	limestone	12	l		
15	K1l	limestone	10	l		
16	Cm	limestone	1	l		
17	D	limestone, dolomitic	1	l		
18	Re	limestone, dolomitic	2	l		
19	Jks	limestone, sandstone	3	l		
20	Jkl	limestone, sandstone	2	l		
21	Ngm	mudstone, siltstone	9	m		
22	Js	mudstone, siltstone	31	m		
23	pCd	dolomite	1	s		
24	pCs	dolomite	2	s		
25	Pd	sandstone	1	s		
26	pC	sandstone	2	s		
27	pCz	sandstone, limestone	1	s		
28	t	tuff, acidic	7	t		
29	Pgkt	tuff, acidic, andesitic	22	t		
30	l	tuff, calcareous	3	t		
31	Q1v	basalt	1	v		
32	Pgkvi	lava, andesite	2	v		
33	Pgkv	lava, basic	46	v		
34	K2v	volcanics, basic	6	v		
35	K1v	volcanics, basic	5	v		

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Sample	GS(%)	MS(%)	FS(%)	GU(%)	MU(%)	FU(%)	T(%)
2	QA108/109/ 270 u. links	1,26	7,75	11,72	14,64	13,87	22,90	27,58
3	QA108/109/ 270 u. rechts	5,97	11,85	15,11	9,52	13,56	14,84	25,32
4	QA110/ 272 Mitte u.	8,57	8,28	10,20	10,22	12,34	17,75	14,73
5	QA111/ 273 Mitte o. bewachsen	4,86	8,05	8,72	6,68	11,19	17,19	19,58
6	QA111/ 273 Mitte o. unbewachsen	1,19	6,82	14,60	11,32	14,29	15,32	21,00
7	QA112/ 274 B/Feinm	14,05	16,58	14,65	13,33	10,05	15,01	9,90
8	QA112/ 274 oben	11,31	12,93	16,05	2,89	1,38	21,76	14,86

Tabelle 4: ▲ Auswertung des Korngrößenspektrums der im Testgebiet 2002 genommenen Bodenproben

Attributes of GPS_Punkte_Testgebiet						
FID	Shape*	RECNUM	NAME	LAT	LON	ALTITUDE
0	Point	6	A1	4025502,00	428513,00	2138
1	Point	7	A2	4026989,00	428855,00	2289
2	Point	8	A3	4028125,00	429758,00	2177
3	Point	9	A4	4029832,00	431332,00	1914
4	Point	19	AL1	4027374,00	429182,00	2380
5	Point	20	AL10	4030288,00	433245,00	1673
6	Point	21	AL2	4028036,00	429256,00	2330
7	Point	22	AL3	4028121,00	429219,00	2324
8	Point	23	AL4	4028079,00	429649,00	2276
9	Point	24	AL5	4028335,00	429877,00	2186
10	Point	25	AL6	4028940,00	430242,00	2107
11	Point	26	AL7	4028833,00	430101,00	2129
12	Point	27	AL8	4029046,00	430690,00	1969
13	Point	28	AL9	4028902,00	430828,00	2046
14	Point	52	BOD1	4028529,00	429987,00	2108
15	Point	65	BU1	4021997,00	425111,00	1608
16	Point	67	BU2	4023503,00	427269,00	1761
17	Point	68	BU3	4024781,00	428068,00	1952
18	Point	69	BU4	4026146,00	429182,00	2214
19	Point	70	BU5	4027007,00	428842,00	2341
20	Point	71	BU6	4027969,00	429130,00	2317
21	Point	72	BU7	4028913,00	430222,00	2068
22	Point	73	BU8	4029791,00	432381,00	1810
23	Point	74	BU9	4030314,00	433316,00	1610
24	Point	734	FLECHa	4029246,00	430844,00	1886
25	Point	1001	KKRUST	4030340,00	432221,00	1719
26	Point	1210	QA108	4029994,00	433374,00	1491
27	Point	1211	QA109	4029858,00	433503,00	1553
28	Point	1213	QA110	4029770,00	433559,00	1591
29	Point	1214	QA111	4029597,00	433667,00	1683
30	Point	1215	QA112	4029521,00	433767,00	1741
31	Point	1229	QA125	4022000,00	440290,00	2570
32	Point	1329	QA93	4022028,00	424241,00	1607
33	Point	1330	QA94	4022136,00	424346,00	1617
34	Point	1331	QA95	4030398,00	432322,00	1761
35	Point	1332	QA96	4033352,00	435180,00	1239
36	Point	1543	TRENN1	4029766,00	431386,00	1906
37	Point	1613	X01	4030636,00	432349,00	1664

Tabelle 5: ◀ Koordinaten der im Testgebiet im Jahr 2002 genommenen GPS-Punkte

Begriffssammlung zu Massenbewegungen: Formen- und Prozessansprachen

Der folgende Index enthält eine kleine Auswahl gängiger Begriffe, die mit Massenbewegungen in Verbindung stehen. Sie sind einigen Lehrbüchern und insbesondere dem Diercke-Wörterbuch Allgemeine Geographie (LESER 1997) oder dem Geologischen Wörterbuch (MURAWSKI & MEYER 1998) entnommen oder diesen abgeglichen, wobei der Schwerpunkt auf dem geomorphologischen Aspekt ruht.

Vorbemerkung: Nicht ganz klar definiert ist das *betroffene Material* einer Massenbewegung. Es scheint eine Definitionsfrage zu sein, ob auch Wasser oder Schnee und Eis zu den Massenbewegungen zählen, diese Thematik wurde wohl durch die historische Entwicklung der geographischen Forschung zergliedert. Muren enthalten ja schon starke Wasseranteile, noch mehr die Wildbäche und dennoch werden beide auch unter dem Aspekt Massenbewegung relativ häufig besprochen. Ähnlich verhält es sich mit Lawinen, die Eingliederung in das Thema ist nicht ganz klar.

Auch die Akkumulationsgebiete sind nicht Bestandteil einer typischen Gliederung oder Klassifikation von Massenbewegung. Ebenfalls nicht geklärt erscheint der zu betrachtende Maßstab einer Massenbewegung: ob Kammeis, Solifluktion und ähnliche Prozesse auch hierzu gehören, ist durch unregelmäßige Erwähnung in den gängigen Lehrbüchern nicht ganz festgelegt.

Der Begriff Massenbewegung wird in dieser Arbeit unter dem gravitativen Aspekt betrachtet. Gravitative Prozesse gehen jedoch sehr häufig auch mit anderen Prozessen, z.B. des Wassers oder auch des Schnees und des Eises, einher. Auch ist in einigen Lehrbüchern (KUGLER & SCHAUB 1997) der Begriff Massenbewegung nicht als alleiniges Phänomen rein gravitativer, sondern auch kryogener Prozesse zu finden: Begriffe wie Kryoturbation, Eiskeile, Toteissenken, Taschenböden und Auslaugungstäler würden hier jedoch nicht dem Rahmen der Arbeit entsprechen.

Abrissnische: größere oder kleiner Hohlform an Hängen, entstanden durch Herausbrechen bzw. Herausstürzen von Gesteinsmaterial. Der Abrissnische wird oft ein Ablagerungsgebiet zugeordnet.

Bergbausenken: oberflächlicher Einbruch anthropogen geschaffener Hohlräume, wie etwa Bergbaustollen.

Berggrutsch: gleitende gravitative Massenbewegung, die größere Hangteile erfasst. Kommt häufig in wechsellagernden Sedimenten oder Gesteinen mit wechselndem Feuchtegehalt vor.

Bergschliff: entspricht praktisch dem Bergsturz. Der Begriff wird jedoch eher bei kleineren Formen angewandt, ohne dass ein Maßstab festgelegt ist.

Bergsturz: Der Sturz überwiegt dem Gleiten als Bewegungsform, charakteristische Formen entstehen mit gliederbarem Profil. Oben entsteht eine markante *Abrissnische* und am Ende der Sturzbahn eine oft große Akkumulationsform. Das unruhige Relief der Ablagerung wird als *Tomalandschaft* bezeichnet. Bergstürze geschehen oft plötzlich, katastrophenartig, und sind in den Alpen verbreitet.

Bergsturzmoräne: Bergstürze, welche auf Gletscher niedergehen und sich dort auf der Oberfläche akkumulieren. Der Charakter der Bergsturzmasse bleibt auch nach dem Transport als *Wandermoräne* noch länger erhalten.

Bergsturzsee: von einem Bergsturz in einem Fließgewässer aufgedämmter See mit Zu- und Ablauf. Hält die Aufdämmung dem sich aufstauenden Fluss nicht stand, ist ein katastrophenartiges Entleeren möglich.

Bergzerreißungsfelder: (Blockbewegungen, mountain splitting areas) Sie bezeichnen das Ablösen mächtiger Teile von Deckplatten an den Rändern von Gesteinsplatten und sie lösen meist *Schuttströme* oder *Muren* als Folge aus.

Blockgletscher: gletscherförmige, mit gefrorenem Wasser durchsetzte Block- und Schuttakkumulation geringer Bewegungsintensität im oder vor dem Bereich des Permafrostes. Mitunter werden auch Bergsturzmassen, welche Gletscherreste oder Permafrost bedecken, so bezeichnet.

Blockstrom: Ablagerung, die durch gravitative und periglaziale Materialbewegung aus einem petrographisch anderen Bereich bewegt wurde.

Blocksturz: *Definition unklar*

Bodenfließen: Sammelbezeichnung für Bodenbewegungen, der Zustand der Vegetation ist hierbei wichtig. Bodenfließen tritt als *Solifluktion* im Perglazial und als *sublivines Bodenfließen* auf.

Bodenkriechen: *Abgrenzung unklar*

Denudation: Sammelbezeichnung für den Abtrag an Hängen, gleich welchen geomorphologischen Prozesses. Des Weiteren in Mitteleuropa besonders für flächenhafte Abtragung im Gegensatz zur Erosion angewandt.

Erdfall: Hohlräum im Karst, in den das Deckgestein unter Auflast nachbricht.

Erdfließen: Denudation durch erhöhten Wassergehalt. Erdfließen kommt in Gang, wenn die Reibung im Materialinnern größer als an der Gleitfläche ist, wobei sich das Gleitmaterial ohne Aggregatsänderung bewegt. Eine der Formen des Erdfließens ist der *Erdschlupf*.

Erdrutsch: vgl. Bergrutsch, nur geht hier leicht bewegliches, erdiges Material in die Bewegung ein.

Erdschlupf: sie geschehen oft in wenig verfestigten Lockersediment- und Verwitterungsdecken auch ganz geringer Mächtigkeit und geraten durch Wasserdurchtränkung und Vegetationsentfernung in Instabilität. Erdschlupfe besitzen halbkreisförmige Abrissnischen und muldenförmige Gleitbahnen. Die Akkumulationsformen sind wulst- oder zungenförmig.

Erdstrom: wird nach dem Diercke-Wörterbuch synonym zu *Erdschlupf* verwendet.

Fanglomerat: auch Schlammbrekzie genannt, ist ein Grob sediment mit allenfalls kantengerundeten und schlecht sortierten Komponenten. Es weist, vergleichbar dem Geschiebe, Transport- und Bearbeitungsspuren an den Komponenten auf, wie z.B. Schrammen und Schlagmarken (pitted pebbles).

Felsdriften: (lateral spreading) steht für laterale

Bewegung von Felsmassen und bezeichnet eine mehrseitig gerichtete Massenbewegung (DIKAU et al. 1996).

Felsschlupf: *Abgrenzung unklar*

Felssturz: liegt in der Größenordnung zwischen Steinschlag und Bergsturz. Von Steilwänden brechen Felsblöcke einzeln oder vergesellschaftet ab.

Gekriech: langsame Bergab-Bewegung, vor allem bei tonigen Gesteinen und guter Durchfeuchtung.

Gleitung/ Gleitbewegung: Die Masse bewegt sich ohne Zustandsänderung fort, d.h. ohne Struktur und Zusammenhang zu verlieren.

Gullies and MB: "in both cases, the soil material frequently conditions the initiation and the development of the erosion process and, at the same time, is affected by them" (ZINCK et al. 2001).

Hakenslagen/ Hakenwerfen: hangabwärtiges Umbiegen der Schichtköpfe des Gebirges infolge von Hangbewegung, die Bäume zeigen *Säbelwuchs*. Ursache sind Kriechbewegungen der Hangschuttdecken.

Hangkriechen: flächenhafter Abtrag von Lockersedimenten und Verwitterungsdecken, im Unterschied zu Prozessen, die auf einzelne Reliefpartien beschränkt sind (KUGLER & SCHAUB 1997, S.173).

Hangrutschung: synonymer Begriff nach Diercke-Wörterbuch zu Rutschung

Hangsolifluktion: Solifluktion, die einen Beitrag zur Hangentwicklung bringt, also eine extreme Kleinform von Massenbewegung.

Kammeis: senkrecht zur Reliefoberfläche wachsende Eisnadeln heben Sand-, Grus- oder Steinpartikel in tageszeitlich auftretendem Frostwechsel an und lassen sie beim Tauvorgang zurückfallen. Auf Hängen geschieht damit eine Bewegung hangabwärts.

Kippung (Felskippung): vgl. Sturz, jedoch inklusive einer Rotationsbewegung

(Kryoturbation): gehört zu den kryogenen For-

mungsprozessen, die beispielsweise taschen-, tropfen- und faltenförmige Veränderungen des Bodensubstrates auch unter Mithilfe von gravitativen Prozessen bewirken.

Lawine: ruckhaftes und rasches Niedergehen von Schnee und Eis als gleitende, fließende, rollende Masse oder als aufgewirbelte Staubwolke auf einem Hang auf einer Gleitschicht aus Schnee oder anderem Untergrund (zu Lawinenklassifikationen und Definitionen siehe ZENKE 1999). Physikalische Ursachen sind die durch das Setzen der Schneedecke entstehenden Zug-, Druck- und Scherspannungen. Lawinen treten ab 10° Hangneigung, häufiger ab 20° Neigung auf.

Lawinenbahn: Geländestreifen, auf dem eine Lawine niedergeht.

Mure: Strom aus Wasser, Boden, Gesteinsschutt und Blöcken, wobei der feste Materialanteil überwiegt, der sich im Hochgebirge nach plötzlichen Starkregengüssen oder Schneeschmelzen an Hängen, in vorgezeichneten Tiefenlinien, z.B. Lawingleitbahnen oder in *Wildbächen*, meist sehr rasch zu Tal bewegt. Die Mure bewegt sich in Schüben, also ruckweise, oder auch in einem Durchgang. Der Ablauf des Prozesses wird als *Murgang* bezeichnet, der die Murenbahn glättet und ausschürft und Gesteinsbrocken ähnlich der Beanspruchung durch Eis/Gletschereis ritzt. Der Schlammstrom einer Mure bewegt sich in einem konvexen Querschnitt, wie auf einem Kegel, ähnlich einem Fluss – in der Mitte schneller als an den Rändern. Die Ablagerungsform ist der *Murkegel*. In den Alpen können Geschiebemengen von 10000 m³ bis zu einigen 100000 m³ mit Fließgeschwindigkeiten bis zu 60-70 km/h erreicht werden (RICKENMANN 2001, S. 161).

Murgang: Ablaufprozess einer Mure, der nach plötzlichen Starkregen oder Schneeschmelzen Schuttanhäufungen und –ströme in Wildbachkerben, die dort temporär abgelagert sind, wiederaufnimmt. Als Voraussetzungen gelten (RICKENMANN 2001, S. 161): ein relativ steiles Hanggefälle, 25° und mehr, zweitens mobilisierbares Lockermaterial, drittens großer Wassereintrag. Granulare Murgänge (debris flows oder stony debris flows): man geht davon aus, dass das Fließverhalten von den größeren Steinen bestimmt wird. Bei schlammstromartigen Murgängen (mudflows) herrscht bei einem Gemisch aus Wasser und Feinmaterial viskoplastisches

Fließverhalten vor.

Murkegel: Steilgeböschte Akkumulationsform der Mure, entsteht an der Ausmündung von der Wildbachkerbe oder Tiefenlinie in ein Haupttal und entspricht im Materialtyp einem *Fanglomerat*.

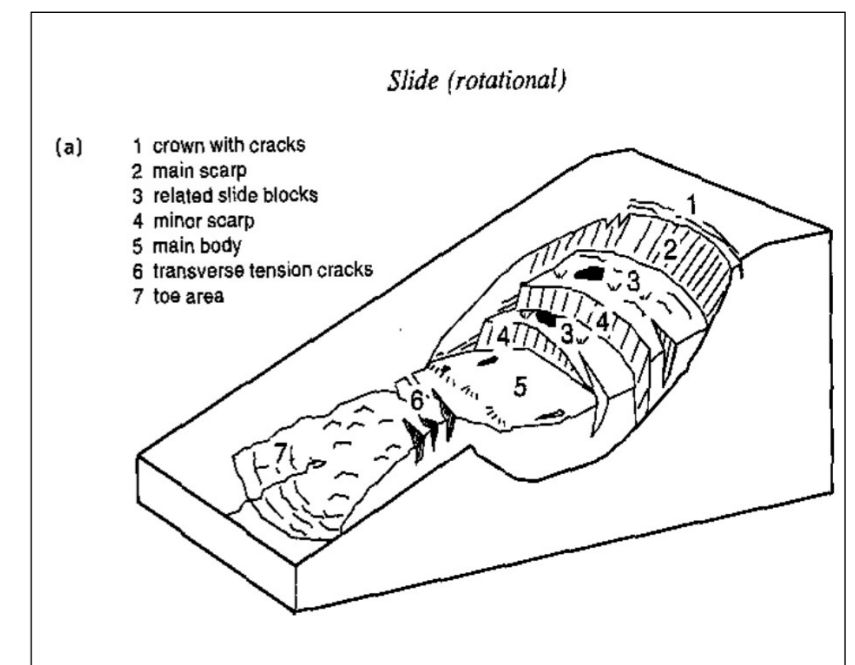
Oberflächenkriechen: *Abgrenzung unklar*

Rutschung: gleichzeitig Begriff für den Prozess und für die morphologische Form. Meist geschieht die Rutschung in Lockergestein oder Böden, die aus wasseraufnahmefähigen feinkörnigen Substraten bestehen und einen Instabilitätszustand durch zuviel Wasserzufuhr erfahren. Oft entsteht eine *halbmondförmige Abrissnische*, unterhalb der sich als Akkumulationsform der *Rutschungswulst* bildet. Sie treten häufig in den Flysch- und Schiefergebieten der Alpen auf, sowie in Ton- und Mergelgebieten sonstiger Regionen. Es werden auch nicht ganz korrekt oft andere Substratbewegungen unter dem Begriff Rutschung zusammengefasst, wie z.B. *Schlammströme*, *subsilvines Bodenfließen*, *Erdfließen*, u.a., andererseits sind die Übergänge zwischen den Begriffen oft fließend. Im übrigen wären der Vollständigkeit halber hier auch Rutschungen unter Wasser, also submarin, zu nennen.

Bemerkung: andere Massenbewegungsformen, wie etwa Murgänge oder Schuttströme, werden auch grob gegliedert, jedoch herrscht noch weniger Übereinkunft über die Ansprache der einzelnen Bereiche als bei der Rutschung, daher werden

Abb.: DIKAU et al. 1996, S.45:

Rutschungen werden morphologisch gegliedert, in: Krone/mit Rissen (crown with cracks), Haupt-Abrissnische (main scarp), zusammenhängende Rutschungsschollen (related slide blocks), Nebenabrissnische (minor scarp), Hauptrutschungskörper/ Gleitmasse (main body) mit Spannungsrissen und dem Fuß (toe area) als Akkumulationsbereich.



sie in dieser Arbeit nicht aufgenommen, es sei auf die entsprechende Literatur verwiesen, z.B. DIKAU (1996)

Sackung: Zusammendrückung/ Verdichtung eines oberflächennahen Untergrundes unter Belastung und Wassereinfluss. Damit können auch horizontale Boden- bzw. Materialbewegungen verbunden sein.

Schliff: Scholle aus Bodenmaterial o.ä., die Zusammenhang mit dem Untergrund aus gravitativen und/oder hygrischen Gründen verliert und in Fließ- bis Gleitbewegung übergeht, fördernd sind eine Unterlage aus mergeligem oder tonigem Material, das Einfallen der Schichten und die Hangneigung.

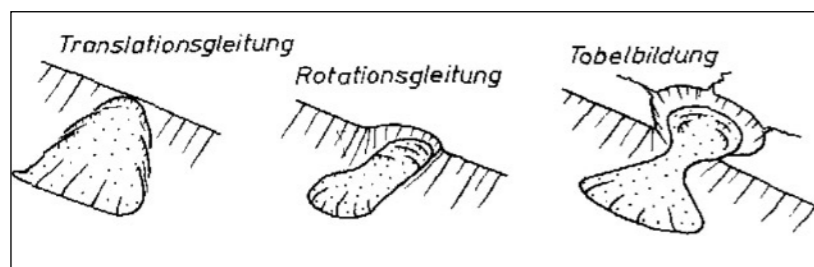
Schlammstrom: mit Wasser angereicherter Lockersedimentstrom, der als *Fanglomerat* abgelagert wird. Schlammstrom gibt es auch als Bezeichnung für Ascheströme oder für durch Vulkantätigkeit mitgeschleppte tonige Gesteinsmasse.

Schuttrutschung: *Abgrenzung unklar*

Schuttströme (earth flows): plastische, feinkörnige, fließende Massen, die sich unmerklich langsam bis mäßig schnell in Hangmulden oder Hangschnitten abwärts bewegen. Scharfe Begrenzungslinien trennen die oft gletscherähnliche Masse von nicht betroffenen Bereichen und passen sich dem Untergrund an, statt ihn zu deformieren. Häufig sind sie in Flyschgebieten anzutreffen: Hangneigungen überschreiten selten 15°.

Solifluktion: durch geringmächtiges Auftauen in Permafrost- oder Periglazialgebieten gerät aufgetauter Boden über immer noch gefrorener Unterlage in eine Kriech- oder Fließbewegung. Dies kann auch unter einer Vegetationsdecke geschehen. Voraussetzungen sind tages- oder jahreszeitliche Temperaturwechsel und Lockermaterial, welche charakteristische Boden- oder Vegetationsmuster (z.B. Frostmusterböden, Rasentreppen) auch schon bei geringer Hangneigung schaffen.

Abb.: EISBACHER & KLEY 2001, S.192: Gleitungsformen



Steinschlag: der plötzliche Absturz von Gesteinstrümmern, durch Frostsprengung, Durchfeuchtung und Temperaturwechsel vorbereitet. Die Steinschlaghäufigkeit ist tages- und jahreszeitlich geregelt, vor allem bei Witterungsumschwüngen oder im Zusammenhang mit intensiver Sonnenbestrahlung. Der Abgang von Steinschlägen erfolgt in *Steinschlagrinnen*, das sind mechanisch stark beanspruchte, sehr enge, steile Tiefenlinien, die sich durch Steinschlag bevorzugt an Rissen, Klüften und Spalten ausbilden. Unterhalb der Steinschläge bauen sich Schutthalden, Schuttkegel oder Schuttfächer auf.

Steinlawine: Erreicht ein Steinschlag größere Ausmaße, kann er auch als Steinlawine bezeichnet werden.

Sturzstrom: *Abgrenzung unklar*

subsilvines Bodenfließen: relevant vor allem für tropische Feuchtwälder, in denen wasserdurchtränkter Boden durch starke Niederschläge und chemische Verwitterung plastisch wird und ins Fließen gerät.

Talzuschiebe (sagging of mountain slopes): Dies sind großflächige und tiefgreifende Hangbewegungen mit einer tiefgreifenden Deformation der Gebirgshänge. Anders als bei Bergstürzen gibt es keine klar abgrenzbare Abrissnische oder Gleit- und Sturzbahn. Verformungen sind als kontinuierlich scheinend zu beobachten, die verformte Masse bleibt jedoch als Zusammenhang bewahrt.

Tobelbildung: hier im Sinne der Form einer *Schuttrutschung* (Gleitung) zu verstehen.

Tomalandschaft: Das unruhige Relief der Ablagerung eines Bergsturzes.

Versatzbewegung: nicht klar definiert, den Gleit- und Sturzbewegungen verwandt; es handelt sich um eine langsame Differentialbewegung größerer Massen.

Wanderschutt: wenn ein aus Gesteinsbruchstücken bestehender Gehängeschutt auf einem *Gekriech* beteiligt ist.

Wandrückverlegung: *Abgrenzung unklar*

abgegeben am: 20.11.2004

Erstkorrektor:
Zweitkorrektor:

Prof. Dr. Detlef Busche
Prof. Dr. Roland Baumhauer