

Rheinische Friedrich - Wilhelm - Universität Bonn

Geographische Institute

Arbeit zur Erlangung des Diploms im Fach Geographie

Methodischer Ansatz zur digitalen Erfassung und Auswertung
hangrutschungsbezogener Daten unter Zuhilfenahme von
Geo-Informationssystemen mit dem Ziel der Erstellung
einer Hangstabilitätskarte für den Bonner Raum
im Maßstab 1:25.000.

Referent: Prof. J. Grunert

vorgelegt am:

21.10.1994

von:

Volkhard S c h m a n k e

Endenicher Allee 17

53115 Bonn

Vorwort

Geo-Informationssysteme (GIS) finden aufgrund einer ständig wachsenden Informations- und Datenflut immer größeren Zuspruch. Ihre Verbreitung steigt rasant an und ihre Ausreifung steht kurz vor der Vollendung.

Dennoch treten immer wieder Schwierigkeiten im täglichen Umgang mit GIS auf, die vor allem auf mangelndes Fachwissen und unzureichende Kenntnisse über den Leistungsumfang dieser Systeme zurückzuführen sind.

Aus diesem Grunde soll mit dieser Arbeit anhand eines konkreten Beispiels versucht werden, dieses Informationsdefizit über GIS zumindest in Teilbereichen zu beseitigen, die Probleme beim Umgang mit GIS zu erläutern und die derzeitigen Möglichkeiten dieser neuartigen Technik aufzuzeigen.

Dabei rückt die Methodik, also die Vorgehensweise für die Lösung einer konkreten Fragestellung, in den Vordergrund. Ihr kommt im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Bedeutung zu.

Zu Anfang möchte ich mehreren Personen meinen Dank aussprechen, die durch ihre Unterstützung zur Verwirklichung dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich Herrn Prof. Dr. J. Grunert für die Begutachtung und Förderung dieser Arbeit, aber auch für die vielen Anregungen und Diskussionen, danken.

Ein weiterer Dank gilt Frau Dr. U. Hardenbicker für zahlreiche Ratschläge und die bereitgestellten Daten. Frau Kirschhausen für die Unterstützung bei der Datenaufnahme in das GIS und den Mitarbeitern der Firma GEOSPACE für die Hilfestellungen im Umgang mit GIS und den Ausdruck der Hangstabilitätskarte im Maßstab 1:25.000 gilt ebenfalls mein Dank.

Ganz besonders möchte ich mich aber bei meinen Eltern bedanken, die durch ihre großzügige Unterstützung meines Studiums diese Arbeit erst ermöglichten.

Bonn, im Oktober 1994

Volkhard Schmanke

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung.....	5
1.1 Vorstellung des Themas	5
1.2 Vorstellung der Hard- und Software.....	5
1.3 Einführung in die Problematik.....	6
1.4 Der gewählte Maßstab	7
2. Das Untersuchungsgebiet.....	9
2.1 Einführung und Abgrenzung	9
2.2 Geomorphologie und Geologie des Bonner Raumes.....	9
2.3 Hangrutschungen im Bonner Raum.....	13
3. Der Einsatz von Geo-Informationssystemen.....	21
3.1 Einführung in Geo-Informationssysteme.....	21
3.1.1 Historische Entwicklung von GIS.....	21
3.1.2 Forschungsstand in der GIS-Technologie.....	23
3.1.3 Vergleich Vektor- und Raster Datenmodelle	24
3.2 Das Geo-Informationssystem ATLAS*GIS	26
3.2.1 Aufbau und Funktionsumfang von ATLAS*GIS	26
3.2.2 Vor- und Nachteile von ATLAS*GIS.....	31
3.2.3 Digitale Aufnahme von hangrutschungsbezogenen Daten	31
3.2.3.1 Digitalisierung der Geologie.....	32
3.2.3.2 Digitalisierung der Isohypsen	35
3.2.3.3. Digitalisierung der Hangrutschungen	36
3.2.3.4 Digitalisierung der Hydrologie	39
3.3 Das Geo-Informationssystem IDRISI.....	41
3.3.1 Aufbau und Funktionsumfang von IDRISI.....	41
3.3.2 Vor- und Nachteile von IDRISI	42

3.3.3 Import von ATLAS*GIS Daten	43
3.3.3.1 Import der digitalisierten Isohypsen.....	43
3.3.4 Berechnung einer Höhengschichten-Karte.....	46
3.3.5 Berechnung einer Hangneigungskarte	48
3.3.5.1 Export nach ATLAS*GIS und Korrektur	49
3.4 Das digitale Höhenmodell (DHM) / Geländemodell (DGM)	51
3.4.1 Herstellung eines DHM aus Rasterlinien	52
3.4.2 Digitales Höhenmodell (DHM) und Geländemodell (DGM) mit IDRISI	52
3.5 Verschneidungstechniken in ATLAS*GIS.....	55
3.6 Die Hangstabilitätskarte.....	57
3.6.1 Forschungsstand bei der Erstellung von Gefahrenkarten / Hangstabilitätskarten.....	57
3.6.2 Ein neuer Weg zur Berechnung einer Hangstabilitätskarte.....	63
3.6.3 Entwicklung eines Flußdiagramms	65
3.6.3.1 Gewichtung der Morphometrie (Hangneigungen)	67
3.6.3.2 Gewichtung der Geologie (Gesteine, Substrate)	67
3.6.3.3 Gewichtung der Morphologie (Rutschungen).....	71
3.6.3.4 Gewichtung der Hydrologie (Vernässungen).....	71
3.6.3.5 Kombination (Verschneidung) der einzelnen Komponenten	71
3.6.4 Die Aussagekraft der berechneten Hangstabilitätskarte.....	73
3.6.5 Verbesserungsmöglichkeiten durch Erweiterung und Korrektur des Datensatzes.....	80
4. Ausblick	81
4.1 Weiterverarbeitung der Ergebnisse innerhalb einer Datenbank auf dem Hintergrund eines GIS	81
5. Zusammenfassung	89
6. Literaturverzeichnis.....	90
7. Kartengrundlage	100

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1 Vorstellung des Themas

Die vorliegende Arbeit versteht sich als ein Aufbauprojekt der seit 1988 durchgeführten Untersuchungen über Rutschungen im Bonner Raum. Erste Ergebnisse lieferte eine Arbeit von HARDENBICKER 1993/94. Dabei wurden zunächst die Rutschereignisse räumlich erfaßt, kartiert und datiert. Darauf aufbauend erfolgte die genaue Analyse einzelner Rutschungshänge (HARDENBICKER 1994, HAKE 1994, KIRSCHHAUSEN 1994 u.a.) im Hinblick auf Sedimentzusammensetzung, Geomorphologie und Horizontabfolgen.

Als weiterer Schritt soll nun der Wechsel von der empirischen auf die digitale Ebene erfolgen. Die große Menge empirisch erfaßter Daten zu den einzelnen Rutschungen eignet sich besonders für die Weiterverarbeitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS). Zum Einsatz kommen soll ein vektororientiertes GIS mit informellem und analytischem Charakter (ATLAS*GIS) und ein vorwiegend rasterorientiertes GIS mit erweitertem analytischen Funktionsumfang (IDRISI). Die Analyse mit der Erzeugung neuer Informationen aus bestehenden "Schichten" durch deren Verknüpfung (Overlay-Technik) steht dabei im Vordergrund (vgl. HEMENWAY 1989). Auf den speziellen Einsatz dieser Programmpakete wird im Laufe der Arbeit noch genauer eingegangen. Ziel der digitalen Aufarbeitung und Analyse der vorhandenen Daten ist die Erstellung einer Hangstabilitätskarte im Maßstab 1:25.000 für den Bonner Raum.

Der Methodik zur digitalen Erfassung, Aufarbeitung, Verschneidung und Klassifizierung der Daten innerhalb eines GIS wird im Rahmen dieser Arbeit eine hohe Bedeutung zukommen. Gerade der methodische Ansatz entscheidet über die Leistungsfähigkeit und Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse. Wird ein falscher Ansatz gewählt, so kann es leicht zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen. Aus diesem Grunde findet hier eine Methode Verwendung, die zwar auf den ersten Blick recht einfach erscheint, aber den Vorteil der leichten Durchschaubarkeit bietet und somit auch jederzeit nachvollziehbar ist. Sämtliche Schritte werden bis ins Detail erläutert und basieren auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und mathematischen Berechnungen (Algorithmen).

1.2 Vorstellung der Hard- und Software

Für die Aufarbeitung und Verwaltung der Daten, die durchzuführenden Berechnungen und die graphische Präsentation kam ein PC-System mit dem Betriebssystem DOS / Windows zum Einsatz. Die Geo-Informationssysteme ATLAS*GIS für DOS und IDRISI arbeiten unter MS-DOS, das nur für die graphische Aufarbeitung der Daten eingesetzte ATLAS*GIS für Windows benötigt zusätzlich die

Benutzeroberfläche MS-Windows. Fast alle Berechnungen konnten unter DOS zügig durchgeführt werden.

Ein 486'er Vesa-Local-Bus PC mit einer 212Mega-Byte Festplatte, 8MB Arbeitsspeicher und einer 1MB Vesa-Local-Bus Super-VGA-Grafikkarte erledigte seine Aufgaben weitestgehend zuverlässig. An die Grenzen seiner Möglichkeiten in Bezug auf die Geschwindigkeit stieß dieses System erst bei der komplexen Verschneidung der Vektorflächen. Hier waren teilweise Wartezeiten von fast einem Tag zu verzeichnen, wenn zwei stark differenzierte Layer übereinandergelegt wurden, um ihre Schnittflächen zu berechnen. Ausschließlich für die graphische Aufarbeitung (Erstellung von Computer-Karten) und Präsentation diente die noch nicht ganz ausgereifte Windows-Version von ATLAS*GIS. Die Ausdrücke lieferten zwei Farb-Tintenstrahldrucker (DIN A4: HP-Deskjet 560C; DIN A0: Novajet II).

Alle Berechnungen erfolgten entweder mit ATLAS*GIS für DOS oder IDRISI (ebenfalls DOS-Version).

Als Eingabegerät für die digitale Aufnahme der kartographischen Daten stand ein Summa-Sketch Professional III+ Digitalisiertablett zur Verfügung. Die Digitalisierung erfolgte auf einem DIN A3-Brett mit Hilfe einer Fadenkreuz-Maus. Da von jedem Meßtischblatt nur ein Ausschnitt benötigt wurde, konnte die Topographie und Geologie des gesamten Bonner Raumes in vier Durchgängen abdigitalisiert werden. Die Morphologie (Rutschungen) und Hydrologie (Vernässungszonen) erforderte aufgrund des größeren Maßstabes (1:10.000) und dem daraus resultierenden häufigen Wechsel der zu digitalisierenden Kartenblätter einen weitaus höheren Arbeitsaufwand. Hier wäre ein größeres Digitalisiertablett (Größe DIN A1) von wesentlichem Vorteil gewesen.

1.3 Einführung in die Problematik

Die Hanglagen des Bonner Raumes sind schon seit historischer Zeit von Massenbewegungen betroffen. Der dazu gehörende Formenschatz beschränkt sich neben der flächenhaften Abspülung hauptsächlich auf Rutschungen (Translations- und Rotationsrutschungen). Die Instabilität der Hänge entlang des Rheintales (linksrheinisch: Venusberg- u. Kottenforsthang, rechtsrheinisch: Westabhang Siebengebirge) und der kleineren Nebentäler (Hardtbachtal, Katzenlochbachtal, Melbtal, Godesberger Tal) führt aufgrund wachsender anthropogener Beanspruchung zu einer zunehmenden Gefährdung dieses stark besiedelten Raumes.

Die Auslöser und Ursachen für das Abrutschen eines Hanges sind weitestgehend erforscht worden. Sie lassen sich aufgrund ihrer Komplexität aber nicht mit traditionellen Arbeitsmethoden zu einer Hangstabilitätskarte verknüpfen. Deshalb wurde hier der Weg über die computergestützte Berechnung und Erzeugung einer Hangstabilitätskarte eingeschlagen.

Es bietet sich vorzugsweise die Verwendung eines Geo-Informationssystems an, in dem die erforderlichen Berechnungsmöglichkeiten integriert sind, aber auch die kartographische Aufarbeitung und Präsentation der Daten ermöglicht wird.

Schon seit Ende der siebziger Jahre versucht man mit Hilfe von computergestützten Modellen die Hangstabilität zu erfassen (Beispiel: CARRARA, CATALANO, SORRISO, REALI & OSSO 1978, HUMA & RADULESCO 1978).

Heute existieren zahlreiche Modelle, die allerdings immer zu sehr auf die vorhandenen Gegebenheiten spezifiziert wurden und somit im Normalfall nicht auf andere Räume übertragbar sind. Aus diesem Grunde soll im Rahmen dieser Arbeit ein stark vereinfachtes Modell entwickelt werden, das nicht nur auf den Bonner Raum, sondern ohne große Veränderungen auch auf andere Regionen anwendbar ist.

Deshalb erfolgte hier eine Beschränkung auf folgende Datensätze:

Geologie (Gesteine, Substrat)

Morphologie (Rutschungen)

Morphometrie (Hangneigung)

Hydrologie (Vernässungsstellen)

Diese vier Datenreihen sind auch in anderen Gebieten erfaßbar, müssen allerdings gegebenenfalls angepaßt werden (Beispiel: andere Geologische Einheiten oder Einsatz der Hangneigungsklassifikation für Hochgebirge anstatt für Mittelgebirge).

1.4 Der gewählte Maßstab

Innerhalb eines Geo-Informationssystems ist der Maßstab für das Kartenlayout normalerweise frei wählbar. Dennoch soll hier eine Richtgröße für den Maßstab festgelegt werden, um in der später berechneten Hangstabilitätskarte eine sinnvolle Auflösung zu erhalten. Am geeignetsten erschien die Festsetzung auf den Maßstab 1:25.000.

Folgende Gründe für diese Entscheidung sind hier anzuführen:

1. Das Kartenmaterial liegt zum Teil nicht in einem größeren Maßstab vor (z. B. Geologie). Deshalb sollte keine höhere Auflösung bzw. kein größerer Maßstab gewählt werden, da sonst Ungenauigkeiten auftreten.
2. Der Kartenmaßstab sollte bezüglich seiner Größe und detailgetreuen Wiedergabe der Ergebnisse festgelegt werden. Dafür bietet sich der Maßstab 1:25.000 geradezu an. Dennoch läßt sich innerhalb des GIS auch ein größerer Maßstab anwählen, um z.B. Teilgebiete besser analysieren zu können. Dies geht allerdings nur zu Lasten einer gewissen Ungenauigkeit.
3. Bei einem Maßstab von 1:25.000 entspricht 1cm in der Karte 250m in der Natur. Rutschungen weisen oftmals in ihrer Breite in etwa diese Größe auf, in ihrer Länge das Doppelte bis Dreifache.

Eine in der Karte dargestellte durchschnittliche Rutschungsfläche von 2 bis 3 cm² ist für das Auge somit noch gut sichtbar.

Vernässungszonen hingegen sind meistens kleiner dimensioniert, so daß ihre Auswirkungen auf die Stabilitätskarte bei einem Maßstab von 1:25.000 nur noch z.T. wiedererkannt werden können.

4. Die Hangneigung wurde auf der Basis eines 50x50m Rasters berechnet. Theoretisch könnten also Abweichungen von 50m entstehen, praktisch liegt der Wert aber deutlich unterhalb dieser Grenze (sonst wäre ein Pixel innerhalb der Hangneigungsberechnung völlig falsch berechnet worden). Die pixelähnliche Darstellung auch in der vektorisierten Form, bedingt durch die Rasterung in IDRISI, bewirkt zwar ein weniger schönes Layout der Hangstabilitätskarte, hat aber kaum Auswirkungen auf die korrekte Darstellung der Flächen, da 50m auf der Karte genau 2 mm entsprechen und somit kaum sichtbar sind. Bei der Wahl eines größeren Maßstabs müßte ein wesentlich kleineres Raster gewählt werden, um nach der Übertragung in die Vektorkarte nicht zu große Ungenauigkeiten zu erhalten.

Zuguterletzt sollte nicht unerwähnt bleiben, daß viele Karten (geologische-, topographische-, hydrologische Karten) im Maßstab 1:25.000 vorliegen und sich deshalb eine Übertragung der Ergebnisse z.B. durch das Hochzeichnen der Hangstabilitätskarte auf andere Karten anbietet.

2. Das Untersuchungsgebiet

2.1 Einführung und Abgrenzung

Der Bonner Raum gehört geomorphologisch gesehen zu einer Übergangslandschaft. Er befindet sich an der Grenze zwischen Rheinischem Schiefergebirge und Niederrheinischer Tieflandsbucht. Der Rhein bildet die zentrale Achse des Bonner Raumes, sein Taltrichter den Kernbereich dieser Region. Dieser Taltrichter, der auch als "Tiefebene der Köln-Bonner Bucht" bezeichnet wird, findet seine Begrenzung im Westen durch den steilen Hang der Ville, im Osten durch die Bergischen Randhöhen.

Die Abgrenzung der Untersuchungsgebiete erfolgte nach folgenden Kriterien:

1. Es sollten möglichst alle bisher erfaßten Rutschungen des Bonner Raumes mit in die Untersuchung einbezogen werden;
2. Hänge im Bereich des Bonner Raumes, die bis heute noch nicht geomorphologisch in Bezug auf Rutschungen kartiert wurden und möglicherweise eine potentielle Gefährdung aufgrund ihrer Instabilität aufweisen, sollten in der Berechnung einer Hangstabilitätskarte Berücksichtigung finden.

Zur Erfüllung der o.g. Kriterien wurden nun folgende Begrenzungen festgelegt:

Die westliche Begrenzungslinie sollte das Hardtbachtal in vollem Umfang mit einschließen (Rechtswert: 571200), die östliche den Steilabhang des Siebengebirges (Rechtswert: 588000). Im Norden wird das Untersuchungsgebiet von den nördlichsten Rutschungen bei Küdinghoven abgegrenzt (Hochwert: 5625200), im Süden durch das Godesberger Tal (Hochwert: 5611450). Daraus ergibt sich eine Gesamtfläche von 230,57 km², wobei 1,22 km² (0,53%) von Rutschungen betroffen sind.

2.2 Geomorphologie und Geologie des Bonner Raumes

Der Bonner Raum stellt wie schon erwähnt eine Übergangslandschaft zwischen Rheinischem Schiefergebirge und Niederrheinischer Tieflandsbucht dar. Von den fast ebenen Flächen des Rheintales, dessen Sohle ganz überwiegend von den Niederterrassen gebildet wird, steigt das Gelände westlich und östlich von Bonn stark an. Bewaldete Hänge leiten zu hochgelegenen Terrassenflächen über, deren bedeutendste als sogenannte jüngere Hauptterrasse westlich des Rheins die Hochfläche des Kottenforstes und der Ville und östlich des Rheins die viel kleinere Hochfläche von der Dollendorfer Hardt bis zum Ennert bildet. Zwischen Rheintal und Hauptterrasse sind lokal noch Zwischenflächen, die sog. Mittelterrassen, eingeschaltet. Linksrheinisch löst sich die breite Terrassentreppe südlich von Godesberg allmählich auf und geht in das Drachenfelder Ländchen über. Gleiches gilt für die rechtsrheinischen

Terrassenflächen. Sie stoßen im Süden auf das kuppenreiche Siebengebirge, das sie um mehr als 250m überragt. Aufgrund seiner Höhe von bis zu 460m (Großer Ölberg) und seiner isolierten Lage bildet das Siebengebirge die beherrschende Berggruppe im Bonner Raum.

Die Entwicklung des Bonner Raumes seit dem Paläozoikum:

Nach einer kurzen Erläuterung der älteren Erdgeschichte (Paläozoikum) soll vor allem die jüngere Erdgeschichte eingehend erläutert werden. Die Tertiärzeit nahm wesentlichen Einfluß auf die Geologische- und Geomorphologische Entwicklung des Bonner Raumes und bedarf einer ausführlicheren Abhandlung. Auf die Darstellung des Erdmittelalters (Mesozoikum) kann verzichtet werden, weil Gesteine aus dieser Zeit im Bonner Raum nicht vertreten sind.

a) Die Entwicklung seit dem Devon:

Die ältesten Gesteine im Bonner Raum stammen aus dem Devon (405-345 Mio. Jahre vor heute). Es handelt sich um quarzitisches Schiefer und Grauwacken der Siegener Schichten des Unterdevon, die im Süden den Anstieg zum Rheinischen Schiefergebirge bilden, im Norden jedoch tief unter den Meeresspiegel tauchen und von mächtigen, jungen Sedimenten bedeckt sind.

Während der variskischen Faltung an der Wende Unter/Oberkarbon, vor etwa 325 Mio. Jahren, wurden die flachliegenden devonischen Sedimente durch seitlichen Druck zusammengepreßt, verfaltet und z.T. geschiefert und somit in harte, metamorphe Gesteine umgewandelt. Durch die anschließenden, großräumig wirksamen tektonischen Vorgänge wurde die gesamte Region herausgehoben, wodurch das Rheinische Schiefergebirge in seiner ersten Anlage entstand. In dem darauf folgenden sehr langen Zeitraum von ca. 250 Mio. Jahren konnte die chemische Verwitterung das Gestein tief zersetzen und abtragen, so daß ein weitgehend eingerumpftes Gebirge mit schwach ausgeprägtem Relief übrigblieb (vgl. GRUNERT 1988 u. GLATTHAAR 1985).

b) Die Entwicklung im Mitteltertiär:

Im späten Mitteltertiär vor etwa 25 Mio. Jahren kam es zu Vulkanausbrüchen, so daß das Rheinische Schiefergebirge besonders in seinem nördlichen Teil im Tertiär eine große Reliefveränderung erfuhr. Der alten Abtragungslandschaft des devonischen Sockels wurden nun jüngere Stratovulkane (Siebengebirge) aufgesetzt.

Vor den Vulkanausbrüchen entstanden bei einer tiefgründigen Verwitterung der nichtquarzitisches Devongesteine kaolinitische Tone, die sich an günstigen Stellen bis heute erhalten haben (Nordrand der Kottenforstplatte bei Witterschlick und Röttgen, Ostrand der Kottenforstplatte bei Muffendorf, weiße

Tone am Himbrichsberg 2,5km westlich von Oberwinter, Oligozäntone im Raum Siegburg sowie vereinzelt Tone im Siebengebirge unter vulkanischen Gesteinen).

Vermutlich an der Wende Oligozän/Miozän setzte im Bereich der Niederrheinischen Bucht Bruchtektonik ein und zerlegte den Devonsockel entlang von Störungslinien in einzelne Schollen. Die charakteristische Horst- und Grabenstruktur des Bonner Raumes bildete sich in jener Zeit heraus.

In der gleichen Zeit begann im Siebengebirge die vulkanische Tätigkeit mit gewaltigen Trachyttuff-Eruptionen. Die Tuffdecken erreichten eine Mächtigkeit von 100-120m und bedeckten ein Areal von ca.100km². Im Anschluß drangen in den bereits bestehenden Förderschloten, aber auch in neuen Förderspalten der Reihe nach trachytische, latitische und schließlich basaltische Magmen auf. Sie gelangten jedoch nicht bis an die Oberfläche der Tuffbedeckung und blieben daher als Quell- oder Staukuppen in unterschiedlicher Höhe im Tuffmantel stecken (FRECHEN u. VIETEN 1970).

Im Jungtertiär und Quartär wurde der Tuffmantel weitgehend abgetragen. Die herauspräparierten harten Schlotfüllungen bilden heute zusammen mit dem um die Schlote erhalten gebliebenen Tuffmaterial die steilflankigen Kegelberge des Siebengebirges (s.a. Höhenmodell Kap. 3.4.2 Abb. 19).

Der Vulkanismus im Bereich des Rodderberges (193m) begann erst in der Würmkaltzeit vor ca. 30.000 Jahren: Die Vulkane besitzen im Gegensatz zu den Siebengebirgsvulkanen einen Ringwall aus Aschen und Schlacken, der eine flache, lößerfüllte Kraterdepression umschließt. Seine Auswurfmassen bedeckten im Hochwürm ein mehrere Quadratkilometer großes Gebiet (BARTELS & HARD 1974).

Das tiefe und rasche Einschneiden des Rheines seit dem mittleren Quartär führte zur intensiven Zerschneidung des Gebirges durch die nach Westen orientierten, sehr gefällsreichen Bäche. Neben der Entstehung enger Kerbtäler wurden die vulkanischen Quellkuppen als steile bis schroffe Formen herauspräpariert (Dominanz der oberen Hangneigungsklassen, siehe Hangneigungskarte Kap. 3.3.5 Abb. 17).

c) Die Entwicklung im Jungtertiär:

Im Untermiozän kam es aufgrund einer kurzzeitigen Hebung der Niederrheinischen Bucht, verbunden mit einem subtropisch warmfeuchten Klima, zur Ausbildung einer üppigen Sumpfvegetation, aus der die späteren Braunkohlelager hervorgingen. Vor und nach dieser Hebung sank die Niederrheinische Bucht allerdings großräumig ab und parallel dazu hob sich das Rheinische Schiefergebirge.

d) Die Entwicklung des unteren Mittelrheintals und der südlichen Niederrheinischen Bucht im Quartär (Kieseloolith- und Hauptterrassenzeit, Mittelterrassenzeit, Niederterrassenzeit und holozäne Talentwicklung):

Während der Kieseloolith- und Hauptterrassenzeit (Ende des Pliozäns vor ca. 2 Mio. Jahren) enthielt der Schotterkörper des muldenförmigen Rheintals fast ausschließlich Quarzkiese, die die Kieseloolithterrassen aufbauten.

Im Altquartär beschleunigten sich die Gebirgsbildung und die durch sie ausgelöste Eintiefung des Mittelrheins. Gleichzeitig trat eine nachhaltige Klimaverschlechterung ein, die in zyklischer Wechselfolge von Kalt- und Warmzeiten das ganze Quartär über anhielt (Beginn des Pleistozäns). Der ständige Klimawechsel führte zu Aufschüttungen des Rheins und seiner Nebentäler in den Kaltzeiten und Einschneidungen unmittelbar am Ende einer jeweiligen Kaltzeit.

Aus den eiszeitlichen Aufschüttungsflächen (Talböden) wurde nach der Einschneidung des Flusses und der Bildung von seitlichen Erosionskanten (Beispiel: östlicher Venusberg/Kottenforsthang) eine nicht mehr überflossene Terrasse mit einem morphologisch auffälligen Terrassenhang. Nachfolgende Staubanwehungen bedeckten diese Terrassen mit einer Lösschicht. Die bedeutendsten kaltzeitlichen Rheinterrassen dieses Zeitabschnittes sind die ältere und jüngere Hauptterrasse, die die wichtigsten Terrassen des Rheintals überhaupt darstellen.

Die Terrassenflächen besitzen in der Regel keinen Oberflächenabfluß, da das kiesig-sandige Sediment durchlässig ist und das Regenwasser rasch in die Tiefe dringt. Hier trifft es jedoch nach kurzem Sickerweg auf stauende Tertiärtonen, weil die Sedimentdecke der Hauptterrassen teilweise nur wenige Meter mächtig ist. Bei erschwertem Horizontalabfluß führt dies zu lokaler Staunässe, die häufig aber auch durch Pseudovergleyungen der verbreiteten Lößlehmdecke verursacht sein kann (Beispiel: Kottenforst, Venusberg). Große Teile der Hauptterrassenfläche, wie etwa der Kottenforst und die Ville, sind daher noch heute waldbedeckt.

In der Nähe der Terrassenränder kommt es dagegen zu einem Horizontalabfluß unter der Oberfläche und folglich zu Wasseraustritten am oberen Terrassenhang. Stellenweise ist hier ein durchgängiger Quellhorizont ausgebildet.

Auf der anderen Seite der Ville-Kottenforst-Hochfläche, unmittelbar südwestlich von Bonn, wurde zur gleichen Zeit (Mittelquartär) das ebenfalls schon im Miozän angelegte Bruchsystem aktiviert, wodurch auf engem Raum Schollen entstanden, die entlang der Nordnordwest-Südsüdost streichenden Bruchlinien eine kräftige ostwärtige Kippung erfuhren. Die heutigen Täler - Hardtbachtal, Katzenlochbachtal - lassen an ihrem asymmetrischen Querschnitt diese Untergrundstruktur deutlich erkennen (vgl. SIEGBURG 1987, FRÄNZLE 1969).

Östlich des Rheins kommt die Horst- und Grabenstruktur des Untergrundes in der Morphologie ebenfalls deutlich zum Ausdruck. Ähnlich dem Kreuzberghorst südwestlich von Bonn verläuft der von Hauptterrassenkiesen bedeckte Hardthorst auf der rechten Rheinseite mit scharfer Erosionskante parallel zum

Rhein. Er ist jedoch von mehreren Basaltintrusionen durchsetzt (Dollendorfer Hardt, Kuckstein, Rabenlay, Finkenberg, heute teilweise durch Steinbruchtätigkeit abgebaut).

Mit dem Ende der Bildungszeit der jüngeren Hauptterrasse im Mittelquartär verstärkte sich die Hebung des Schiefergebirges beträchtlich. Der Rhein wurde zu einer raschen Tiefenerosion gezwungen und es entstand das mittelhessische Engtal. Gleichzeitig bildeten sich im Zusammenspiel von hochkaltzeitlichen Aufschüttungs- und spätkaltzeitlichen Einschneidungsphasen die Mittel- und Niederterrassen (vgl. BIBUS 1980).

Die untere Mittelterrasse wird wegen ihrer recht großen Verbreitung auch als eigentliche oder als Mittelterrasse schlechthin bezeichnet. Ihre Sand-Kies-Aufschüttung erreicht bis zu 20m Mächtigkeit. Stellenweise wird die Terrasse von einer fast 10m mächtigen Lössschicht bedeckt. Die Niederterrassenflächen nehmen heute den größten Teil der Godesberg-Bonner Talbucht und der Köln-Bonner Tieflandsbucht ein und sind fast tischeben.

Mit der raschen Klimaerwärmung im Boreal, der nacheiszeitlichen Wärmezeit, schnitt sich der Rhein rasch tiefer in sein niederterrassenzeitliches Bett ein und fixierte seinen heutigen Lauf (vgl. GRUNERT 1988, GLATTHAAR 1985, FRÄNZLE 1969).

2.3 Hangrutschungen im Bonner Raum

An den steilen Talhängen des Rheins und seiner Nebentäler in der Umgebung von Bonn kam es in den letzten Jahren immer wieder zu Rutschereignissen. Sie wurden zumeist durch eine vermehrte Bautätigkeit in den Hanglagen ausgelöst.

Auch in historischer Zeit hat der Mensch schon durch bergbauliche Tätigkeiten in die natürliche Form der Bonner Hänge eingegriffen, wodurch es immer wieder zu Abrutschungen kam.

Begünstigt werden die Rutschungen durch folgende Faktoren: Junge, steile Talhänge, an denen tertiäre Tone und Feinsande sowie verwitterte devonische Schichten austreten, hangparallel verlaufende tektonische Störungen, verschiedene Grundwasserhorizonte in den tertiären Schichten und Regenperioden mit hohen Niederschlagssummen. Besonders rutschanfällig sind Hänge in vertonten, oligozänen Trachyttuffen.

Auslöser ist jedoch meistens der Mensch. Anthropogene Eingriffe wie Aufkippungen, Abgrabungen, Oberflächenversiegelung, nicht vorhandene oder falsch angelegte Drainage führen zu einer Reaktivierung alter Rutschungen oder Ausweitung vorhandener Rutschgebiete (vgl. HARDENBICKER 1994).

Waren früher fast ausschließlich Schädigungen in der Forstwirtschaft zu verzeichnen, so sind heute auch zunehmend besiedelte Gebiete in Hanglagen betroffen (Beispiel: Rutschung Bonn-Kessenich Bergstraße am Venusbergabhang 1937; Rutschung an der B42n bei Ramersdorf 1977; Rutschung am Alten Friedhof Ippendorf 1988 s. Abb. 2 u. Abb. 3). Die gesamte Infrastruktur wie Straßen (Beispiel: Rutschung an der

L261, s. Abb. 4), Wasserleitungen (Beispiel: Rutschung am Weinhaus Rüdenet bei Königswinter 1982) und Kanäle (Beispiel: Rutschung an der Quellenstraße in Bad Godesberg 1900/1901/1907) wird ebenfalls immer häufiger von Rutschereignissen in Mitleidenschaft gezogen (s. Tab. 1).

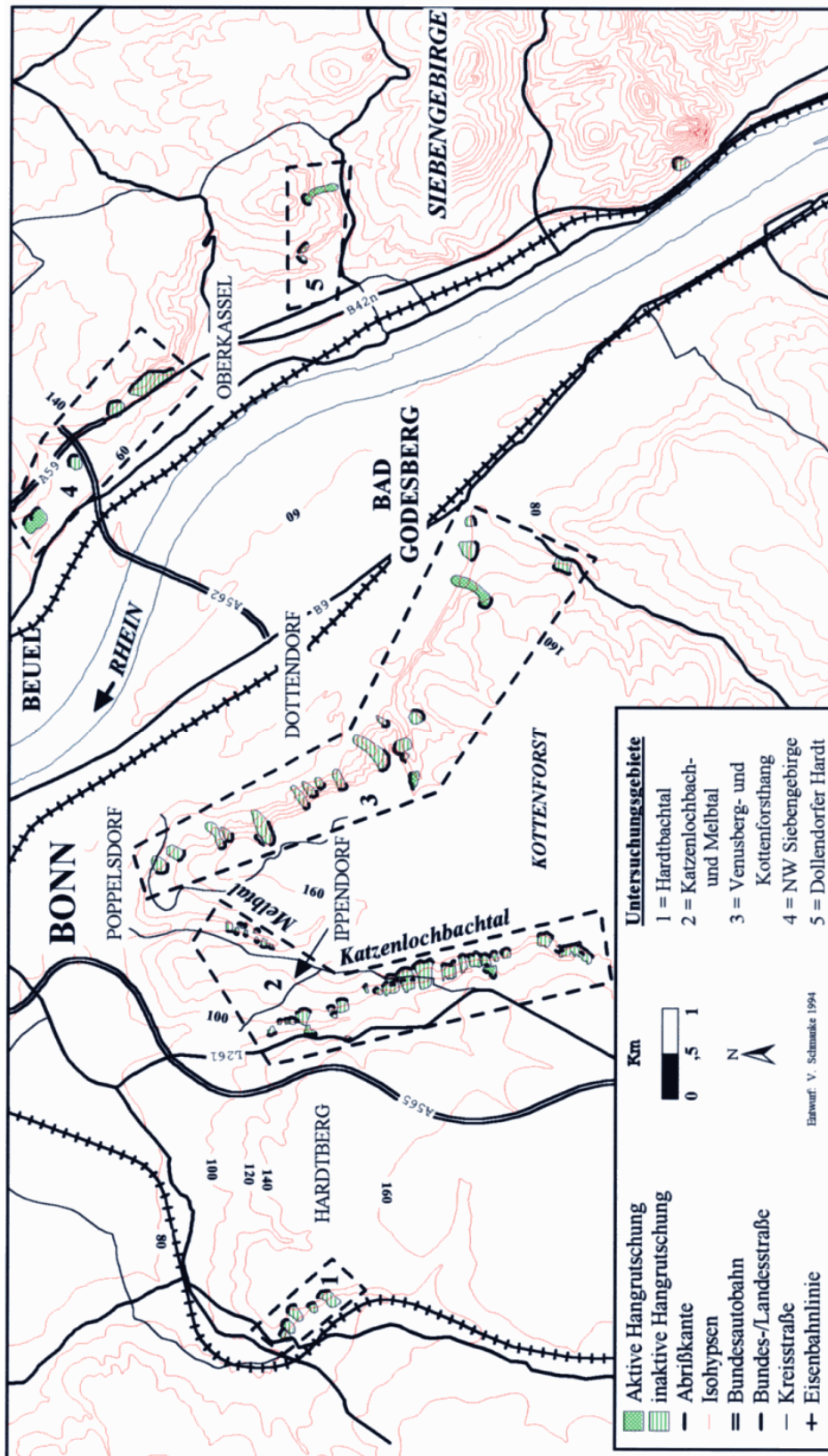


Abb. 1: Übersichtskarte des Bonner Raums, mit Untersuchungsgebieten



Abb. 2: Abrißgebiet der Rutschung am Alten Friedhof Ippendorf (1988)



Abb. 3: Abrißkante der Rutschung am Alten Friedhof Ippendorf (1988)

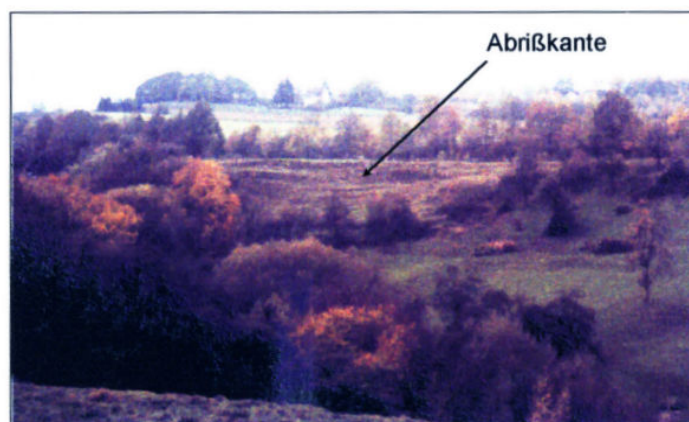


Abb. 4: Rutschung an der Landesstraße 261 (1988)

Nr.	Monat/Jahr	Ortsbezeichnung aufgetretener Rutschungen; Rutschungsschäden	Ursachen
1	Dez.1846	Oberwinter/Remagen, Unkeler Steinbruchsweg; Zerstörung der Landstraße und der Bahngleise	Anlage eines Steinbruchs, Auflast durch Haldenmaterial; Regenfälle
2	Winter 1859/60, 1862/63	Bad Godesberg, Schweinheimer Heide, "Im Saufrössel", unterhalb der Viktorshöhe	Durchfeuchtung, Auflast durch eine Halde ausgelaugter Alauntone
3	März 1876	Oberwinter Steinskante; Zerstörung der Straße und der Bahnanlage	langanhaltende Regenfälle
4	August 1900 Sept. 1901/ 1907	Bad Godesberg, Quellenstraße; Beschädigung von Fabrikgebäuden, der Straße und der Kanalisation	Anlage einer Tongrube, Ausschachtung einer Ziegelei, mangelhafte Entwässerung
5	Mai 1904	Bonn-Poppelsdorf, Lotharstraße (Ziegelei) bis zum Kloster am Venusberg, am Venusberghang; Beschädigung von Gebäuden und Wegen	Abbau eines Widerlagers durch eine Ziegelei
6	ab Frühjahr 1923 bis 1957	Witterschlick bei Bonn, Rutschungen am Berghang östlich vom Bahnhof Witterschlick; Zerstörung der Bahnanlagen, von Wegen und Mauern	Großräumige Abgrabungen, Aufschüttung und Tunnelanlagen im Rahmen des Tonabbaus
7	Feb./März 1926	Bad Godesberg, Ostrand des Burgfriedhofes; Zerstörung von Grabanlagen und Wegen	langanhaltende Regenfälle, Anlage von Gräbern (bis 2,5m tief)
8	Feb./März 1926	Lengsdorf, Provinzialstraße (L 261) zwischen Lengsdorf und Ückesdorf (erbaut 1865); teilweise Zerstörung der Straße	langanhaltende Regenfälle, künstliche Auflast durch Fahrbahndamm
9	Feb./März 1926	Dottendorf, in der Nähe der Straßenbahndienststelle, am Venusberghang	langanhaltende Regenfälle
10	März 1937	Kessenich, Bergstraße, Abhang des Venusberges; Zerstörung von Wasserleitungen, Mauern und Zäunen, Beschädigung von Straße und Häusern	starke Niederschläge, Wassereintritte
11	Juni 1961	Ippendorf, Am Mühlberg, Osthang des Melbtales; Freilegung der Hausfundamente, teilweise Zerstörung von Stützmauern	alte Rutschungen, starke Niederschläge Anfang Juni 1961, künstliche Auflast und veränderte Drainage
12	Nov.1963 bis heute	Bonn-Röttgen, Westhang des Katzenlochbaches; Zuschüttung des Baches, Gefährdung von Ortsteilen durch mögliche Flutwelle	Verfüllung der in den 30er Jahren stillgelegten Tongruben von Röttgen
13	1969-1970 bis heute	Bonn-Küdinghoven, Rutschung im Nordwestabschnitt des Friedhofes; Zerstörung von Grabanlagen, Risse an Gebäuden und Straßen	Aufschüttungen und Grabungen im Friedhofsbereich, alte Rutschungen
14	1957 u. 1972	Südhang der Dollendorfer Hardt, Siebengebirge; Zerstörung von Waldwegen und Vernichtung des Baumbestandes im Rutschbereich	alte Rutschungen, Anlage eines Wanderweges

15	ab 1971	Lengsdorf, Provinzialstraße (L 261), an gleicher Stelle wie 1926, erneuter Rutschungsbeginn; Abrißkante der Rutschung beschädigt Straße	künstliche Auflast durch Straßendamm
16	Juni/Juli 1977 bis heute	Umfangreiche Rutschungen zwischen dem Autobahnkreuz Bonn-Ost und der Anschlußstelle Königswinter (B42n) sowie im Bereich der Gemeinde Ramersdorf; erhebliche Schäden im Bereich der Baustelle, Beschädigung von Straßen und Gebäuden (z.B. Kommende Ramersdorf)	Aushubarbeiten im Zuge des Autobahnbaues, starke Veränderung der Hangmorphologie durch Basaltabbau (Basaltschutthalden) im vorigen Jahrhundert; alte Rutschungen
17	Anfang 1982	Rutschung am Westhang des Katzenlochbaches (gegenüber Rutschung an der Provinzialstraße, von 1988); Zuschüttung des Bachbettes	künstliche Aufschüttung von Erdmassen auf den Unterhang
18	ab 1982	Rutschung in Königswinter, am Westhang des Drachenfelsen, Weinhaus Rüdenet; Zerstörung des Hauses, Beschädigungen sowie Zerstörung von Weinberganlagen, Wegen, Mauern, Wasserleitungen und Bäumen	Flurbereinigungsmaßnahmen von 1979, langanhaltende Regenfälle des Winters 1981/82
19	Winter 1981/1982	Dollendorfer Hardt, Südwesthang, Rutschungen in Weinbergen; Zerstörung von Weinstöcken, Beschädigung der Wege	Terrassierung des Hanges; langanhaltende Niederschläge
20	Ende 1987	Rutschung in Bonn-Friesdorf, unterhalb des Annaberger Schlosses, am Ostabhang des Venusberges	Abraumhalden und Grabungen durch den Alaunbergbau Ende des vergangenen Jahrhunderts
21	April 1988	Bonn-Ippendorf, Ostrand des alten Friedhofes am Melbtal; Zerstörung von Grabanlagen und Wegen	alte Rutschungen, Grabarbeiten
22	April 1988	Lengsdorf, Provinzialstraße (L 261), 300 m nördlich der Rutschungen von 1926 und 1971; Aufstauungen des Baches	Halde, alte Rutschung, starke Niederschläge

Tabelle 1: Chronologie dokumentierter Rutschereignisse im Bonner Raum (HARDENBICKER 1994)

Die dokumentierten historischen und rezenten Rutschungen im Bonner Raum wurden zumeist durch massive menschliche Eingriffe (z.B. Bergbau, Straßenbau) ausgelöst. Die durch diese Rutschungen verursachten Schäden erregten öffentliches Interesse und waren nicht selten mit Rechtsstreitigkeiten und hohen finanziellen Aufwendungen verbunden; über Rutschungen in Waldgebieten und landwirtschaftlich genutzten Flächen gibt es weniger Quellen. Außer den eindeutig anthropogen ausgelösten Rutschungen liegen besonders an den übersteilten Hängen der kleinen Täler im Einzugsbereich des Rheins zahlreiche aktive, latente und fossile Rutschungen vor (vgl. HARDENBICKER 1994).

Eindeutig natürliche Ursachen besitzen sehr große prähistorische, fossile Rutschungen in vertonten Trachyttuffen am Fuß des Siebengebirges bei Oberkassel östlich von Bonn. Untersuchungen beim Bau der B42n ergaben, daß Trachyttuffe vermutlich schon im Spätglazial bis 100m weit über hochglaziale Flugsande und Sandlössse hinweggeglitten waren (HEITFELD, DÜLLMANN, VÖLTZ 1980). Bei Ausraumarbeiten geriet ein Teil des alten Rutschhangs erneut in Bewegung und mußte durch aufwendige Sanierung stabilisiert werden (MÜLLER 1987).

Fossile Rutschungen in tertiären Sedimenten, die von Lößlehm bedeckt sind, wurden am Ippendorfer Westhang von Bonn nachgewiesen (Ingenieurgeologisches Büro KAISER - KÜHN (Hrsg.) 1988 a).

Aufbau von Rutschungen:

Rutschungen besitzen in der Regel einen 30 - 100m langen, halbrunden, 3 - 10m tiefen Abriß am Oberhang, der durch sekundäre Nachbrüche nochmals unterteilt sein kann. Unterhalb des Abrisses folgt meist in gleicher Breite eine Hohlform, die besonders bei latenten Rutschungen stark vernässt sein kann. Das Verhältnis Breite zur Länge beträgt in der Regel 1:3, wobei die Längenausdehnung durch Erreichen der Talsohle beendet wird.

Die unteren Teile der Rutschungen sind meist markant durch Rutschungsloben geprägt, die der ehemaligen Hangoberfläche aufliegen. Sie zeichnen sich durch eine unruhige Oberfläche und meist starke Vernässung aus.

Am ursprünglichen Hang tritt ein Abrißgebiet (A) mit Abrißwand, Einzelschollen, Längsspalten und Zugrissen auf (s. Abb. 5). Im mittleren Rutschbereich (B), der eigentlichen Bewegungszone, geben seitliche Abrisse, Querrisse und wallartige Preßfugen Hinweise auf die Bewegungsrichtung. Kleinere Abrisse, Aufwölbungen, abflußlose Senken mit Naßstellen sowie Wassertümpel im mittleren Rutschungsbereich und in der Rutschungszunge können auf Sekundärrutschungen hinweisen.

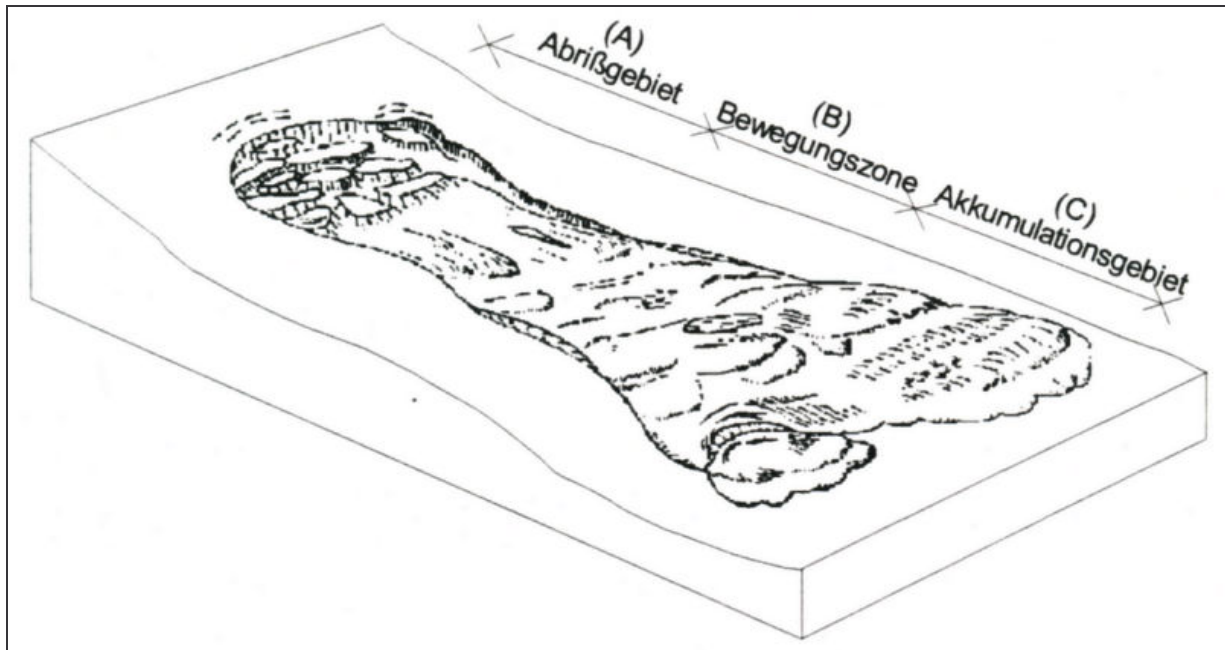


Abb. 5: Terminologie der Rutschungserscheinungen (KLENGEL & PASEK 1974)

Der Fuß der Rutschung (C), das sog. Akkumulationsgebiet, unterscheidet sich deutlich von benachbarten ungestörten Hangbereichen (vgl. KLENGEL & PASEK 1974).

In Abhängigkeit vom Wassergehalt der Rutschmassen kann der Rutschungsfuß nur gestaucht sein, walzenartig überschoben werden oder zungenförmig ausfließen. Die Rutschereignisse kündigen sich meist durch Spaltenbildung und Kriechbewegungen im Abrißgebiet an. Nach dem ersten größeren Rutschereignis vergrößert sich das Rutschgebiet in den folgenden Wochen und Monaten ständig, wobei vor allem hangabwärts liegende Hangbereiche, aber auch seitlich angrenzende und hangaufwärts liegende Hangbereiche von den Rutschbewegungen erfaßt werden (vgl. HARDENBICKER 1994).

3. Der Einsatz von Geo-Informationssystemen

3.1 Einführung in Geo-Informationssysteme

Ein Geo-Informationssystem stellt laut einer Definition von BILL / FRITSCH (1991) ein "rechnergestütztes System dar, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfaßt und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden."

Die in ein Informationssystem zu integrierenden Daten werden in drei Kategorien untergliedert:

1. Statistische Daten: Dazu gehören hauptsächlich die in einer Datenbank zu verwaltenden Daten. Sie sind also nicht unmittelbar in der Karte vorhanden, besitzen aber einen Raumbezug.
2. Objektbasierte Daten plus Attributdaten: Hierzu gehören linienhafte, punkthafte und flächenhafte Daten zur Darstellung von Objektklassen. Diesen Datentyp findet man vorwiegend in Vektorsystemen wieder.
3. Lagebasierte Daten: Hierbei wird ein Raster über die Landschaft gelegt, wobei jede Lage ein bestimmtes Charakteristikum hat. Bei diesen vorzugsweise in Vektorsystemen verwendeten Daten werden nicht die Objekte, sondern die Lage betrachtet.

Die Aufnahme der Daten in ein Geo-Informationssystem erfolgt entweder über die Digitalisierung, wobei die Koordinaten von Punkten, Linien oder Polygonen erfaßt und mit einem Attribut versehen werden, das Abscannen (Entstehung von Rasterbildern) mit der Option einer späteren Vektorisierung oder die direkte Übernahme von digitalen Bilddaten aus Luft- und Satellitenbildern.

Ihre Weiterverarbeitung und Analyse läßt u.a. Möglichkeiten der Datenmanipulation, Abstandsberechnungen, Oberflächenanalysen, räumliche Analysen, Bildverarbeitung und kartographische Modellierung zu.

Die Ausgabe und Darstellung der Daten erfolgte bis vor wenigen Jahren entweder in Rasterbildern (Schwarzweißbild, Farbbild, Blockbild, Blockbild mit Oberflächeninformation, 3D-Darstellung) oder Vektorgrafiken (Kombination von Punkt-, Linien- und Flächensignaturen, als Kartogramm, Kartodiagramm oder Isoliniendarstellung). In neuesten Geo-Informationssystemen werden diese beiden Darstellungsarten miteinander kombiniert (hybride Systeme).

3.1.1 Historische Entwicklung von GIS

Die Entwicklung von Geo-Informationssystemen (GIS) begann vor ca. 34 Jahren. R. F. TOMLINSON berichtet in seinem historischen Rückblick (vgl. TOMLINSON 1984), daß er im Jahre 1960 die Grundideen für ein GIS entwickelte, 1962 seine Vorschläge der Kanadischen Regierung unterbreitete und 1964 das erste polygonorientierte GIS, das Canadian Geographical Information System (CGIS), für das

"Agricultural Rehabilitation and Development Program" in Betrieb nahm. So wie heute noch in den meisten Fällen ging es darum, alle Informationen über die Landnutzung, die in Kartenform bereits existieren, im Computer digital zu speichern und für anschließende Übersichten und Analysen zu nutzen.

Mit zunächst etwas anderer Zielsetzung entwickelte sich fast gleichzeitig die rasterorientierte Computerkartographie, insbesondere am "Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis". Diese neue Technik fand ihre Fortsetzung in der Entwicklung von Geo-Informationssystemen auf Rasterbasis und führte zu einer Neuorientierung der amerikanischen Geographie ("quantitative Revolution", "Spatial Analysis"). 1972 wurde durch die "International Geographical Union" (IGU) die erste GIS Publikation herausgegeben (zwei Bände mit dem Titel "Geographical Data Handling"). Bald darauf begannen sich die Themen "GIS" und "Computerkartographie" in Lehre und Forschung an einigen amerikanischen Universitäten zu etablieren.

In Europa kam es bereits 1966 (also vor ca. 30 Jahren) am Geographischen Institut der Universität Zürich zur Entwicklung eines eigenen Computerkartographieprogrammes (GEOMAP). Daraus resultierte 1971 der erste Atlas mit Computerkarten, der "Computeratlas der Schweiz" (KILCHENMANN 1971).

Allgemein läßt sich die Entwicklung der Geo-Informationssysteme in Europa in drei Phasen einteilen (nach OTTENS 1991):

1. Pionier-Phase (Innovation): Die frühe Entwickler-Phase begann ca. 1965/70 und endete zwischen 1980 und 1985.
2. Reife-Phase: Die Spezialisierung und Kommerzialisierung nahm ihren Anfang ca. 1980/85 und wird wohl ihre Endphase ca. 1990/1995 erreichen.
3. Benutzungs-Phase: Aufbauend auf die Reife-Phase erfolgt der weitverbreitete Einsatz von Geo-Informationssystemen (Beginn: 1990/1995).

Diese Verbreitung spiegelt sich in einem weiten Spektrum von GIS-Disziplinen wieder (s. Abb. 6). Das Thema GIS ist jedenfalls heute eine ausgesprochen interdisziplinäre Angelegenheit. So finden sich Teilnehmer aus den verschiedensten wissenschaftlichen, institutionellen und privatwirtschaftlichen Bereichen zusammen und immer häufiger bilden sich interdisziplinäre Forschergruppen um ein gemeinsames fachübergreifendes Geo-Informationssystem.

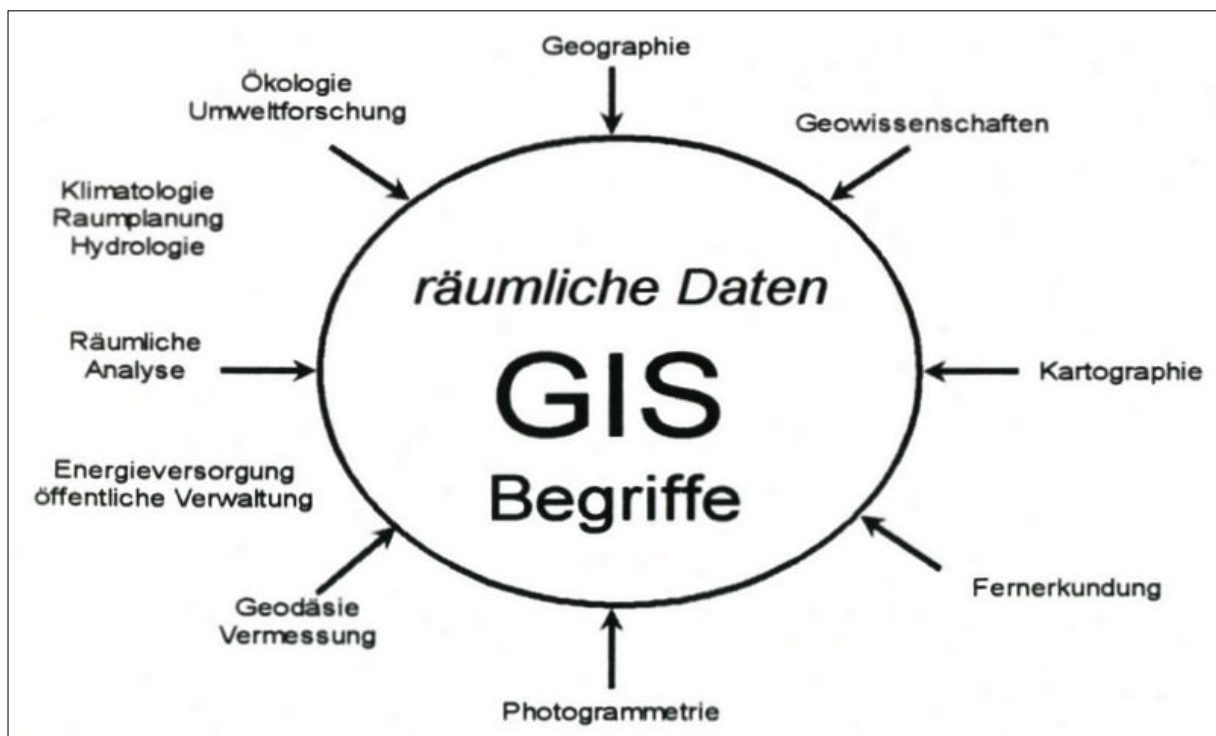


Abb. 6: GIS - Disziplinen - Begriffe (Kilchenmann 1992)

Einzelne Institute und Organisationen sind sicher auch im deutschsprachigen Raum bereits am Anfang der "Benutzungsphase", die durch den weitverbreiteten Einsatz der GIS-Technologie gekennzeichnet ist.

Durch immer leistungsfähigere Rechner werden die Einsatzmöglichkeiten der GIS-Technologie in Zukunft weiter ausgebaut werden können. Da die Ausgabegeräte (Drucker, Plotter etc.) immer billiger und besser werden, ist abzusehen, daß Geo-Informationssysteme die traditionellen Karten so ersetzen werden, wie z.B. elektronische Datenbanken die traditionellen Karteikästen.

Jeder, der bisher mit geographischen Daten und mit Karten gearbeitet hat, wird sich also überlegen müssen, wie er zukünftig die Vorteile der "digitalen, elektronischen Karte" in seinem Bereich nutzen kann und welche ganz neuen Möglichkeiten sich dadurch unter Umständen eröffnen (vgl. KILCHENMANN 1992).

3.1.2 Forschungsstand in der GIS-Technologie

In der heutigen Zeit erfordern starke Veränderungen in der Raumnutzung und in der Umwelt ein schnelles Erfassen komplexer Zusammenhänge. Dies trifft auch für die Geomorphologie zu. Die Nutzungsintensivierung im Alpenraum, die zunehmende Bebauung der Hangflächen in den Mittelgebirgen (Beispiel: Bonner Raum) und die sich abzeichnenden Umweltveränderungen werden im Bereich Naturgefahren flexible Schutzkonzepte erfordern. Geo-Informationssysteme eignen sich besonders für die

Ausarbeitung solcher Konzepte, da sie es u.a. erlauben, Daten kurzfristig nachzuführen (zu aktualisieren), Kombinationen verschiedener Datenebenen rasch durchzuführen und verschiedene Szenarien zu analysieren.

Trotzdem können die analytischen Möglichkeiten von Geo-Informationssystemen bis heute nicht voll ausgenutzt werden. Ein großer Aufwand besteht nach wie vor darin, die großräumig relevanten Grundlagendaten (z.B. Geologie) in einem angepaßten Detailierungsgrad zu erarbeiten. Dabei muß auch die Nutzung von hochauflösenden Satellitenbildern in Erwägung gezogen werden. Die Prozeß-Simulation steht bei verschiedenen geomorphologischen Prozessen noch in den Anfängen. Simulationsmodelle spielen jedoch in geomorphologischen GIS-Anwendungen eine wichtige Rolle. Desweiteren müssen Geo-Informationssysteme vermehrt in die geomorphologische Lehre und Forschung integriert werden. Durch einen breiten Einsatz solcher Systeme können sich die verschiedenen Sparten der Geomorphologie gegenseitig befruchten. So könnte beispielsweise eine digitale Weiterentwicklung der GMK-25 eine wertvolle Grundlage für die Prozeßsimulation darstellen. Die von DIKAU (1989) vorgeschlagene digitale geomorphologische Grundlagenkarte zeigt einen Versuch auf, wie dieser Schritt vollzogen werden könnte (vgl. MANI 1992).

Seit wenigen Jahren versucht man durch eine möglichst vollständige Vernetzung und der gleichzeitigen Anlage eines Datenpools das Problem der Datengrundlage zu beheben. Trotzdem existieren zumeist unüberwindbare Hindernisse, wenn es um den Datenaustausch geht, da die Programmvietfalt zu groß ist und aufgrund häufiger Inkompatibilitätsprobleme (fehlende Schnittstellen) ein sinnvoller Datenaustausch nicht möglich ist. Hier sind die Software-Entwickler gefragt, endlich Abhilfe zu schaffen, damit der Datenaustausch auf möglichst vielfältige Weise in unterschiedlichsten Geo-Informationssystemen gewährleistet wird.

3.1.3 Vergleich Vektor- und Raster Datenmodelle

Die beiden geläufigsten digitalen Verarbeitungsweisen von Daten, nämlich die auf Vektoren einerseits und die auf Rastern andererseits basierenden Systeme sollen in diesem Abschnitt gegeneinander gestellt werden (s. Abb. 7).

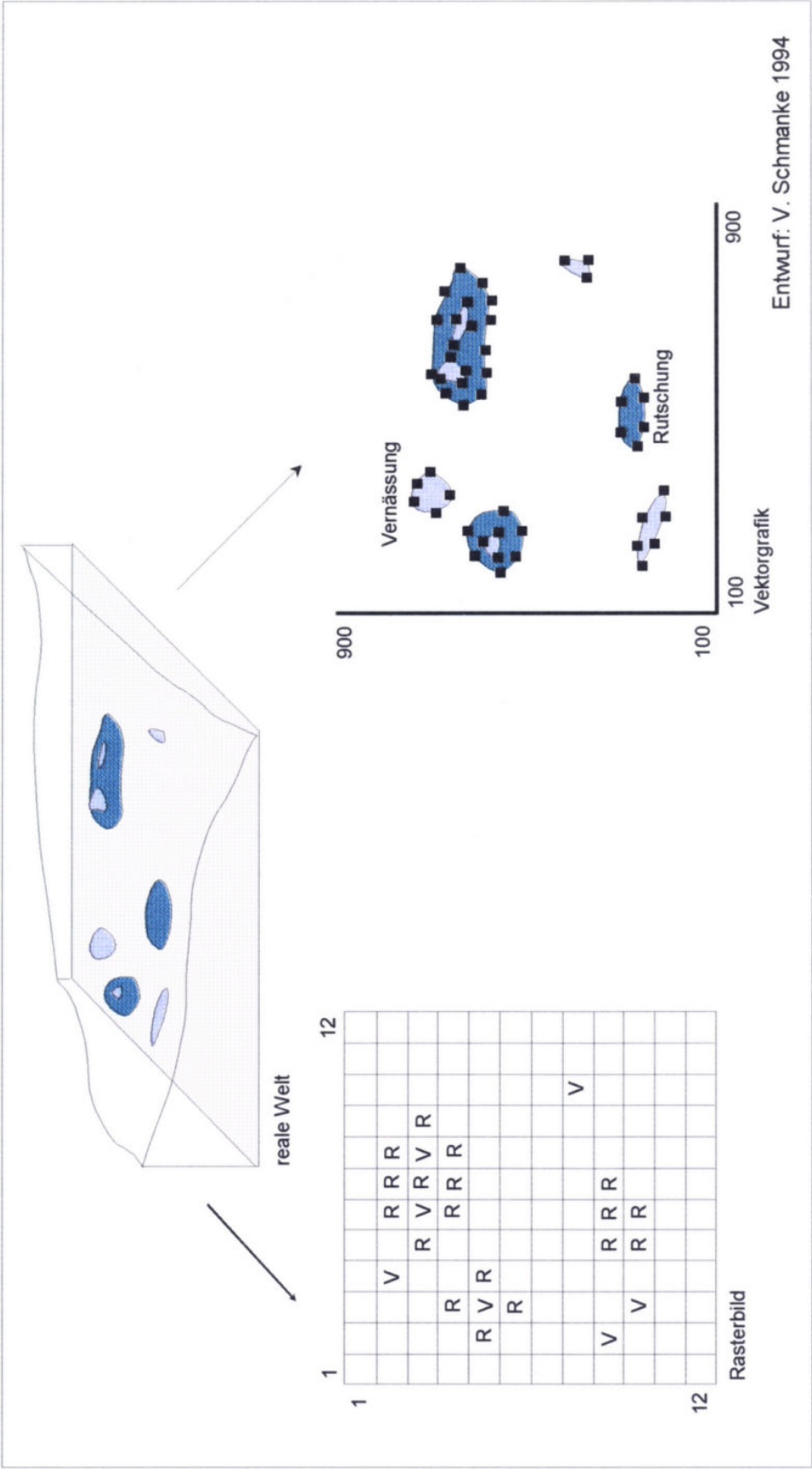


Abb. 7: Vergleich von Raster- und Vektorrepräsentation

Die Vorteile von Rastersystemen liegen insbesondere in der einfachen Datenstruktur, der großen räumlichen Variabilität, der leicht durchzuführenden Analyse räumlicher Daten sowie der unkomplizierten Verarbeitung und Berechnung von Daten im Bereich der Overlay-Operationen und Simulationen. Zudem existieren zu Rastersystemen in der Bildverarbeitung (z.B. Satellitenbilder) keinerlei Alternativen.

Die Nachteile dieses Systems liegen vor allem in den großen anfallenden Datenmengen, der schwierigen Erfassung topologischer Beziehungen sowie in der fehlenden geometrischen Genauigkeit und Transformation. Hinzu kommt die "unschöne" graphische Ausgabe, da jedes Bild eine deutliche Pixelstruktur beibehält.

Vektorsysteme zeichnen sich durch eine kompakte Datenstruktur, eine gute Repräsentation der Phänomenstruktur, gute Verarbeitungsmöglichkeiten bei Topologischen Karten und einfache Möglichkeiten zur Abfrage und Aktualisierung von Attributen aus. Ebenso können ohne großen Arbeitsaufwand Generalisierungen durchgeführt werden und die Kartenausgabe ähnelt sehr dem herkömmlichen Kartenlayout.

Nachteilig wirkt sich besonders die komplexe Datenstruktur aus. Desweiteren sind die Overlay-Funktionen zwar vielfältiger, aber dafür wesentlich schwieriger durchzuführen als bei Rastersystemen. Räumliche Analysen, Bildverarbeitung und Bildrepräsentation sind nur mit Einschränkungen möglich oder überhaupt nicht realisierbar.

Insgesamt läßt sich feststellen, daß beide Systeme sowohl Vor- als auch Nachteile implizieren. Man kann weder das Vektor- noch das Rastersystem favorisieren, ohne den Anwendungsbezug miteinzubeziehen. Erst bei einer konkreten geographischen Problemstellung und deren Lösungsansatz kann man durch Abwägung der Vor- und Nachteile eines der beiden Systeme favorisieren.

3.2 Das Geo-Informationssystem ATLAS*GIS

Mit dem Programm - Paket ATLAS*GIS ist seit 1990 ein leistungsfähiges und benutzerfreundliches vektororientiertes GIS der unteren Preiskategorie auf dem deutschen Markt. Die Software dient als Werkzeug zum Aufbau eines raumbezogenen Informationssystem, basierend auf einer dBase-kompatiblen Datenbank. Zudem bietet sie umfangreiche GIS-Analysefunktionen und eine thematische Kartographie. 1990 erhielt dieses GIS-Programm von der Association of American Geographers Microcomputer Specialty Group die Auszeichnung als das GIS des Jahres.

3.2.1 Aufbau und Funktionsumfang von ATLAS*GIS

Die wichtigsten Funktionen dieses GIS sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden. Im wesentlichen gliedert sich das Programm ATLAS*GIS in zehn Hauptbestandteile. Alle Befehle werden in der Hauptmenüleiste (soweit nicht manuell verändert) angesteuert:

FILE	Laden und Sichern der verschiedenen Dateiarten
VIEW	Änderung der Karten- und Blattdarstellung
SELECT	Auswahl und Verknüpfung von Merkmalen
EDIT	Bearbeitung von räumlichen Daten und Attributdaten
OPERATE	Analytische GIS-Funktionen
THEMATIC	Thematische Kartographie
DISPLAY	Kartengestaltung
CONFIGURE	Grundeinstellungen im Programm, für Digitalisiertabletts und Drucker
PRINT	Druckkommandos
HELP	"On line" - Hilfestellung

Der Menüpunkt FILE - die Datenverwaltung:

In ATLAS*GIS werden die räumlichen Kartenstrukturen als graphische Merkmale in sogenannten "Layern" abgelegt. Jede Datei verwaltet bis zu 250 solcher Themenebenen mit beliebig vielen Merkmalen in Form von Punkten, Linien und Flächen (Polygonzügen). Dies können z. B. Bodenprofile von Rutschungen (Punkte), Isohypsen (Linien) oder Vernässungszonen (Flächen) sein. Die klare Trennung von Punkten, Linien und Flächen bei der Digitalisierung, Verwaltung und Editierung graphischer Merkmale dient der Übersichtlichkeit der Themenebenen. Das Digitalisieren gestaltet sich durch diese Konzeption und durch Hilfsfunktionen, wie die Zugriffsmöglichkeit auf bestehende Scheitelpunkte einer Struktur oder die Bildung gemeinsamer Grenzlinien, sehr komfortabel. Eine aufwendige Nacharbeit, wie in anderer GIS-Software teilweise unvermeidlich, bleibt in ATLAS*GIS die Ausnahme.

Die Kartenthemen sind in unterschiedlichen Projektionen wie Albers, Lambert, Mercator usw. darstellbar. Zusätzlich lassen sich auf der Basis dieser Projektionen weitere Koordinatensysteme wie die in dieser Arbeit benutzte Gauß-Krüger Projektion definieren.

Die beschreibenden Attributinformationen werden in einer internen, dBase-kompatiblen relationalen Datenbank verwaltet. Bis zu 128 Sachthemen (= Zahl der Spalten in der Datenbank) mit beliebig vielen Einträgen können dies in jeder Datei sein. Diese Sachinformationen werden den räumlichen Informationen über eine Identitätsnummer zugeordnet. Das hat den Vorteil, daß sich beispielsweise den Rutschungsflächen Attributdateien mit unterschiedlichen thematischen Bezügen zuordnen lassen. Die erste Datenbank enthält allgemeine Informationen zur Rutschung selbst, die nächste Daten zu einzelnen Bodenprofilen, die dritte Daten zur Vegetation usw..

Punktbezogene Daten, wie z.B. Meßpunkte (Bodenprofile), können mit Lagekoordinaten in die Datenbank integriert werden.

Die Ergebnisse der GIS-Analyse und der thematisch-kartographischen Bearbeitung werden in ASCII-Kartendateien abgelegt.

Der Menüpunkt VIEW - die Ausschnittsbestimmung in Karten:

Dieses Hauptmenü erlaubt die interaktive Vergrößerung, Verkleinerung und Verschiebung des Kartenblattes, der Karte bzw. von Nebenkarten am Bildschirm. Ein neuer Kartenausschnitt wird z.B. über das Zoomen oder Verschieben des Bildausschnittes, Vorwahl einer Maßstabszahl, eines Bildmittelpunktes mit Radius oder über vorselektierte Merkmale festgelegt. So kann auf einfache Weise jeder beliebige Ausschnitt einer Karte mit exakter Maßstabsgröße angezeigt werden.

Der Menüpunkt SELECT - Auswahl und Verknüpfung von Merkmalen:

Beliebig viele Merkmale können in der Karte oder der Datenbank für die weitere Bearbeitung ausgewählt werden. Dazu gibt es verschiedene Hilfsfunktionen.

Gerade in der GIS-Analyse wird der SELECT-Menüpunkt zum wichtigen Hilfsmittel, wenn es um die Auswahl von Merkmalen anhand bestimmter topologischer Beziehungen und/oder Wertigkeiten von Datenbankeinträgen geht.

Der Menüpunkt EDIT - Bearbeitung von Dateieinträgen:

In diesem Menüpunkt wird zunächst einmal zwischen der Bearbeitung von räumlichen Strukturen in der Karte und der Editierung von Datenbankeinträgen unterschieden.

Punkte, Linien und Polygone werden als graphische Strukturen digitalisiert und den Themenebenen zugeordnet. Die Flächengröße und der Umfang von Polygonzügen sowie die Länge von Linien werden automatisch berechnet und in der Datenbank erfaßt. Ein blattschnittfreies Digitalisieren wird unterstützt.

Nachträglich können die graphischen Merkmale in vielfältiger Weise editiert werden, z.B. durch Addieren, Löschen oder Verändern von Scheitelpunkten in Linien und Polygonzügen, Löschen, Verändern, Kopieren, Drehen, Vergrößern, Verkleinern, Zusammenfassen und Teilen von Strukturen.

Die geometrische Lageanpassung von räumlichen Strukturen auch unterschiedlicher Ausgangsmaßstäbe erfolgt automatisch. Gegebenenfalls sind individuelle Anpassungen möglich, z.B. über Transformationsrechnungen.

Auch in der Datenbank gibt es umfangreiche Editierfunktionen: Suchen und Filtern von bestimmten Einträgen, Sortieren nach Rängen und Gewichtung von Eintragungen, Ergänzen und Löschen von Eintragungen, Verrechnung von Spalteneinträgen.

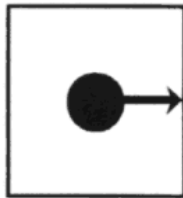
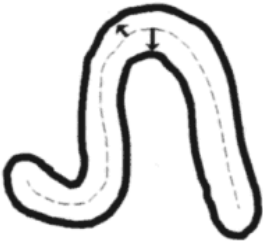
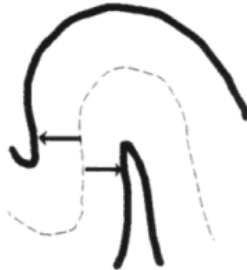
		
Punkt	Kreispufter	Quadratpufter
		
Linie	enger Linienpufter	breiter Linienpufter
		
Fläche	äußerer Flächenpufter	innerer Flächenpufter

Abb. 8: Zonengenerierung (BUFFERS) um die geomatischen Grundelemente (nach BILL / FRITSCH 1991)

Der Menüpunkt OPERATE - analytische GIS-Operationen:

Unter diesem Menüpunkt sind weitere wichtige GIS-Analysefunktionen aktivierbar. Dazu gehört z.B. die Geokodierung von punktbezogenen Sachdaten über das sogenannte "Address matching", die Bildung von

Distanzringen und -korridoren an Punkt-, Linien- und Flächenstrukturen (s. Abb. 8) sowie die Zusammenfassung und Verschneidung räumlicher Strukturen unter Umrechnung ihrer zugehörigen Sachinformationen. Angewendet werden soll diese Funktion vor allem bei der Berechnung der Hangstabilitätskarte durch die Verschneidung unterschiedlicher räumlicher Sachinformationen.

Der Menüpunkt THEMATIC - Thematische Kartographie:

Nach Vorauswahl der Datenbankinformationen für eine thematisch-kartographische Darstellung lassen sich die Statistik für die Variablen berechnen sowie die Legendenklassen und deren Signaturen editieren.

Der Menüpunkt DISPLAY - kartographische Ausgestaltung der Thematik:

Unter diesem Menübefehl werden alle weiteren Funktionen zur Kartengestaltung angesteuert. Für die Darstellung der räumlichen Strukturen und Sachdaten stehen zahlreiche Signaturen und Farben zur Verfügung. Strukturen können generalisiert werden, z.B. wenn der Formenschatz einer Rutschung nur im Maßstabsbereich 1:100 bis 1:1.000 sichtbar sein soll. Die Namen von räumlichen Strukturen können dabei auf unterschiedlichste Weise bezüglich ihrer Schriftart, Schriftgröße, Fett- und Kursivschrift usw. in der Karte positioniert werden.

Kartenbildelemente wie Titel, Legenden, Nebenkarten und Maßstab in der Karte können ebenfalls beliebig positioniert und gestaltet werden.

Freihandzeichnungen als Symbole, Linien, Kreise, Rechtecke, Polygone sowie Zusatztexte lassen sich leicht anordnen und editieren, absichern und wieder aufrufen. Ein graphischer Editor ermöglicht den Entwurf eigener Symbole, um z.B. den Formenschatz einer Rutschung in die Karte aufnehmen zu können.

Der Menüpunkt CONFIGURE - Grundeinstellungen:

Über diesen Befehl werden Grundeinstellungen im Programm, im Bildschirmaufbau, der Farbauswahlpalette, für die Maus, für das Digitalisiertablett und für die Druckausgabegeräte vorgenommen.

Der Menüpunkt PRINT - die Druckausgabe:

Karten lassen sich je nach angeschlossenem Printer oder Plotter bis zum DIN A0-Format ausgeben. Die Datenausgabe kann auch in Postscript, Computer Graphics Metafile (CGM) oder im HPGL-Format erfolgen. Ein Ausdruck von Datenbankauszügen ist ebenfalls möglich.

Der Menüpunkt HELP...

bietet eine "On-Line"-Hilfe an jeder beliebigen Programmstelle.

Hardwareanforderungen:

ATLAS*GIS läuft auf jedem IBM-kompatiblen PC, XT, AT, PS/2 unter DOS mit 540 K freiem Arbeitsspeicher. Die Software ist netzwerkfähig.

Für den Aufbau des GIS zum Themenkomplex Hangrutschungen wurde allerdings ein wesentlich leistungsfähigerer PC eingesetzt, um ein angenehmes, wenig zeitaufwendiges Arbeiten zu ermöglichen (Hardware-Ausstattung: s. Kap. 1.2).

3.2.2 Vor- und Nachteile von ATLAS*GIS

ATLAS*GIS zeichnet sich besonders durch eine hervorragende Digitalisierungsfunktion, sehr gute kartographische Ausgabemöglichkeiten, eine benutzerfreundliche Oberfläche mit leicht erlernbarer Handhabung der programmspezifischen Funktionen und eine integrierte dBase-kompatible Datenbank aus. Vergleicht man den Preis (ca. 3000DM) mit den Anschaffungskosten anderer GIS-Systeme, so fällt dieses Produkt eindeutig in den Low-Cost Bereich.

Trotz des recht guten Preis-Leistungsverhältnisses darf man aber nicht über einige Schwachstellen des Programmes hinwegsehen. So fehlen z.T. grundlegende mathematische Berechnungsfunktionen (z.B. Berechnung der Hangneigung und Exposition) ebenso wie das Anzeigen und / oder Verarbeiten von Bildern (Scans, Satellitenbilder etc.). Desweiteren sind die Verschneidungstechniken viel zu aufwendig und zeitintensiv. Vermisst wird auch die Erzeugung Digitaler Höhen- und Geländemodelle (DHM, DGM). Deshalb empfiehlt sich neben diesem auf Vektorbasis beruhenden Informationssystem noch ein Rastersystem einzusetzen, um geomorphologische Berechnungen durchführen zu können und Digitale Höhen- und Geländemodelle abzuleiten. Hier erwies sich die Kombination aus ATLAS*GIS und IDRISI mit zugehöriger integrierter Schnittstelle zwischen beiden Programmen als sehr sinnvoll, da beliebig importiert und exportiert werden konnte.

3.2.3 Digitale Aufnahme von hangrutschungsbezogenen Daten

Die Digitalisierung erfolgte mit einem in ATLAS*GIS integrierten Digitalisierungsprogramm. Als Hardware-Komponente diente ein DIN A3 Digitalisiertablett der Firma SummaSketch (SummaSketch Professional III+), um die Daten digital zu erfassen. Digitalisiert wurde mit einer 16-Tasten Fadenkreuz-Maus.

Um die Punkte lagetreu erfassen zu können, mußten zunächst das Tablett konfiguriert, das Koordinatensystem (Gauß-Krüger 2) und der Maßstab festgelegt sowie einige Paßpunkte digitalisiert werden. Danach wurden die zu digitalisierenden Flächen Punkt für Punkt mit der Fadenkreuz-Maus abgefahren und als Feature mit ID (Identifizier-Number) abgespeichert. Die Digitalisierung der Punkte erfolgte auf zweierlei Weise: Punkte oder Linien wurden entweder über das Abfahren von Linien auf Karten mit Hilfe der Fadenkreuz-Maus oder durch das Aufgreifen vorhandener Punkte und Linien innerhalb der digitalen Karte übernommen. Dies geschah mit einer Art SNAP-Mechanismus, wo der Anfangs- und Endpunkt einer digital abgespeicherten Linie markiert und über den Befehl COMMON-BORDER in das neue Feature übernommen wird.

Nach der Digitalisierung standen dem Anwender zahlreiche Bearbeitungswerkzeuge zur Verfügung, um die digitalisierten Formen abändern und korrigieren zu können. Die Layer-Einstellungen ließen sich beliebig editieren (z.B. Linienstil, Füllformen, Label-Zuordnung) zwecks Gestaltung eines optisch ansprechenden und sinnvollen Kartenlayouts für anschließende Präsentationen und Ausdrücke auf Printern.

3.2.3.1 Digitalisierung der Geologie

Die Digitalisierung der Geologie erfolgte im Maßstab 1:25.000. Die Maßstabsgröße war zum einen durch die vier verwendeten Geologischen Kartenblätter vorgegeben, zum anderen wäre eine höhere Auflösung aufgrund des stark erhöhten Speicherplatzbedarfes wenig angebracht gewesen. Die Darstellung der über 2 Megabyte großen Karte dauerte bei der Visualisierung einer Gesamtübersicht ca. 3 min, die Verwendung eines größeren Maßstabes hätte demzufolge durch die exponentielle Vergrößerung der Dateigröße ein sinnvolles Arbeiten kaum noch möglich gemacht. Desweiteren muß auch an dieser Stelle schon der spätere Rechenbedarf innerhalb der durchzuführenden Verschneidungen bei der Erstellung einer Hangstabilitätskarte berücksichtigt werden.

Als Kartengrundlage diente die Geologische Karte von Preußen und den benachbarten Bundesstaaten (bzw. 2. Auflage, geologisch unveränderter Nachdruck auf neuer topographischer Grundlage als: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen) 1:25.000 (GK 25).

- | | | |
|------|-------------------------|-------------------------------------|
| I) | Blatt 5208 Bonn | (Aufnahme 1911-16, erschienen 1923) |
| II) | Blatt 5209 Siegburg | (Aufnahme 1935, 2. Aufl. 1978) |
| III) | Blatt 5308 Godesberg | (Aufnahme 1902-15, 2. Auflage 1980) |
| IV) | Blatt 5309 Königswinter | (Aufnahme 1931, 2. Auflage 1978) |

Die Digitalisierung der Geologischen Formationen umfaßte 38 LAYER (Ebenen), wobei jeder Layer noch einmal in zahlreiche FEATURES (Flächen mit gleichen Attributen) untergliedert war (Abb. 9).

Nach der digitalen Aufnahme war zunächst eine Generalisierung der Formationen erforderlich. Mehrere Layer konnten aufgrund ihrer Ähnlichkeit zusammengeführt werden, da ihre unterschiedlichen Deklarierungen wohl weniger im vorhandenen Gestein oder Substrat lagen, sondern vielmehr in den großen Zeitspannen zwischen den Aufnahmen der verwendeten Kartenblätter zu suchen waren, was zu einem z.T. stark differierenden Legendenaufbau führte. Zusammengefaßt wurden die Layer *Dünensand* und *Flugdecksand* (neues Attribut: *Dünen-/Flugdecksand*), *Löß* (undifferenziert) und *Löß der Mittel- und Hauptterrasse* (neue Bezeichnung: *Löß/Lößlehm*), sowie *vulkanisches Lockergestein* und *Basalttuff* (neuer Layername: *Basalttuff*).

Im Anschluß an die Generalisierung wurden mit Hilfe von vorliegenden Untersuchungsergebnissen (Bohrungen) noch einige manuelle Korrekturen durchgeführt. So ist für die Anfälligkeit des Trachyttuffes in Bezug auf Rutschungen unbedingt eine Unterscheidung zwischen unverwittertem und verwittertem Trachyttuff erforderlich. Der unverwitterte Trachyttuff gehört zur Gruppe der nicht anfälligen Gesteine, der verwitterte Trachyttuff hingegen ist häufig in von Rutschungen betroffenen Gebieten anzutreffen und muß aufgrund wissenschaftlicher Erkenntnisse den stark rutschanfälligen Gesteinen zugeordnet werden. Deshalb wurden die durch vorliegende Gutachten bekannten Gebiete mit verwittertem Trachyttuff (Beispiel Rutschungsgebiet an der B42n bei Oberkassel) nachdigitalisiert bzw. korrigiert.

Eine weitere Korrektur war bei der Begrenzung der Talböden erforderlich. Die Breite der Talböden (Beispiel: Katzenlochbachtal, Melbtal) mußte z.T. um bis zu 50% verringert werden, um eine Angleichung an die realen Verhältnisse in den Tälern zu erreichen. Dabei wurden die frei werdenden Flächen den angrenzenden Geologischen Einheiten zugeordnet. Eine Richtlinie bei der Korrektur der Talböden bildeten die kartierten Rutschungen, die allesamt außerhalb von Talbodenflächen liegen. Mit dieser Hilfe konnte die richtige Größe der Talböden bestimmt werden, da in beiden Tälern zahlreiche Rutschungen kartiert sind.

Als ein entscheidender Nachteil bei der Digitalisierung der Geologie mit Hilfe der GK 25 - Kartengrundlage stellte sich das sehr unterschiedliche Kartenmaterial heraus. So differierten die Auflagezeitpunkte zwischen den einzelnen Geologischen Karten teils erheblich (Beispiel: Blatt 5208 Bonn -> jüngste Auflage 1923, Blatt Godesberg -> jüngste Auflage 1980), was sich in einem zum Teil stark voneinander abweichenden Kartenlayout bemerkbar machte. Diese Abweichungen setzten sich in der Legende fort, so daß schon die Kartierung aufgrund unterschiedlicher Legenden in einigen Bereichen ganz anders erfolgen mußte.

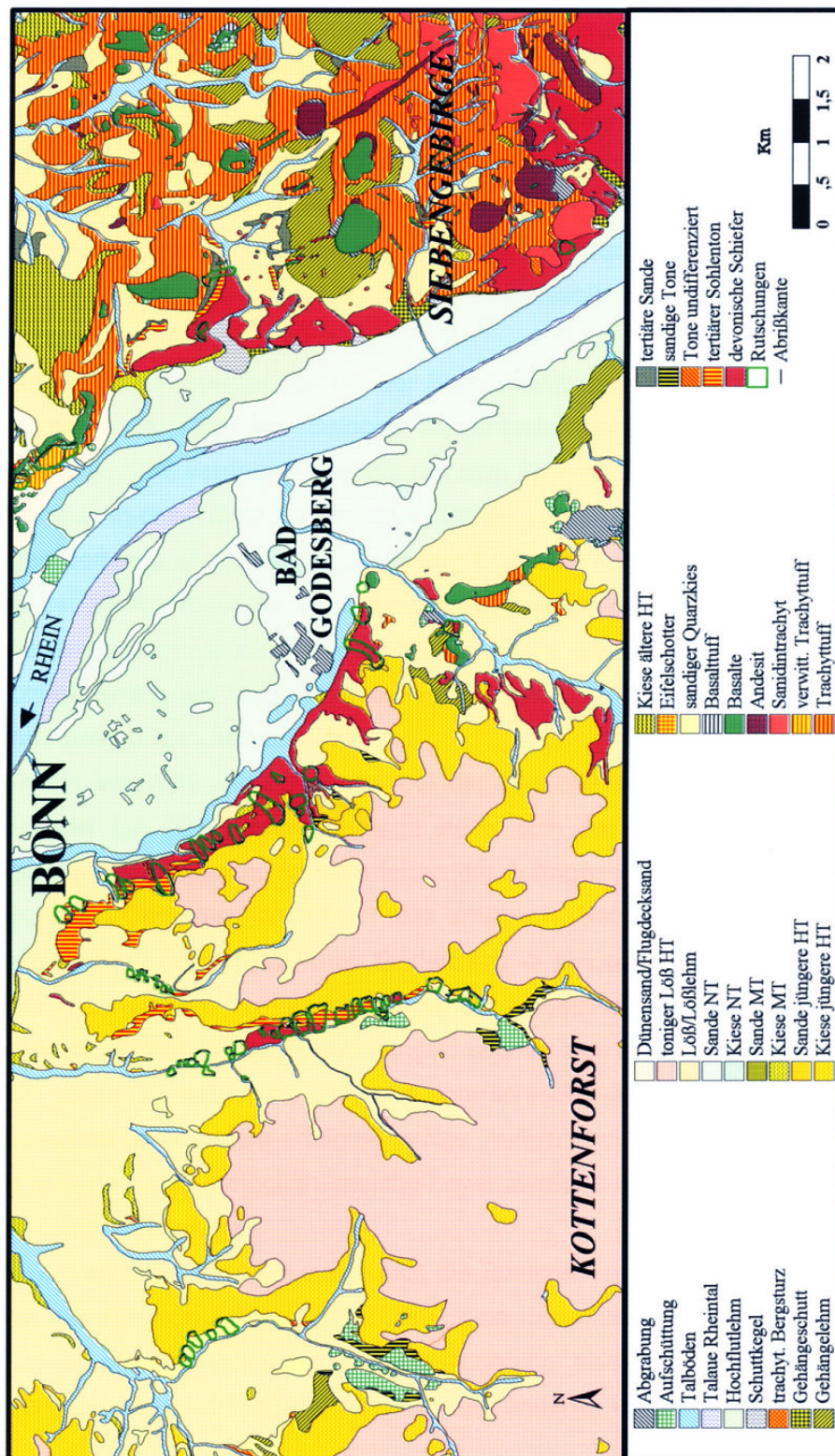


Abb. 9: Geologie und Rutschungen im Bonner Raum (Ausschnitt aus der digitalisierten Karte, Grundlage GK 25)

Aufgrund dieser Unterschiede war es teilweise fast unmöglich, gleiche Layer zweier benachbarter Kartenblätter zusammenzufügen.

Als ein weiteres Problem stellte sich die Speicherkapazität heraus. Zum einen war für jede Fläche (FEATURE) eine maximale Punktzahl von 4000 Punkten erlaubt, so daß bei großen Flächen nur noch eine Generalisierung (Verkleinerung der Punktdichte) half, zum anderen wurde die Gesamtdatei aufgrund der hohen Punktdichte so groß (> 3MB Speicherplatz), daß es zu häufigen Programmabstürzen schon während der Digitalisierung kam.

Beim späteren Ausdruck der Karten in ATLAS*GIS für WINDOWS konnten infolge einer programmtechnisch bedingten verminderten Schraffur-/ Texturauswahl viele Darstellungsformen der GK25 nicht berücksichtigt werden und mußten zwangsläufig durch andere Schraffuren oder Texturen ersetzt werden. Auch bei der Farbauswahl waren Einschränkungen vorgegeben. Das Programm stellte zwar jede beliebige Farbe aus einer Auswahl von 256 bzw. 64000 Farben korrekt am Bildschirm dar, doch im Druck reduzierte sich diese Farbauswahl auf wenige Farbelemente. Gerade Pastelltöne wurden beim Druck z.T. überhaupt nicht berücksichtigt, so daß die Geologische Karte ein wenig bunt ausfiel. Die Fehler im Ausdruck lagen vermutlich an einem falsch programmierten Druckertreiber.

3.2.3.2 Digitalisierung der Isohypsen

Die Digitalisierung der Isohypsen erfolgte wie bei der Geologischen Karte im Maßstab 1:25.000. Das verwendete Kartenmaterial bestand aus vier Kartenblättern der Topographischen Karte 1:25.000 (TK25) in der jeweils neuesten Auflage:

- | | | |
|------|-------------------------------|--------|
| I) | Blatt 5208 Bonn | (1990) |
| II) | Blatt 5209 Siegburg | (1990) |
| III) | Blatt 5308 Bonn-Bad Godesberg | (1990) |
| IV) | Blatt 5309 Königswinter | (1990) |

Als geeignete Intervallgröße für die spätere Darstellung in digitalen Karten, aber auch für die Berechnung eines Digitalen Höhenmodells, erwies sich ein Isohypsenabstand von 20m. Im Bereich der Kottenforstfläche war eine feinere Abstufung erforderlich, um die zu großen Abstände zwischen den Isohypsen (realer Abstand z.T. > 4km) zu kompensieren. Aus diesem Grunde erfolgte hier eine Ergänzung durch die 170m Isohypse.

Neben der besseren optischen Darstellung der Rutschungen in thematischen Karten wurden die digitalisierten Isohypsen für die Berechnung einer Hangneigungskarte und die Erzeugung eines Digitalen Höhenmodells (mit Hilfe des Programms IDRISI, siehe Kapitel 3.4.2) herangezogen.

Bei der Digitalisierung erwiesen sich die vier Kartenblätter der TK 25 als die am besten geeignete Kartengrundlage. Dennoch traten Probleme bei der Digitalisierung auf. So lagen in Bereichen mit großen Höhenunterschieden auf kleiner Fläche die Isohypsen oftmals zu dicht beieinander und erschwerten das Abfahren der Linien mit der Fadenkreuzmaus. Hinzu kam gerade in diesen Bereichen das teilweise

Aussetzten der Isohypsen in der Kartengrundlage, so daß eine zeitaufwendige Nachdigitalisierung der unterbrochenen Linien mit Hilfe der Interpolation erfolgen mußte.

3.2.3.3. Digitalisierung der Hangrutschungen

Bei der Digitalisierung der Hangrutschungen fand neben Aufzeichnungen aus Geländepraktika hauptsächlich die geomorphologische Kartierung von Frau Dr. U. HARDENBICKER im Rahmen Ihrer Promotion Berücksichtigung. Die einzelnen Rutschungen und Abrißkanten mußten allerdings zunächst in die TK 25 hochgezeichnet und teilweise generalisiert werden, um sie in das gewählte Koordinatensystem (Gauß-Krüger) übertragen zu können (Abb. 10 und Abb. 11). In der ursprünglichen Kartierung waren meistens keine Hoch- und Rechtswerte eingetragen, die zur Initialisierung jeder Informationsebene benötigt werden.

Bei der eigentlichen Digitalisierung erschien eine Aufsplittung in zwei Layer sinnvoll:

Layer I: Aktive Rutschungen (Rutschungen, die heute noch eine gewisse Bewegungsdynamik aufweisen)

Layer II: Inaktive Rutschungen (meist latente oder historische Rutschungen, heute nicht mehr in Bewegung).

Diese Untergliederung wurde bei der Berechnung der Hangstabilitätskarte (s. Kapitel 3.6) bedeutsam, wo die beiden Layer eine unterschiedliche Gewichtung erhielten.

Neben den Rutschungsflächen wurden auch die Abrißkanten jeder Rutschung in die digitale Karte aufgenommen. Sie dienen in erster Linie der besseren Visualisierung der Rutschungen und haben keinen Einfluß auf die Berechnung der Hangstabilitätskarte.

Leider sind im Bonner Raum bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht alle potentiellen Rutschgebiete auf Massenverlagerungen untersucht worden. Gerade das Siebengebirge und mehrere Täler südlich von Bad-Godesberg bedürfen einer Geomorphologischen Kartierung. Desweiteren sind einige Rutschungen aufgrund fehlender Erborung in ihrer Begrenzung bis heute nicht eindeutig fixiert. Als problematisch erweist sich auch die exakte Abgrenzung zwischen aktiven und inaktiven Rutschungen. Viele Rutschungen zeigen zwar Merkmale, die auf eine Bewegungsaktivität innerhalb der Rutschung hinweisen, sind aber dennoch schon vor Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten zum Stillstand gekommen. Hier wären Bewegungsmessungen mit Hilfe von Extensiometern notwendig, um eine eindeutige Aussage treffen zu können.

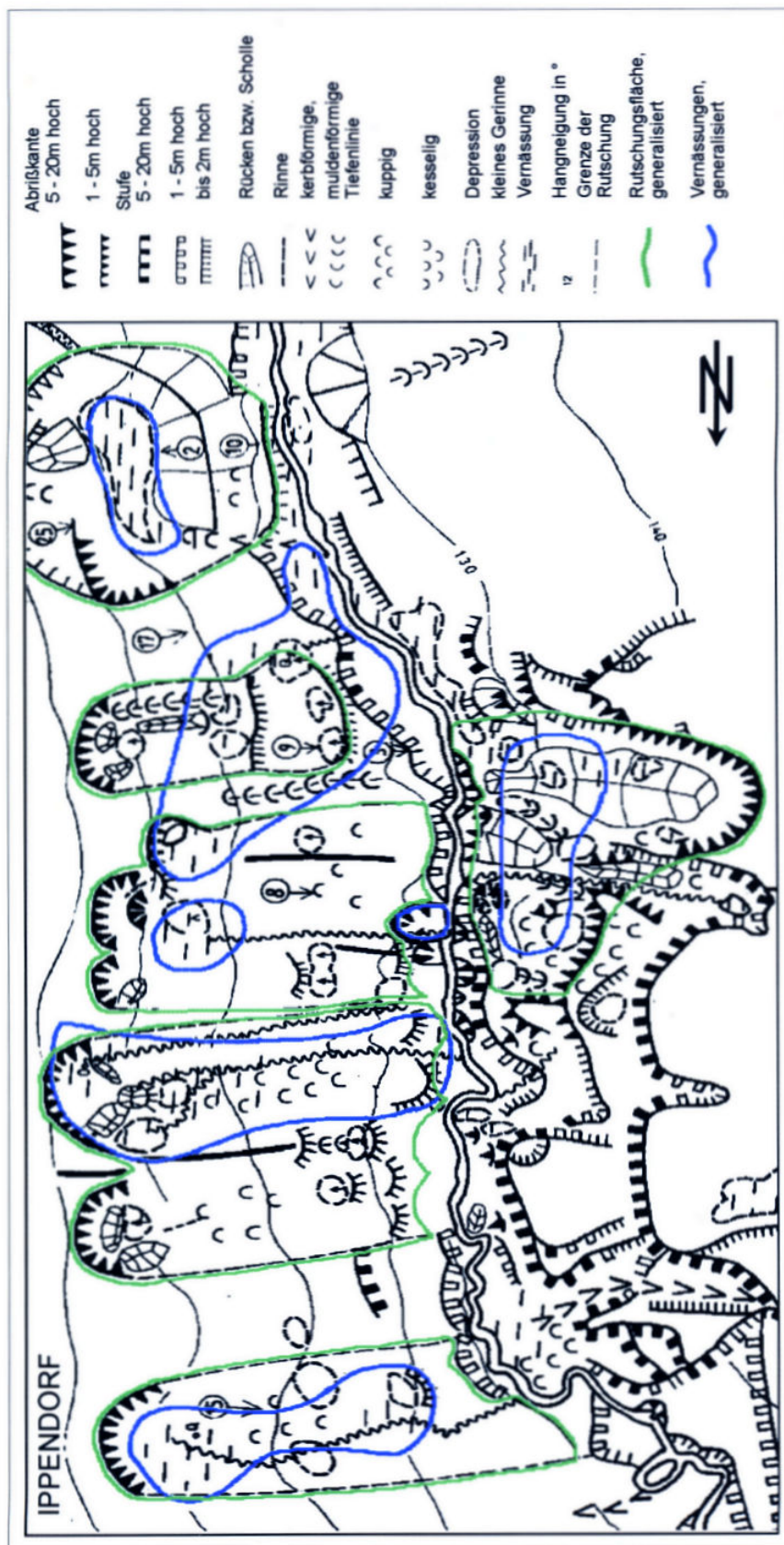


Abb. 10: Generalisierung der Rutschungs- und Vernässungsflächen vor der Aufnahme in das Geo-Informationssystem
Kartengrundlage: Geomorphologische Kartierung von U.Hardenbicker (1994)

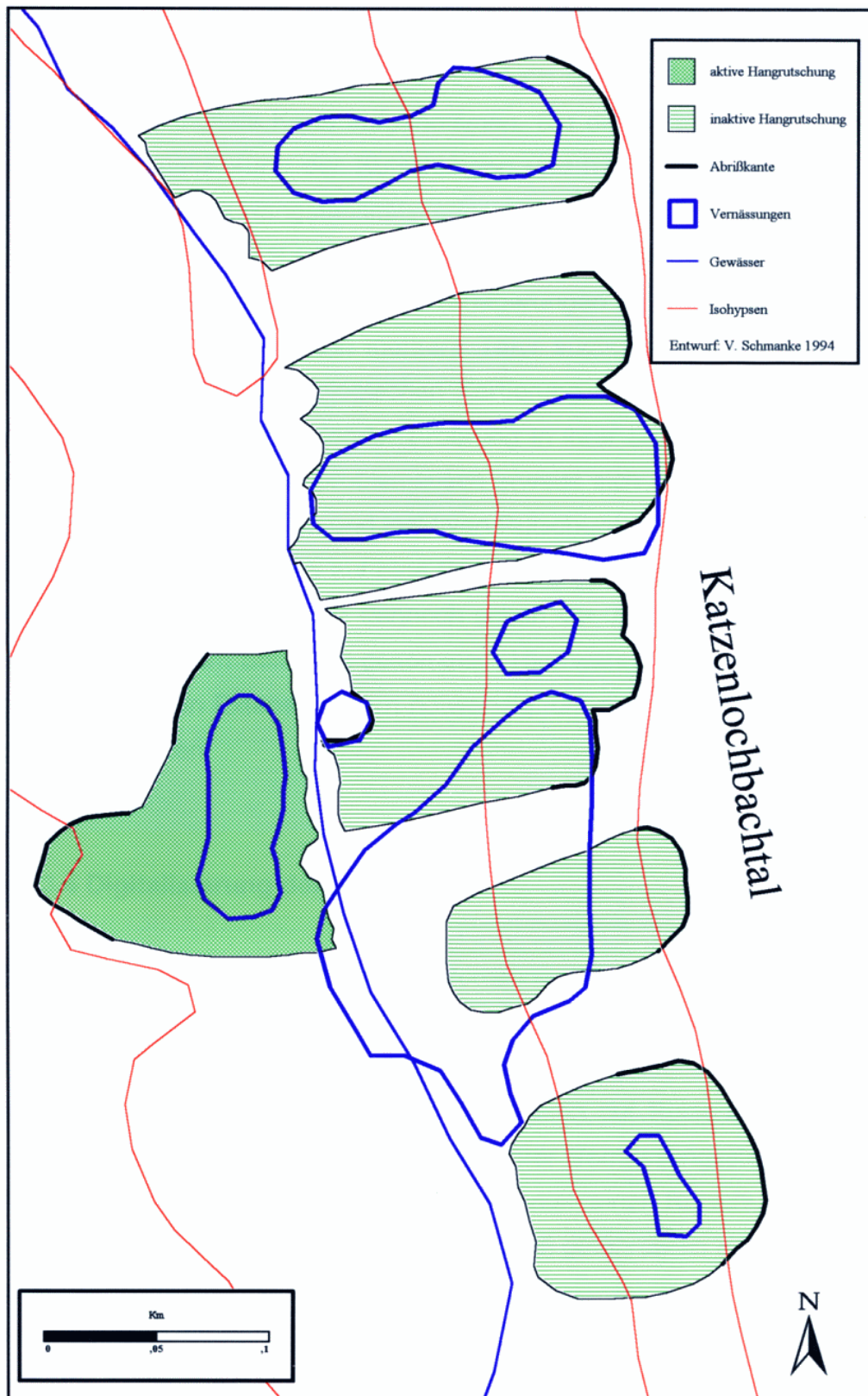


Abb. 11: Rutschungen und Vernässungen nach der Übernahme in das GIS

3.2.3.4 Digitalisierung der Hydrologie

Zu den wichtigsten hydrologischen Komponenten in Bezug auf Hangrutschungen gehören die Vernässungsstellen (Abb. 12). Sie sind gerade auf geneigten Flächen mit einer Hangneigung von mindestens 7° ein sicheres Indiz für Störungen im Hangbereich und lassen auf Rutschungen schließen. Die Digitalisierung sämtlicher bekannter Vernässungsstellen läßt in Teilbereichen eine Aussage über die Aktivität einer Rutschung zu und kann zudem für die Ausweisung von potentiell gefährdeten Hängen herangezogen werden (siehe auch Kapitel 3.6).

Die Grundlage stellten Kartierungen aus Geländepraktika sowie Kartierungen von Mitarbeitern des Instituts und Eigenkartierungen dar. Die Hochzeichnung und Generalisierung der kartierten Flächen war wie schon bei der Digitalisierung der Rutschungen auch hier die Voraussetzung.

Allerdings erfolgte das Hochzeichnen der Vernässungsflächen auf größere Meßtischblätter (Maßstab 1:5.000 oder größer), um die zumeist kleinen Flächen mit einer Ausdehnung von teilweise nur wenigen Quadratmetern noch möglichst flächentreu aufnehmen zu können.

Zur besseren Veranschaulichung der Hydrologie des Bonner Raumes diente die digitale Aufnahme der Gewässer. Das digitalisierte Gewässernetz kann zudem im Rahmen von Abflußmengenberechnungen Verwendung finden. Als Kartengrundlage diente die Hydrologische Karte von Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:25.000 (Grundrißkarte).

- | | | |
|------|-------------------------|--------|
| I) | Blatt 5208 Bonn | (1985) |
| II) | Blatt 5209 Siegburg | (1988) |
| III) | Blatt 5308 Godesberg | (1986) |
| IV) | Blatt 5309 Königswinter | (1987) |

Leider konnten einige Gewässer nicht in ihrem vollem Umfang in die digitalisierte Form übernommen werden, da einige Teilabschnitte durch Überbauung und Kanalisierung mit zum Teil unterirdischem Gewässer-Verlauf entlang der Linie Bonn-Zentrum -- Bad Godesberg gar nicht in der Karte verzeichnet waren. Außerdem treten wie schon bei der Rutschungskartierung Lücken in der kartographischen Erfassung der Vernässungsstellen auf. Auch hier fehlen an einigen Hängen des Siebengebirges und südlich von Bad Godesberg genauere Untersuchungen bezüglich der Hydrologie.

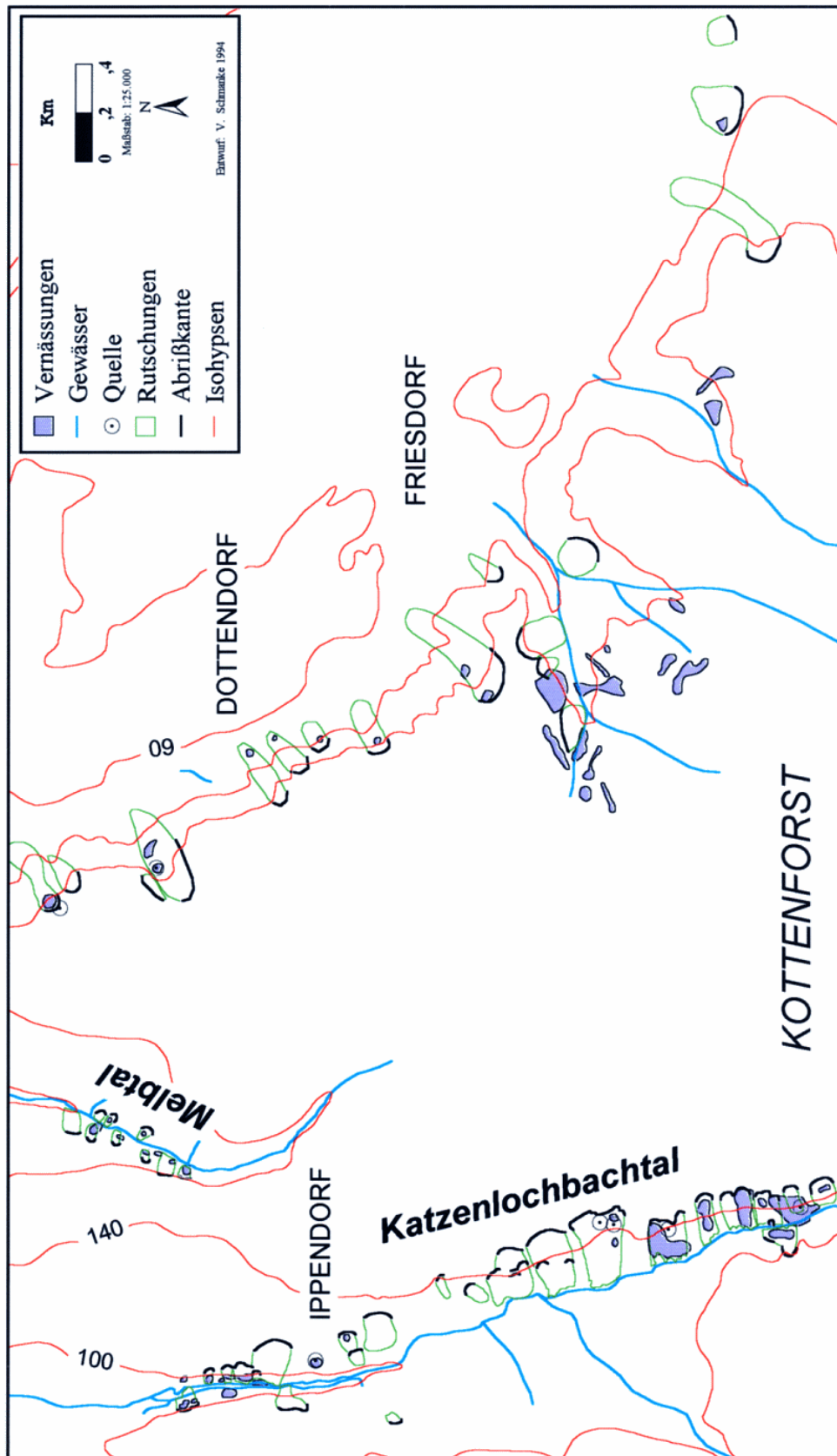


Abb. 12: Hydrologie (Vernässungsstellen, Quellen und Gewässer)

3.3 Das Geo-Informationssystem IDRISI

IDRISI ist ein rasterorientiertes System für Bildverarbeitung und die Analyse geographischer Informationen. Es wurde an der Graduate School of Geography an der Clark University in den USA entwickelt. Die Grundidee ist die Bereitstellung professioneller Algorithmen für Anwendung und Forschung auf einer Low-cost Basis. Inzwischen wird dieses System in über 80 Ländern eingesetzt.

3.3.1 Aufbau und Funktionsumfang von IDRISI

IDRISI ist kein Einzelprogramm, es besteht vielmehr aus einer Sammlung von über 100 Programmodulen, die über ein Menüsystem zusammengebunden sind. Es lassen sich drei Hauptbereiche unterscheiden:

1. *Kernmodule*: Hier werden Grundfunktionen wie Dateneingabe, Speicherung, Management und Darstellung von Raster- bzw. Vektordaten zur Verfügung gestellt.
2. *Analysemodule*: Sie dienen der Analyse von Raster- und Vektordaten.
3. *Peripheriemodule*: Sie bieten zahlreiche Schnittstellen für die Datenkonversion zwischen IDRISI und einer ganzen Reihe von anderen Programmen (zumeist Geo-Informationssystemen).

Die Konzeption als Sammlung einzelner Programmodule zeigt die Offenheit der IDRISI-Programmstruktur und die Möglichkeit einer jederzeitigen Veränderung und Ergänzung der Module an. Das Programm zeichnet sich zudem durch eine einfache Benutzeroberfläche aus (DOS-Ebene), wobei jedes Programmodul unabhängig von anderen Programmteilen gestartet werden kann. Die IDRISI-Module erfordern vor dem eigentlichen Programmdurchlauf einige Eingaben. Diese werden jeweils abgefragt und die Programme erwarten eine konkrete Antwort. Einige Module können auch über Kommandolinien-Parameter angesteuert werden. Die Abfragen entfallen dann und das Programm wird direkt ausgeführt. Ein Beispiel dafür ist COLOR. Ruft man das Bild mit COLOR auf, so wird dieses ohne automatische Skalierung auf den Bereich 0-15 Farbstufen ausgegeben, obwohl es vielleicht Werte über 15 enthält. Ruft man das Modul jedoch mit COLOR A auf, so bedeutet das "A" eine automatische Skalierung auf die im Bild vorhandenen Minima und Maxima.

In IDRISI gibt es drei verschiedene Dateitypen: Bilddaten, Vektordateien und Attributdateien. Zusammen bilden sie die geographische Datenbank für ein ausgewähltes Gebiet.

Die Bilddateien stellen den wichtigsten Datensatz zur Beschreibung und Analyse raumbezogener Phänomene dar. Dabei handelt es sich um Rasterdaten, d.h. um ein feines Netz von Rasterzellen mit Zahlenwerten für die jeweiligen Phänomene. Die Analyse in IDRISI wird auf der Basis von Rasterdaten durchgeführt. Dies zeigt sich auch durch den hohen Anteil von Programmfunktionen zur Darstellung, Umrechnung und Analyse der Bilddateien.

Vektordateien werden im Wesentlichen als Dateninput verwendet. Hier unterscheidet man drei Typen: Punkt-, Linien- und Polygondateien. Die Vektordateien tragen keine Attribute, sie beschreiben lediglich die Geographie der Merkmale.

In den Attributdateien werden einzelnen Merkmalen Attributwerte zugewiesen, wobei es sich in der Regel um einfache Tabellen handelt. Eine solche Datei enthält z.B. Hangneigungsklassen als Indikatoren und die dazugehörigen Gefährdungstufen als Zahlencode.

Bilddateien bestehen in IDRISI aus einem Netz von Rasterzellen. Die Speicherung erfolgt als eine lange Reihe einzelner Zahlen. Die Zahlen eines Bildes können von folgendem Typ sein:

1. BYTE: ganzzahlig, Wertebereich 0-255;
2. INTEGER: ganzzahlig, Wertebereich -32767 bis +32768;
3. REAL: Gleitkommazahl, z.B. 67.857;

Bilddateien können in den Dateiformaten ASCII, binär oder binär gepackt abgelegt werden.

Beim ASCII-Format handelt es sich um eine normale Textdatei. Der Dateiinhalt kann von DOS aus mit dem Befehl TYPE angezeigt werden - die Zahlenwerte sind direkt erkennbar. Das ASCII-Format ist für den Datentransfer geeignet, da es sich dabei um einen Standard handelt (ASCII = American Standard Code for Information Interchange). ASCII-Dateien stellen jedoch nicht die effizienteste Speicherung der Daten dar, so daß sich eine Konvertierung in das Binärformat empfiehlt (siehe auch Kapitel 3.3.3.1).

Binärdateien können nicht direkt angezeigt werden. Bei der Eingabe von TYPE erscheint eine Reihe seltsamer Zeichen an Stelle von Zahlen auf dem Bildschirm. Dabei handelt es sich um ASCII-Zeichen, wobei jedes Zeichen für einen Zahlenwert im Bereich von 0-255 steht. Die Zahl 125 wird im Binärformat also als "}" gespeichert.

Beim gepackten Binärformat handelt es sich um eine komprimierte Speicherung von Integer/Bytedaten. Eine Konvertierung in dieses Format ist jedoch nur sinnvoll, falls die Rasterzellen oftmals den gleichen Zahlenwert enthalten.

Die empfohlene Hardware-Ausrüstung für IDRISI 4.0 besteht aus einem Prozessor 80386, 80486 oder Pentium, einem mathematischen Coprozessor, einer größeren Festplatte (mind. 200MB), einer Super-VGA Grafikkarte mit 1 MB Speicher sowie einer Maus. Eigene Erfahrungen zeigen gerade bei komplexeren Berechnungen (Beispiel: Hangneigungsberechnung) die Erfordernis eines möglichst schnellen Prozessors, um nicht stundenlange Wartezeiten in Kauf nehmen zu müssen.

3.3.2 Vor- und Nachteile von IDRISI

IDRISI zeichnet sich durch eine leichte und schnelle Erlernbarkeit aus. Da jedes Modul einzeln lauffähig ist, kann man ohne große Vorkenntnisse schon nach kurzer Zeit gute Ergebnisse erzielen.

Die Hardware-Anforderungen sind im Vergleich zu anderen Geo-Informationssystemen eher gering. Das System läuft ohne weiteres schon auf einem AT-Rechner (80286-Prozessor), kommt allerdings erst ab einem 80386-Rechner mit mathematischem Coprozessor richtig zur Geltung. Leistungsschwächere Rechner benötigen gerade bei komplexen Berechnungen eine indiskutable Zeitspanne, die nicht selten Tage in Anspruch nehmen kann.

Das niedrige Preisniveau (Kosten ca. 200 \$) macht das Programm zwar für den Neueinsteiger in Geo-Informationstechniken attraktiv, man erreicht allerdings schnell die Grenzen dieser GIS-Software. Am effizientesten erscheint aus diesem Grunde die Kombination von IDRISI mit einem weiteren möglichst vektororientierten Geo-Informationssystem. Hier bietet sich das GIS-Produkt ATLAS*GIS an, zu dem eine Schnittstelle existiert. Der Datenimport und -export kann so ohne größere Schwierigkeiten erfolgen. Die Programme ergänzen sich hervorragend. ATLAS*GIS zeigt seine Stärken in der sehr guten Bedienbarkeit, einer ausgezeichneten Digitalisierfunktion und zahlreichen Möglichkeiten in der kartographischen Umsetzung und Ausgabe von Karten. IDRISI ergänzt diese Software durch einen hohen Funktionsumfang mathematischer Algorithmen, wozu auch die Berechnung zahlreicher geomorphologischer Größen wie die Hangneigung und Exposition gehören.

3.3.3 Import von ATLAS*GIS Daten

Der Import der für die Hangneigungskarte benötigten Höhendaten (Isohypsen) erfolgte über eine Schnittstelle. Diese Schnittstelle ist durch das Programm ATLAS IMPORT-EXPORT sowie das Programm TRIDAT4 gegeben. Mit Hilfe von ATLAS IMPORT-EXPORT lassen sich ATLAS*GIS-Files (AGF-Files mit zugehörigen Attribut-Dateien) in ein sog. BNA-File umwandeln. Dieses BNA-File kann dann von TRIDAT4 in das von IDRISI lesbare VEC-Format konvertiert werden. Zur Berechnung einer Hangneigungskarte sind allerdings noch weitere Modifizierungen nötig (s. Kapitel 3.3.4 ff.).

3.3.3.1 Import der digitalisierten Isohypsen

Um die Isohypsen vom Vektorformat in das Rasterformat transferieren zu können, muß zunächst ein Rasterbild definiert werden. Dieses geschieht mit Hilfe der Funktion INITIAL, wo der Datentyp (real), das Dateiformat (binär), die Anzahl der Bildpunkte und die äußere Begrenzung festgelegt werden (Koordinaten: min x/y: 571200/5611450, max x/y: 588000/ 5625200). Bei der äußeren Begrenzung ist darauf zu achten, daß jede importierte Isohypse über die zuvor definierte Bildbegrenzung hinausreicht, da ansonsten die im Anschluß stattfindende Interpolation nicht korrekt durchgeführt werden kann.

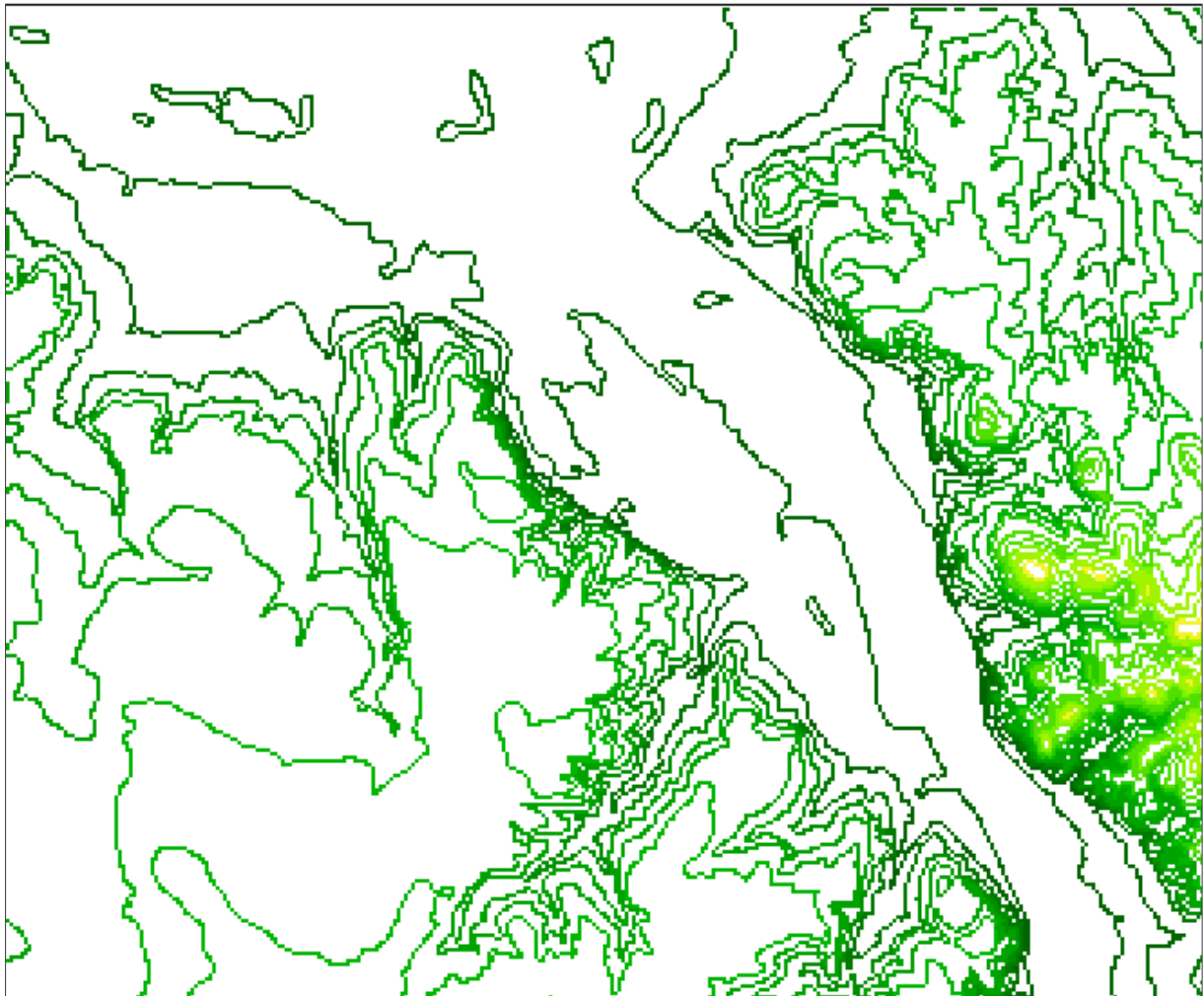


Abb. 13: Höhenlinien nach dem Transfer von Vektor zu Raster (IDRISI)

Die Anzahl der Bildpunkte richtet sich nach dem gewählten Raster und der X/Y-Ausdehnung des dargestellten Gebietes.

Das Raster wurde auf 50x50m festgelegt, d.h. für eine Fläche von 50m² wird eine konkrete Information gespeichert. Die Verkleinerung der Rastergröße würde zwar detailreichere Informationen liefern, wäre aber wesentlich speicherintensiver. Abgesehen davon reicht die vorgesehene Rastergröße für den Maßstab 1:25.000 voll aus, 50m entsprechen genau 2mm innerhalb der Karte. Fehler aus der Berechnung wären für das Auge kaum sichtbar, da sie sich fast ausschließlich in einem Bereich <1mm bewegen. Somit kann der Unterschied zwischen Realität und digitaler Karte maximal 25m betragen.

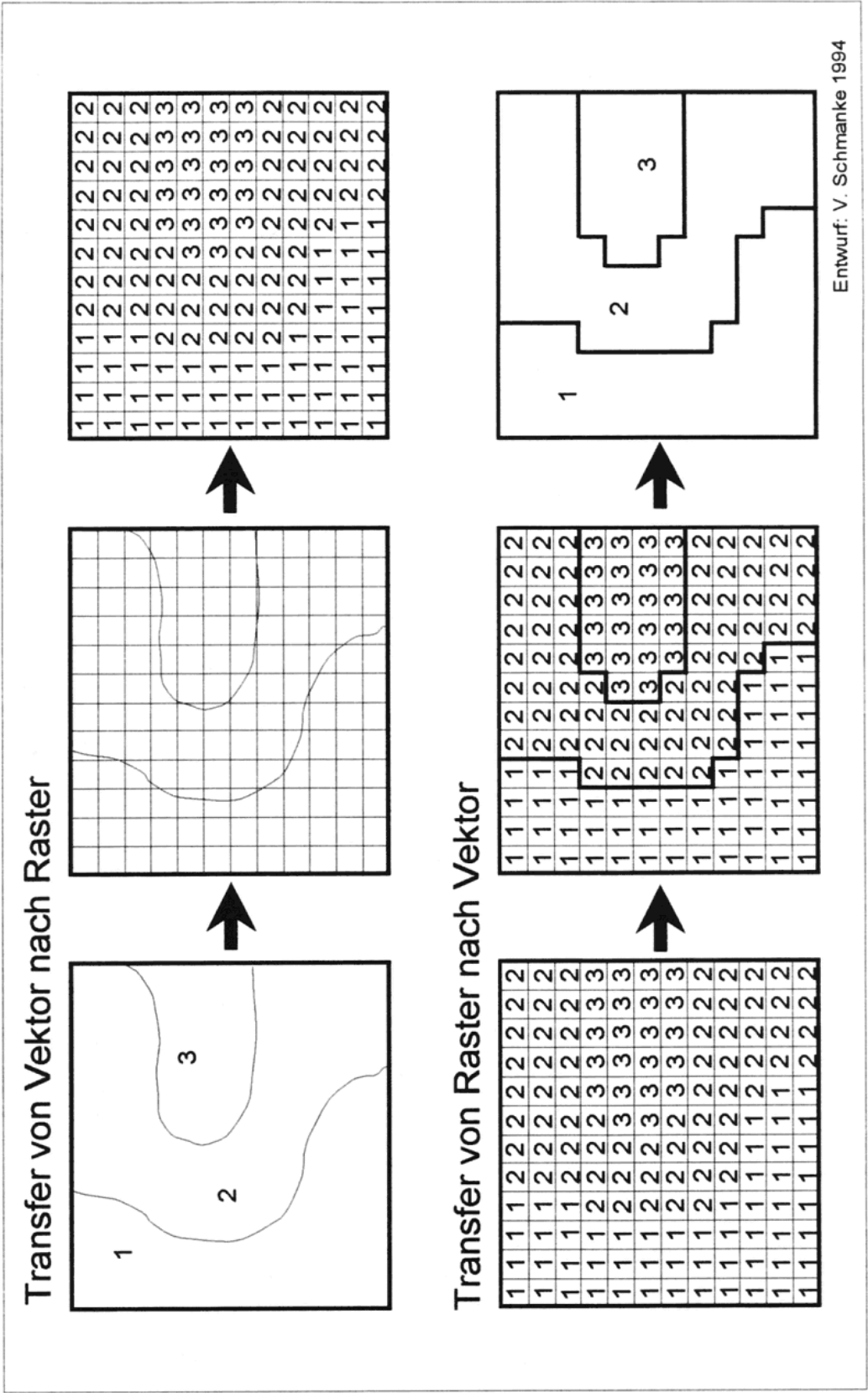


Abb. 14: Transfer Vektor -> Raster und umgekehrt

Die Spalten- und Reihenanzahl für den gewählten Bildausschnitt errechnet sich nun aus der x/y-Ausdehnung, dividiert durch die Rastergröße:

Spaltenanzahl:

16800m (West-Ost Erstreckung) : 50m (Rastergröße) ergibt 336 Spalten

Reihenanzahl:

13750m (Nord-Süd Erstreckung) : 50m (Rastergröße) ergibt 275 Reihen

Nach der Initialisierung wurden die Vektorlinien mit Hilfe des Moduls LINERAS in das Rasterformat konvertiert (Abb. 13 und Abb. 14).

3.3.4 Berechnung einer Höhenschichten-Karte

Vor der Berechnung der Hangneigungskarte ist zunächst eine Interpolation der Linien mit anschließender Filterung notwendig. Das gewählte Interpolationsverfahren benutzt eine lineare Interpolation und errechnet aus digitalisierten Höhenlinien ein Raster-Höhenmodell. Vor der Interpolation müssen die Höhen der vier Bildecken und der Hintergrundwert eingegeben werden. Die Höhen der vier Bildecken können in der TK25 abgelesen werden. Der Hintergrundwert richtet sich nach dem tiefsten Höhenwert des gewählten Kartenausschnittes und beträgt für den Bonner Raum an keinem Ort weniger als 50m, so daß man als Grundhöhe diesen Wert angeben kann.

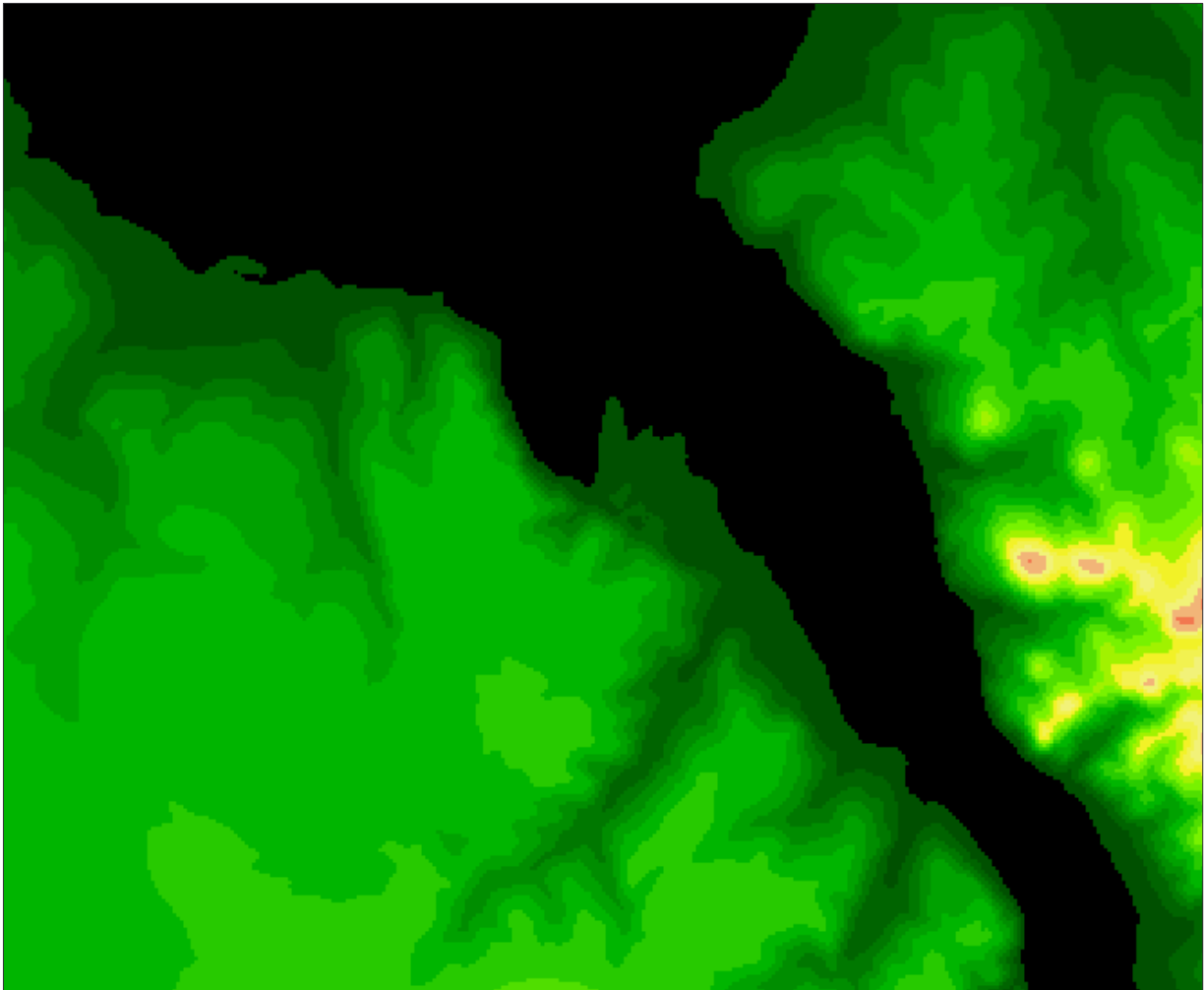


Abb. 15: Höhen nach der Interpolation und Filterung mit IDRISI

Bei den insgesamt sechs Interpolationsdurchgängen findet ein Algorithmus von David Douglas (Universität Ottawa) Verwendung, der nach folgendem Verfahren (CONSURF) arbeitet: Zuerst werden die vier Bildecken durch Profile verbunden. Dann werden von den Randprofilen ausgehend horizontale Profile durch alle Zeilen gelegt. Die Berechnung wird mit vertikalen und diagonalen Profilen fortgesetzt. Die endgültige Höhe eines Pixels ist diejenige aus dem Profil mit der maximalen Neigung an der entsprechenden Stelle. Ungenauigkeiten treten dann auf, wenn scharfe Sprünge und eng zusammenliegende Kurven vorliegen.

Nach der Interpolation sollte man eine Filterung vornehmen. Das Modul Filter berechnet dabei für jedes Pixel einen neuen Wert, indem es die Umgebungswerte einbezieht. Die Umrechnung wird über eine 3x3 Filtermatrix geregelt, die die genauen Filtergewichte enthält. Das Pixel selbst und die acht umgebenden Bildelemente werden mit der Filtermatrix verrechnet, aufsummiert und ein neuer Wert für das Pixel

ermittelt. Von den sechs angebotenen Filteroptionen (u.a. Medianfilter, Modalfilter, Hochpaßfilter) eignet sich der Mittelwertfilter (Tiefpaßfilter) am besten für die Korrektur des Bildes. Hierbei wird eine Generalisierung durchgeführt, um beispielsweise Ausreißer innerhalb einer Fläche abzuschwächen oder zu eliminieren. Diese Filterung wurde zweimal angewendet, um ein "sauberes" Bild zu erhalten (Abb. 15).

3.3.5 Berechnung einer Hangneigungskarte

Das in IDRISI integrierte Modul SURFACE bietet die Möglichkeit, aus Höhenlinien nach ihrer Interpolation eine Hangneigungskarte zu berechnen (Abb. 16).

Die Hangneigung für jeden Rasterpunkt ergibt sich aus der Berechnung der maximalen Neigung in der Umgebung jedes Pixels aus den lokalen Neigungen in x und y-Richtung. Nur die unmittelbaren Nachbarn des Pixels (oben, unten, links, rechts) werden dabei berücksichtigt (vgl. BÖHM 1991).

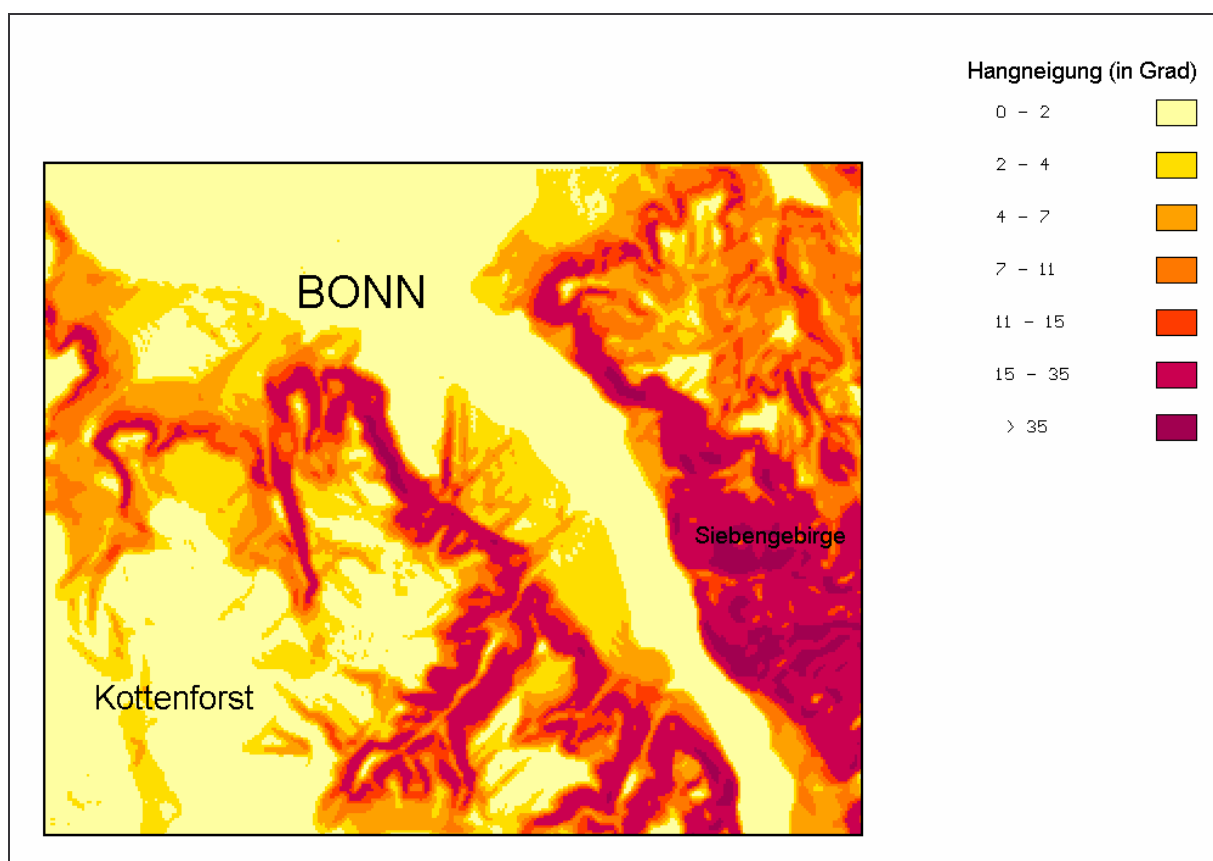


Abb. 16: Hangneigung, berechnet mit IDRISI (Modul SURFACE)

Um von der Einheit "Meter" nach "Grad" zu gelangen, muß ein sog. Conversion-Faktor eingegeben werden. Dieser errechnet sich aus der Amplitude der Höhen ($334\text{m} - 55\text{m} = 279$), dividiert durch die

Amplitude der möglichen Hangneigungen (von 0 - 90° -> Amplitude = 90). Der Conversion-Faktor beträgt in diesem Fall 3,01 (keine Einheit erforderlich).

Nach der Hangneigungsberechnung erfolgte noch eine Klassifizierung. Dabei wurde die GMK-Legende für Mittelgebirge zugrundegelegt, die eine Klassifizierung in folgende Wertebereiche vorgibt:

Klasse I: 0-2°; Klasse II: 2-4°; Klasse III: 4-7°; Klasse IV: 7-11°; Klasse V: 11-15°; Klasse VI: 15-35°; Klasse VII: >35°.

Der Befehl RECLASS ordnet während der Reklassifizierung jedem Pixel den Wert der zugehörigen Klasse zu. Die Reklassifizierung ist notwendig, um Flächen mit gleichen Attributen zu erhalten und als zusammenhängende Polygone nach ATLAS*GIS exportieren zu können.

3.3.5.1 Export nach ATLAS*GIS und Korrektur

Die Exportierung der Hangneigungskarte erfolgt wie schon bei der Importierung über das IMPORT-EXPORT-Modul von ATLAS*GIS. Zuvor muß man die Daten in ein Vektorformat konvertieren, das von der Schnittstellensoftware IMPORT-EXPORT gelesen werden kann. Dies geschieht mit Hilfe des Befehls POLYVEC, wo anhand der Rasterbilddatei eine Vektor-Polygon-Datei erstellt wird (Abb. 17).

Nach der Konvertierung und Übernahme in ATLAS*GIS war allerdings eine manuelle Korrektur von falsch berechneten Hangneigungsflächen (Rheinebene am Venusberghang entlang der Linie Kessenich - Dottendorf - Friesdorf) notwendig. Hier wurden für mehrere Gebiete z.T. Hangneigungen berechnet, die unverkennbar zu hohe Werte aufwiesen. Ursache war ein Fehler innerhalb des Interpolationsalgorithmus, der am Hangfuß des Venusbergabhangs sternförmig einigen Flächen einen zu hohen Höhenwert zuwies.

Dieser Fehler pflanzte sich in der Berechnung der Hangneigungskarte fort und konnte nur über eine manuelle Überarbeitung korrigiert werden. Die zu hoch berechneten Hangneigungswerte wurden demnach um ein bis zwei Stufen herabgesetzt.

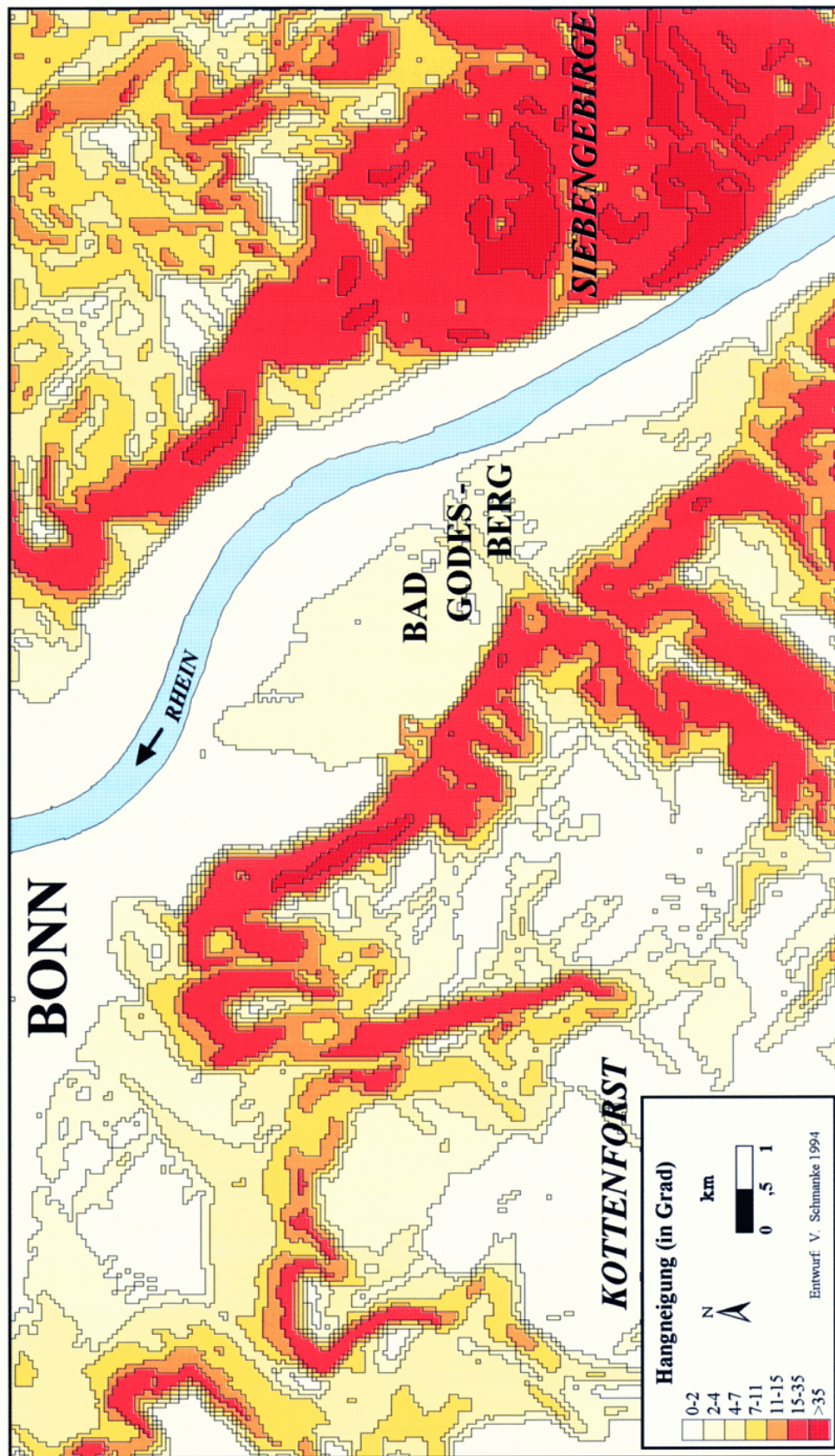
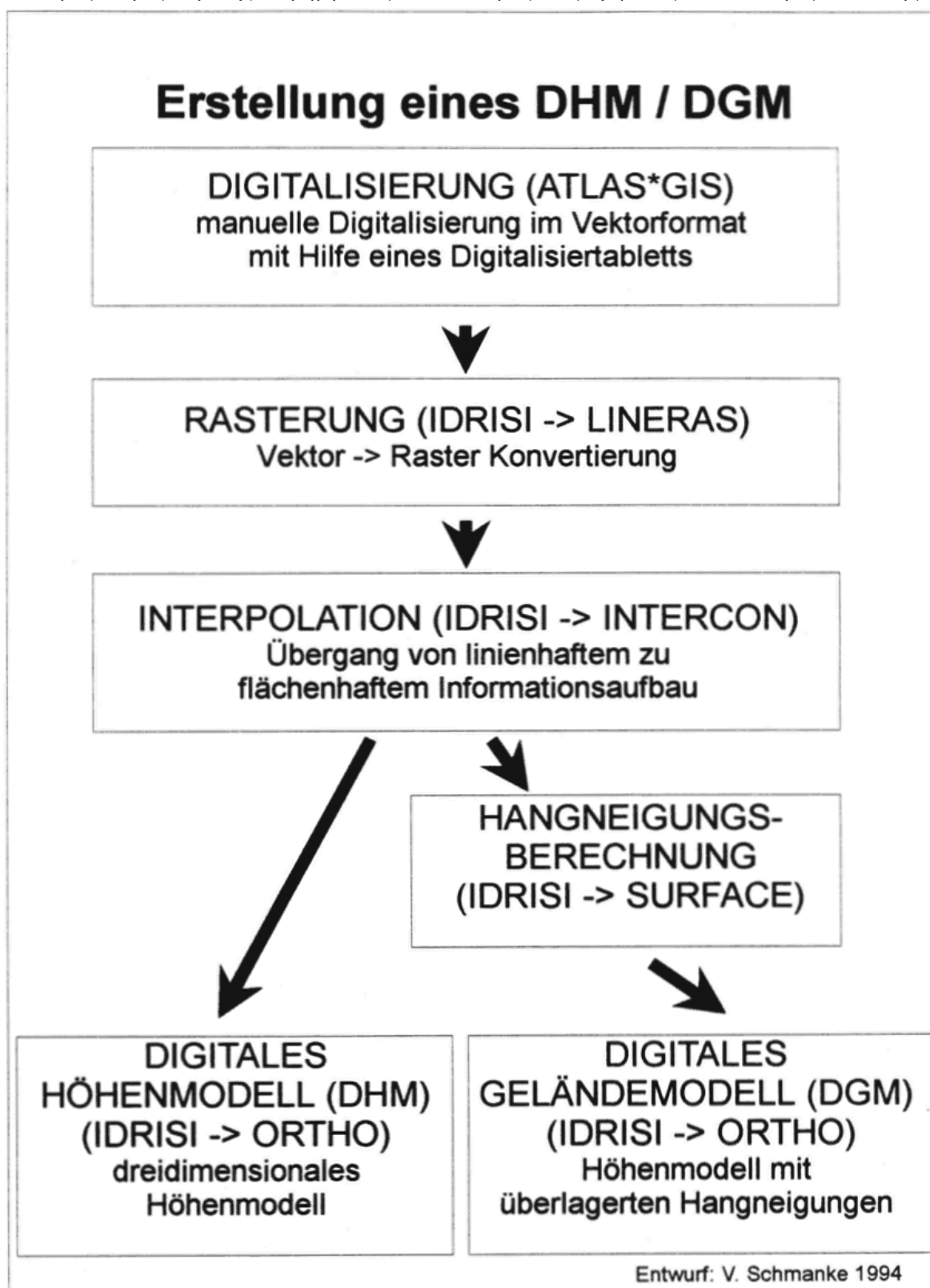


Abb. 17: Hangneigungskarte, exportiert von IDRISI nach ATLAS*GIS

3.4 Das digitale Höhenmodell (DHM) / Geländemodell (DGM)

Unter einem digitalen Höhenmodell (DHM) versteht man laut einer Definition des ARBEITSKREISES NUMERISCHE PHOTOGRAMMETRIE 1975 die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren. Ist der Grundriß (Situation)



Die Möglichkeiten des DGM-Einsatzes in der Geomorphologie sind allein durch die Berechnung direkt aus den Höhendaten ableitbarer morphometrischer Parameter wie Neigung, Exposition, Wölbungsradien etc. (z.B. durch das "Digitale Reliefmodell (DRM)" von BAUER et. al. 1985), deren Klassifizierung (z.B. DIKAU 1988), die statistische Weiterverarbeitung und Korrelation z.B. mit morphogenetischen Prozessen (z.B. DIKAU 1990) nicht ausgeschöpft. Das Bestreben muß es sein, DGM auch hinsichtlich einer Reliefgliederung auszuwerten, die über die bloße schwellenwertbezogene Klassifizierung morphometrischer Parameter und deren einfache Verschneidung mit anderen Flächeninformationen hinausgeht. Auf der Datenbasis von Digitalen Geländemodellen und digitalen geowissenschaftlichen Zusatzinformationen können an herkömmlichen Definitionen orientierte maschinengerechte Definitionen von Oberflächenformen erarbeitet werden, um mit Datenverarbeitungstechniken themenspezifische Reliefeinheiten auszugliedern, deren Grenzen an signifikante Änderungen morphometrischer Parameter gebunden sind (vgl. KÖTHE & LEHMEIER 1991, LEHMEIER 1990/1991).

3.4.1 Herstellung eines DHM aus Rasterlinien

Mit Hilfe unterschiedlicher Meßmethoden (Geodätische Messungen, Photogrammetrische Auswertungen von Stereomodellen, Digitalisieren und Scannen von Höhenlinienplänen) werden zunächst Höheninformationen über das Gelände gewonnen (GOTTSCHALK und NEUBAUER 1974). Die Punkte in diesem gemessenen DHM sind mehr oder weniger unregelmäßig angeordnet. Für viele Anwendungen in Geo-Informationssystemen der Rastertechnik ist diese Datenstruktur jedoch nicht geeignet. Lokale Operationen etwa können nur mit regelmäßigen Rastern durchgeführt werden. Deshalb wird aus den originären Höhendaten mit Hilfe verschiedener Algorithmen ein DHM mit regelmäßiger Struktur interpoliert. Bei diesem gerechneten DHM wird für jedes Bildelement (Pixel) die Höhe berechnet (siehe auch Kap. 3.3.4 u. 3.4.2). Man erhält ein mehr oder weniger abgeflachtes bzw. terrassiertes Höhenmodell. Zur Verbesserung der Ergebnisse müßten Geländekanten bei der Berechnung mitberücksichtigt werden. Meist bietet die in der Rasterdatenverarbeitung angebotene Software diese Möglichkeit jedoch nicht an (gilt auch für IDRISI).

3.4.2 Digitales Höhenmodell (DHM) und Geländemodell (DGM) mit IDRISI

IDRISI bietet mit der Funktion ORTHO die Möglichkeit an, interpolierte Höhendaten innerhalb eines Digitalen Höhenmodells (DHM) als dreidimensionale orthographische Darstellung anzuzeigen (Abb. 19). Veränderbare Parameter sind die Blickrichtung auf das dreidimensionale Bild und der Überhöhungsgrad. Desweiteren kann ein zweites Bild der 3D-Darstellung überlagert werden (DRAPE-Funktion), so daß eine optische Visualisierung des Geländes mit einem thematischen Bezug möglich wird (-> Digitales Geländemodell DGM). Als Beispiel sei hier die Überlagerung der Hangneigung auf ein Digitales

Höhenmodell genannt (Abb. 20). Mit Hilfe der dreidimensionalen Darstellung kann man z.B. sehr gut die für Hangrutschungen besonders wichtigen mittleren Hangneigungen ($11-35^\circ$) im Bereich der Täler (Hardtbachtal, Katzenlochbachtal, Melbtal, Godesberger Tal) und am westlichen Rand des Siebengebirges veranschaulichen.

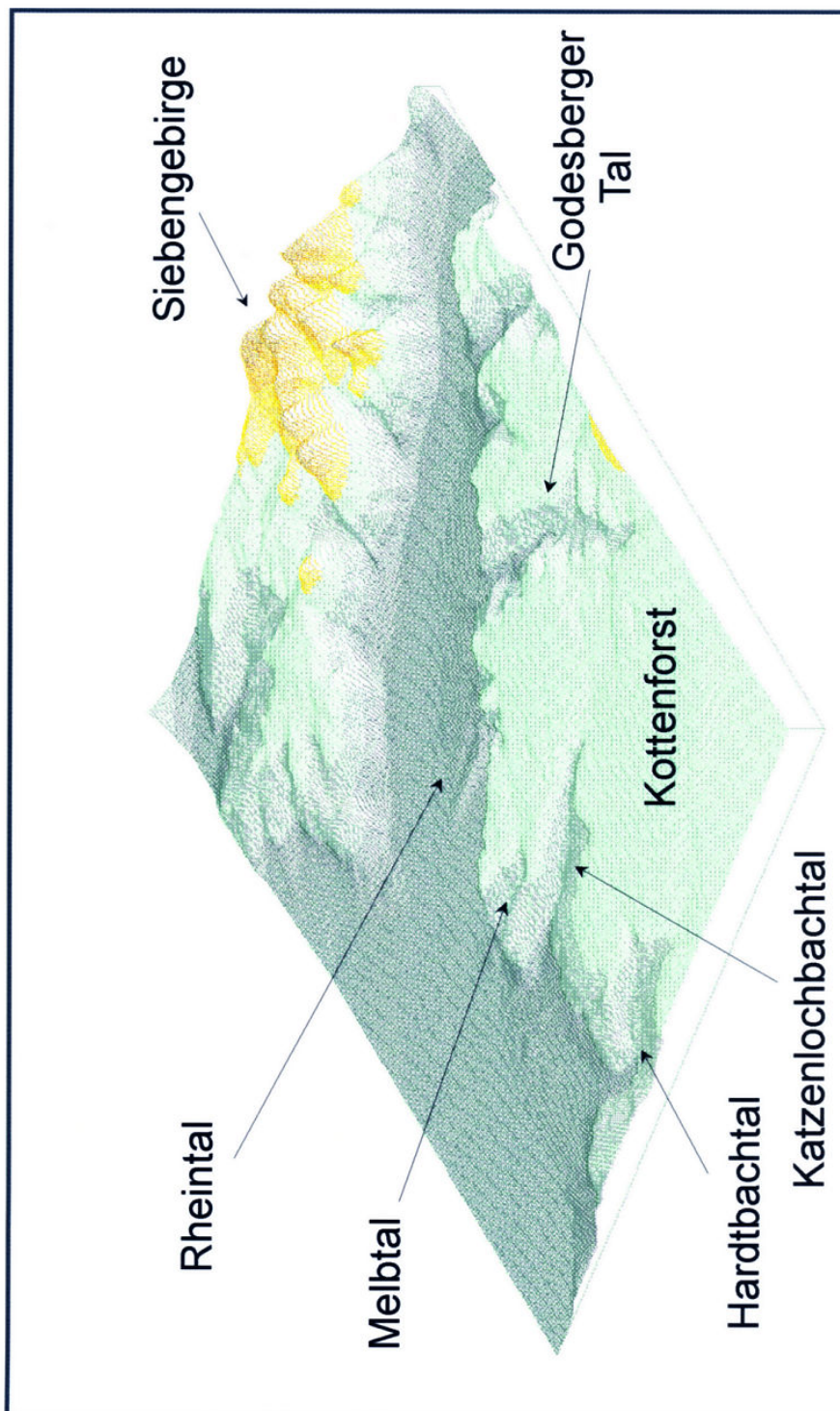


Abb. 19: Digitales Höhenmodell (DHM) des Bonner Raumes (IDRISI)

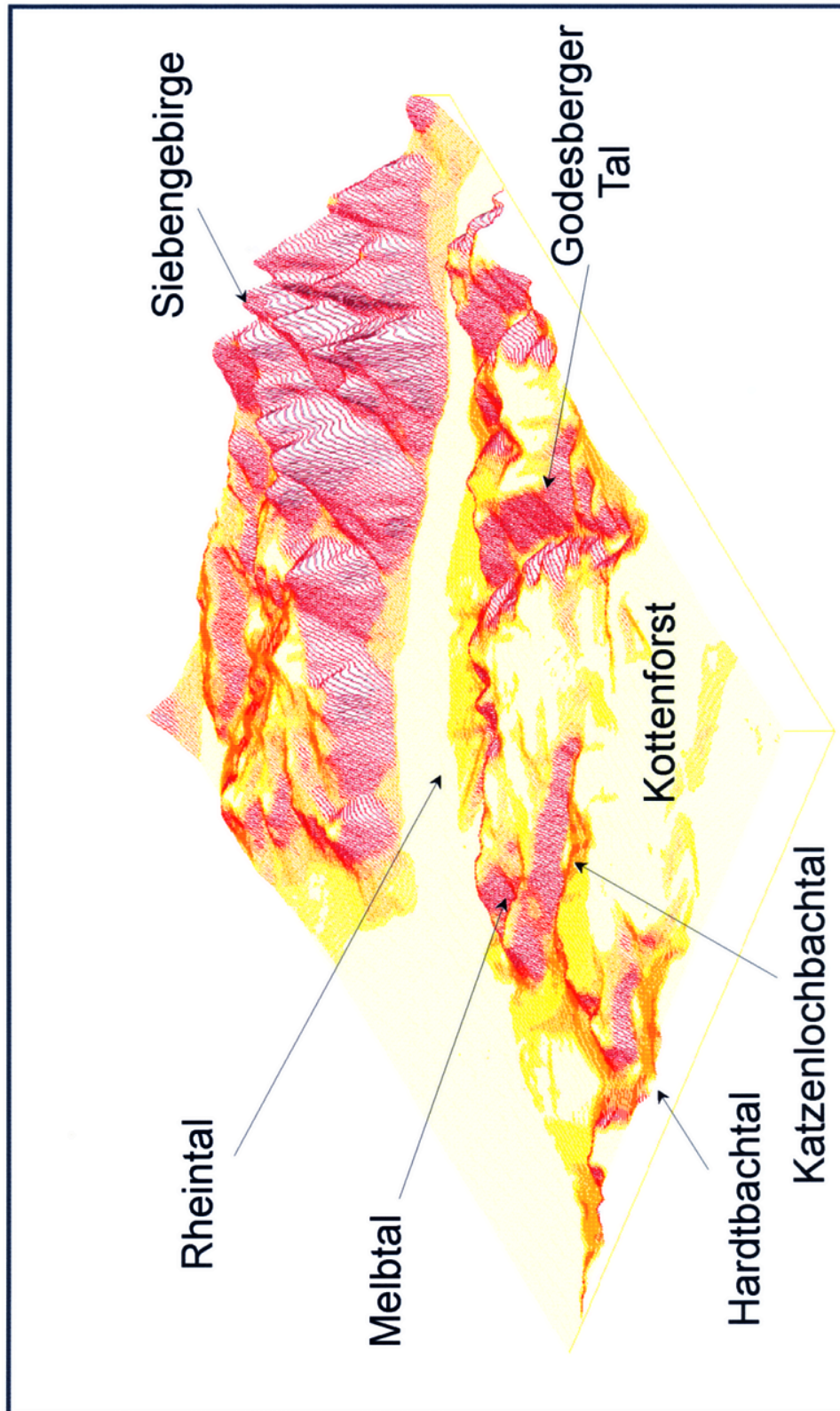


Abb. 20: Digitales Geländemodell (DGM) aus Höhen und Hangneigung (IDRISI)

3.5 Verschneidungstechniken in ATLAS*GIS

Verschneidungstechniken finden besonders bei der Geographischen Analyse Verwendung. Sie erzeugen neue Informationen durch geometrische, logische und relationale Verknüpfungen der Daten (vgl. BILL / FRITSCH 1991). ATLAS*GIS bietet differenzierte Möglichkeiten der Geographischen Analyse.

Das Programm stellt Analyse-Werkzeuge wie UNION (Zusammenfügung), SPLIT (Schnittflächen- und Schnittlinienbildung) oder BUFFERS (Pufferungszonen) bereit.

Der UNION-Befehl erzeugt neue Flächen aus der Zusammenfügung von Flächen mit gleichen Attributen. Eingesetzt werden hier z.B. Additions- oder Gewichtungsfunktionen, die unterschiedliche Kombinationsabläufe ermöglichen.

Der SPLIT-Befehl zeichnet sich durch die Overlay-Technik aus. Dabei werden zwei Layer übereinandergelegt und die Schnittflächen berechnet. Die Attribute beider Layer gehen nicht verloren. Verschneidungen können sowohl durch die Überlagerung von Fläche mit Fläche (Abb. 21) als auch Fläche mit Linie durchgeführt werden (s.a. Kap. 3.6.2 ff).

Eine weitere Analyse-Funktion ergibt sich aus dem Befehl BUFFERS. BUFFERS berechnet Pufferzonen um vorhandene Flächen. Die Breite dieser Pufferzonen kann einen konstanten Wert einnehmen oder mit Hilfe eines mathematischen Ausdrucks zur variablen Gestaltung der Ausmaße verknüpft werden.

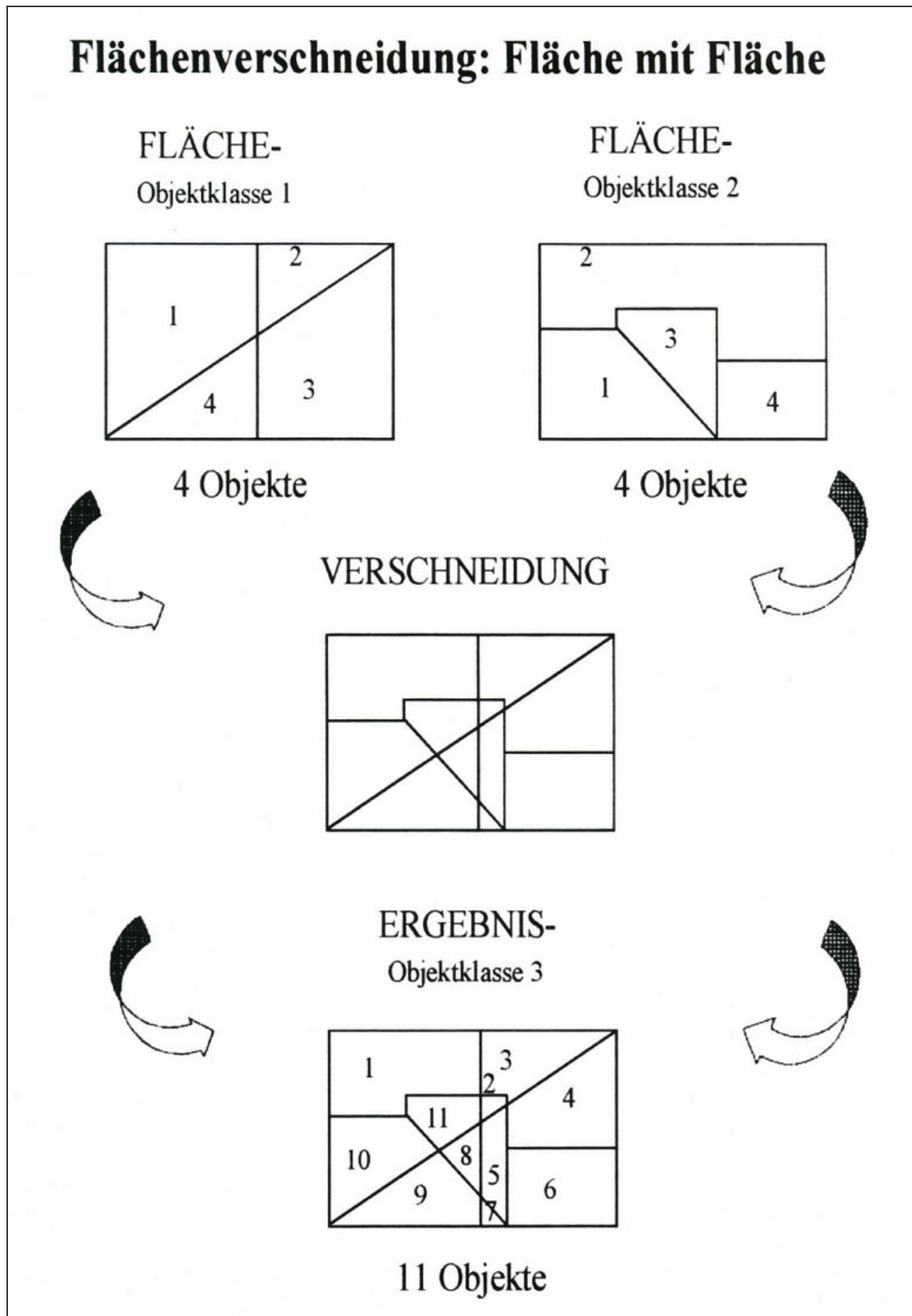


Abb. 21: Verschneidung von Flächen mit Flächen (nach BILL / FRITSCH)

3.6 Die Hangstabilitätskarte

Die Hangstabilitätskarte soll Auskunft über eine potentielle Gefährdung durch Massenbewegungen geben. Für den Bonner Raum treten besonders die Hangrutschungen in den Vordergrund. Das an zahlreichen Hängen auftretende Phänomen zeigt eine Instabilität der Hänge an. Im Rahmen zunehmender Bebauung der Hanglagen kommt der Erstellung von Gefährdungskarten eine immer größere Bedeutung zu.

Bis zum heutigen Zeitpunkt wurden Hangstabilitätskarten im Umfeld des Bonner Raumes stets nur für sehr begrenzte Flächen erstellt. Sie basieren ausschließlich auf ingenieurgeologischen Gutachten. Um nun eine Gefährdungskarte für den gesamten Bonner Raum erstellen zu können, benötigte man hangrutschungsrelevante Daten auf flächendeckender Basis. Hier konnte man vor allem auf die fast lückenlosen geomorphologischen Kartierungen und Untersuchungen zahlreicher Hänge zurückgreifen. Hinzu kamen Informationen aus der Geologischen Karte 1:25.000 und der Topographischen Karte, ebenfalls im Maßstab 1:25.000. Diese Datengrundlage bildet das Grundgerüst der späteren Hangstabilitätskarte.

3.6.1 Forschungsstand bei der Erstellung von Gefahrenkarten / Hangstabilitätskarten

Seit einigen Jahren versucht man mit verschiedenen Modellen das Phänomen Hangrutschung zu erfassen und im Rahmen von Hangstabilitätskarten (Gefahrenkarten) zu regionalisieren.

An dieser Stelle sollen nun drei sehr unterschiedliche Modelle erläutert werden. Sie stammen von M. MOSER („Vorschlag zu einer vorläufigen Hangstabilitäts-Klassifikation mit Hilfe eines Gefährlichkeitsindex“ 1973), A. CARRARA („Multivariate Models for Landslide Hazard Evaluation" 1983) und T.v.ASCH, B. KUIPERS & D. J. v. d. ZANDEN ("An Information System for Large Scale quantitative Hazard Analyses of Landslides" 1993).

MOSER entwickelte auf traditionellem Wege (ohne Einsatz von GIS) eine Hangstabilitäts-Klassifikation, indem er mit Hilfe eines Fragebogens den Gefährlichkeitsindex aufstellte.

Auszug aus dem Fragebogen zur Berechnung eines Hangstabilitäts-Index:

Frage 1: Vorgefundenes Substrat an den zu beurteilenden Lehnen (Festgesteine) ?

- a) kristalline Schiefer (nähere Kennzeichen Textur: strengschiefrig, Kluftkörpergr. n. Müller: blättrig kleinschuppig) Glimmer- Quarzgeh. Mergel (6 Pkt.)
- b) kristalline Schiefer in schiefrig-kleintäfeliger Ausbildung (5 Pkt.)
- c) Schiefer, geringer Metamorphose (Phyllite, schwach geschieferte Sandsteine), nähere Kennzeichen: Kluftkörpergröße schiefrig bis kleintäfelig Glimmer- Quarzgehalt (4 Pkt.)
- d) Kalke, Dolomite, Sandsteine geschichtet (3 Pkt.)

- e) Kalke, Dolomite, Sandsteine gebankt, kristalline Schiefer (Kluftkörpergröße quadrig-bankig, großblöckig) (2 Pkt.)
- f) Kalke, Dolomite, Quarzite, Amphibolite massig (1 Pkt.)

...

Frage 10: Welche hydrogeologischen Verhältnisse werden im Bereich der zu beurteilenden Lehnen zu normalen Witterungszeiten angetroffen ?

- a) ständige Wasseraustritte mit einer möglichen Konzentrierung der Hangwässer (6 Pkt.)
- b) vernähte Verflachungszonen oberhalb der betroffenen Lehnen (5 Pkt.)
- c) periodische Wasseraustritte (3 Pkt.)
- d) keine Wasseraustritte und Möglichkeit zur konzentrierten linearen Abfuhr der Wässer (2 Pkt.)

...

Dieser Fragebogen baut auf ein Punktesystem mit sechs Stufen auf (von *sehr stark gefährdet* / *anfällig bis schwach oder kaum gefährdet*). Die wichtigsten Merkmale bilden die Kennzeichen über das Substrat (Fest- / Lockergestein) und die hydrographischen Charakteristika (Art und Stärke der Niederschläge) sowie die Form, die Art und der Vorgang der zu erwartenden Anbruchbildung. Hinzu kommen noch Fragen zur Morphologie und Vegetation. Aus der Beantwortung der Fragen ergibt sich eine Punktesumme, die durch die Anzahl der beantwortbaren Fragen dividiert wird. Das Ergebnis bildet den Gefährlichkeitsindex. Nach anschließender Klassifikation kann eine Schadensbeurteilung vorgenommen werden.

Wesentlich aufwendiger und komplexer zeigt sich die Vorgehensweise von CARRARA (s.a. CARRARA 1978, 1982, 1991). CARRARA untersuchte zwei Gebiete in Süd-Italien und setzte erstmalig die Möglichkeiten der computergestützten Multiplen Regressions- und Diskriminanzanalyse ein. Erfasst wurden 1800 Rutschungs- und Erosionsformen auf einer Fläche von 600km². Eine zugehörige Datenbank verwaltete für jedes "Hang-Instabilitäts-Phänomen" mehr als 100 Merkmale. Zur statistischen Analyse der Datenmenge wurden sowohl kommerzielle Programme wie SPSS, aber auch eigene Routinen eingesetzt. Das erste Untersuchungsgebiet ("Ferro Basin") wies eine Zellengröße von 200x200m auf. Hier sollte mit Hilfe der Diskriminanzanalyse eine Gefahrenkarte erstellt werden. Es wurden 25 Attribute berücksichtigt, darunter 11 Variablen mit Hangrutschungs- oder Erosions-Merkmalen und 14 Variablen mit Bezug zur Geologie und Geomorphologie.

Nach der Analyse erfolgte eine Untergliederung in zwei Klassen, wobei Parzellen mit einer Massenbewegungsfläche < 15% als stabil, Parzellen mit einer Massenbewegungsfläche > 15% als instabil gekennzeichnet wurden.

Die Auswahl der Attribute für die Diskriminanzanalyse erfuhr eine mehrmalige Abänderung. Beste Ergebnisse lieferte die Analyse, bei der alle Daten in die Berechnung eingingen.

Für das zweite Untersuchungsgebiet ("Buonamico basin", Abb. 22 und Abb. 23) wurde eine engere Maschenweite gewählt (100x100m). Der Datensatz war mit 100 Variablen, verteilt auf 20 Attribute, wesentlich umfangreicher als für das erste Testgebiet.

Neben der Diskriminanzanalyse sollte hier vor allem die Multiple Regressionsanalyse getestet werden.

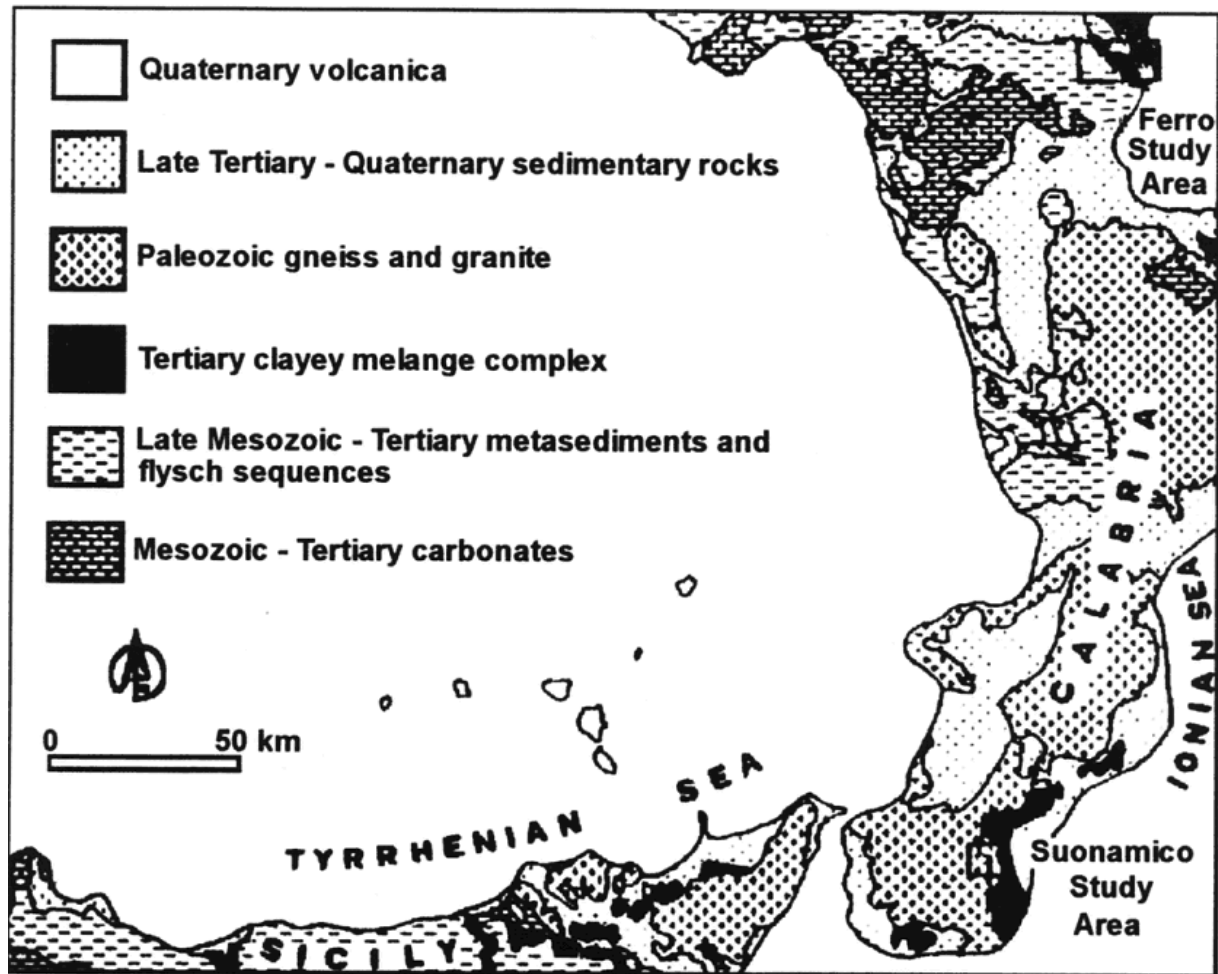


Abb. 22: Geologische Karte von Kalabrien und NO-Sizilien u. Lage der Untersuchungsgebiete (CARRARA 1983)

Vergleicht man die beiden verwendeten Analyse-Verfahren, so lassen sich folgende Aussagen treffen:

1. Die Diskriminanzanalyse stellt für beide Testgebiete ein sinnvolles Mittel zur Berechnung von Hangstabilitätskarten dar.

2. Die Multiple Regressionsanalyse eignet sich in besonderem Maße für die Berechnung und Anzeige von Hängen, die direkt von Hangrutschungen betroffen sind. Außerdem lassen sich mit ihrer Hilfe Vorhersagen über die potentielle Hangrutschungsgefahr erstellen.

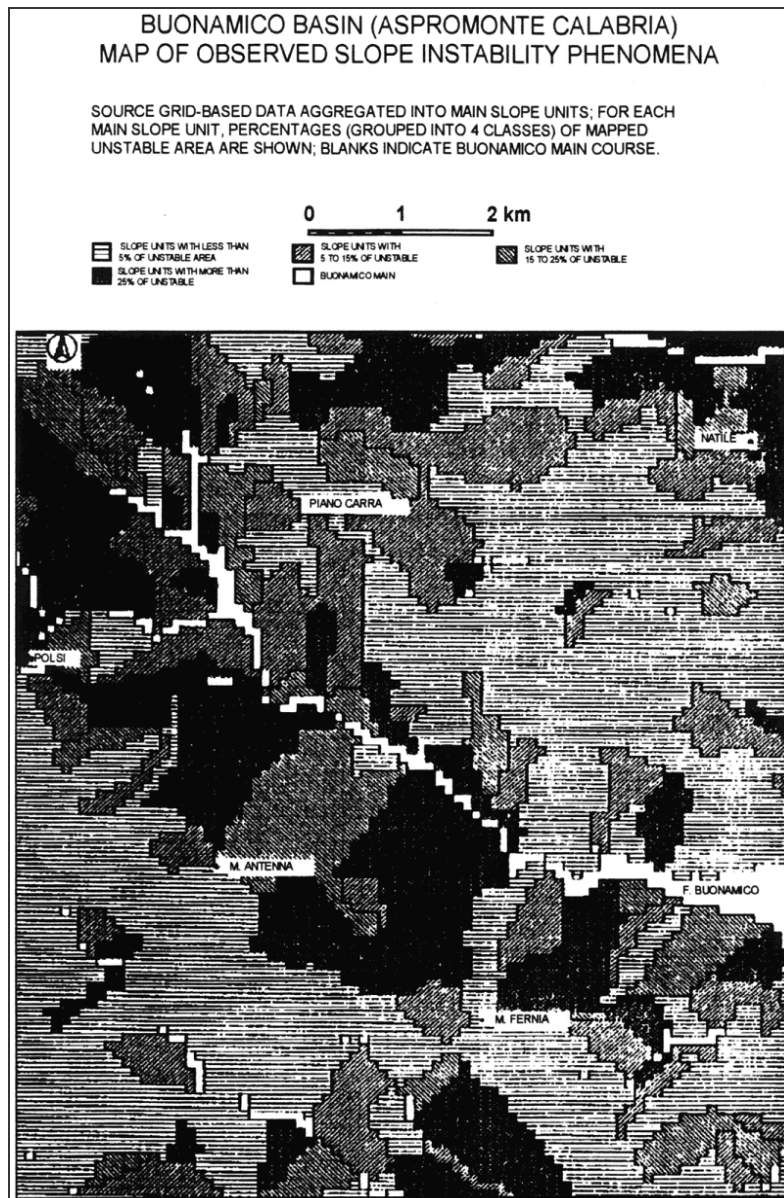


Abb. 23: Karte der Hanginstabilitäts-Erscheinungen innerhalb des Gebietes „BUONAMICO BASIN“.

Allgemein stellt man ein erhöhtes Rutschungspotential in Gebieten mit Hangneigungen zwischen 15 u. 30° bei der Verschneidung von instabilen Hängen mit den dazugehörigen Hangneigungen fest.

Betrachtet man die Genauigkeit der Stabilitätsanalyse in Relation zum Kostenaufwand, so läßt sich nicht verleugnen, daß die hier vorgestellten Methoden aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes nur für kleinere Gebiete anwendbar sind.

Die jüngste Methode stammt von T. v. ASCH, B. KUIPERS & D. J. v. d. ZANDEN. Sie wurde 1993 erstmalig vorgestellt und basiert im Wesentlichen auf einem Geo-Informationssystem mit Unterstützung durch verschiedene geotechnische Modelle. Der Vorteil besteht zum einen in der genauen Gewichtung der einzelnen Faktoren, zum anderen in der höheren Auflösung trotz gleicher Informationsdichte wie bei traditionell erstellten Karten. Hier lassen sich die Vorteile der automatischen Interpolation ebenso nutzen wie Berechnungsverfahren, die auf manuellem Wege entweder technisch unmöglich oder nur mit hohem Zeitaufwand durchzuführen sind.

Das Untersuchungsgebiet besteht aus einer 4km² großen Fläche im hinteren Bregenzer Wald (Vorarlberg). Das digitale Netz wurde sehr engmaschig gewählt (350x400 Punkte, Maschenweite: 5,13m), um die komplexen topographischen Strukturen mit starken Hangneigungsänderungen auf kleinstem Raum erfassen zu können.

Begonnen wurde mit der Erstellung eines DTM (Digital Terrain Modell), um einen anschaulichen Überblick über das Gelände zu erhalten und eine Interpolation durchführen zu können.

Weitere Informationsschichten bestanden aus einer Karte mit der Darstellung der oberflächennahen Schichten, Karten mit Grundwasserdaten und einer Karte der Bodenmechanik (Massendichte des Materials / Kohäsion, Winkel der inneren Reibung).

Aus diesen Informationsschichten erzeugte das GIS eine Rasterkarte. Danach kamen die geotechnischen Modelle zum Einsatz. Die Berechnung des Stabilitätsgrades zur Erstellung einer Gefahrenkarte geschah auf der Basis eines Sicherheitsfaktors (Safety Factor SF). Dieser Faktor gibt Auskunft über den Wechsel des Stabilitätsgrades, die zeitliche Einordnung des Rutschungsereignisses und den Umfang der Rutschung (Größenverhältnisse). Um genaue Aussagen im Rahmen von forstwirtschaftlichen Planungen sowie dem Bau von Straßen und Siedlungen machen zu können, wurde der Maßstabsbereich auf 1:1000 bis 1:10000 eingeeengt.

Zur Berechnung des Sicherheitsfaktors wurde eine deterministische Methode hinzugezogen. Ziel war es, den Sicherheitsfaktor entlang von Hangprofilen zu berechnen (nach FELLENIUS und BISHOP). Als Grundlage dienten konventionelle Stabilitätsmodelle. Nach der Berechnung des Profils legte man ein Netz, bestehend aus Ringen, über die Hangprofile. Die Anzahl und Ausdehnung der Kreise hängt dabei von der Zonierung der Hänge, der Variabilität der verschiedenen Stabilitäts-Parameter entlang der Hänge und der gewünschten Genauigkeit der berechneten Karte ab.

Im Anschluß berechnete das Programm für jeden Raster-Punkt die potentielle Gleitfläche und ermittelte mit Hilfe einer schrittweisen Verkleinerung des Radius den SF-Wert. Der kleinste errechnete SF-Wert stellte das Ergebnis dar (s. Abb. 24).

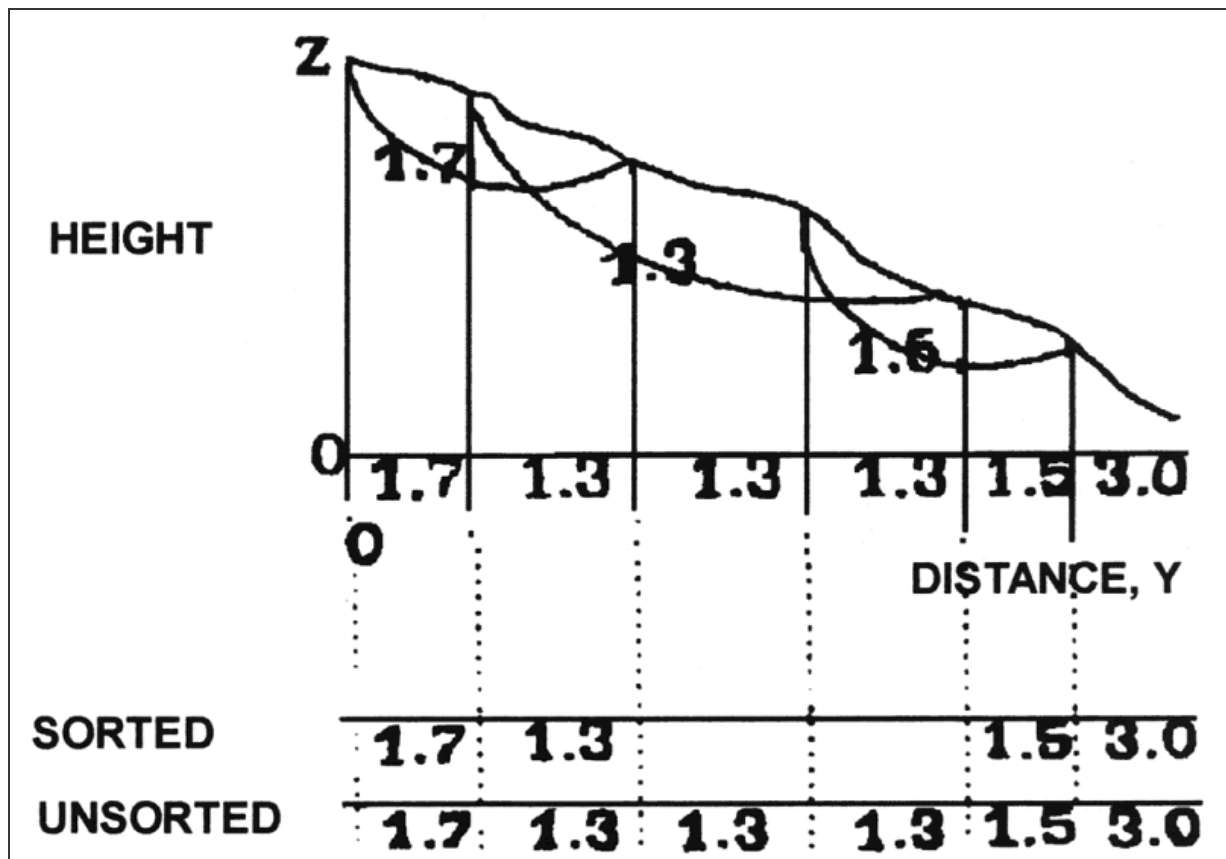


Abb. 24: Berechnung der minimalen SF-Werte (v. ASCH 1993)

Im Anschluß an eine Filterung und Interpolation ließ sich eine Stabilitätskarte mit Isolinien gleicher SF-Werte ausgeben (Abb. 25). Diese Karte zeigt Flächen mit einer Skala von "nicht gefährdet" bis "stark gefährdet".

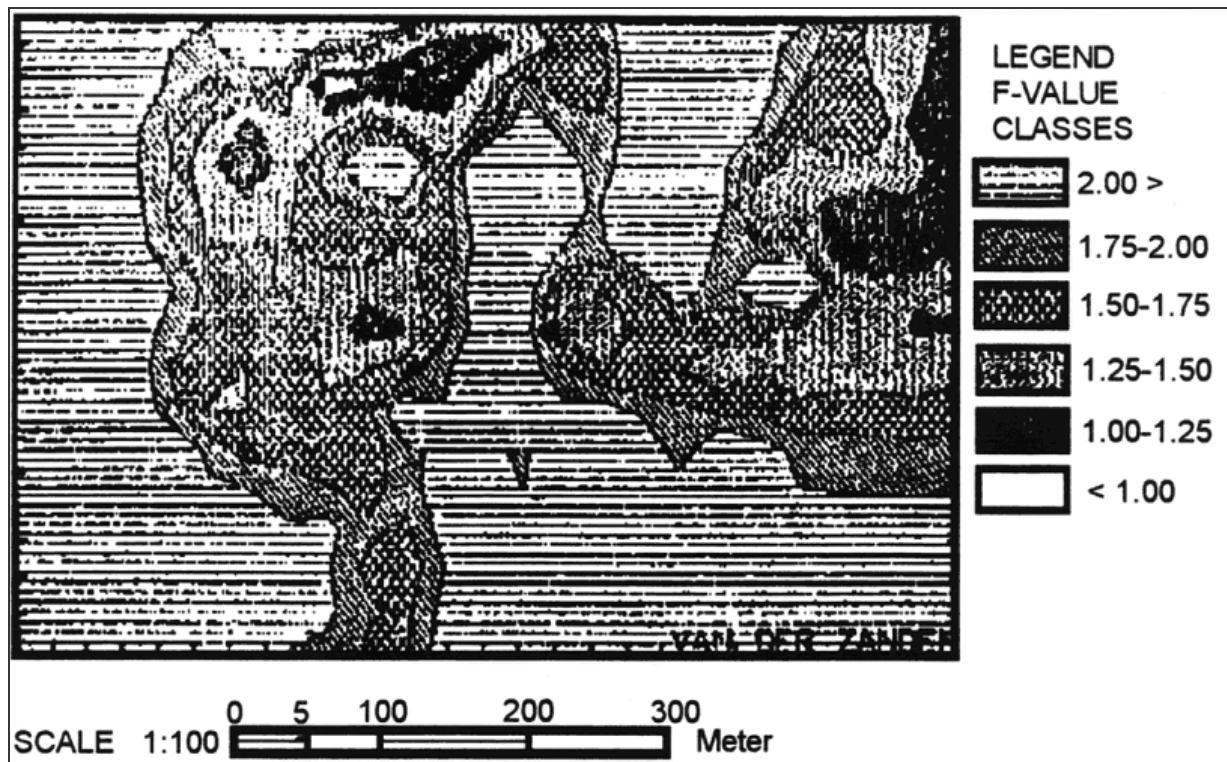


Abb. 25: Gefahrenkarte, berechnet mit Hilfe des SF-Wertes (v. ASCH 1993)

3.6.2 Ein neuer Weg zur Berechnung einer Hangstabilitätskarte

Der hier vorgestellte Weg zur Erstellung einer Hangstabilitätskarte baut auf ein Flußdiagramm (Kap. 3.6.3) auf. Anhand dieses Flußdiagramms soll versucht werden, die unterschiedlichen Informationsschichten durch eine sinnvolle Gewichtung und Kombination (Verschneidung) zusammenzuführen (Abb. 26). Die digital vorliegenden Informationsschichten setzen sich aus der Morphometrie (Hangneigung), Geologie (Gesteine & Substrate), Morphologie (Rutschungen) und Hydrologie (Vernässungen) zusammen. Als Verschneidungsform wurde die Overlay-Technik gewählt, neue Informationsschichten ergeben sich aus der Schnittmenge von zwei übereinandergelagerten Layern.

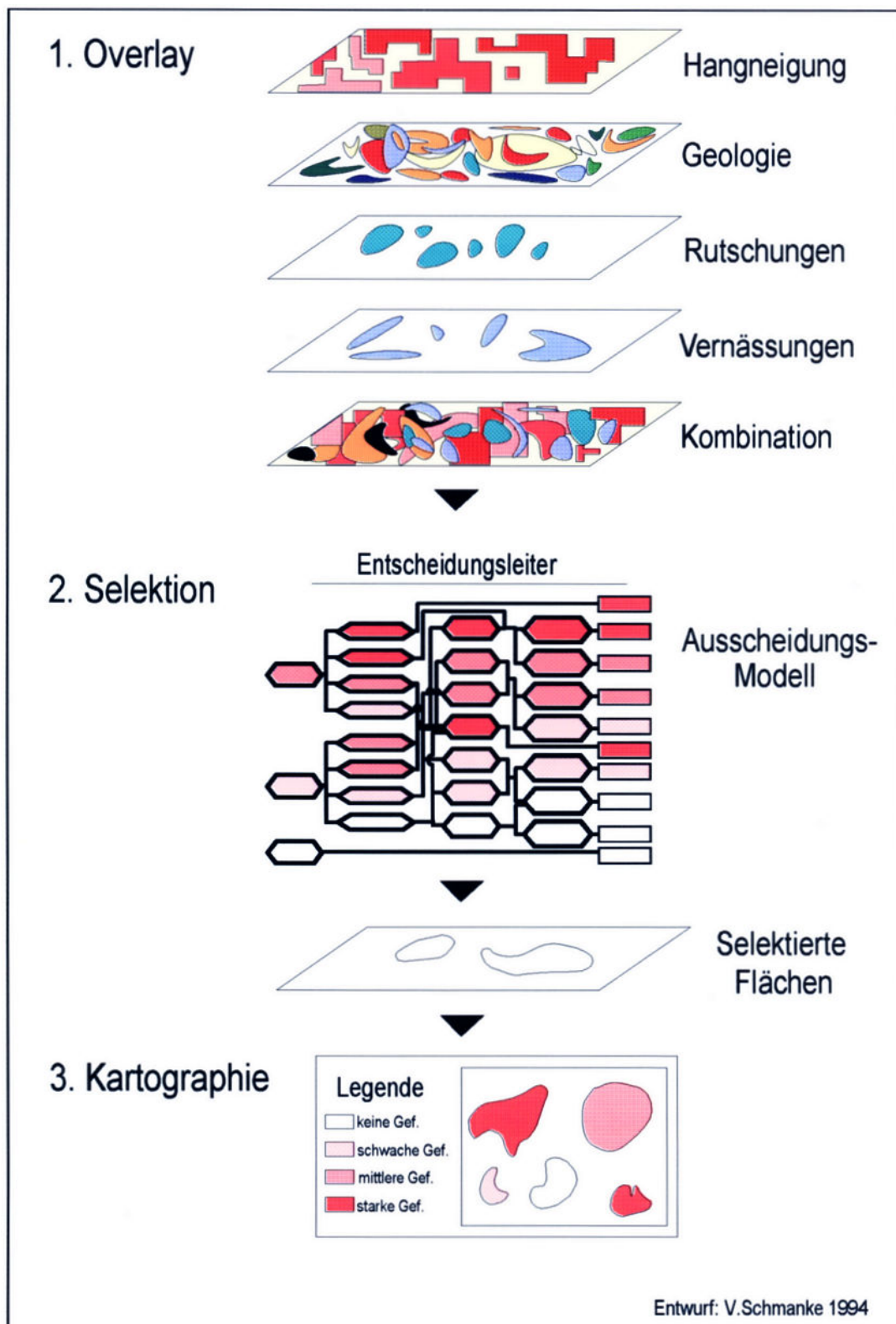


Abb. 26: Vorgehensweise für die Berechnung einer Hangstabilitätskarte mit Hilfe eines Geo-Informationssystems

3.6.3 Entwicklung eines Flußdiagramms

Für die Entwicklung einer Hangstabilitätskarte wurde ein Modell entwickelt, das die Verschneidung der vier Informationsschichten regelt (Abb. 27). Das Modell legt zum einen fest, welche Information mit welcher weiteren Information überlagert wird, zum anderen definiert es die Auswirkungen auf eine Fläche durch die gezielte Gewichtung einzelner Komponenten (Auf- oder Abwertung der Gefährdung um eine oder mehrere Stufen).

Als Grundkarte für alle weiteren Berechnungen wurde die Hangneigungskarte ausgewählt. Ihre Position als Basis-Informationsschicht begründet sich zum einen in der Existenz flächendeckender Daten, zum anderen stellt sie einen wesentlichen Faktor bezüglich der Stabilität eines Hanges dar. Im Vergleich zur Geologischen Karte mit ebenfalls flächendeckender Informationsschicht nimmt sie aufgrund wesentlich zuverlässigerer Werte eine vorrangige Stellung ein.

Die Geologische Karte hingegen stellt zwar für die oberflächennahen Schichten eine sehr gute Datenbasis zur Verfügung, die tieferen für die Hangstabilität bedeutsamen Schichten (in ca. 5 - 10m Tiefe -> Gleitschichten) müssen aber nicht zwangsläufig den oberflächennahen Schichten entsprechen. Der daraus resultierende Ungenauigkeitsfaktor wertet die eigentliche Dominanz der Geologie ab. Deshalb fließen ihre Werte erst an zweiter Stelle in die Verschneidung ein und dienen schon nur noch der Korrektur der gewichteten Hangneigungskarte.

Die Layer zur Morphologie und Hydrologie sollen vor allem eine Nachbesserung und Verfeinerung der von Rutschungen betroffenen Hänge bewirken. Gerade diese Hänge erfordern aufgrund ihrer potentiellen und z.T. akuten Gefahr ein hohes Maß an Genauigkeit in der Kennzeichnung ihrer Stabilität.

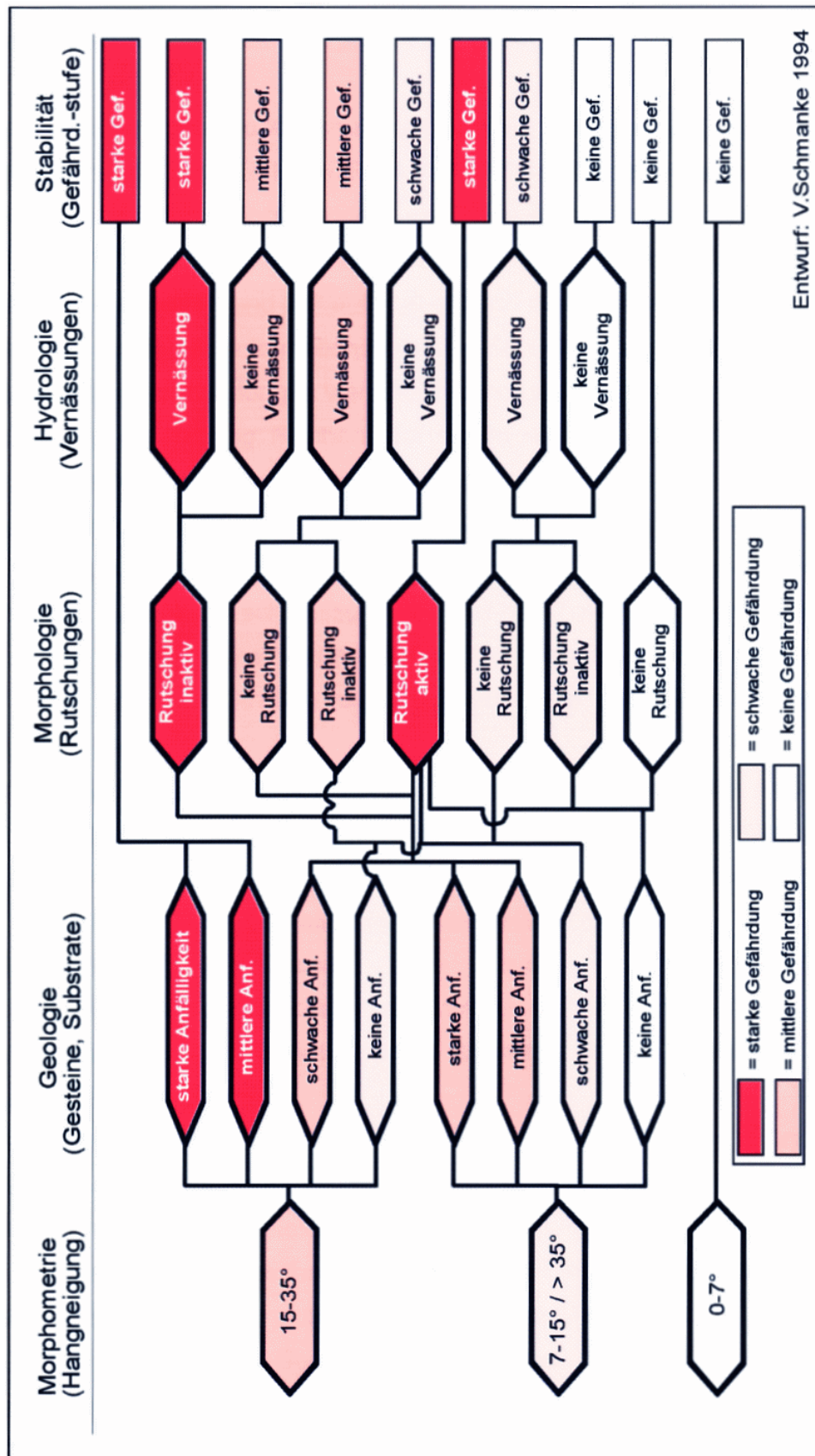


Abb. 27: Entscheidungsleiter zur Berechnung einer Hangstabilitätskarte des Bonner Raumes

3.6.3.1 Gewichtung der Morphometrie (Hangneigungen)

Zunächst erfolgte eine Klassifizierung anhand vorliegender Ergebnisse aus dem Bonner Raum (U. HARDENBICKER 1994). Bestätigung erfuhren diese Resultate durch Forschungen und Publikationen anderer Universitäten (Beispiel: T. v. ASCH 1993: "Rutschungen treten verstärkt bei Hangneigungen zwischen 15 und 30° auf"), aber auch durch Berechnungen mit Hilfe des benutzten Geo-Informationssystems (Kap. 4.1, Abb. 39).

Es wurde eine Einteilung in vier Gefährdungsstufen gewählt:

- a) Starke Gefährdung: Flächen, auf denen eine unmittelbare Bedrohung durch den Abgang einer Rutschung existiert;
- b) Mittlere Gefährdung: Flächen, die nicht direkt durch den Abgang einer Rutschung bedroht sind, aber durch ungünstige Witterungsverhältnisse (z.B. hohe Niederschlagssummen über den Zeitraum mehrerer Monate) oder anthropogene Veränderungen der Hangmorphologie (z.B. durch den Bau von Straßen und Häusern) eine potentielle Gefährdung darstellen.
- c) Schwache Gefährdung: Flächen, die im Normalfall stabil sind, aber durch angrenzende instabile Hänge oder das Zusammenwirken mehrerer Faktoren (z.B. hohe Niederschläge + anthropogene Veränderungen + Erdbeben) eine gewisse potentielle Gefahr darstellen;
- d) Keine Gefährdung: Flächen, die auch unter ungünstigsten Verhältnissen (s.o.) nicht instabil werden.

Die Hangneigungskarte untergliedert sich nach der Klassifizierung in drei Gefährdungsstufen:

Mittlere Gefährdung: alle Flächen mit einer Neigung zwischen 15 und 35°

Schwache Gefährdung: Neigungsflächen zwischen 7 und 15° sowie >35°

Keine Gefährdung: Gebiete mit einer Hangneigung von 0-7°

Um innerhalb der Verschneidung Flächen mit *mittlerer Gefährdung* noch aufwerten zu können, wurden zu Beginn der Verschneidung noch keine Gebiete einer *starken Gefährdung* zugeordnet, obwohl z.B. Hangneigungen zwischen 15 und 35° durchaus ein hohes Gefährdungspotential besitzen.

3.6.3.2 Gewichtung der Geologie (Gesteine, Substrate)

Um eine sinnvolle Gewichtung der Geologie vornehmen zu können, muß man ihre Rutschanfälligkeit untersuchen. Für eine nähere Betrachtung bezüglich ihrer Stabilität wurden die devonischen Gesteine, die tertiären Sedimente und die Trachyttuffe ausgewählt.

Die devonischen Gesteine (Siegener Schichten) sind größtenteils mehrere Meter bis Dekameter tief verwittert. An den Talhängen können an der Grenze verwittertes/unverwittertes Devon, d.h. an einer vorgegebenen Schwächezone, Gleitflächen ausgebildet werden, an denen sich in der Regel tiefgreifende Translations- und Rotationsrutschungen entwickeln. Eine solche Schwächezone liegt beispielsweise vor,

wenn die Schichten zum Hang hin einfallen (Beispiel: Steilhang zwischen Bonn und Bad Godesberg mit mehreren Rutschungen).

Die mächtige, auf dem devonischen Grundgebirge aufliegende Verwitterungsdecke wird nach FELIX-HENNINGSSEN (1990) in Solum und Saprolit untergliedert. Die Verwitterung des Saprolits reicht teilweise in bis zu 150m Tiefe herab. Die Rutschanfälligkeit von Hängen im Saprolit wird durch die Volumenverluste des Gesteins erhöht.

In der miozänen Unterflözgruppe, die sich aus wechsellagernden Tonen, Feinsanden und dünnen Braunkohleeinlagerungen zusammensetzt und Mächtigkeiten bis zu 30m erreicht, können an mehreren Stellen des Schichtgebäudes Gleitflächen ausgebildet werden. Die grauen bis bunten Tone des Tertiärs besitzen je nach Wassergehalt eine weiche, steife bis halbfeste Konsistenz und sind nahezu wasserundurchlässig. Hier kommt es vor allem an den Grenzen zu sandigen Schichten zur Entstehung von Gleitflächen. Auch in den Braunkohleeinlagerungen mit hohem Wassergehalt und weicher Konsistenz können sich Gleitflächen entwickeln. So stellen besonders geringmächtige Braunkohleschichten potentielle Gleitflächen und damit eine erhöhte Rutschanfälligkeit dar.

Die Trachyttuffe im Siebengebirge und im linksrheinischen Gebiet südlich von Bonn treten an den Hängen, an tief eingeschnittenen Bachtälern und Terrasseneinebnungsflächen, von denen der Löß wieder abgetragen ist, oberflächennah auf.

Besonders die verwitterten Trachyttuffe mit ihrem hohen Smectitgehalt sind extrem rutschanfällig. Ebenso von Rutschungen betroffen sind Gebiete, wo vertonte Trachyttuffe von wasserdurchlässigen Basalten oder Basaltschutt überlagert werden (vgl. HARDENBICKER 1994).

Mit Hilfe dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse erfolgte nun eine Klassifizierung der Gesteine und Substrate (Tab. 2 und Abb. 28).

Es wurde eine Einteilung in vier Klassen gewählt. Entscheidend für die Zuordnung der Gesteine und Substrate waren zum einen die o.g. Forschungsergebnisse, zum anderen aber auch Erfahrungswerte, die im Rahmen bisheriger Untersuchungen und anhand von ingenieurgeologischen Gutachten gesammelt wurden.

Eine Aufwertung innerhalb der Verschneidung sollten alle geologisch stark oder mittelbar rutschanfälligen Gesteine und Substrate erhalten, eine Abwertung geologisch unbedeutsame Flächen. Alle übrigen Gebiete (Geologische Einheiten mit schwacher Anfälligkeit) übernahmen die Werte aus der Hangneigungskarte.

starke Rutschanfälligkeit	mittlere Rutschanfälligkeit	schwache Rutschanfälligkeit	keine Rutschanfälligkeit
sandige Tone	Abgrabung	Andesit	Basalttuff
tertiärer Sohlenton	Aufschüttung	Basalte	Dünensand / Flugdecksand
Tone undifferenziert	Gehängelehm	Eifelschotter	Kalktuff
verwitterter Trachyttuff	Gehängeschutt	Kiese ältere HT	Löß / Lösslehm
	devonische Schiefer	Kiese jüngere HT	sandiger Quarzkies
	tertiäre Sande	Kiese MT	Sanidintrachyt
		Kiese NT	Schuttkegel
		Sande jüngere HT	Hochflutlehm
		Sande MT	Talböden
		Sande NT	Talaue Rheintal
			toniger Löß HT
			trachytischer Bergsturz
			Trachyttuff

Tab. 2: Rutschungsanfälligkeit der Gesteine und Substrate (nach der Legende der GK 25)

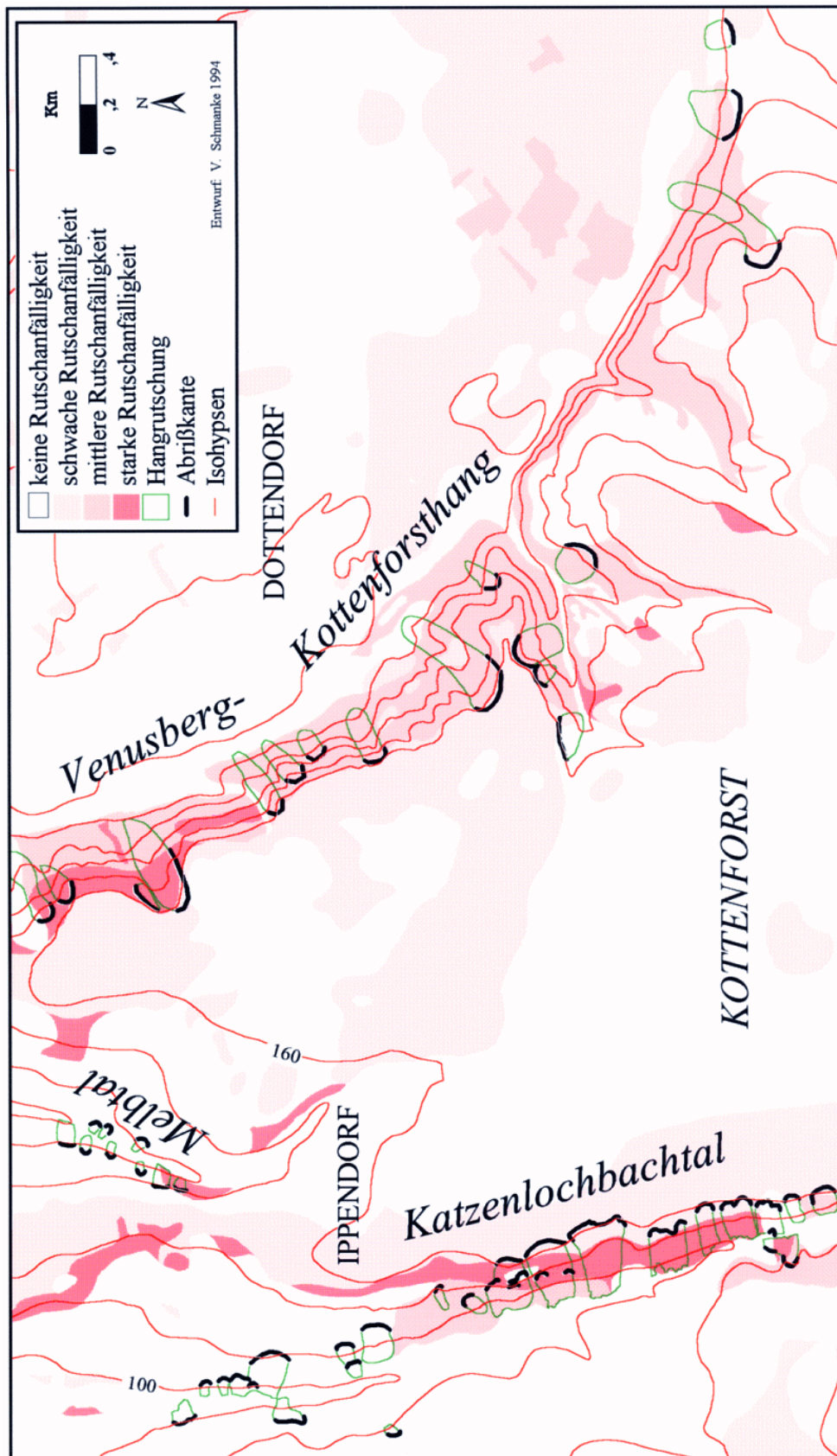


Abb. 28: Rutschanfälligkeit der Gesteine und Substrate

3.6.3.3 Gewichtung der Morphologie (Rutschungen)

Rutschungsflächen bedingen eine Untergliederung nach dem Grad ihrer Aktivität. *Aktive Rutschungen* zeigen eine momentane Instabilität des Hanges an und erforderten somit die Zuordnung sämtlicher sich in Bewegung befindlicher Hänge (Ausnahme schwach geneigte Hänge von 0-7° Hangneigung) in die höchste Gefährdungsstufe. Lag eine *inaktive Rutschung* vor, so mußte die Fläche eine Aufwertung um eine Stufe erfahren. Diese Aufwertung sollte allerdings in direktem Zusammenhang mit der Hydrologie gesehen werden (s. Kap.3.6.3.4). Bei allen übrigen Flächen fand keine Korrektur des zuvor berechneten Gefährdungsgrades statt.

3.6.3.4 Gewichtung der Hydrologie (Vernässungen)

Die Verschneidungen im Rahmen der Hydrologie dienen der Bestätigung oder Korrektur der Hangstabilität der durch Rutschungen aufgewerteten Flächen. So behielten alle durch Rutschungen um eine Stufe erhöhten Flächen ihren zugewiesenen Wert, falls sich innerhalb der Rutschungszone mindestens eine Vernässungsfläche befand. Lag keine Vernässung vor, so wurde der Hangstabilitätswert um eine Stufe herabgesetzt.

Die Verknüpfung der beiden Faktoren Morphologie und Hydrologie sollte vor allem eine Überbewertung inaktiver Rutschungen ausschließen. Deshalb erhielten nur diejenigen inaktiven Rutschungsflächen in der Stabilitätskarte den durch die Morphologie zugewiesenen Wert, die zusätzlich eine Vernässungszone und damit ein eindeutiges Merkmal einer gewissen Instabilität aufwiesen.

Alle Flächen außerhalb von Rutschungen wurden während der Verschneidung mit der Hydrologie nochmals untergliedert. Nahmen diese Flächen nach der Verschneidung mit der Morphologie den Grad einer schwachen oder mittleren Gefährdung ein, so erfolgte nun eine Abwertung. In den Vernässungszonen selbst blieb der zuvor existierende Wert allerdings erhalten.

Zu erwähnen sind noch die Flächen, die nach dem Hinzuziehen der Morphologie unter der Bezeichnung "keine Gefährdung" geführt wurden. Hier kam es weder zu einer Aufwertung noch zu einer Abwertung der Flächen.

3.6.3.5 Kombination (Verschneidung) der einzelnen Komponenten

Aus dem im Kap. 3.6.3 vorgestellten Modell läßt sich mit Hilfe eines Geo-Informationssystems durch Verschneidungstechniken eine Gefährdungskarte berechnen.

Die Komplexität der schon in den vorigen Kapiteln angedeuteten Verschneidungen soll nun anhand mehrerer Beispiele dargestellt werden. Dabei werden die Auswirkungen unterschiedlicher Attribute für einige ausgewählte Flächen dargestellt, so daß man erkennen kann, welchen Weg eine Fläche bei der Verschneidung durchläuft.

Beispiel 1 (Hangneigung: 15-35° -> Geologie: starke Anfälligkeit):

Für Hangneigungen mit stärkster Rutschanfälligkeit und gleichzeitiger Existenz einer extrem rutschanfälligen geologischen Schicht (z.B. Tone oder verwitterte Trachyttuffe) kommt der Existenz von Rutschungen oder Vernässungszonen keine Bedeutung zu. Die Geologie nimmt hier eine zentrale Stellung ein. Liegen die Hangneigungen zudem zwischen 15 u. 35°, so müssen diese Flächen auch bei einer Absistenz von Hangrutschungen und / oder Vernässungszonen einer starken Gefährdung zugerechnet werden.

Beispiel 2 (Hangneigung: 15-35° -> Geologie: schwache Anfälligkeit -> Morphologie: Rutschung inaktiv -> Hydrologie: keine Vernässung):

Sind die Flächen 15-35° geneigt und mit einer Gesteins- oder Substratauflage schwacher Anfälligkeit bedeckt, so muß mittels der Morphologie und Hydrologie eine Spezifizierung erfolgen, um nicht einen zu hohen Gefährdungsgrad zu erhalten. Liegt eine inaktive Rutschung vor, so sollte der zugewiesene Wert einer mittleren Gefährdung für die Rutschungsfläche nur dann aufrecht erhalten werden, wenn zugleich eine Vernässung vorliegt. Trifft man innerhalb der inaktiven Rutschung keine Vernässungszone an, so muß eine Abwertung erfolgen, da solche Gebiete maximal schwach gefährdet sind.

Beispiel 3 (Hangneigung 7-15°/ >35° -> Geologie: mittlere Anfälligkeit -> Morphologie: Rutschung aktiv):

Für die Hangneigungsklasse 7-15° und >35° kommt es durch die Verschneidung mit Geologischen Schichten mittlerer Gefährdung zu einer Aufwertung um eine Stufe. Ist zudem eine aktive Rutschung präsent, so kommt dem Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein einer Vernässungszone keinerlei Bedeutung mehr zu, da aktive Rutschungen auch bei schwach anfälligen Neigungen und weniger gefährdeten Gesteinen oder Substraten eine hohe potentielle Gefährdung besitzen.

Beispiel 4 (Hangneigung 7-15°/ >35° -> Geologie: keine Anfälligkeit -> Morphologie: Rutschung inaktiv -> Hydrologie: Vernässung vorhanden):

Zum Schluß soll der Weg durch den Entscheidungsleiter für einen Hangbereich mit schwacher Gefährdung beschrieben werden.

Weist ein Hang oder Teilbereich eines Hanges Neigungen zwischen 7 und 15° oder > 35° auf und liegen keine anfälligen Geologischen Schichten an der Oberfläche an, so bewirkt die

Präsenz einer inaktiven Rutschung nach der Abwertung durch die Geologie zunächst wieder eine Aufwertung um eine Stufe. Letztendlich entscheidet aber erst die Existenz einer Vernässung innerhalb der inaktiven Rutschung darüber, ob die zu Beginn der Verschneidung festgelegte Gefährdungsstufe (schwach gefährdet) ihren Wert behält oder um eine Stufe erniedrigt wird (keine Gefährdung).

3.6.4 Die Aussagekraft der berechneten Hangstabilitätskarte

Aussagen über die Stabilität eines Hanges dürfen nur nach der Verschneidung sämtlicher Faktoren getätigt werden. Eine Interpretation der Ergebnisse nach der ersten oder zweiten Verschneidung könnte zu Fehlinterpretationen führen, da innerhalb des Entscheidungsleiters zahlreiche Abhängigkeiten existieren und somit eine Verschneidung auf die andere aufbaut. Als Beispiel sei hier die bewußte Heraufsetzung inaktiver Rutschungen bei geologisch unbedeutsamen Flächen (keine Anfälligkeit) und Hangneigungen zwischen 15 und 35° erwähnt, mit der Option, diese im Rahmen der Verschneidung mit der Hydrologie wieder abwerten zu können.

Betrachtet man nun das Ergebnis der Verschneidung (Abb. 29 - 33 und Karte 1:25.000 im Anhang), so gibt auch der eher kleine Maßstab von 1:25.000 (in Bezug auf Hangstabilitätskarten) schon ein recht differenziertes Bild der verschiedenen Stabilitätsstufen wider.

Eine starke Hanginstabilität findet man, wie die Häufigkeit der Rutschungen vermuten läßt, an den Osthängen des Katzenlochbachtals und am Venusberg-Kottenforsthang vor. Aber auch in einigen Teilabschnitten des Melbtales und Godesberger Tales wurden Hänge starker oder mittlerer Gefährdung ausgewiesen. Dagegen trifft man im Hardtbachtal trotz zahlreicher Rutschungen fast nur Hänge schwacher oder keiner Gefährdung an. Diese vermutlich leichte Unterbewertung ist zum einen auf die schwache Anfälligkeit der Hänge bezüglich ihrer Hangneigung und zum anderen auf die Geologie (Löß / Lößlehm und Sandiger Quarzkies -> keine Gefährdung) zurückzuführen. Aus diesem Grund bekommen außer den Rutschungsflächen nur wenige andere Bereiche innerhalb des Hardtbachtals eine Gefährdung zugewiesen. Die gleiche Situation ergibt sich für das Melbtal und den nördlichsten Abschnitt des Katzenlochbachtals. Bis auf wenige tonreiche Schichten (Melbtal) findet man hier ausnahmslos nicht rutschanfällige Lößauflagen vor. So kommt es auch hier fast ausschließlich zur Ausweisung von instabilen Flächen im Bereich von Rutschungen.

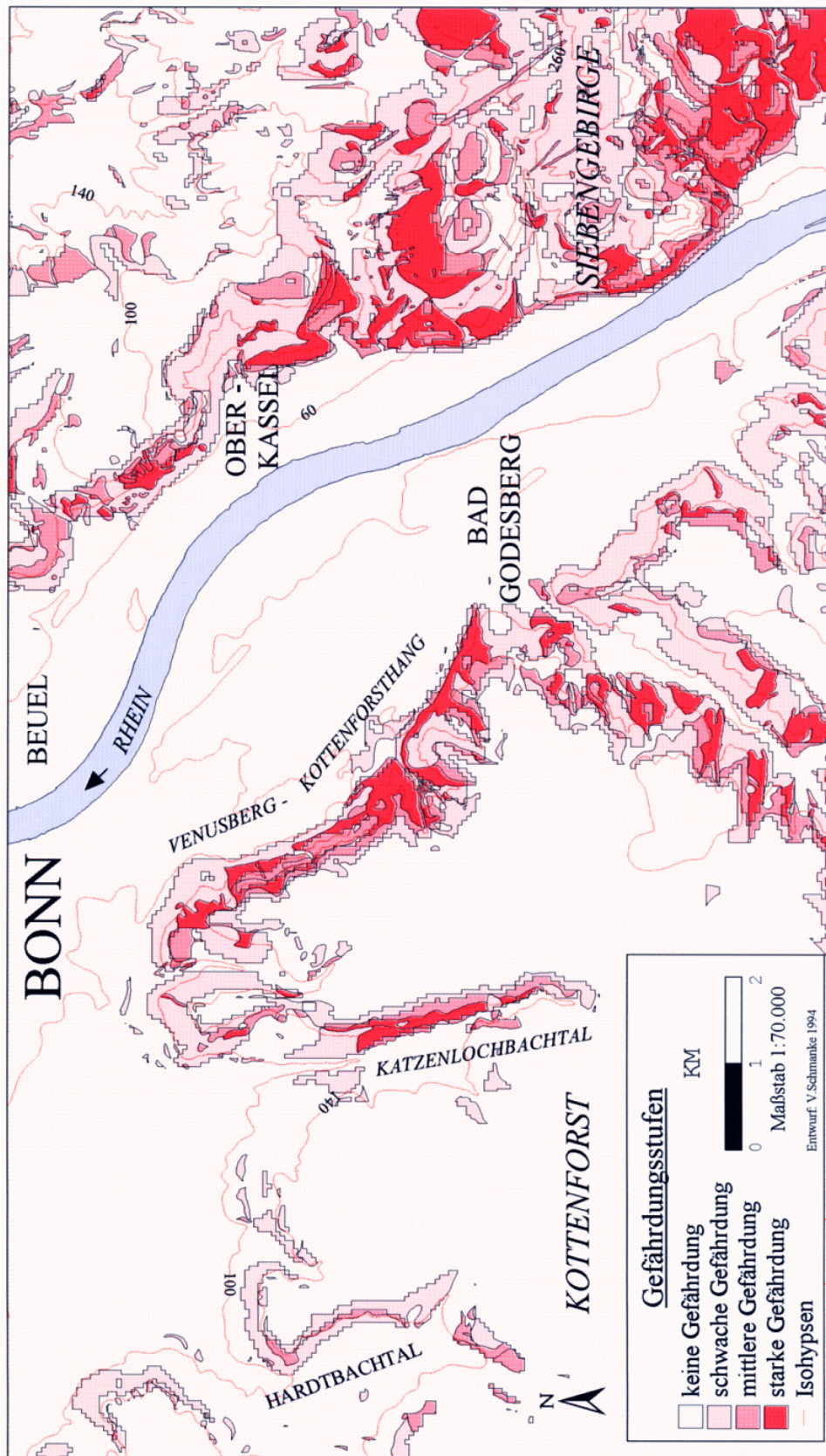


Abb. 29: Hangstabilitätskarte Bonner Raum nach der Verschneidung der Informationsschichten Hangneigung & Geologie

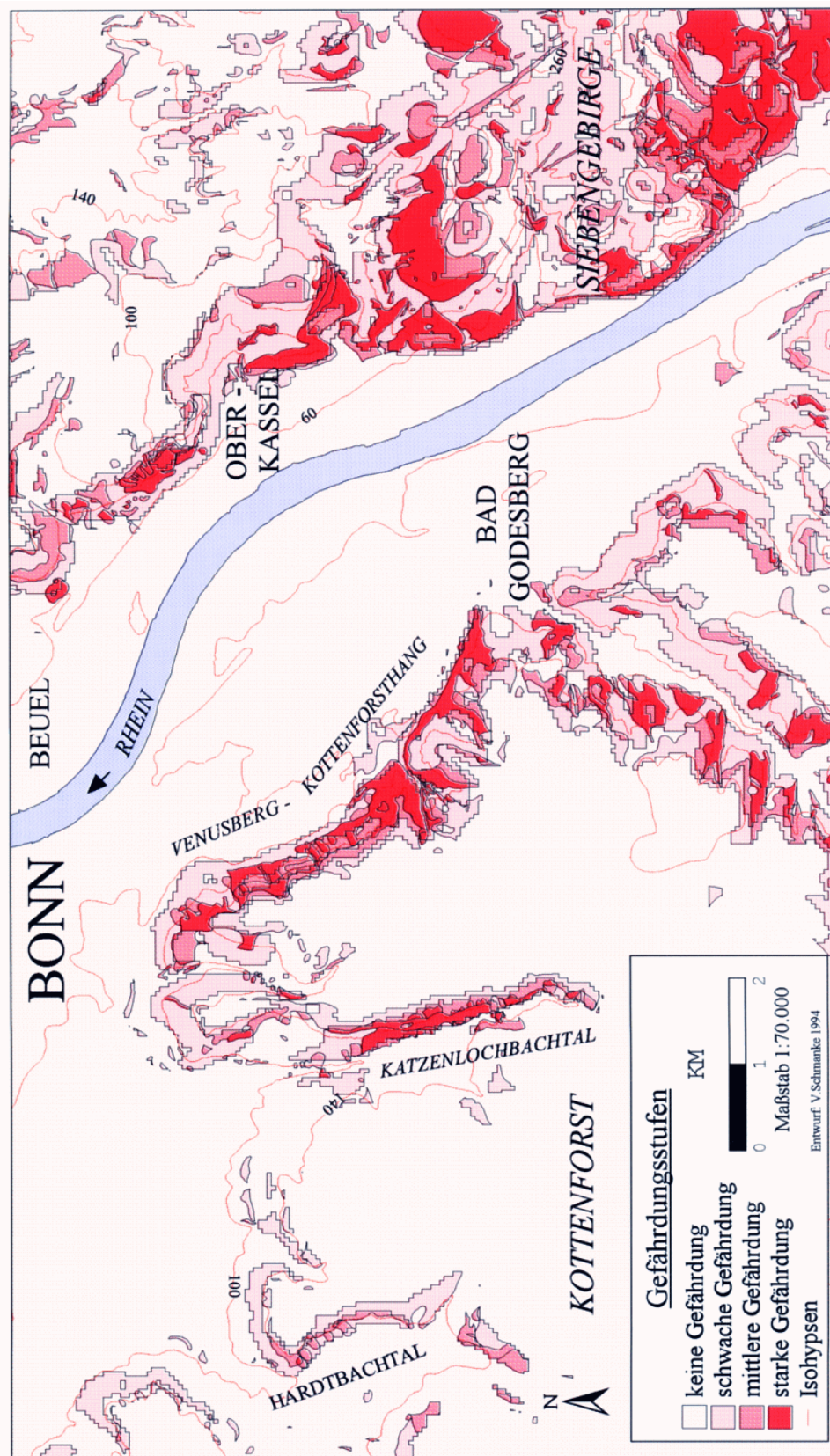


Abb. 30: Hangstabilitätskarte Bonner Raum nach der Verschneidung der Informationsschichten Hangneigung, Geologie & Rutschungen

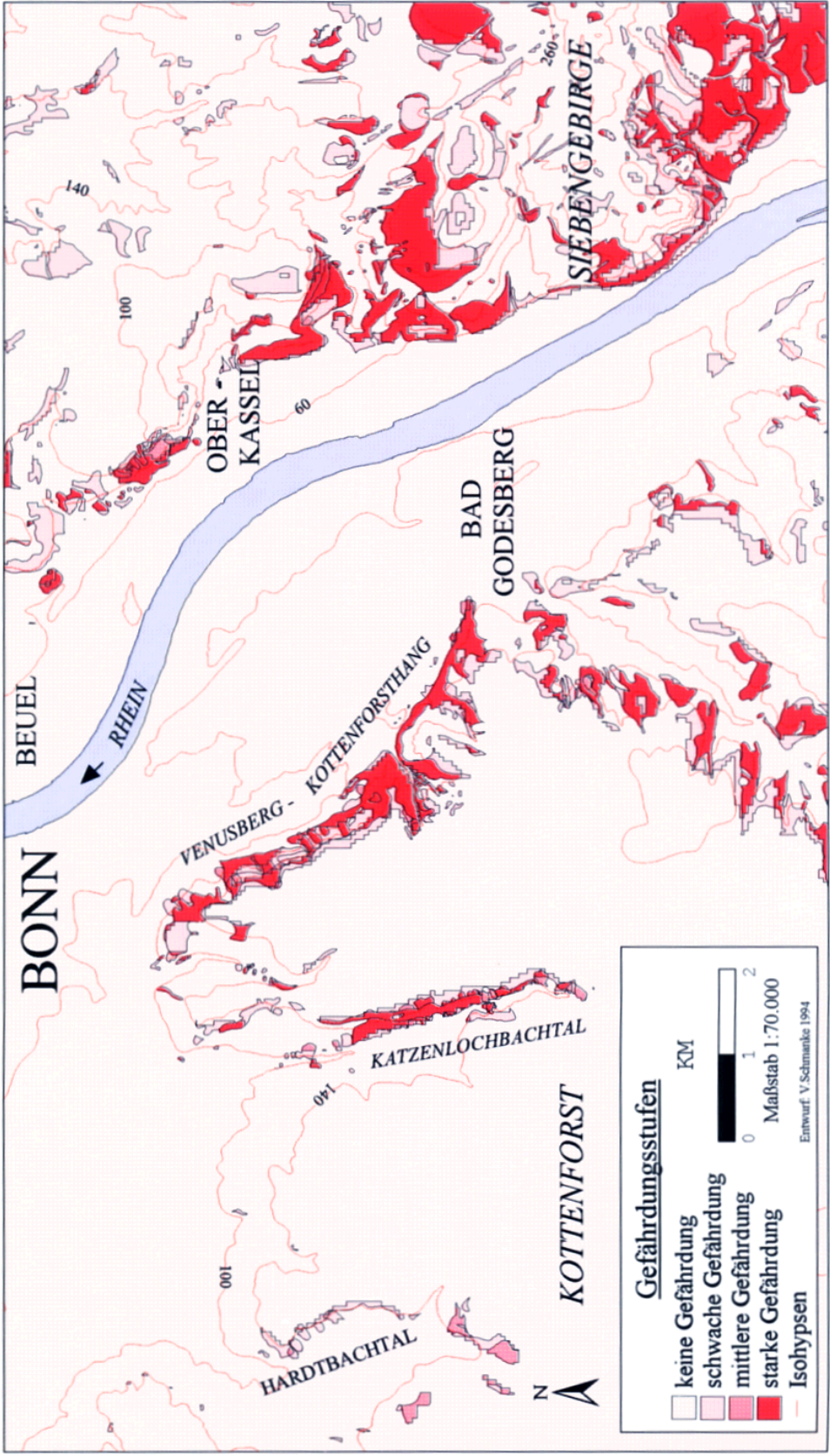


Abb. 31: Hangstabilitätskarte Bonner Raum (Verschneidung der Informationsschichten Hangneigung, Geologie, Rutschungen & Vernässungen)

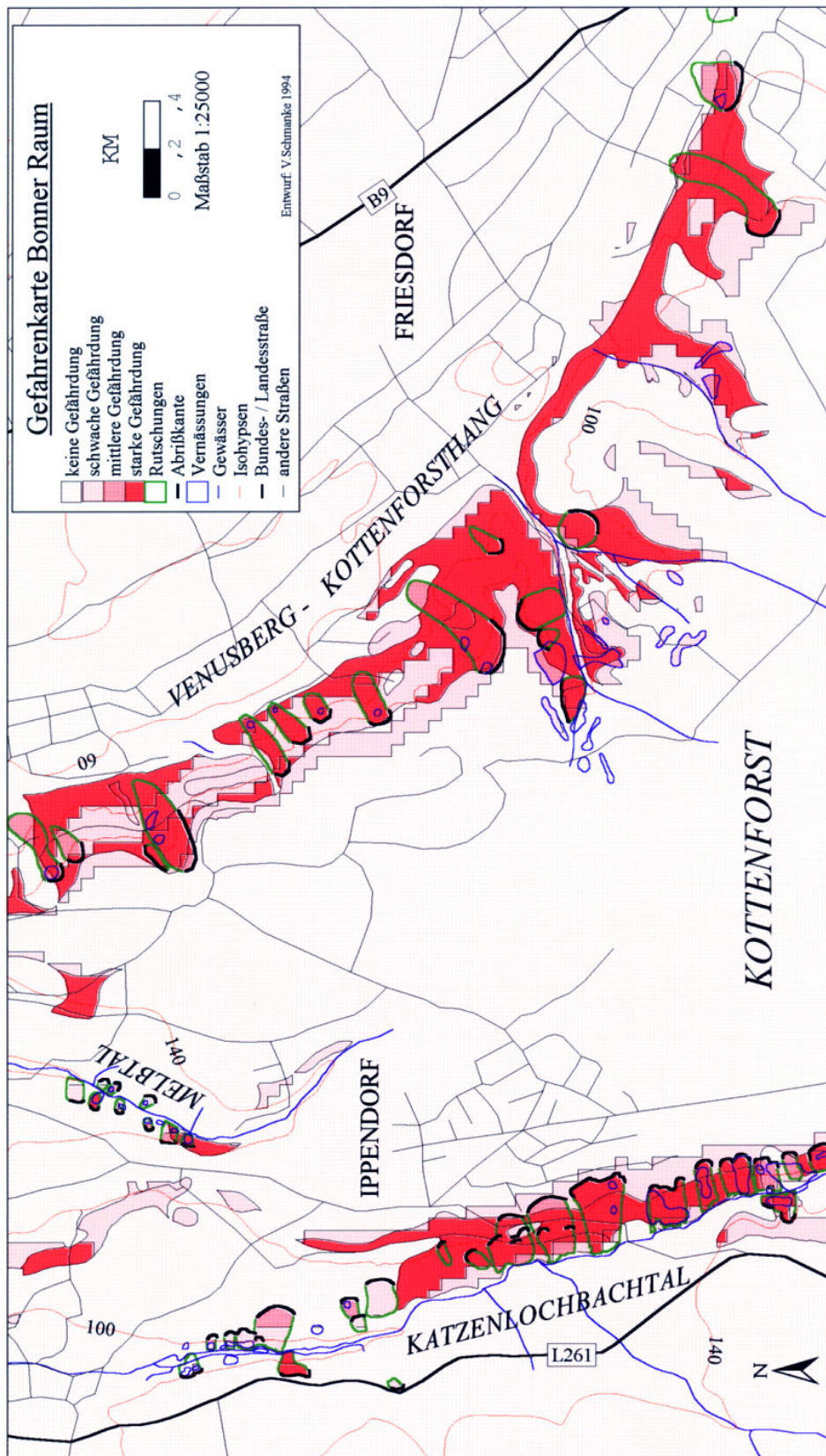


Abb. 32: Hänge mit hoher Instabilität (Ausschnitt: Katzenlochbachtal, Melbtal, Venusberg - Kottenforsthang)

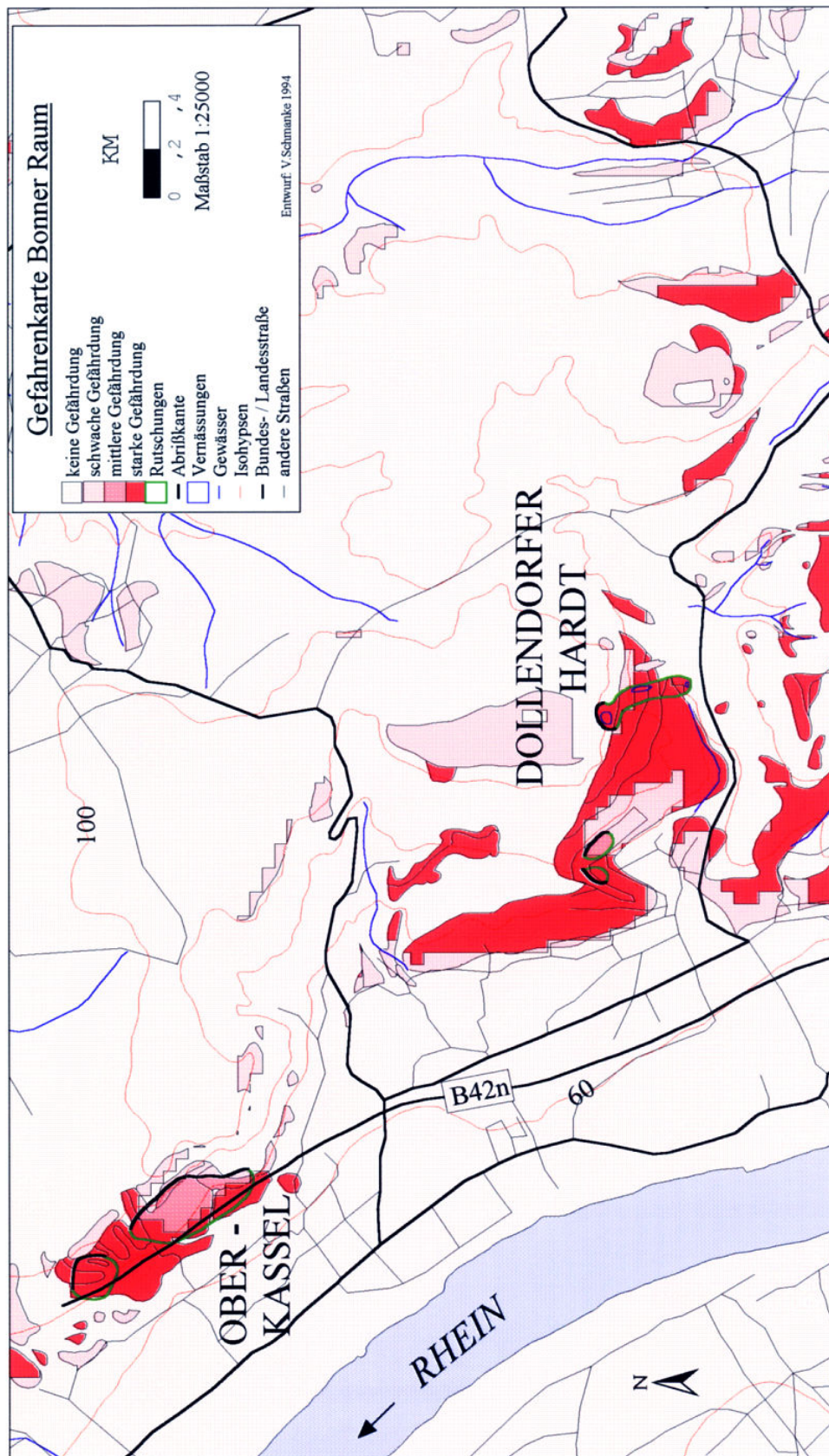


Abb. 33: Hänge mit hoher Instabilität (Ausschnitt: Oberkassel und Dollendorfer Hardt)

Ganz anders sieht die Morphometrie und Geologie im südlichen Katzenlochbachtal und an den Osthängen des Venusberges und Kottenforstes aus. Hier überwiegt die Hangneigungsklasse mit stärkster potentieller Rutschgefahr (15 bis 35°) und die Geologie setzt sich hauptsächlich aus stark rutschanfälligen Gesteinen (sandige Tone, tertiärer Sohlenton) und Gesteinen mittlerer Rutschanfälligkeit (devonische Schiefer, Gehängelehm) zusammen. Hinzu kommt die Präsenz zahlreicher Rutschungen und Vernässungszonen, so daß die Dominanz der stark gefährdeten Flächen hier wohl richtig berechnet wurde.

Das Godesberger Tal zeigt eine auffällige Abwechslung zwischen stark gefährdeten Hangbereichen (meist Flächen mit devonischen Schiefern) und Gebieten mit keiner Gefährdung (überwiegend Lößflächen). Trotz einer fast flächenhaft existierenden Hangneigung von 15-35° erhielten viele Hangbereiche keine Gefährdung zugewiesen. Dies liegt neben der Geologie auch an der noch nicht vollständigen Kartierung bezüglich der Geomorphologie (Hangrutschungen) und Hydrologie (Vernässungen). Hier könnte es durch die Kartierung bestehender Rutschungen und Vernässungen durchaus zu einer Aufwertung bisher zu niedrig bewerteter Flächen kommen.

Gleiches gilt auch für weite Teile des Siebengebirges. Kartiert wurden hier bislang hauptsächlich die westlichen Randhänge. Sie zeigen auch die stärksten Gefährdungen an. Dies liegt aber nicht zuletzt an der hohen Verbreitung devonischer Schiefer. Hier zeigt sich, wie auch für einige Hänge des Godesberger Tales und den Osthang des Kottenforstes zutreffend, ein Schwachpunkt der berechneten Gefahrenkarte: Für einige Gesteine und Substrate müßte eine weitere Differenzierung durchgeführt werden, da sie derzeit einer Überbewertung unterliegen. Dies gilt gerade für die devonischen Schiefer, die nur bei tiefgründiger Verwitterung (Saprolit-Bildung) zu einer Gefährdung beitragen. Alle geringfügig verwitterten Schiefer-Flächen dürften maximal einer mittleren Gefährdung zugeordnet werden.

Für den Trachyttuff wurde die Modifizierung in verwitterten und unverwitterten Trachyttuff bereits durchgeführt.

Bemerkbar macht sich dies vor allem in einigen Bereichen des Siebengebirges, wo maximal eine schwache Gefährdung vorliegt, ganz im Gegensatz zu den Hängen an der B42n bei Oberkassel, wo anhand ingenieurgeologischer Gutachten eine Korrektur vorgenommen wurde. Die nachträgliche Digitalisierung verwitterter Trachyttuffe führte an diesem Hangabschnitt zu einer Heraufsetzung der Gefährdung um mindestens eine Stufe.

Als Fazit kann man festhalten, daß die digitalisierten Informationsschichten und deren Verschneidung mit Hilfe eines neu entwickelten Modells einen ersten erfolgreichen Schritt in die Entwicklung einer Hangstabilitätskarte darstellen. Die Hanginstabilitätskarte im Maßstab 1:25.000 erfüllt ihren Zweck, nämlich die Ausweisung von potentiell gefährdeten Hangflächen, in vollem Umfang und untergliedert diese Flächen zudem in vier Gefährdstufen (von "nicht gefährdet" bis "stark gefährdet").

3.6.5 Verbesserungsmöglichkeiten durch Erweiterung und Korrektur des Datensatzes

Um die oben genannten Ungenauigkeiten zu beseitigen, müssen vor allem noch etliche Geländearbeiten (Kartierungen etc.) durchgeführt werden.

Die Geologie stellt, wie schon zu einem früheren Zeitpunkt erwähnt, die Schwachstelle der Berechnung dar und bewirkt so z.T. eine unkorrekte Ausweisung von gefährdeten Hangflächen. Abhilfe kann hier nur die genaue ingenieurgeologische Untersuchung und Kartierung des geologischen Untergrundes erbringen. Ebenfalls wünschenswert wären genauere Kenntnisse über die Hydrologie. Hier könnte u.a. auch der Einsatz von Rechenalgorithmen weitere Informationen liefern. Als Beispiel sei hier die Möglichkeit der Berechnung des Oberflächenabflusses über die digitale Erfassung der Wasserscheiden genannt.

Um die mögliche Schädigung anthropogener Einrichtungen besser beurteilen zu können, müßte eine weitere Informationsschicht, basierend auf einer Karte der besiedelten Flächen, digitalisiert werden. Dann könnte man auch Aussagen über die direkte Gefährdung bebauter Flächen treffen.

4. Ausblick

4.1 Weiterverarbeitung der Ergebnisse innerhalb einer Datenbank auf dem Hintergrund eines GIS

Geo-Informationssysteme bieten neben der Verarbeitung (Analyse, Modellierung) von Daten auch deren Verwaltung mit Hilfe von Datenbanken. Diese sind zumeist in das GIS integriert und erlauben Abfragen unterschiedlichster Art.

Den Rutschungen des Bonner Raumes wird auf dem Hintergrund einer dBase-kompatiblen Datenbank zur Zeit ein großer Datensatz mit zahlreichen Variablen zugeordnet. In diesen Datensatz sollen mittelbar auch die Ergebnisse der Verschneidungen dieser Diplomarbeit einfließen.

Der bislang existierende Datensatz erlaubt Anfragen zu jeder einzelnen Rutschung. So können beispielsweise ohne großen Aufwand die Flächenanteile verschiedener Gesteine und Substrate innerhalb einer Rutschung berechnet werden (Abb. 34).

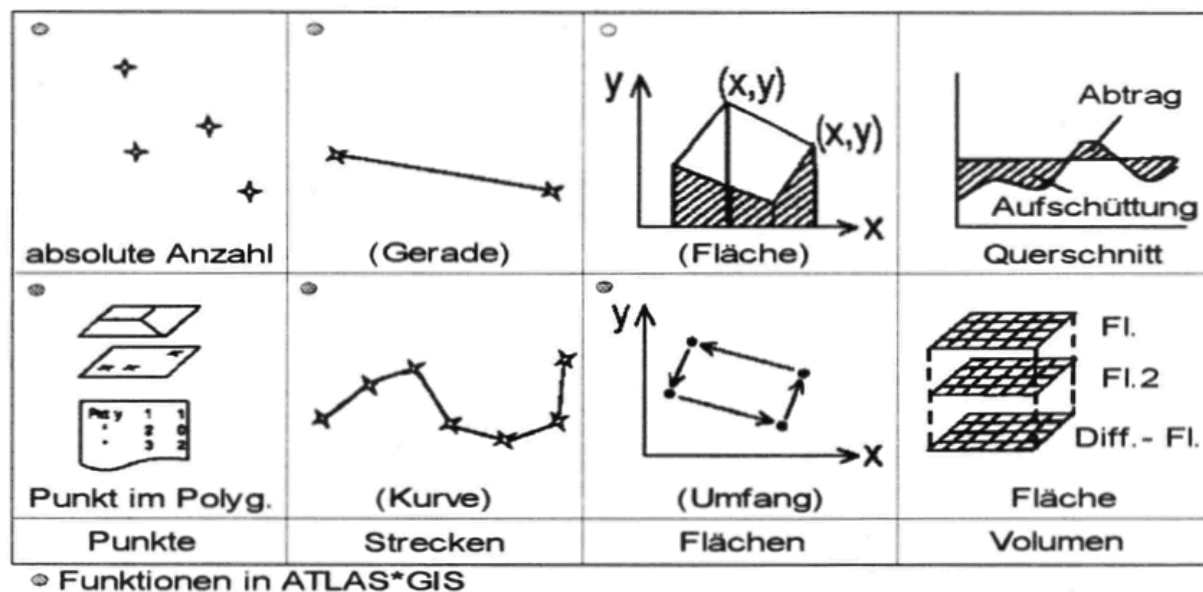


Abb. 34: Messen und Zählen im Datenbestand (BILL / FRITSCH 1991)

Gleiches gilt für die Hangneigungsanteile oder auch die Gefährdung bezüglich der Hangstabilität im Umfeld einer Rutschung.

Als Beispiel sollen hier zwei Berechnungen angeführt werden, die die Gesamtheit der Rutschungsflächen betreffen.

Die erste Karte (Abb. 35) zeigt die Geologie im Bereich von Rutschungsflächen für das Katzenlochbachtal, Melbtal sowie einen Abschnitt des Venusberg-Kottenforsthanges. Betrachtet man die Anteile der

Geologischen Einheiten, bezogen auf die Gesamtfläche der Rutschungen, so fällt zunächst auf, daß die devonischen Schiefer und Löss die größten Flächenanteile einnehmen (Abb. 36). Dies ist allerdings nicht verwunderlich, dominieren diese Gesteine bzw. Substrate doch auch bei Betrachtung des gesamten Bonner Raumes. Eine besondere Bedeutung kommt aber den stark rutschanfälligen verwitterten Trachyttuffen und tertiären Sohlentonen zu. Sie erreichen zusammen mit den unbedeutenden sandigen Tönen trotz einer geringen flächenhaften Ausdehnung einen Anteil von 20,2 % auf Rutschungsflächen (Abb. 37). Zieht man den Anteil der mittelbar rutschanfälligen Gesteine hinzu (34,1 %), so erreichen diese beiden Klassen einen Anteil von > 50 %, d.h. der Hauptanteil der Rutschungsflächen ist entweder stark oder zumindest mittelbar rutschanfällig.

Die zweite Karte (Abb. 38) stellt die Neigungen im Bereich von Rutschungen dar. Der hohe Anteil der Neigungen zwischen 15 und 35° (hellrote Färbung) bestätigt sich in der Darstellung der absoluten und relativen Zahlen (Abb. 39 und 40). Die Rutschungsflächen befinden sich zu 67,5 % in Bereichen mit einer mittleren Gefährdung bezüglich ihrer Hangneigung. Hier wird der hohe Stellenwert der Hangneigungsklasse 15-35° ersichtlich. Sie stellt ein deutliches Kriterium für das Auftreten von Rutschungen dar.

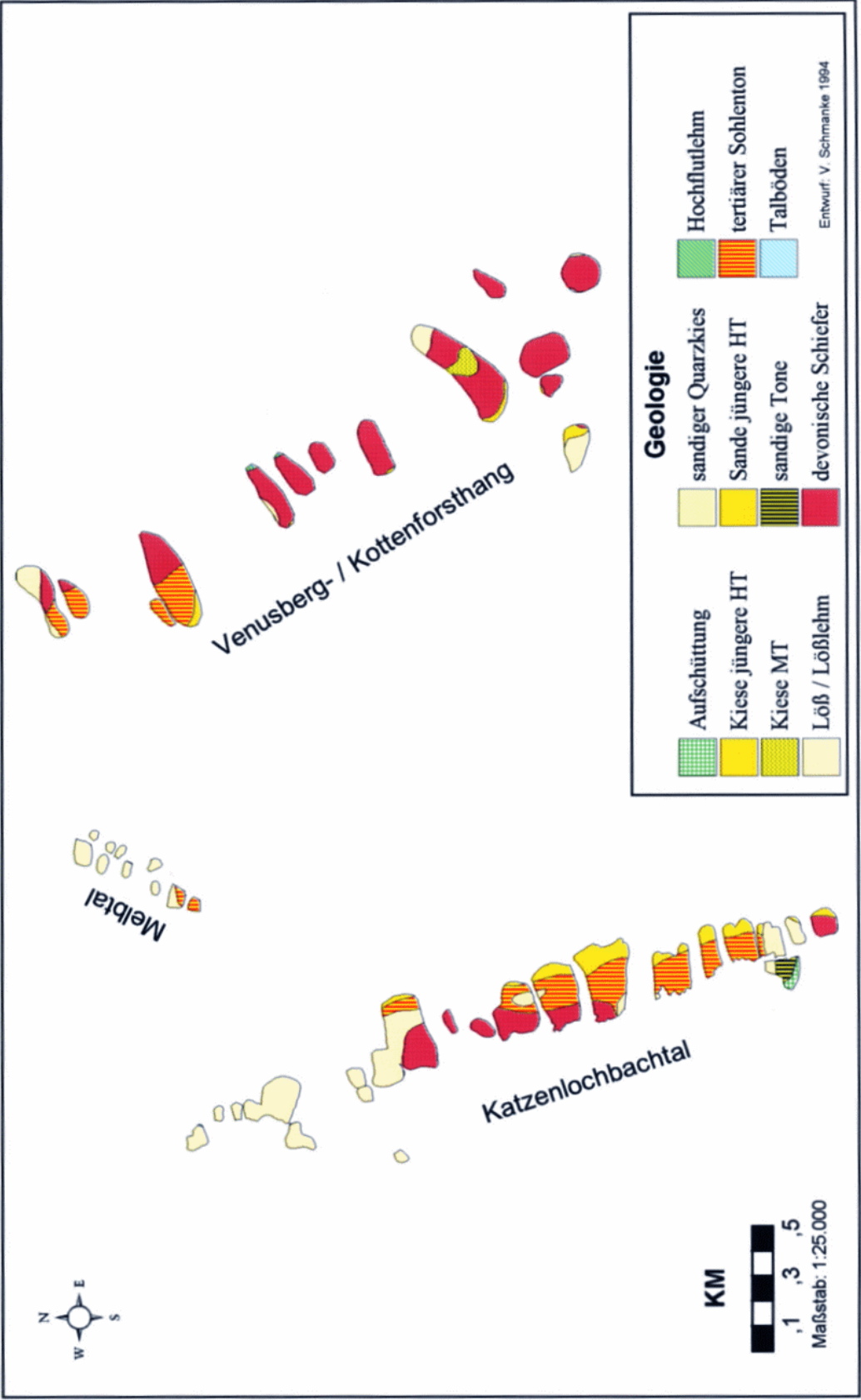


Abb. 35: Geologischer Untergrund auf Rutschungsflächen

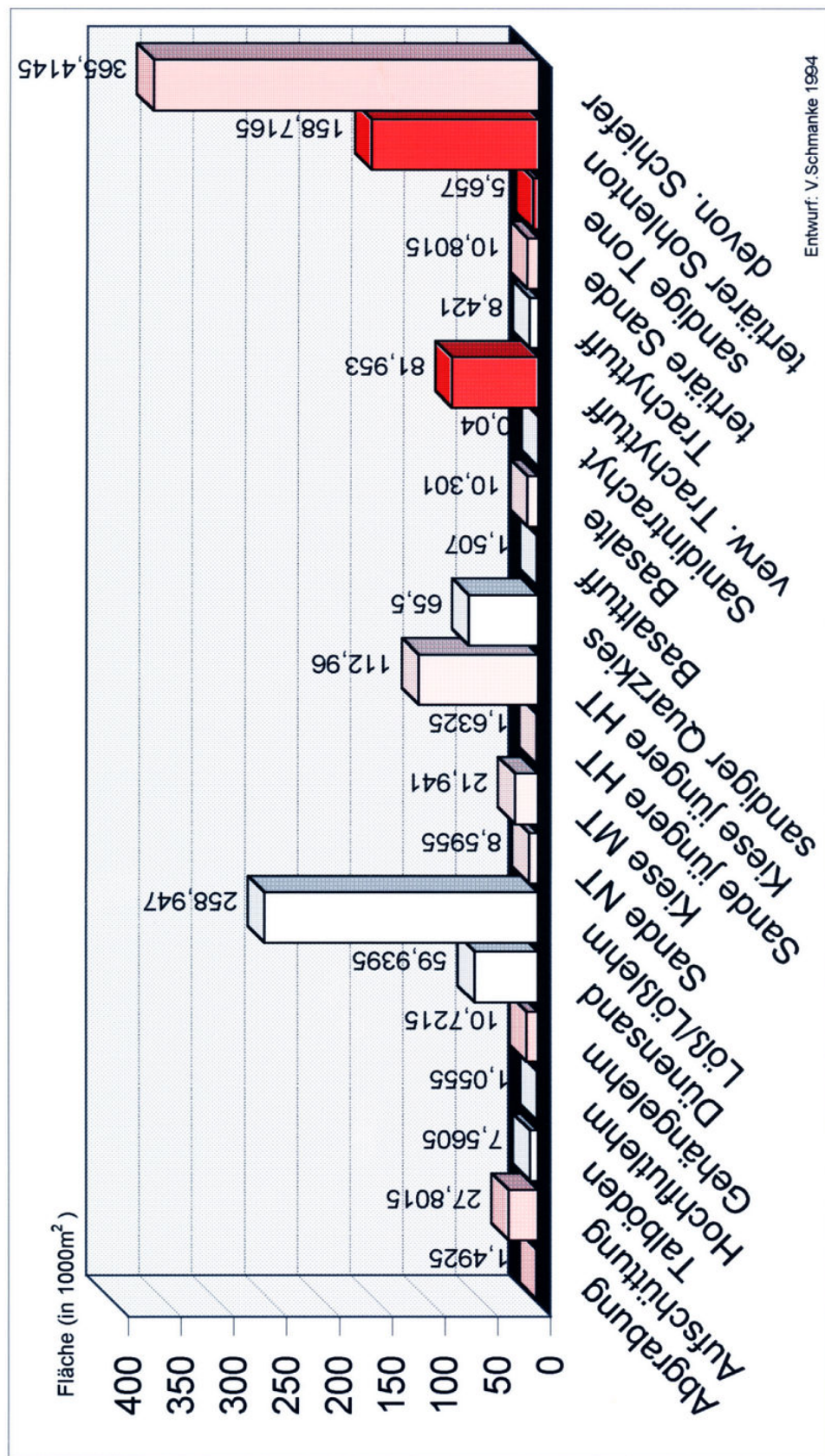
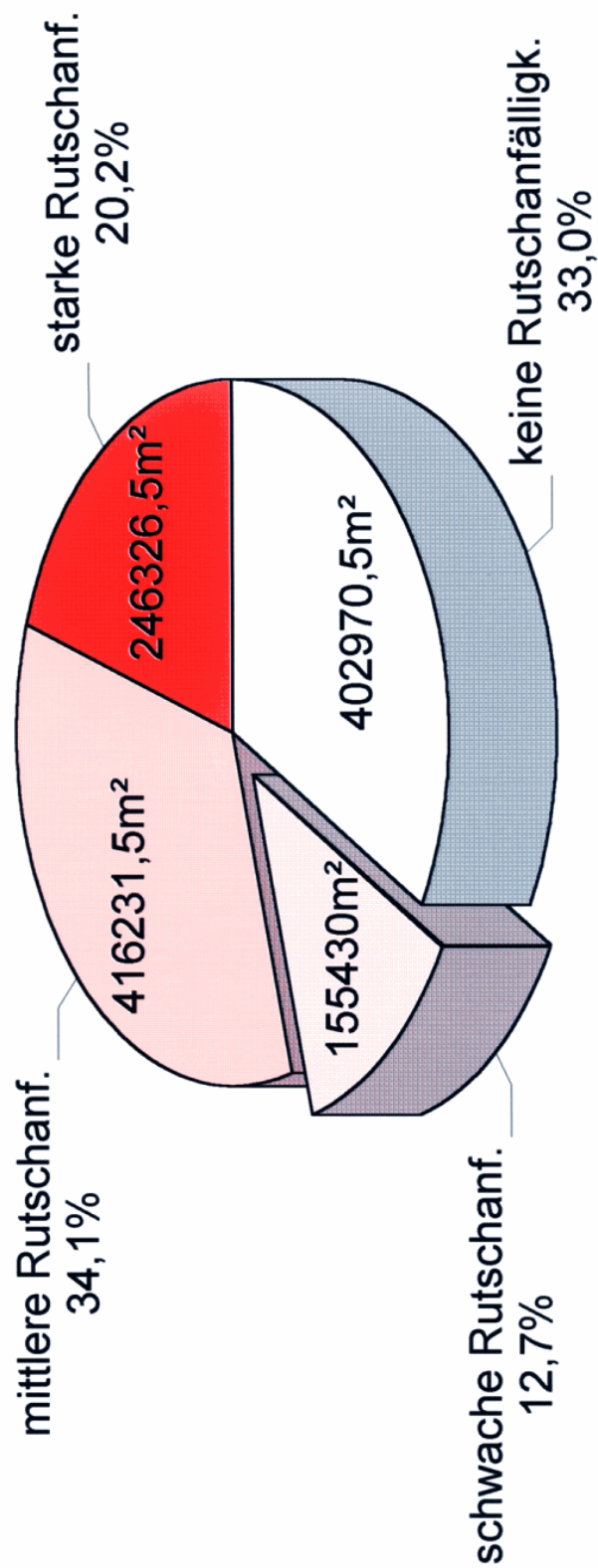
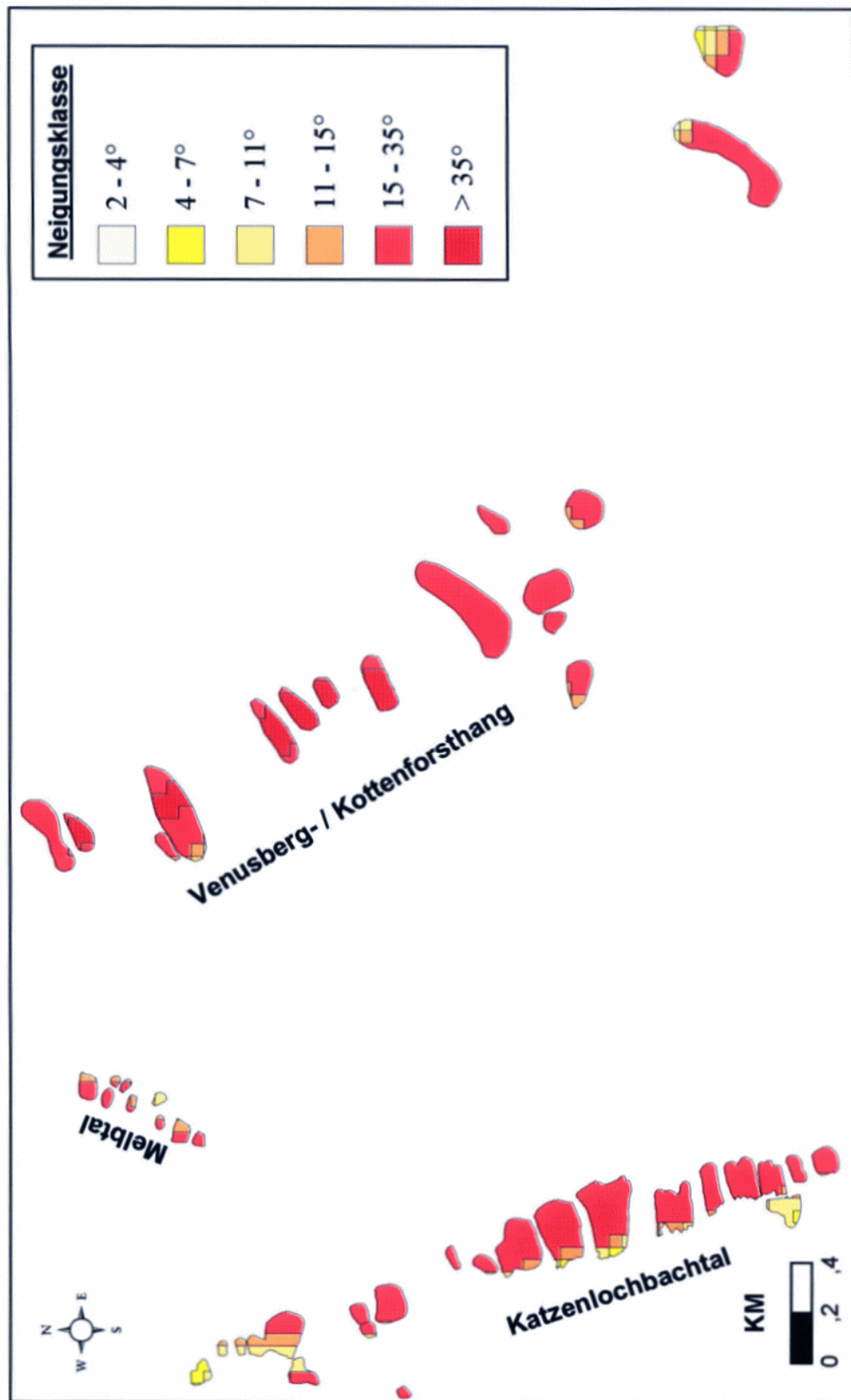


Abb. 36: Anteile der Geologischen Einheiten an der Gesamtfläche der Rutschungen



Entwurf: V.Schmanke 1994

Abb. 37: Anteile der Gesteine und Substrate innerhalb von Rutschungen, untergliedert nach ihrer Rutschanfälligkeit



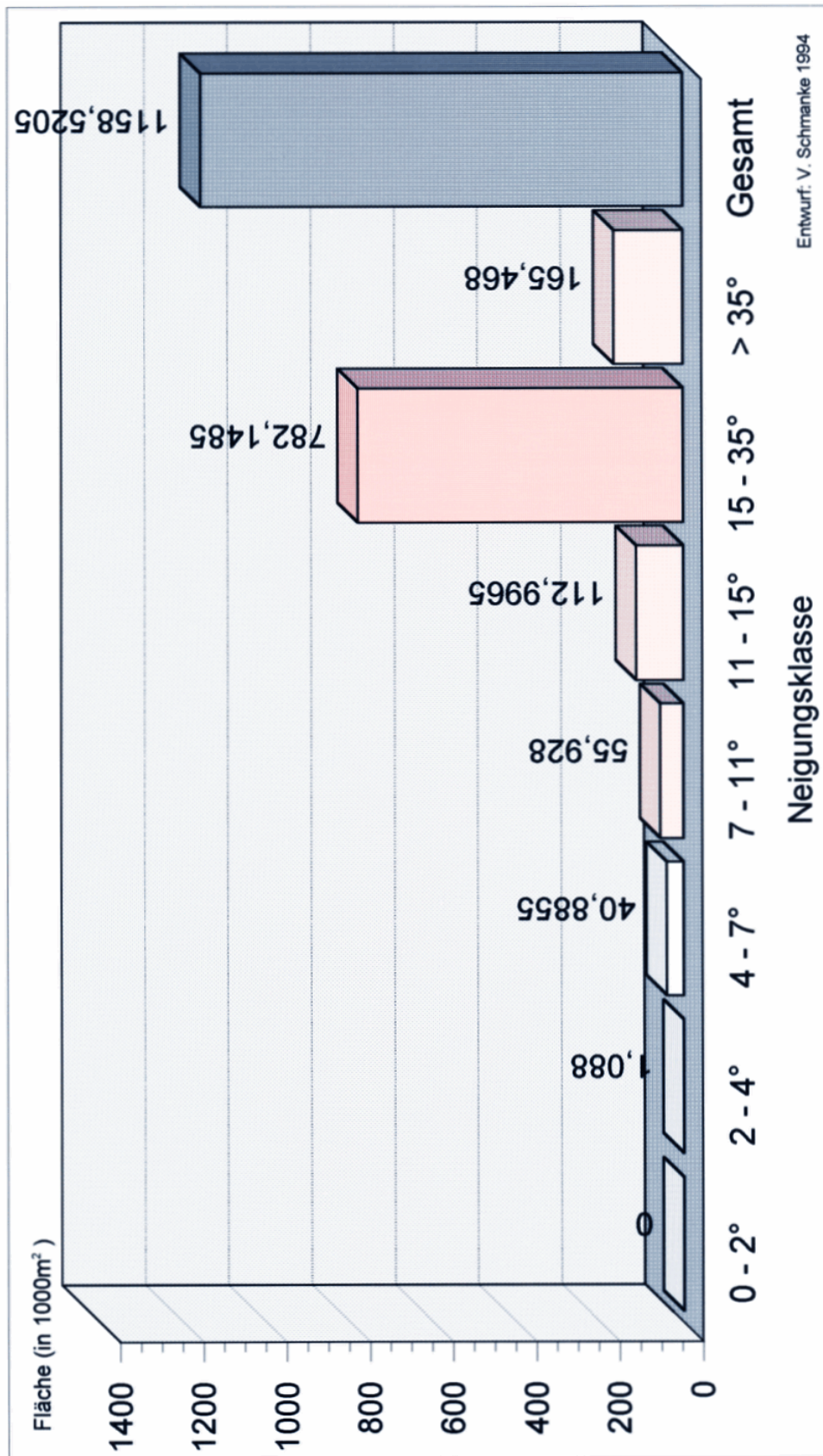


Abb. 39: Hangneigungen im Bereich von Rutschungsflächen

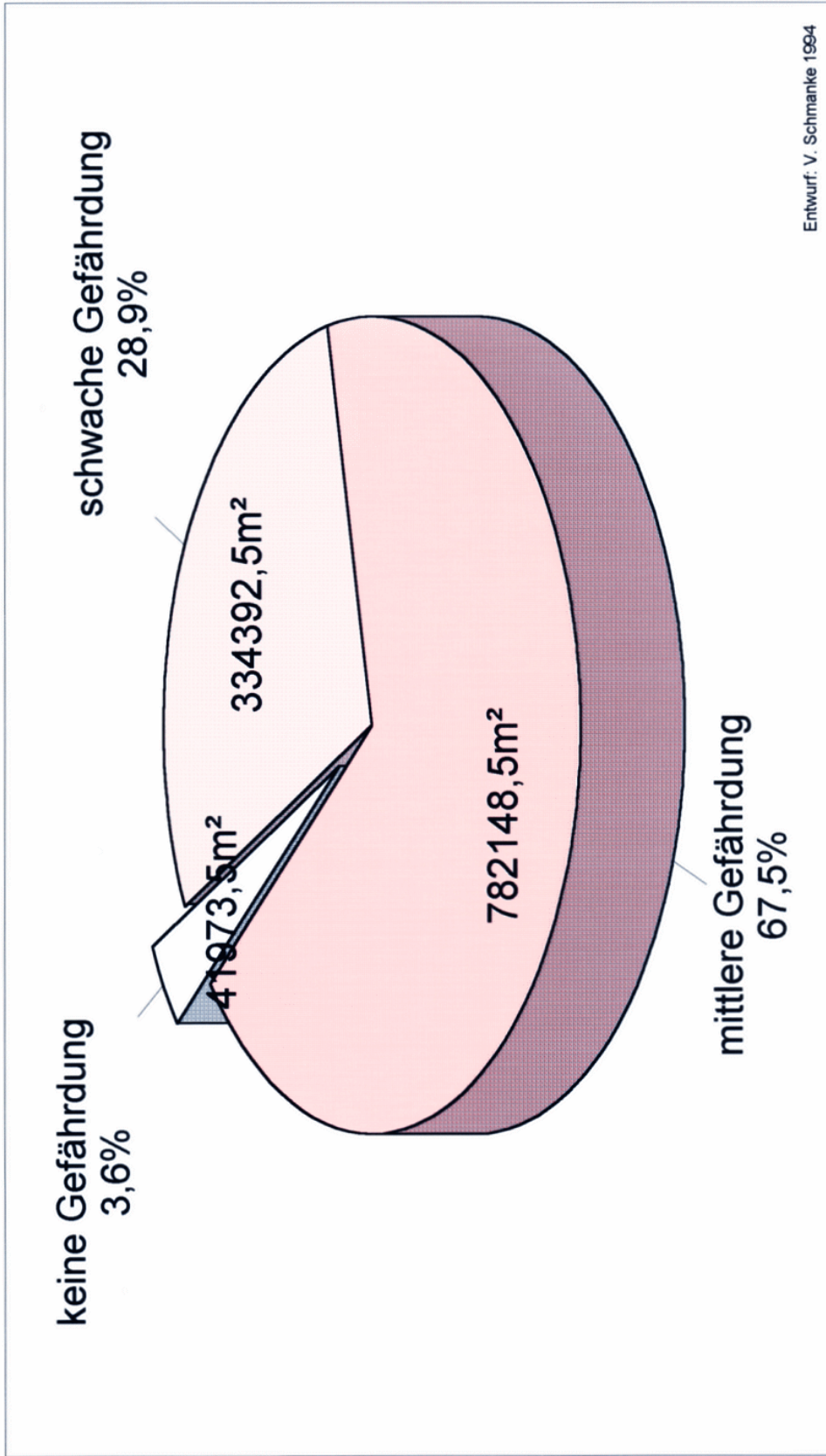


Abb. 40: Anteile der Hangneigungen innerhalb von Rutschungen, untergliedert nach ihrer Gefährdungsstufe

5. Zusammenfassung

Mit einfacher Hardware-Ausstattung (PC) lassen sich heute sehr komplexe geomorphologische Analysen durchführen, wie das vorliegende Beispiel zeigt. Flächenverschnidungen und ähnlich komplexe Analysen waren bis vor wenigen Jahren aufgrund des enormen Zeitaufwandes undenkbar.

Geo-Informationssysteme bieten deshalb völlig neue Perspektiven, auch wenn sie noch nicht ganz ausgereift sind, wie das Beispiel dieser Arbeit verdeutlicht. Gerade kleinere Datensätze können zumeist auch mit herkömmlichen digitalen Berechnungsmethoden ohne den Einsatz von GIS bearbeitet werden und führen zu ähnlichen Ergebnissen. Als Beispiel seien hier die Rechenalgorithmen von IDRISI genannt, die jeweils auch einzeln aufgerufen werden können und im Grunde selbstständige Programme darstellen.

Anstrengungen sind vor allem noch in der großräumigen Erfassung von Grundlagendaten (z.B. Geologie, Bodenbedeckung etc.) erforderlich. Um einen angepaßten Detaillierungsgrad zu erhalten, sollte auch die Möglichkeit des Einsatzes von Satellitenbildern geprüft werden.

Weitere Verbesserungen sind in der Simulation geomorphologischer Prozesse durchzuführen. Diese Modelle stellen einen wichtigen Bestandteil von GIS-Anwendungen dar. Für die Entwicklung solcher Simulationsmodelle muß allerdings zunächst das Prozeßverständnis verbessert werden. GIS können hierbei wertvolle Hilfe leisten, z.B. bei der Ermittlung kritischer Parameterkombinationen.

Betrachtet man den Zeit- und Kostenaufwand für die Lösung einer konkreten Fragestellung, so muß man sich zunächst fragen: "Ist ein GIS überhaupt das richtige Mittel für die Beantwortung meiner Fragestellung?"

Für die Erstellung einer Hangstabilitätskarte war der Zugriff auf ein GIS mit Sicherheit die richtige Entscheidung. Der Datensatz erfordert aufgrund der Größe und Komplexität die Verwaltung mit Hilfe einer Datenbank. Diese ist in ATLAS*GIS ebenso integriert wie die geforderten Funktionen zur Digitalisierung, Verrechnung (Verschnidung) und kartographischen Ausgabe der Daten.

Deshalb ist in diesem Falle der Zugriff auf ein GIS für die Berechnung einer Hangstabilitätskarte die sinnvollste Lösung.

6. Literaturverzeichnis

- ASH, TH. VAN, B. KUIPERS & D.J. VAN DER ZANDEN (1993): An Information System for large scale quantitative hazard analysis of landslides. in: Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplementbd. 87, Berlin-Stuttgart, S. 133-140.
- BARSCH, D. & G. STÄBLEIN (1978): EDV-gerechter Symbolschlüssel für die geomorphologische Detailaufnahme. in: Berliner Geographische Abhandlungen, H. 30, S.63-78, Berlin.
- BARSCH, D. & W. SCHUSTER (1981): Die Erfassung von Daten zum Substrat und zur Geomorphodynamik auf geomorphologischen Karten (GMK 25) mit dem geomorphologischen Symbolschlüssel (GMS) und auf Computerkarte. Zeitschrift für Geomorphologie. Suppl. 39, S.29-38.
- BARSCH, D. & R. DIKAU (1989): Entwicklung einer Digitalen Geomorphologischen Basiskarte (DGmbK). in: GIS (Geo-Informationssysteme 1989). H.3, S.12-18.
- BARTELS, G. & G. HARD (1974): Zur Datierung des Rodderberges bei Bonn. in: Decheniana 126, 1974, S.367-376.
- BARWINSKI, K. & R. HARBECK (1990): Die topographische Information als Basis raumbezogener Informationssysteme. in: GIS, H.4, S.1-2.
- BAUER, J. H. ROHDENBURG & H.R. BORK (1985): Ein digitales Reliefmodell zur Berechnung geoökologisch relevanter morphologischer Parameter. - Landschaftsökologisches Messen und Auswerten 1,2,3, S.117-124; Braunschweig.
- BIBUS, E. (1980): Zur Relief-, Boden- und Sedimentgenese am unteren Mittelrhein. in: Frankfurter Geow. Arbeiten, Serie D, physische Geographie, Bd. 1, 296 S., Frankfurt/M.
- BILL, R. & D. FRITSCH (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. Karlsruhe 1991, 414 S.

- BIRKENHAUER, J. (1973): Klima und Flächenbildung im jüngeren Tertiär im zentralen Rheinischen Schiefergebirge. in: Die Entwicklung des Talsystems und des Stockwerkbaus im zentralen Rheinschiefergebirge zwischen dem Mitteltertiär und dem Altpleistozän. - Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, Bd. 34, 217 S, Bonn.
- BIRKENHAUER, J. (1983): Tal- und Höhenrelief der deutschen Mittelgebirge - Ein Beitrag zum Stand der geomorphologischen Forschung. - Geographische Rundschau, H. 1, S.27-34, Braunschweig.
- BÖHM, R. (1991): Geomorphologische Bearbeitungen von digitalen Reliefmodellen mit Methoden der Rasterbildverarbeitung. in: Petermanns geographische Mitteilungen Jg. 135, S.273-282.
- BOLLMANN, J. (1984): Geomorphologische Daten und kartographische Darstellung. - Berliner Geographische Abhandlungen 36, S.27-36.
- BRABB, E.E. (1984): Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. in: Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Vol. I, Toronto, S. 307-323.
- BRABB, E.E. & B.L. HARROD (Hrsg.) (1989): Landslides: extent and economic significance. in: Proceedings of the 28th. International Geological Congress, Symposium on Landslides, Rotterdam, 385 S..
- BRÄNDLI, M. (1991): Oberflächeninterpolation aus Höhenkurvendaten. in: Geoprocessing Reihe 11, 1991, Zürich.
- BRINKMANN, R. (1976): Abriß der Geologie, 400 S., Stuttgart.
- CARRARA, A., E. CATALANO, M. VALVO SORRISO, C. REALI & I. OSSO (1978): Digital terrain analysis for land evaluation. in: Geologia Applicata e Idrogeologia, Bd. 13, S. 69-127.
- CARRARA, A., M. VALVO SORRISO & C. REALI (1982): Analysis of landslide form and incidence by statistical techniques, Southern Italy. in: Catena, Interdisziplinäre Zeitschrift für Hydrologie-Geomorphologie-Pedologie, Bd. 9, S. 35-63.

- CARRARA, A. (1983): Multivariate Models for landslide hazard evaluation. in: Journal of the International Association for Mathematical Geology, Bd. 15, H. 3, New York, S. 403-426.
- CARRARA, A., M. CARDINALI, R. DETTI, F. GUZZETI, V. PASQUI & P. REICHENBACH (1991): GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. in: Earth Surface Processes and Landforms, Bd. 16, New York, S. 427-445.
- DIKAU, R. (1988): Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefeinheiten. - Heidelberger geogr. Bausteine 5, S. 1-45; Heidelberg.
- DIKAU, R. (1989b): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. in: RAPER, J. (Hrsg.): Three Dimensional Application in Geographic Information Systems, London (im Druck).
- DIKAU, R. (1990): Derivates from detailed geoscientific maps using computer methods. in: Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplementbd. 80, Berlin - Stuttgart, S. 45-55.
- DIKAU, R. (1990b): Aspects of constructing a Digital Geomorphological Base Map (preprint to be published in: VINKEN, R. (Ed.): Geologisches Jahrbuch A122, Hannover, o.S.).
- DIKAU, R., S. JÄGER, J. GRUNERT, K.-H. ERDMANN & U. HARDENBICKER (1991): Angewandte GMK 25 und GMK 25 - Auswertung. in: Geographie und Umwelt. Verh. d. Deutschen Geographentages Bd. 48, Basel 1991., S.147-163.
- DIKAU, R. (1992): Hangrutschungen - Verbreitung und Auftreten im Rahmen der Naturgefahren- und Risikoabschätzung. in: Arbeitsmaterialien Wissenschaftlicher Beirat der DFG für das IDNDR-Nationalkomitee, Bonn (unveröffentlicht).
- DIKAU, R. (1993): Geographical Information Systems as Tools in Geomorphology. in: Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Supplementbd. 92, Berlin - Stuttgart, S. 231 - 239.
- DIKAU, R., A. CAVALLIN & S. JÄGER (1993): Databases and GIS for landslide research in Europe. in: FLAGEOLLET, J.C. (Hrsg.): Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Programme EPOCH, Final Report, Part I, Strasbourg, S. 97-116.

- DIKAU, R., A. CAVALLIN & S. JÄGER (1993): Case studies of the temporal Occurence of Landslides in the European Community in: FLAGEOLLET, J.C. (Hrsg.): Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Programme EPOCH, Final Report, Part II, Strasbourg, S. 509-559.
- DOLLINGER, F. (1989): Angewandte geographische Informationstechnologie. Beiträge zum GIS-Symposium. Salzburg: Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität. in: Salzburger Geographische Materialien. H. 13, S.113-124.
- DOLLINGER, F. (1989): Wie kam die Geographie zum GIS ? Über die Entwicklung des GIS-Konzeptes in der Landschaftsforschung. in: Salzburger Geographische Materialien 1989, H.13, S.11-26.
- DOLLINGER, F. & J. STROBL (1989): GIS - Begriff und Bedeutung. in: Salzburger Geographische Materialien 1989, H.13, S.7-10.
- DORRER, E. (1975): Gedanken zum Digitalen Geländemodell. in: Bildmessung und Luftbildwesen 43, S.90-91.
- ERB, W.-D., P. LUDÄSCHER, W. STEINGRUBE, K.-L. STORCK & M. WERNER (1991): Auswahl und Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) in Forschung und Lehre. in: Freiburger Geographische Hefte, H. 34, S.33-50.
- FABER, T. F. (1992): Atlas GIS - das Geographische Informationssystem für den Personal Computer. Technologie Geographischer Informationssysteme, Berlin-Heidelberg, S.125-139.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (1990): Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke (MTV) im Rheinischen Schiefergebirge - Aufbau, Genese und quartäre Überprägung. - Relief, Boden, Paläoklima, H. 6, 192 S., Berlin, Stuttgart.
- FÖCKELER, A. & H. KUHN (1990): Aufbau und Anwendung von Digitalen Geländemodellen in Nordrhein-Westfalen. in: GIS, H.4, S.22-27.

- FRÄNZLE, O. (1969): Geomorphologie der Umgebung von Bonn. in: Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, H.29, Bonn, 58 S.
- FRÄNZLE, O. (1969b): Zertalung und Hangbildung im Bereich der Südvilla. - Erdkunde, H.23, S.1-9, Bonn.
- FRECHEN, J. & K. VIETEN (1970): Petrographie der Vulkanite des Siebengebirges. in: Decheniana 122, 1970, S.337-377.
- GLATTHAAR, D. (1985): Geomorphologische Forschung im Rheinischen Schiefergebirge. - Bericht zur deutschen Landeskunde, H.59, S.177-189, Trier.
- GOSSMANN, H. (1981): Fragen und Einsichten zum Einsatz von Hangmodellen in der geomorphologischen Analyse. in: Geoökodynamik 2, S.205-218.
- GOTTSCHALK, H. J. & H. G. NEUBAUER (1974): Wege zu einem Digitalen Geländemodell. in: Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen. 1974, H. I, S.13-19.
- GOTTSCHALK, H. J. & H. G. NEUBAUER (1975): Herstellung eines Digitalen Geländemodells. in: Bildmessung und Luftbildwesen 3, S.92-95.
- GRUNDER, M. (1984): Ein Beitrag zur Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf die Erstellung von mittellaßstäbigen Gefahrenhinweißkarten (mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos). Geogr. Bernensia, Bd. G23, Bern, 217 S.
- GRUNERT, J. (1988): Geomorphologische Entwicklung des Bonner Raumes. in: Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, H.58, Bonn, S.165-180.
- GRUNERT, J. & U. HARDENBICKER (1991): Hangrutschungen im Bonner Raum - ihre Genese und Kartierung für Planungszwecke. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement, Bd. 89, Berlin-Stuttgart, S.35-48.

- GRUNERT, J. & U. HARDENBICKER (1993): Gravitative Hangabtragung im Bonner Raum während des Holozäns. Ein Beitrag zur Paläoklimaforschung. in: Würzburger Geographische Arbeiten, H. 87, S. 325-338, Würzburg 1993.
- GÜNDRA, H. (1991): Laufende Aktivitäten aus dem Bereich digitaler Geländemodellierung am Geographischen Institut der Universität Heidelberg. in: Freiburger Geographische Hefte, H. 34, S. 81-84.
- HAKE, D. (1994): Boden- und Sedimentuntersuchungen an rutschungsgefährdeten Hängen im Bonner Raum - Kottenforstabhäng zwischen Poppelsdorf und Dottendorf. Diplomarbeit 1994 Univ. Bonn, 75 S. (unveröffentlicht).
- HANSEN, A. (1984): Landslide hazard analysis. in: BRUNSDEN, D. & B. PRIOR (Hrsg.): Slope Instability, Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore, S. 523-602.
- HARDENBICKER, U. (1991): Verbreitung und Chronologie der Hangrutschungen im Bonner Raum. in: Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde 1991, H.60, Bonn, S.9-18.
- HARDENBICKER, U. (1994): Rutschungen im Bonner Raum. Naturräumliche Einheiten und ihre anthropogenen Ursachen. in: Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde, H.64, 105 S. Bonn 1994.
- HEITFELD, K.-H., DÜLLMANN, H. & H. VÖLTZ (1980): Gutachten über die ingenieurgeologischen und hydrologischen Verhältnisse im Bereich der Haldenzone (B42n) zwischen Bau-km 26 + 950 einschließlich Empfehlungen für die Böschungssanierung (unveröffentl.) Aachen.
- HEMENWAY, D. (1989): GIS Observer. in: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. LV, No.4, S.402.
- HESEMANN, J. (1975): Geologie Nordrhein-Westfalens. Bochumer Geographische Arbeiten, Sonder. 2, Paderborn.
- HÖHLE, J. (1993): Height models and digital orthophotos in GIS. in: GIS (Geo-Informationssysteme 1993). H. 4, S.17-22.

- HUMA, I. & D. RADULESCO (1978): Automatic production of thematic maps of slope stability. in: Bulletin International Association of Engineering Geology, No. 17, Krefeld, S. 95-99.
- Ingenieurgeologisches Büro KAISER-KÜHN (Hrsg.) (1988a): Hydrogeologisches Gutachten Ippendorfer Westhang (unveröffentl.) Bonn.
- JORDAN, E. & W. LINDER (1991): Einsatz und die Anwendung von Digitalen Höhen-(Gelände-) Modellen am Universitätsstandort Vechta. in: Freiburger Geographische Hefte, H.34, S. 89-98.
- JÜPTNER, B. (1991): Das Digitale Höhenmodell (DHM) in Rasterform als Grundlage für die Ableitung großmaßstäbiger Beschattungsmodelle. in: Salzburger Geographische Materialien 1991, H.16, S.139-148.
- KIENHOLZ, H. (1993): Naturgefahren - Gefahrenkarten. in: Arbeitsmaterialien Wissenschaftlicher Beirat der DFG für das IDNDR-Nationalkomitee, Bonn (unveröffentlicht), 21 S..
- KILCHENMANN, A. (1992): GIS: Vergangenheit-Gegenwart-Zukunft. Technologie Geographischer Informationssysteme, Heidelberg-Berlin, S.1-12.
- KIRSCHHAUSEN, D. (1994): Boden- und Sedimentuntersuchungen an rutschungsgefährdeten Hängen im Bonner Raum - Kottenforstabhäng zwischen Dottendorf und Friesdorf. Diplomarbeit 1994 Univ. Bonn, 120 S. (unveröffentlicht).
- KÖTHE, R. & F. LEHMEIER (1991): "Digitale Reliefanalyse" - Ein Projekt zur geomorphologischen Auswertung Digitaler Geländemodelle (DGM). in: Freiburger Geographische Hefte, H. 34, S. 99-110.
- KRAUTER, E. & K. STEINGÖTTER (1983): Die Hangstabilitätskarte des linksrheinischen Mainzer Beckens. in: Geologisches Jahrbuch, Reihe C, H. 34, Hannover, S. 3-31.

- KRAUTER, H., H. von PLATEN, A. QUEISSER & K. STEINGÖTTER (1985): Hangstabilitäten im Mainzer Becken. in: HEITFELD, K.-H. (Hrsg.): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein, Berlin - Heidelberg, S. 280-295.
- LEHMEIER, F. (1987): Entwicklung eines EDV-gestützten Dokumentations- und Abfragesystems für Daten zur regionalen Geomorphologie (DARG). in: Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl. Bd. 66, S.155-165.
- LEHMEIER, F. (1991): Vergleichende Zusammenstellung der digitalen Geländemodelle (DGM) der deutschen Bundesländer (Stand 1990/91). in: Freiburger Geographische Hefte, H. 34, S. 77-80.
- LESER, H. & G. STÄBLEIN (1978): Legende der Geomorphologischen Karte 1:25000 (GMK 25). 3. Fassung im GMK-Schwerpunktprogramm. - in: Stäblein, G. (Hrsg.): Geomorphologische Detailaufnahme. Beiträge zum GMK-Schwerpunktprogramm I. Berliner Geographische Abhandlungen, H.30, S.79-80, Berlin.
- MANI, P. (1992): Geographische Informationssysteme - mehr als digitale Kartographie ? in: Geographische Informationssysteme in der Geomorphologie. Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG). Hrsg.: H. KIENHOLZ u.a., Geographica Bernensia G 39.
- MEYER, W. (1986): Geologie der Eifel, 614 S., Stuttgart.
- MOLENAAR, M. (1993): Object Hierarchies and uncertainty in GIS or why is standardisation so difficult ? in: GIS (Geo-Informationssysteme 1993). H. 4, S.22-28.
- MOSER, M. (1973): Vorschlag zu einer vorläufigen Hangstabilitätsklassifikation mit Hilfe eines Gefährlichkeitsindex. 100-Jahrfeier Hochschule für Bodenkultur, Bd. IV Teil II, Wien, S. 159-168.
- NEMOCK, A., J. PASEK & J. RYBAR (1972): Classification of landslides and other mass movements. in: Rock Mechanics, H. 4, Wien - New York, S. 71-78.

- OTTENS, H. (1991): GIS in Europe. Proceedings EGIS 91.
- READING, A.J. (1993): A Geographical Information System (GIS) for the prediction of landsliding potential and hazard in South-West Greece. in: Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement Bd. 87, Berlin - Stuttgart, S. 141-149.
- RICHTER, H. (1962): Eine neue Methode der großmaßstäbigen Kartierung des Reliefs. Petermanns Geographische Mitteilungen, 106, Gotha 1962, 4, S.309-312.
- ROSCHER, S. (1991): Das Relief als bodenerosionssteuernder Faktor. Eine Untersuchung mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems im Bonner Raum. Diplomarbeit, 111 S. (unveröffentlicht), Bonn.
- SCHLICHER, M. und D. FRITSCH (1989): Geo-Informationssysteme. Karlsruhe, 364 S.
- SIEGBURG, W. (1987): Asymmetrische Täler und andere eiszeitliche Formen im Bonner Raum. in: Decheniana 140, S.204-217, Bonn.
- SIGLE, M. (1991): Die Erstellung von Bodenerosionsgefährdungskarten auf der Basis eines Digitalen Geländemodells. in: GIS (Geo-Informationssysteme 1991). H. 4, S.2-7.
- STÄBLEIN, G. (1987): Geomorphologische Standortaufnahme mit dem EDV-Symbolschlüssel. Beispiele von Dateien und Auswertungen. in: Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Suppl. 39, S.39-49.
- STROBL, J. (1988): Einige Aspekte geomorphologischer Analyse und Dokumentation aus der Sicht der EDV. in: Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Suppl. 68, S. 9-19.
- STROBL, J. (1988): Reliefanalyse mit dem Computer. Anwendungsmöglichkeiten digitaler Geländemodelle in der physischen Geographie. in: Geographische Rundschau 40, S. 38-43.
- STROBL, J. (1990): GIS - Trends zu Beginn der 90er Jahre. in: Salzburger Geographische Materialien 1990, H. 15, S.7-14.

- STROBL, J. (1991): Digitale Österreichische Karte 1:50000: Vektor vs. Raster. in: Salzburger Geographische Materialien 1991, H.16, S.149-153.
- TOMLINSON, R.F. (1984): Geographic Information Systems - a new frontier. The Operational Geographer, H. 5, S. 31-35.
- ULRICH, C. (1986): Geomorphologische Detailkartierung im Westen von Bonn. Diplomarbeit am Geographischen Institut in Bonn (unveröffentlicht), 114 S..
- WEBER, M. (1991): Welchen Beitrag kann die Luftbildinterpretation zur Erfassung und Datierung von Hangrutschungen leisten ? Erste Ergebnisse aus dem Bonner Raum. i
- WERNER, J. (1974): Zur Bedeutung einer EDV-Relief-Datei für die Geomorphologie. in: Zeitschrift für Geomorphologie N. F. 18, S.316-328.

7. Kartengrundlage

a) Topographische Karten:

Topographische Karte 1:25000 (TK 25), neueste Auflage:

Blatt 5208 Bonn	(1990)
Blatt 5209 Siegburg	(1990)
Blatt 5308 Bonn-Bad Godesberg	(1990)
Blatt 5309 Königswinter	(1990)

b) Geologische Karten:

Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten (bzw. 2. Auflage, geologisch unveränderter Nachdruck auf neuer topographischer Grundlage als: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen) 1:25000. (GK 25)

Blatt 5208 Bonn	(Aufnahme 1911-16, erschienen 1923)
Blatt 5209 Siegburg	(Aufnahme 1935, 2. Aufl. 1978)
Blatt 5308 Godesberg	(Aufnahme 1902-15, 2. Auflage 1980)
Blatt 5309 Königswinter	(Aufnahme 1931, 2. Auflage 1978)

c) Hydrologische Karten:

Hydrologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000 (Grundrißkarte)

Blatt 5208 Bonn	(1985)
Blatt 5209 Siegburg	(1988)
Blatt 5308 Godesberg	(1986)
Blatt 5309 Königswinter	(1987)

d) Rutschungen und Vernässungen:

Kartierungen zahlreicher Geländepraktika der Jahre 1990 - 1994 (Maßstab 1:1000 bis 1:10000)

e) Erläuterungshefte zur GK 25

- BURRE, O. (1978): Erläuterungen zu Blatt 5309 Königswinter. Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000. Hrsg. v. Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen. 2. Auflage, Krefeld.
- RAUFF, H. (1980): Erläuterungen zu Blatt 5308 Bonn-Bad Godesberg. Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000. Hrsg. v. Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen. 2. Auflage, Krefeld.
- UDLUFT, H. (1977): Erläuterungen zu Blatt 5209 Siegburg. Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000. Hrsg. v. Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen. 2. Auflage, Krefeld.
- TRAUTMANN, W. (1972): Erläuterungen zur Karte der potentiellen natürlichen Vegetation. Vegetationskarte der BRD 1:200000, Blatt CC 5502. - Schriftenreihe für Vegetationskunde, H.6, 172 S.