

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Heft 122

ISSN 0373-0468

Marc-O. LÖWNER

**Formale semantische Modellierung von
geomorphologischen Objekten und Prozessen
des Hochgebirges zur Repräsentation in einem
Geoinformationssystem (GIS)**

Herausgeber • *Editor*:

Geographisches Institut der Universität Bonn
Department of Geography, University of Bonn

Verantwortlicher Herausgeber • *Editor-in-Chief* W. Schenk



ASGARD-VERLAG SANKT AUGUSTIN 2008

**Formale semantische Modellierung von
geomorphologischen Objekten und Prozessen
des Hochgebirges zur Repräsentation in einem
Geoinformationssystem (GIS)**

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Heft 122

ISSN 0373-0468

Herausgeber • *Editor*

Geographisches Institut der Universität Bonn
Department of Geography, University of Bonn

Verantwortlicher Herausgeber • *Editor-in-Chief* W. Schenk



ASGAR-VERLAG SANKT AUGUSTIN 2008

**Formale semantische Modellierung von
geomorphologischen Objekten und Prozessen
des Hochgebirges zur Repräsentation in einem
Geoinformationssystem (GIS)**

von • by

Marc-O. LÖWNER

mit 5 Tabellen und 27 Abbildungen
with 5 tables and 27 figures

In Kommission bei • *on consignment by*
Asgard-Verlag • Sankt Augustin

alle Rechte vorbehalten
all rights reserved

ISBN: 978-3-537-87672-0

© 2008 Asgard-Verlag Dr. Werner Hippe GmbH, 53757 Sankt Augustin
Druck • *Print* Druckerei Martin Roesberg, 53347 Alfter-Impekoven

Inhalt

1	Einleitung	10
1.1	Wände und steile Hangbereiche in Geomorphologie und Geoinformation	10
1.2	Ziele dieser Arbeit	13
1.3	Gliederung der Arbeit	14
2	Konzeptionelle Grundlagen	16
2.1	Semantische Modellierung geographischer Objekte – ein ontologischer Ansatz	17
2.1.1	Stufen der Entwicklung einer Ontologie	19
2.1.2	Probleme bei der Erstellung einer Ontologie für geographische Objekte	20
2.1.2.1	Feldansatz versus einer objektorientierten Wahrnehmung	21
2.1.2.2	Das Problem unscharfer Grenzen	23
2.1.3	UML – ein Formalismus zur semantischen Modellierung	24
2.1.4	Die geometrische Repräsentation	28
2.1.4.1	Das Raster-Konzept als gängiges Datenformat	28
2.1.4.2	Repräsentation der Geometrie – das „Spatial Schema“	31
2.2	Geomorphologische Grundlagen	32
2.2.1	Die geomorphologische Sicht auf das Relief	33
2.2.2	Interaktion von Relief und geomorphologischem Prozess	36
2.2.2.1	Die Prozesssysteme von Wänden und steilen Hangbereichen	38
2.2.3	Sedimentspeicher und das System der Sedimentkaskade	44
2.2.3.1	Die Wand am Rand der Sedimentkaskade	47
3	Semantische Modellierung geomorphologischer Konzepte	50
3.1	Semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen	51
3.2	Geeignete Repräsentation der Geometrie	53
3.2.1	Grenzen von flächenhaften und volumenhaften Objekten	57
3.2.2	Modellierung der Topologie mit der Klasse GM_Complex	58
3.2.3	Die Klasse GM_Composite	59
3.3	Das semantisch basierte Anwendungsmodell	60
3.3.1	Die Klasse _Geoobjekt	60

3.3.2	Die Klasse Hang	63
3.3.3	Bedarf es einer weiteren Spezialisierung der Klasse Hang?	74
3.3.4	Die Klasse Wand	75
3.3.5	Die Klasse Felswand	79
3.3.5.1	Die Klasse Kluft	81
3.3.5.2	Die Klasse Leiste	83
3.3.5.3	Die Klasse Kante	85
3.4	Ein Klassendiagramm für Prozesse	87
3.4.1	Die Klasse _Geoprozess	89
3.4.2	Die Klasse KomplexerGeoprozess	92
3.4.3	Spezialisierungen der Klasse _Geoprozess	92
3.4.4	Modellierung einer Sedimentkaskade	93
4	Diskussion	96
4.1	Rückblick und Bewertung	96
4.1.1	Repräsentation von Prozessen	98
4.1.2	Nutzen der Ergebnisse	99
4.2	Ausblick	100
Literatur		101

Abbildungen

1.1	Eine Felswand mit Überhang als Bedrohung eines Hauses im Rhonetal	11
2.1	Beispiel einer Modellierung in UML	25
2.2	Legende der verwendeten UML-Symbole	27
2.3	Repräsentation von Wänden und Überhängen durch das Rasterformat	29
2.4	Relative Häufigkeit der Hangneigung im Turtmantal	30
2.5	Formengröße und Existenzdauer von Reliefformen	35
2.6	Vektorparallelogramm der Gewichtskraft und der Druck- und Scher- spannung	37
2.7	Drei Typen von Schutthalden	41
2.8	Frequenz der Hangneigungsverteilung gestreckter Hänge	42
2.9	Konzeptmodell einer Sedimentkaskade im Reintal	44
2.10	Das alpine Hangsystem	45
2.11	Leiste mit aufsitzendem Sediment an der Barwang im Pipjitälli	48
2.12	Konzeptmodell der Sedimentkaskade einer Wand	49
3.1	Profil des ISO-Standards 19107 „Spatial Schema“	55
3.2	Die Boundary-Klassen des ISO 19107	57
3.3	Die Klasse GM_Complex in ihrer UML-Notation	59
3.4	Die Klasse GM_Composite in ihrer UML-Notation	60
3.5	Repräsentation der Klasse _Geoobjekt und Hang	61
3.6	Repräsentation der Klasse Hang	65
3.7	Blockdiagramm eines Hanges	67
3.8	Abgeleitete Assoziationen der ZeitlichenRepräsentation	69
3.9	Repräsentation der Klasse Wand	77
3.10	Repräsentation der Klasse Felswand	81
3.11	Geometrische Repräsentation einer Leiste	85
3.12	Modellierung der Klasse Kante	86
3.13	Repräsentation der Klasse _Geoprozess	90
3.14	Vorschlag einer Modellierung der Sedimentkaskade	94

Tabellen

2.1	Anteil ausgewählter Hangneigungsgrößen an der Gesamtfläche des Turmanntales über 2400 NN	30
2.2	Klassifikation von Fallprozessen	40
2.3	Typische maximale Hangneigung von verfestigtem Material	43
3.1	Geometrische Klassen zur Attributierung von Features nach ISO 19019	52
3.2	Beschreibung von Wänden in der gesichteten Literatur	76

Glossar

Anmerkungen zum Sprachgebrauch

In Übereinstimmung mit der angegebenen Fachliteratur werden ausgewählte Fachausdrücke in ihrem originalen englischen Sprachgebrauch belassen bzw. mit angegeben. Klassennamen der geometrischen und semantischen Modellierung sind in *Courier* gesetzt, Attributnamen im Modellschema in *kursivem Courier*. Methoden sind ebenfalls in *kursivem Courier()* gesetzt, wobei die nachgestellten Klammern das der Methode zu übergebende Attribut enthalten. Assoziations- und Rollennamen sind in *kursiver* Normalschrift gesetzt. Bezeichnungen von Instanzen sind im Gegensatz zu Klassen dem Standard der UML folgend unterstrichen.

Verwendete Abkürzungen

3D	dreidimensional
BRep	Boundary Repräsentation
DHM	Digitales Höhenmodell
GIS	Geoinformationssystem
GML	Geography Markup Language
ISO	International Organization for Standardization
OCL	Object Constraint Language
TIN	Triangulated Irregular Network (deutsch: <i>Unregelmäßige Dreiecksvermaschung</i>)
UML	Unified Modelling Language
v. h.	vor heute (Geologische Zeitangabe)
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

Steep bedrock Cliffs are one of the most characteristic features of the alpine landscape. They appear simple in a generalized form [...] but, in detail, the cliff profile is usually stepped, in response to structural controls, and its angle may vary from that of the talus to a true vertical. Because of ledges even the free face has a storage capacity for waste and it is from this, rather than from bedrock weathering, that material is added to the talus. (CAINE 1974)

1.1 Wände und steile Hangbereiche in Geomorphologie und Geoinformation

Die Struktur der Landoberfläche, das Relief, stellt einen wesentlichen Schlüssel zur Erkenntnis der Transportprozesse von Sediment auf unserer Erde dar. Ein besonderes Charakteristikum der alpinen Hochgebirgsregionen sind Felswände und sehr steile Hangbereiche, also Hänge, deren Hangneigung so hoch ist, dass sich kein Verwitterungsmaterial auf ihnen halten kann und dieses durch Einwirkung der Gravitation sofort oder unvermittelt abstürzen muss. Sie sind dabei in mehrerer Hinsicht nicht nur für die Geomorphologie von besonderer Bedeutung.

Wände und steile Hangbereiche stellen aufgrund ihrer hohen Hangneigung und den damit verbundenen schnell ablaufenden Prozessen ein bedeutendes Naturgefahrenpotential für die alpinen Gebiete Europas und der gesamten Welt dar (vgl. GEIPEL 1992). Mit Felswänden verbundene Prozesse, wie Felsstürze oder Steinschlag, bedrohen Siedlungen und Tourismus in erschreckender Häufigkeit. Auch Muren (COROMINAS et al. 1996), die in den Medien gerne Schlammlawinen genannt werden, sind an steile Hänge und eine entsprechende Bereitstellung von Sediment gebunden. Die Bilanz der Todesopfer und monetärer Schäden durch Prozesse in Bereichen steiler Hangneigungen ist erschreckend. So forderte die Vajont-Felsgleitung, bei der im Jahre 1963 250 Mio. m³ Festgestein in den italienischen Alpen blitzartig bewegt wurden, 2000 Todesopfer! In den Anden Perus fielen 1970 gar 20000 Menschen der Huascarán-Felslawine zum Opfer. Die unglaubliche Zahl von 30000 Todesopfern musste Venezuela im Dezember des Jahres 1999 durch Murgänge beklagen (vgl. DIKAU und GLADE 2002).

Obwohl Ereignisse dieser Art verhältnismäßig selten auftreten, gefährden auch kleinere, aber dafür hochfrequente Prozesse Menschenleben und Güter. Steinschläge bedrohen Siedlungen in alpinen Tälern und geben Anlass für aufwendige Schutzbauten. Abbildung 1.1 zeigt eine Felswand mit Überhang im Rhonetal (Schweiz). Das am Fuße

der Wand stehende Gebäude ist durch Felsstürze stark gefährdet. Allein im Turtmannal (Schweiz) sind mehr als 200 Wände mit rezenter Steinschlagaktivität dokumentiert (OTTO und DIKAU 2004).



Abb. 1.1 Eine Felswand mit Überhang als direkte Bedrohung eines Hauses im Rhonetal, Schweiz (Aufnahme vom 24.07.2003)

Die Erforschung der genannten Prozesse und der damit assoziierten Formen fällt in den Fachbereich der Geomorphologie. Sie verfügt über das grundlegende Verständnis von Abläufen auf dem Relief und damit prinzipiell über die Möglichkeit, von Formen auf die mit ihnen verbundenen Prozesse zu schließen. Aus geomorphologischer Sicht sind Wände zunächst einmal

- Bereiche stärkster Hangneigung,
- eine direkte Sedimentquelle im Hochgebirge,
- Gebiete, in denen der Prozess des Fallens auftritt und damit
- Bereiche starker Gefährdung aufgrund schnell ablaufender gravitativer Massenbewegungen.

Dabei sind die schnell ablaufenden Prozesse schwer vorherzusagen, deuten sich aber durch die Form selbst und durch die Verformung des Gesteins an. In Bereichen geringerer Hangneigung sind die auf geomorphologische Erkenntnisse fußenden Vorhersagen von Massenbewegungen durchaus möglich. Im Tessin (Italien) kommen bspw. optische

Monitoringsysteme zum Einsatz, um Gefährdungen von Siedlungen im Bereich gravitativer Massenbewegung abzuwenden (vgl. PASUTO et al. 1993; HERVÁS et al. 2003).

Diese Arbeit betrachtet das skizzierte Forschungsfeld der Geomorphologie nun aus Sicht der Geoinformation. Diese bietet die Möglichkeiten, die analytische Arbeit der Geomorphologie grundlegend zu ergänzen und einen Austausch von Ergebnissen innerhalb der Fachwissenschaft weltweit zu ermöglichen. Geoinformationssysteme (GIS) sind in anderen Anwendungsbereichen schon heute in der Lage, komplexe geometrische Formen zu repräsentieren und mit Hilfe von Algorithmen in Bezug auf Nachbarschaft und Raum-zeitliche Veränderung zu analysieren (vgl. RIGAUX et al. 2002). Insbesondere nehmen die Möglichkeiten Objektrelationaler Datenbanken, geometrisch-topologische Datenmodelle im dreidimensionalen Bereich zu implementieren und räumlich zu analysieren, beständig zu. Auch im Bereich der Repräsentation sind in der 3D-Modellierung erhebliche Fortschritte zu verzeichnen (vgl. HERRING 2001; GRÖGER und KOLBE 2005). Zu einer effizienten Unterstützung fachspezifischer Fragestellung benötigt die Geoinformation allerdings formal eindeutige Beschreibungen der zu modellierenden Phänomene. Ein GIS, das die Bereiche der Datenmodellierung und -erfassung, die Datenanalyse und -interpretation, sowie die Visualisierung der Daten umfasst (vgl. WORBOYS 1995), kommt ohne eine formale semantische Modellierung des Fachwissens nicht aus.

An dieser Stelle soll nicht verschwiegen werden, dass an der Schnittstelle zwischen Erd- und Informationswissenschaften noch erhebliche Lücken klaffen. Dies hat im Wesentlichen drei hier zu nennende Gründe.

Zum einen werden von den Erdwissenschaften häufig rasterbasierte Repräsentationsansätze verwendet. Diese bieten keine direkte Möglichkeit zur Analyse von Wänden und steilen Hangbereichen, wie sie für das Hochgebirge charakteristisch sind. Wände stehen senkrecht zur Horizontalen, sie sind gar überhängend, haben Höhlen, Anrissnischen und Klüftungen (vgl. AHNERT 1996). All diese Phänomene können Hinweise auf mögliche Gefährdungen durch Felsstürze oder Steinschlag geben. Die in den Geowissenschaften weit verbreiteten Geoinformationssysteme, wie etwa ERDAS IMAGINE oder ES-RIs ArcMap erlauben keine Repräsentation senkrecht stehender oder überhängender Landformen und ihrer Strukturen. Auch die Erfassung der Landoberfläche stößt an ihre Grenzen. Digitale Höhendaten im Rasterformat, wie sie etwa aus klassischen Luftbildern gewonnen werden, bieten durch ihre Projektion auf die Horizontalebene keine Möglichkeit der Analyse. Selbst die hoch aufgelösten Rasterdaten einer High Resolution Stereo Camera (HRSC), die in einer Befliegung des Turtmanntales in der Schweiz durch die Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt (DLR) für das Graduiertenkolleg 437, „das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“, erstellt worden sind (vgl. OTTO et al. 2004), bieten keine hinreichenden Informationen über Strukturen von senkrechten und überhängenden Felswänden und steilen Hangbereichen.

Der zweite Punkt ergibt sich direkt aus dieser Affinität zum Feldansatz der räumlichen Repräsentation. Zwar sind in der Geomorphologie die Entitäten der Wand und anderer

Landformen erkannt, eine Modellierung in der objektorientierten Sicht wird aber nur unzureichend diskutiert. Während über die Ausdehnung geographischer Objekte und den damit verbundenen Problemen der Grenzen dieser Entitäten nachgedacht wird (vgl. BURROUGH 1996), erfährt die Betrachtung der Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Objekten der Landoberfläche kaum Anerkennung bei den Versuchen einer Beschreibung. Die regelhafte Struktur von Landformen ist aber nicht nur durch Nachbarschaften sondern auch durch eine *prozessuale Erreichbarkeit* bestimmt. Die hier formulierte prozessuale Erreichbarkeit, die ausgehend vom Klimasystem und der Oberflächenstruktur des Reliefs bestimmt, ob und wie Objekte mit anderen über den Austausch von Masse in Beziehung stehen können, ist elementar für das Verständnis des Reliefs und damit auch für einen verbesserten Schutz gefährdeter Siedlungsbereiche. Eine semantisch definierte prozessuale Erreichbarkeit muss auf einer topologischen Betrachtung der Reliefs fußen, was wiederum voraussetzt, die Existenz von Grenzen der einzelnen Objekte zu postulieren. Diese Gedanken finden auch in neueren Ansätzen zur Gefahrenkartierung, etwa bei KASSEBEER 2002, keine entsprechende Würdigung.

Der dritte Grund ist schließlich in der Differenz zwischen dem Formulierungsgrad der Geomorphologie und dem Formalisierungsanspruch der Geoinformation zu suchen. Hier ist es nun notwendig, die Schere zwischen der diskursiven Sprache der Fachwissenschaft und den formalen Sprachen der Geoinformation zu schließen. Dafür muss der Konzeptualisierung als Aufbereitung einer fachwissenschaftlichen Theorie im Sinne von GRUBER 1993 eine Klärung derseben vorausgehen. Das ist in erster Linie Aufgabe der Fachwissenschaft selbst (vgl. FONSECA und EGENHOFER 1999; DEHN et al. 2001) bzw. derjenigen, die sich an der Schnittstelle dieser beiden Wissenschaften einordnen möchten. Eine resultierende explizite Definition des semantischen Modells verhindert dabei Konflikte zwischen dem allgemeinen Fachwissen (engl.: *common sense ontology*) der Anwender und der Implementierung durch mathematische Konzepte in einer Software (vgl. FRANK 1997). Ein entsprechender Ansatz ist aber im Bereich der Geomorphologie bis heute nicht erfolgt. Hier wollen wir ansetzen.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Das Graduiertenkolleg 437, „das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“ an der Universität Bonn hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Forschung im Bereich des Reliefs im interdisziplinären Rahmen voranzutreiben. Diese hier vorgelegte Arbeit versteht sich als ein Beitrag zur vermittelnden Position zwischen Geomorphologie und Geoinformation. Ziel aus Sicht der Geomorphologie muss es dabei sein, ihre sinnstiftenden Konzepte für die formalen Anforderungen der Geoinformation freizulegen. Mittelfristig muss es gelingen, ein Konzept zu entwickeln, das die Bedürfnisse der Geowissenschaft in Bezug auf die Repräsentation, dauerhafte Haltung und Analyse von Wänden und steilen Hangbereichen als herausragende Vertreter des alpinen Formenschatzes befriedigt.

Kern dieses Vorgehens bildet hier die formale semantische Modellierung von hoch alpinen Formen, wie etwa Wände und steile Hangbereiche, die die Sicht der Geomorphologie als Fachrichtung repräsentiert. Dieses zu entwickelnde Anwendungsmodell stellt einen wesentlichen Vorteil bei der Nutzung geoinformationstechnischer Erkenntnisse durch die Geomorphologie dar. Es erlaubt die Implementierung geomorphologischer Konzepte in Geoinformationssysteme und damit den internationalen und interdisziplinären Austausch von Erkenntnissen der Fachwissenschaft. In dieses Schema muss ebenfalls eine geometrische Repräsentation der in der semantischen Modellierung definierten Objekte integriert werden können. Aus Sicht der Geoinformation bietet sich dafür das „Spatial Schema“ der ISO 19107 (vgl. HERRING 2001) an. Dieser internationale Standard muss für die Bedürfnisse der hier durchgeführten semantischen Modellierung allerdings angepasst werden.¹

Aus den oben formulierten Überlegungen lassen sich für diese Arbeit folgende Teilziele formulieren:

- Der wichtigste Punkt ist die Formulierung eines formalen semantischen Modells geomorphologischen Fachwissens. Hierbei liegt der Fokus auf dem Hang, insbesondere auf steilen Hängen und Wänden, wie sie für hoch alpine Gebiete charakteristisch sind. Bei der Repräsentation der Geometrie in einem GIS gilt es, allgemeine Konzepte der Geomorphologie auf der Basis des sog. *least commitment* zu identifizieren, also solche Aussagen, die unnötige oder strittige Punkte innerhalb der Fachwissenschaft ausblenden. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass die entwickelte semantische Modellierung durch den Bezug auf internationale Standards den Ansprüchen der Interoperabilität genügt und die Geomorphologie damit in die Lage versetzt, ihre Forschungsergebnisse von voluminösen Geoobjekten umfassend auszutauschen.
- Die Beziehungen von Landformen werden neben topologisch zu beschreibenden Nachbarschaftsbeziehungen überwiegend durch Materialtransportprozesse bestimmt. Daher hat diese semantische Modellierung zum Ziel, grundlegende geomorphologische Prozesse im Bereich von Wänden in Form einer Konzeptmodellierung mit einzubeziehen. Nur auf diese Weise wird es möglich, sich dem in der Geomorphologie wichtigen Konzept der Sedimentkaskade zu nähern.

1.3 Gliederung der Arbeit

Aus den oben benannten Zielen leitet sich folgende Gliederung ab. In Kapitel 2 werden grundlegende Ansätze zur formalen semantischen Modellierung der Objekte von Wänden und steilen Hangbereichen beleuchtet. In diesem Kapitel ist darauf geachtet

¹Die hier nicht behandelten Schwächen der Datenerhebung mittels klassischer Luftbilder können durch terrestrische Digitalbilder ergänzt werden. Das hier entwickelte formale semantische Modell ermöglicht eine solche Erfassung, wobei auf LÖWNER 2005 verwiesen wird.

worden, die jeweils zugrunde liegenden Prinzipien der beiden beteiligten Fachwissenschaften für die jeweils andere Seite verständlich zu machen. Dabei beginnt Kapitel 2.1 mit den Anforderungen an eine formale semantische Modellierung und zeigt Probleme auf, die sich insbesondere bei der Modellierung geographischer Entitäten ergeben. Kapitel 2.2 folgt mit den zu modellierenden Konzepten der Geomorphologie. Diese umfassen neben einer Klärung der Begrifflichkeiten von Objekten auch die Betrachtung grundlegender Ansätze der Fachwissenschaft. Dazu gehören prozessuale Beziehungen von Objekten untereinander ebenso wie die Diskussion über Sedimentspeicher und ihre Bedeutung im Geosystem.

Ausgehend von den in Kapitel 2 erläuterten Grundlagen wird in Kapitel 3 die formale semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen diskutiert. Hierzu ist in Kapitel 3.2 ein Profil des Internationalen Standards der ISO 19107 zu definieren, das den Ansprüchen dieser Modellierung genügt. Die formale Modellierung selbst wird in Kapitel 3.3 auf der inhaltlichen Ebene zunächst für die Objekte des hochalpinen Reliefs durchgeführt. In Kapitel 3.4 folgt eine Klassenmodellierung der Prozesse, die die Geoobjekte durch den Transport von Sediment miteinander in Beziehung stellen. Dazu gehört auch die Modellierung des in der Geomorphologie übergeordneten Konzeptes der Sedimentkaskade.

In Kapitel 4 erfolgt eine kritische Diskussion des Erreichten und ein Ausblick auf weiter gehende Forschungsfragen, die im Rahmen des Graduiertenkollegs 437 unter Einladung der beteiligten Geomorphologie am Institut für Kartographie und Geoinformation angestrebt werden.

2 Konzeptionelle Grundlagen

Zusammenfassung

Thomas S. Kuhn beschreibt in seinem bahnbrechenden Buch „Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen“ das *Paradigma* als allgemeine wissenschaftliche Leitidee. Innerhalb der „normalen Wissenschaft“ dient es dazu, dem Erfolg nach zu streben, den es bei der Lösung von Problemen verspricht. In der Eigenschaft der übergeordneten Leithypothese beeinflusst ein Paradigma sogar die Wahrnehmung der Wissenschaftler (vgl. KUHN 1967). Diese Frage nach der Art des durch Paradigmen gesteuerten Zugangs zu den Forschungsinhalten ist auch für diese Arbeit wesentlich. Die Voraussetzung für eine Anwendungsmodellierung bedarf der Betrachtung grundlegender Objekte und Konzepte in verschiedenen Sichtweisen. Dabei sollen die Fachwissenschaftler auf der Grundlage der ihnen geläufigen Terminologie auf dieses Modell zugreifen können, unabhängig welcher Schule innerhalb der Geomorphologie sie angehören. Um dies leisten zu können, müssen die identitätstiftenden Konzepte der diskursiven Fachwissenschaft extrahiert und formalisiert werden. Aussagen, die unnötige oder strittige Punkte beleuchten, müssen zunächst ausgeblendet und von grundlegenden Erkenntnissen getrennt werden. Der allgemeine Denkansatz innerhalb der Geomorphologie ist dabei das Objekt, das über einen Materialtransportprozess mit anderen in Beziehung steht.

In diesem Kapitel werden nun die Grundzüge der wissenschaftlichen Richtungen skizziert, die an der formalen semantischen Modellierung von Objekten des Reliefs und deren Repräsentation in einem GIS beteiligt sind. Dies sind die Geoinformation und die Geomorphologie. Den Anfang macht Kapitel 2.1 mit den Anforderungen an eine formale semantische Modellierung aus Sicht der Geoinformation. In Kapitel 2.1.2 wird auch auf Schwierigkeiten eingegangen, die sich bei der Modellierung der räumlich ausgedehnten Konzepte der Geowissenschaften ergeben. Hier stehen sich im Wesentlichen der Feldansatz und die objektorientierte Sichtweise gegenüber, wobei sich letztere als die geeignetere herausstellt. Als formale Sprache, die zur Repräsentation einer semantischen Modellierung unabdingbar ist, werden in Kapitel 2.1.3 die Vorteile der Unified Modelling Language (UML) herausgearbeitet. Dies sind insbesondere die anschauliche Art der standardisierten Sprache und ihre mächtige Erweiterung durch die Object Constraint Language (OCL). Kapitel 2.1.4 erläutert, warum das in der geomorphologischen Forschung häufig verwendete Rasterformat für eine geometrische Analyse von Wänden und steilen Hangbereichen ungeeignet ist. Es wird in Folge dieser Unzulänglichkeiten der internationale Standard ISO 19107 als Repräsentation von 3D-Objekten vorgestellt.

In Kapitel 2.2.1 werden die Konzepte der Geomorphologie diskutiert, die in der semantischen Modellierung repräsentiert werden sollen. Am Anfang steht die Klärung des allgemeinen Verständnisses der Geomorphologie über den Begriff des *Reliefs*, der bei weitem nicht einheitlich verwendet wird. Konsens ist jedoch, dass das Relief durch die in Kapitel 2.2.2 beleuchteten Prozesse ständig verändert wird. Wichtig an dieser Stelle festzuhalten ist, dass formenverändernde Prozesse zwar vom Klimasystem angetrieben werden, die Wirkung des klimatischen Einflusses aber vom Geobjekt selbst bestimmt wird. Mit Blick auf die besondere Stellung der Wand im Sedimentkaskadensystem, geht Kapitel 2.2.3.1 auf ein grundlegendes Konzept der Geomorphologie ein. Kapitel 2.2.3 stellt dem eine allgemeinere Veranschaulichung dieses Konzeptes voran.

2.1 Semantische Modellierung geographischer Objekte – ein ontologischer Ansatz

Als Teilgebiet der Semiotik (*griech.: σημειωτική*) betrachtet die Semantik im engeren, linguistischen Sinne die Bedeutung von sprachlichen Zeichen (PELZ 1993). Sie beruht seit DESAUSSURE 1931 auf der Erkenntnis, dass das sprachliche Zeichen und seine Bedeutung untrennbar miteinander verbunden sind. In der Informationswissenschaft wird der Begriff der semantischen Modellierung allerdings weiter gefasst und als das Aufstellen von Konventionen und Definitionen einer Idee verstanden. In diesem Sinne wird die Dichotomie deSaussures bezüglich des sprachlichen Zeichens auf der informatischen Ebene erweitert und als Beziehung zwischen der informationstechnischen Repräsentation und der korrespondierenden Welt verstanden (RISHE 1992). Hier verlässt die semantische Modellierung der Geoinformation das Forschungsfeld der Semiotik und wird zu einer Wissenschaft, die Theorien mit spezifischen Vokabeln benutzt, um Entitäten, Klassen, Eigenschaften und Funktionen im Verhältnis zu einem gewissen Blick auf die Welt zu entwickeln. Das Ergebnis einer solchen Wissensrepräsentation sind semantische Netze (vgl. REIMER 1991), die in diesem Zusammenhang auch Ontologie genannt werden können (vgl. FONSECA et al. 2002).

Der Begriff der semantischen Modellierung ist hier also mit dem der Ontologie synonym verwendet, ohne die Fortschritte im Bereich der Ontologien zu übersehen. Ein wesentlicher Grund dafür entspringt der Berufung beider Ansätze auf die gleichen, durch Aristoteles in dem vierten Buch seiner Metaphysik gegebenen Wurzeln der Ontologie als die Wissenschaft vom Seienden (SCHWARZ 2000, vgl. a. SEIDL 1988). Infolgedessen wird auch in entsprechender Fachliteratur nicht eindeutig zwischen semantischer Modellierung und dem Erstellen einer Ontologie getrennt (vgl. etwa FONSECA et al. 2002). Es handelt sich bei den Begriffen der semantischen Modellierung und dem der Ontologie also offensichtlich nicht um inhaltlich begründete Gegensätze zweier Paradigmen im Sinne von KUHN 1967, den sich gegenseitig ausschließenden Überzeugungen in der Wissenschaft.

Beiden Wissenschaftsentwicklungen liegt das Prinzip des *Konzeptes* zu Grunde. Ein Konzept ist nach GENESERETH und NILSSON 1987 eine abstrakte, vereinfachte Sicht auf den Abschnitt der Welt, der aus gewissen Gründen repräsentiert werden soll. Das Konzept wird als ein 3-Tupel aus Konzeptname, Intension und Extension verstanden (REIMER 1991). Die Intension gibt die Merkmale eines Objektes an, die es aufweisen muss, um zu dem entsprechenden Konzept zu gehören. Diese Merkmale können zu *Merkmalsklassen*, etwa der Farbe zusammengefasst werden. Die Extension eines Konzeptes sind die instantiierten Eigenschaften der Objekte, die zu einem Konzept gehören, weil sie etwa die Farbe Blau haben. Besitzt ein Konzept mehrere Extensionen in Form von Objekten, wird es auch *Konzeptklasse*, kurz *Klasse* genannt. Jede Klasse verfügt über semantische Beziehung (vgl. CHAUFFIN und HERRMANN 1988) zu anderen Konzeptklassen aber auch zu Individualkonzepten.² Zu anderen Konzeptklassen sind dies etwa *Teil-von-Beziehungen*, zu den Individualkonzepten sind es *Instanz-von-Beziehungen*. Die Instanzen oder Objekte einer Klasse tragen als Repräsentanten von Objekten der Realwelt die Information, sind somit also Ausprägungen der Merkmalsklassen. Wie Realweltobjekte auch, können solche Objekte während ihrer Lebenszeit verschiedene Rollen einnehmen, die sie in bestimmten Kontexten mit den ihnen assoziierten Objekten derselben oder anderer Klassen spielen (vgl. FONSECA et al. 2002). Ein Beispiel aus der Geomorphologie wäre die Klasse aller Hänge eines alpinen Tals, die zum einen die Rolle des Sedimentspeichers der Verwitterungsprodukte einer Wand einnehmen kann, zum anderen aber die der Sedimentquelle für das unterhalb gelegene fluviatile System. Die Rolle, die ein Vertreter der Klasse alpiner Hänge annimmt, ist also von der Art der mit ihr assoziierten Objekte abhängig. Unabhängig davon lassen sich die zweistelligen semantischen oder assoziativen Beziehungen zwischen Konzeptklassen, Konzepthierarchie oder einem semantischen Netz darstellen (vgl. REIMER 1991). Dabei ergibt sich die Konzepthierarchie aus dem jeweiligen Zweck der Modellierung, also aus dem wissenschaftlichen Hintergrund und kann prinzipiell nach beliebigen Kriterien erfolgen.

Ähnlich der oben skizzierten semantischen Modellierung begreift sich die Ontologie seit Aristoteles als Wissenschaft von Typen, also den Konzeptklassen und den Entitäten der Realität sowie deren Eigenschaften, Kategorien und Beziehungen (SMITH und MARK 1999). Wichtig dabei ist, dass sie damit, wie die semantische Modellierung auch, eine spekulative Untersuchung darstellt, von der unsicher ist, ob die ontologischen Theorien durch empirische Methoden nachgewiesen werden können. In der künstlichen Intelligenz (engl.: *artificial intelligence*) wird Ontologie von GRUBER 1993 als explizite Spezifizierung einer Konzeptualisierung definiert und besteht, wie ein semantisches Netz, aus Konzepten über Objekte, die im Feld des Interesses stehen. GUARINO 2004 definiert eine Ontologie verfeinert als die logische Theorie, die für die intendierte Bedeutung eines formalen Vokabulars steht, wohingegen die Konzeptualisierung die for-

²Hier wird der Begriff der Semantik gegenüber seinen Ursprüngen aus der Linguistik erneut erweitert, indem auch Beziehungen zu anderen Klassen als dem Semem, also dem kleinsten Träger von Bedeutung, angesehen werden.

male, vom Vokabular unabhängige Struktur der in der Ontologie modellierten Realität ist. Während die Konzeptualisierung eine Aufbereitung einer Theorie in eine für Maschinen lesbaren Form ist, muss die Theorie von der Fachwissenschaft selbst geliefert (vgl. FONSECA und EGENHOFER 1999; DEHN et al. 2001) und explizit gemacht werden. Die explizite Definition der Ontologie verhindert dabei Konflikte zwischen dem allgemeinen Fachwissen (engl.: *common sense ontology*) der Anwender und der Implementierung durch mathematische Konzepte in einer Software (vgl. FRANK 1997).³ Das Aufstellen einer Ontologie muss also klar von der Implementierung getrennt werden.

2.1.1 Stufen der Entwicklung einer Ontologie

FRANK 2001 postuliert verschiedene Entwicklungsstadien einer Ontologie, die von FONSECA et al. 2002 zu einem fünf-stufigen Modell erweitert werden. Danach gehören

1. die vom Menschen unabhängige Realität,
2. die Objekte mit ihren Eigenschaften,
3. die Beobachtung der physikalischen Welt,
4. die soziale Realität sowie
5. das subjektive Wissen

zu den Faktoren, die eine Ontologie beeinflussen. Während die vom Menschen unabhängige Realität das Ziel der Beschreibung ist, sind die daraus kognitiv wahrgenommenen Objekte durch die Art der Beobachtung der physikalischen Welt abhängig. Diese Beobachtung ist dabei stark vom Alltagswissen eines betrachtenden Menschen geprägt, das wiederum vom sozialen, also kulturellen Hintergrund einer Gesellschaft beeinflusst wird. BURROUGH und FRANK 1995 weisen darauf hin, dass der kulturelle Einfluss auch auf die wissenschaftlich geprägte Wahrnehmung wirkt, die das subjektive Wissen eines Menschen aus der Fachwissenschaft ausmacht. Die Fachwissenschaft ist also nicht a priori neutral oder objektiv, was sich allein schon durch die Wahl der von ihr betrachteten Objekte ergibt.

Die Größe des betrachteten Ausschnitts des Universums der menschenunabhängigen Phänomene (engl.: *universe of discourse*) bilden die Grundlage für die Erstellung einer Ontologie, wobei GRUBER 1993 die folgenden fünf Punkte als Kriterien des Designs nennt.

1. Klarheit (engl.: *clarity*): Eine Ontologie sollte effektiv die Bedeutung der definierten Begriffe kommunizieren können. Die Definitionen sollten objektiv sein, wofür ein Formalismus wichtig ist, der mit der natürlichen Sprache kommentiert werden sollte.

³Hierbei ist das allgemeine Fachwissen natürlich nicht mit dem von HORTON 1982 definierten Alltagswissen (engl.: *primary theory*) zu verwechseln, dem SMITH und MARK 2003 die wissenschaftliche Erkenntnis (engl.: *secondary theorie*) entgegenstellen, die hier gemeint ist.

2. Logische Stimmigkeit (engl.: *coherence*): Unstimmigkeiten der Definitionen sollten vermieden werden. Stimmigkeit sollte auch zwischen der formalen Definition und der beschreibenden natürlichen Sprache vorliegen.
3. Erweiterbarkeit (engl.: *extendibility*): Eine Ontologie sollte auf Grundlage der bestehenden Definitionen monoton erweiterbar sein, d. h. ohne eine Änderung am bereits Bestehenden durchzuführen sein.
4. Minimale Neigung zur Verschlüsselung (engl.: *minimal encoding bias*): Der Formalismus sollte auf der Ebene des Wissens entwickelt werden, ohne dass Zwänge des verwendeten Formalismus oder der Implementierung bedeutend sein sollten.
5. Minimale ontologische Bindung (engl.: *minimal ontological commitment*): Um das gemeinte Wissen zum Ausdruck zu bringen sollte eine Ontologie so grundlegend und offen wie möglich sein.

Die Punkte dieser geforderten Eigenschaften einer Ontologie sind dabei nach GRUBER 1993 in Abwägung unterschiedlich stark zu berücksichtigen. Wie bereits gesehen, sind die Punkte eins und zwei nicht einfach nachprüfbar, bestenfalls falsifizierbar. Die Forderung nach monotoner Erweiterbarkeit ist dabei einfacher zu erfüllen, auch wenn es in der Fachwissenschaft der Geomorphologie bereits bei grundlegenden Erkenntnissen durchaus verschiedene Ansätze gibt. Auch wird der Formalismus selbst mitunter gewisse Zugeständnisse im Vergleich zur allgemeinen Fachsprache fordern, in denen aber auch Chancen liegen. Ein allgemein als sinnvoll erachteter Formalismus kann helfen, die prosaisch vorgetragenen und dadurch oft unübersichtlichen Definitionen und Konzepte einer Fachwissenschaft regelhaft zu ordnen.

2.1.2 Probleme bei der Erstellung einer Ontologie für geographische Objekte

Die oben genannten Anforderungen an eine erfolgreiche, formale semantische Repräsentation geographischer Konzepte verlangen eine Suche nach zumindest minimalen Übereinstimmungen innerhalb der Fachwelt (vgl. DEHN et al. 2001). Der Aufbau einer Terminologie, also die Summe der *termini technici*, die auf die Ordo einer Wissenschaft zielt, ist dabei gerade in der Geomorphologie Schwierigkeiten unterworfen, die dem Objekt der Betrachtung, dem Georelief als Summe von Einzelphänomenen selbst inhärent sind (vgl. Kapitel 2.2.1). So stellt LEHMANN 1964 fest, dass zum einen Geländeformen schwer begrifflich zu fassen seien, weil man im fließenden Ineinander nicht wisse, wo die eine Form anfangt und die andere aufhört. Zum zweiten sei das haptische Sehen, also der ins Optische übertragene Tastsinn zum Erkennen dreidimensionaler Formen bei den meisten Menschen schwach ausgebildet. Schließlich stelle zum dritten die Sprache ein kümmerliches Vokabular hinsichtlich der Formenbeschreibung zur Verfügung. Damit arbeitet LEHMANN 1964 die wesentlichen und gegenwärtigen Problemfelder der Geowissenschaften in Bezug auf die semantische Modellierung heraus. Das betrifft im Einzelnen die feldbasierte Sicht in der Geomorphologie versus ei-

ner objektorientierten, die Problematik der Bestimmung von Grenzen geomorphologischer Objekte und die damit verbundene geometrische Repräsentation derselben. Hinzu kommt, dass eine global agierende Wissenschaftsgemeinde durch Einflüsse kultureller Art und die Präsenz vorherrschender und z. T. divergierender Wissenschaftsschulen eben nicht zwingend zu einer einheitlichen Sichtweise der Objekte des Diskurses findet.

2.1.2.1 Der Feldansatz versus objektorientierter Wahrnehmung

Ein wesentliches Problem bei der Identifikation relevanter Konzepte innerhalb der Geomorphologie ist, dass sich zur geometrischen Analyse des Raumes der Feldansatz und der objektorientierte Ansatz gegenüber stehen. Eine Diskussion, die so alt ist, wie die Geoinformationssysteme und auch als Gegensatz zwischen Raster- und Vektorrepräsentation diskutiert wird (vgl. FRANK 1996). In der Theorie der Geomorphologie herrscht die Vorstellung vor, dass die Landoberfläche durch klar gegeneinander abzugrenzende Objekte gegliedert ist. Diese Objekte haben Nachbarschaftsbeziehungen und treten über geomorphologische Materialtransportprozesse mit anderen Objekten in Beziehung. Die quantitative Forschungsrichtung der Geomorphologie, die Geomorphometrie hingegen verfolgt die Analyse dieser Objekte überwiegend mit dem Feldansatz.

Der Feldansatz basiert darauf, dass jeder Punkt im zweidimensionalen Raum mit einem oder mehreren Attributwerten assoziiert ist (RIGAUX et al. 2002). Die geographische Realität wird dabei als eine Menge (engl.: *set*) von im geographischen Raum verteilten Attributen aufgefasst (FONSECA et al. 2002). Eine Klassifikation der räumlichen Phänomene wird dann durch deskriptive Statistik des Höhenfeldes und seiner Derivate, also Hangneigung oder Wölbung als erste bzw. zweite Ableitung der Höhe zu erreichen versucht (DEHN et al. 2001), wie dies in der Geomorphologie etwa EVANS 1972, O'NEILL und MARK 1987, BRÄNDLI 1997 oder LÖWNER et al. 2003 getan haben. Dabei gehen die wissenschaftlichen Ansätze zur Klassifikation des Reliefs bereits auf PENCK 1894 zurück, der etwa steil geneigte Flächen von Einstülpungen oder Wannen unterscheidet. Allgemeines Ziel dieser Analyse ist die Diskretisierung des räumlichen Kontinuums des Reliefs⁴ in Einheiten, die mit den untersuchten Phänomenen in Beziehung stehen (RASEMANN 2004). WRIGHT 1972 definiert diese über statistische Klassifizierungsmethoden gefundenen Gebiete einheitlicher Charakteristik als taxonomische Einheiten, die durch Zerlegung des Ganzen in immer kleinere Teile erhalten werden. Fraglich bleibt nur, auf welche Taxonomie sich der Analysierende hierbei bezieht. DIKAU 1989 nennt diese kleinsten Einheiten, die in ihrer Hangneigung, Exposition und Wölbung homogen sind, Formfazetten, die über Klassifizierung wiederum zu größeren Einheiten, den Formenelementen zusammengefasst werden. Bei den genannten Autoren erfolgt die Erstellung eines Attributkataloges, das Ableiten der Attribute und die nachfolgende Klassifizierung derselben also in Abhängigkeit der Ausgangsdaten, in diesem Fall einem Raster von Höhendaten. Auch hier bleibt fraglich, ob diese

⁴Zur genaueren Betrachtung des Begriffes Relief in der Geomorphologie sei auf das Kapitel 2.2.1 verwiesen.

Klassifizierung primär im Sinne der Ordo der Geowissenschaft oder aber in Abhängigkeit der zugänglichen Daten erfolgt. DEHN et al. 2001 zweifeln folgerichtig an dem semantischen Gehalt der Reliefklassifikation auf Grund von Attributklassifizierung und werden von FISHER und WOOD 1998 unterstützt.

Ohne die Betrachtung der geomorphologischen Sicht auf das Relief in Kapitel 2.2.1 allzu stark vorweg nehmen zu wollen, ist klar, dass 3D-Objekte, die über funktionale Beziehungen in Zusammenhang stehen, nicht allein durch Verfahren deskriptiver Statistik, die auf ein 2,5D-Feld der Höhen und damit allein auf die Grenzfläche der Objekte mit der Atmosphäre Anwendung findet, klassifiziert oder gar identifiziert werden könnten. Die Kritik am Festhalten der Reliefanalyse an 2D-Daten wird dabei auch von CHORLEY 1972 angebracht.

Im Gegensatz zum feldbasierten Ansatz betrachtet die objektorientierte Sicht die Welt als eine Oberfläche, die aus diskreten, identifizierbaren Entitäten mit geometrischer Repräsentation und beschreibenden Attributen zusammen gesetzt ist (FONSECA et al. 2002). Der wesentliche Unterschied zwischen der objektorientierten Sicht und dem Feldansatz liegt in dem Bedarf, die Entitäten der Betrachtung erst einmal zu identifizieren (SMITH und MARK 2003). Es muss also im Sinne eines ontologischen Konzeptes eine vereinfachte Sicht auf das Objekt definiert werden. Dabei unterscheidet CURRY 2000 den nüchternen, *deskriptiven* Ansatz, der gerade die in einer Systematik verwendeten Objekte als real ansieht, vom *normativen* Ansatz, der Dinge, die in einem System erlaubt sein sollen, identifiziert und deren Datenstrukturen modelliert. Beide Ontologien stellen dabei natürlich Untermengen der wirklich realen Welt dar. In beiden Ansätzen ist gleichermaßen die Intension des Konzeptes, die mit der assoziativen Beziehung zu anderen Objekten über seine intrinsischen Eigenschaften hinausgeht, von entscheidender Wichtigkeit (vgl. Kapitel 2.1). Trotz dieser Schwierigkeiten der Konzeptdefinition fordern RAPER und LIVINGSTONE 1995 die Modellierung der Umwelt aufzugeben, die sich aus den planaren Darstellungen räumlicher Objekte ergibt und preferieren eine integrierte, objektorientierte Betrachtung räumlicher Phänomene, wie dies schon THORNBURY 1956 getan hat.⁵ Sie ist Voraussetzung zum Erstellen einer Ontologie, die, ebenso wie die semantische Modellierung von der Vorstellung eines Konzeptes als Einheit der Gesamtsystematik ausgeht. Es müssen also Konzeptklassen definiert und klassifiziert werden und keine Merkmalsklassen, wie dies in der feldbasierten Extraktion von Objekten der Fall ist. Die Identifikation einer den von GRUBER 1993 genannten Anforderungen entsprechenden Ordo einer Wissenschaft oder eines ihrer Teile stellt damit bereits einen wissenschaftlichen Wert dar.

BURROUGH und FRANK 1995 weisen zurecht darauf hin, dass die Erdoberfläche in der Wahrnehmung, die ja ebenfalls einen entscheidenden Anteil an der Generierung einer semantischen Modellierung hat, wahrscheinlich als Mixtur der beiden gegensätzlichen Ansätze erscheint. Sie nennen als Beispiel eines Objektes, das aus feldbasierten Da-

⁵Die planare Darstellung von Entitäten des Reliefs birgt insbesondere bei Wänden und Überhängen erhebliche Probleme (vgl. Kapitel 2.1.4).

ten extrahiert werden kann, die Tiefdruckzelle. Dabei verschweigen sie allerdings, dass sich ein Tiefdruckgebiet im Gegensatz zu hohem Luftdruck durch nur eine Merkmalsausprägung, die dann den Status eines definitiven Merkmals einnimmt (vgl. REIMER 1991), abgrenzen lässt. JAQUEZ et al. 2000 schlagen hingegen vor, Grenzen geographischer Objekte ebenfalls als Objekte anzusehen, da sie sich auf Objekte von wissenschaftlicher und realer Bedeutung beziehen.

2.1.2.2 Das Problem unscharfer Grenzen

FISHER und WOOD 1998 argumentieren, dass das Ziehen von Grenzen, die den Raum in mehrere Gebiete unterteilen, innerhalb des Feldansatzes durch Änderungen von Variablen grundsätzlich möglich sei. Häufig aber sei der Wechsel der Variablenwerte graduell, wodurch die Bestimmung von Grenzen unsicher werde. JAQUEZ et al. 2000 fordern daher eine statistisch fundierte Analyse von Grenzen, die deren Charakter und Signifikanz zum Ausdruck bringen soll. Im Rahmen des Feldansatzes führt dies zu Problemen. Zwar glaubt jedermann, dass jedes Ding eine räumliche Ausdehnung hat, die Idee, den Raum in präzise Teile zu zerlegen lässt sich aber auf Konzepte, wie etwa das eines „Berges“ nicht gut anwenden. Hier könnte der Begriff des Fuzzy sets zur Hilfe genommen werden, der eine Theorie der unscharfen Mengenlehre darstellt. Die Theorie der Fuzzy-Logik (deutsch: *ungenau, verschwommen, unscharf*) wurde von ZADEH 1965 entwickelt (vgl. KOSKO 1993; KLIR und YUAN 1995) und verwirklicht die Vorstellung, dass ein Element in einer Grundmenge auch nur zu einem gewissen Teil enthalten sein kann. Der Grad an Zugehörigkeit wird meist durch eine Zugehörigkeitsfunktion beschrieben, die den Elementen einer Grundmenge eine reelle Zahl zwischen 0 und 1 zuordnet, wobei Letzteres eine eindeutige Zuteilung dokumentiert. Die Theorie der Fuzzy-Logik ist in der hier vorgestellten Identifikation relevanter geomorphologischer Konzepte allerdings abzulehnen. Die Notwendigkeit Nachbarschaftsbeziehungen und prozessuale Erreichbarkeiten zwischen Objekten der Landoberfläche beschreiben zu müssen, bedingt es vielmehr, von Objekten mit eindeutigen Grenzen auszugehen, wie es die Theorie der Geomorphologie im Kern auch tut.

Im Sinne der objektorientierten Sicht weisen ideale geographische Entitäten nach BURROUGH 1996 exakte (engl.: *crisp*) räumliche Grenzen und wohl definierte Merkmalsklassen auf. Diese können dann durch Koordinaten in Form von Punkten, Linien, Flächen oder Volumen angegeben werden. SMITH 2000 führt daher für Objekte, die durch ihre Natur keine eindeutige Begrenzung aufweisen, den Begriff der sog. Fiat-Grenzen. Fiat-Grenzen werden durch den Menschen gezogen, wie etwa Landesgrenzen oder Bereiche, auf denen gewisse geomorphologische Prozesse wirken. Sie lassen sich in der objektorientierten Vorstellung also auch für die Repräsentation der räumlichen Ausdehnung von Entitäten anwenden. In der normativen Verfahrensweise der semantischen Modellierung ist es daher zunächst nebensächlich, ob Grenzen in der Praxis klar definiert werden können. Entscheidend ist nur, dass die von der Geomorphologie betrachteten Objekte in der theoretischen Anschauung, also auch im semantischen Modell, eine

scharfe Grenze aufweisen. Dies ist für die Bestimmung der Ausdehnung eines Sees für eine längere Zeitspanne weniger klar, als bei der Begrenzung eines speziellen Sedimentkörpers. Auch wenn die Grenzen des Letzteren nicht bekannt sind, ist gewiss, dass sie vorhanden sind (vgl. COUCLELIS 1996), so wie dies zu einem bestimmten Zeitpunkt auch bei dem Wasserkörper eines Sees der Fall ist.

RASEMANN 2004 zeigt am Beispiel des Konzeptes „Berg“ allerdings auf, dass eine klare Definition auch innerhalb der geomorphologischen Wissenschaft nicht zwingend vorhanden ist. Damit unterstützt er die Forderung, die in einer Wissenschaft kursierenden Vorstellung von den Entitäten der Betrachtung im Sinne von GUARINO 2004 formal eindeutig zu definieren.

2.1.3 UML – ein Formalismus zur semantischen Modellierung

Zur Entwicklung eines ontologisch basierten Geoinformationssystems muss die Ontologie von der Fachwissenschaft gestellt und entwickelt werden (FONSECA und EGENHOFER 1999). Die Übermittlung der Ontologie in Form einer semantischen Modellierung kann dabei natürlich nicht prosaisch erfolgen. Sie braucht, wie in Kapitel 2.1 diskutiert, einen Formalismus, der die von GUARINO 2004 geforderte logische Theorie der intendierten Bedeutung eines Wissenschaftsfeldes verdeutlicht. Diese Formalisierung muss in allgemeiner und rechnerverständlicher Form erfolgen, damit die Informationswissenschaft die in der semantischen Modellierung getroffenen Aussagen verstehen und implementieren kann. Als Lösung für diesen Kommunikationsbedarf bietet sich die Unified Modelling Language (deutsch: *vereinheitlichte Modellierungssprache*) (UML) an. Sie ist eine objektorientierte Sprache zur Spezifikation, Visualisierung, Konstruktion und Dokumentation von Anwendungsmodellen für Software-, Daten- und andere Nicht-Softwaresysteme (vgl. DUMKE ND). CRANFIELD und PURVIS 1999 bemerken zudem, dass viele der anderen verwendeten Sprachen zur Generierung von Ontologien wenig intuitiv und kaum über die Grenzen der Informationswissenschaft hinaus bekannt sind. Im einzelnen sind die Vorteile von UML, dass sie

- eine standardisierte graphische Sprache ist,
- mit OCL (Object Constraint Language) eine mächtige Ergänzung erhält, die auf der Prädikatenlogik basiert,
- durch XMI (XML Model Interchange) als Standard austauschbar ist und durch diese Vorteile
- eine schnell wachsende Anwendergemeinschaft hat.

Damit bietet sie die Möglichkeit, den Entwurf und die Entwicklung von semantischen Modellen auf einer einheitlichen Basis zu diskutieren und stellt gleichzeitig deren Implementierung durch Geodatenbanken und Anwendungsprogramme sicher. Das gilt, obwohl KUHN 2002 bezweifelt mit UML eine Basis zu haben, auf der die Experten der Fachwissenschaften diskutieren und Missinterpretationen und Auslassungen in einem

semantischen Modell finden können. Damit spricht er lediglich ein allgemeines Problem der Interdisziplinarität an, das sich beim Erstellen einer Ontologie zwangsläufig ergeben muss. Die Problematik ergibt sich im Übrigen auch in die andere Richtung, weswegen die von GRUBER 1993 geforderte Kommentierung einer solchen Modellierung durch die natürliche Sprache unbedingt erfolgen muss.

Als weiterer Vorteil kommt hingegen hinzu, dass neben den kommerziellen Produkten, wie das hier verwendete Poseidon for UML auch freie UML Tools, wie Umbrello, Violet oder Dia verfügbar sind (GODFREY 2005), mit denen sich UML-Diagramme entwickeln lassen. So können auch Fachwissenschaftler selbst leicht das Erstellen formaler und interoperationaler semantischer Modellierungen durchführen.

Damit die semantische Modellierung in dieser Arbeit als Beitrag der Fachwissenschaft Geomorphologie dort auch rege diskutiert werden kann, soll die Syntax der UML hier kurz erläutert werden. Leser, denen die Arbeitsweise mit UML vertraut ist, können den Rest dieses Kapitels also sorglos übergehen. Umfassendere Dokumentationen finden sich bei OESTERREICH 1998, HITZ und KAPPEL 1999 oder BOOCH et al. 1999. Zur Lektüre der gesamten Spezifikation von UML sei auf die OBJECT MANAGEMENT GROUP 2003 verwiesen, wo man auch feststellen wird, dass die seit 1998 angesehene UML weit über die in dieser Arbeit angewendeten Klassendiagramme hinaus geht.

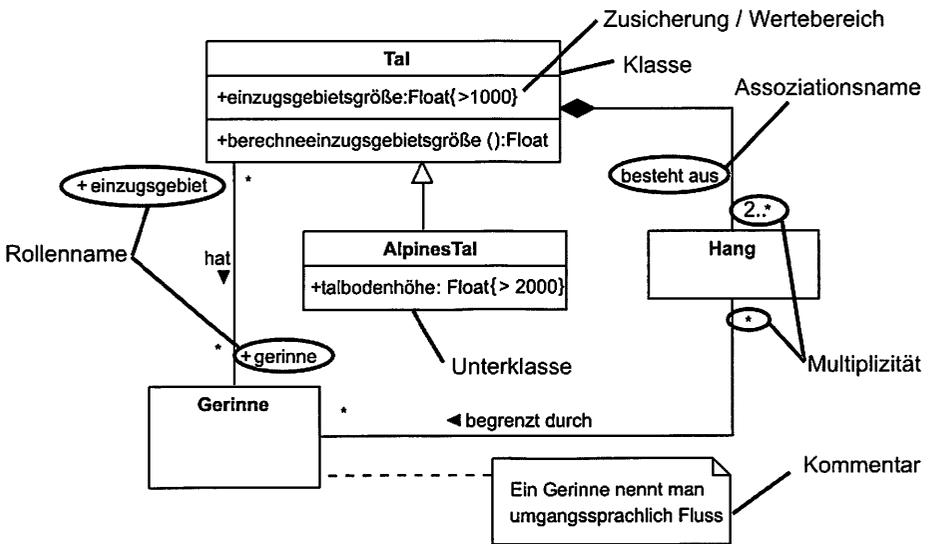


Abb. 2.1 Beispiel einer UML-Modellierung. Dargestellt sind ausschließlich Klassen, die Eigenschaften ihrer Objekte definieren, nicht aber reale Instanzen.

Das grundlegende Konzept einer semantischen Modellierung ist das der *Klasse* und das des *Objektes*. Ein Tal (vgl. Abbildung 2.1) kann allgemein durch eine Klasse repräsentiert werden, der gewisse Eigenschaften in Form von *Attributen* zugesprochen werden, wobei letztere in UML generell klein geschrieben werden. Diese Eigenschaften sind der Klasse dabei zunächst nur konzeptionell zugeordnet, wozu auch die Festlegung des *Typs* gehört. Eine Klasse *Tal* hat z. B. immer eine *einzugsgebietsgröße* vom Typ *Float*, also eine Zahl, die Nachkommastellen haben kann. Welche Werte diese Attribute annehmen, ist in der Konzeption der Klasse nicht festgelegt, sondern wird erst durch die Objekte, reale Instanzen des Konzeptes, gesetzt. Das *Turtmantal* in der Schweiz ist eine solche Instanz der Klasse *Tal*, ein Objekt mit realen Werten für die Größe des Einzugsgebietes (vgl. BOOCH et al. 1999 aber auch RAPER und LIVINGSTONE 1995). Auf der Ebene der Klasse können aber sehr wohl *Zusicherungen* oder auch *Wertebereiche* für die Attribute definiert werden. So mag es sinnvoll erscheinen eine Hohlform erst als Tal anzusprechen, wenn seine Einzugsgebietsgröße größer als 1000 ist. Die Festlegung einer solchen Zusicherung ist damit eine definitorische Aussage (vgl. REIMER 1991), da sie ein Kriterium der Entscheidung ist, ob eine Form ein Tal oder aber eine andere Form, etwa eine Mulde ist.

Aus Sicht der Geoinformationswissenschaft ist es nun sinnvoll dafür zu sorgen, dass die Klasse *Tal* die Einzugsgebietsgröße auch berechnen kann. Dem *Tal* wird also eine *Methode berechneEinzugsgebietsgröße() : Float* hinzugefügt, die dies tut und den Wert als für das entsprechende Attribut notwendigen Typ zur Verfügung stellt. Die Definition einer Methode auf der Ebene des Klassendiagramms gibt dabei aber nur die grundsätzlichen Voraussetzungen in Bezug auf beteiligte Objekte, nicht aber die konkrete Realisierung dieser Methode vor. Dies fällt in den Aufgabenbereich der Implementierung und gehört damit nicht zu einer semantischen Modellierung.

Klassen können durch *Assoziationen* zu anderen Klassen in Beziehung gesetzt werden. Dabei unterscheidet man zwischen einer allgemeinen *Assoziation*, einer Bestandteilbeziehung oder auch *Aggregation* und einer existenzabhängigen Bestandteilbeziehung, der *Komposition*, die im UML-Diagramm durch einen Strich, eine Raute bzw. eine gefüllte Raute notiert werden (vgl. Abbildung 2.2). Existenzabhängige Aggregation können in der Geomorphologie im Kontext der Skalenabhängigkeit verstanden werden. Mit ihr lässt sich beispielsweise der Umstand modellieren, dass eine kleinere Form einer größeren aufsitzt und zwingend zerstört wird, wenn die Größere zerstört wird (vgl. Kapitel 2.2.1). Einfache Assoziationen können entweder graphisch mit einem Assoziationspfeil oder aber auch als Attributnotation innerhalb der Klasse erfolgen. Letzteres kann die Darstellung übersichtlicher machen, ist zum Ausdruck inhaltlicher Zusammenhänge aber nicht immer illustrativ. Im obigen Beispiel hat der Hang eine Assoziation mit einer Klasse *Gerinne*, wobei die Leserichtung des *Assoziationsnamens*, in diesem Fall *hat*, durch die Pfeilrichtung angegeben wird. Zusätzlich werden an den Assoziationen die *Rollennamen* der Klassen und die *Multiplizitäten* notiert. Auf jeder Seite der Assoziation können Rollennamen vergeben werden, müssen es aber nicht. Sie beschreiben, welche Rolle die jeweiligen Objekte in der assoziativen Beziehung ein-

nehmen. Ein Tal nimmt für das Gerinne die Rolle des Einzugsgebietes wahr. Multiplizitäten geben an, wie viele Objekte der Klasse mit denen der anderen assoziiert sein können. Hier kann ein Tal also Null, ein oder mehrere Gerinne haben, das jeweilige Gerinne aber gehört genau einem oder mehreren Objekten der Klasse Tal an. Weiter setzt sich ein Tal aus zwei oder mehreren Objekten der Klasse Hang zusammen. Die Art der Assoziation ist hier eine *Komposition*, also eine existenzabhängige Aggregation. Wird das Tal durch kataklystische Ereignisse zerstört, werden auch die Hänge des Tales zerstört. Diese Notation ist deshalb wichtig, weil eben auch in einem Geoinformationssystem dafür gesorgt werden muss, dass die entsprechenden Hangobjekte zerstört, also gelöscht werden, um Inkonsistenzen in der Datenhaltung zu vermeiden.

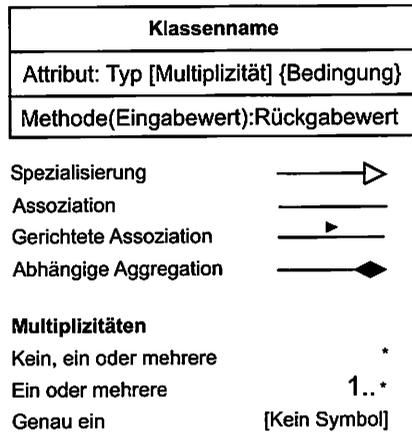


Abb. 2.2 Legende der verwendeten UML-Symbole

Die objektorientierte Modellierung bedient sich des Konzeptes der *Vererbung*, durch das Klassenkonzepte weiter spezialisiert werden können. Eine Klasse Tal kann so also in die Klasse AlpinesTal spezialisiert werden, das sich bzgl. der Höhe des Talbodens von allgemeinen Tälern unterscheiden mag. Dabei übernimmt die *Unterklasse* alle Attribute und Methoden der *Oberklasse*. Die Vererbung bezieht sich auch auf die Assoziationen der Oberklasse. Ein AlpinesTal hat also ebenso eine Assoziation zu einem Gerinne, wie die Klasse Tal. Die Spezialisierung erfolgt nun durch die Definition zusätzlicher Attribute in der Unterklasse. Durch eine Vererbung können auch Methoden der Oberklasse genauer spezifiziert werden, was in der Sprache der objektorientierten Anwendungsprogrammierung auch *Überladen* genannt wird.

Ein weiterer wichtiger Teil in der Spezifizierung von UML sind die *Kommentare*, die mittels einer gestrichelten Linie an das zu kommentierende Objekt gehängt werden (vgl. Abbildung 2.1). Kommentare bieten neben verbalen Erläuterungen auch Ausdrücken der Object Constraint Language (OCL) Platz. OCL wurde entwickelt um Spezifikationslücken von UML zu schließen und wendet als formale Sprache Prädikatenlogik

auf die objektorientierten Modelle an. OCL hat einen ausschließlich abfragenden Charakter, manipuliert werden können Objekte mit ihr also nicht. Jedem OCL-Ausdruck wird ein Kontext zugewiesen, eine Art Einsprungsadresse im entsprechenden UML-Diagramm, die angibt, für welches Modellelement der Ausdruck definiert ist. Navigiert wird entlang der Assoziationen, in Navigationsrichtung, ohne das Knoten, also Klassen angegeben werden. Das setzt natürlich voraus, dass die Assoziationsnamen einer Klasse in die entsprechende Richtung eindeutig sind, was eine Forderung in UML ist. OCL wird hauptsächlich angewendet, um Invarianten für Klassen, Typen sowie Vor- und Nachbedingungen für Operationen zu überwachen (HITZ und KAPPEL 1999). Nähere Einzelheiten werden wegen des mächtigen Sprachumfangs von OCL an entsprechender Stelle der Modellierung in Kapitel 3 bei der Behandlung konkreter Fälle gegeben.

2.1.4 Die geometrische Repräsentation von Geobjekten

Viele Objekte unserer Umwelt verbinden wir mit der Vorstellung, dass sie eine räumliche Ausdehnung haben. Die in der Geomorphologie betrachteten Objekte, die Landformen, sieht (AHNERT 1996) durch ihre Lage⁶, ihre Grundrissform und ihre Größe gekennzeichnet. Die Geoinformationswissenschaft hat viele Ansätze entwickelt, um räumliche Ausprägungen zu repräsentieren. Die Eigenschaften voluminöser Geobjekte verlangt dabei nach entsprechenden Lösungen, die allerdings in der Geomorphologie zurzeit noch nicht zum Einsatz kommen. An dieser Stelle soll nun der Bedarf von Geobjekten des alpinen Raumes, wie etwa auch Wänden, in Bezug auf ihre geometrische Repräsentation in einem GIS beleuchtet werden. Vorangestellt ist eine Betrachtung der Repräsentation durch Rasterdaten.

2.1.4.1 Das Raster-Konzept als gängiges Datenformat

Die am häufigsten verwendete Repräsentation des Raumes in den Geowissenschaften erfolgt durch regelmäßige Raster. Sie entsprechen einem Feldansatz (vgl. Kapitel 2.1.2.1), indem sie jedem Ort auf einer Horizontalprojektion ein Attribut der Höhe in Form einer Graphenfläche zuweisen (vgl. RIGAUX et al. 2002), wie in (2.1) gegeben. Damit stellen Raster eine Form der Tessellation, einer vollständigen und überlappungsfreien Zerlegung des euklidischen Raumes dar.

$$z = f(x, y) \tag{2.1}$$

(2.1) ist eine rechtseindeutige und im Falle eines digitalen Höhenmodells (DHM), also einer rechnergestützten Repräsentation der Geländeoberfläche, eine linkstotale Relation

⁶Diese Charakterisierung ist leider nicht eindeutig zu verstehen. Kann die Lage eines Objektes einmal absolut, das heißt als Position mittels Koordinaten definiert werden, ist auch eine Betrachtung der Lage des Objektes zu anderen Objekten möglich. Dies ist dann eine topologische Betrachtung.

(vgl. PLÜMER et al. 2002B), die jeder Koordinate genau *einen* Funktionswert zuordnet. Für die meisten Formen der Erdoberfläche kann so sicherlich die Lage und die Grundrissform als Projektion auf die Horizontalebene angegeben werden. Dies gilt nicht bei Wänden, die zum Teil überhängend sind. Abbildung 2.3 zeichnet die Limitierung der Repräsentation der Erdoberfläche durch regelmäßige Raster nach. Ein Überhang (Ab-

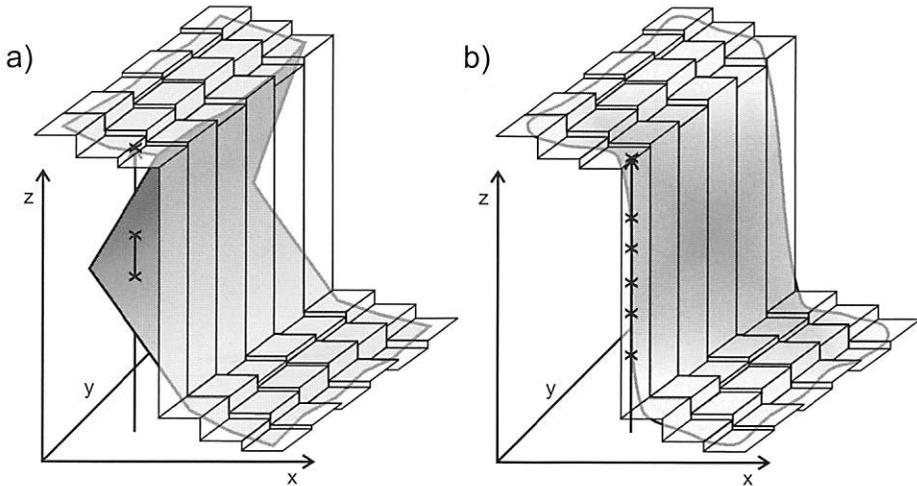


Abb. 2.3 Probleme der Repräsentation von a) Überhängen und b) senkrechten Wänden durch das Rasterformat. Während sich die repräsentierten Phänomene augenscheinlich unterscheiden, ist die Repräsentation durch ein Raster hier identisch.

bildung 2.3 a) weist an einem Ort (x, y) mindestens drei Werte der Höhe z auf, während eine senkrechte Wand (Abbildung 2.3 b) an einer Stelle theoretisch unendlich viele z -Werte annehmen kann. Beide Oberflächenphänomene sind also durch die Funktion (2.1) und damit in einem Raster nicht korrekt abzubilden. Die geometrische Repräsentation der beiden Formen wäre in diesem Falle sogar gleich!

Doch auch ohne das Auftreten von vertikalen Wänden oder Überhängen weist das Rasterformat Mängel in der Repräsentation alpiner Gebiete auf. Gerade hohe Hangneigungen sind hier wichtig. Diese wird in Rastern durch eine Nachbarschaftsanalyse im Ortsraum berechnet (vgl. DEMERS 2000), die in der Geomorphometrie oft durch ein gleitendes Fenster (engl.: *moving window*) realisiert wird (vgl. RASEMANN 2004).⁷ Diese Methode ist in den kommerziellen GIS als Standardmethode implementiert. Hangneigungswerte können in Rastern durch diese Methoden allein aus geometrischen Gründen nie Werte von 90° annehmen (vgl. EVANS 1980).

⁷Aus der digitalen Bildverarbeitung kommend wird das Verfahren der Nachbarschaftsanalyse hauptsächlich zur geometrischen Verbesserung von Grauwertbildern oder zur Kantenextraktion verwendet (vgl. HABERÄCKER 1987).

Eine Analyse der relativen Verteilung der Hangneigungen im Turtmantal auf einem 1m-Rasterdatensatz zeigt, dass der Anteil der hohen Hangneigungen scheinbar gering ist (vgl. Abbildung 2.4). Das hieße also, dass man es hier mit Bereichen untergeordneter Wichtigkeit zu tun hat.

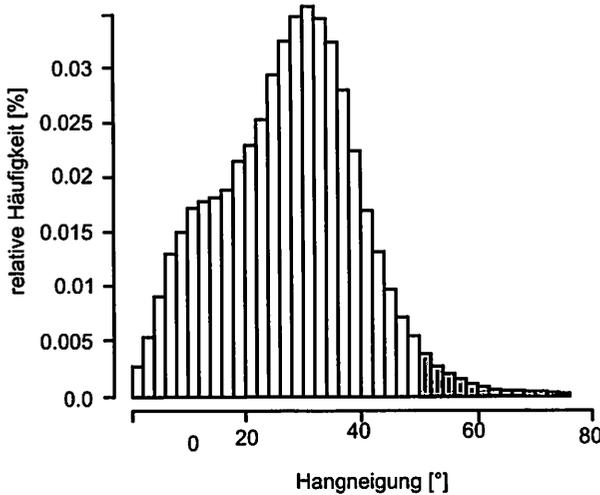


Abb. 2.4 Relative Häufigkeit der Hangneigung im Turtmantal, die aus einem Raster der Auflösung von 1m abgeleitet wurde. Deutlich zu erkennen ist, dass der Anteil der steilen Hangneigungen (>50°, hier grau dargestellt) offensichtlich keinen großen Anteil an der Gesamtfläche des Tales hat. Der Mittelwert der Hangneigung liegt bei 27,28° (verändert nach RASEMANN 2004).

Eine Analyse auf demselben Datensatz zeigt, dass Flächen mit Hangneigungen von über 45° mit nur 10% vertreten sind, obwohl der untere Bereich des Turtmantales mit dem dazugehörigen flachen Talboden nicht in die Berechnung einbezogen wurde (vgl. Tabelle 2.1). Es gilt festzuhalten, dass die in Abbildung 2.4 und Tabelle 2.1 dar-

Hangneigung	Anteil am Turtmantal (>2400 NN.) [%]
> 45°	10,1557
> 75°	0,3528
> 80°	0,084
> 89°	0,0

Tab. 2.1 Anteil ausgewählter Hangneigungsgrößen an der Gesamtfläche des Turtmantales über 2400 NN

gestellten Flächenanteile sich auf die Horizontalprojektion beziehen, nicht aber auf die wahre Oberfläche des Gebietes. Die von AHNERT 1996 angegebene wichtige Eigenschaft der Grundrissform kann also nicht unbedingt als Indikator der Wichtigkeit einer

Form gelten (s. a. Fußnote 13 auf S. 36). Die geometrische Repräsentativität durch eine auf die Horizontalebene projizierte Tessellation stellt für Wände und Überhänge ein entscheidendes Problem dar, die ein weit größeres Gebiet durch die an ihnen stattfindenden Prozesse beeinträchtigen, als ihre so ermittelte, kleine Fläche dies vermuten ließe (vgl. Abbildung 2.10).

Eine Möglichkeit, Wände und auch Überhänge mit ihrer wahren Oberfläche informatisch zu repräsentieren, bieten die Ansätze von GRÖGER und PLÜMER 2003 sowie GRÖGER und PLÜMER 2005. Sie entwickeln in Erweiterung des 2,5D-Ansatzes ein topologisch-geometrisches 2,8D-Datenmodell, das es erlaubt, Oberflächen von vertikalen Wänden und Überhängen darzustellen. Prinzip ist die Aggregation von Knoten zu Kanten, aus denen sich Flächen zusammensetzen. Dabei haben Knoten jeweils eindeutige Koordinaten und mindestens zwei inzidente Kanten. Die als gradlinig definierten Kanten haben genau zwei Endpunkte, die die einzige Verbindung von Kanten darstellt. Die Kanten sind also kreuzungsfrei und haben jeweils genau zwei angrenzende Maschen, die bei GRÖGER und PLÜMER 2003 nicht zwingend Dreiecke sein müssen. Diese Maschen werden von genau einem simplen Kantenzklus umgrenzt, d. h. zum Umfahren des Umrings muss jeder Punkt nur einmal besucht werden. Hinzu kommt, dass kein Mittelpunkt einer Kante im Inneren einer Masche liegen darf. Der Vorteil dieser Form der Oberflächenrepräsentation, das wie ein eng anliegendes Kleidungsstück über das Gelände gezogen werden kann, ist, dass eine 2D-Topologie auf sie angewendet werden kann. Eine Nachbarschaftsanalyse auf einem 2,8D-Datenmodell ist also wie auf 2D-Daten durchführbar. Henkel und Volumen dürfen dabei allerdings nicht vorkommen.

2.1.4.2 Repräsentation der Geometrie durch den ISO 19107 „Spatial Schema“

Zur Repräsentation der von AHNERT 1996 postulierten Eigenschaft der Größe einer jeden Entität der Landoberfläche muss das Volumen eines Körpers repräsentiert werden können. Hinzu kommt, dass in der hier vorliegenden Arbeit die semantische Modellierung von Geoobjekten auf Grundlage internationaler Standards durchgeführt werden soll. Daher wird zur Repräsentation der Geometrie der von der International Organization for Standardization (ISO) empfohlene Standard ISO 19107 „Spatial Schema“ verwendet. Dieser Standard ermöglicht die Modellierung 0-D bis 3-D geometrischer und topologischer Primitive, Komplexe und Aggregate (vgl. GRÖGER und KOLBE 2005), die für eine Repräsentation von Geoobjekten erforderlich sind. Die ISO 19107 ist eine abstrakte Spezifikation, die räumliche Konzepte auf Basis der UML (vgl. Kapitel 2.1.3) beschreibt. Eine konkrete Realisierung des Standards ist mit der Geography Markup Language (GML3) gegeben, die auf den weit verbreiteten Internetstandard der Extensible Markup Language (XML) zurückgreift (vgl. YERGEAU et al. 2004). Anwendungen dieses Standards sind auch am Institut für Kartographie und Geoinformation (IKG) der

Universität Bonn im Rahmen der Special Interest Group 3D der Geodateninfrastruktur des Landes NRW durchgeführt worden. Die Anwendungsmodellierung der SIG-3D zielt im Gegensatz zu der hier vorgestellten Arbeit allerdings auf die dreidimensionale, semantische Modellierung von Städten. Dennoch eignen sich diese Ansätze als Nachweis einer erfolgreichen Verwendung des „Spatial Schema“ zur Repräsentation volumenhafter Objekte (vgl. KOLBE und GRÖGER 2002; KOLBE et al. 2004 sowie GRÖGER et al. 2005).

Da die Spezifizierung des ISO 19107 zur Erstellung eines an die Erfordernisse der in dieser Arbeit vorgestellten semantischen Modells angepassten Profils in Kapitel 3.2 eingehend diskutiert wird, soll an dieser Stelle auf weitere Erläuterungen verzichtet werden.

2.2 Geomorphologische Grundlagen

γεω, μορφή, λογος— *Erde, Form, Diskurs* oder kurz Geomorphologie ist der seit den 60er Jahren des 19ten Jahrhunderts verwendete Terminus für die Wissenschaft der Gestalt der Erdoberfläche (HEMPEL 1974; HUGGET 2003). Eine Teildisziplin der Geomorphologie, die Geomorphographie, widmet sich der Beschreibung der Landform nach Geometrie, Größe und räumlicher Lage, der Erfassung ihrer materiellen Beschaffenheit (AHNERT 1996) sowie ihrer Anordnung (LESER et al. 1992A). Ihre Aufgabe innerhalb der Geomorphologie besteht darin, Reliefformen zu erkennen, die mit formenbildenden, geomorphologischen Prozessen bzw. Prozessassoziationen korrespondieren (DIKAU 1996).

Der Begriff *Reliefform* ist hierbei nicht mit *Landform* gleichzusetzen, der in seiner Bedeutung eher dem Allgemeinwissen (engl.: *common sense knowledge*) (vgl. REIMER 1991) entspringt. Reliefform enthält hingegen einen Bezug zu einem Konzept des Begriffes Relief, dessen Definition vom Anwender abhängt.⁸ Es wird also versucht, Reliefformen zu charakterisieren, anhand derer sich geomorphologische Prozesse rekonstruieren sowie rezente und zukünftige Prozesse ableiten lassen (DIKAU und SCHMIDT 1999). Die numerische Analyse dieser Reliefformen wird als Geomorphometrie oder Morphometrie bezeichnet (PIKE 1995). Die genannten Forschungsfelder beruhen auf der Erkenntnis, dass die Erdoberfläche in ihrer Gestalt durch Prozesse, die auf und an ihr stattfinden, einem ständigen Wandel unterzogen ist. Im Blickfeld der Geomorphologie stehen also neben der qualitativen und quantitativen Beschreibung der Erdoberfläche auch die physischen Abläufe, die sie verändern (MACHATSCHEK 1973). Diese Beschreibung der gegenwärtigen Beziehung zwischen formenveränderndem Prozess und

⁸Im Folgenden werden die Begriffe in dem Bedeutungsumfang der Autoren verwendet. Die Bezeichnung *Landform* entspringt allerdings eher dem englischen *landform*, wohingegen die deutsche Bezeichnung *Relief* im Englischen für ein wohl definiertes Konzept, nämlich das der Höhendifferenz eines Gebietes steht (vgl. MONTGOMERY und GREENBERG 2000).

Landformen, Gesteins- und Bodenmaterialien wird als funktionale Geomorphologie bezeichnet (AHNERT 1996).

Viele, insbesondere große, alte Landformen aber können nicht gänzlich durch die Natur und Intensität aktueller Prozesse erklärt werden. Die Entwicklung von Landformen durch Aufbereitung, Transport und Ablagerung von Oberflächenmaterial über einen längeren Zeitraum wird Geomorphogenese genannt. Sie ist durch das Klimasystem, das durch die Sonne als primäre Energiequelle angetrieben wird, Änderungen in der Intensität aber auch der Art der formenverändernden Prozesse ausgesetzt.⁹ Schumm weist in seinen Arbeiten darauf hin, dass die Reaktion von Landformen auf externe Einflüsse auch oder gar im Wesentlichen von ihrem inneren Zustand abhängt (vgl. u. a. SCHUMM 1973; SCHUMM 1979; SCHUMM 1991). Dadurch rückt er das Augenmerk verstärkt auf die Form selbst, die unter gegebenen klimatischen Verhältnissen in Abhängigkeit ihrer Ausprägung reagiert. Das Geoobjekt selbst lässt also Prozesse zu, die unter gleichen klimatischen Bedingungen aber einem anderen internen Zustand nicht oder in veränderter Ausprägung stattfinden.

Funktionale Beziehungen mit dem Ergebnis der Veränderung von Geoobjekten bestehen aber nicht nur im Wirkungsgefüge äußerer Form, inneren Zuständen und externen Energieflüssen. Auch die strukturelle Anordnung, die Nachbarschaft, der Landformen bewirkt Änderungen der benachbarten Formen, die zu einem großen Teil, aber nicht nur klimatisch angetrieben und determiniert wird. Sediment verlässt eine Landform durch einen auf sie wirkenden Prozess, akkumuliert auf einer anderen Form und verändert diese, falls es die Ausprägungen der Formen dies unter gegebenen Bedingungen zulassen. Die Masse kann auch eine neue Form bilden und tut dies auf einer größeren Form. Die Spuren dieser kaskadierenden Verlagerung von Sediment (vgl. Kapitel 2.2.3) machen die Gesamtheit des Reliefs aus, lassen sich aber auf Grund veränderter Randbedingungen vielfach nicht mehr aktiv beobachten. Zur umfassenden Erklärung der Ausprägung und räumlichen Anordnung existierender Landformen muss die Geomorphologie also auch deren historische Genese in Augenschein nehmen (SUMMERFIELD 1997).

2.2.1 Die geomorphologische Sicht auf das Relief

Der Schlüssel zur Beantwortung der erläuterten Fragestellungen liefert die Oberfläche der Erde, das *Georelief*, wobei die Begriffe Relief und Georelief im Folgenden synonym verwendet werden (vgl. RASEMANN 2004). Trotz oder gerade wegen dieser zentralen Stellung innerhalb der Geomorphologie, wird der Begriff des Georeliefs in unterschiedlichen Kontexten verwendet (DIKAU 1996). Mathematisch betrachtet stellt das Relief die kontinuierliche Oberfläche der Erde dar (DEHN et al. 2001). In der Geomorphologie wird das Georelief i. Allg. als Grenzfläche zwischen den geomorpholo-

⁹Landformen werden auch durch endogene Prozesse in ihrer Form verändert. Endogene Prozesse werden die Prozesse genannt, die durch tektonische Aktivitäten der Erdkruste ablaufen. Dazu gehören auch Erdbeben (vgl. PRESS und SIEVER 1995).

gisch relevanten äußeren Bereichen der Lithosphäre¹⁰, der Atmosphäre und der Hydrosphäre¹¹ verstanden. (vgl. DIKAU und SCHMIDT 1999; DIKAU 1996; RASEMANN 2004). In diesem Sinne kann es als zweidimensionales Gebilde, als eine Fläche im Raum gesehen werden (FRÄNZLE 1971). Viele Ansätze betrachten das Georelief aber disaggregiert und aus kleineren Einheiten zusammengesetzt. So kann es etwa als die Oberfläche eines Körpers verstanden werden, der durch die Krümmung einer Fläche im Raum entsteht (BARSCH 1969). Hierbei erhält das Relief eine dreidimensionale Ausdehnung, da ihm das Volumen zwischen einer gekrümmten Oberfläche und der diese nach unten begrenzenden Ebene zugeordnet wird.

Eine dritte Sicht versteht das Georelief als die Oberfläche eines durch den oberflächennahen Untergrund gebildeten Körpers, den KUGLER 1974 als geomorphosphärischen Komplex bezeichnet. Dieser besteht aus den Komponenten Georelief, also der Oberfläche des Körpers, dem Baustoff oder Substrat der Form sowie den Prozessen. Entscheidend ist, dass mit der Oberfläche des geomorphosphärischen Komplexes nur die Oberfläche als Teil der Grenzfläche zur Atmosphäre und Hydrosphäre, nicht aber die umhüllende Fläche eines dreidimensionalen Körpers gemeint ist. Auch ist nicht abschließend geklärt, ob Prozesse gemeint sind, die unter gegebenen Bedingungen real auf die Form wirken oder aber bei anderen Umständen auf sie wirken *könnten*. YOUNG 1978 unterstützt die Ausdehnung des Reliefbegriffes auf die dritte Dimension. Er betont, dass die Form zwar durch die Oberfläche repräsentiert wird, in sensu lato aber auch die Mächtigkeit und die Art des Regoliths dazu gehört.

In Anlehnung an den Reliefbegriff von KUGLER 1974 sieht DIKAU 1996 das Georelief in der Geomorphologie als Assoziation von Reliefeinheiten unterschiedlicher Geometrie, Topologie, Struktur und Größe, die durch den oberflächennahen Untergrund getragen werden. Die diskretisierten Reliefformen existieren dabei in speziellen Größenbereichen und sind folglich in ihrer Existenz skalenabhängig. Diese Skalenabhängigkeit impliziert, dass Formen in räumlichen Hierarchien in sich verschachtelter Reliefassoziationen organisiert sind (AHNERT 1988; DIKAU 1989; BRUNSDEN 1996). Kleinere Landformen sitzen größeren auf und überdecken sie teilweise. Diese Hierarchie ist eine fundamentale Eigenschaft aller natürlichen Systeme, wobei das Einzelne, in diesem Falle also die Landform, auch als Holon bezeichnet wird (vgl. HAIGH 1987), das durch eine Menge von Regeln mit dem Ganzen in Verbindung steht (vgl. Kapitel 2.2.2).

Nach BARSCH 1978 und KUGLER 1974 unterscheidet DIKAU 1989 Größentypen der Landformen vom Piko- bis zum Megarelief. Hierbei weicht er allerdings von der allgemein gebräuchlichen Konvention der Benennung von Maßeinheiten ab (vgl. Abbildung

¹⁰Der Begriff Lithosphäre bezeichnet die bis in eine Tiefe von 50 - 100 km reichende Kruste und damit den oberen Bereich des Mantels der Erde (PRESS und SIEVER 1995). Für die Geomorphologie sind davon aber i. d. R. nur die ersten Dekameter interessant, im Bereich der großen Haupttäler der Alpen sicherlich auch die ersten 1000 m.

¹¹Der Begriff Hydrosphäre bezeichnet die Wasserhülle der Erde, die Meere, Binnengewässer und das Grundwasser einschließt. Ebenso zählen Eis und Schnee dazu (LESER et al. 1992A).

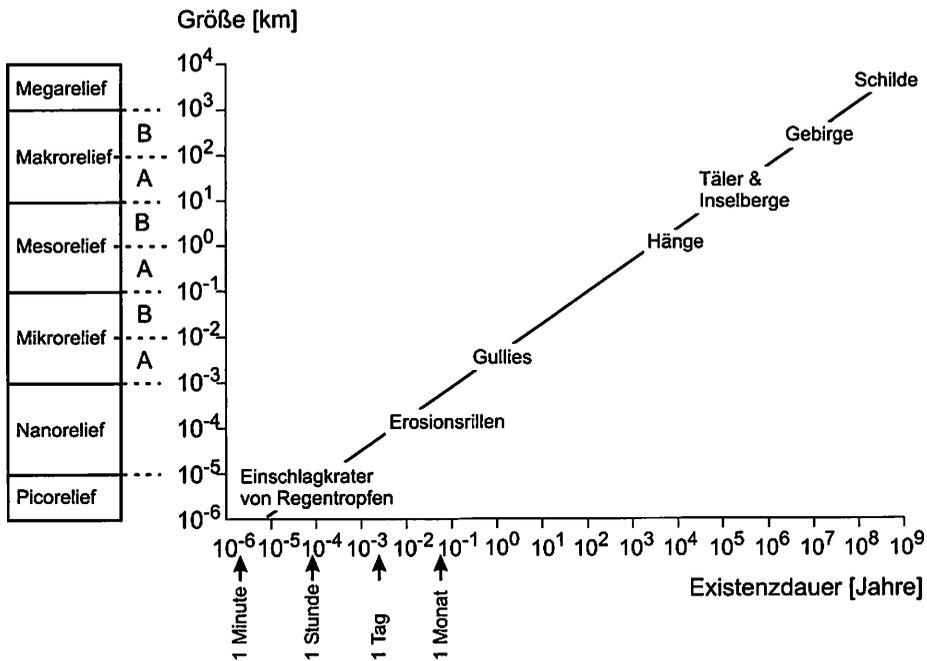


Abb. 2.5 Formengröße und Existenzdauer von Reliefformen. Normalerweise existieren große Formen länger als kleine, die allerdings häufiger auftreten. Kleinere Formen sitzen auf großen, älteren Formen auf und treten über materialbewegende Prozesse mit ihnen in Beziehung. Zeit ist also ein wesentlicher Faktor bei der Betrachtung von Geoobjekten (verändert nach DIKAU 1989 und AHNERT 1996).

2.5) und provoziert damit unnötige Missverständnisse mit den benachbarten Naturwissenschaften.¹² Wichtig aber ist, dass die Größenordnung einer Reliefform i. d. R. mit einer zeitlichen Komponente verknüpft ist. Während sehr kleine Reliefformen kurzlebig sind, existieren größere und größte über Jahrtausende hinfort, wie dies in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt ist. Das heißt also, dass kleinere Landformen häufiger neu gebildet, verändert oder ausgelöscht werden können, ohne dass die in der Raumskala übergeordneten Objekte in ihrer Existenz bedroht sein müssen. Eine Erosionsrinne kann wieder verfüllt oder zu einem Graben vergrößert werden, ohne dass der Hang, auf dem sie lokalisiert ist und mit dem sie prozessual in Beziehung steht, aufhört zu existieren. Er wird nur in seiner äußeren Form und eventuell seinen internen Zuständen modifiziert. Der Faktor Zeit ist also bei der Genese und der Existenzdauer von Landformen eine relevante Größe. Die Angabe über eine spezifische Größe der Form ist jedoch auf Grund der unterschiedlichen Ansichten über die Begrifflichkeit des Reliefs nicht ein-

¹²Größendimensionen werden von yocto (10^{-24}) bis yotta (10^{24}) in Schritten der Größe 10^3 benannt.

heitlich. So kann sowohl die Basisbreite der Form, die Fläche der Horizontalprojektion oder die wahre Oberfläche und maximale Höhe der Form für eine Angabe der Größe verwendet werden (vgl. RASEMANN 2004). Hierbei ist zu beachten, dass senkrechte Wände in ihrer auf die Horizontalfläche projizierten Ausdehnung selten in den Bereich der Mesoskala aufsteigen und damit nur Monate oder wenige Jahre bestehen dürften. Bei Verwendung des Parameters der wahren Oberfläche ist dies durchaus der Fall.¹³

2.2.2 Interaktion von Relief und geomorphologischem Prozess

Alle Landformen der Oberfläche unterliegen also in der Zeit der Veränderung durch Prozesse, die im Wesentlichen durch das Klimasystem angetrieben, deren Wirkung aber vom Geobjekt selbst modifiziert werden. Dabei bilden die Verwitterung, die Erosion, also die Aufnahme und der Transport von verwittertem Material, und die Akkumulation von zuvor erodiertem Material die drei zu unterscheidenden Hauptgruppen der Veränderung. Während die Verwitterung ein interner, die äußere Form nicht verändernder Prozess ist, führen die beiden anderen Gruppen durch Massentransport Veränderungen der Landoberfläche herbei. Für das Georelief ergeben sich in diesem Zusammenhang mindestens zwei interessante Aspekte (vgl. DEHN et al. 2001). Zum einen ist es selbst das Resultat vergangener geomorphologischer und geologischer Prozesse, der Geomorphogenese. Aktualistische Analogieschlüsse erlauben es sogar, den formenbildenden Prozess aus der Form, d. h. aus ihrer Geomorphometrie selbst zu rekonstruieren.¹⁴ Dies ist möglich, weil die Genese des Reliefs auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und funktionaler Wirkung formenbildender Prozesse bei bestimmten Randbedingungen beruht (DIKAU 1996). Innerhalb dieser funktionalen Gesichtspunkte, und das ist der zweite Aspekt, ist das Relief einer der kontrollierenden Faktoren aktueller geomorphologischer Prozesse. Dies wird deutlich in der Fließrichtung des Wassers und des damit verbundenen aquatischen Sedimenttransportes, die Funktionen des Reliefs sind (CARSON und KIRKBY 1972). Gleiches gilt insbesondere auch für die Massenbewegungen (engl.: *mass movement*), die unter unmittelbarer Einwirkung der Schwerkraft, ohne ein zusätzliches Transportmedium wie etwa Wasser stattfinden (BRUNSDEN 1984; ZEPP 2003; GLADE und DIKAU 2001). Hierbei genügt es, wenn die Scherkraft, also die Kraft, deren Richtungsvektor parallel zur Fläche wirkt, auf die

¹³ Dabei soll die Einheit der Ordinate in Abbildung 2.5 nicht weiter verwirren. Natürlich ist die korrekte Einheit einer Fläche m^2 . Aber selbst bei Verwendung der absoluten Höhe als Parameter der Größenangabe ragt das wohl berühmteste europäische Beispiel einer Wand, die Eiger Nordwand in der Schweiz mit ihren 1800 m weit in den Mesobereich hinein.

¹⁴ Das im 18. Jahrhundert von Hutton und Lyell in die Geomorphologie getragene Aktualismusprinzip (engl.: *uniformitarianism*) bezeichnet durch den Ausspruch „*the present is the key to the past*“ die Annahme, dass rezent beobachtbare Prozesse die heute existierenden Formen erklären helfen, wenn sie nur lang genug wirksam sind. Diese Theorie geht davon aus, dass zum einen die Naturgesetze zeitlich unverändert sind und zum anderen damals wie heute ähnliche formenbildende Prozesse vorherrschen (vgl. CHRISTOPHERSON 1997). Gerade der letzte Punkt stellt bei der Erklärung von Landformen häufig ein Problem dar (vgl. SEMMEL 1993A).

die Kraft selbst wirkt, die haltenden Kräfte übersteigt. Die haltende Kraft ist die Druckkraft, die sich aus der Masse des aufliegenden Körpers und der Schwerebeschleunigung ergibt. Beide Kräfte werden, auf die Fläche bezogen, als Scherspannung τ und Druckspannung σ bezeichnet. Vereinfacht ausgedrückt genügt es hierbei, wenn die in Abbildung 2.6 dargestellte Scherspannung in Abhängigkeit der Hangneigung α die Druckspannung übersteigt.¹⁵ Das Auftreten von Steinschlag aus einer Felswand ist also nicht

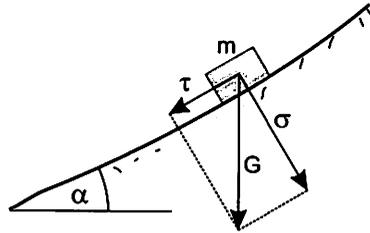


Abb. 2.6 Vektorparallelogramm der Gewichtskraft und der Druck- und Scherspannung (verändert nach AHNERT 1996)

einmal zwingend an Niederschlag gebunden, sondern an eine große Hangneigung und einen internen Faktor, dem Verwitterungszustand und damit der Festigkeit des Materials (vgl. Kapitel 2.2.2.1).

Die Dichotomie des Reliefs im Prozess-Reaktionsgefüge (engl.: *process-response*) ist allerdings bei Betrachtung verschiedener Zeitskalen nicht monodirektional (SCHUMM und LICHTY 1965). Kurzfristig wirkt ein Prozess auf die Form, indem er sie durch Erosion bzw. Akkumulation verändert. Langfristig kann aber die Form den Prozess bestimmen, der auf sie wirken kann (vgl. PARSONS 1988). So wird ein Steinschlag die Wand, aus der das Geröll stammt, sowie die unter ihr befindliche Schutthalde in ihrer Oberflächenform und ihrem Volumen verändern. Langfristig aber wird die Schutthalde dazu tendieren, die Wand zu bedecken und Steinschläge unmöglich zu machen (vgl. LEHMANN 1933; BÜDEL 1970). Jedoch ist diese Rückkopplung von Prozess und Formadaption nicht in jedem Fall so eindeutig sondern in vielen Fällen, insbesondere bei zunehmender Größe des betrachteten Systems komplex (vgl. SCHUMM 1973). Dies zeigt sich auch daran, dass tendenziell kleinere, jüngere Reliefformen ältere und größere überlagern können (CHORLEY et al. 1984). Letztere sind dann ggf. nur noch im Paläorelief nach DIKAU 1998, der ehemaligen Oberfläche zu rekonstruieren.

Der in Kapitel 2.2.1 diskutierte Reliefbegriff in der Definition eines geomorphosphärischen Komplexes nach KUGLER 1974 bestimmt also neben den mittel- und langfristigen Klimagegebenheiten eines Raumes die Prozesse, die in einem Raum stattfinden.

¹⁵ AHNERT 1996 verwendet in seiner Abbildung die Einheit g , die in der Physik allerdings die Schwerebeschleunigung mit der Einheit m/s^2 bezeichnet. Die Gewichtskraft als Produkt der Schwerebeschleunigung g und der Masse m eines Körpers wird mit G bezeichnet.

Damit bilden Relief und Prozess sog. Prozessdomänen (engl.: *prozess domain*)¹⁶, die mit der ökologischen Nische vergleichbar sind (THORNES 1989). Hierbei sind freilich nur die hauptsächlich formenbildenden oder formenverändernden Prozesse gemeint, nicht die eventuell stattfindenden Einzelprozesse (MÄUSBACHER 1985). In Erweiterung zu BARSCH und LIEDTKE 1980, die die Prozessdomäne als Raum eines bestimmten formenbildenden Prozesses sehen, betonen OTTO und DIKAU 2004 die Geomorphogenese eines Raumes in der Zeit. Sie sehen in einer Prozessdomäne also auch die in der Ausprägung des Reliefs dokumentierten vergangenen Prozesse. Das Konzept der Prozessdomäne vereint damit das im Raum ausgedehnte Relief sowie den Prozess in der Zeit und kann als hierarchisch übergeordnete Klassifizierung von Gebieten ähnlicher interner und externer Randbedingungen gesehen werden.

2.2.2.1 Die Prozesssysteme von Wänden und steilen Hangbereichen

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in der Betrachtung besonderer Stellen des alpinen Reliefs und damit auf Wänden und steilen Hangbereichen. Die initiale Bildung von Wänden ist einerseits der Tektonik, also der Bewegung der Erdoberfläche bei der Bildung von Steilstufen (engl.: *scar*) zuzuschreiben (BLOOM 1998). Andererseits entstehen Wände und steile Hangbereiche im Hochgebirge durch Tiefenerosion der Gletscher während der letzten Kaltzeiten oder rezenter Vergletscherung (vgl. RAPP 1960A). Dabei stellen sie neben Karen und Hörnern, die auch Karlinge genannt werden¹⁷, ein entscheidendes Charakteristikum des alpinen Raumes und, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung desselben, den Nachweis vergangener glazialer Prozesse dar (vgl. BARSCH und CAINE 1984; EVANS 1997).

Felswände unterliegen wie alle Landformen der Oberfläche der Verwitterung und Erosion. Das Festgestein erfährt dabei zunächst eine Zergliederung durch Klüfte¹⁸, die infolge der Druckentlastung durch zuvor erodiertes Material parallel zur Landoberfläche entstehen (AHNERT 1996). Druckentlastungsklüfte bewirken den Prozess der Exfoliation oder Grobabschuppung sowie des Blockzerfalls und können gar zu explosionsartigen Felszerreibungen führen (HUGGET 2003). Diese Prozesse laufen unabhängig von anderen Erosionsprozessen ab (SCHUMM und CHORLEY 1966), bilden aber die Leitlinien des Wassers und damit Hauptangriffspunkte der physikalischen und der hier nicht näher betrachteten chemischen Verwitterung.¹⁹ Damit sind Klüfte für die Entstehung und Entwicklung von Felswänden nicht zu unterschätzen (vgl. KIMBER et al. 2002).

¹⁶Die Prozessdomäne ist in keinem Fall mit dem Begriff *Domäne* des geometrischen Konzeptes der auf ISO 19107 basierenden Definition der Geography Markup Language (GML) zu verwechseln (vgl. Kapitel 3.2).

¹⁷Der im europäischen Kontext wohl berühmteste Karling ist das Matterhorn in der Schweiz.

¹⁸Diaklase, Lithoklase, Riss oder Fuge sind hierzu synonym (vgl. LESER et al. 1992A).

¹⁹Obwohl die Lösungsverwitterung etwa für die Hälfte des Sedimentaustrages in alpinen Systemen verantwortlich ist (BARSCH und CAINE 1984), ist sie eher im Karst (HUGGET 2003) oder an marinen Steilküsten formengebend wirksam (PANZER 1949), nicht aber im hier betrachteten Raum.

Die physische Verwitterung, insbesondere die Frostsprengung ist hierbei in alpinen und periglazialen Regionen der wichtigste geomorphologische Prozess (CHURCH et al. 1979; DOUGLAS 1980; SASS und WOLLNY 2001) und häufiger Auslöser für Felsstürze (LUCKMAN 1976). Das Wasser, das selbst in die kleinsten Klüfte des Gesteins vordringt, erfährt beim Gefrieren eine Volumenzunahme von ca. 9% und kann bei -22°C einen Druck von etwa $210 \text{ Pa} \cdot 10^6$ entwickeln (vgl. LOUIS und FISCHER 1979).²⁰ Ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit des Frostsprengungsprozesses ist die in alpinen Regionen große Anzahl von Frostwechseln (vgl. DOUGLAS 1980). Im Tagesgang dringt der Frost dabei wenige Zentimeter bis Dezimeter, im jahreszeitlichen Wechsel bis zu Metern in das Gestein ein (vgl. CAINE 1974; HAEBERLI et al. 1997). Selbst im Laufe eines Tages kann es durch etwa bewölkungsbedingter Abschattung zu mehreren Frostwechseln an Wänden kommen (MORTENSEN 1960). Die optimale Kluftbildung vollzieht sich nach HAEBERLI et al. 1997 dabei im Temperaturintervall von -3°C – -6°C . DOUGLAS et al. 1980 und SASS 1998 weisen allerdings auch auf die lithologischen Eigenschaften der Felswand hin, die in ihrer Ausprägung von Diskontinuitäten, wie etwa Mikroklüften, Schichtungs- und Scherungsflächen einen wesentlichen Anteil an der Wirksamkeit der Frostsprengung haben. Die Form selbst und ihre innere Struktur modifizieren also auch hier die Wirksamkeit und Ausprägung des Prozesses.

Neben der Frostsprengung wirkt auch die Insulationsverwitterung durch Wechsel von Sonneneinstrahlung und Abschattung auf die Festigkeit des Gesteins ein (CAINE 1974). Der Effekt der Verwitterung durch Temperaturunterschiede kommt dabei durch den unterschiedlichen Temperatur-Ausdehnungskoeffizient verschiedener Minerale zustande (vgl. LOUIS und FISCHER 1979). Da Fels ein schlechter Wärmeleiter ist, kann ihn schon ein Temperaturgradient von $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ zerreißen (HALL und HALL 1991).²¹ Durch die Zunahme der kurzwelligigen Globalstrahlung mit der Höhe (vgl. FLIRI 1975; SCHROTT 1991) wirkt dieser Prozess in alpinen Regionen stärker als in den Tiefebeneben. Die Insulationsverwitterung dringt im Vergleich zur Frostsprengung aber nur sehr oberflächlich ein und ist hauptsächlich für die Produktion feinkörnigen Grusses verantwortlich (STÄBLEIN 1983).

Nach der Verwitterung oder Aufbereitung des Gesteinsmaterials unterliegt es der Erosion. Dabei ist die Hangneigung der entscheidende Faktor für die Art des Weitertransportes. Ist sie gering, wird ein Transportmedium (Agens) in Form von Wasser, Schnee oder Eis benötigt. Die wichtigste Prozessgruppe von Wänden und steilen Hangbereichen ist jedoch die der gravitativen Massenbewegungen, die sich im Wesentlichen in Fallen (engl.: *fall*), Kippen (engl.: *topple*) Kriechen (engl.: *creep*) und Fließen (engl.: *flow*) unterteilen lassen. Weitere Unterteilungen sind auf Grund der Größe des bewegten Volumens und der Geschwindigkeit möglich (vgl.: RAPP 1960B; RIB und LIANG

²⁰Dabei entspricht der Wert von einem Pascal als SI-Einheit für den Druck genau einem Newton pro Quadratmeter ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$).

²¹Dies ist allerdings nicht unumstritten. So weisen PRESS und SIEVER 1995 auf Laborversuche hin, in denen die allgemeine Wirkung der Temperaturverwitterung nicht nachgewiesen werden konnte. Ähnlich kritisch äußern sich LOUIS und FISCHER 1979.

1978; VARNES 1978; FLAGEOLLET 1993). Der Prozess des Fallens wird hier für Wände, die so steil sind, dass sich lösendes Verwitterungsmaterial nicht in situ verbleiben kann (vgl. RASEMANN 2004), als besonders wichtig angesehen. Dazu gehört der Steinschlag (engl.: *rockfall*), der einzeln oder auch in großer Zahl erfolgen kann (CARSON und KIRKBY 1972). Eine Kategorisierung nach der Größe des bewegten Materials gibt WHALLEY 1974 (vgl. Tabelle 2.2). LESER et al. 1992A und LESER et al. 1992B

Typ	Volumen	Bemerkungen
Debris Fall	< 10 m ³	
Boulder Fall	10-100 m ³	normalerweise nur einige größere Blöcke
Block Fall	>100 m ³	mögliche Zerkleinerung der Blöcke nach Aufschlag
Cliff Fall	10 ⁴ -10 ⁶ m ³	
Bergsturz	>10 ⁶ m ³	Fall, Slide oder Lawine, die bedeutende Distanz zurücklegen kann

Tab. 2.2 Klassifikation von Fallprozessen nach WHALLEY 1974

unterscheiden zwischen Steinschlag, Felssturz und Bergsturz mit jeweils zunehmender Größe. Die Steinlawine bezeichnen sie als „großen Steinschlag“, womit sie das Fallen von Steinen und Blöcken in großer Anzahl meinen. Damit stellt die Steinlawine in der Wissensrepräsentation ein Massenkonzent dar, das sich dadurch auszeichnet, dass es nicht zählbar ist (vgl. REIMER 1991). Dass die Größe der bewegten Masse ein sinnvolles Kriterium zur Klassifizierung ist, zeigt das von WOLMAN und MILLER 1960 in die Geomorphologie getragene Frequenz-Magnituden Prinzip. Danach erfolgen kleinere Ereignisse häufiger als größere. Dies ist auch für Felsstürze zutreffend, wie es u. a. GARDNER 1983, DOUGLAS 1980 und WHALLEY 1974 zeigen.

HUTCHINSON 1988 unterscheidet nach Art des Herkunftsmaterials in primären Fall, bei frisch aus der Wand heraus gelöstem und in sekundären Fall bei losem, zuvor schon transportiertem und zwischengespeichertem Material. Diese Unterscheidung ist für die Betrachtung des sich kaskadierend bewegenden Sedimentes sicherlich wesentlicher (vgl. Kapitel 2.2.3). Dabei spielen die in der Wand vorhandenen Leisten (vgl. Abbildung 2.11 auf S. 48) eine große Rolle bei der Zwischenspeicherung des Wandmaterials über einen gewissen Zeitraum (CAINE 1974). Als Auslöser (engl.: *trigger*) von primären und sekundären Fallprozessen sind neben der Frostsprengung vor allem Starkniederschläge und Erdbeben zu nennen (vgl. BURBANK und ANDERSON 2001; RAPP 1960B). Hierbei ist insbesondere die zeitliche Variabilität der auslösenden Faktoren interessant. Während Erdbeben keinem saisonalen Verlauf folgen, ist Frostsprengung im alpinen Raum vom Herbst bis zum Frühsommer dominierend. Starkniederschläge für den Transport des zuvor auf Leisten zwischengespeicherten Materials hingegen häufen sich im Spätsommer (vgl. KELLER und MOSER 2002).

Das durch den Prozess des Fallens oder auch Stürzens aus der Wand und der ihr aufsitzenden Leisten transportierte Material lagert sich unterhalb der Wände als Schutthalde

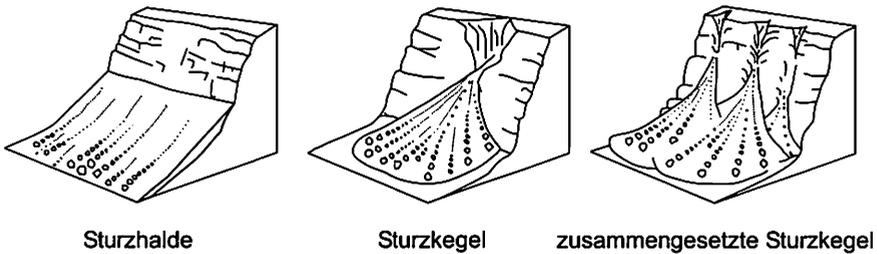


Abb. 2.7 Drei Typen von Schutthalden (BALLANTYNE und HARRIS 1994)

(engl.: *talus* oder *debris slope*) ab (vgl. BECHT 1995). Der Begriff Schutthalde ist dabei zunächst völlig frei von einer genetischen Interpretation (DÜRR 1970), durch die Zufuhr aus einer oberhalb gelegenen Wand hier aber mit dem Sturzprozess in Verbindung zu bringen. In Abhängigkeit der Schutzzufuhr als Folge der Form der liefernden Wand können sich dabei im Wesentlichen drei Arten von Schutthalden bilden (vgl. BALLANTYNE und HARRIS 1994). Bei ungliederten Wänden entstehen horizontal gestreckte Schutthalden (engl.: *talus sheet*). Erfolgt die Schutzzufuhr linear aus Konkavitäten, den sog. Steinschlagrinnen (vgl. RASEMANN 2004) entstehen in der Horizontalen konvexe Schuttkegel (engl.: *talus cone*). Durch das Zusammenwachsen einzelner Schuttkegel können zusammengesetzte Schuttkegel (engl.: *coalescing talus cone*) entstehen (vgl. Abbildung 2.7). Die Form des exponierten Objektes, der Wand, ist also ausschlaggebend für die geometrische Form des erodierten Materials und der dadurch aufgebauten Akkumulationsform. Die Richtung des Prozesses wird durch die Schwerkraft festgelegt.

Aus Sicht der Geomorphometrie ist wichtig, dass Schutthalden als Akkumulationsform häufig ein zweigeteiltes Profil aufweisen, das sich aus einem gestreckten oberen Bereich und einer basalen Konkavität auszeichnet. Letztere nimmt mit geringer werdender Wandhöhe als Liefergebiet der Halde ab (vgl. DÜRR 1970; STRATHAM 1976; FRANCOU und MANTÉ 1990). Bei der Frage nach einem typischen Hangneigungswinkel herrscht in der Literatur wenig Übereinstimmung. Während STRATHAM 1976 bei Sturzthalden von einer Maximalneigung von 38° ausgeht, finden sich auch weit höhere Werte, ohne allerdings dass der explizite Prozess zur Bildung der Hänge benannt wird (vgl. Abbildung 2.8). CAINE 1974 nennt die drei Hangneigungsintervalle $37 - 40^\circ$ für Blocksturzthalden, $30 - 40^\circ$ für aluviale Schutthalden und $3 - 30^\circ$ für Lawinalthalden. Diese Angaben können aber nur für Schutthalden gelten, die sich im Gleichgewichtszustand befinden. Das heißt, dass sie durch sekundäre Prozesse auf der Schutthalde die Schutzzufuhr aus der Wand dergestalt ausgleichen können, dass sich ihre Hangneigung der von der Größe des Substrates abhängigen Maximalneigung anpassen kann. Werden diese Hänge durch Prozesse anderer Objekte, etwa einem angrenzenden Gerinne unter-schnitten und damit übersteilt, wie dies für die in Abbildung 2.8 (B) gemessenen Hang-

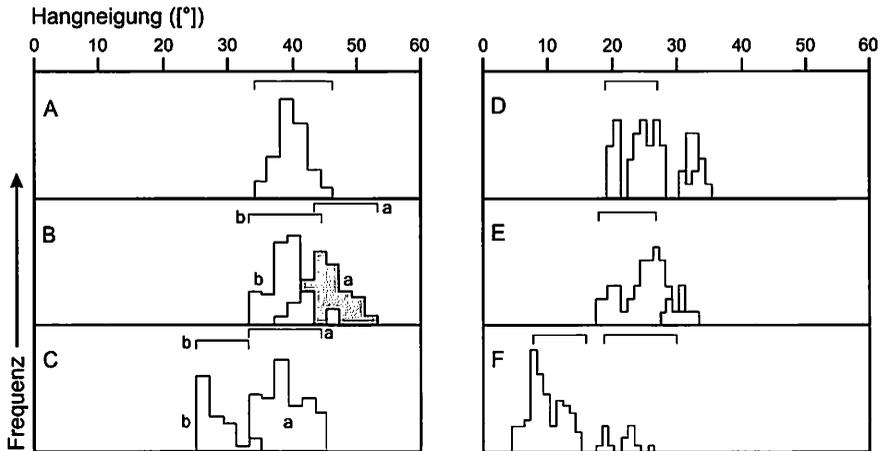


Abb. 2.8 Frequenz der Hangneigungsverteilung gestreckter Hänge aus sechs verschiedenen Regionen zur Verdeutlichung der maximalen Hangneigung von Schutthalden. A: Schieferhänge, Mesa Verde, Colorado, USA. B: Unterschnittene (a) und geschützte Hänge, Verdugo Hills, Kalifornien, USA. C: Hänge aus Queenstown Schiefer mit (a) schutthaltigem und (b) tonhaltigem Regolith. D: Hänge in Sandstein, Penninen und Exmoor, GB. E: Hänge in den Laramie Mountains, Wyoming, USA (weißes Histogramm zeigt trockene Schutthänge). F: Hänge in tonigem Schiefer, Debyshire, GB. Die maximalen Hangneigungen sind durch die horizontalen Klammern dargestellt (nach CARSON 1976).

neigungen der Fall ist, gelten sie nicht. CARSON und KIRKBY 1972 sowie COOKE und REEVES 1972 finden überdies einen Zusammenhang zwischen typischen Hangneigungen und dem Material der Schutthalden (vgl. Tabelle 2.3). Dieses ist wiederum von den Prozessen und innerhalb des Sturzprozesses von der Struktur der liefernden Wände abhängig.

Nach der Akkumulation des Gerölls auf der Schutthalde unterliegt es weiteren Transportprozessen, die hier kurz angesprochen werden sollen. Bei zunehmender Akkumulation durch die oberhalb gelegene Wand wird die Halde steiler, wobei die Standfestigkeit antiproportional zur Hangneigung abnimmt (PANIZZA 1996). In einem gravitativen Prozessresponssystem wird diese überschrittene kritische Hangneigung durch Schuttrutschungen ganzer Haldenteile oder einzelner Blöcke ausgeglichen (vgl. AHNERT 1996). Schuttrutschungen oder der Weitertransport einzelner Blöcke können also, wie das Fallen auch, ohne ein externes Transportmedium vonstatten gehen und sind nur von Eigenschaften des Objektes, in diesem Fall der Hangneigung, der Korngrößenzusammensetzung und Lagerungsdichte der Halde abhängig.

Auch Muren (engl.: *debris flow*)²², die ebenfalls den gravitativen Massenbewegun-

²²Muren werden in der medialen Welt auch gerne Schlammlawinen genannt.

Hangneigung [°]	Hangmaterial
43 – 45	Felsblockmaterial, augenscheinlich kohäsionslos aber mit hoher Lagerungsdichte
33 – 38	Material wie oben aber mit geringerer Lagerungsdichte
25 – 28	Aluviale Hänge (stark gemischte Korngröße), in denen ein hoher Porenwasserdruck herrschen kann
19 – 21	Sandiges Material
8 – 11	Tone

Tab. 2.3 Typische maximale Hangneigung von verfestigtem Material nach CARSON und KIRKBY 1972

gen zugeschrieben werden (vgl. COROMINAS et al. 1996), sorgen für einen Weitertransport des Haldenmaterials. Voraussetzung für Muren sind neben einem großen Gefälle eine umfangreiche Akkumulation von Schutt mit einem hinreichenden Anteil von Feinmaterial sowie ein starkes Niederschlagsereignis. Dieses muss ausreichen, um die Porenräume der Schuttakkumulation zu füllen und einen positiven Porenwasserdruck zu erzeugen, bevor das infiltrierende Wasser subkutan abfließen kann. Die so in ihrer Scherfestigkeit verringerte Masse fließt in Hangneigungsrichtung und baut durch den seitlichen Ausfluss von Wasser und der damit wieder eintretenden Scherfestigkeit Murendämme oder Leves auf. Wiederholte Murabgänge führen zu der Akkumulationsform des Murkegels mit der charakteristischen Hangneigung von etwa 8 – 12° (vgl. AHNERT 1996). Das Auftreten von Muren ist neben dem externen Ereignis des Starkniederschlags also auch vom internen Zustand des betroffenen Geoobjektes in Form der Hangneigung und der Materialzusammensetzung abhängig. Ein vergleichbarer Niederschlag würde auf Hängen mit feinem Bodenmaterial nicht zu Muren sondern zu Rinnenspülung oder Grabenreissen führen (vgl. PÉCSI und RICHTER 1996).

Auch Schneelawinen können die Hangneigung der Schutthalde entsprechend anpassen, wobei sie Gesteinsmaterial mitreißen und im unteren Teil der Halde wieder ablagern. Tritt dieses häufiger auf, wird das Längsprofil der Halde im Übrigen konkav (vgl. CAINE 1969; EMBLETON 1979). Lawinen folgen dabei im oberen Teil präexistierenden Hohlformen, den sog. Lawinengraben, die sie durch denudative, also abtragende Arbeit weiter ausbilden.

Neben den oben aufgeführten gravitativen Massenbewegungen und nivalen Prozessen wirken auch hangaquatische Prozesse auf Hänge. Diese werden jedoch auch bei geringeren Hangneigungen wirksam, als sie bei Objekten der hier im Fokus stehenden alpinen Wände von besonderem Interesse wären. So kann durch Niederschlags- oder Schmelzwasser Feinmaterial von Schutthalden ausgewaschen werden (COOKE und REEVES 1972) oder lockeres Material beim Entstehen von Oberflächenabfluss durch flächenhafte aquatische Denudation (engl.: *sheet wash*) oder lineare Erosion bewegt werden. Voraussetzung für die Wirksamkeit hangaquatischer Prozesse ist aber stets die Generierung von Oberflächenabfluss, der an die Überschreitung der Infiltra-

tionsrate des Substrates durch den Niederschlag gebunden ist (vgl. DEPLOEY 1990). Bei grobblockigem Material der Schutthalde ist dies weniger häufig zu erwarten, als etwa auf den als Zwischenspeicher agierenden Leisten. Hier ist die Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Korngröße des Substrates zwar ähnlich hoch, durch den oberflächennahen, felsigen Untergrund der subkutane Abfluss jedoch nur eingeschränkt wirksam. Auch inaktive Schutthalden, die Bodenbildung aufweisen, sind eher für die Generierung von Oberflächenabfluss geeignet als aktive.

2.2.3 Sedimentspeicher und das System der Sedimentkaskade

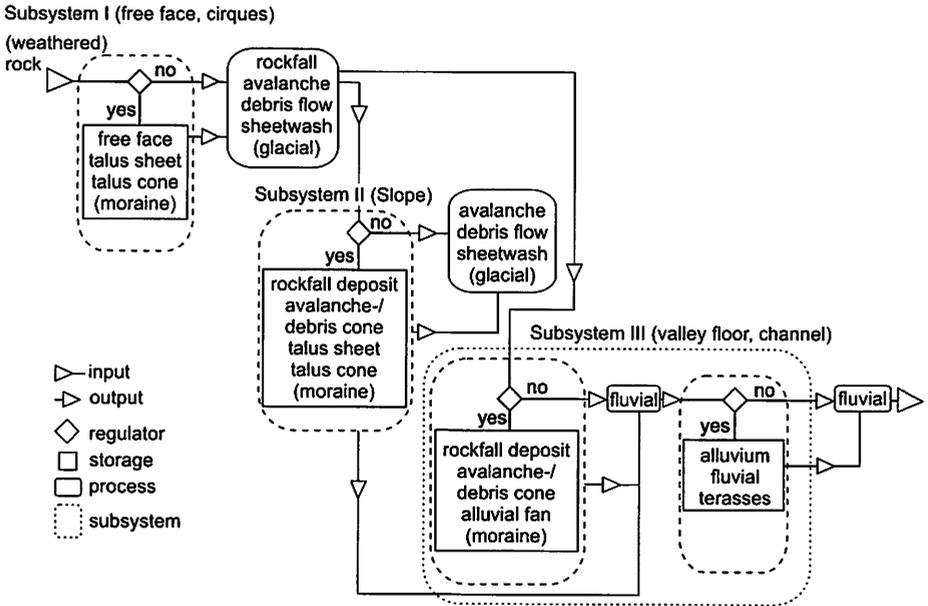


Abb. 2.9 Konzeptmodell verschiedener Speichertypen und Prozesse einer Sedimentkaskade im Reintal (aus SCHROTT et al. 2003)

Die von CHORLEY und KENNEDY 1971 in die Geomorphologie getragene Systemtheorie ist Ausgangspunkt eines weiteren Konzeptes der Geomorphologie, das der *Sedimentkaskade*. Das Konzept der Sedimentkaskade ist ein umfassenderes und abstrakteres als die Betrachtung der rein geometrischen Form. Es verbindet die durch ihre inneren Zustände gekennzeichneten Landformen mit den formenverändernden und die Geoobjekte verbindenden Prozesse, die eine Materialumlagerung bewirken. Die Aufklärung der Speicherzustände, ihrer Volumina und der Verweildauer des Sediments am Speicherort ist wesentlicher Bestandteil der geomorphologischen Forschung (vgl. CHURCH und SLAYMAKER 1989; JORDAN und SLAYMAKER 1991). Für den alpinen und peri-

glazialen Raum findet sie ihren Anfang in den Arbeiten von JÄCKLI 1957 und RAPP 1960B.

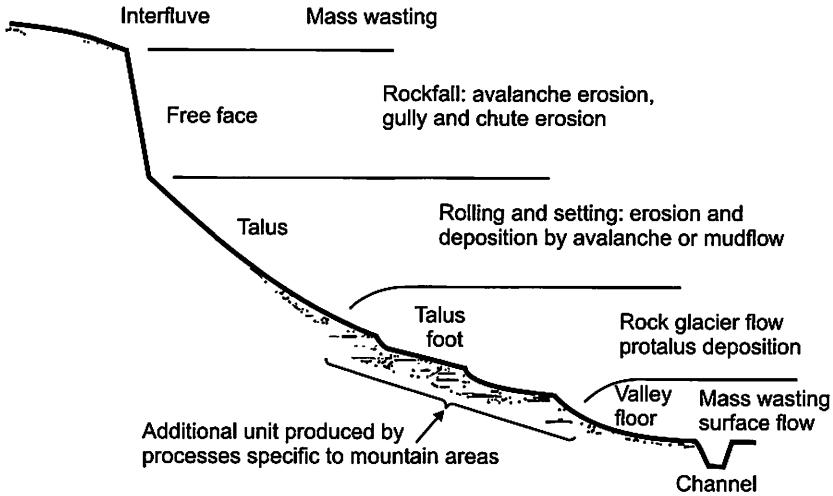


Abb. 2.10 Das alpine Hangsystem nach CAINE 1974

In der Betrachtung der Sedimentkaskade geht man davon aus, dass Sediment, also Masse in sog. Sedimentspeichern (engl.: *storage*), kurz Speicher genannt, vorhanden ist und dort in Abhängigkeit der Transportprozesse über eine gewisse Zeitdauer verweilt. Der Austrag (engl.: *output*) des einen Subsystems der Sedimentkaskade stellt den Eintrag (engl.: *input*) in das andere dar. Regulatoren, wie etwa das Relief, sorgen für eine Teilung des Eintrages in Material, das im System, dem Speicher, verbleibt und dasjenige, welches weitergeleitet wird. Kaskadensysteme können dabei in verschiedenen Skalen analysiert werden, wobei den Bereichen der mittleren Skala in der bisherigen Forschung ein übergeordnetes Interesse entgegengebracht wird (SLAYMAKER 1991). Ein konzeptionelles Modell eines Sedimentkaskadensystems für den alpinen Raum stellen SCHROTT et al. 2003 vor (vgl. Abbildung 2.9). Die hier dargestellten Subsysteme Wand/Kar (engl.: *free face/cirque*), Hang (engl.: *slope*) und Talboden/Gerinne (engl.: *valley floor/channel*) erfahren einen Sedimenteintrag durch das verwitterte Gestein. In Abhängigkeit des transportierenden Prozesses und nicht näher spezifizierten Regulatoren verbleibt es über einen gewissen Zeitraum im jeweiligen Subsystem oder wird in das nächste Subsystem der Kaskade weiter transportiert.

Die Kopplung der Sedimentspeicher erfolgt also über die in Kapitel 2.2.2 besprochenen Prozesse. Von der freien Wand (engl.: *free face*) gelangt das Sediment über die Prozesse des Fallens auf die unterhalb gelagerten Schutthalden (engl.: *talus*) und wird dann über weitere Prozesse schließlich zum Vorfluter (engl.: *channel*) und von dort über fluviale Prozesse in das Endsedimentationsbecken transportiert. Wichtig ist, dass

in Abhängigkeit der Stärke des Prozesses auch Subsysteme der betrachteten alpinen Sedimentkaskade übersprungen werden können.

Die in Abbildung 2.9 angestellte Systemanalyse stellt eine starke Vereinfachung der Realität im betrachteten System dar. Zwar werden die Prozesse, die die Subsysteme koppeln angeführt, die Speichersituation der Wand als Teil des Primärspeichers hingegen bleibt unaufgelöst. So erfährt in Subsystem I, die Wand, ebenso wie die Schutthalde einen Eintrag an Sediment durch den verwitternden Fels, ohne dass die Zwischenspeicherung in der Wand durch Bänke oder Leisten berücksichtigt wird. Auch ist die Wand als Teil des Anstehenden nicht von den Sekundärspeichern differenziert. Gleiches ist dem Modell von CAINE 1974 vorzuwerfen, der das Schema einer alpinen Sedimentkaskade bildlich illustriert (vgl. Abbildung 2.10). Auch hier werden die Prozesse nur außerhalb des für die initiale Zufuhr von Sediment wichtigen Wandsystems betrachtet.

Speicher stellen offene Systeme dar, die durch Austausch von Masse und Energie charakterisiert sind (MÜLLER 1999). In dem hierarchisch übergeordnetem Kaskadensystem, das durch Massein- und -austrag in und aus Speichern gekennzeichnet ist, treten diese durch Transportprozesse miteinander in Beziehung. Dabei gilt die Massenerhaltungsgleichung (2.2) nach (TERJUNG 1982) für die meisten Speicher in einem Geosystem. Für Speicher am oberen Rand des Kaskadensystems, wie etwa Wänden, fällt der Summand auf der rechten Seite von (2.2) weg, beim Endsedimentationsbecken der Minuent.²³

$$[\text{Akkumulationsrate}] = [\text{Rate des Masseneintrages}] - [\text{Rate des Massenaustrages}] \quad (2.2)$$

Die Akkumulationsrate kann für ein System auch als Sedimentbudget bezeichnet werden, für dessen Quantifizierung sämtliche Akkumulations- und Erosionsprozesse eines Systems betrachtet werden müssen (REID und DUNNE 1996). Die internen Sedimentumlagerungen werden durch die Sedimenttransferrate beschrieben, die das Verhältnis von mobilisierten zu tatsächlich aus dem betrachteten System ausgetragenen Material widerspiegelt (DIETRICH et al. 1982; COOKE und DOORNKAMP 1990). Das Konzept wird in der Geomorphologie durch Umstellung der in (2.2) gegebenen Gleichung genutzt, um über Messung des Sedimentaustrages auf die gesamte Erosionsleistung aller beteiligten Prozesse in einem System zu schließen (vgl. MILLIMAN und MEADE 1983; JORDAN und SLAYMAKER 1991; DEDKOV und MOZZHERIN 1996; WALLING et al. 1996). Dieser Top-down Ansatz betrachtet das untersuchte System als Integral aller dort wirkenden Prozesse. Eine differenzierte Betrachtung der Subsysteme ist damit natürlich nicht durchzuführen (vgl. LÖWNER 2000). Dies führt zu eklatanten Limitierungen dieses Ansatzes, wie eine Langzeitstudie am Coon Creek zeigt (PHILLIPS 1992; TRIMBLE 1999). Die Erkenntnis hieraus ist, dass sich der Sedimenttransport ei-

²³Die SI-Einheit für die Rate des Transportes von Masse ist kg/s . In der Geomorphologie finden sich aber oft abweichende, dem Phänomen angepasste Einheiten, die zudem auf eine Fläche bezogen werden. In der Bodenerosionsforschung ist daher die Einheit $t/ha/a$ gebräuchlich (vgl. BORK 1988; LÖWNER et al. 2005).

nes Gewässers trotz enormer Erosions- und Akkumulationsphasen des dazugehörigen Einzugsgebietes im betrachteten Zeitraum kaum ändert.

Für eine Felswand, die unterhalb einer Wasserscheide liegt, wird (2.2) also immer negativ sein, weil kein Sediment in das System eingebracht wird. Für die Nordsee als Sedimentationsbecken des Rheinsystems gilt dies genau anders herum. Das heißt jedoch nicht, dass in Wänden kein Sediment, etwa auf Bänken oder Leisten gespeichert wird. In Abhängigkeit der betrachteten Skala erscheint die gesamte Wand jedoch zunächst als Blackbox, die nur durch Sedimenttransfer aus, nicht aber durch Sedimentflüsse innerhalb des Speichers gekennzeichnet ist.

Die Systemzustände der an der Sedimentkaskade beteiligten Subsysteme sind einer zeitlichen Veränderung unterworfen (vgl. HARDISTY 1987; SLAYMAKER 1991), die sich auf ihre Regulatoren und inneren Zustände auswirken. Diese internen Zustände sind für die Wirksamkeit der materialbewegenden Prozesse ebenso entscheidend, wie die externe Energiezufuhr in Form von Niederschlag. Der interne Schwellenwert (engl.: *internal threshold*) bestimmt, wann ein Speicher auf einen äußeren, womöglich in der Zeit konstant bleibenden Einfluss reagiert (vgl. SCHUMM 1979). So kann etwa der zunehmende Verwitterungszustand einer steilen Wand plötzlich zu einer Standfestigkeitsverringerung führen, die einen Bergsturz zulässt, obwohl die Hangneigung in der Zeit konstant geblieben ist.

2.2.3.1 Die Wand am Rand der Sedimentkaskade

Als Bestandteile von Einzugsgebieten sind Hänge offene Systeme, die durch Energie- und Masseflüsse in und aus ihrer Umgebung mit dieser in Verbindung stehen (WHITE et al. 1992). Der primäre Sedimentspeicher eines alpinen Kaskadensystems stellt allgemein das unveränderte geologische Substrat, das Anstehende dar. Es verbleibt in situ, bis es einer Form der Bewegung ausgesetzt wird (HANSEN 1984). Das Anstehende ist in alpinen Tälern im Wesentlichen von Verwitterungsschutt oder bereits bewegtem Material überdeckt und somit vor Verwitterung und Erosion geschützt. Eine Ausnahme stellen Felswände dar, die verwitterungslimitiert sind (vgl. PARSONS 1988)²⁴, von denen also jedes durch Verwitterung gelöste Material durch Sturzprozesse sofort abtransportiert wird. Die Felswand ist damit ein wesentlicher, weil isolierter Bestandteil der Sedimentkaskade. Wie schon bemerkt wurde, ist die Gleichung (2.2) immer negativ, wenn die Wand als Ganzes und ohne ihre Zwischenspeicher betrachtet wird. Die Felswand als primärer Sedimentspeicher beinhaltet aber selber Zwischenspeicher, die verwittertes oder aus oberhalb gelegenen Teilen der Felsfläche transportiertes Material aufnehmen können. Dazu gehören insbesondere die Leisten (engl.: *ledge*) (vgl. CAINE

²⁴Das Prinzip der Verwitterungslimitierung ist bereits von Gilbert in die Geomorphologie getragen worden. Es besagt, dass aus einem System kein Sediment transportiert werden kann, wenn es nicht in aufbereiteter also verwitterter Form vorliegt. Diesem Konzept steht das der Transportlimitierung durch fehlende bewegende Agenten, wie etwa Wasser oder Schnee entgegen (vgl. AHNERT 1996).

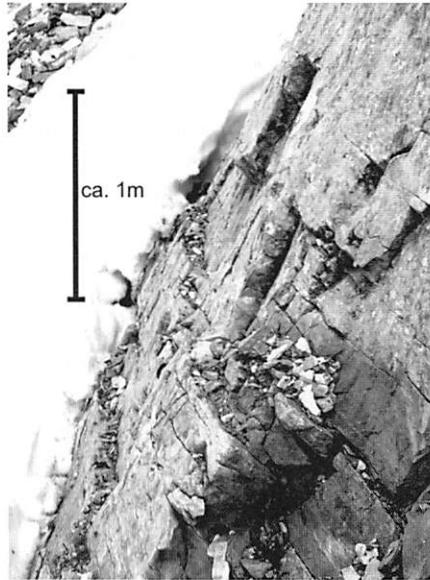


Abb. 2.11 Leiste mit aufsitzendem Sediment an der Barwang im Pipjitälli des Turtmantales. Die unterschiedliche Färbung des aufliegenden Sedimentes spricht für eine allochthone Herkunft (Aufnahme vom Juli 2004).

1974), stufenförmige Absätze, die durch differenzierte Erosion in der Wand entstehen (vgl. Abbildung 2.11). Auch können Kavitäten, die durch das Herausbrechen einzelner Gesteinsbruchstücke aus der Wand entstehen, als Zwischenspeicher von Sediment dienen. Das in diesen Zwischenspeichern befindliche Sediment kann erst durch Abbruch der unterliegenden Gesteinsplatte, ein erneut auftreffendes Geröll oder einen Starkniederschlag weiter transportiert werden. Eine weitere Speicherlokalität in der Wand sind Klüfte, die je nach der Größe ihrer Klaffung Sediment auffangen können.

Abbildung 2.12 auf Seite 49 macht das Konzept der Sedimentkaskade des Systems Wand deutlich. Der Sedimenteintrag durch das verwitterte Gestein wird über den Prozess des Steinschlages auf eine Leiste oder direkt auf die Schutthalde transportiert. Auch von Leisten kann Sediment nun entweder durch Steinschlag oder aber aquatische Spülprozesse auf Leisten oder aber auf die Halde weiter transportiert werden. Das verwitterte Ausgangsgestein kann aber nicht auf den Zwischenspeichern der Wand akkumuliert werden, wenn es durch Fels- oder Bergstürze transportiert wird. Hierbei würde ein so großes Volumen transportiert, dass die Zwischenspeicher, die der Wand aufsitzen, zerstört würden. Die Existenz einer hierarchisch niedrigeren Form ist also auch von der Reaktion und der Lebensdauer der übergeordneten Form unter gegebenen externen Einflussfaktoren abhängig. In Abbildung 2.12 wird neben der inhaltlichen Aussage auch die Limitierung der Darstellungsform sichtbar. Es kann im Sinne der

Modellierung der Landschaftsgenese weder die vollständige Zerstörung noch eine Generierung von Geoobjekten repräsentiert werden. Eine Einschränkung, die für den in dieser Arbeit verwendeten Formalismus der Unified Modelling Language (UML) nicht gilt (vgl. Kapitel 2.1.3). Auch ist die Rolle der Regulatoren so unklar, dass sich die Frage ergibt, was denn die regulierende Wirkung ausübt. Wie in der obigen Diskussion deutlich wurde, ist es im Wesentlichen das Geoobjekt mit seiner Form und seinen internen Zuständen selbst, das die Lieferung, den Transport oder die Akkumulation von Masse in Abhängigkeit der gegebenen klimatischen Bedingungen reguliert.

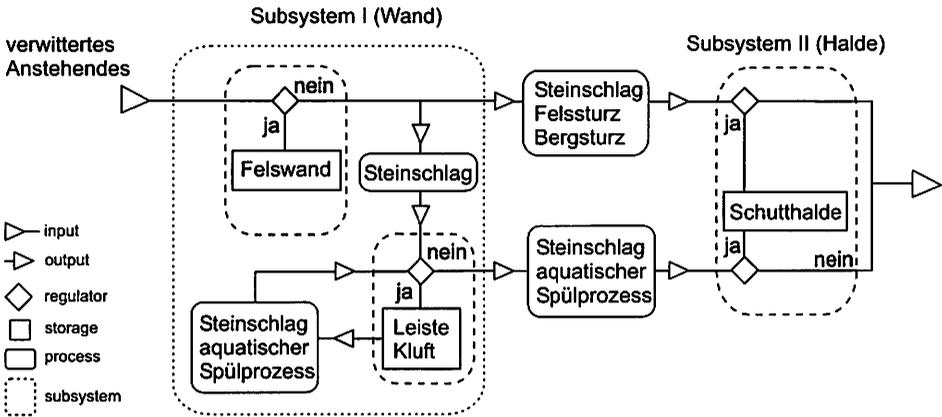


Abb. 2.12 Konzeptmodell der Sedimentkaskade einer Wand. Trotz erhöhter Detailgenauigkeit lassen sich einige Aspekte der Sedimentkaskade in dieser Darstellungsart nicht verdeutlichen.

Ein weiterer Nachteil der in der Geomorphologie gängigen Form der Modellierung von Systemen ist, dass der in Abbildung 2.9 und Abbildung 2.12 auf Seite 44 bzw. 49 verwendete Formalismus weder eine Repräsentation der Geometrie zulässt, noch eine adäquate Repräsentation der Zeit. Die Zeit wird hier nur topologisch, nicht aber metrisch dargestellt. Es ist zwar klar, dass gewisse Transportereignisse vor anderen stattfinden müssen, wie lange diese dauern, bzw. wie lange die Verweildauer des Sedimentes in einem Subsystem ist, kann nicht ausgedrückt werden. Diese Limitierungen gelten nicht für den Formalismus der UML.

Es bleibt festzuhalten, dass die Wand im alpinen Kaskadensystem sowohl ein Teil des Primärspeichers ist, als auch mit den ihr aufsitzenden Sekundärspeichern, den Leisten, Kavitäten und Klüften Sekundärspeicher beherbergt. Verlässt das Sediment die Wand, wird es in Sedimentspeichern unmittelbar an ihrem Fuße abgelagert (vgl. Kapitel 2.2.2.1). Damit verlässt es auch die Domain des dominierenden Prozesses, die Prozessdomain des Fallens.

3 Formale semantische Modellierung geomorphologischer Konzepte

Zusammenfassung

Hauptanliegen dieser Arbeit ist das Aufstellen einer formalen semantischen Modellierung als Beitrag zur Interdisziplinarität zwischen Geomorphologie und der Geoinformationswissenschaft. Dazu werden die in Kapitel 2.2 erläuterten Konzepte der Fachwissenschaft Geomorphologie unter den Prämissen der semantischen Modellierung, die in Kapitel 2.1 dargestellt sind, zu ordnen versucht. Da es zwischen Geomorphologie und Geoinformation zwar eine gewaltige Schnittmenge aber auch großes Potenzial an Missverständnissen gibt, muss dies in für beide Wissenschaftsrichtungen verständlicher Form erfolgen.

In Kapitel 3.1 wird kurz die in dem obigen Kapitel bereits diskutierte Vorgehensweise bei der Erstellung eines formalen semantischen Modells erläutert. Es wird ein normativer Ansatz der Modellierung gewählt, um die in Kapitel 2.2 skizzierten Phänomene semantisch und geometrisch zu repräsentieren. Formale Grundlage der Modellierung bildet die ISO 19109, die zur Repräsentation der geometrischen Eigenschaften von räumlich ausgedehnten Objekten die Geometrietypen der ISO 19107 als verbindlich erklärt. Kapitel 3.2 widmet sich dann einer ausgiebigen Diskussion dieser verwendeten Geometrietypen. Es wird ein Profil der in der ISO 19107 gegebenen räumlichen Konzepte vorgestellt, das, obwohl auf die Bedürfnisse der hier durchgeführten Modellierung angepasst, den Ansprüchen der Interoperabilität genügt. Für die Modellierung der Topologie wird auf implizite Forderungen der in Kapitel 3.2.2 vorgestellte Geometrieklasse `GM.Complex` zurückgegriffen, die allerdings monoton erweitert werden muss. Dies erfolgt zum besseren Verständnis an einem konkreten Beispiel in Kapitel 3.3.2.

In Kapitel 3.3 wird die semantische Modellierung von geomorphologisch definierten Objekten durchgeführt. Ausgehend von der formalen Repräsentation eines `Geoobjektes` als Oberklasse wird die Klasse des `Hanges` eingeführt. Ein `Hang` kann dabei wiederum Instanzen der Klasse `Hang` beinhalten, was der geomorphologischen Auffassung der Formenverschachtelung entspricht. Er ist als dreidimensionale Form dabei skalunabhängig. Die `Wand`, die sich zunächst rein geometrisch definiert, ist eine Ableitung des `Hanges` mit der Eigenschaft, dass sich verwittertes Material auf Grund ihrer hohen Hangneigung nicht halten kann. In Kombination mit gewissen, den `Hang` und damit die `Wand` aufbauenden Materialien, dem anstehenden Gestein, wird schließlich die Klasse `Felswand` modelliert. Sie beherbergt weitere für den in Kapitel 2.2.3 diskutierten

Ansatz der Sedimentkaskade wichtige Formen, wie Leisten und Klüfte. Die semantische Modellierung, die in der formalen Sprache UML erfolgt, wird von ausgiebigen Kommentaren begleitet, die Missverständnisse der beiden an einer formalen Ontologie beteiligten Wissenschaftsrichtungen weitgehend ausschließen sollen.

In Kapitel 3.4 wird schließlich ein Klassendiagramm für Geoprozesse entworfen. Geoprozesse sind die entscheidenden Konektoren, die Geoobjekte über den Austausch von Masse miteinander in Beziehung stellen. Es wird postuliert, dass die Wirksamkeit von Geoprozessen neben dem klimatischen Einfluss auch von den inneren Zuständen der Geoobjekte determiniert wird. Geoobjekte lassen Prozesse, wie das Fließen des Wassers also nur zu geomorphologisch wirksamen Geoprozessen werden, wenn die inneren, haltenden Kräfte den äußeren nicht widerstehen können. Durch die Verbindung von Geoprozessen nehmen Geoobjekte in der Sedimentkaskade bestimmte und sich verändernde Rollen ein. Eine Schutthalde repräsentiert z. B. gegenüber der oberhalb gelegenen Wand die Rolle des Speichers, gegenüber des unterhalb fließenden Flusses allerdings die Rolle der Sedimentquelle. Geoobjekte sind also über Geoprozesse vernetzt.

3.1 Semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen

Wie in Kapitel 2.1 diskutiert, ist die Entwicklung eines semantischen Modells von mehreren Faktoren abhängig. Zum einen sind dies die Objekte und ihre Eigenschaften, also das zu Modellierende. Sie sind in der vom Menschen unabhängigen Welt vorhanden, werden von ihm wahrgenommen und in unserem Falle modelliert. Der zweite Punkt ist der modellierende Mensch, dessen Wahrnehmung als Erweiterung seines subjektiven Wissens von seiner wissenschaftlichen Prägung abhängig ist. Beides hängt untrennbar miteinander zusammen, da die vom Menschen unabhängige Umwelt nur in unserer Vorstellung Wirklichkeit annehmen kann, und wir die Welt nur in unserem Geiste fassen können.

Die wissenschaftliche Sicht auf die Welt definiert den Ausschnitt, der in den Diskurs einbezogen wird. In dieser Arbeit sind dies die Konzepte der Fachrichtung der Geomorphologie, die in Kapitel 2.2 diskutiert wurden. Hierbei geht es um räumlich ausgedehnte Phänomene, die über den Austausch von Masse und infolgedessen auch, aber nicht nur, durch ihre Nachbarschaft in Beziehung stehen. Die Beschäftigung von räumlichen Phänomenen ist seit jeher das Betätigungsfeld der Geoinformation, mit dem Ziel der formalen und damit einer operablen Repräsentation dieser Phänomene. Der Zweck dem eine jede Modellbildung zu Grunde liegt, muss in dieser Arbeit also die Schaffung einer Schnittstelle der beiden Wissenschaften sein, die sich z. T. mit denselben Phänomenen der unabhängig existierenden Welt beschäftigen. Der Aufwand an Vermittlung ist dabei in beide Richtungen gleichermaßen hoch. Zum einen müssen die geomorphologischen

Konzepte der Geoinformation nahe gebracht werden, damit diese sie formal und damit in ihrem Sinne effizient behandeln kann. Zum anderen muss der Geomorphologie die Möglichkeit eröffnet werden, die Formalismen und Arbeitsmethoden der Geoinformation zu verstehen, um daraus den Nutzen dieser Sichtweise für sich extrahieren zu können.

In der Geoinformation gibt es für die Erstellung semantischer Modelle internationale Standards, die der Interoperabilität, also dem unproblematischen Austausch von Informationen dienen. Der auf internationaler Ebene wohl wichtigste Standard zur Erstellung semantischer Modelle ist dabei das „Rules for application schema“ (ISO/DIS 19109 2002) der International Organization for Standardization. Hier wird formal festgelegt, wie ein semantisches Modell, das auch Anwendungsschema (engl.: *application schema*) genannt wird, definiert werden soll. Dabei folgt das generelle Abstraktionsmodell (engl.: *general feature modell*) der ISO 19109 im Grunde der in Kapitel 2.1 abgehandelten Diskussion über das Zustandekommen semantischer Modelle. Wichtig ist jedoch, dass die ISO 19109 genau festlegt, wie die Geometrien von Objekten repräsentiert werden sollen, wobei sie eindeutig einem objektorientierten Ansatz folgt (vgl. Kapitel 2.1.2). Geometrische Repräsentationen von *features*, also Abstraktionen der Realweltobjekte, sollen danach mit den in der ISO 19107 zur Verfügung gestellten Geometrietypen modelliert werden. Dabei gibt es jedoch einschränkende Regeln. Nicht alle Geometrietypen dürfen direkt mit Abstraktionen der Realweltobjekte assoziiert werden. Tabelle 3.1 gibt die Einschränkungen der möglichen Geometrien zur Modellierung von Klassenkonzepten der Realwelt wieder. Die Geometrietypen werden im Einzelnen und ausführlich in Kapitel 3.2 besprochen.

Geometrische Primitive	Geometrische Komplexe	Geometrische Aggregationen
GM.Point	GM.CompositePoint	GM.Aggregate
GM.Curve	GM.CompositeCurve	GM.MultiPoint
GM.Surface	GM.CompositeSurface	GM.MultiCurve
GM.Solid	GM.CompositeSolid	GM.MultiSurface
	GM.Complex	GM.MultiSolid
		GM.MultiPrimitive

Tab. 3.1 Geometrische Klassen der ISO 19107, die nach ISO 19109 zur Attributierung von Features im Anwendungsschema verwendet werden können. Auch Subtypen dieser Klassen sind zugelassen (verändert nach ISO/DIS 19109 2002).

Neben der geometrischen Repräsentation von im Raum ausgedehnten Objekten muss aber auch geklärt werden, in welcher Weise die semantischen Eigenschaften der Objekte des Diskurses gefunden werden. Wie in Kapitel 2.1.2.1 diskutiert, unterscheidet CURRY 2000 den deskriptiven vom normativen Ansatz. Hier wird der normative Ansatz gewählt, was zwei Gründe hat. Zum einen muss erkannt werden, dass Beobachtungen und die damit verbundene Modellierung prinzipiell immer unvollständig bleiben muss. Zum anderen entzieht sich die definitorische Modellierung der Beweislast in Bezug auf

das einzelne Phänomen, kann aber gleichermaßen auf den Kanon der fachwissenschaftlichen Literatur als Extrakt der Beobachtung verweisen. Grenzen von Objekten können postuliert werden, ohne sich in Diskussion über die Beschaffung der einzelnen Koordinaten derselben verwickeln zu müssen. Ein definitorischer Modellierungsansatz muss sich dabei lediglich gegen Falsifizierung schützen.

Dabei lässt sich die Normierung natürlich nicht strikt von der Beobachtung trennen. Dennoch soll die hier vorgestellte Modellierung eher normativ durchgeführt werden, wobei dies im Sinne einer subsummierenden Abduktion zu verstehen ist (vgl. PEIRCE 1955), in der das beobachtete Phänomen schon bestehenden Begriffen oder Regeln zugeordnet wird. Diese Begriffe kommen dabei aus der Wissenschaft der Geomorphologie, ebenso wie aus der Geoinformation. Dies hat in den nachstehenden Ausführungen zur Folge, dass die von GRUBER 1993 geforderte Kommentierung einer Ontologie den größten Platz einnehmen wird. Das Verständnis der beiden Wissenschaften nämlich ist Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Diskussion über die im Folgenden aufgestellte semantische Modellierung.

3.2 Geeignete Repräsentation der Geometrie

Wie in Kapitel 2.1.4 diskutiert, sind Rasteransätze für die geometrische Repräsentation von z. T. überhängenden Flächen oder gar voluminösen Geoobjekten nicht ausreichend. Eine Lösung bieten Grenzflächen-Repräsentationen (B-Rep) (engl.: *boundary representation*), die Volumen durch die sie begrenzenden Flächen beschreiben. Der Standard ISO 19107 „Spatial Schema“ (HERRING 2001) spezifiziert B-Rep-Konzepte zur Definition des Raumbezuges von Abstraktionen geographischer Objekte, den *features*, deren Modellierung wiederum durch den internationalen Standard ISO 19109 festgelegt ist (vgl. Kapitel 3.1). Die ISO 19107 umfasst 0- bis 3-dimensionale geometrische und topologische Konzepte, die durch Klassen in UML-Notation formalisiert sind (vgl. Kapitel 2.1.3). Die Beziehungen dieser Klassen sind durch ihre räumliche Semantik, ihre Attribute und die Beziehungen untereinander festgelegt (vgl. GRÖGER und KOLBE 2005). Des Weiteren sind ihnen Methoden zugeordnet, die Objekte erzeugen oder Eigenschaften, wie die Begrenzungslinie einer Oberfläche oder das Volumen eines Körpers ermitteln. Der gesamte Standard der ISO 19107 umfasst mehr als 100 Klassen, von denen nicht alle für die hier vorgelegte semantische Modellierung in Kapitel 3.3 relevant sind. Es muss also eine Auswahl, gegebenenfalls eine Anpassung des Standards erfolgen. Hierbei ist festzuhalten, dass es sich bei der Formulierung dieses Profils, ebenso wie bei der in Kapitel 3.3 entwickelten formal semantischen Modellierung nicht um eine operationale Implementierung eines lauffähigen GIS handelt. Die Verwendung der formalen Sprache UML aber, die zur Beschreibung semantischer, komplexer Sachverhalte entwickelt wurde, ermöglicht diese Implementierung durch z. B. Überführung in ein Datenbankschema und damit die Integration in ein übergeordnetes Informationssystem (vgl. LÖWNER 2005). Die Verwendung inter-

nationaler Standards, die von der International Organization for Standardization (ISO) beschlossen und damit in der weltweiten Gemeinschaft der GI-Anwender und Hersteller akzeptiert ist, garantiert zusätzlich den von BISHR 1998 als wesentlichen Punkt der Interoperabilität erachteten plattform- und systemunabhängigen Austausch von Daten. Dieser Austausch kann über die Geography Markup Language (GML) erfolgen, die eine direkte Realisierung der in ISO 19107 modellierten Geometrietypen darstellt (vgl. LAKE et al. 2004).²⁵

Im Folgenden wird ein Profil eines existierenden Standards im Sinne einer Vereinfachung und leichter Modifikation erstellt, das trotz dieser Modifikation für den externen Zugriff Dritter interoperabel ist.²⁶ Dabei wird auf die Modellierung der Topologie im „Spatial Schema“ nicht eingegangen, da sie sich für unsere Zwecke aus der zu besprechenden Klasse `GM_Complex` ergibt (vgl. Kapitel 3.2.2). Für Details der ISO 19107 sei auf HERRING 2001 verwiesen, einen Überblick geben GRÖGER und KOLBE 2005 sowie KRESSE 2004.

In der ISO 19107 sind die geometrischen Konzepte, denen Koordinaten zugrunde liegen, durch die Spezialisierung der Klasse `GM_Object` in Abbildung 3.1 realisiert. Damit beziehen sich die 2D- oder 3D-Koordinaten auf ein Koordinatenreferenzsystem, das durch den Standard ISO 19111 „Spatial referencing by coordinates“ (ISO/FDIS 19111 2002) eindeutig definiert werden kann. `_GM_Primitive` ist die von `GM_Object` abgeleitete abstrakte Oberklasse für geometrische Primitive.²⁷ Instanzen von `_GM_Primitive` sind Objekte, die nicht weiter in Primitive derselben Dimension zerlegt, aber von Primitiven der nächst niedrigeren Dimension begrenzt werden können. Letzteres gilt natürlich nicht für Punkte mit der Dimension 0. Die Klasse `_GM_Primitive` stellt die Methode `boundary()` zur Verfügung, die die Grenze einer `_GM_Primitive`-Klasse als Menge von `_GM_Primitive`-Klassen zurück gibt (vgl. Kapitel 3.2.1). Von `_GM_Primitive` sind die Klassen `GM_Point`, `GM_OrientableSurface` und `GM_Solid` abgeleitet. Während `GM_Point` die Geometrie der Dimension 0 bzw. `GM_Solid` die der Dimension 3 repräsentiert, wird `GM_OrientablePrimitive` weiter in `GM_OrientableCurve` und `GM_OrientableSurface` für die Dimension 1 bzw. 2 spezialisiert. Die Orientierung gibt bei den abgeleiteten Klassen `GM_Curve` die Richtung einer aus mehreren verbundenen Punkten bestehenden Linie bzw. die Oberseite einer Fläche der Klasse `GM_Surface` an. Dies ist insbesondere bei

²⁵GML ist ein aus der Extensible Markup Language (XML) entwickeltes Datenformat im Ascii-Code und damit für Maschinen und Menschen gleichermaßen lesbar (vgl. RAY 2001).

²⁶Für die Erstellung eines Profils eines Standards gibt es wiederum eine ISO Norm, die ISO/DIS 19106 2002. Sie besagt, dass Profile Untermengen der in den Standards gegebenen Definitionen darstellen sollen, Ergänzungen dürften folglich nicht gemacht werden. In der Praxis wird dies aber nicht immer eingehalten. So verfährt die STANDARDS NEW ZEALAND 2005 nach dieser Normierung, andere Autoren verzichten nicht auf Veränderungen, wenn diese der Anwendung dienlich sind (vgl. W3C-CONSORTIUM 2001; ANGST und SCHNEIDER 2004).

²⁷Die Eigenschaft, eine abstrakte Klasse zu sein, kommt durch den Unterstrich im Text und zusätzlich durch die kursive Schrift im Klassendiagramm zum Ausdruck. Abstrakte Klassen können nicht direkt instanziiert werden, wohl aber ihre Spezialisierungen.

besitzt. Nicht aus der ISO 19107 in das hier verwendete Profil übernommen wird die Klasse `GM.LineSegment` als Spezialisierung von `GM.LineString`. Ihre Eigenschaft, zwei Objekte der Klasse `GM.Position` linear zu verbinden, also eine Kante zu bilden, kann bei entsprechender linearer Interpolationsvorschrift auch durch die Klasse `GM.Curve` erfolgen. Diese Klasse wiederum beinhaltet eine Assoziation mit der Klasse `GM.DirectPosition`. Hier werden die eigentlichen Koordinaten der Stützpunkte eines `GM.CurveSegment`s abgelegt. Die Dimension der `GM.DirectPosition` ist ein abgeleitetes Attribut, das sich aus der Länge der Zahlensequenz der Koordinaten ergibt.²⁸ Auch die Klasse `GM.Point` erhält ihre Koordinate über eine Assoziation mit `GM.DirectPosition`.

Ein `GM.Surface` wird aus einer oder mehreren Instanzen der abstrakten Klasse `GM.SurfacePatch` komponiert. Auch hier gilt, dass ein `GM.SurfacePatch` zu höchstens einem `GM.Surface` gehören darf. Eine Spezialisierung von `GM.SurfacePatch` ist das `GM.Polygon`, das durch eine Menge an begrenzenden Linien und einer Fläche definiert wird. Die Interpolationsmethode dieser Fläche ist nach dem Standard ISO 19107 eine planare (vgl. HERRING 2001). Aus einem oder mehreren Objekten der Klasse `GM.Polygon` setzt sich ein `GM.PolyhedralSurface`, der Spezialisierung von `GM.Surface` zusammen und entspricht damit einer allgemeinen Tesselation.²⁹ Das `GM.Polygon` wird durch die Klasse `GM.Triangle` mit der Eigenschaft, mit genau drei Objekten der Klasse `GM.Position` assoziiert zu sein, weiter spezialisiert. Ein `GM.TriangulatedSurface` wird aus mindestens einer Instanz der Klasse `GM.Triangle` komponiert. Auch hier gilt, dass jedes `GM.Triangle` nur zu einem `GM.TriangulatedSurface` gehören darf. Die Klasse `GM.TriangulatedSurface` stellt keinerlei Bedingungen an die Art der Triangulation. Die von `GM.TriangulatedSurface` abgeleitete Klasse `GM.Tin` setzt eine Triangulation nach Delaunay (vgl. OKABE et al. 2000) voraus und setzt sich in Kenntnis der Triangulationsvorschrift nicht aus Dreiecken, sondern aus drei oder mehreren Objekten der Klasse `GM.Position` zusammen. Ein `GM.Tin` kann über das Attribut *breakLines* semantisch aufgewertet werden. Das Attribut, das hier im Gegensatz zum ISO-Standard 19107 vom Typ `GM.Curve` ist, beinhaltet Instanzen, die bei einer Delaunay Triangulation eventuell zerschnitten würden. Um dies zu verhindern, muss eine Constraint Delaunay Triangulation durchgeführt werden, wobei die Instanzen, aus denen eine `GM.Curve` besteht, die Sichtbarkeit der zu triangulierenden Punkte im Sinne des Delaunay-Algorithmus verhindern. Damit geben `GM.Curves` die Möglichkeit, besondere Stellen der Oberfläche, wie etwa Profilknicke oder andersartig semantisch definierte linienhafte Objekte im TIN zu erhalten (vgl. HERRING 2001). Dies ist insbesondere

²⁸ Die Eigenschaft, ein abgeleitetes Attribut zu sein, zeigt sich in der UML-Notation durch ein vorangestelltes „/“ (vgl. HITZ und KAPPEL 1999) (s. a. Fußnote 39 auf S. 68).

²⁹ Auch hier liegt im Gegensatz zum ISO-Standard 19107 eine marginale Änderung vor. Wird dort die Klasse `GM.PolyhedralSurface` als Implementierungsassoziation mit der Notation einer gestrichelten Vererbung realisiert (vgl. HERRING 2001), erfolgt hier die Spezialisierung mittels „normaler“ Vererbung. Für eine Implementierungsassoziation besteht an dieser Stelle keine Notwendigkeit.

bei der Modellierung der in der Geomorphologie wichtigen Kanten starker Hangneigungsänderung interessant (vgl. Kapitel 3.3.5.3).

3.2.1 Grenzen von flächenhaften und volumenhaften Objekten

Die in der ISO 19107 „Spatial Schema“ definierte Methode *boundary()* von GM-Object gibt die Begrenzung einer jeweiligen Geometrie in einer darunter liegenden Dimension zurück. Sie wird von den Klassen GM_Solid sowie GM_Surface und deren Unterklassen überschrieben und hat als Rückgabewert eine Spezialisierung der abstrakten Klasse GM_PrimitiveBoundary (vgl. HERRING 2001). Diese Spezialisierung erfolgt jeweils nach Art der Dimension des Objektes entweder in GM_CurveBoundary, GM_SurfaceBoundary oder GM_SolidBoundary. Dabei ist die GM_CurveBoundary mit jeweils genau einem Anfangs- und Endpunkt der Klasse GM_Point assoziiert (siehe Abbildung 3.2). Eine GM_SurfaceBoundary hat genau eine äußere und potenziell eine oder mehrere innere Grenzen, die durch die Klasse GM_Ring als Spezialisierung der Klasse GM_CompositeCurve repräsentiert wird. Obwohl jeder GM_Ring simpel ist, also jeder seiner Punkte beim Umfahren nur einmal besucht wird (vgl. WORBOYS 1995), muss seine Grenze nicht simpel sein, das heißt, ein innerer Ring kann einen äußeren berühren, das Innere der beiden ist aber disjunkt. Eine GM_SolidBoundary besteht in Analogie dazu aus einer äußeren und keiner, einer oder mehreren GM_Shells (deutsch: *Hülle*).

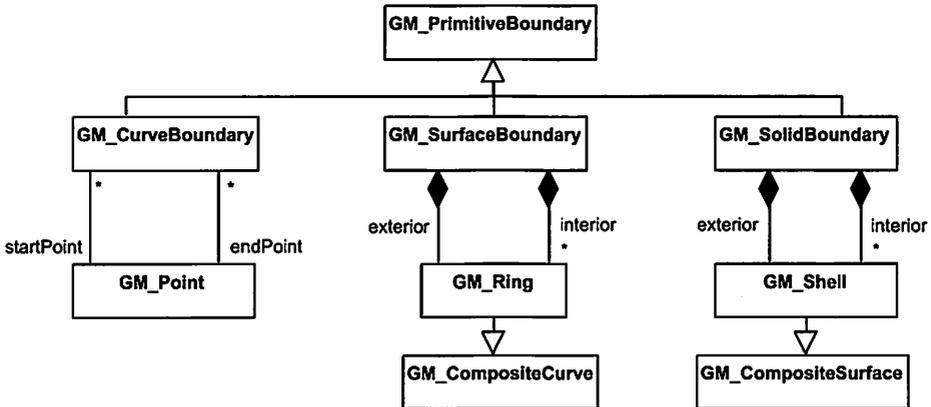


Abb. 3.2 Die Boundary-Klassen der ISO 19107

Eine Änderung des hier entwickelten Profils gegenüber dem ISO-Standard 19107 besteht nun darin, dass diese Grenzen direkt mit den Klassen assoziiert werden, die sie begrenzen. Das wirkt sich insbesondere für den Aufbau eines Datenbankschemas aus, in dem diese begrenzenden Objekte nun persistent gehalten werden können. Auswir-

kungen dieses Modellierungsschrittes auf die Interoperabilität sind nicht vorhanden, da die Methode *boundary()* die geforderten Klassen weiterhin liefert (siehe Abbildung 3.1).

3.2.2 Modellierung der Topologie mit der Klasse *GM_Complex*

Die in Abbildung 3.3 dargestellte Klasse *GM_Complex* ist eine Möglichkeit, *GM_Primitives* in strukturierter Art zusammenzufassen. Dabei dürfen sich die Primitive nur am Rand berühren oder schneiden, ihr Inneres aber muss disjunkt sein. Diese Forderung entspricht der von GRÖGER und PLÜMER 2003 sowie GRÖGER und PLÜMER 2005 (vgl. Kapitel 2.1.4). Kommt es zu einem Schnitt oder einer Berührung am Rand, muss dieser geometrische Bereich als eigenständiges Objekt der Klasse *GM_Primitive* oder *GM_Complex* repräsentiert werden. Außer bei der Klasse *GM_Point* müssen also für alle Primitive auch die dazugehörigen Primitive niedriger Dimensionalität in dem *GM_Complex* enthalten sein. Ist z. B. ein *GM_Complex* aus mehreren Instanzen der Klasse *GM_Surface* aggregiert, sind in diesem *GM_Complex* auch alle Grenzen der Form *GM_CompositeCurve* (vgl. Kapitel 3.2.1) enthalten. Durch diese Nutzung von gemeinsamen Geometrien wird eine Spaghetti-Modellierung, bei der Grenzen benachbarter Objekte doppelt gehalten werden müssen, verhindert und Inkonsistenzen in der Datenhaltung vermieden (RIGAUX et al. 2002). Dem so modellierten Komplexen liegt das Konzept der Zellkomplexe (JÄNICH 1999) der kombinatorischen Topologie zugrunde. Dies ist für die Modellierung von Geometrien im GIS-Bereich zentral, da die Disjunktheit von Features eine wichtige Integritätsbedingung ist (GRÖGER 2000). Würden sich zwei innere Teile einer Geometrie überschneiden, hieße das auch eine doppelte Belegung der semantischen Zuordnung dieser Bereiche, und damit eine unsaubere Modellierung.

Ein *GM_Complex* kann über die Assoziation *contains* wiederum *GM_Complexe* beinhalten, wobei eindeutig spezifiziert ist, welches *GM_Complex* das übergeordnete ist. Es lässt sich also eine Hierarchie auf geometrischer Ebene modellieren. Ist ein *GM_Complex* in keinem weiteren enthalten, ist der Rückgabewert der Methode *isMaximal()* „wahr“. Damit bildet das *GM_Complex* einen topologischen Raum. *GM_Complexe* können auch für die Modellierung nicht zusammenhängender Objekte genutzt werden, was mit Primitiven nicht möglich ist (vgl. GRÖGER und KOLBE 2005). Damit lässt sich z. B. die Modellierung einer Sedimentkaskade (vgl. Kapitel 2.2.3) mit sich nicht berührenden Speichern, also etwa einem Hang und einem aus dessen erodiertem Material aufgebauten, weit entfernt gelegenen Aluvium geometrisch fassen. Die Anwendung der Klasse *GM_Complex* entspricht also nicht einer Tessellation, bei der alle Punkte der betrachteten Oberfläche innerhalb der die Tessellation aufbauenden Maschen liegen müssen (vgl. OKABE et al. 2000). Vielmehr erfüllt der *GM_Complex* die Anforderung, die in der Geomorphologie relevanten Objekte zu repräsentieren und das im Sinne der Semantik Irrelevante auszublenden.

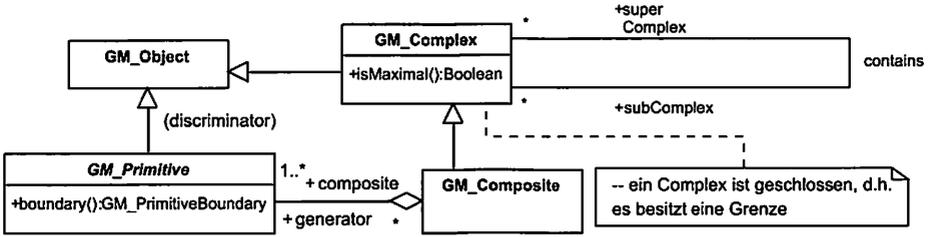


Abb. 3.3 Die Klasse GM_Complex in ihrer UML-Notation

Zur impliziten Modellierung der Topologie wird hier also nicht auf die in der ISO 19107 vorgeschlagenen Klassen zurückgegriffen, sondern ein GM_Complex verwendet. Dieses modelliert die Topologie, wie gesehen, im Grunde mit (vgl. GRÖGER und KOLBE 2005) und sichert im Wesentlichen die Überschneidungsfreiheit der geometrischen Objekte. Auf Grund der Einfachheit des hier für eine semantische Modellierung von Geobjekten verwendeten geometrischen Modells, scheint dies angebracht.

Die Forderung nach der Geschlossenheit eines GM_Complexes, also danach, dass alle Subkomplexe eine Grenze beinhalten, fordert die Betrachtung der Klasse GM_Composite im folgenden Kapitel.

3.2.3 Die Klasse GM_Composite

Abgeleitet von GM_Complex ist die Klasse GM_Composite in Abbildung 3.4 ein geometrischer Komplex, der aus Primitiven aufgebaut ist, die vom selben Typ sein müssen und dabei nur eine äußere Grenze hat. Die direkte Folge ist, dass GM_Composites zusammenhängend sein müssen und eine äußere Grenze aufweisen. Innere Grenzen werden nicht redundant gehalten.³⁰

Mit der Forderung der Isomorphie stellt das GM_Composite die Modellierung einer rekursiven Aggregation dar, mit der Primitive wiederum zu Primitiven derselben Dimension zusammengefügt werden können. Hinsichtlich der fehlenden Bedingungen an die Überschneidungsfreiheit der Grenzen lässt sich eine Topologie im Sinne simplizialer Komplexe nicht verwirklichen. Wichtig ist ein GM_Composite insbesondere für die Bereitstellung konvexer Hüllen der Form GM_Shell für GM_Solids.

³⁰GRÖGER und KOLBE 2005 weisen hier im Übrigen darauf hin, dass dies bei volumenhaften Verbunden zu inkonsistenter Modellierung der Orientierung begrenzender Flächen führe. Sie bemerken, dass die innere Grenze so orientiert sein müsse, dass ihre Unterseite zum Inneren beider benachbarter Körper zeigt, was schier unmöglich wäre. Das scheint zunächst schlüssig. Jedoch werden nur diejenigen Objekte der Klasse GM_OrientableSurface durch eine Instanz der Klasse GM_Surface repräsentiert, deren Orientierung „+“, also oben ist. Bei negativer Orientierung erfolgt die Repräsentation durch einen Verweis auf eine Instanz der Klasse GM_Surface. Eine GM_OrientableSurface zeigt also nicht in zwei Richtungen, sondern immer nur in eine, wobei bei negativer Orientierung eben nur ihre Orientierung, nicht aber ihre Geometrie gehalten wird (vgl. HERRING 2001 S. 41f.).

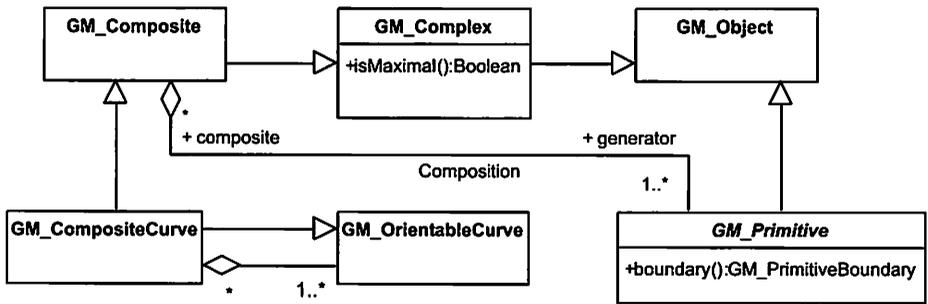


Abb. 3.4 Die Klasse `GM.Composite` in ihrer UML-Notation

3.3 Das semantisch basierte Anwendungsmodell von Wänden und steilen Hangbereichen

3.3.1 Die Klasse `_Geoobjekt`

Abgeleitet von der Klasse `GF.FeatureType` des ISO/DIS 19109 2002 stellt die Klasse `_Geoobjekt`, dargestellt in Abbildung 3.5, die Oberklasse aller in der hier vorgestellten Modellierung repräsentierten, geomorphologisch relevanten, räumlich ausgedehnten Objekte des Georeliefs dar. Diese Klasse ist abstrakt, d. h. sie kann nicht direkt instanziiert werden, muss also durch Vererbung in Unterklassen, die dann durch Objekte realisiert werden können, spezialisiert werden.

Ein `_Geoobjekt` hat eine oder mehrere Assoziationen mit einer Klasse `ZeitlicheRepräsentation`, die wiederum durch eine Assoziation mit der Klasse `GM.Complex` gekennzeichnet ist. Die Assoziation der Klasse `_Geoobjekt` mit seiner Geometrie über eine `ZeitlicheRepräsentation` ist sinnvoll, weil sich semantisch identifizierte, geomorphologische Objekte durch Prozesse in der Geometrie verändern können. Dabei bleibt aber die Identität des Objektes, so es nicht völlig ausgelöscht wird, erhalten. Ein Beispiel hierfür ist der viel beachtete Felssturz vom 15.07.2003 am Hörnligrat des Matterhornes (vgl. RAMBAUSKE 2003). Der Felssturz, der 1000 m³ bewegte, veränderte zwar die Geometrie des berühmten Berges, seine Identität als *Matterhorn* und dem dazugehörigem *Hörnligrat* ist dadurch aber nicht gefährdet.³¹ Damit bezieht sich die `ZeitlicheRepräsentation` ausschließlich auf die geometrische Repräsentation eines geomorphologischen Objektes. Mag sich auch die Geometrie dieses Objektes verändern und damit die Assoziation zu einem neuen Objekt der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` nötig werden, drückt dieses nicht das Alter der Form in Bezug auf sein Material oder seine Genese aus.

³¹Die Benennung dieses Ereignisses als Felssturz folgt in der allgemeinen Wahrnehmung der Definition von LESER et al. 1992B und nicht der in Tabelle 2.2 von WHALLEY 1974 verwendeten Nomenklatur.

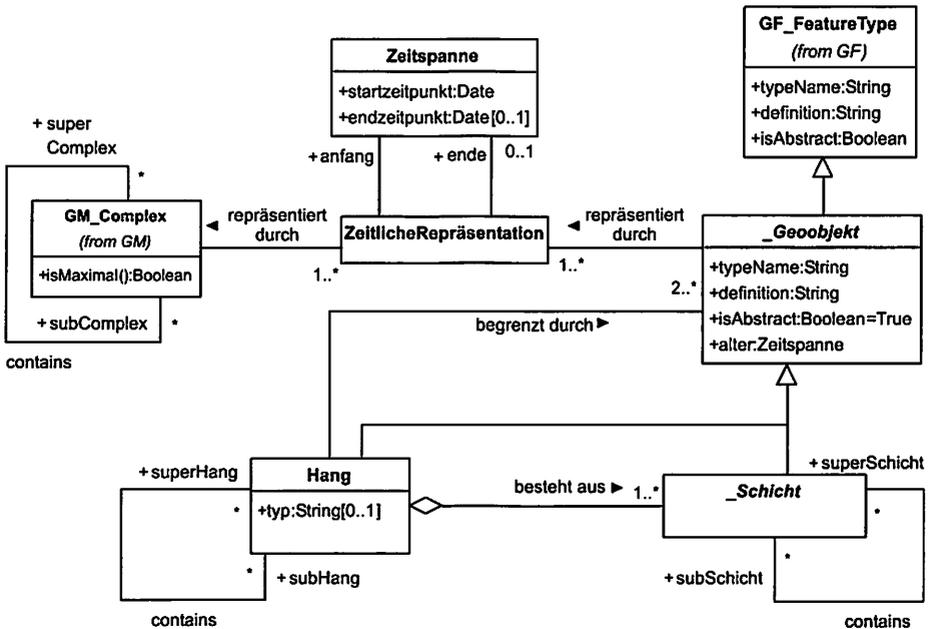


Abb. 3.5 Repräsentation der Klasse `_Geoobjekt` und `Hang`

Die Attribute der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` sind *anfang* und *ende*, die hier in der assoziativen Notation von UML skizziert wurden. Sie sind vom Typ `Zeitspanne`, da die Entstehung einer Form oft nur während einer `Zeitspanne`, nicht aber an einem exakten Zeitpunkt stattfindet. So dauert der Aufbau einer Schutthalde durch die Akkumulation von Material der oberhalb gelegenen Wand oft hunderte von Jahren. Die Multiplizität von *anfang* ist dabei 1, was im Modell durch eine fehlende Notation ausgedrückt wird. Es muss also eine `Zeitspanne` der Entstehung geben, sonst wäre das `_Geoobjekt` in seiner jetzigen geometrischen Repräsentation offensichtlich nicht existent. Für das Ende ist dies, falls das `Geoobjekt` in seiner Form unverändert besteht, nicht zwingend der Fall. Gleiches gilt auch für die Attribute der `Zeitspanne`. Während ein *endzeitpunkt* optional gegeben sein kann, ist ein *startzeitpunkt* obligatorisch (engl.: *mandatory*). Auch wenn die `ZeitlicheRepräsentation` der Klasse `_Geoobjekt` also nur eine obligatorische Zeitangabe in Form eines Datums braucht, um die Anforderungen der Modellierung zu erfüllen, kann nicht immer ein Datum der Entstehung einer Form angegeben werden. In einer praktischen Anwendung besteht die Form aber zumindest zu der Zeit der Aufnahme derselben. Hier kann also das Datum der Erhebung gesetzt werden. Dies sind allerdings

keine Kriterien, die in einem semantischen Modell zwingend definiert werden müssen, sondern eine Aufgabenstellung für die Realisierung des Modells im jeweiligen konkreten Fall.

Neben der Klasse `ZeitlicheRepräsentation`, die sich auf die zeitliche Existenz einer bestimmten Geometrie bezieht, hat ein `_Geoobjekt` das Attribut `alter` vom Typ `Zeitspanne`. Dieses Attribut repräsentiert das Alter der Form und somit den Zeitpunkt ihres ersten Auftretens als Objekt der zugehörigen Klasse. Es bezieht sich also auf die Genese eines Sedimentkörpers, nicht auf dessen exakte geometrische Form zum jetzigen Zeitpunkt, die auch nach seiner Bildung weiterhin verändert werden kann. So kann eine Schutthalde direkt nach der Deglaziation³² gebildet werden, ihr Alter wäre dann etwa 10000 Jahre, ihre Form aber kann durch rezente Erosions- und Akkumulationsprozesse verändert werden, vielleicht gerade gestern.

Unter Berücksichtigung der in ISO/DIS 19109 2002 gegebenen Modellierungsregel, sind die Geometrien von `_Features` nicht mit der allgemeinsten Klasse des „Spatial Schemas“, dem `GM_Object`, sondern nur mit den in Tabelle 3.1 auf Seite 52 zugelassenen Geometrieklassen oder deren Spezialisierung zu modellieren. Die `ZeitlicheRepräsentation` hat infolgedessen genau eine Assoziation zu einer Geometrieklasse `GM_Complex`, die nach HERRING 2001 in der Vererbungshierarchie der ISO 19107 die allgemeinste Geometrie repräsentiert und zusätzlich topologische Bedingungen fordert (vgl. Kapitel 3.2.2). Ein `GM_Complex` kann im Gegenzug mit mehreren Instanzen der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` assoziiert werden, da letztere sich auch durch Veränderung innerer Zustände des Geoobjektes verändern kann, ohne dass sich die dazugehörige Geometrie des `_Geoobjektes` ändert. Ein Beispiel hierfür wäre der Verwitterungszustand einer Felswand, der in der Zeit fortschreitet, ihre Geometrie ohne einen formenverändernden Prozess aber nicht sichtlich oder messbar verändert. Mit der zwingenden Assoziation des `_Geoobjektes` zu einer Klasse `ZeitlicheRepräsentation` ist im Übrigen auch die Forderung von RAPER und LIVINGSTONE 1995 zu erfüllen, die die Zeit als Eigenschaft des Objektes sehen, und nicht das Objekt in einer übergeordneten Zeit. Der Zustand des Reliefs als Ganzes innerhalb eines Zeitintervalls kann einfach durch eine Abfrage über die Instanzen der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` erfolgen.

Im Sinne der objektorientierten Modellierung übernehmen alle von `_Geoobjekt` abgeleiteten Klassen die beschriebene Assoziation mit der Klasse `ZeitlicheRepräsentation`, genauso wie `_Geoobjekt` die von in der ISO/DIS 19109 2002 definierten Klasse `GF_FeatureType` verwendeten Attribute `typeName`, `definition` und `isAbstract`.³³ Bei der Repräsentation der Geometrie durch die Klasse `GM_Complex` ist auf der Ebene der Klasse `_Geoobjekt` noch nicht festgelegt, welche Dimension die Geometrie einer Spezialisierung von `_Geoobjekt` hat oder haben muss.

³²Der Begriff Deglaziation bezeichnet das massive Zurückschmelzen der Gletscher nach einer Kaltzeit.

³³Im Vergleich zur ISO 19109 wird allerdings hier das Attribut `typeName` nicht als `LocalName`, sondern als `String` realisiert (vgl. ISO/DIS 19109 2002).

Sie wird erst durch die Klassen der spezialisierten „Geoobjekte“ selbst festgelegt und kann theoretisch von der Dimension 0 für Punkte bis zur dritten Dimension für Volumina reichen.

3.3.2 Die Klasse Hang

Neben der Modellierung des „Geoobjektes“ ist auch die Repräsentation seiner wohl wichtigsten Spezialisierung, dem Hang, in Abbildung 3.5 dargestellt. Hänge stellen für die Geomorphologie fundamentale Einheiten der physiogeographischen Landschaft dar (TWIDALE 1960) und sind damit die grundlegenden Elemente derselben (FINLAYSON und STATHAM 1980). Damit haben sie auch eine wichtige Funktion in der Charakterisierung von Landschaftstypen (CHORLEY 1996). Trotz dieser enormen Wichtigkeit von Hängen bei der Betrachtung der Landoberfläche durch die Geomorphologie stellen SCHUMM und MOSLEY 1973 eine beeindruckende Definitionslücke des Terminus Hang fest.³⁴ Immerhin ist sicher, dass Hänge in ihrer Form sehr variieren (SUMMERFIELD 1997). LEOPOLD et al. 1964 sowie AHNERT 1970A definieren Hänge als Teil der Landoberfläche, der sich zwischen einem Höhenkamm (engl.: *crest*) und der dazugehörigen Tiefenlinie befindet. Er wird also nach oben und nach unten von diesen Objekten begrenzt. YOUNG 1964 differenziert daraufhin konkave Talanfangshänge (engl.: *valley-head slope*), konvexe Spornhänge (engl.: *spur-end slope*) und gestreckte Talhänge (engl.: *valley-side slopes*). Diese Typen von Hängen sind ineinander verschachtelt. DEHN et al. 2001 kommen in ihrer Definition des Hanges zu der Erkenntnis, dass ein Hang eine geneigte Fläche ist, die von mindestens zwei weiteren Einheiten begrenzt wird. Zusätzlich liegt seine Hangneigung zwischen nicht näher definierten Neigungswinkeln β_{min} und β_{max} , die ihn von der Ebene und der Wand abgrenzen. Ohne Angaben von Gründen benennt SAVIGEAR 1960 den maximalen Winkel eines Hanges mit 40° , der ihn von einem Kliff³⁵ unterscheidet. Hier wird dieser definitorischen Festlegung maximaler und minimaler Hangneigungen nicht gefolgt. Dennoch bleibt die Wichtigkeit der Hangneigung als Regler der Gravitation und damit der Art und Stärke formenverändernder Prozesse zu betonen (vgl. EVANS 1972; AHNERT 1970B sowie Abbildung 2.6 auf Seite 37).

Ausgehend von obigen Versuchen einer Definition und dem in auf Seite 45 dargestellten Hangsystem von CAINE 1974, das eine hierarchisch übergeordnete Sicht auf den Begriff Hang hat, wird die Klasse Hang hier als eine Spezialisierung eines „Geoobjektes“ modelliert, das bzgl. seiner Skala und Hierarchie (vgl. Kapitel 2.2.1) nicht festgelegt ist (vgl. LESER et al. 1992B). Hänge, die nach LEOPOLD et al. 1964 vom Höhenkamm bis zum Gerinne ausgedehnt sind, können in dem hier vorgestellten formal semantischen Modell also wiederum aus Hängen bestehen oder aber aus anderen

³⁴Zur allgemeinen Verwirrung der Definition mag auch die Isophonie des englischen Begriffes *slope* beitragen, der im Englischen sowohl Hang als auch Hangneigung bedeuten kann.

³⁵Zur Verwendung des Begriffes *Kliff* siehe Kapitel 3.3.4.

Geobjekten. So ist bspw. die orographisch rechte Talflanke³⁶ des Turtmanntales durch Seitentäler zergliedert, die ihrerseits von Hängen begrenzt werden. In der Modellierung kommt diese „Verschachtelung“, die von AHNERT 1988, DIKAU 1989 und auch BRUNSDEN 1996 postuliert wird, bei Objekten der Klasse *Hang* durch die Assoziation *contains* zum Ausdruck. Auch hier ist, wie bei der Modellierung eines *GM_Complex*-es (vgl. Kapitel 3.2.2) die hierarchische Struktur durch die Bezeichnung *SuperHang* und *SubHang* eindeutig. Die Klasse *Hang* weist das Attribut *typ* vom Typ *String* auf. Hiermit kann eine Klassifizierung genetisch unterschiedlicher Hänge erfolgen, ohne dass alle möglichen Hangtypen einzeln zu modellieren sind (vgl. Kapitel 3.3.3).

Aus der Betrachtung des Georeliefs im Sinne eines geomorphosphärischen Komplexes nach KUGLER 1974 kann gefolgert werden, dass ein Hang ein dreidimensionaler Körper ist, der durch Schichten homogener Materialzusammensetzung und Genese aufgebaut wird. Schichten erhalten in der Geomorphologie und Geologie zumeist Namen oder Bezeichnungen, die sie in einen genetischen oder zeitlichen Kontext stellen. Sie sind es, die das historische Archiv für die funktionale Analyse des Georeliefs darstellen (vgl. Kapitel 2.2.1). Wegen dieser herausragenden Stellung ist die abstrakte Klasse *_Schicht* als Spezialisierung der Klasse *_Geoobjekt* modelliert. Damit hat eine *_Schicht* neben einem *alter* also auch eine Assoziation zu der Klasse *ZeitlicheRepräsentation*, die die zeitliche Gültigkeit ihrer geometrischen Repräsentation durch die Klasse *GM_Complex* angibt. Ein *Hang* weist eine oder mehrere Assoziationen *besteht aus* zu der Klasse *_Schicht* auf, besteht also aus entsprechend vielen Objekten der Klasse *_Schicht*.

Die Klasse *_Schicht* ist wie das *_Geoobjekt* abstrakt, d. h. sie kann nicht direkt instanziiert werden, wohl aber ihre Spezialisierungen. Die Entscheidung einer abstrakten Modellierung begründet sich neben formalen Aspekten der Sprache UML vor allem in der Vielfältigkeit der Genese geomorphologischer und geologischer Schichten. Die damit verbundene Vielzahl der Parameter, die Schichten charakterisieren helfen, sind kaum sinnvoll innerhalb einer Klasse zu fassen. Während z. B. geologische Schichten in Akkumulationsräumen und -bedingungen entstanden sind, deren Randbedingungen heute am selben Ort häufig nicht mehr anzutreffen sind, entstehen Bodenschichten auch rezent oder werden rezent weiterentwickelt. Die unterschiedliche Genese von Schichten stellt jeweils andere Eigenschaften in den Fokus des fachwissenschaftlichen Interesses. Abbildung 3.6 zeigt die Spezialisierung der *_Schicht* zu einer *Bodenschicht*.

Zur Wahrung der topologischen Eigenschaften der in der ISO 19107 definierten Klasse *GM_Complex* (vgl. Kapitel 3.2.2) muss zwingend gewährleistet sein, dass der *GM_Complex*, der die Geometrie einer *_Schicht* repräsentiert, Teil desjenigen *GM_Complex*-es ist, der die Geometrie des Hanges repräsentiert, der aus diesen Schichten besteht. Dieser Sachverhalt ist durch die Assoziation eines *GM_Complex*-es mit einem

³⁶Die Bezeichnung *orographisch* bezieht sich immer auf die Richtung des übergeordneten Prozesses. Der orographisch linke Hang des Flusses A ist also der in Blickrichtung der Fließrichtung von A links gelegene Hang.

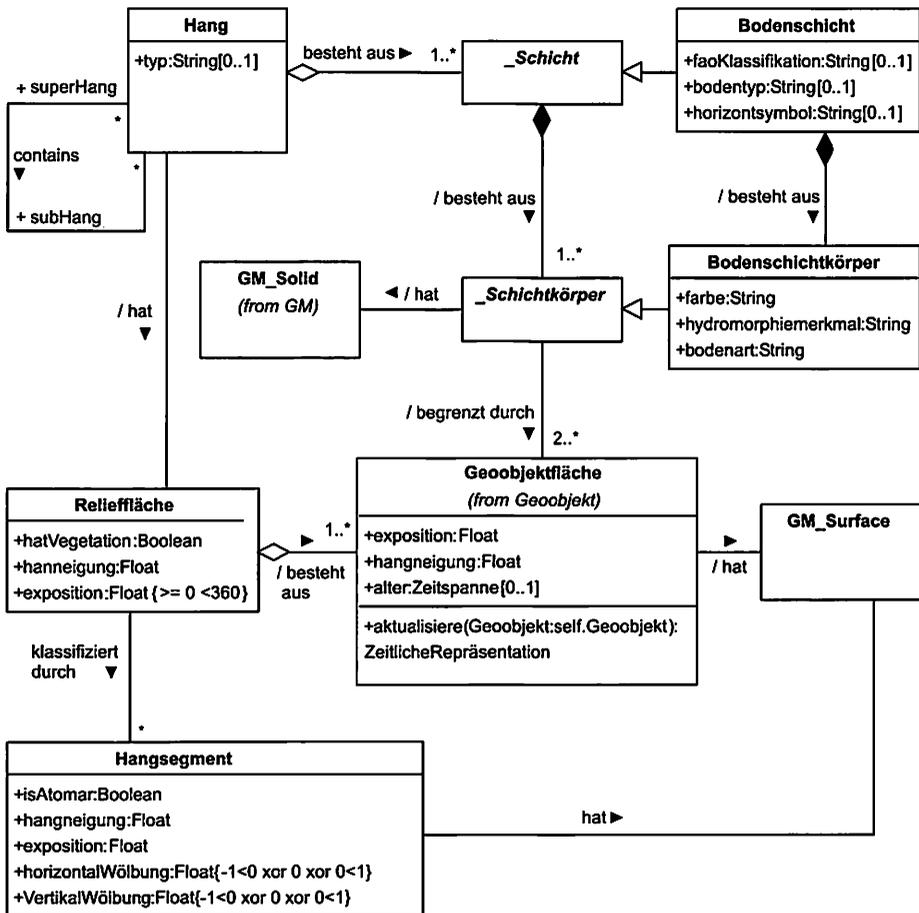


Abb. 3.6 Repräsentation der Klasse `Hang`. In Ebenen angeordnet sind die verschiedenen Geometrien, von dem des obersten `GM.Complex` über den `GM.Solids` bis zu der des `GM.Surface` herunter.

weiterem `GM.Complex` in der ISO 19107 implizit gefordert. Er stellt aber keine Methode zur Überprüfung dieses Sachverhaltes bereit. Dieses Problem ist nach dem Standard des „Spatial Schema“ im Bereich der Implementierung angesiedelt (vgl. HERRING 2001). Auf der Modellebene böte sich eine Methode an, die diese implizit geforderte Überschneidungsfreiheit der Primitive von `GM.superComplex` und `GM.subComplex` durch einen boolschen Operator, etwa durch die Methode `contains(GM.Complex):Boolean`, überprüft. Dies würde eine monotone Erweiterung des ISO-Standards bedeuten, die Durchführung dieser Überprüfung muss aber auch hier an die Implementierung weitergereicht werden. Auf der Modellierungsebene würde zur An-

wendung einer solchen Methode ein Ausdruck der Object Constraint Language (OCL)³⁷ (vgl. Kapitel 2.1.3) angewendet werden. Dabei müsste der boolesche Operator der Methode *contains(GM.Complex): Boolean* der Klasse *GM.Complex* den Wert „wahr“ annehmen. Die explizite Abfrage dieser Anforderung würde durch die Navigation entlang der Assoziationen der an der Abfrage beteiligten Klassen erfolgen (vgl. HITZ und KAPPEL 1999).

```
context Hang
this.repräsentiertdurch.repräsentiertdurch.contains(
    this.bestehtaus.repräsentiertdurch.repräsentiertdurch
): Boolean = True
```

Ausgehend von der Klasse *Hang*, was durch die erste Zeile und dem *this* der zweiten Zeile zum Ausdruck kommt, wird nun entlang der Assoziationen zum *GM.Complex* dieser Klasse navigiert, der die Methode *contains(GM.Complex): Boolean* zur Verfügung stellt, wobei die Klassen wegen der Eindeutigkeit der Assoziationsnamen in Verbindung mit der Leserichtung bzw. der Rollennamen nicht explizit genannt werden müssen. Die Klasse *Hang* hat natürlich keine direkte Assoziation zu dem sie repräsentierenden *GM.Complex*, ist aber eine Unterklasse von *_Geoobjekt*. Das weist die Assoziation *repräsentiert durch* zur Klasse *ZeitlicheRepräsentation* auf, die ihrerseits durch eine Assoziation *repräsentiert durch* mit dem *GM.Complex* assoziiert ist. Dieser Methode wird nun auf analoge Weise das Argument, also die Geometrie der *_Schicht* übergeben. Die Forderung ist, dass *contains(GM.Complex): Boolean* den Wert „wahr“ zurück gibt.³⁸

Aus geomorphologischer Sicht ist es sinnvoll, dass die *_Schicht*, ebenso wie der *Hang*, über eine Assoziation *contains* wiederum Spezialisierungen ihrer eigenen Klasse enthalten kann. Dies gilt vor allem für komplexere Schichten, denen als Ganzes eine Eigenschaft zugeordnet werden kann, deren Teile, also wiederum Instanzen der Spezialisierung von *_Schicht*, sich aber in den Werten ihrer Attribute unterscheiden. Das ist insbesondere für die Repräsentation von Bodenschichten (s. u.) wichtig. Die Darstellung in der UML-Notation der Abbildung 3.5 ist dabei analog zu der des Hanges.

Eine *_Schicht* hat eine existenzabhängige Aggregation, eine Komposition, mit einer oder mehreren Instanzen der Klasse *_Schichtkörper*. Diese ist ebenfalls abstrakt und bekommt durch ihre Assoziation mit der Klasse *GM.Solid* die eigentliche 3D-Geometrie zur Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 3.6). Mit anderen Worten besteht eine Schicht aus Schichtkörpern und die haben ein Volumen. Allerdings muss in der Implementierung des Modells gewährleistet sein, dass die *_Schichtkörper* Teil des *GM-*

³⁷Ein OCL-Ausdruck kann direkt im graphischen UML-Diagramm oder als externer Textfile notiert werden.

³⁸Umgangssprachlich meint der OCL-Ausdruck: „Hang, wende deine von Geoobjekt geerbte und den ISO-Standard erweiternde Methode *contains(GM.Complex): Boolean* an und überprüfe, ob sie für die *_Schicht*, aus denen du bestehst, gültig ist“.

Complexes der jeweiligen „Schicht“ sind. Da die Formulierung eines entsprechenden OCL-Ausdrucks unter Verwendung der zusätzlichen Methode `contains(GM_Complex) : Boolean` sich analog zu der obigen auf Seite 66 verhält, ist sie hier weggelassen.

Es soll noch einmal betont werden, dass die Methode `contains(GM_Complex) : Boolean` nicht im ISO-Standard 19107 definiert ist. Sie ist aus Sicht einer Modellierung komplexer geometrischer Sachverhalte allerdings zu fordern. Ihre Ausführung liegt damit aber weiterhin im Bereich der Implementierung des semantischen Modells durch eine Anwendung.

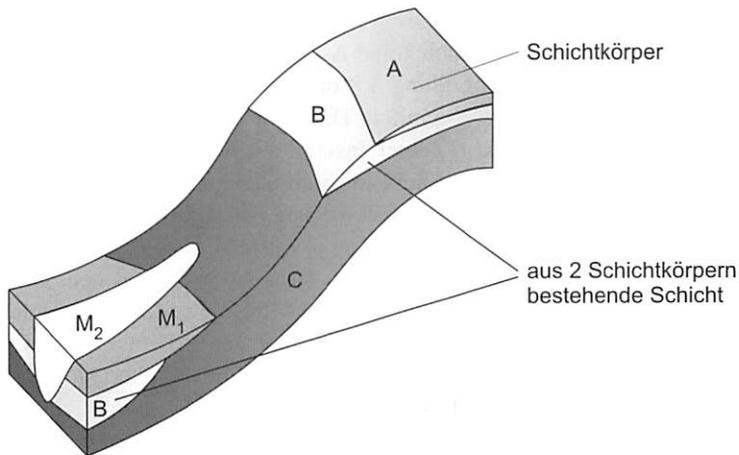


Abb. 3.7 Blockdiagramm eines Hanges, der sich aus vier Objekten der Klasse „Schicht“ zusammensetzt. Eine genetisch homogene Schicht kann aus mehreren Objekten der Klasse „Schichtkörper“ bestehen, wie dies bei Schicht B der Fall ist. Die Abbildung zeigt einen typischen, vom Prozess der Bodenerosion veränderten Hang in einem Lössgebiet (vgl. BORK 1988; LÖWNER et al. 2005). Dabei waren Schicht A und B ehemals flächendeckend vorhanden, wurden aber durch hangaquatische Prozesse zerschnitten. Die Schichten M₁ und M₂ sind aus dem Material der Schichten A, B und C aufgebaut.

In der geomorphologischen Sichtweise ist es klar, dass die „Schichtkörper“ geometrisch nicht zusammenhängen müssen, um zu einer Schicht zu gehören. Eine Schicht kann durch Akkumulationsprozesse gebildet und nach einiger Zeit von einem Erosionsprozess ganz oder teilweise erodiert werden. Dieser Erosionsprozess kann auch zu einer Zerschneidung in einzelne, sich nicht berührende Volumina führen, deren Zugehörigkeit zu der ehemals akkumulierten Schicht dabei unangetastet bleibt. Die räumliche Trennung von Geometrien eines GM_Complexes ist nach der ISO 19107 ja zulässig (vgl. Kapitel 3.2.2). Abbildung 3.7 stellt einen solchen Sachverhalt dar, der für Hänge in Lössgebieten Deutschlands nicht ungewöhnlich ist.

Die Aggregation einer „Schicht“ aus Schichtkörpern sowie die Assoziation der

Schichtkörper zu einem `GM.Solid`, der ihre Geometrie repräsentiert, müssen dabei allerdings aus dem `GM.Complex`, der die Geometrie der `_Schicht` beinhaltet, abgeleitet werden.³⁹ Der Grund dafür ist, dass die geometrische Repräsentation einer `_Schicht` mittels eines `GM.Complexes` durch die Assoziation mit einer `ZeitlichenRepräsentation` nur in der jeweiligen Zeitspanne Gültigkeit hat. Wird also ein Objekt einer Bodenschicht durch einen Prozess in seiner Geometrie verändert, wird eine neue Instanz der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` angelegt. Dabei werden die im assoziierten `GM.Complex` vorgehaltene Geometrien zunächst kopiert und dann verändert.⁴⁰ Die Geometrie, aus denen die Bodenschicht aufgebaut ist, sind Objekte der Klasse `GM.Solid`, die mit den entsprechenden `BodenSchichtkörpern` assoziiert sind. `BodenSchichtkörper` sind aber nicht von `_Geoobjekt` abgeleitet und haben damit auch keine Assoziation zu einer Instanz der `ZeitlichenRepräsentation`. Abbildung 3.8 macht die daraus entstehenden Probleme in Form eines Instanzmodells⁴¹ deutlich. Das Objekt `Ranker` der Klasse `BodenSchicht` besteht zum Zeitpunkt `t1`, einer Instanz der Klasse `ZeitlicheRepräsentation`, auf der semantischen Ebene aus den Objekten `BodenSchichtkörper` `Ah-Horizont` und `C-Horizont`. Deren Geometrien `Ah-Solid` und `C-Solid` werden im `RankerComplex(t1)` zusammengeführt, der über `t1` mit dem `Ranker` assoziiert ist. Wird nun der `Ah-Solid` durch einen Erosionsprozess verändert, wird ein neues Objekt der `ZeitlichenRepräsentation` `t2` angelegt, das mit dem `RankerComplex(t2)` assoziiert ist. Das semantische Objekt `Ah-Horizont` muss also mit einer neuen Geometrie assoziiert werden, wobei die alte durch ihre Assoziation mit `RankerComplex(t1)` weiter bestehen bleiben muss. Bei einer direkten Assoziation des `Schichtkörpers` mit einem `GM.Complex` würde `Ah-Solid(t1)` entweder gelöscht und überschrieben werden oder aber eine weitere Assoziation mit der Instanz `AhSolid(t2)` erzeugt werden. Der erste Fall bedeutete ein Überschreiben der im `RankerComplex(t1)` zusammengeführten Geometrien, was mit der Modellierung der `ZeitlichenRepräsentation` nicht sinnvoll wäre. Es wäre keine Historie der alten Geometrie von `Ah-Horizont` mehr vorhanden. Im zweiten Falle wäre völlig ungeklärt, welche Geometrie `Ah-Horizont` die gültige wäre, falls etwa zum Zwecke der Visualisierung, eine Abfrage über eine bestimmte Zeit an eine Datenbank gestellt würde. Das Objekt `BodenSchichtkörper` trägt ja keine Information über den zeitlichen Zusammenhang seiner mehreren Geometrien.

³⁹ Abgeleitete Assoziationen sind Assoziationen, deren konkrete Objektbeziehung aus den Werten anderer Objektbeziehungen abgeleitet werden können. Diese Ableitungsvorschrift kann dabei als Zusicherung, etwa in Form eines OCL-Ausdrucks, notiert werden. Sie werden, wie abgeleitete Attribute auch, mit einem vorangestellten Schrägstrich notiert (vgl. OESTERREICH 1998).

⁴⁰Die beschriebene Vorgehensweise fällt streng genommen in den Bereich der Implementierung des hier vorgestellten semantischen Modells. Dennoch muss ein reibungsloser Ablauf der Implementierung schon durch das Modell gewährleistet werden.

⁴¹Ein Instanzmodell repräsentiert, anders als ein Klassendiagramm, wirkliche Objekte der entsprechenden Klassen. Die Notation erfolgt ähnlich einem Klassendiagramm, nur sind die Objektamen unterstrichen. Die Klassen der Instanzen sind nach dem Doppelpunkt notiert. In einem Instanzdiagramm werden Assoziationsnamen nicht notiert (vgl. OESTERREICH 1998).

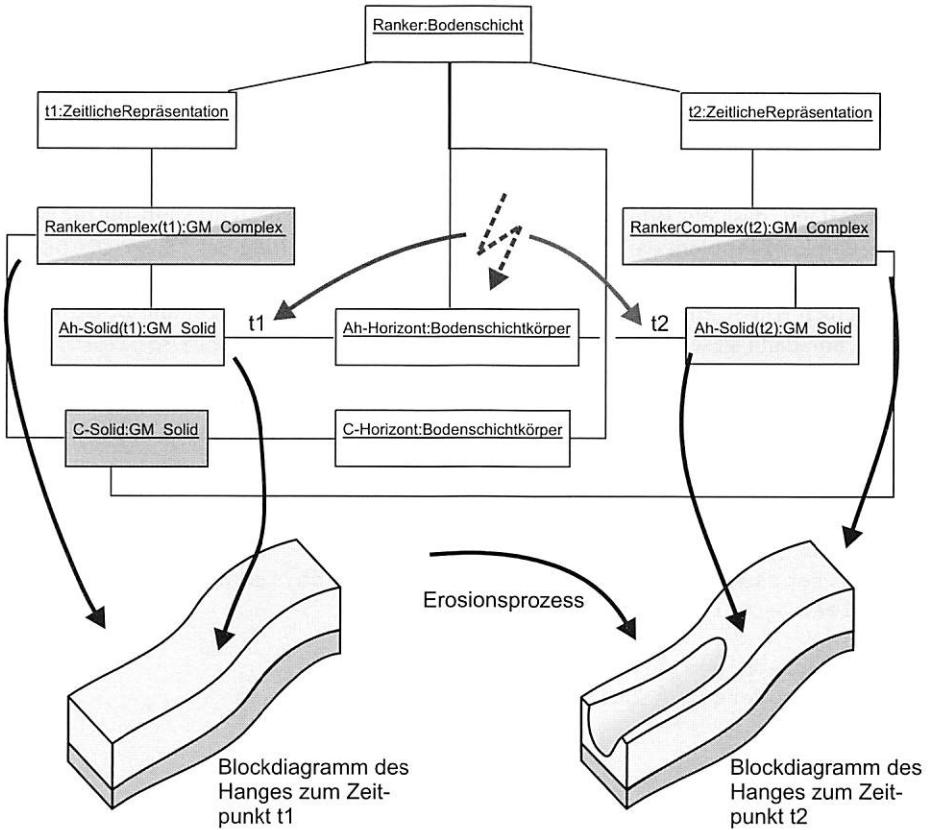


Abb. 3.8 Abgeleitete Assoziationen zur Wahrung der Integrität der ZeitlichenRepräsentation von Geobjekten

Die Assoziation der Klasse `_Schichtkörper` muss also aus einer zeitlich abhängigen Klasse, dem `GM_Complex` abgeleitet werden, um Inkonsistenzen oder Doppelrepräsentationen zu verhindern. Dasselbe gilt auch für die Komposition der `_Schicht` aus `_Schichtkörpern`, weil Instanzen der Spezialisierung dieser abstrakten Klasse u. U. mit einer in der Zeit wechselnden Anzahl von Unterklassen des `_Schichtkörpers` assoziiert sein können. Allgemein gilt, dass alle Assoziationen, und damit auch ihre Unterklassen, wie Aggregation und Komposition, von zeitlich abhängig modellierten Klassen mit zeitlich unabhängigen Klassen aus dem `GM_Complex` der Zeitlichen-Repräsentation eines `_Geobjektes` abgeleitet werden müssen.

`_Schicht` und `_Schichtkörper` realisieren zunächst nur eine direkte oder abgeleitete Assoziation zu einer Geometrie. Die eigentliche, durch die Fachbereiche der Geomorphologie festgelegte Bezeichnung der `_Schicht` sowie die Materialeigenschaften

ten der `_Schichtkörper` werden erst in der Spezialisierung dieser Klassen angegeben. Für das Beispiel von Bodenschichten, die in der Geographie eine übergeordnete Stellung einnehmen, ist diese Spezialisierung der beiden Klassen in `BodenSchicht` bzw. in `BodenSchichtkörper` in Abbildung 3.6 auf Seite 65 skizziert. Eine Bodenschicht erhält die optionalen Attribute *faoKlassifikation*, *bodentyp* und *horizontsymbol*, die auf die Genese des Bodenkörpers verweisen (SEMMELE 1993B).⁴² Der Umstand, dass ein Bodentyp aus mehreren Horizonten besteht, stellt für die Modellierung kein Problem dar. Die `_Schicht` als Spezialisierung der Klasse `_Geoobjekt` kann durch die geometrische Repräsentation als `GM.Complex` wiederum Objekte derselben Klasse enthalten. Die Attribute *faoKlassifikation* und *bodentyp* dürfen nur dann gesetzt werden, wenn die Methode *isMaximal(Boolean)* des die Schicht repräsentierenden `GM.Complexes` den Wert „wahr“ annimmt. In einem Datenbankschema wäre die mehrfache Belegung nicht funktional abhängiger Nicht-Schlüsselfelder ein Verstoß gegen die dritte Normalform (vgl. ULLMAN 1988). Auch dies lässt sich mit einer OCL-Formulierung fordern:⁴³

```
context _Schicht
this.repräsentiertdurch.repräsentiertdurch.isMaximal():
Boolean = False implies (
  (
    (faoKlassifikation = Null) and
    (bodentyp = Null)
  )
)
```

Wird eine `_Bodenschicht` durch ein `GM.Complex` repräsentiert, der maximal ist, ist dieses Objekt ein Boden. Andernfalls ist dies nicht der Fall und die Werte der Attribute *faoKlassifikation* und *bodentyp* sind nicht zu setzen. Ein Hang kann sich aus weiteren Objekten der Klasse `_Schicht` aufbauen, die dann allerdings durch einen anderen `GM.Complex` repräsentiert werden. Das Setzen des Attributes *isMaximal(Boolean)* einer Schicht verhindert also nicht das Auftreten weiterer `GM.Complexe` innerhalb eines Hanges.⁴⁴

Die von `_Schichtkörper` abgeleitete Klasse `BodenSchichtkörper` enthält nun die eigentlich geomorphologisch relevanten Eigenschaften des Materials, welches die Schicht aufbaut. Für das Beispiel der Klasse `BodenSchichtkörper` ist dies eine Reihe von Attributen, die sich u. a. aus *farbe*, *hydromorphiemerkmal* und

⁴²Die für alpine Gebiete häufigste Klassifikation nach der FAO-UNESCO 1988 dürfte der Leptosol, ein schwach ausgebildeter Boden auf Festgestein sein. In der auf MÜCKENHAUSEN 1962 zurückgehenden Bodensystematik der Bundesrepublik wäre dies der Bodentyp des Rankers (vgl. AG BODEN 1996).

⁴³Dabei ist der Wert „Null“ ein Nullpointer, der besagt, dass ein entsprechender Wert nicht gesetzt ist. „Null“ ist dabei in keinem Fall mit der Zahl 0 gleichzusetzen.

⁴⁴Durch diese Modellierung sind also auch Hänge mit Paläoböden, also ehemals an der Oberfläche vorhandene und durch Akkumulationsprozesse überfahrene Böden repräsentierbar.

bodenart zusammensetzt. Das letzte Attribut ist die Bezeichnung der Korngrößenzusammensetzung eines Materials und ist daher auch für die Beschreibung von Schutthalden interessant. Die Liste der hier angegebenen Attribute kann allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, was die Aussagekraft des Modells an dieser Stelle jedoch nicht beeinflusst. Das Modell ist an dieser Stelle im Sinne von GRUBER 1993 monoton, d. h. ohne Änderungen des bestehenden Modells erweiterbar.

Ein *_Schichtkörper* wird durch mindestens zwei Objekte der Klasse *Geoobjektfläche* begrenzt. Diese Klasse ist dabei keine Spezialisierung von *_Geoobjekt*, da es sich um einen Teil der Grenze *GM.Boundary* (vgl. Kapitel 3.2) eines *GM.Solid*, also eines Volumenkörpers handelt. Sie ist folglich mit der Klasse *GM.Surface* assoziiert. Die Klasse *Geoobjektfläche* weist die Attribute *exposition* sowie *hangneigung* vom Typ *Float* auf. Diese Attribute können also auch Flächen zugewiesen werden, die sich nicht an der Erdoberfläche befinden, sondern umhüllende Flächen von unterirdischen Schichtkörpern. Dies ist insbesondere für die Analyse des für die Geomorphogenese wichtigen Paläoreliefs von Bedeutung (vgl. Kapitel 2.2.2). Da eine *Geoobjektfläche* die umhüllende eines *_Schichtkörpers* und damit einen Teil einer *_Schicht* repräsentiert, muss gewährleistet sein, dass das mit ihr assoziierte *GM.Surface* innerhalb des für die Topologie wichtigen *GM.Complex* der *_Schicht* enthalten ist. Auch diese Bedingung kann wie oben in Form eines OCL-Ausdrucks gefordert werden, worauf hier verzichtet wurde.

Als optionales Attribut erhält die *Geoobjektfläche* ein *alter* vom Typ *Zeitspanne*. Dieses Attribut, steht nur scheinbar im Widerspruch zur Assoziation mit der Klasse *ZeitlicheRepräsentation* eines *_Geoobjektes* und damit der *_Schicht* sowie dem Attribut *alter* eines *_Geoobjektes*, zu der der entsprechende *Schichtkörper* und damit auch die *Geoobjektfläche* selbst gehört. Er hat dennoch seine semantische Berechtigung. Wird etwa eine Schicht M_1 in Abbildung 3.7 durch Akkumulation gebildet, definiert dieser Vorgang ihr genetisches Alter, das Attribut des *_Geoobjektes* *_Schicht*. Durch einen Erosionsprozess, der den Platz für eine weitere zukünftige Schicht (M_2) schaffen kann, verändert sich also die *Geoobjektfläche* der Schicht M_1 zu diesem neuerlich gegebenen Zeitpunkt. Damit verändert sich natürlich auch die *ZeitlicheRepräsentation* der *_Schicht*. Durch einen Akkumulationsprozess wird die Schicht M_1 an dieser Stelle nun durch M_2 abgedeckt.⁴⁵ Sie kann aber an anderer Stelle durch einen weiteren Prozess verändert werden, ohne dass die zuvor veränderte *Geoobjektfläche* von dieser Änderung betroffen wäre. Für die zeitliche Rekonstruktion der Genese des gesamten *Geoobjektes* ist es also unabdingbar, den einzelnen Objekten der Klasse *Geoobjektfläche* ein eigenes Alter zuzuweisen und damit die Datierung einzelner Prozesse zu ermöglichen.

⁴⁵ Der Zeitpunkt der Abdeckung einer ehemaligen Oberfläche lässt sich erfolgreich durch Optisch Stimulierte Lumineszenz (OSL) ermitteln. Hierbei handelt es sich um eine dosimetrische Datierungsmethode, bei der die Akkumulation von Strahlenschäden im Mineral den zeitabhängigen Prozess bildet. Wird das Material abgedeckt, bilden sich diese Strahlenschäden in Abhängigkeit der Zeit zurück (vgl. LANG 1996; AITKEN 1998).

Da es sich also bei der Geoobjektfläche um einen Teil der Grenze eines „Geoobjektes“ handelt, muss trotz obiger Überlegung bei Veränderung seiner Grenze auch dessen zeitliche Repräsentation aktualisiert werden. Dies ist durch die Methode *aktualisiere (Geoobjekt:self.Geoobjekt):ZeitlicheRepräsentation* gefordert. Hierbei wird durch die Bezeichnung *self* die zeitliche Repräsentation des „Geoobjektes“ geändert, zu der die Geoobjektfläche gehört. Es handelt sich hier also um die Formulierung des Aktionsteiles eines Triggers, der in Datenbankmanagementsystemen dann eingesetzt wird, wenn durch die Veränderung eines Attributes einer Klasse ein oder mehrere Attribute derselben oder einer anderen Klasse aus Gründen der Konsistenz ebenfalls geändert werden müssen (vgl. KEMPER und EICKLER 1999). Die Realisierung der Methode fällt dann in den Bereich der Implementierung und nicht in die formal semantische Modellierung.

Die Klasse *Hang* hat immer eine Grenzfläche zur Atmosphäre. Ein Teil der begrenzenden Oberfläche eines 3D-Hanges wird also durch eine sichtbare Relieffläche gebildet, die sich direkt in einem DHM analysieren lässt. Die Klasse *Relieffläche* ist dabei ebenfalls keine Spezialisierung von „Geoobjekt“, sondern von Geoobjektfläche abgeleitet, die wiederum eine Assoziation zur Klasse *GM_Surface* aufweist. Die *Relieffläche* übernimmt durch diese Vererbung ebenfalls die Attribute *exposition* und *hangneigung*. Auch die Methode *aktualisiere (Geoobjekt:self.Geoobjekt):ZeitlicheRepräsentation* wird an die *Relieffläche* vererbt, wodurch eine Konsistenz des Modells in Bezug auf die Veränderung der Form gewährleistet ist. Zusätzlich zu diesen Eigenschaften wird die *Relieffläche* durch das Attribut *hatVegetation* charakterisiert. Dieses Attribut vom Typ *Boolean* ist für die geomorphologische Analyse des Reliefs deshalb von Bedeutung, weil eine vorhandene Vegetationsdecke ein Zeichen relativer Ruhe im Sinne einer Akkumulation von Material oder der die Vegetation zerstörenden Erosionsprozesse ist. Auch kann *Vegetation* an Felswänden auf das Vorkommen von Lockermaterial auf Leisten oder Klüften hinweisen (vgl. DALRYMPLE et al. 1968).

Die *Relieffläche* kann eine Assoziation zu einem, keinem oder mehreren Instanzen der Klasse *Hangsegment* besitzen. Das *Hangsegment* ist nicht von „Geoobjekt“ abgeleitet, es weist lediglich eine Assoziation zu *GM_Surface* auf. Neben den Attributen *hangneigung* und *exposition* ist das *Hangsegment* durch zwei Attribute für die Wölbung (engl.: *curvature*) charakterisiert. Dabei meint *horizontalwölbung* die Veränderung der Exposition, die der Isohypse gleich kommt, die *vertikalwölbung* die der Neigungsstärke in Neigungsrichtung (vgl. DIKAU und FRIEDRICH 1999). Die Wölbung als zweite Ableitung der Höhe (ZEVEBERGEN und THORNE 1987; MOORE et al. 1991) ist damit positiv bei konkaven und negativ bei konvexen Längs- oder Querprofilen.⁴⁶ Das *Hangsegment* repräsentiert damit die in der Geomorphometrie wichtige Einheit des Formenelementes, die durch eine einheitli-

⁴⁶Dass die Bestimmung der Wölbung unabhängig vom verwendeten Algorithmus hinreichend stabil ist, zeigen SCHMIDT et al. 2003.

che Wölbung in vertikaler und horizontaler Richtung gekennzeichnet ist (DIKAU 1988). Ihm kommt damit als Analyseergebnis der Oberflächeneigenschaft des „Geobjektes“ eine vergleichbare Funktion wie die der Signatur in der Kartographie zu. Die Assoziation der Relieffläche zum Hangsegment ist infolgedessen im Gegensatz zu den auf Seite 67f. diskutierten Assoziationen ist keine abgeleitete. Einem Hang sind der Anzahl seiner ZeitlichenRepräsentationen entsprechend viele Reliefflächen zugeordnet. Ein oder mehrere Hangsegmente klassifizieren also immer die Relieffläche einer ZeitlichenRepräsentation und sind somit nur von der Geometrie der Relieffläche nicht aber von deren zeitlicher Gültigkeit abhängig. Die Generierung von Instanzen der Hangsegmente kommt also der Methode *boundary ()* des ISO Profils in Abbildung 3.1 gleich.

Die weitere Begrenzung der Klasse Hang nach oben, unten oder zur Seite erfolgt durch mindestens zwei Objekte der Klasse „Geobjekt“ (vgl. DEHN et al. 2001). Diese Assoziation lässt natürlich auch Spezialisierungen der Oberklasse, also etwa eine Klasse Kante (vgl. Abbildung 3.12) oder aber einen weiteren Hang zu (vgl. Kapitel 3.3.5). Die dem Hang assoziierte Klasse Relieffläche zählt nicht zu den mindestens zwei geforderten Begrenzungen, sie sind keine „Geobjekte“. Auch wird diese Anforderung nicht durch ein Objekt der Klasse „Schicht“ erfüllt. Hierbei handelt es sich um eine existenzabhängige Aggregation, was durch die gefüllte Raute der Assoziation zwischen Hang und „Schicht“ und durch die entsprechenden Assoziationsnamen zum Ausdruck kommt. Der Hang *besteht aus* einer oder mehreren „Schichten“ und wird *begrenzt durch* mindestens zwei Geobjekte.

Dem Hang selbst sind keine definitorischen Eigenschaften in Form von Zusicherungen etwa des Attributes *hangneigung* zugeordnet. Dies mag verwirren, stellt man sich doch unter einem Hang eine geneigte Fläche von mindestens einer gewissen Größe der Hangneigung vor. Die Entscheidung, eine entsprechende Zusicherung nicht zu modellieren, entspringt zum einen der Tatsache der vielfältigen und offenen Definition des Terminus Hang, der nach CAINE 1974 auch den Überflutungsbereich von Gerinnen umfassen kann, der i. d. R. wenig bis gar nicht geneigt ist (vgl. Abbildung 2.10). Ein in der Hierarchie weit unten angesiedelter Hang wird also immer wieder geforderte Mindestgrößen der Hangneigung unterschreiten können. Zum anderen gibt es keine verbindliche Eigenschaft der Hangneigung in der funktionalen Geomorphologie. Natürlich brauchen Hangprozesse als Voraussetzung eine minimale Hangneigung, die für den Kriechprozess der Gellisolfuktion von WILLIAMS und SMITH 1991 und AHNERT 1996 etwa mit 2° angegeben werden. Ein Abfließen von aquatischen Prozessen ist aber sicherlich auch unterhalb dieser Hangneigung möglich. Hinzu kommt, dass durch eine definitorische Eigenschaft der minimalen Hangneigung in einem DHM nahezu alles als Hang klassifiziert werden würde (DEHN et al. 2001). Die *Neigung* einer Fläche ist also offensichtlich aus Sicht der Geomorphologie kein hinreichendes Kriterium für die Klassifizierung als *Hang* und eignet sich folglich auch nicht für eine formale semantische Definition. Die tatsächliche Hangneigung eines Hanges wird, wie oben beschrieben, als Attribut der Geobjektfläche, aus denen sich die Re-

lieffläche desselben zusammensetzt, gegeben. Dabei wird hier nicht spezifiziert, wie die Berechnung der Hangneigung erfolgen soll.

3.3.3 Bedarf es einer weiteren Spezialisierung der Klasse Hang?

Dem obigen, allgemeinen Konzept des Hanges steht augenscheinlich eine heterogene Klassifizierung von Hangtypen im alpinen und periglazialen Raum seitens der Geomorphologie entgegen. So beschreiben bspw. STINGL und GARLEFF 1983 Glatthänge in den Hochanden Argentiniens mit gradlinigem bis leicht konvexem Hangprofil. Ihre Hangneigungen reichen von wenig geneigt bis zu 35° . Die Schuttbedeckung ist sehr gering und wird nicht als Sturzmasse oberhalb gelegener Wände, sondern als Erosionsprodukt der Felshänge selbst gesehen (HAGEDORN 1970). Rezente Glatthangbildung findet unabhängig der Gesteinsart statt, wie u. a. HAGEDORN 1970 postuliert. Er geht davon aus, dass die Bildung der Glatthänge nicht an ein bestimmtes Ausgangsgestein gebunden ist, wohl aber durch ein semi-arides Klima in Verbindung mit Kalkstein begünstigt wird.

Der Terminus Glatthang wurde von SPREIZER 1957 eingeführt und bezeichnet einen ungliederten Hang mit geradem Querprofil und einer Neigung von etwa 27° - 35° . Beobachtet wurden diese Phänomene allerdings schon von RICHTER 1900, der sie als „schiefe Denudationsflächen“ ansprach (vgl. HÖLLERMANN 1983). Diese können dann mit einer dünnen Schuttdecke überzogen oder aber als „nackter“ Felshang auftreten. Diese nackten Glatthänge können abgeschliffen wirken, jedoch kommen auch Hänge mit relativ rauem Mikrorelief vor. Glatthänge brechen am oberen Ende oft in einem scharfen Grat gegen einen Steilabfall der ihnen entgegengesetzten Kammseite ab. FRENCH 1996 ordnet die Glatthänge den periglazialen Hängen zu, bei denen Schuttzufuhr und -abtransport in etwa ausgeglichen sind. Das Ergebnis sei ein Hang mit einer in Bezug auf das Ausgangsgestein nahezu parallelen Schuttbedeckung. Diese so beschriebenen „Richterschen Denudationsböschungen“ wurden zu einem wesentlichen Objekt mathematischer Überlegungen zur Rückverwitterung freier Felswände. Die von LEHMANN 1933, BAKKER und LE HEUX 1947, BAKKER und LE HEUX 1950 und ARMSTRONG 1987 seien hier als Beispiel für in der Literatur viel beachteten Modelle genannt.

Aus der Sicht der oben diskutierten semantischen Modellierung stellt sich nun die Frage, ob es für das oben beschriebene Beispiel eines speziellen Hangtyps mit einer eigenen Repräsentation als eigenständige Klasse bedarf. Dazu sollen hier kurz die oben getroffenen Aussagen betrachtet und die Möglichkeit der Repräsentation durch das formale semantische Modell erläutert werden.

Hänge setzen sich aus Schichten zusammen, die ihrerseits aus Schichtkörpern bestehen. Die Eigenschaften des Materials werden also durch diese beiden Klassen bzw. deren Spezialisierungen festgelegt. Auch erhält der Hang durch diese Klasse

seine Geometrie. Der Hang selbst hat neben dem Attribut *typ* und seiner Assoziation *contains* zu sich selbst keine Möglichkeiten, Geometrie oder Materialeigenschaften zu repräsentieren. Auch ist der Klasse *Hang* keine Mindest- oder Maximalgröße zugeordnet. Je nach Betrachtungsmaßstab kann also die eine Talflanke eines alpinen Tals ebenso als *Hang* aufgefasst werden, wie eine Schutthalde. Die wesentlichen Unterschiede sind aus geomorphologischer Sicht das Material sowie die Geometrie, beides gegeben durch *_Schicht* und *_Schichtkörper*, die Stellung innerhalb der Hierarchie mit anderen Landformen und die formenprägenden Prozesse, die die Genese der Landform prägen. Das Erste kann durch die Assoziation des Hanges *contains* mit anderen Vertretern seiner Klasse oder Unterklassen realisiert werden, bis die Methode *isMaximal(Boolean)* den Wert „wahr“ annimmt. Ein Talhang beinhaltet also eine oder mehrere Schutthalden. Die Information, dass es sich um einen Talhang bzw. eine Schutthalde handelt, wird im Attribut *typ* repräsentiert. Das Zweite muss durch eine Modellierung der für den entsprechenden Typ des Hanges wichtigen Prozesse erfolgen. Wird ein Hang vom Typ *Schutthalde* modelliert, muss mit ihm wohl zumindest der Prozess des Sturzes assoziiert werden. Der übergeordnete Hang mag darüber hinaus noch weitere Prozesse umfassen, mit denen die Objekte, aus denen er zusammengesetzt ist, miteinander in Beziehung stehen.

Die Klasse *Hang* muss auf der Ebene des semantischen Modells also nicht zwingend in unzähligen Typen spezialisiert werden, um die Phänomene der Landoberfläche zu fassen. Eine Schutthalde weist im Gegensatz zum oben skizzierten Glatthang, der im Gegensatz zur Schutthalde eine Erosionsform ist, eine andere innere Struktur der ihn aufbauenden Schichten auf. Allerdings muss das bestehende Modell um eine Komponente der Prozesse erweitert werden, was in Kapitel 3.4.1 erfolgen soll. Damit kann ein Glatthang neben der Unterscheidung durch die Typbezeichnung auch durch die mit ihm assoziierten Prozesse semantisch eindeutig von der Schutthalde abgegrenzt werden.

3.3.4 Die Klasse *wand*

Der Begriff *Wand* ist zunächst einmal ein umgangssprachlicher und in dieser Funktion mit vielen Vorstellungen, insbesondere aber mit der Eigenart verbunden, steil oder stark geneigt zu sein. Für LESER et al. 1992B stellen Wände, die sie synonym mit dem Begriff *Steilwand* verwenden, Hänge dar, die eine Hangneigung von über 60° aufweisen. Ihnen kann der Überhang mit mehr als 90° Hangneigung folgen. Dies ist also ein rein geometrisches Kriterium, das unabhängig vom Material der geneigten Fläche angewendet wird. So kann z. B. auch Löss, ein äolisches Sediment, das hauptsächlich aus Schluff mit einer Korngröße von 0,002 - 0,063 mm besteht, nahezu vertikale Wände aufbauen (PÉCSI und RICHTER 1996, widersprüchlich dazu LOHNES und HANDY 1968). Häufiger als der Begriff *Wand*, der mitunter in Wörter- oder Lehrbüchern der Geomorphologie gar nicht vorkommt (vgl. KENDE 1947), finden sich Wortbildungen mit ergänzenden Konnotationen. RASEMANN 2004 definiert *Steilwand* als freie Felsflächen im Hochgebirge, bei denen die Hangneigung so groß ist, dass lösendes Ver-

witterungsmaterial nicht in situ verbleiben kann. Es stürzt herab und bildet am Fuß der Steilwand eine Schutthalde. Dabei variere die Hangneigung der Steilwand nach Geologie und Lithologie, auch seien senkrechte Wände und Überhänge möglich. DALRYMPLE et al. 1968 nennen die Fallwand (engl.: *fall face*), die eine Hangneigung über 45° normalerweise aber über 65° aufweist. Hier wird also der prozessuale Charakter eines Geobjektes in den Vordergrund gerückt. BÜDEL 1970 stellt fest, dass kaum eine Wand auf der Erde je senkrecht sei. Ihre Abschrägung richte sich vielmehr nach der mechanischen Angreifbarkeit des nackten Gesteins beim gerade herrschenden Klima. Mit 63° Hangneigung komme aber eine für die Alpen häufige Steilheit einer solchen Steinschlagwand vor. In der Betonung des Ausgangsmaterials für die geometrische Ausprägung der Wand wird er von SCHUMM und CHORLEY 1966 bestätigt. Dies sehen auch LESER et al. 1992A so und definieren die Felswand als eine steile Hangform ohne Verwitterungsdecke, deren Formenentwicklung sich an der Gesteinsart, der Gesteinslagerung und der Klüftigkeit orientiert. Hier wird also Struktur des Ausgangsmaterials und mögliche Angriffspunkte für Verwitterungs- und Erosionsprozesse (vgl. Kapitel 2.2.2.1) in die Betrachtung einbezogen. SELBY et al. 1988 verwenden den Begriff Felshang (engl.: *rock slope*), den sie im Wesentlichen frei von Boden- und Schuttbedeckung und als einen nahezu einheitlichen Körper exponierten Felsens sehen. LUCKMAN 1976 betont die Interaktion der besonderen Form der Wand mit dem Prozess. So steuerten geologische Kontrollgrößen den Charakter des Schutts und die Natur des Transportes. Daher sei die dreidimensionale Form der Felswand von unbedingter Wichtigkeit. Massive, vertikale Wände, so LUCKMAN 1976 weiter, seien bevorzugt für große primäre Felsstürze, wohingegen geneigte oder mit vielen Leisten oder Bänken (engl.: *bench*) ausgestattete Wände durch viele kleine, sekundäre Felsstürze charakterisiert seien.⁴⁷

Quelle	Begriff	Eigenschaft	Hangneigung
BÜDEL 1970	Wand	kaum senkrecht	≈ 63°
BLOOM 1998	Scarp	steiler, abrupter Hang oder Cliff, der durch tektonische Aktivität, Erosion oder Akkumulation entstehen kann	
DALRYMPLE et al. 1968	Fall Face	Steinschlagwand	≥ 45° normalerweise aber ≥ 65°
LESER et al. 1992B	Wand / Steilwand		≥ 60°
RASEMANN 2004	Steilwand	Fläche, so steil, dass loses Material nicht auf ihr verweilen kann	-
SAVIGEAR 1960	Cliff	geneigte Fläche	≥ 40°
YOUNG 1978	Cliff, synonym mit Free Face	Teile eines Hanges aus purem Fels	≥ 45°

Tab. 3.2 Beschreibung von Wänden in der gesichteten Literatur

⁴⁷LUCKMAN 1976 vollzieht hier die in Kapitel 2.2.2.1 diskutierte Unterscheidung der Begriffe Steinschlag und Felssturz in Abhängigkeit des transportierten Volumens offensichtlich nicht nach.

Ähnlich wie bei dem Begriff Hang findet sich also auch für die Wand keine einheitliche Definition eines in der Geomorphologie als Terminus verwendeten Begriffes, was besonders bei einer in Tabelle 3.2 vorgenommenen Zusammenschau der oben genannten Definitionsversuche deutlich wird. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass sowohl im Deutschen als auch im Englischen der Begriff Kliff (engl.: *cliff*) als Synonym für Wände verwendet wird. So benutzen bspw. YOUNG 1978, CAINE 1982 und HUTCHINSON 1998 den Begriff in der oben umschriebenen Bedeutung, während CARSON und KIRKBY 1972 das Wort Kliffwand (engl.: *cliff face*) anführen. Auch der Begriff Frostkliff kommt vor (vgl. STÄBLEIN 1983). Im Wesentlichen wird der Begriff Kliff nach LESER et al. 1992A aber für eine mit der Abrasionsfläche einer Steilküste vergesellschafteten Form verwendet, wie dies u. a. auch PANZER 1949 und KALLETAT 1999 tun. Er stellt damit einen Begriff der hier nicht näher betrachteten Küstengeomorphologie dar.

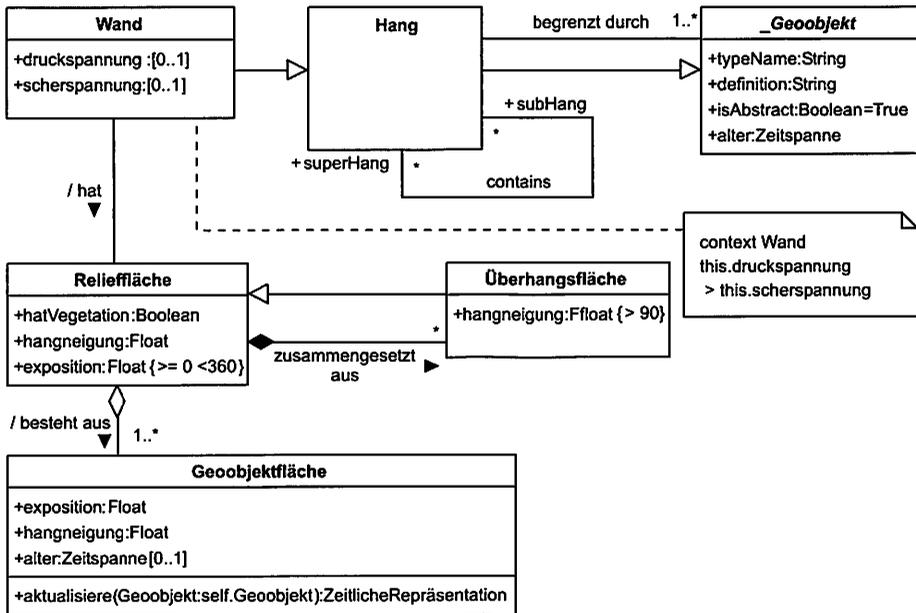


Abb. 3.9 Repräsentation der Klasse Wand

Der expliziten Lesart von LESER et al. 1992B folgend, dass Wände im Grunde Hänge mit einer bestimmten Eigenschaft seien, wird die Klasse Wand in dem hier vorgestellten semantischen Modell in Abbildung 3.9 als Spezialisierung von Hang repräsentiert. Der Forderung nach einer definitorischen Mindesthangneigung, die sie ebenso wie DALRYMPLE et al. 1968 oder BÜDEL 1970 stellen, kann jedoch nicht nachgegeben werden. Dies hat hauptsächlich drei Gründe. Zum einen werden in der zitierten Literatur

mehrere oft widersprüchliche Werte der minimalen Hangneigung einer Wand angeben. Zum anderen ist die Hangneigung stark von der Art und dem Verwitterungszustand des die Wand aufbauenden Materials abhängig, also hochgradig variabel. Zum Dritten stünde ein willkürlich niedrig gewählter Neigungswinkel mit dem Ziel, alle erdenklichen Wände dieser Erde erfassen zu wollen, im Widerspruch zu Hangneigungen von Hängen, die reine Akkumulationsformen darstellen, wie etwa die Schutthalden. Diese können, wie die Abbildung 2.8 auf Seite 42 mit ihren Beispielen zeigt, Hangneigungen von über 50° annehmen. Dies ist insbesondere dann zu beobachten, wenn der Hang von einem Gerinne angeschnitten und damit übersteilt wird (vgl. CARSON 1976), sich also auf Grund externer Einwirkung nicht in einem Gleichgewicht zwischen Hangneigung und Festigkeit des Materials befindet. Vielmehr soll hier der Definition von LUCKMAN 1976 und RASEMANN 2004 gefolgt werden, die als Kriterium für eine Wand festlegen, dass verwittertes Material aus der Wand sofort weiter transportiert wird. Daraus folgt, dass das Ausgangsmaterial, aus dem die Wand aufgebaut ist zumindest teilweise zu sehen sein muss, eine Aussage, die auch von LESER et al. 1992B und SELBY et al. 1988 gestützt wird. Das weggeführte Material sammelt sich unterhalb der Wand oder aber wird durch andere Prozesse als die der gravitativen Massenbewegung an der Wand erodiert. Hierbei ist es völlig nebensächlich, ob das verwitterte Material durch einen primären Fall oder durch Rutschen oder Gleiten aus der Wand abtransportiert wird. Ein Fallen als Entscheidungskriterium für eine Wand zu nennen, wie dies DALRYMPLE et al. 1968 tun, scheint nicht sinnvoll, insbesondere weil sie die Wände ja schon ab Hangneigungen von 45° definieren. Die Bedingung des sofortigen Abtransportes von verwittertem Material lässt sich allgemein durch die in Abbildung 2.6 auf Seite 37 verdeutlichten Kräfte der Scher- oder Schubspannung τ und der Druck- oder Normalspannung σ fordern. Übersteigt die Schubspannung die Scherspannung von neuerlich verwittertem Material, wird es sogar ohne externe Energiezufuhr herabstürzen oder rutschen. Die Forderung ist in der Klasse *Wand* durch die optionalen Parameter der im Gelände sicherlich schwer zu messenden Größen und einer entsprechenden Bedingung in Form eines OCL-Kommentares in Abbildung 3.9 formuliert.

Für eine Wand besteht wie für einen Hang auch eine Assoziation zur Klasse *Relieffläche*, die sich aus Objekten der Klasse *Geobjektfläche* zusammensetzt. Die *Relieffläche* kann bei Wänden teilweise überhängend sein. Diese besondere Eigenschaft der *Relieffläche* wird in der hier vorgestellten Modellierung durch eine Spezialisierung derselben in eine Klasse *Überhangsfläche* berücksichtigt. Sie hat, ebenso wie die *Geobjektfläche* auch, das Attribut *hangneigung*, das aber mit der Zusicherung, größer als 90° zu sein, spezifiziert ist. Diese Zusicherung erfolgt in den geschweiften Klammern, die nach dem Typ des Attributes stehen (vgl. Kapitel 2.1.3) und stellt damit eine definitorische Aussage über das Konzept *Überhangsfläche* dar (vgl. REIMER 1991). Die *Relieffläche* setzt sich wiederum aus den Objekten der Klasse *Überhangsfläche* zusammen, wie sie aus denen der Klasse *Geobj-*

jektfläche besteht.⁴⁸ Der Unterschied ist aber zum einen, dass die Aggregation optional ist, da nicht jede Relieffläche überhängende Teilflächen aufweisen muss und zum anderen, dass sie existenzabhängig ist. Letzteres wird durch die Eigenschaft der Relieffläche deutlich, ein Teil zwischen Grenzfläche des Georeliefs und Atmosphäre zu sein (vgl. Kapitel 3.3.2). Wird die Geoobjektfläche durch Erosion zerstört oder durch Akkumulation verschüttet, endet auch die Existenz des Objektes der Überhangsfläche.

Im Gegensatz zu LESER et al. 1992B wird hier also der Überhang nicht als eigenständiges Geoobjekt, das sich wegen seiner Hangneigung von der Wand unterscheidet, modelliert, sondern als eine Eigenschaft der sichtbaren Geoobjektfläche der Klasse Wand. Dies ist sinnvoll, weil der innere, durch die Objekte der Klasse `_Schicht` repräsentierte Aufbau einer Wand sich nicht von der eines Überhanges unterscheidet. Es ist lediglich eine geometrische Besonderheit der Klasse Wand.

3.3.5 Die Klasse `Felswand`

Die in Abbildung 3.10 dargestellte Klasse `Felswand` des hier vorgestellten semantischen Modells ist eine Spezialisierung der Klasse `Wand` und damit ebenfalls ein `Hang`. Das entscheidende Kriterium bei der Unterscheidung von Felswänden zu anderen, etwa aus Löss, Brekzien oder Geröll⁴⁹ aufgebauten Wänden ist, dass sie aus Schichten des Anstehenden, also des unveränderten geologischen Substrates (vgl. HANSEN 1984) aufgebaut sind. Eine Klasse `Felswand` besteht also aus Objekten der Klasse `GeologischeSchicht`, die eine Spezialisierung einer `_Schicht` ist.

Eine `GeologischeSchicht` besteht wie jede `Schicht` aus verschiedenen `Schichtkörpern` (vgl. Kapitel 3.3.2), die im Falle der `Felswand` zu der Klasse `GeologischerSchichtkörper` spezialisiert wird und für das Anstehende charakteristische Attribute aufweist. Auch hier ist die Komposition der `GeologischenSchicht` aus der Klasse `GeologischerSchichtkörper` eine abgeleitete, wie auf S. 67 f. diskutiert wurde. Die Attribute der Klasse `GeologischeSchicht` sind `gesteinsart`, `lithologie`, `äon`, `ära`, `periode`, `epoche` und `alter`. Die Werte, die das Attribut `gesteinsart` annehmen kann, werden durch eine `<<codelist>>`⁵⁰ repräsentiert, welche die in der Geologie drei üblichsten Gesteinsarten Magmatit, Sedimentgestein und Metarmorphit enthält (vgl. PRESS und SIEVER 1995). Diese Auflistung kann natürlich nicht den Anspruch der Vollständigkeit erheben. Die Attribu-

⁴⁸Die Namen der Assoziationen *besteht aus* und *zusammengesetzt aus* könnten vom semantischen Standpunkt aus betrachtet identisch sein. UML verlangt aber eine eindeutige Bezeichnung dieser Assoziationen, die hinsichtlich der Leserichtung von einer Klasse ausgehen.

⁴⁹Der Begriff Brekzie bezeichnet ein aus kantigen Bruchstücken zusammengesetztes Gestein, wohingegen Geröll durch fluviale Prozesse abgelagert wird.

⁵⁰Eine `<<codelist>>` ist ein Stereotyp, also eine Erweiterung des Metamodells von UML (HITZ und KAPPEL 1999), die eine Werteliste (engl.: *enumeration*) mit möglichen Werten als `String` repräsentiert. Sie wird in der Nähe der durch die `<<codelist>>` zu erweiternde Klasse im UML-Diagramm notiert.

te *äon*, *ära*, *periode* und *epoche* geben das Entstehungsalter des Ausgangsgesteins der Geologischen Schicht in Form einer geologischen Zeitskala an und werden als *String* repräsentiert. Hierbei handelt es sich um in den Geowissenschaften allgemein gültige Bezeichnungen von Erdzeitaltern, die einer jeweiligen Zeitspanne entsprechen und das Alter der Entstehung des Gesteins bezeichnen (vgl. AHNERT 1996).⁵¹ Die wohl eindrucksvollsten Beispiele von Felswänden, die aus mehrere geologischen Schichten unterschiedlicher Erdzeitalter aufgebaut sind, finden sich im Coon Creek (vgl. KIMBER et al. 2002).

Wie jeder *Schichtkörper* wird auch die Klasse *Geologischer Schichtkörper* von mindestens zwei Instanzen der Klasse *Geoobjektfläche* begrenzt⁵². Die Klasse *Relieffläche*, die sich, wie in Kapitel 3.3.4 diskutiert, aus mindestens einem Objekt dieser Klasse aggregiert, wird zur besonderen Kennzeichnung einer Felswand neben der Überhangsfläche in eine *Felsfläche* mit besonderen Eigenschaften spezialisiert. Zusätzlich zum geerbten Attribut *hatVegetation*, der bei einer Felsfläche an angewitterten Stellen (engl.: *planes of weakness*) durchaus den Wert „wahr“ annehmen kann, weist die *Felsfläche* Mikrostrukturen auf. Diese werden hier allerdings nicht in Form von Klassen oder einem Typ *String*, sondern in Form einer `<<codelist>>` repräsentiert. Auch diese Aufzählung erhebt nicht den Anspruch der Vollständigkeit, enthält aber die wichtigsten Merkmale, die sich an Felsflächen im alpinen Raum beobachten lassen. Dazu gehören neben Gletscherschrammen auch Verwitterungsspuren im Pikobereich (vgl. Abbildung 2.5), wie die Karrenverwitterung im Karst⁵³ und Lochverwitterung, die bei Sandsteinen zu beobachten ist (vgl. AHNERT 1996). Die *Felsfläche* charakterisiert dabei die besondere Stelle des Reliefs, an der das Anstehende als Primär-speicher direkt den exogenen Prozessen, die durch das Klimasystem angetrieben werden, ausgesetzt ist und den lokalen Beginn einer Sedimentkaskade bildet (vgl. Kapitel 2.2.3.1).

⁵¹Wir befinden uns zur Zeit in der Epoche des Holozäns (10000 Jahre v. h. - heute), die in die Periode des Quartärs (1,6 Mio. Jahre v. h. - 10000 v. h.) und damit in die Ära des Känozoikums (65 Mio. Jahre v. h. - heute) des Äons Phanerozoikum (570 Mio. Jahre v. h. - heute) fällt (HARLAND et al. 1986).

⁵²Das Alter einer an der Oberfläche ausbeißenden (s. Fußnote 54 auf S. 82) Felswand kann anders als eine unterirdische Geoobjektfläche (vgl. Fußnote 45 auf S. 71) neben der direkten Beobachtung ihrer Veränderung auch durch kosmogene Nuklide, die bereits 1928 von PANETH et al. 1928 entdeckt wurden, ermittelt werden. Das Prinzip der Methode beruht auf der Akkumulation kosmogener Strahlung auf Oberflächen der Erde (vgl. MERCHEL 2005).

⁵³Unter Karst werden Landformen verstanden, die durch vorherrschende Lösungsverwitterung geprägt sind. Karst kann nur bei Gesteinen wirken, die durch flüssiges Wasser gelöst werden können, wie etwa bei Kalk, Dolomit, Halit (Steinsalz) oder Sylvit (Kalisalz) (vgl. FORD und WILLIAMS 1989). Auch hier ist also das Ausgangsgestein ein wesentlicher Faktor bei der Wirksamkeit des formenbildenden Prozesses.

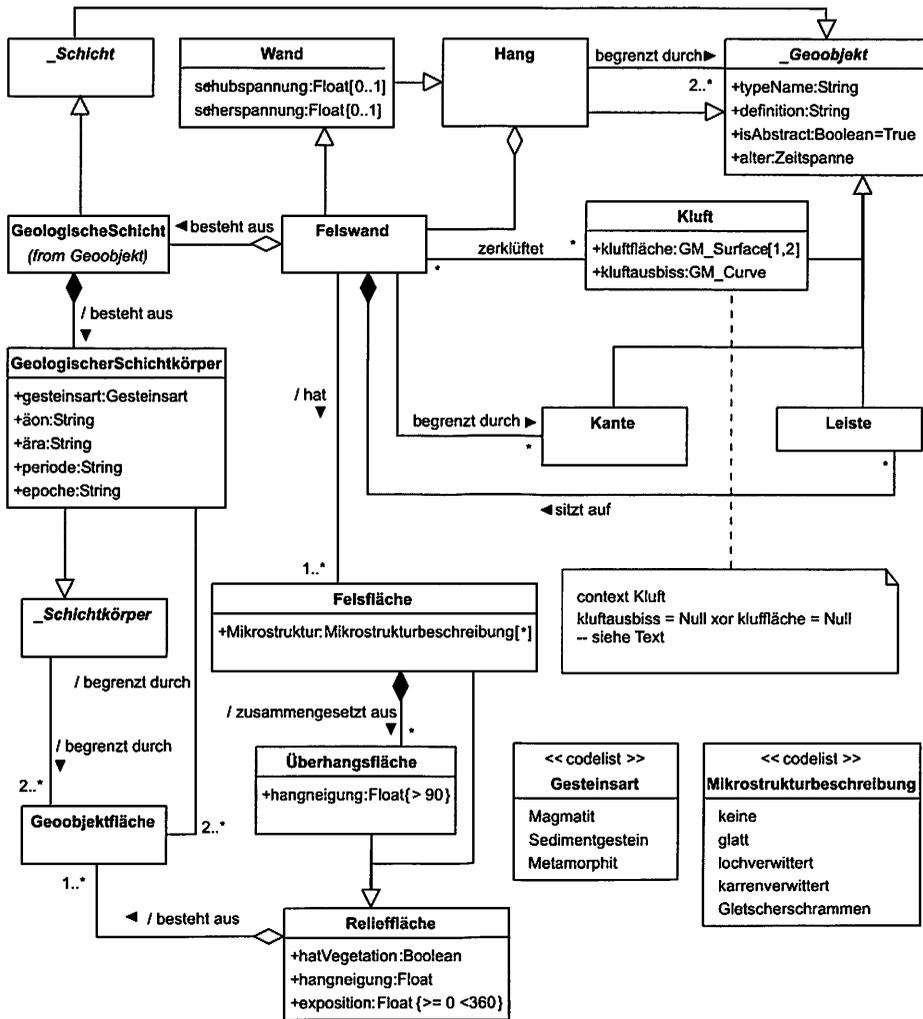


Abb. 3.10 Repräsentation der Klasse `Felswand` und der mit ihr assoziierten Klassen

3.3.5.1 Die Klasse `Kluft`

Felswände werden nach ihrer Exposition an der Erdoberfläche durch Druckentlastung sowie Temperatur- und Wassereinwirkung zerklüftet (vgl. Kapitel 2.2.2.1). Dieser Umstand ist durch die Assoziation der Klasse `Felswand` mit einer `Kluft` repräsentiert. Dabei zeigt die Leserichtung der Assoziation hier im Sinne der Semantik von der `Kluft` zur `Felswand`. Eine `Kluft` *zerklüftet* also eine `Wand`. Die Multiplizität der

Assoziation ist dabei eine n:n-Beziehung, die im UML-Modell der Abbildung 3.10 durch Sternchen an beiden Seiten der Assoziation gekennzeichnet ist. Natürlich können Felswände von mehreren Klüften zerklüftet werden. Aber auch Klüfte selbst können so tiefgründige und weitreichende Phänomene sein, dass sie mehrere Instanzen der Klasse Felswand zerschneiden können.

Eine Kluft ist eine Spezialisierung von `_Geoobjekt` und kann damit durch seine geerbte Assoziation mit der Klasse `ZeitlicheRepräsentation` in seiner Geometrie durch ein `GM.Complex` repräsentiert werden. Eine Kluft ist bei genauerer Betrachtung ein volumenhaftes Objekt, das durch zwei, innerhalb der Felsmasse verlaufenden Flächen (`GM.Surface`) und einer die Felsfläche segmentierenden Klaffung modelliert werden kann. Dabei würde die Klaffung durch eine Abschlussfläche modelliert, wie dies zur Vermeidung von Löchern beim Auftreten von Unterführungen oder offenen Gebäuden, wie etwa Hallen oder Tunnel in Stadtmodellen getan wird, um geschlossene Volumen in einer BRep-Modellierung sicher zu stellen (vgl. GRÖGER et al. 2005). Dem Modellierungsansatz einer „durchsichtigen“ Abschlussfläche soll hier aus zwei Gründen nicht gefolgt werden. Zum Ersten ist das entscheidende Kriterium bei der Abschätzung der Stabilität einer Felswand die Veränderung der Weitung der Klüfte im Laufe der Zeit. Dies kann durch die Berechnung des Abstandes der die Kluft begrenzenden *kluftflächen* vom Typ `GM.Surface` nachgewiesen und vermessen werden. Zum Zweiten bilden Klüfte wichtige Leitlinien der Verwitterung, die im Wesentlichen durch das fließende und gefrierende Wasser bewirkt wird. Zur Modellierung der Fließwege von Wasser sind also insbesondere diese „Löcher“ im Relief einer Felswand entscheidend.

Bei der Repräsentation der Geometrie einer Kluft kommt aber ein weiterer, aus der Praxis der Datenerhebung motivierter Aspekt hinzu. *Kluftflächen* als Bestandteile einer Kluft verlaufen subkutan, also unterirdisch. Ihre Vermessung ist weder trivial noch mit den in (LÖWNER 2005) beschriebenen photogrammetrischen Methoden möglich. Vielmehr sind Klüfte durch ein linienhaftes Ausbeißens⁵⁴ an einer Felsfläche charakterisiert. Die Repräsentation kann also unter Berücksichtigung der erzielbaren Genauigkeit der Kartierung einer Felswand auch durch ein Attribut *Kluftausbiss* mit dem Typ `GM.Curve` mit der Multiplizität eins oder zwei erfolgen. Auch diese offen gehaltene Multiplizität zollt der in der Praxis möglichen und nötigen Genauigkeit Tribut. Da sich nun die Repräsentationen zweier Ausbisslinien der beiden obligatorischen *Kluftflächen* mit der eines *kluftausbisses* widersprechen würde, muss bei der konkreten Realisierung einer Instanz der Klasse `Kluft` auf Exklusivität der beiden Attribute geachtet werden. Diese Forderung wird mit dem OCL-Ausdruck in Abbildung 3.10, der ein gleichzeitiges Setzen beider Attribute durch ein „exklusives Oder“ verhindert, kenntlich gemacht.⁵⁵ Diese Repräsentation der Käfte durch ein

⁵⁴ Als Ausbiss bezeichnet man in der Geomorphologie und Geologie den sichtbaren Schnitt eines Körpers oder einer Fläche mit der Erdoberfläche. Ähnlich der Projektion von Volumina oder Flächen auf eine Ebene kommt es dabei zu einer Dimensionsreduktion der beobachtbaren Phänomene.

⁵⁵ Hierbei ist zu bemerken, dass der Sprachumfang von OCL kein *exklusives Oder* (\vee) umfasst. Dies

Attribut *kluftausbiss* ist z. B. ausreichend, um das für die Verwitterung und Erosion einer Felswand wichtige Kluftsystem (vgl. SCHUMM und CHORLEY 1966) zu kartieren.

3.3.5.2 Die Klasse Leiste

Ein weiterer Bestandteil von Felswänden sind die aus Sicht des Sedimentkaskadenansatzes der Geomorphologie die in Kapitel 2.2.3.1 diskutierten, wichtigen Leisten (engl.: *ledge*) (vgl. CAINE 1974) oder Bänke (engl.: *bench*) (vgl. LUCKMAN 1976). Dies sind Absätze in Felsflächen, die durch Absturz oberhalb gelegener Gesteinsmassen oder unterschiedlicher Verwitterungsresistenz inhomogenen Materials entstehen. Sie weisen, ähnlich einer Treppenstufe, kleinräumig eine geringere Hangneigung als die sie umgebende Felsfläche auf, sodass sich von ihnen oberhalb erodiertes Sediment darauf akkumulieren kann (vgl. Abbildung 2.11). Die Leisten stellen in der Wand also Lokalisationen für Sedimentspeicher innerhalb der alpinen Sedimentkaskade dar (vgl. Abbildung 2.12). Die Klasse *Leiste* ist hier als Unterklasse vom *Geoobjekt* modelliert und hat eine von *GM_Surface* abgeleitete *Leistenfläche*, die ihre Geometrie repräsentiert. Anders als Instanzen der Klasse *Hang* ist eine *Leiste* also kein 3D-Objekt oder aus einem solchen aufgebaut. Das ist im Sinne der Repräsentation von *Geoobjekt* durch einen *GM_Complex* auch nicht zwingend erforderlich, wie in Kapitel 3.2 diskutiert. Klar ist jedoch, dass die *Leistenfläche* integraler Bestandteil des *GM_Complex* der Wand sein muss, mit der sie assoziiert ist.

Eine *Leistenfläche* ist eine Aggregation von *Objektflächen*. Das ist sinnvoll, da *Leisten* durch ihre 2D-Repräsentation im Grunde nur gewisse Ausprägungen von Oberflächen der 3D-Objekte darstellen. Die *Leistenfläche* kann aber keine Spezialisierung einer *Relieffläche* sein, da sie meistens durch Sediment verdeckt ist. Sollte eine *Leiste* durch aquatische oder sonstige Prozesse vom Sediment befreit sein, werden die *Geoobjektflächen* natürlich Bestandteil der *Relieffläche*, die *Leiste* selbst als, wenn auch nicht generischer Teil der Oberfläche der Geosphäre, erkennbar.

Bei Kartierung einer Wand ist im Regelfall die *Leistenfläche* einer *Leiste* nicht zu erfassen, da sie von Sediment bedeckt ist. Ähnlich einer *Kluft* wird jedoch ein *Leistenausbiss*, der Ausbiss der *Leistenfläche* an der Wand erkennbar sein, der deshalb in diesem Modell durch eine eigene Klasse repräsentiert werden soll. Bei einer Kartierung einer Wand über einen längeren Zeitraum hinweg, würden allein die Veränderungen der Zahl oder Geometrie von *Leistenausbissflächen* ausreichen, um eine qualitative Aussage über die Dynamik der Wandverwitterung und -

lässt sich aber leicht aus der Kombination von *Negation*, *Und* und *Oder* konstruieren. Dabei gilt $a \underline{\vee} = (a \vee b) \wedge \neg (a \vee b)$ (vgl. ZOGLAUER 1997). Auch lässt sich der Ausdruck $(a \vee b)$ (*a Oder b*) durch $\neg (\neg a \wedge \neg b)$ ersetzen, so dass nur eine *Negation* und ein *Und* im OCL-Ausdruck vorkommen muss. Diese Form wurde aus Gründen der Kürze hier allerdings nicht verwirklicht, da es sich offensichtlich um ein akzidenzielles Problem handelt.

erosion zu treffen. Durch die im ISO 19107 vorgegebene Modellierung der Geometrie muss darauf geachtet werden, dass der Leistenausbiss der von `GM_Curve` abgeleitet ist, ein Teil der Grenze (`GM_SurfaceBoundary`) der entsprechenden Leistenfläche ist. Genauer gesagt, ist er ein Teil desjenigen äußeren `GM_Ringes`, aus dem sich die `GM_SurfaceBoundary` der Leistenfläche zusammensetzt. Diese Bedingung lässt sich nur durch den unten stehenden OCL-Ausdruck fordern.

```
context Leistenfläche
this.hat.exterior.bestehtaus.includes(
  this.leiste.repräsentiertdurch
): Boolean = True
```

Hierin wird durch den OCL-Operator *includes* gefordert, dass, ausgehend von der Einsprungsadresse `Leistenfläche`, in der Liste der Objekte von `GM_Curve`, aus denen sich der äußere Ring der `GM_SurfaceBoundary` zusammensetzt, der Leistenausbiss enthalten ist, der diese `Leiste` repräsentiert.⁵⁶

Die `Leiste` stellt, wie oben gesehen, kein volumenhaftes `Geoobjekt` dar. Sie ist im Grunde nur eine Fläche, die in den Attributen der sie zusammensetzenden `Geoobjektflächen` von denen einer `Felswand` dergestalt abweicht, als dass Sediment auf ihr verbleiben kann (vgl. Kapitel 3.3.4). Das ist, da die Scher- oder Schubspannung von den Verwitterungsprodukten der `Schichtkörper` abhängt, im Wesentlichen die Hangneigung der `Geoobjektflächen`, die dieses Volumen nach unten begrenzen. Das Volumen des Sedimentes, das der `Leiste` aufsitzt, ist also dadurch nicht modelliert. Vielmehr stellt eine `Leiste` die untere Begrenzung eines Hanges dar, der das aufliegende Sediment als `Schicht` enthält. Die Modellierung dieses der `Leiste` aufsitzenden Sedimentes als `Hang`, ist innerhalb dieses formal-semantischen Modells kein Widerspruch. Einem `Hang` als Spezialisierung eines `Geoobjektes` ist im Gegensatz zu den in Abbildung 2.5 dargestellten Hängen keiner räumlichen Skala zugeordnet. Eine Klasse `Hang` kann über die Assoziation *contains* (vgl. Abbildung 3.6) wiederum aus Instanzen der Klasse `Hang` und damit auch aus deren Spezialisierungen wie `Wand` und `Felswand` aufgebaut sein (vgl. Kapitel 3.3.4). Folglich ist es im Sinne der hier vorgestellten Modellierung möglich, dass auch eine `Felsfläche` aus Instanzen der Klasse `Hang` besteht. Die in der Geomorphologie verbundene Existenzdauer, die mit einem nicht näher definierten *typischen* `Hang` verbunden ist, gilt hier also nicht. Das Verhältnis von Größe und Lebensdauer entspringt einer auch durch die Autoren der Abbildung nicht näher spezifizierten Empirie, deren Sinnhaftigkeit hier nicht angezweifelt werden soll, deren Modellierung aber auf Grund fehlender Skalenzugehörigkeit der

⁵⁶Die Navigation zu dem Objekt, das in der Liste enthalten sein soll, unterscheidet sich hier allerdings leicht von den OCL-Kommentaren bezüglich der `Schicht` und des `Hanges` auf S. 70 bzw. 66. Anders als dort wird hier durch die Bezeichnung von Rollennamen der entsprechenden Klassen und nicht allein durch die Bezeichnung des Assoziationsnamens von der `Leistenfläche` zur `Leiste` gesprungen, weil die Orientierung der Assoziation auf Grund semantischer Überlegungen dafür in die falsche Richtung zeigte.

Klasse Hang gar nicht möglich und auch nicht zwingend ist. Die hier entwickelte Modellierung kann im Gegenzug die Frage nach der Existenzdauer von Landformen aufdecken helfen. Durch die obligatorische Assoziation eines jeden *Geoobjektes* mit einer Klasse *ZeitlicheRepräsentation* lässt sich zu diesem Zwecke natürlich auch die Auslöschung von ehemals erfassten Formen terminieren.

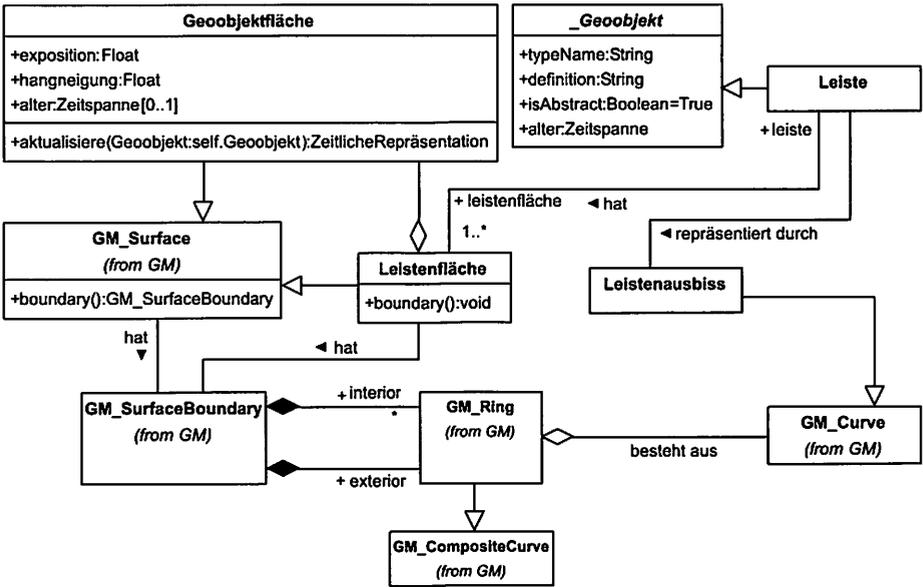


Abb. 3.11 Geometrische Repräsentation einer Leiste

3.3.5.3 Die Klasse Kante

Ein weiterer hier modellierter Bestandteil einer Felswand aber auch anderer Spezialisierungen der Klasse *_Geoobjekt* ist die Klasse *Kante*, die nicht mit einer topologischen Kante zu verwechseln ist, die durch die Verbindung zweier Punkte gegeben ist (vgl. GRÖGER 2000; PLÜMER et al. 2002A). Eine Kante ist aus geomorphologischer Sicht nach DIKAU und SCHMIDT 1999 eine Reliefeinheit, also eine räumlich begrenzte Entität mit definierter geomorphologischer Bedeutung. Diese bezieht sich dabei insbesondere auf die Änderungen der Hangneigung, weswegen BRÄNDLI 1997 die *Kante* auch Bruchkanten (engl.: *break line*) nennt. AHNERT 1970A verwendet den Begriff Profilknick (engl.: *profil break*) und definiert diesen als so deutliche Änderung der Hangneigung, dass diesen Stellen nicht mehr die Eigenschaft der Konkavität oder Konvexität zugeordnet werden kann. SAVIGEAR 1965 definiert die Distanz, auf der

eine abrupte Änderung der Hangneigung dabei auftreten kann als die Strichstärke eines Bleistifts beim Aufnehmen einer geomorphologischen Karte. Bei einer Angabe von 1/50 Inch (= 0,17 cm) für die Strichstärke und einem Kartiermaßstab von 1 : 10 000, wie ihn etwa OTTO und DIKAU 2004 verwenden, bedeutete dies also eine signifikante Änderung der Hangneigung auf 5.08 m der Hangfalllinie. Eine Kante ist damit in Abhängigkeit des betrachteten Maßstabes nicht zwingend als linienhaftes Objekt der Klasse GM_Curve zu erfassen, sondern muss auch die Möglichkeit einer flächenhaften Repräsentation durch ein Attribut *kantenfläche* vom Typ GM_Surface bieten. In der Modellierung in Abbildung 3.12 wird dies analog zu der ambivalenten geometrischen Repräsentation der Kluft in Abbildung 3.10 mit Hilfe eines OCL-Ausdruckes gelöst (vgl. Fußnote 55 auf S. 82).

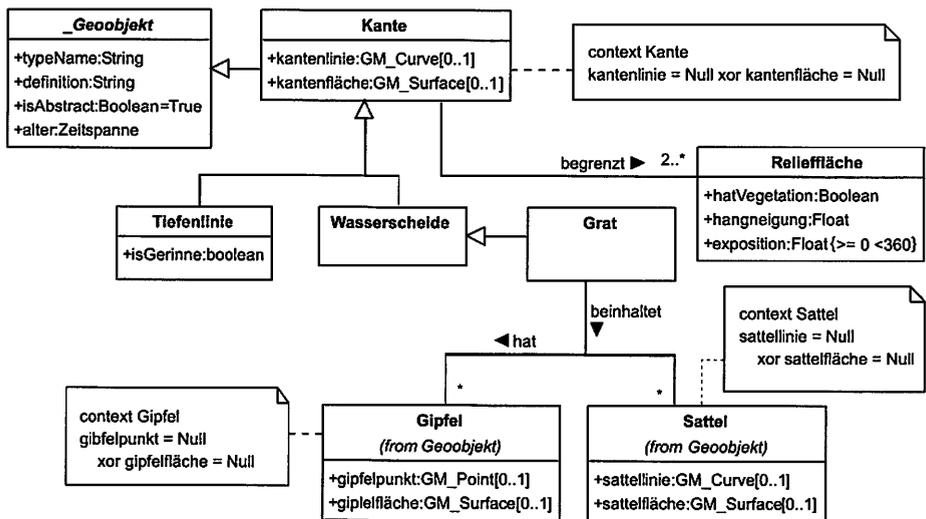


Abb. 3.12 Modellierung der Klasse Kante und ihre Spezialisierungen mit alternativer Repräsentation der Geometrie

Die Semantik einer Kante soll im hier aufgestellten Modell jedoch weiter gefasst werden als die Beschränkung auf ein linienhaftes Objekt, das Flächen stark unterschiedlicher Hangneigung voneinander abgrenzt. Es soll vielmehr der Versuch unternommen werden, die Definition dieser Klasse auf linienhaften Objekte mit geomorphologischer Relevanz zu erweitern. Diese geomorphologische Relevanz erhält die Kante dabei insbesondere durch ihre Beeinflussung der auf der Oberfläche stattfindenden Prozesse. Sie werden durch die Orientierung der Schwerkraft und damit durch die Fließrichtung des Wassers bestimmt. Wasserscheiden und Tiefenlinien sind dabei von großer Wichtigkeit. Diese können aber auch ohne große Hangneigungsänderung auftreten, etwa in einem flachen Talboden oder auf wenig gewölbten Oberhängen. Daher wird hier eine Kante als ein linienhaftes Objekt definiert, das zwei benachbarte Reliefflä-

chen voneinander abgrenzt, die in der Stärke ihrer Hangneigung stark voneinander differieren oder aber deren Exposition unterschiedlich ist. Mit dieser Definition werden zusätzlich zu den oben definierten geomorphologischen Kanten als Ausdruck starker Hangneigungsänderung auch diejenigen linienhaften Stellen im Relief repräsentiert, die die Prozessrichtung auch ohne diese große Differenz in der Hangneigung beeinflussen.

Eine Kante begrenzt also mindestens zwei Objekte der Klasse *Relieffläche*.⁵⁷ Spezialisiert wird die Kante in *Tiefenlinie* und *Wasserscheide*. Die *Tiefenlinie* kann durch ein Gerinne geprägt sein, wodurch das boolsche Attribut *hatGerinne* den Wert „wahr“ annehmen würde.⁵⁸ Eine *Wasserscheide* spezialisiert sich weiter in die für den alpinen Raum wichtigen *Grat*. Dieser kann eine Assoziation zu einem *Gipfel* und zu einem *Sattel* aufweisen. Die Repräsentation dieser beiden Klassen ist, wie bei der alternativen Repräsentation einer *Kluft* (vgl. Kapitel 3.3.5.1), entweder durch ein punkthaftes oder linienhaftes Objekt *Gipfelpunkt* oder *Gipffläche* bzw. *Sattellinie* oder *Sattelfläche* möglich. Auch hier wird eine Art der Repräsentation jeweils durch einen OCL-Ausdruck als exklusive Alternative gefordert.

3.4 Ein Klassendiagramm für Prozesse

Wie in Kapitel 2.2.2 und Kapitel 2.2.3 auf Seite 44 diskutiert, stehen die Geoobjekte des Reliefs über den Austausch von Masse, dem Sediment, in einem prozessualen Zusammenhang. So wird Masse durch Erosionsprozesse von einem Geoobjekt aufgenommen, über einen Transportprozess im Raum und zumeist auf dem Relief bewegt⁵⁹ und schließlich an einem anderen Ort akkumuliert. Diese Akkumulation erfolgt *immer* auf einem oder mehreren im Vergleich zum bewegten Volumen in der Raumskala übergeordneten oder gleichgestellten Geoobjekt, etwa einem übergeordneten Hang oder einer Schutthalde als Spezialfall des Hanges. Diese, an den Prozessen der Erosion und Akkumulation beteiligten Geoobjekte, werden dabei natürlich in ihren äußeren Formen verändert, völlig neu geschaffen, überdeckt oder aber ausgelöscht. Derartige formen-

⁵⁷Die Multiplizität von mehr als zwei Flächen würde die von GRÖGER 2000 entworfenen Axiome zur Erstellung einer 2,8D-Oberfläche (vgl. Kapitel 2.1.4) übrigens verletzen. In einer wahren 3D-Modellierung ist sie aber zulässig.

⁵⁸Natürlich kann auch ein Gerinne oder gar ein Fluss als 3D-Objekt, bzw. als „Geoobjekt“ modelliert werden. Dies ist in der hier vorgestellten formalen Semantik jedoch nicht erfolgt, weil sie sich auf Hänge und steile Hangbereiche beschränkt. Das Attribut *hatGerinne* stünde aber auch einer Assoziation der *Tiefenlinie*, die in diesem Fall wohl als flächenhaftes Objekt repräsentiert würde, nicht widersprüchlich entgegen.

⁵⁹Die Ausnahmen zu den Transportwegen *auf* der Oberfläche des Georeliefs bilden im Wesentlichen der Transport von Masse in Form der hier nicht betrachteten Lösungsverwitterung entlang hydrologischer Leitlinien (vgl. HERRMANN 1977) und die subkutane Erosion von Feinmaterial. Diese ist insbesondere in Lössgebieten, wie sie im Bonner Raum zu finden sind, ein wichtiger Prozess (vgl. HAUSER und ZÖTL 1955, BOTSCHKE und SKOWRONEK 1999; BOTSCHKE et al. 2001), aber auch bei der Auswaschung des Feinmaterials aus Schutthalden beteiligt (COOKE und REEVES 1972).

verändernde Prozesse führen in dem in Kapitel 3.3.1 entwickelten formal semantischen Modell also zwangsläufig zu einer neuen Instanzierung der Klasse *ZeitlicheRepräsentation* der beteiligten Objekte von *Geoobjekt*.

Prozesse wirken aber auch auf die inneren Zustände von Geoobjekten, ohne dass die äußere Form und damit das Relief verändert würde. Die Prozesse der Verwitterung bereiten Material für die Erosion auf, indem sie es chemisch verändern und in Lösung bringen oder physikalisch zerkleinern. Dadurch wird der innere Zusammenhalt einer Form und damit auch ihr Widerstand gegen äußere Einflüsse, etwa einem Niederschlagsereignis verändert, zumeist verringert. Die Verwitterung kann aber auch zu einer veränderten Anfälligkeit eines Geoobjektes auf Prozesse führen, die ohne dies überhaupt nicht stattfinden würden. Eine tiefgründig durch Frostsprengung verwitterte Wand ist anfällig für Steinschlag oder Felssturz, während eine unverwitterte Wand nur zur Abgrusung, also der Erosion feinkörniger Gesteinsbruchstücke an seiner Oberfläche neigt. Auch die signifikante Veränderung durch interne Prozesse führt also zu einer neuen Instanz der Klasse *ZeitlicheRepräsentation* für das entsprechende *Geoobjekt*.

Geoprozesse, die formenverändernd wirken, werden immer durch eine von außen einwirkende Kraft ausgelöst und angetrieben. Bei hangaquatischen Prozessen ist es die Schleppekraft des fließenden Wassers, die etwa mit dem Produkt der Wassertiefe und dem Sinus der Hangneigung zunimmt (vgl. SIMONS 1969). Ursächlich für die Auswirkung der Kraft ist hierbei also ein klimatischer Faktor, der Niederschlag, der durch die Eigenschaften der Infiltrationsrate des vom Niederschlag betroffenen Substrates und der Hangneigung eines oder mehrerer *Geoobjekte* bzw. deren *Reliefflächen* modifiziert wird.⁶⁰ Geomorphologisch wirksam wird der Oberflächenabfluss allerdings nur, wenn seine Schleppekraft ausreicht, um Partikel des Geoobjektes tatsächlich zu transportieren. Dies wiederum ist abhängig von der Korngrößenzusammensetzung des Geoobjektes, z. B. eines Hanges und der Kohäsion der ihn aufbauenden Partikel. Fließendes Wasser allein ist also noch *kein* Geoprozess, sondern wird es erst dann, wenn die vom Geoobjekt abhängenden internen Faktoren eine geomorphologische Arbeit zulassen. Ähnlich verhält es sich auch mit der Schwerebeschleunigung der Erdanziehungskraft. Sie wirkt ständig auf ein Geoobjekt, etwa einen Überhang ein. Ausgelöst wird ein geomorphologisch wirksamer Prozess des Fallens aber erst dann, wenn die innere Festigkeit der Gesteinsmasse durch andere, interne Prozesse entsprechend gelockert wurde. Ein Geoprozess ist also ein Prozess, der das Geoobjekt in seinen inneren Zuständen oder seiner äußeren Form verändert. Die auslösenden Kräfte sind klimatischen, gravitativen

⁶⁰Obwohl hier vom klimatischen Faktor oder Einfluss die Rede ist, handelt es sich um Wetterphänomene, die Auslöser von Prozessen sind. Wetter bezeichnet dabei den Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt, Klima den Zustand über einen Zeitraum von 30 Jahren. Diese Definitionen, die noch durch den Begriff der Witterung, der einen Zeitraum von Wochen bezeichnet, verdeutlichen also zeitliche Skalen (vgl. KRAUS 2000). Natürlich finden gewisse Wetterphänomene nur in gewissen klimatischen Zonen der Erde statt (WEISCHET 1991).

oder chemischen Ursprungs.⁶¹ und werden in ihrer Wirkungsweise vom Geoobjekt bedingt.

Die Trennung von Prozessen in interne und externe ist dabei nicht immer eindeutig. Das wird in der hier vorgestellten Modellierung insbesondere bei der Betrachtung der Klasse `Kluft` deutlich. Sie wird durch Temperatur und Wassereinwirkung i. d. R. geweitet, also in ihrer äußeren Form verändert. Ausdruck findet diese Formveränderung dabei in den `Kluftflächen`. Für eine Wand als Ganzes ist die Verwitterung durch Frostsprengung zunächst sicherlich ein interner Prozess. Die Entscheidung, ob Prozesse für ein `_Geoobjekt` ein interner oder formenverändernder Prozess ist, hängt also vom betrachteten Objekt ab und kann nicht regelhaft vorgegeben werden.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Wechselbeziehungen von Geoobjekten mit den auf sie wirkenden Geoprozessen beleuchtet werden. Dabei geht es nicht um eine physikalische Modellierung von Prozessen, wie sie etwa durch die Anwendung der Diffusionsgleichung (vgl. THORN und WELFORD 1994) zur Erklärung von Materialtransport betrieben wird. Auch geht es nicht um die Aufdeckung empirisch gefundener Zusammenhänge zwischen antreibenden Faktoren und Sedimentaustrag, wie etwa bei der Unified Soil Loss Equation (USLE), die verschiedenen Aspekte der Reliefeigenschaften eines Oberhanges mit dem Niederschlag und die daraus resultierende Bodenerosionsrate in Beziehung stellt (vgl. WISCHMEYER und SMITH 1962). Hier geht es vielmehr um eine beschreibende Diskussion, wie Geoobjekte insgesamt über Prozesse in Verbindung stehen. Die Prozesse übernehmen dabei die verbindenden Kanten zwischen Geoobjekten, durch die sie in einem semantischen Netz miteinander verknüpft sind. Diese Verknüpfung ist spezieller als die reine Nachbarschaft von Objekten.

3.4.1 Die Klasse `_Geoprozess`

Die in Abbildung 3.13 dargestellte Klasse `_Geoprozess` ist wie das in Kapitel 3.3.1 modellierte `_Geoobjekt` auch eine abstrakte Klasse, die nicht direkt instanziiert werden kann. Ein `_Geoprozess` ist im Gegensatz zu `_Geoobjekt` nicht von `GF_featureType` abgeleitet, da es sich nicht um ein Objekt mit räumlicher Ausdehnung und einer Lokalität im Raum handelt, was zur Definition eines `GF_featureTypes` notwendig wäre (ISO/DIS 19110 2000). Natürlich laufen Prozesse im Raum ab und lassen sich über räumlich ausgedehnte Spuren des Prozesses nachweisen. Im Sinne der hier vorgestellten Modellierung sind diese jedoch als eigene Instanz der Klasse `_Geoobjekt` zu sehen, wie etwa eine Schutthalde auch ein Zeuge eines langfristig stattfindenden Steinschlages ist. In Abhängigkeit der betrachteten Skala können Spuren von Prozessen auch als Eigenschaft der Oberfläche eines `_Geoobjektes` in Form einer Mikrostrukturbeschreibung modelliert werden, wie dies in Abbildung 3.10 auf Seite

⁶¹Es mag verwundern, bei chemischen Prozessen von Kräften zu sprechen. Bei den hier betrachteten Vorgängen werden Energien, die zunächst in chemischen Prozessen freigesetzt werden in den meisten Fällen in geomorphologisch wirksame Kräfte umgewandelt.

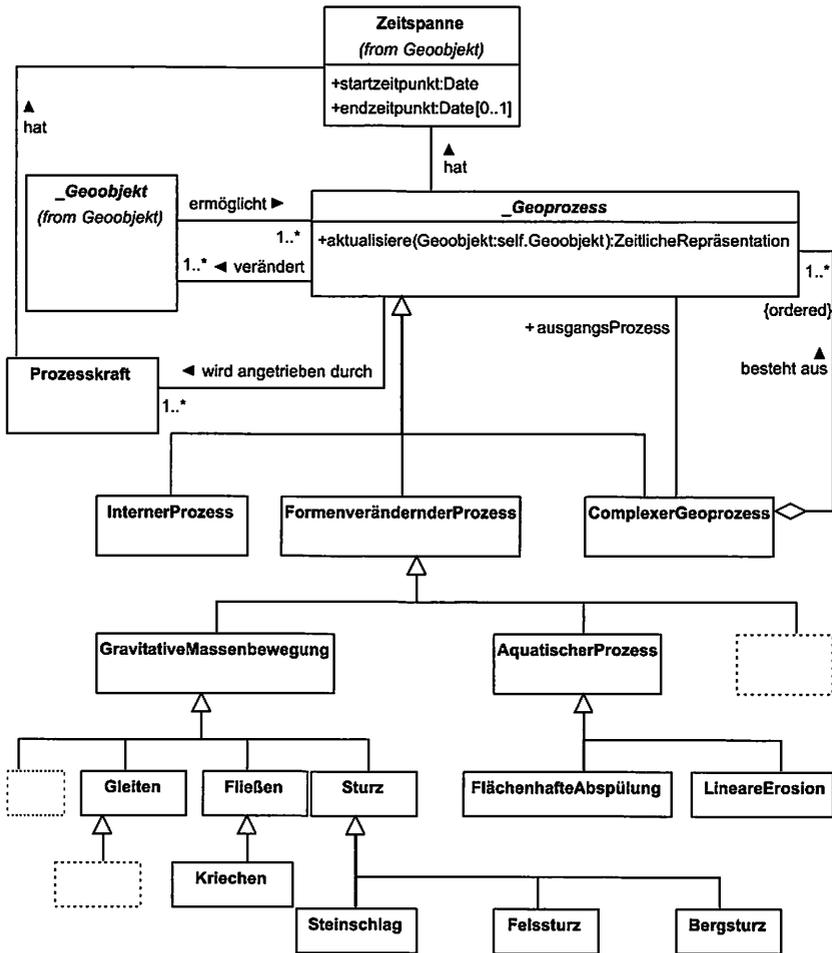


Abb. 3.13 Repräsentation der Klasse `_Geoprozess` und der von ihr abgeleiteten und mit ihr assoziierten Klassen

81 getan wurde. Neben dieser durch veränderte oder neu geschaffene `_Geoobjekte` dokumentierte Ausdehnung der Geoprozesse im Raum sind sie auch in der Zeit ausgedehnt. Dies wird durch eine Assoziation der Klasse `_Geoprozess` mit der Klasse `Zeitspanne` mit den Attributen `startzeitpunkt` und `endzeitpunkt` ausgedrückt.

`_Geoprozesse` benötigen eine antreibende Kraft, um Arbeit, etwa den Transport von Sediment oder physikalische Verwitterung verrichten zu können, was durch die Assoziation mit der Klasse `Prozesskraft` repräsentiert wird. Diese Kräfte können

ständig wirken, wie dies die Gravitation tut, oder aber temporär. Letzteres ist etwa bei der Schleppkraft des Wassers der Fall, die wiederum von einem Niederschlagsereignis und der darauf folgenden Generierung von Oberflächenabfluss abhängig ist. Auch die Prozesskraft ist also mit der Klasse *Zeitspanne* zu assoziieren. Die zeitliche Spanne der Einwirkung einer Prozesskraft, die einen *Geoprozess* bewirken kann und die eines *Geoprozesses* sind dabei nicht zwingend identisch. Dies wird in Abbildung 2.6 auf Seite 37 deutlich. Die Gravitation wirkt ständig auf eine am Hang befindliche Masse. Die Zeitspanne, in der ein geomorphologischer Prozess, in diesem Falle ein Rutschen oder Fallen eintritt, ist aber erheblich kürzer. Auch muss ein Oberflächenabfluss, der natürlich eine Prozesskraft auf die Bodenpartikel ausübt nicht zu deren Transport und damit zu einem *Geoprozess* führen. Wann eine Prozesskraft ausreicht, um ein *Geoobjekt* in seiner äußeren Form zu verändern, hängt allein von ihrem Verhältnis zu den haltenden Kräften des *Geoobjektes* selbst und damit von seinen internen Schwellenwerten bzgl. äußerer Krafteinwirkung ab.

Die in Abbildung 3.13 wichtigsten Assoziationen bestehen zwischen dem *Geoprozess* und dem *Geoobjekt*. Ein *Geoprozess* verändert ein oder mehrere Objekte der Klasse *Geoobjekt*. Diese Veränderung kann in Abhängigkeit der Art, also der Spezialisierung der abstrakten Klasse *Geoprozess* unterschiedlich ausfallen. Zum einen kann der interne Zustand eines *Geoobjektes* verändert werden, wenn Verwitterungsprozesse auf dasselbe einwirken. Durch den Prozess der Frostsprengung etwa wird die Anzahl der Objekte der Klasse *Kluft*, die eine Felswand zerklüften (vgl. Abbildung 3.10) größer, was zu einer Instanziierung neuer *Kluftobjekte* und einer Veränderung der äußeren Form der Felswand führt. Werden bestehende Klüfte erweitert, verändert sich deren äußere Form und die der Felswand. Ein Objekt der Klasse *Geoprozess* oder seiner Unterklasse muss also die *ZeitlicheRepräsentation* desjenigen *Geoobjektes*, das es verändert, aktualisieren können. Das geschieht durch die in Abbildung 3.13 dargestellten Methode *aktualisiere (Geoobjekt: self. Geoobjekt) : ZeitlicheRepräsentation*, deren Wirkungsweise analog zu der einer *Geoobjektfläche* in Abbildung 3.6 auf Seite 65 ist. Zum anderen kann diese Veränderung formenverändernd im Sinne eines Volumenverlustes eines *Geoobjektes* und einer Volumenzunahme eines oder mehrerer anderer *Geoobjekte* sein. Auch in diesem Fall muss die *ZeitlicheRepräsentation* der beteiligten *Geoobjekte* aktualisiert werden. Die Art der Ausgestaltung der Methode ist natürlich von der Art des *Geoprozesses* und der an ihm beteiligten *Geoobjekte* abhängig. Jede Spezialisierung der Klasse *Geoprozess* muss die geerbte Methode also überschreiben, um dem Wirkungsgefüge zwischen den speziellen Objekten und Prozessen zu genügen. Dies ist allerdings eine Anforderung an die Implementierung und fällt damit nicht in den Bereich der semantischen Modellierung.

3.4.2 Die Klasse KomplexerGeoprozess

„Geoprozesse laufen i. d. R. nicht isoliert sondern häufig mit anderen „Geoprosessen kombiniert ab. Der Transport eines Gesteinsbruchstückes aus einer Wand wird erst durch einen Sturz aus der Wand transportiert und kann dann über ein Rutschen auf der Halde weiter transportiert werden. Auch Instanzen des InternenProzesses finden häufig nebeneinander statt. Die in Abbildung 3.13 modellierte Klasse KomplexerGeoprozess wird diesem Umstand gerecht. Sie wird aus Instanzen der Klasse „Geoprozess oder ihrer Spezialisierungen aggregiert. Diese Aggregation ist nicht existenzabhängig, was die nicht gefüllte Raute zum Ausdruck bringt. Die „Geoprozesse müssen jedoch in einer geordneten Liste vorliegen. Ein KomplexerGeoprozess ist also die Modellierung einer Prozesskette und hat, wie der Geoprozess auch, eine Assoziation zu einer Zeitspanne. Dabei müssen die im KomplexenGeoprozess aggregierten „Geoprozesse nicht zwingend gleichzeitig ablaufen, sie tun es sogar in den seltensten Fällen. Jeder „Geoprozess hat auch in der Klasse KomplexerGeoprozess seine eigene Assoziation zu einer Zeitspanne. Die Zeitspanne der Klasse KomplexerGeoprozess geht über alle in ihr aggregierten Klasse. So kann bspw. modelliert werden, wie lange ein Volumen an Sediment braucht, um vom Sturz aus der Wand und weiteren Prozessen in den das Tal entwässernden Vorfluter zu gelangen. Auch an dieser Stelle soll natürlich nicht behauptet werden, dass dieser Zeitraum leicht zu messen wäre, seine Repräsentation ist mit der hier vorgestellten Modellierung aber möglich. Das von CAINE 1974 in Abbildung 2.10 dargestellte Hangsystem ließe sich also neben der Erweiterung durch eine verbesserte geometrische Repräsentation auch durch die vorgestellte Modellierung durch den „Geoprozess präziser abbilden.

Von besonderem Interesse bei der Betrachtung einer Prozesskette kann der initiale Prozess sein. Dies ist insbesondere bei der Betrachtung der Wand von Interesse. Die Klasse KomplexerGeoprozess hat deshalb eine Assoziation zu einem „Geoprozess bzw. einer Spezialisierung desselben, die die Rolle des *ausgangsProzesses* einnimmt. Dies ist in der durch die Klasse KomplexerGeoprozess repräsentierten Prozesskette verständlicher Weise der, der in der Zeit vor den anderen aggregierten „Geoprosessen steht.

3.4.3 Spezialisierungen der Klasse „Geoprozess

Die in Abbildung 3.13 modellierten Prozesse sind im Wesentlichen bereits in Kapitel 2.2.2 diskutiert worden und sollen hier nur noch kurz betrachtet werden. Interne Prozesse werden hierbei nicht weiter modelliert. Sie sind weder in der Geomorphologie unumstritten noch etwa für einen oberflächlichen Kartierungsansatz von Relevanz.⁶²

⁶²Dennoch soll an dieser Stelle nicht der Eindruck erweckt werden, interne Prozesse seien von nebengeordneter Bedeutung. Ohne eine Aufbereitung des Materials durch die Verwitterung wäre anstehender Fels

Im Wesentlichen lässt sich ein „Geoprozess in die Klassen GravitativeMassenbewegung und AquatischerProzess spezialisieren.“⁶³ Der erstere ist für die hier im Fokus stehenden Wände und steilen Hangbereiche alpiner Gebiete sicherlich der interessantere. Sie laufen ohne antreibendes Agens wie etwa Wasser oder Schnee, sondern unter der bloßen Einwirkung der Schwerkraft ab. Die Klasse GravitativeMassenbewegung lässt sich folglich durch die Klassen Gleiten, Fließen und Sturz spezialisieren. Der Sturz wiederum spezialisiert sich in einen Steinschlag, Felssturz und den Bergsturz. Als definitorisches Attribut zur Unterscheidung dieser verschiedenen Unterklassen mag die in Tabelle 2.2 gegebene Klassifikation von WHALLEY 1974 auf Grundlage des Volumens der bewegten Masse dienen.

3.4.4 Modellierung einer Sedimentkaskade

Das Konzept der Sedimentkaskade stellt in der Geomorphologie einen wichtigen Ansatzpunkt zur Beschreibung der Veränderung von Landformen dar (vgl. Kapitel 2.2.3). Die in Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 diskutierte Modellierungen von „Geobjekten und „Geoprozessen auf Grundlage der UML erlauben es nun, auch dieses Konzept abzubilden. Ein wesentlicher Aspekt bei dieser objektorientierten Modellierung ist dabei, dass die modellierten Klassen, wie die Realweltobjekte auch, während ihrer Lebenszeit verschiedene Rollen einnehmen können (vgl. Kapitel 2.1), die sie in einem bestimmten Kontext mit den ihnen assoziierten Instanzen derselben oder anderer Klassen spielen.

Dies birgt für die Beschreibung und Analyse der funktionalen Beziehungen von Objekten auf der Landoberfläche wesentliche Vorteile und Chancen. Zum einen lassen sich die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten semantischen Modellierungen je nach Bedarf monoton erweitern. In Abhängigkeit der Fragestellung können also entweder geometrische oder prozessuale Aspekte von Geobjekten und Geoprozessen weiter ausmodelliert werden. Insbesondere die Beschreibung der inneren Widerstände gegen Veränderungen von Geobjekten gegenüber formenverändernden Prozessen bergen hier noch großes Potential. Die Beziehungen von „Geobjekt und „Geoprozess lassen sich also geometrisch und funktional nach Belieben hoch auflösen. Zum anderen sind die so repräsentierten Beziehungen von Entitäten der Erdoberfläche informationstechnisch fassbar. Die hier vorgestellten Modelle in Form der UML ermöglichen es, sie in Datenbankmanagementsystemen zu implementieren und mit auf die Bedürfnisse der

nur mit einer kleinen Gruppe formenverändernder Prozesse zu bewegen. Auch stellen die von SCHUMM 1973, SCHUMM 1979 und SCHUMM 1991 angestellten Beobachtungen über interne Schwellenwerte ein erhebliches Erklärungspotenzial für die Genese des Georelieffs dar.

⁶³Wie auch die Modellierung des „Geobjektes, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben soll, können nicht alle in der Geomorphologie betrachteten Prozesse in dem hier vorgestellten Klassendiagramm Ausdruck finden. Die Vervollständigung ist aber von jedermann leicht durchzuführen, da es sich um eine monotone Erweiterung des semantischen Modells im Sinne von GRUBER 1993 handelt. Die Modellierung hier soll lediglich die grundsätzliche Voraussetzung für eine solche Erweiterung geben.

Anwender angepassten Applikationen zu speichern, zu analysieren und zu visualisieren. Damit bietet die hier vorgestellte Modellierung wesentliche Vorteile gegenüber der in Kapitel 2.2.3 gezeigten schematischen Darstellung in Abbildung 2.10 von CAINE 1974 und auch gegenüber den dort diskutierten Konzeptmodellen in Abbildung 2.9 und 2.12.

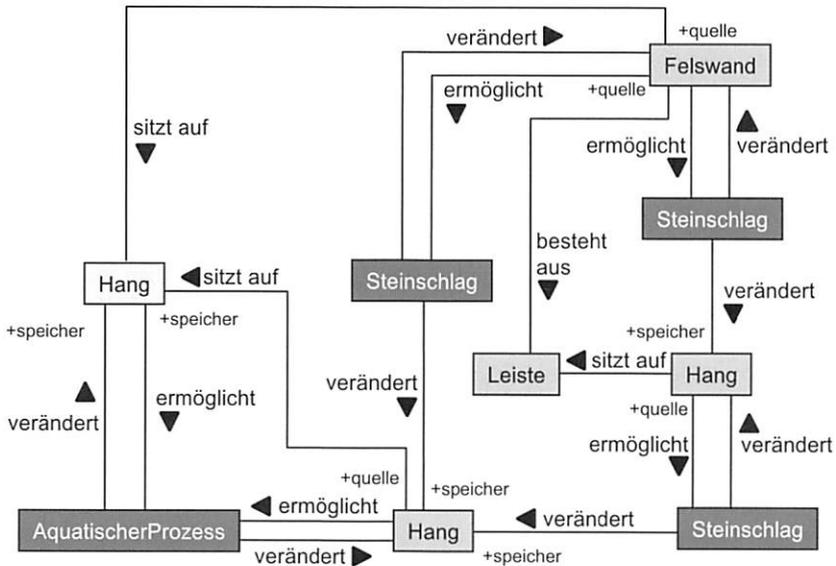


Abb. 3.14 Vorschlag einer Modellierung der Sedimentkaskade, wie sie etwa in Abbildung 2.12 als Konzeptmodell vorliegt. Hier ist die Repräsentation als Klassenmodell der in Kapitel 3.3 diskutierten Geobjekte (hellgrau dargestellt) und der in Kapitel 3.4 (dunkelgrau dargestellt) beschriebenen Geoprozesse verwirklicht.

Abbildung 3.14 zeigt eine Repräsentation einer Sedimentkaskade, wie sie an einer Felswand vorzufinden ist. Hierbei sind die Geometrien der einzelnen Geobjekte zur Verbesserung der Anschaulichkeit abstrahiert. Auch sind die Vererbungshierarchien von `_Geobjekten` und `_Geoprozessen` nicht in die Abbildung integriert.

Der in der Skalenhierarchie übergeordnete `Hang` (weiß dargestellt), etwa eine Talflanke, beherbergt eine `Felswand` und einen weiteren `Hang`, der, definiert durch das Attribut `typ`, als eine Sturzhalde unterhalb dieser `Felswand` klassifiziert werden kann (vgl. Kapitel 3.3.3). Dieser `Hang` und die `Felswand` sitzen also dem hierarchisch übergeordnetem `Hang` auf. Eine `Felswand` besteht nun neben anderen `_Geobjekten` auch aus Objekten der Klasse `Leiste`. Das Sediment, das auf der `Leiste` liegt, sitzt ihr in Form einer Klasse `Hang` auf.⁶⁴ Über den `_Geoprozess` `Steinschlag`

⁶⁴ Erneut soll darauf hingewiesen werden, dass das Konzept des Hanges sich in der hier vorgestellten Modellierung von der in der Geomorphologie herrschenden Vorstellung unterscheidet, als dass ihm, anders als

wird die Felswand für diesen auf der Leiste sitzenden Hang zur Sedimentquelle, kurz *Quelle* genannt, und der Hang zum Sedimentspeicher, kurz *Speicher*. Die Felswand sorgt also für Sedimenteintrag in die ihr aufsitzenden Sedimentspeicher, die an den Speicherlokalitäten der Leiste befindlich sind. Die Felswand kann über denselben „Geoprozess, den Steinschlag, natürlich auch direkt den unterhalb gelegenen Hang beliefern. Hier übernimmt die Felswand ebenfalls die Rolle der *Quelle*, der Hang die Rolle des *Speichers*. Der auf der Leiste aufsitzende Hang kann über den Steinschlag für den unterhalb der Felswand gelegenen Hang ebenfalls zur *Quelle* werden. Er nimmt also gegenüber zwei Klassen jeweils unterschiedliche Rollen ein. Der unterhalb der Felswand gelegene Hang, der ihr gegenüber in der Rolle des *Speichers* aufgetreten ist, übernimmt nun seinerseits dem hierarchisch übergeordneten Hang, etwa über die Spezialisierung des „Geoprozesses, bspw. dem Aquatischen Prozess, die Rolle der *Quelle*.

Die in den Kapiteln 3.3 und 3.4 vorgestellte Modellierung der in der Geomorphologie betrachteten Objekte und Prozesse auf Grundlage der in der Geoinformation entwickelten Repräsentationen hat also eindeutige Vorteile. Der wichtigste ist, dass sich so auch über die rein geometrischen Phänomene hinausgehende Konzepte, wie das der Sedimentkaskade repräsentieren lässt. Insbesondere die prozessualen Beziehungen, die durch eine ausschließlich topologische Terminologie nicht zu fassen wären, lassen sich modellieren. Die Rollenverteilung von *Quelle* und *Speicher* sind dabei entscheidende Aspekte. Darüber hinaus lassen sich Klassenmodelle in Geoinformationssysteme implementieren und ermöglichen so die Validierung und Analyse der theoretischen Modelle der Fachwissenschaft Geomorphologie.

in Abbildung 2.5, a priori keine Skala zugeordnet ist.

4 Diskussion

4.1 Rückblick und Bewertung

Die wesentlichen Ziele dieser Schrift waren zum Ersten die Formulierung eines formalen, semantischen Modells für geomorphologische Objekte des Hochgebirges, insbesondere aber den Wänden und steilen Hangbereichen unter Berücksichtigung der Fachwissenschaft. Dabei sollte die Repräsentation der in der Geomorphologie identifizierten Objekte in einem Geoinformationssystem (GIS) auf Grundlage internationaler Standards erfolgen, um dem in der Geoinformation geforderten Anspruch der Interoperabilität zu genügen. Zum Zweiten sollte der Erkenntnis Rechnung getragen werden, dass die Objekte der Landoberfläche neben den Nachbarschaftsbeziehungen auch über Transportprozesse miteinander in Beziehung stehen. Hierfür wurde eine geeignete Möglichkeit gefunden, die Interaktion von Geoobjekten über Geoprozesse zu repräsentieren. Dies ist hier mit der Einführung des Begriffs *Prozessuale Erreichbarkeit* erfolgt.

Formulierung eines formalen semantischen Modells geomorphologischer Objekte

Fachwissen über Art und funktionale Beziehungen von Landformen liegt innerhalb der Geomorphologie zumeist in verbaler und darüber hinaus in z. T. widersprüchlicher Form vor. Die Formulierung eindeutiger und formaler semantischer Modelle ist aber für die Kooperation mit benachbarten Wissenschaften, insbesondere der Geoinformation, eine zwingende Voraussetzung (vgl. FONSECA und EGENHOFER 1999; DEHN et al. 2001). Zunächst musste also der Versuch unternommen werden, eine im Sinne der Fragestellung schlüssige Ordnung in die innerhalb der Geomorphologie kursierenden Vorstellungen über Objekte der Landoberfläche und die ihnen zugeordneten Eigenschaften zu bringen. Dies ist anhand einschlägiger Literatur versucht worden. Dabei kann ein gewisser Anteil an subjektiv bedingter, selektiver Wahrnehmung durch die zitierten Autoren ebenso wenig ausgeschlossen werden, wie bei der Auswahl und Bewertung der Referenzen. Diese Einschränkung der Objektivität, die nach FRANK 2001 und FONSECA et al. 2002 jedem semantischen Modell inhärent ist, kann dazu genutzt werden, eine bestimmte Sichtweise auf Phänomene der physischen Welt zu verdeutlichen. Eine wesentliche Entscheidung wurde durch die Wahl der normativen und objektorientierten Betrachtung des Reliefs getroffen. Diese Anschauung bietet die Möglichkeit, die Modellierung der Landformen aus einer verbal manifestierten Vorstellung heraus entwickeln zu können, ohne im ersten Schritt der Beschreibung direkt an

die Ränder des Konzeptes, die durch Ausnahmerecheinungen geprägt sind, herantreten zu müssen. Eine Normierung kann natürlich nicht in beliebige Vereinfachung münden, sondern ist hier durch einen Grad an Allgemeinheit erfolgt, der, wie in dieser Arbeit geschehen, auch die Modellierung speziellerer Konzepte erlaubt. Die durch die semantische Modellierung aufgestellte Ordnung wird damit als allgemein genug bewertet, um Erweiterungen zuzulassen.

Aus Sicht der Geoinformation ist ein Formalismus für die Formulierung semantischer Konzepte unumgänglich. Hierfür wurde die Unified Modelling Language (UML) als besonders geeignet eingestuft. Diese Entscheidung konnte zum einen in der Betrachtung der UML in Kapitel 2.1.3 in Bezug auf die objektorientierte Sichtweise von Konzepten der Realwelt selbst begründet werden. Zum anderen zeigte sich die UML auch bei der Formulierung der Semantik in Kapitel 3 den Anforderungen gewachsen. Insbesondere die zur Spezifikation der UML gehörende Erweiterung OCL versetzt den Modellierenden in die Lage, komplizierte Bedingungen zu formulieren und zu überprüfen.

Der besondere Fokus der durchgeführten Modellierung lag auf den für alpine Täler charakteristischen geomorphologischen Objekten, zu denen insbesondere Wände und steile Hangbereiche gehören. Das führte zu der Suche nach einer Möglichkeit, diese durch ihre Steilheit in ihrer Oberflächencharakteristik einmaligen Phänomene der Landoberfläche in einem GIS geometrisch repräsentieren zu können. Generell musste auch, der Semantik der Geoobjekte gerecht werdend, eine 3D-Repräsentation der Geometrie sichergestellt werden. Da ein wesentlicher Aspekt moderner Geoinformationstechnologie die Interoperabilität ist, wurde der bei 3D-Stadtmodellen erprobte ISO-Standard 19107 „Spatial Schema“ für die Lösung dieses Problems herangezogen. Neben seiner in Kapitel 2.1.4 ausgiebig diskutierten Überlegenheit gegenüber dem Rasterformat bei der Repräsentation von überhängenden Flächen und 3D-Geometrien, sichert er als international anerkannter Standard den Austausch von Geometriedaten. Dabei gewinnt er durch seine Implementierung in Form der Geography Markup Language (GML) gegenüber proprietären Formaten großer GIS-Hersteller zunehmend an Bedeutung. Es konnte während der Dokumentation des formalen semantischen Modells in Kapitel 3 mehrfach gezeigt werden, dass die Verwendung der ISO 19107 für geomorphologische Fragestellungen eine geeignete Repräsentation der im dreidimensionalen Raum ausgedehnten Geoobjekte darstellt.

Darüber hinaus wurde durch die Modellierung einer zeitlichen Repräsentation von Geoobjekten und Geometrien der Tatsache Rechnung getragen, dass sich Landformen geometrisch aber auch in ihrer inneren Zusammensetzung in der Zeit verändern. Die Repräsentation dieser Veränderung ist für eine Analyse der Genese des Georeliefs von entscheidender Wichtigkeit. Durch die Modellierung einer zeitlichen Repräsentation ist eine solche Analyse innerhalb eines GIS ermöglicht worden. Sie erlaubt es, Versionen des Zustandes des Georeliefs zu repräsentieren, abzuspeichern und zu untersuchen.

4.1.1 Repräsentation von Prozessen

Die im Blickfeld der Geomorphologie stehenden Objekte der Landoberfläche stehen über Materialtransport in funktionaler Beziehung. Die Art der Prozesse, die auf ein Geobjekt einwirken, bestimmen über die Zeit seine Genese. Die prozessualen Beziehungen finden, so sie in Kombination mit der Verweildauer von Material auf einem Objekt der Landoberfläche gesehen werden, Ausdruck in dem geomorphologischen Konzept der Sedimentkaskade. Zur Repräsentation dieser prozessualen Beziehungen wurde das semantische Modell um die Modellierung eines Geoprozesses erweitert, der direkt mit den Geobjekten assoziiert werden kann. Über diese assoziative Beziehung können Geoprozesse mit einem oder mehreren Objekten der Landoberfläche in Beziehung stehen, wobei sie diese in ihrem inneren Aufbau oder in ihrer geometrischen Form verändern können. Diese Modellierung lässt eine Betrachtung des Georeliefs zu, die über eine rein geometrische Vergesellschaftung hinausgeht. Durch die hier modellierte Beziehung der Geobjekte über den Geoprozess kann eine prozessuale Erreichbarkeit repräsentiert werden. Somit wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass Geobjekte einander auch dann beeinflussen, wenn sie nicht in direkter topologischer Nachbarschaft liegen, wie dies etwa bei einem Hang und einem weit entfernten Aluvium über den Prozess des fluvialen Massentransports der Fall ist.

Bei der assoziativen Beziehung zwischen Geoprozess und Geobjekt war es wichtig festzuhalten, dass die Veränderung eines Geobjektes nur dann erfolgt, wenn dieses den Geoprozess, also die Veränderung, auch zulässt. Damit wurde der Diskussion um interne Schwellenwerte Rechnung getragen, die im Wesentlichen von Stanley Alfred Schumm in die Geomorphologie getragen wurde (SCHUMM 1973; SCHUMM 1979; SCHUMM 1991). Dieser Ansatz hilft bei der Erklärung, warum bei ähnlichen klimatischen Einwirkungen gewisse Landformen in gewisser Weise reagieren, andere aber nicht. Das hier entwickelte semantische Modell ermöglicht also die Repräsentation dieser Zusammenhänge. Dies gilt auch, wenn die Beeinflussung dieser inneren Bedingungen von Geobjekten bezüglich der Wirksamkeit von Geoprozessen nicht en detail ausmodelliert worden sind. Auch hier sei gesagt, dass das Modell im Sinne von GRUBER 1993 monoton erweiterbar ist, also ohne eine Änderung des bereits Bestehenden ergänzt werden kann. Auch die Repräsentation von Einwirkungen, die nicht nur *einer* Art von Prozess zuzuschreiben sind, ist über das Konzept des komplexen Geoprozesses möglich.

Die hier präsentierte Modellierung der Interaktion von Prozessen und Landformen kann des Weiteren dazu genutzt werden, das über die Betrachtung der Einzelprozesse hinausgehende Konzept der Sedimentkaskade darzustellen. In Kapitel 3.4.4 konnte ein Beispiel für eine Repräsentation der Sedimentkaskade einer Felswand gegeben werden. Die Repräsentation in Form des in Abbildung 3.14 auf Seite 94 gegebenen Klassenmodells geht dabei weit über die Möglichkeiten der in der Geomorphologie gebräuchlichen Konzeptmodelle, wie etwa Abbildung 2.12 auf Seite 49 eines zeigt, hinaus. Alle im Klassenmodell repräsentierten Geobjekte weisen nämlich eine der ISO 19107 entspre-

chende Assoziation zu einer Geometrie auf, sind also als Form und in ihrer Veränderung über die Zeit tatsächlich repräsentiert. Auch können Angaben zu den mit den Objekten assoziierten Prozessen explizit gemacht werden. Die hier vorgestellte Modellierung von Geoobjekten und Geoprozessen versetzt die Geomorphologie also prinzipiell in die Lage, die von ihr verinnerlichteten theoretischen Konzepte innerhalb einer geoinformatischen Anwendung zu validieren.

4.1.2 Nutzen der Ergebnisse

Mit dem vorgestellten semantischen Modell für Geoobjekte von Wänden und steilen Hangbereichen als Vertreter des alpinen Hochgebirges ist eine formalisierte Form geomorphologischen Fachwissens auf der Grundlage internationaler Standards zur Repräsentation der Geometrie vorgelegt worden. Auf dieser Grundlage ist es der Geomorphologie möglich, ihre Ergebnisse digital und weltweit auszutauschen.

Der geleistete Beitrag für die Fachwissenschaft der Geomorphologie ist dabei nicht zu unterschätzen. Durch die Formalisierung geomorphologischen Fachwissens ist ein Beitrag geleistet worden, die etwa von DEHN et al. 2001 geforderte semantische Modellierung auch innerhalb der Fachwissenschaft weiter voranzutreiben. Es wurde versucht, Ordnung in die z. T. unübersichtliche Lage der Termini eines Bereiches der Geomorphologie zu bringen. Mit der Entwicklung der monoton erweiterbaren, formalen semantischen Modellierung von Geoobjekten und Geoprozessen ist eine Möglichkeit geschaffen worden, die Inhalte der Geomorphologie einer fachübergreifenden Diskussion zuzuführen.

Auch für die Diskussion innerhalb der Geomorphologie stellt sich die Frage nach einer veränderten Darstellung systemarer Zusammenhänge mittels der formalen Sprache UML. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Formalismus einer reinen konzeptionellen Darstellung komplexerer Konzepte der Geomorphologie überlegen ist. Am Beispiel des Sedimentkaskadenansatzes wurde deutlich, dass die UML nicht nur differenziertere Möglichkeiten der Illustration systemarer Zusammenhänge bietet. Sie ist darüber hinaus direkt in Datenbankmanagementsysteme übertragbar und bietet so die Möglichkeit, die entwickelten Theorien mit Daten realer Objekte zu validieren.

Bei der durchgeführten Modellierung wird hier insbesondere Stellung für eine objektorientierte Anschauung der oberflächennahen Phänomene bezogen. Die Landform, die auch im Diskurs innerhalb der Geomorphologie als Entität und damit als ein Vertreter einer Klasse gesehen wird, entspricht dieser Anschauungsweise. Es wird über *Hänge* geredet und nicht über *Verteilungen von Hangneigungen*. Auch können Geoobjekte über Prozesse mit anderen Geoobjekten in Beziehung stehen. Die Repräsentation in Form von Klassenkonzepten kommt dabei einem semantischen Netz gleich (vgl. REIMER 1991), in dem die Geoobjekte die Knoten und die Geoprozesse die Kanten darstellen. Würde die Terminologie eines Teilbereiches der Geomorphologie, etwa die alpine Geomorphologie (vgl. BARSCH und CAINE 1984) in dieser Form repräsentiert,

könnten über die Anordnungen der Kanten vertiefere Aussagen über die Struktur des Georeliefs getroffen werden, als dies über die Analyse von flächenhaft im Raum verteilten Variablen der Fall ist.

Infolgedessen ist hier ein Anstoß gegeben worden, die in der Geomorphologie, insbesondere aber der Geomorphometrie verbreitete Repräsentation der betrachteten Objekte vom Ansatz des Rasters zu lösen und international anerkannte und darüber hinaus 3D-fähige Formate zu Nutzen. Die ISO 19107 bietet für die Erdwissenschaften mehr Potenzial als das Festhalten an veralteten aber verbreiteten Repräsentationsformen. Die Geomorphologie wird an dieser Stelle aufgefordert, die Erkenntnisse der Geoinformation bezüglich der Vorteile interoperabler Formate nicht zu verpassen.

4.2 Ausblick

Soll der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz einer semantischen Modellierung nachhaltig zum formalisierten Diskurs zwischen Geomorphologen beitragen, muss er weiter ausgebaut werden. Der grundlegende Charakter dieser Arbeit soll dazu beitragen, dass dies nunmehr eigenständig innerhalb der Geomorphologie vorangetrieben werden kann. Dabei muss neben der weiteren Identifizierung von Konzepten geomorphologischer Objekte auch das Verhältnis von Geoobjekt zu Geoprozess differenzierter spezialisiert werden.

In der geometrischen Repräsentation von Geoobjekten muss ferner diskutiert werden, wie mit dem Problem der Bestimmung von Grenzen umgegangen werden soll. Die von BURROUGH und FRANK 1995 aufgestellte Forderung nach klaren Grenzen für die Entitäten einer objektorientierten Sichtweise räumlich ausgedehnter Phänomene ist auch für die Analyse von Nachbarschaftsbeziehungen und die hier postulierten prozessualen Erreichbarkeiten von Geoobjekten unerlässlich.

Literatur

- AG BODEN (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 4. Ausgabe. 392 S.
- AHNERT, F. (1970A): An approach towards a descriptive classification of slopes. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 9: 71–84.
- AHNERT, F. (1970B): A comparison of theoretical slope models with slopes in the field. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 9: 88–101.
- AHNERT, F. (1988): Modelling landform change. ANDERSON, M. G. (Hrsg.): *Modelling geomorphological systems*, Wiley, Chichester, 375–400.
- AHNERT, F. (1996): *Einführung in die Geomorphologie*. Eugen Ulmer, Stuttgart. 440 S.
- AITKEN, M. J. (1998): An introduction to optical dating. *The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence*. Oxford University Press, Oxford. 267 S.
- ANGST, D. und A. SCHNEIDER (2004): Aufbau eines Nationalen Metadaten-Portals als Teil einer NGDI in der Schweiz – Vortrag gehalten auf der AGIT. http://www.itv.ch/news/vortrag_agit04.pdf (Internetseite, zuletzt besucht am 16.03.2007).
- ARMSTRONG, A. C. (1987): Slopes, Boundary conditions, and the development of convexo-concave form – some numerical experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12. 17-30.
- BAKKER, J. P. und J. W. N. LE HEUX (1947): Projective geometry treatment of O. Lehmann's theory of the transformation of mountain slopes. *Proc. Koninkl. Akad. Wetenschappen*, (49): 532–547.
- BAKKER, J. P. und J. W. N. LE HEUX (1950): Theory on the central rectilinear recession of slopes. *Proc. Koninkl. Akad. Wetenschappen*, (53): 1072–1084.
- BALLANTYNE, C. K. und C. HARRIS (1994): *The Periglaciation of Great Britain*. Cambridge University Press, Cambridge. 330 S.
- BARSCH, D. (1969): *Studien zur Geomorphogenese des zentralen Berner Juras*, Band 9 der Reihe *Basler Beiträge zur Geographie*. 221 S.
- BARSCH, D. (1978): Active rock glaciers as indicators for discontinuous alpine permafrost. An example from the Swiss Alps. In: *Proceedings of the third international Conference on permafrost*, 1. NRC-Ottawa, 349–352.

- BARSCH, D. und N. CAINE (1984): The nature of mountain geomorphology. *Mountain Research and Development*, 4(4): 287–298.
- BARSCH, D. und H. LIEDTKE (1980): Principles, scientific value and practical applicability of the geomorphological map of the Federal Republic of Germany at the scale of 1:25,000 (GMK 25) and 1:100,000 (GMK 100). *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 36: 296–313.
- BECHT, M. (1995): Untersuchungen zur aktuellen Reliefentwicklung in alpinen Einzugsgebieten, Band A 47 der Reihe Münchener Geographische Abhandlungen. Geobuch, München. 187 S.
- BISHR, Y. A. (1998): Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(4): 299–314.
- BLOOM, A. L. (1998): *Geomorphology - A systematic analysis of late cenozoic landforms*. Prentice Hall, London. 482 S.
- BOOCH, G., J. RUMBAUGH und I. JACOBSON (1999): *The Unified Modeling Language Guide*. Addison-Wesley, London. 482 S.
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion, Band 13 der Reihe Landschaftsgenese und Landschaftsökologie. 249 S.
- BOTSCHKE, J. und A. SKOWRONEK (1999): Zum Abtragspotential der Tunnelerosion. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 91: 1175–1178.
- BOTSCHKE, J., S. KRAUSE und A. SKOWRONEK (2001): Tunnelerosion und Erodierbarkeit von Lößböden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 96: 587–588.
- BRÄNDLI, M. (1997): Modelle und Algorithmen für die Extraktion geomorphologischer und hydrologischer Objekte aus digitalen Geländemodellen, Band 32 der Reihe Geoprocessing. Zürich. 176 S.
- BRUNSDEN, D. (1984): Mudslides. BRUNSDEN, D. AND PRIOR, D. B. (Hrsg.): *Slope instability*, Wiley, Chichester, 363–418.
- BRUNSDEN, D. (1996): Geomorphological events and landform change. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 40: 273–288.
- BÜDEL, J. (1970): Pedimente, Rumpfflächen und Rückland-Steilhänge – deren aktive und passive Rückverlegung in verschiedenen Klimaten. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 14(1): 1–57.
- BURBANK, D. W. und R. S. ANDERSON (2001): *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science. 274 S.
- BURROUGH, P. A. (1996): Natural objects with indeterminate boundaries. BURROUGH, P. A. und A. U. FRANK (Hrsg.): *Geographic objects with indeterminate boundaries*, Nummer 2 in *Gisdata*, Taylor & Francis, London, 3–28.

- BURROUGH, P. A. und U. A. FRANK (1995): Concepts and paradigms in spatial information: Are current geographic information systems truly generic? *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(2): 101–116.
- CAINE, N. (1969): A model for alpine talus slope development by slush avalanching. *Journal of Geology*, 77: 92–100.
- CAINE, N. (1974): The geomorphic processes of the alpine environment. IVES, J. D. und R. G. BARRY (Hrsg.): *Arctic and Alpine Environments*, Methuen, London, 721–748.
- CAINE, N. (1982): Toppling failures from alpine cliffs on Ben Lomond, Tasmania. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 133–152.
- CARSON, M. A. (1976): Mass-wasting, slope development and climate. DERBYSHIRE, E. (Hrsg.): *Geomorphology and climate*, John Wiley & Sons, New York, 101–136.
- CARSON, M. A. und M. J. KIRKBY (1972): *Hillslope Form and Process*. University Press, Cambridge. 475 S.
- CHAUFFIN, R. und D. J. HERRMANN (1988): The nature of semantic relations: A comparison of two approaches. CHORLEY, R. J. (Hrsg.): *Relational models of the lexicon*, Cambridge University Press, Cambridge, 289–334.
- CHORLEY, R. J. (1972): Spatial analysis in geomorphology. CHORLEY, R. J. (Hrsg.): *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen, London, Kapitel 1, 1–16.
- CHORLEY, R. J. (1996): The nodal position and anomalous character of slope studies in geomorphological research. *Geol. J.*, 130: 70–73.
- CHORLEY, R. J. und B. A. KENNEDY (1971): *Physical Geography – a systems approach*. Prentice Hall, London. 370 S.
- CHORLEY, R. J., S. A. SCHUMM und D. E. SUDGEN (1984): *Geomorphology*. Methuen, London. 607 S.
- CHRISTOPHERSON, R. W. (1997): *Geosystems – An introduction to Physical Geography*. Prentice Hall, London. 656 S.
- CHURCH, M. und O. SLAYMAKER (1989): Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia. *Nature*, 337(2): 452–454.
- CHURCH, M., R. F. STOCK und J. M. RYDER (1979): Contemporary sedimentary environments on Baffin Island, N.W.T., Canada: debris slope accumulation. *Arctic and Alpine Research*, 11(4): 371–402.
- COOKE, R. U. und R. W. REEVES (1972): Relations between debris size and the slope of mountain fronts and pediments in the Mojave Desert, California. *Z. Geomorph. N. F.*, 16: 76–82.
- COOKE, R. U. und J. C. DOORKAMP (1990): *Geomorphology in environmental management*. Clarendon, Oxford. 410 S.

- COROMINAS, J., P. REMONDO, M. ESTEVAO, J. ZÉZERE, J. DÍAZ DE TERÁN, R. DIKAU, L. SCHROTT, J. MOYA und A. GONZÁLEZ (1996): Debris Flow. DIKAU, R., D. BRUNSDEN, L. SCHROTT und M.-L. IBSEN (Hrsg.): *Landslide Recognition*, John Wiley & Sons, Chichester, Kapitel 7.2, 161–180.
- COUCLELIS, H. (1996): Towards an operational typology of geographic entities with ill-defined boundaries. BURROUGH, P. A. und A. U. FRANK (Hrsg.): *Geographic objects with indeterminate boundaries*, Nummer 2 in *Gisdata*, Taylor & Francis, London, 45–55.
- CRANEFIELD, S. und M. PURVIS (1999): UML as an ontology modelling language. In: *Proceedings of the Workshop on Intelligent Information Integration of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, 230–239. <http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/Publications/CEUR-WS/Vol-23/cranefield-ijcai99-iii.pdf> (Interentseite, zuletzt besucht am 17.06.2007).
- CURRY, M. R. (2000): Geographical practice and the ontologies of geographic information systems – Vortrag gehalten auf der Annunal meeting Association of American Geographers. <http://baja.sscnet.ucla.edu>(Interentseite, zuletzt besucht am 10.02.2007).
- DALRYMPLE, J. B., R. J. BLONG und A. J. CONACHER (1968): An hypothetical nine unit landsurface model. *Z. Geomorph. N. F.*, 12: 60–76.
- DEDKOV, A. P. und V. I. MOZZHERIN (1996): Erosion and sediment yield on the earth. WALLING, D. E. und D. WEBB, B. W.PIMENTEL (Hrsg.): *Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives*, Wallingford, 29–33.
- DEHN, M., H. GÄRTNER und R. DIKAU (2001): Principles of semantic modelling of landform structures. *Computers and Geosciences*, 27: 1005–1010.
- DEMERS, M. N. (2000): *Fundamentals of Geographic Information Systems*. Wiley, New York. 489 S.
- DEPLOEY, J. (1990): Theshold conditions for thalweg gullying with special reference to loess areas. *Catena Suppl.*, 17: 67–72.
- DESAUSSURE, F. (1931): *Grundlagen der allgemeinen Sprachwissenschaft*. DeGruyter Clarendon, Leipzig.
- DIETRICH, W. E., T. DUNNE, N. F. HUMPHREY und L. M. REID (1982): Construction of sediment budgets for drainage basins. SWANSON, F. J., R. J. JANDRA, T. DUNNE und D. N. SWANTSON (Hrsg.): *Sediment budgets and routing in forested drainage basins*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 35–58.
- DIKAU, R. (1988): Entwurf einer geomorphographisch - analytischen Systematik von Reliefeinheiten, Band 5 der Reihe Heidelberger Geographische Bausteine. Heidelberg. 43 S.

- DIKAU, R. (1989): The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. RAPER, J. (Hrsg.): Three dimensional application in Geographic Information Systems, Taylor & Francis, London, Kapitel 5, 51–77.
- DIKAU, R. (1996): Geomorphologische Reliefklassifikation und -analyse. Heidelberger Geographische Arbeiten, 104: 15–23.
- DIKAU, R. (1998): The need for field evidence in modelling landform evolution. HERGARTEN, S. und H. J. NEUGEBAUER (Hrsg.): Process modelling and landform evolution, Lecture notes in earth sciences, Springer, Heidelberg, 3–12.
- DIKAU, R. und K. FRIEDRICH (1999): Digitale Reliefmodellierung. ZEPP, H. und M. J. MÜLLER (Hrsg.): Landschaftsökologische Erfassungsstandards. Ein Methodenbuch, Nummer 244 in Forschungen zur deutschen Landeskunde, Flensburg, 50–74.
- DIKAU, R. und T. GLADE (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. Geographische Rundschau, 54(1): 38–45.
- DIKAU, R. und J. SCHMIDT (1999): Georeliefklassifikation. SCHNEIDER-SLIWA, R., D. SCHAUB und G. GEROLD (Hrsg.): Angewandte Landschaftsökologie. Grundlagen und Methoden, Springer, Heidelberg, 217–244.
- DOUGLAS, D. (1980): Magnitude and frequency study of rockfall in Co. Antrim, North Ireland. Earth Surface Processes and Landforms, 5: 123–129.
- DOUGLAS, D., W. WHALLEY und J. MCGREEVY (1980): Rock properties as controls on free-face debris fall activity. Permafrost and Periglacial Processes, 2: 311–319.
- DÜRR, E. (1970): Kalkalpine Sturzhalden und Sturzschuttbildungen in den westlichen Dolomiten, Band 37 der Reihe Tübinger Geographische Studien. Tübingen. 120 S.
- DUMKE, R. R. (ND): UML-Tutorial. <http://ivs.cs.uni-magdeburg.de/dumke/UML/inhalt.htm> (Internetseite, zuletzt besucht am 09.06.2005).
- EMBLETON, C. (1979): Nival processes. EMBLETON, C. und J. THORNES (Hrsg.): Process in Geomorphology, Edward Arnold, London, 307–324.
- EVANS, I. S. (1972): General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. CHORLEY, R. J. (Hrsg.): Spatial analysis in geomorphology, Methuen, London, 17–90.
- EVANS, I. S. (1980): An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd., 36: 274–295.
- EVANS, I. S. (1997): Process and Form in the erosion of glaciated mountains. STODDART, D. R. (Hrsg.): Arctic and alpine environments, Routledge, London, 145–174.
- FAO-UNESCO (1988): Soil Map of the World – Revised Legend. Rom.
- FINLAYSON, B. und I. STATHAM (1980): Hillslope analysis. Butterworth. 230 S.

- FISHER, P. und J. WOOD (1998): What is a mountain? Or the englishman who went up a boolean geographical concept and realized it was fuzzy. *Geography*, 83: 247–256.
- FLAGEOLLET, J. C. (1993): Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. European Community Programme.
- FLIRI, F. (1975): Das Klima der Alpen im Raume von Tirol, Band 1 der Reihe Monographien zur Landeskunde Tirols. Innsbruck. 111 S.
- FONSECA, F. T. und M. J. EGENHOFER (1999): Ontology-driven geographic information Systems. In: BAUZER, C. (Hrsg.): Proc. Fifteenth Annual ACM, Nummer 7 in ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems. ACM, Kansas.
- FONSECA, F. T., M. J. EGENHOVER, C. DAVIS und G. CÂMARA (2002): Semantic granularity in ontology-driven geographic information systems. *Annals of mathematics and artificial intelligence - Special issue on spatial and temporal granularity*, 36(1-2): 121–151.
- FORD, D. und P. W. WILLIAMS (1989): Karst geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman, London. 601 S.
- FRÄNZLE, O. (1971): Physische Geographie als quantitative Landschaftsforschung. Beiträge zur geographischen Landeskunde und Regionalforschung in Schleswig-Holstein. *Schrift. Geogr. Inst. Kiel*, 37: 297–312.
- FRANCOU, B. und C. MANTÉ (1990): Analysis of the sedimentation in the profil of alpine talus slopes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1: 53–60.
- FRANK, A. U. (1996): The prevalence of objects with sharp boundaries in GIS. BURROUGH, P. A. und A. U. FRANK (Hrsg.): *Geographic objects with indeterminate boundaries*, Nummer 2 in *Gisdata*, Taylor & Francis, London, 29–40.
- FRANK, A. U. (1997): Spatial ontology. STOCK, O. (Hrsg.): *Spatial and temporal reasoning*, Kluwer Academic, Dordrecht, 135–153.
- FRANK, A. U. (2001): Tiers of ontology and consistency constraints in geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 15: 667–678.
- FRENCH, H. M. (1996): The periglacial environment. Longman, London, 2. Ausgabe. 341 S.
- GARDNER, J. S. (1983): Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rock Mountains. *Z. Geomorph. N. F.*, 27(3): 311–324.
- GEIPEL, R. (1992): *Naturrisiken. Katastrophenbewältigung im sozialen Umfeld*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. 292 S.
- GENESERETH, M. R. und N. J. NILSSON (1987): *Logical foundations of artificial intelligence*. Morgan Kaufmann, San Matego.

- GLADE, T. und R. DIKAU (2001): Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 145(6): 42–55.
- GODFREY, M. W. (2005): My Little UML Page. <http://plg.uwaterloo.ca/migod/uml.html> (Internetseite, zuletzt besucht am 17.06.2005).
- GRÖGER, G. (2000): Modellierung raumbezogener Objekte und Datenintegrität in GIS. Wichmann, Heidelberg. 188 S.
- GRÖGER, G. und T. H. KOLBE (2005): Normen und Standards für 3D-Geodaten. CORRS, V. AND ZIPF, A. (Hrsg.): 3D-Geoinformationssysteme – Grundlagen und Anwendungen, Wichmann, Heidelberg, Kapitel 4, 56–70.
- GRÖGER, G. und L. PLÜMER (2003): Exploiting 2D Concepts to Achieve Consistency in 3D GIS Applications. In: HOEL, E. und P. RIGAUX (Hrsg.): Proc. of the 11th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM-GIS 2003), Nummer 7 in ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems. ACM, New Orleans, 78–85.
- GRÖGER, G. und L. PLÜMER (2005): How to get 3-D for the price of 2-D - Topology and Consistency of 3-D Urban GIS. *Geoinformatica*, 9(2): 139–158.
- GRÖGER, G., J. BENNER, D. DÖRSCHLAG, R. DREES, U. GRUBER, K. LEINEMANN und M.-O. LÖWNER (2005): Das interoperable 3D Stadtmodell der SIG 3D. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*.
- GRUBER, T. R. (1993): Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(4-5): 907–928.
- GUARINO, N. (2004): Formal ontology and information systems. In: Proceedings of the 1st International Conference on Formal Ontologies in Information Systems, FOIS'98. IOS Press, Trento, 3–15.
- HABERÄCKER, P. (1987): *Digitale Bildverarbeitung – Grundlagen und Anwendungen*. Hanser, München. 350 S.
- HAEBERLI, W., M. WEGMANN und D. VONDER MUEHLL (1997): Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90: 407–414.
- HAGEDORN, J. (1970): Zum Problem der Glatthänge. *Z. Geomorph. N. F.*, 14(2): 103–113.
- HAIGH, M. J. (1987): The holon: Hierarchy theory and landscape research. *Catena Suppl.-Bd.*, 10: 181–192.
- HALL, K. J. und A. HALL (1991): Thermal gradients and rock weathering at low temperatures: Some simulation data. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2: 103–112.

- HANSEN, M. J. (1984): Strategies for classification of landslides. BRUNSDEN, D. und D. B. PRIOR (Hrsg.): Slope instability, John Wiley & Sons, Chichester, 1–25.
- HARDISTY, J. (1987): The transport response function and relaxation time in geomorphic modelling. *Catena Supp.*, 10: 171–179.
- HARLAND, W. B., R. L. ARMSTRONG, A. V. COX, L. E. CRAIG, A. G. SMITH und D. G. SMITH (1986): A geologic time scale 1989. Cambridge University Press, Cambridge. 263 S.
- HAUSER, A. und J. ZÖTL (1955): Die morphologische Bedeutung der unterirdischen Erosion durch Gesteinsausspülung. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 99: 18–21.
- HEMPEL, L. (1974): Einführung in die Physiogeographie. Einleitung in die Geomorphologie. Franz Steiner, Wiesbaden. 147 S.
- HERRING, J. (2001): The OpenGIS abstract specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document 01-101. 168 S.
- HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Teubner, Stuttgart. 151 S.
- HERVÁS, J., J. I. BARREDO, P. L. ROSIN, A. PASUTO, F. MANTOVANI und S. SILVANO (2003): Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: The case history of Tessina landslide, Italy. *Geomorphology*, 54: 63–75.
- HITZ, M. und G. KAPPEL (1999): UML @ work – Von der Analyse zur Realisierung. dpunkt, Heidelberg. 357 S.
- HÖLLERMANN, P. (1983): Verbreitung und Typisierung von Glatthängen. POSER, H. und E. SCHUNKE (Hrsg.): Mesoformen des Reliefs im heitigen Periglazialraum, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 241–260.
- HORTON, R. (1982): Tradition and modernity revisited. HOLLIS, M. und S. LUKES (Hrsg.): Rationality and relativism, Blackwell, Oxford, 201–260.
- HUGGET, R. J. (2003): Fundamentals of Geomorphology. Routledge, London. 386 S.
- HUTCHINSON, J. N. (1988): Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrology. In: BONNARD, C. (Hrsg.): Landslides, Nummer 1 in Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides, 3–35.
- HUTCHINSON, J. N. (1998): A small field check on the Fisher-Lehmann and Bakker-Le Heux cliff degradation Models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 913–926.
- ISO/DIS 19106 (2002): Geographic information – Profiles. <http://www.isotc211.org> (Internetseite, zuletzt besucht am 17.03.2005).
- ISO/DIS 19109 (2002): Geographic information – Rules for application schema. <http://www.isotc211.org> (Internetseite, zuletzt besucht am 17.03.2005).

- ISO/DIS 19110 (2000): Geographic information – Feature cataloguing methodology. <http://www.isotc211.org> (Internetseite, zuletzt besucht am 17.03.2005).
- ISO/FDIS 19111 (2002): Geographic information – Rules for application schema. ISO Technical Committee 211, Final Draft International Standard. <http://www.isotc211.org> (Internetseite, zuletzt besucht am 17.03.2005).
- JÄCKLI, H. (1957): Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes., Band 36 der Reihe Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie. Springer. 126 S.
- JÄNICH, K. (1999): Topologie. Springer, Heidelberg. 239 S.
- JAQUEZ, G.M., S. MARUCA und M.-J. FORTIN (2000): From fields to objects: A review of geographic boundary analysis. *J Geogr Sys*, 2: 221–241.
- JORDAN, P. und O. SLAYMAKER (1991): Holocene sediment production in Lillooet River Basin British Columbia: A sediment budget approach. *Géographie physique et Quaternaire*, 45(1): 45–57.
- KALLETAT, D. (1999): Physische Geographie der Meere und Küsten. Teubner, Stuttgart. 258 S.
- KASSEBEER, W. (2002): GIS-gestützte Gefährdungskartierung einer alpinen Region. Dissertation, Martin-Luther-Universität, Karlsruhe. <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psgunzip/2002/bio-geo/9/9.pdf> (Internetseite, zuletzt besucht am 27.06.2005).
- KELLER, D. und M. MOSER (2002): Assessments of field methods for rock fall and soil slip modelling. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 127: 127–135.
- KEMPER, A. und A. EICKLER (1999): Datenbanksysteme. Oldenbourg, München. 504 S.
- KENDE, O. (1947): Geographisches Wörterbuch allgemeine Erdkunde. Teubner, Leipzig. 238 S.
- KIMBER, O. G., R. J. ALLISON und N. J. COX (2002): Rates and Mechanism of Change of hard rock steep slopes on the colorado plateau, USA. ALLISON, R.J. (Hrsg.): *Applied Geomorphology*, John Wiley & Sons, Chichester, 65–89.
- KLIR, G. und B. YUAN (1995): Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Prentice Hall, Upper Saddle River. 592 S.
- KOLBE, T. H. und G. GRÖGER (2002): 3D-Stadtmodellierung auf der Basis internationaler GI-Standards. ZIPF, A. und V. COORS (Hrsg.): *3D-Geoinformationssysteme: Grundlagen und Anwendungen*, Wichmann, Heidelberg.
- KOLBE, T. H., G. GRÖGER und L. PLÜMER (2004): CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. In: VAN OOSTEROM, P., S. ZLATANOVA und E. M. FENDEL (Hrsg.): *Geo-information for Disaster Management*, Nummer 1 in Proc. of the 1st

- International Symposium on Geo-information for Disaster Management. Springer, Delft.
- KOSKO, B. (1993): *Fuzzy Thinking*. Hyperion, New York. 318 S.
- KRAUS, H. (2000): *Die Atmosphäre der Erde*. Vierweg, Braunschweig. 470 S.
- KRESSE, W. (2004): Standardization of geographic information. In: *International Archives of ISPRS*, Nummer XXXV. Istanbul.
- KUGLER, H. (1974): *Das Georelief und seine kartographische Modellierung*. Dissertation B, Martin-Luther-Universität Halle.
- KUHN, T. S. (1967): *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Suhrkamp, Frankfurt.
- KUHN, W. (2002): Ontologies in support of activities in geographical space. *International Journal of activities in geographical space*, 15(7): 613–631.
- LAKE, R., D. S. BURGGRAF, M. TRNINIĆ und L. RAE (2004): *GML – Geography Mark.Up Language*. John Wiley & Sons, Chichester. 388 S.
- LANG, A. (1996): *Die Infrarot-Stimulierte-Lumineszenz als Datierungsmethode für holozäne Lössderivate*, Band 103 der Reihe Heidelberger Geographische Arbeiten. Heidelberg. 137 S.
- LEHMANN, H. (1964): Glanz und Elend der morphologischen Terminologie. BÜDEL, J. (Hrsg.): *Neue Fragen der Allgemeinen Geographie*, Nummer 12 in *Würzburger Geographische Arbeiten*, Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Würzburg, Würzburg, 11–22.
- LEHMANN, O. (1933): *Morphologische Theorie der Verwitterung von Stein-schlagwänden*. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, LXXVIII: 83–126.
- LEOPOLD, L. B., M. G. WOLMANN und J. P. MILLER (1964): *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman & Company, London. 522 S.
- LESER, H., H.-D. HAAS, T. MOSIMANN und R. PAESLER (1992A): *Wörterbuch der Allgemeinen Geographie*, Band 1 A – M. dtv/Westermann, München. 422 S.
- LESER, H., H.-D. HAAS, T. MOSIMANN und R. PAESLER (1992B): *Wörterbuch der Allgemeinen Geographie* Band, 2 N – Z. dtv/Westermann, München. 421 S.
- LÖWNER, M.-O. (2000): *Geophysikalische und sedimentologische Untersuchungen zu Sedimentspeichern auf Gut Frankenforst*. Diplomarbeit, unveröffentlicht, am Geographischen Institut der Universität Bonn. 141 S.
- LÖWNER, M.-O. (2005): *Semantische Modellierung und Repräsentation geomorphologischer Objekte in einem geographischen Informationssystem (GIS) unter besonderer Berücksichtigung von Wänden und steilen Hangbereichen*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Kartographie und Geoinformation. http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online/landw_fak/2005/loewner_marc-oliver.

- LÖWNER, M.-O., D. DÖRSCHLAG und PLÜMER L. (2003): Interaktive Geoobjekterkennung in digitalen Höhenmodellen mittels Parametervisualisierung. In: Visualisierung und Erschließung von Geodaten, Nummer 7 in Kartographische Schriften. Bonn, 59–66.
- LÖWNER, M.-O., N. J. PRESTON und R. DIKAU (2005): Reconstruction of a colluvial body using geoelectrical resistivity. *Z. Geomorph. N. F.*, 49(2): 225–238.
- LOHNES, R. A. und R. L. HANDY (1968): Slope angles in friable loess. *Journal of Geology*, 76: 247–258.
- LOUIS, H. und K. FISCHER (1979): *Allgemeine Geomorphologie*. Walter de Gruyter, Berlin. 814 S.
- LUCKMAN, B. H. (1976): Rockfalls and rockfall inventory data: Some observations from Surprise Valley, Jasper National Park Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1: 287–298.
- MACHATSCHEK, F. (1973): *Geomorphologie*. Teubner, Stuttgart. 256 S.
- MÄUSBACHER, R. (1985): Die Verwendbarkeit der geomorphologischen Karte 1:25 000 (GMK 25), Band 97 der Reihe Berliner Geographische Abhandlungen. University Press, Berlin. 97 S.
- MERCHEL, S. (2005): Kosmogene Nuklide. http://www.meteoroids.de/wiss_met.c.htm (Internetseite, zuletzt besucht am 30.04.2005).
- MILLIMAN, J. D. und R. H. MEADE (1983): World-wide delivery of sediment to the oceans. *The Journal of Geology*, 91: 1–21.
- MONTGOMERY, D. R. und H. M. GREENBERG (2000): Local relief and the hight of Mount Olympus. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(4): 385–396.
- MOORE, I. D., R. B. GRAYSON und A. R. LANDSON (1991): Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5: 3–30.
- MORTENSEN, H. (1960): Zur Theorie der Formenentwicklung freier Felswände. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 1: 103–113.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1962): *Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland*. DLG, Frankfurt a. M. 148 S.
- MÜLLER, F. (1999): Ökosystemare Modellvorstellung und Ökosystemmodelle in der angewandten Landschaftsökologie. SCHNEIDER-SLIWA, R., D. SCHAUB und G. GEROLD (Hrsg.): *Angewandte Landschaftsökologie*, Springer, Heidelberg, 25–46.
- OBJECT MANAGEMENT GROUP (2003): *OMG Unified Modelling Language Specification*. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/03-03-01.pdf> (Internetseite, zuletzt besucht am 01.06.2005).

- OESTERREICH, B. (1998): Objektorientierte Softwareentwicklung – Analyse und Design mit der Unified Modeling Language. Oldenbourg, München. 375 S.
- OKABE, A., B. BOOTS, SUGIHARA K. und S. N. CHIU (2000): Spatial Tesselations. Wiley, Chichester. 671 S.
- O'NEILL, M. P. und D. M. MARK (1987): On the Frequency Distribution of Land Slope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 127–136.
- OTTO, J.-C. und R. DIKAU (2004): Geomorphologic system analysis of a high mountain valley in the Swiss Alps. *Z. Geomorph. N. F.*, 48(3): 323–341.
- OTTO, J.-C., K. KLEINOD, O. KÖNIG, M. KRAUTBLATTER, M. NYENHUIS, I. ROER, M. SCHNEIDER, B. SCHREINER und R. DIKAU (2004): HRSC-A data: a new high-resolution data set with multi-purpose applications in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 31(2): 179–197.
- PANETH, F., H. GEHLEN und P. L. GÜNTHER (1928): Über den Helium-Gehalt und das Alter von Meteoriten, Band 34 der Reihe *Z. Elektrochem.* 645 S.
- PANIZZA, M. (1996): Environmental Geomorphology. Arctic and alpine environments, Nummer 4 in *Developments in earth surface processes*, Elsevier, Amsterdam. 286 S.
- PANZER, W. (1949): Brandungshöhlen und Brandungskehlen. *Erdkunde*, 3: 29–41.
- PARSONS, A. J. (1988): Hillslope Form. Routledge, London. 212 S.
- PASUTO, A., S. SILVANO und G. P. BOZZO (1993): The Tessina landslide (Belluno, Italy). In: PANIZZA, M., M. SOLDATI und D. BARANI (Hrsg.): *Proc. First European Intensive Course on Applied Geomorphology*, Pubblicazioni Istituto di Geologia, Università degli Studi di Modena, Italy. Modena, 63–69.
- PÉCSI, M. und G. RICHTER (1996): Löss. Herkunft - Gliederung - Landschaft, Band 98 der Reihe *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.* Gebrüder Borntraeger, Stuttgart. 391 S.
- PEIRCE, C. S. (1955): *Deduction, Induction and Hypothesis.* PEIRCE, C. S. (Hrsg.): *Collected Papers*, Nummer 2, Cambridge, 619–644.
- PELZ, H. (1993): *Linguistik für Anfänger.* Hoffmann & Campe, Hamburg. 320 S.
- PENCK, A. (1894): *Die Morphologie der Landoberfläche.* Stuttgart. 471 S.
- PHILLIPS, J. D. (1992): The source of alluvium in large rivers of the lower Coastal Plain of North Carolina. *Catena*, 19: 59–75.
- PIKE, R. J. (1995): Geomorphometry - progress, practice, and prospect. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 101: 221–238.
- PLÜMER, L., W. FÖRSTNER, T. H. KOLBE, A. BRUNN und G. GRÖGER (2002A): Konzeption und Dokumentation eines Verfahrens zur Ableitung von 3D-Stadtmodellen aus der Regengelderfassung (Versieglungskartierung). unveröffentlicht.

- PLÜMER, L., G. GRÖGER, I. PETZOLD und K. BISSELING (2002B): Vorschlag für ein Modell zur Repräsentation für 3D-Objekte für Landschaftsmodelle. unveröffentlicht.
- PRESS, F. und R. SIEVER (1995): Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 602 S.
- RAMBAUSKE, T (2003): Chronik 2003. <http://www.bergnews.com/service/chronik2003.htm> (Internetseite, zuletzt besucht am 21.04.2005).
- RAPER, J. und D. LIVINGSTONE (1995): Development of a geomorphological spatial model using object-oriented design. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4): 359–383.
- RAPP, A. (1960A): Literature on slope denudation in Finland, Iceland, Norway, Spitsbergen and Sweden. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 1: 33–48.
- RAPP, A. (1960B): Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geografiska Annaler*, 42: 71–200.
- RASEMANN, S. (2004): Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems, Band 111 der Reihe Bonner Geographische Abhandlungen. Asgard Verlag, Sankt Augustin. 240 S.
- RAY, E. T. (2001): Einführung in XML. O'Reilly, Cambridge. 350 S.
- REID, L. M. und T. DUNNE (1996): Rapid evaluation of sediment budgets. *Catena*, Reiskirchen. 164 S.
- REIMER, U. (1991): Einführung in die Wissensrepräsentation. Teubner, Stuttgart. 313 S.
- RIB, H. T. und T. LIANG (1978): Recognition and identification. SCHUSTER, R. L. und R. J. KRIZEK (Hrsg.): Landslides analysis and control, Nummer 176 in *Transp. Res. Board, Spec. Rep.*, 34–80.
- RICHTER, E. (1900): Geomorphologische Untersuchungen in den Hochalpen. *Petermanns Geographische Mitteilungen Ergänzungshefte*. 130 S.
- RIGAUX, P., M. SCHOLL und A. VOISARD (2002): Spatial Databases with application to GIS. Academic Press, London. 410 S.
- RISHE, N. (1992): Database Design: The Semantic Modeling Approach. McGraw-Hill. 528 S.
- SASS, O. (1998): Die Steuerung von Steinschlagmenge und -verteilung durch Mikroklima, Gesteinsfeuchte und Geesteinseigenschaft im westlichen Karwendelgebirge (Bayrische Alpen), Band B29 der Reihe Münchener Geographische Abhandlungen. Tübingen. 175 S.
- SASS, O. und K. WOLLNY (2001): Investigations regarding alpine talus slopes using ground-penetrating radar (GPR) in the Bavarian Alps, Germany. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1071–1086.

- SAVIGEAR, R. A. G. (1960): Slopes and hills in West Africa. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 1: 156–171.
- SAVIGEAR, R. A. G. (1965): A technique of morphological mapping. *Ann. Assoc. of Amer. Geogr.*, 55(3): 514–538.
- SCHMIDT, J., I. J. EVANS und J. BRINKMANN (2003): Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(8): 797–814.
- SCHROTT, L. (1991): Global solar radiation, soil temperature and permafrost in the central Andes, Argentina: A progress report. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2(3): 59–66.
- SCHROTT, L., G. HUFSCHMIDT, M. HANKAMMER, T. HOFFMANN und R. DIKAU (2003): Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. *Geomorphology*, 55: 45–63.
- SCHUMM, S. A. (1973): Geomorphic threshold and complex response of drainage systems. MORISAWA, M. (Hrsg.): *Fluvial Geomorphology*, Kapitel 13. 299–310.
- SCHUMM, S. A. (1979): Geomorphic thresholds: The concept and its application. *Transactions of the Institute of British Geographers (New Series)*, 4: 485–515.
- SCHUMM, S. A. (1991): *To Interpret the Earth – Ten Ways to be Wrong*. Cambridge University Press, Cambridge. 133 S.
- SCHUMM, S. A. und R. J. CHORLEY (1966): Talus weathering and scarp recession in the Colorado Plateaus. *Z. Geomorph. N. F.*, 10: 11–36.
- SCHUMM, S. A. und W. LICHTY (1965): Time, space, and causality in geomorphology. *American Journal of Science*, 263: 110–119.
- SCHUMM, S. A. und M. P. MOSLEY (1973): *Slope Morphology*. Hutchinson & Ross, Dowden. 468 S.
- SCHWARZ, F. F. (HRSG.) (2000): *Aristoteles Metaphysik*. Reclam, Stuttgart. 443 S.
- SEIDL, H. (HRSG.) (1988): *Thomas von Aquin: Über Seiendes und Wesenheit (De ente et essentia)*, Lateinisch Deutsch, mit Einleitung. Meiner, Hamburg. 134 S.
- SELBY, M. J., P. AUGUSTINUS, V. G. MOON und R. J. STEVENSON (1988): Slopes on strong rock masses: modelling and influences of stress distributions and geomechanical properties. ANDERSON, M. G. (Hrsg.): *Modelling geomorphological systems*, John Wiley & Sons, Chichester, Kapitel 12, 341–374.
- SEMMEL, A. (1993A): Das aktualistische Prinzip und seine Anwendung in der deutschen Tropen-Geomorphologie. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, 93: 47–59.
- SEMMEL, A. (1993B): *Grundzüge der Bodengeographie*. Teubner, Stuttgart. 127 S.
- SIMONS, D. B. (1969): Open channel flow. CHORLEY, R. (Hrsg.): *Water, Earth, and Man*, Methuen, London, 297–318.

- SLAYMAKER, O. (1991): Mountain geomorphology: A theoretical framework for measurement programmes. *Catena*, 18: 427–437.
- SMITH, B. (2000): Fiat Objects. *Philosophy and Phenomenological Research*, 60(2): 401–420.
- SMITH, B. und D. M. MARK (1999): Ontology with human subjects testing. *The American Journal of Economics and Sociology*, 58(2): 245–272.
- SMITH, B. und D. M. MARK (2003): Do Mountains exist? Towards an Ontology of Landforms. *Planning and Design*, 30(3): 411–427.
- SPREIZER, H. (1957): Zur Geographie des Kilikischen Ala Dag im Taurus. Festschrift zur Hundertjahrfeier der Geographischen Gesellschaft Wien, Wien, 414–459.
- STÄBLEIN, G. (1983): Formung von Hängen und Wänden. Beobachtung im Bereich der Antarktischen Halbinsel. POSER, H. und E. SCHUNKE (Hrsg.): *Mesoformen des Reliefs im heutigen Periglazialraum*, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 160–170.
- STANDARDS NEW ZEALAND (2005): Geographic information Profiles – Draft for Public Comment Australian/New Zealand Standard. <http://shop.standards.co.nz/drafts/DR05046-DR05046.pdf> (Internetseite, zuletzt besucht am 16.03.2005).
- STINGL, H. und K. GARLEFF (1983): Beobachtung zur Hang- und Wandentwicklung in der Periglazialstufe der subtropisch-semiariden Hochanden Argentiniens. POSER, H. und E. SCHUNKE (Hrsg.): *Mesoformen des Reliefs im heutigen Periglazialraum*, Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 199–213.
- STRATHAM, I. (1976): A scree slope rockfall model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1: 43–62.
- SUMMERFIELD, M. A. (1997): *Global Geomorphology - An Introduction to the study of landforms*. Addison Wesley, Essex. 537 S.
- TERJUNG, W. H. (1982): Process-response systems in physical geography, Band 14 der Reihe *Colloquium Geographicum*. Dümmler, Bonn. 66 S.
- THORN, C. E. und M. R. WELFORD (1994): The equilibrium concept in geomorphology. *Annals of American Geographers*, 84(4): 666–696.
- THORNBURY, W. D. (1956): *Principles of geomorphology*. Wiley & Sons, New York. 618 S.
- THORNES, J. B. (1989): *Environmental Systems Patterns, Processes and Evolution*. CLARK, M. J., K. J. GREGORY und A. M. GURNELL (Hrsg.): *Horizons in Physical Geography*, Barnes & Noble, Ottawa.
- TRIMBLE, S.W. (1999): Decreased rates of sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975 - 93. *Science*, 285: 1244–1246.

- TWIDALE, C. R. (1960): Some problems of slope development. *J. Geol. Soc. Australia*, 6: 131–147.
- ULLMAN, J. D. (1988): *Principles of database and knowledge-base systems*, Band 1. Computer Science Press, New York. 631 S.
- VARNES, D. J. (1978): Slope movements. ECKEL, E. B. (Hrsg.): *Landslides analysis and control*, Nummer 176 in *Transp. Res. Board, Spec. Rep.*, 11–33.
- W3C-CONSORTIUM (2001): *WebCGM 1.0 Second Release*. <http://www.w3.org/TR/REC-WebCGM/Overview.html> (Internetseite, zuletzt besucht am 16.03.2005).
- WALLING, D. E., B. W. WEBB und D. PIMENTEL (1996): Erosion and sediment yield: A global overview. WALLING, D. E. und D. WEBB, B. W. PIMENTEL (Hrsg.): *Erosion and sediment yield: Global and regional perspectives*, Wallingford, 3–20.
- WEISCHET, W. (1991): *Einführung in die allgemeine Klimatologie*. Teubner, Stuttgart. 275 S.
- WHALLEY, W. B. (1974): The mechanics of high magnitude low frequency rock failure and its importance in a mountain area, Band 27 der Reihe *Geogr. Papers*. Reading University. 48 S.
- WHITE, I. D., D. N. MOTHERSHEAD und S. J. HARRISON (1992): *Environmental Systems*. Chapman & Hall, London.
- WILLIAMS, P. und M. SMITH (1991): *The frozen Earth*. University Press, Cambridge. 306 S.
- WISCHMEYER, W. H. und D. D. SMITH (1962): Soil-loss estimation as a tool in soil and water management planning. In: *ON LAND EROSION, COMMISSION* (Hrsg.): *Symposium of Bari*, Nummer 59, 148–159.
- WOLMAN, M. G. und J. P. MILLER (1960): Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68: 54–74.
- WORBOYS, M. F. (1995): *Geographic Information Systems: A Computing Perspective*. Taylor & Francis, London. 376 S.
- WRIGHT, R. L. (1972): Principles in a geomorphological approach to landform classification. *Z. Geomorph. N. F.*, 16(4): 351–372.
- YERGEAU, F., T. BRAY, J. PAOLI, C. M. SPERBERG-MCQUEEN und E. MAILER (2004): *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Third Edition)*. <http://www.w3.org/TR/2004/REC-xml-20040204/> (Internetseite, zuletzt besucht am 22.06.2005).
- YOUNG, A. (1964): In discussion on: Slope profiles: a symposium. *Geographical Journal*, 130: 80–82.
- YOUNG, A. (1978): *Slopes*. Longman, London. 288 S.

- ZADEH, L.A. (1965): Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8: 337–353.
- ZEPP, H. (2003): *Geomorphologie*. Ferdinand Schöningh, Paderborn. 354 S.
- ZEVEBERGEN, L. W. und C. R. THORNE (1987): Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(4): 47–56.
- ZOGLAUER, T. (1997): *Einführung in die formale Logik für Philosophen*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. 172 S.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit ist im Graduiertenkolleg „Das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“ an der Universität Bonn entstanden. Sie befasst sich mit der formalen semantischen Modellierung und geometrischen Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen als besondere Stellen des alpinen Reliefs. Im Fokus stehen die Fragen, wie geomorphologisches Fachwissen auf Grundlage internationaler Standards formalisiert und die im Rasterformat nicht zu fassenden Geometrien dieser z. T. überhängenden Formen repräsentiert werden können. Dabei muss der diskursive Formalisierungsgrad innerhalb der Geomorphologie dem Formalisierungsanspruch der Geoinformation angepasst werden.

Wände und steile Hangbereiche stellen ein bedeutendes Naturgefahrenpotential für alpine Gebiete der gesamten Welt dar. Mit Felswänden verbundene Prozesse, wie Felsstürze oder Steinschlag, bedrohen Siedlungen und Tourismus. Die Erforschung dieser Landformen ist Aufgabe der Geomorphologie. Eine auf Rasterdaten basierende Repräsentation ermöglicht allerdings keine ausreichende Analyse dieser z. T. überhängenden Bereiche des Georeliefes. Auch liegen keine weiterreichenden formalen semantischen Modellierungen der betrachteten Objekte, ihrer funktionalen Beziehungen und anderer, grundlegender Konzepte der Fachwissenschaft vor. Eine geeignete geometrische Repräsentation und eine formale Semantik auf Grundlage internationaler Standards sind aber Voraussetzung für den weltweiten Austausch von Informationen innerhalb der Geomorphologie.

Hier wird eine formale semantische Modellierung der grundlegenden Konzepte der alpinen Geomorphologie, insbesondere aber von Wänden und steilen Hangbereichen vorgelegt. Dafür wurde das geomorphologische Wissen gesichtet und in die formale Sprache UML überführt, die eine Implementierung des Modells in ein GI-System ermöglicht. Als geometrische Repräsentationsform, die einen Austausch von Daten garantiert, wurde der ISO 19107 „Spatial Schema“ gewählt. Eine semantische Modellierung geomorphologischer Konzepte auf Grundlage internationale Standards ist durchführbar und weist weitreichende Vorteile auf. Diese sind vor allem die Repräsentation von 3D-Geometrien. Weiter können auf Klassenkonzepte basierende semantische Modellierungen in DBMS überführt und die modellierten Phänomene damit informationstechnisch verarbeitet werden.

Abstract

This thesis was written within the research training Group „Landform – a Structured and Variable Boundary Layer“. It occupies itself with formal semantic modelling and geometric representation of walls and steep slopes for financial geoinformational purposes. The main focus is on the questions of how to formalise specific knowledge of geomorphology on the basis of international standards and how to represent the geometries of partially overhanging forms, which cannot be captured in raster format, with concepts of geoinformation. Therefore, the semantic gap between geomorphology and geoinformation has to be considered.

Walls and steep slopes are a major threat in alpine regions all over the world. Processes associated with rockwalls, such as rockfall, threaten settlements and the tourist infrastructure. It is the task of geomorphology to investigate these landforms. Because of their special processes and their significance within the concept of the sediment cascade, the investigation of these landforms is of special interest. A representation based on raster data does not, however, render a sufficient analysis of these parts of the georeliefs possible, as partially overhanging walls cannot be captured from above. Moreover, far-reaching formal semantic modelling of the objects in question, their functional relations and other basic concepts of geomorphology do not yet exist. However, a suitable geometric representation and formal semantics based on international standards are prerequisites for the analysis of objects, their genesis and their interaction in a GIS. They are therefore vital for interdisciplinary investigation of land surfaces and the interchange of information.

The present work introduces a formal semantic model of basic geomorphological concepts, focused on walls and steep slopes. For this task, the specific existing geomorphological knowledge was screened and transferred into UML, which enabled an implementation of the model in a database management system. The ISO 19107 „Spatial Schema“ was chosen as a geometric form of representation that guarantees an easy data exchange.

Semantic modelling of geomorphological concepts based on international standards is feasible and offers a number of advantages. Apart from rendering a differentiated investigation possible, these are especially the representations of 3D geometries. Furthermore, semantic modelling based on class concepts can be transferred into the DBMS and thus the modelled phenomena can be processed.

Dank

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Mentor und dem Betreuer dieser Arbeit Prof. Dr. Lutz Plümer bedanken, der mir in vielen ergiebigen Diskussionen mit Anregungen, konstruktiver Kritik und Rat zur Seite stand. Ohne ihn wäre diese Arbeit in der hier vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Auch andere Personen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. An erster Stelle möchte ich dabei PD Dr. Gerhard Gröger für die intensive Auseinandersetzung und die konstruktiven und leidenschaftlichen Diskussionen der hier vorgestellten semantischen Modellierung und seine lehrreiche Zusammenarbeit im Rahmen der SIG-3D der GDI NRW danken. Auch Prof. Dr. Thomas H. Kolbe sei für seine Mut machenden Diskussionen aufrichtig gedankt. Für die Hilfe beim Einstieg in die geodätische Denkweise und unzähliger kleinerer Hilfestellungen danke ich Dipl. Ing. Dirk Dörschlag sowie allen anderen ungenannten Kollegen am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn, insbesondere dem nun doch genannten Dipl. Inform. Victor Stroh.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Feldbegehungen und für geomorphologische Diskussionen möchte ich mich bei Dr. Jan C. Otto und Dr. Stefan Rasemann und allen weiteren Kollegen herzlich bedanken.

Grundlagen dieser Arbeit entstanden im Rahmen des Graduiertenkollegs 437 „Das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“ und wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

- Heft 4: HAHN, H.: Der Einfluß der Konfessionen auf die Bevölkerungs- und Sozialgeographie des Hunsrücks. 1950. 96 S. € 2,50
- Heft 5: TIMMERMANN, L.: Das Eupener Land und seine Grünlandwirtschaft. 1951. 92 S. € 3,00
- Heft 15: PARDE, M.: Beziehungen zwischen Niederschlag und Abfluß bei großen Sommerhochwassern. 1954. 59 S. € 2,00
- Heft 16: BRAUN, G.: Die Bedeutung des Verkehrswesens für die politische und wirtschaftliche Einheit Kanadas. 1955. 96 S. € 4,00
- Heft 19: STEINMETZLER, J.: Die Anthropogeographie Friedrich Ratzels und ihre ideengeschichtlichen Wurzeln. 1956. 151 S. € 4,00
- Heft 21: ZIMMERMANN, J.: Studien zur Anthropogeographie Amazoniens. 1958. 97. S. € 5,00
- Heft 22: HAHN, H.: Die Erholungsgebiete der Bundesrepublik. Erläuterungen zu einer Karte der Fremdenverkehrsorte in der deutschen Bundesrepublik. 1958. 182 S. € 5,50
- Heft 23: VON BAUER, P.-P.: Waldbau in Südchile. Standortkundliche Untersuchungen und Erfahrungen bei der Durchführung einer Aufforstung. 1958. 120 S. € 5,50
- Heft 26: FRÄNZLE, O.: Glaziale und periglaziale Formbildung im östlichen Kastilischen Scheidegebirge (Zentralspanien). 1959. 80 S. € 5,00
- Heft 27: BARTZ, F.: Fischer auf Ceylon. 1959. 107 S. € 5,00
- Heft 30: LEIDLMAIR, A.: Hadramaut, Bevölkerung und Wirtschaft im Wandel der Gegenwart. 1961. 47 S. € 4,00
- Heft 33: ZIMMERMANN, J.: Die Indianer am Cururú (Südwestpará). Ein Beitrag zur Anthropogeographie Amazoniens. 1963. 111 S. € 10,00
- Heft 37: ERN, H.: Die dreidimensionale Anordnung der Gebirgsvegetation auf der Iberischen Halbinsel. 1966. 132 S. € 10,00
- Heft 38: HANSEN, F.: Die Hanfwirtschaft Südostspaniens. Anbau, Aufbereitung und Verarbeitung des Hanfes in ihrer Bedeutung für die Sozialstruktur der Vegas. 1967. 155 S. € 11,00
- Heft 39: SERMET, J.: Toulouse et Zaragoza. Comparaison des deux villes. 1969. 75 S. € 8,00
- Heft 41: MONHEIM, R.: Die Agrostadt im Siedlungsgefüge Mittelsiziliens. Erläutert am Beispiel Gangi. 1969. 196 S. € 10,50
- Heft 42: HEINE, K.: Fluß- und Talgeschichte im Raum Marburg. Eine geomorphologische Studie. 1970. 195 S. € 10,00
- Heft 43: ERIKSEN, W.: Kolonisation und Tourismus in Ostpatagonien. Ein Beitrag zum Problem kulturgeographischer Entwicklungsprozesse am Rande der Ökumene. 1970. 289 S. € 14,50
- Heft 44: ROTHER, K.: Die Kulturlandschaft der tarentinischen Golfküste. Wandlungen unter dem Einfluß der italienischen Agrarreform. 1971. 246 S. € 14,00
- Heft 45: BAHR, W.: Die Marismas des Guadalquivir und das Ebrodelta. 1972. 282 S. € 13,00
- Heft 47: GOLTE, W.: Das südchilenische Seengebiet. Besiedlung und wirtschaftliche Erschließung seit dem 18. Jahrhundert. 1973. 183 S. € 14,00
- Heft 48: STEPHAN, J.: Die Landschaftsentwicklung des Stadtkreises Karlsruhe und seiner näheren Umgebung. 1974. 190 S. € 20,00
- Heft 49: THIELE, A.: Luftverunreinigung und Stadtklima im Großraum München. 1974. 175 S. € 19,50
- Heft 50: BÄHR, J.: Migration im Großen Norden Chiles. 1977. 286 S. € 15,00
- Heft 51: STITZ, V.: Studien zur Kulturgeographie Zentraläthiopiens. 1974. 395 S. € 14,50
- Heft 53: KLAUS, D.: Niederschlagsgenese und Niederschlagsverteilung im Hochbecken von Puebla-Tlaxcala. 1975. 172 S. € 16,00
- Heft 54: BANCO, I.: Studien zur Verteilung und Entwicklung der Bevölkerung von Griechenland. 1976. 297 S. € 19,00
- Heft 55: SELKE, W.: Die Ausländerwanderung als Problem der Raumordnungspolitik in der Bundesrepublik Deutschland. 1977. 167 S. € 14,00
- Heft 56: SANDER, H.-J.: Sozialökonomische Klassifikation der kleinbäuerlichen Bevölkerung im Gebiet von Puebla-Tlaxcala (Mexiko). 1977. 169 S. € 12,00
- Heft 57: WIEK, K.: Die städtischen Erholungsflächen. Eine Untersuchung ihrer gesellschaftlichen Bewertung und ihrer geographischen Standorteigenschaften – dargestellt an Beispielen aus Westeuropa und den USA. 1977. 216 S. € 10,00
- Heft 58: FRANKENBERG, P.: Floreogeographische Untersuchungen im Raume der Sahara. Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Differenzierung des nordafrikanischen Trockenraumes. 1978. 136 S. € 24,00
- Heft 60: LIEBHOLD, E.: Zentralörtlich-funktionalräumliche Strukturen im Siedlungsgefüge der Nordmeseta in Spanien. 1979. 202 S. € 14,50
- Heft 61: LEUSMANN, CH.: Strukturierung eines Verkehrsnetzes. Verkehrsgeographische Untersuchungen unter Verwendung graphentheoretischer Ansätze am Beispiel des süddeutschen Eisenbahnnetzes. 1979. 158 S. € 16,00
- Heft 62: SEIBERT, P.: Die Vegetationskarte des Gebietes von El Bolsón, Provinz Río Negro, und ihre Anwendung in der Landnutzungsplanung. 1979. 96 S. € 14,50
- Heft 63: RICHTER, M.: Geoökologische Untersuchungen in einem Tessiner Hochgebirgstal. Dargestellt am Val Vegorner im Hinblick auf planerische Maßnahmen. 1979. 209 S. € 16,50
- Heft 67: HOLLERMANN, P.: Blockgletscher als Mesoformen der Periglazialstufe – Studien aus europäischen und nordamerikanischen Hochgebirgen. 1983. 84 S. € 13,00
- Heft 69: GRAAFEN, R.: Die rechtlichen Grundlagen der Ressourcenpolitik in der Bundesrepublik Deutschland. Ein Beitrag zur Rechtsgeographie. 1984. 201 S. € 14,00

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung • *continued*)

- Heft 70: FREIBERG, H.-M.: Vegetationskundliche Untersuchungen an südchilenischen Vulkanen. 1985. 170 S. € 16,50
- Heft 71: YANG, T.: Die landwirtschaftliche Bodennutzung Taiwans. 1985. 178 S. € 13,00
- Heft 72: GASKIN-REYES, C. E.: Der informelle Wirtschaftssektor in seiner Bedeutung für die neuere Entwicklung in der nordperuanischen Regionalstadt Trujillo und ihrem Hinterland. 1986. 214 S. € 14,50
- Heft 73: BRÜCKNER, CH.: Untersuchungen zur Bodenerosion auf der Kanarischen Insel Hierro. 1987. 194 S. € 16,00
- Heft 74: FRANKENBERG, P. u. D. KLAUS: Studien zur Vegetationsdynamik Südosttuniens. 1987. 110 S. € 14,50
- Heft 75: SIEGBURG, W.: Großmaßstäbige Hangneigungs- und Hangformanalyse mittels statistischer Verfahren. Dargestellt am Beispiel der Dollendorfer Hardt (Siebengebirge). 1987. 243 S. € 19,00
- Heft 77: ANHUF, D.: Klima und Ernteertrag – eine statistische Analyse an ausgewählten Beispielen nord- und südsaharischer Trockenräume – Senegal, Sudan, Tunesien. 1989. 177 S. € 18,00
- Heft 78: RHEKER, J. R.: Zur regionalen Entwicklung der Nahrungsmittelproduktion in Pernambuco (Nordbrasilien). 1989. 177 S. € 17,50
- Heft 79: VÖLKEL, J.: Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Nigers (Südsahara und Sahel). 1989. 258 S. € 19,50
- Heft 80: BROMBERGER, CH.: Habitat, Architecture and Rural Society in the Gilán Plain (Northern Iran). 1989. 104 S. € 15,00
- Heft 81: KRAUSE, R. F.: Stadtgeographische Untersuchungen in der Altstadt von Djidda / Saudi-Arabien. 1991. 76 S. € 14,00
- Heft 82: GRAAFEN, R.: Die räumlichen Auswirkungen der Rechtsvorschriften zum Siedlungswesen im Deutschen Reich unter besonderer Berücksichtigung von Preußen, in der Zeit der Weimarer Republik. 1991. 283 S. € 32,00
- Heft 83: PFEIFFER, L.: Schwerminalanalysen an Dünensanden aus Trockengebieten mit Beispielen aus Südsahara, Sahel und Sudan sowie der Namib und der Taklamakan. 1991. 235 S. € 21,00
- Heft 84: DITTMANN, A. and H. D. LAUX (Hrsg.): German Geographical Research on North America – A Bibliography with Comments and Annotations. 1992. 398 S. € 24,50
- Heft 85: GRUNERT, J. u. P. HÖLLERMANN (Hrsg.): Geomorphologie und Landschaftsökologie. 1992. 224 S. € 14,50
- Heft 86: BACHMANN, M. u. J. BENDIX: Nebel im Alpenraum. Eine Untersuchung mit Hilfe digitaler Wettersatellitendaten. 1993. 301 S. € 29,00
- Heft 87: SCHICKHOFF, U.: Das Kaghan-Tal im Westhimalaya (Pakistan). 1993. 268 S. € 27,00
- Heft 88: SCHULTE, R.: Substitut oder Komplement – die Wirkungsbeziehungen zwischen der Telekommunikationstechnik Videokonferenz und dem Luftverkehrsaufkommen deutscher Unternehmen. 1993. 177 S. € 16,00
- Heft 89: LÜTZELER, R.: Räumliche Unterschiede der Sterblichkeit in Japan – Sterblichkeit als Indikator regionaler Lebensbedingungen. 1994. 247 S. € 21,00
- Heft 90: GRAFE, R.: Ländliche Entwicklung in Ägypten. Strukturen, Probleme und Perspektiven einer agraren Gesellschaft, dargestellt am Beispiel von drei Dörfern im Fayyûm. 1994. 225 S. € 23,00
- Heft 92: WEIERS, S.: Zur Klimatologie des NW-Karakorum und angrenzender Gebiete. Statistische Analysen unter Einbeziehung von Wettersatellitenbildern und eines Geographischen Informationssystems (GIS). 1995. 216 S. € 19,00
- Heft 93: BRAUN, G.: Vegetationsgeographische Untersuchungen im NW-Karakorum (Pakistan). 1996. 156 S. € 27,00
- Heft 94: BRAUN, B.: Neue Cities australischer Metropolen. Die Entstehung multifunktionaler Vorortzentren als Folge der Suburbanisierung. 1996. 316 S. € 14,50
- Heft 95: KRAFFT, TH. u. L. GARCÍA-CASTRILLO RIESCO (Hrsg.): Professionalisierung oder Ökonomisierung im Gesundheitswesen? Rettungsdienst im Umbruch. 1996. 220 S. € 12,00
- Heft 96: KEMPER, F.-J.: Wandel und Beharrung von regionalen Haushalts- und Familienstrukturen. Entwicklungsmuster in Deutschland im Zeitraum 1871-1978. 1997. 306 S. € 17,00
- Heft 97: NÖSSER, M.: Nanga Parbat (NW-Himalaya): Naturräumliche Ressourcenausstattung und humanökologische Gefügemuster der Landnutzung. 1998. 232 S. € 21,00
- Heft 98: BENDIX, J.: Ein neuer Methodenverbund zur Erfassung der klimatologisch-lufthygienischen Situation von Nordrhein-Westfalen. Untersuchungen mit Hilfe boden- und satellitengestützter Fernerkundung und numerischer Modellierung. 1998. 183 S. € 24,00
- Heft 99: DEHN, M.: Szenarien der klimatischen Auslösung alpiner Hangrutschungen. Simulation durch Downscaling allgemeiner Zirkulationsmodelle der Atmosphäre. 1999. 99 S. € 11,00
- Heft 100: KRAFFT, TH.: Von Shāhjahānābād zu Old Delhi: Zur Persistenz islamischer Strukturelemente in der nordindischen Stadt. 1999. 217 S. € 19,50
- Heft 101: SCHRÖDER, R.: Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. 2000. 175 S. € 12,00
- Heft 102: KRAAS, F. und W. TAUBMANN (Hrsg.): German Geographical Research on East and Southeast Asia. 2000. 154 S. € 16,00
- Heft 103: ESPER, J.: Paläoklimatische Untersuchungen an Jahrringen im Karakorum und Tien Shan Gebirge (Zentralasien). 2000. 137 S. € 11,00
- Heft 104: HALVES, J.-P.: Call-Center in Deutschland. Räumliche Analyse einer standortunabhängigen Dienstleistung. 2001. 148 S. € 13,00

BONNER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN (Fortsetzung • *continued*)

Heft 105:	STÖBER, G.: Zur Transformation bäuerlicher Hauswirtschaft in Yasin (Northern Areas, Pakistan). 2001. 314 S.	€ 18,00
Heft 106:	CLEMENS, J.: Ländliche Energieversorgung in Astor: Aspekte des nachhaltigen Ressourcenmanagements im nordpakistanischen Hochgebirge. 2001. 210 S.	€ 19,00
Heft 107:	MOTZKUS, A. H.: Dezentrale Konzentration – Leitbild für eine Region der kurzen Wege? Auf der Suche nach einer verkehrssparsamen Siedlungsstruktur als Beitrag für eine nachhaltige Gestaltung des Mobilitätsgeschehens in der Metropolregion Rhein-Main. 2002. 182 S.	€ 18,00
Heft 108:	BRAUN, Th.: Analyse, Planung und Steuerung im Gesundheitswesen. Geographische Möglichkeiten und Perspektiven am Beispiel von Daten der Gesetzlichen Krankenversicherung. 2002. 147 S.	€ 16,00
Heft 109:	REUDENBACH, Ch.: Konvektive Sommerniederschläge in Mitteleuropa. Eine Kombination aus Satellitenfernkundung und numerischer Modellierung zur automatischen Erfassung mesoskaliger Niederschlagsfelder. 2003. 152 S.	€ 18,00
Heft 110:	HÖRSCH, B.: Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz. 2003. 270 S.	€ 24,00
Heft 111:	RASEMANN, S.: Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems. 2004. 240 S.	€ 22,00
Heft 112:	SCHMIDT, M.: Boden- und Wasserrecht in Shigar, Balistan: Autochthone Institutionen der Ressourcennutzung im Zentralen Karakorum. 2004. 314 S.	€ 25,00
Heft 113:	SCHÖTTEMEYER, A.: Verdichtete Siedlungsstrukturen in Sydney. Lösungsansätze für eine nachhaltige Stadtentwicklung. 2005. 159 S.	€ 19,00
Heft 114:	GRUGEL, A.: Zuni Pueblo und Laguna Pueblo – Ökonomische Entwicklung und kulturelle Perspektiven. 2005. 281 S.	€ 21,00
Heft 115:	SCHMIDT, U.: Modellierung des kurzweiligen solaren Strahlungshaushalts im Hochgebirge auf der Basis von digitalen Geländemodellen und Satellitendaten am Beispiel des Hunza-Karakorum / Nordpakistan. 2006. 133 S.	€ 21,00
Heft 116:	NYENHUIS, M.: Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. 2006. 142 S.	€ 23,00
Heft 117:	ROER, I.: Rockglacier Kinematics in a High Mountain Geosystem. 2007. 217 S.	€ 25,00
Heft 118:	RAHMAN-FAZLUR: Persistence and Transformation in the Eastern Hindu Kush: A Study of Resource Management Systems in Mehlp Valley, Chitral, North Pakistan. 2007. 314 S.	€ 25,00
Heft 119:	UHLIG, B.: <i>Calocedrus decurrens</i> (TORREY) FLOREN und <i>Austrocedrus chilensis</i> (D. DON) PIC. SERM. & BIZZARRI. Ein pflanzengeographischer und ökologischer Vergleich zweier Reliktconiferen in den nord- und südamerikanischen Winterregen-Subtropen. 2008. 281 S.	€ 25,00
Heft 120:	WIESE, B.: Museums-Ensembles und Städtebau in Deutschland – 1815 bis in die Gegenwart – Akteure – Standorte – Stadtgestalt. 2008. 287 S.	€ 28,00
Heft 121:	RAUPRICH, D.: Alltagsmobilität älterer Menschen im suburbanen Raum – Möglichkeiten und Grenzen eine ökologisch nachhaltigen Gestaltung durch eine geänderte Verkehrsmittelnutzung. 2008. 283 S.	€ 21,00

In Kommission bei • *on consignment by* Asgard-Verlag, Sankt Augustin

Nicht genannte Nummern sind vergriffen, sämtliche Titel unter
Titles not listed are out of print, see for all titles

www.geographie.uni-bonn.de/schriften.welcome.html