

**Semantische Modellierung von geomorphologischen Objekten in einem
Geoinformationssystem (GIS) unter besonderer Berücksichtigung von
Wänden und steilen Hangbereichen**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 04. 08. 2005

von

Dipl. Geogr. Marc-O. Löwner

aus Wilhelmshaven

Referent: Prof. Dr. L. Plümer
Koreferenten: Prof. Dr. W. Förstner
PD Dr. T. Glade
Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2005

Erscheinungsjahr: 2005

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

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 aus der Sicht der Geoinformation. 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 und nimmt dort wegen ihrer schnell ablaufenden Prozesse eine besondere Stellung ein. Eine auf Rasterdaten basierende Repräsentation ermöglicht allerdings keine ausreichende Analyse dieser Bereiche des Georeliefs, z. T. überhängende Wände sind mit klassischen Luftbildern nicht zu erfassen. Methoden zur terrestrischen Erhebung, etwa mittels Photogrammetrie, sind in der Geomorphologie wenig verbreitet. 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 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 Datenbankmanagementsystem ermöglicht. Als geometrische Repräsentationsform, die einen Austausch von Daten garantiert, wurde der ISO 19107 „Spatial Schema“ gewählt. Zur nachhaltigen Speicherung der modellierten Konzepte und geometrischer Repräsentationen kommt das objekt-relationale Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial zum Einsatz. Zur Erfassung von z. T. überhängenden Wänden werden die Möglichkeiten der terrestrischen Photogrammetrie unter Verwendung einer handelsüblichen Kamera aufgezeigt. Hierfür wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Photos zu orientieren und Neupunkte auf ihnen zu kartieren.

Eine semantische Modellierung geomorphologischer Konzepte auf Grundlage internationale Standards ist durchführbar und weist weitreichende Vorteile auf. Diese sind neben einer differenzierten Betrachtungsmöglichkeit 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. Methoden der terrestrischen Photogrammetrie ermöglichen es, mit der hier entwickelten Software „GeoSamt“ die besonderen Stellen des Reliefs aufzuklären.

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. Methods of terrestrial data capture, e.g. photogrammetry, are scarcely used in geomorphology. 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, focussed 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. The object-relational database management system Oracle Spatial was used for the persistent storage of the modelled semantic concepts and the geometric representation. In order to capture partly overhanging walls, the facilities of terrestrial photogrammetry were documented, using a consumer camera. For this the possibility to orientate the photos and to map new points was created.

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. Methods of terrestrial photogrammetry combined with the software „GeoSamt“ - which was developed for this work - allow a thorough investigation of the specific parts of the relief.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Glossar	xi
Danksagung des Autors	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Die Relevanz von Wänden und steilen Hangbereichen in der Geomorphologie und Geoinformation	1
1.2 Ziele der Arbeit	4
1.3 Gliederung der Arbeit	6
2 Konzeptionelle Grundlagen	8
2.1 Semantische Modellierung geographischer Objekte – ein ontologischer Ansatz	9
2.1.1 Stufen der Entwicklung einer Ontologie	11
2.1.2 Probleme bei der Erstellung einer Ontologie für geographische Objekte	12
2.1.3 UML – ein Formalismus zur semantischen Modellierung	16
2.1.4 Die geometrische Repräsentation	20
2.2 Geomorphologische Grundlagen	24
2.2.1 Die geomorphologische Sicht auf das Relief	25
2.2.2 Interaktion von Relief und geomorphologischem Prozess	27
2.2.3 Sedimentspeicher und das System der Sedimentkaskade	35
2.3 Persistente Datenhaltung in der räumlichen Datenbank Oracle Spatial . . .	40
2.3.1 Die räumliche Datenbank Oracle Spatial	41
2.4 Erfassung von Wänden mittels terrestrischer Photos	44
2.4.1 Die Kollinearitätsgleichungen	46
2.4.2 Das Verfahren der Bündelblockausgleichung	47
2.4.3 Der räumliche Vorwärtsschnitt	48
2.4.4 Kamerakalibrierung	49
2.4.5 Tauglichkeit handelsüblicher Kameras für photogrammetrische Messver- fahren	49
3 Semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen	52
3.1 Verfahren zur semantischen Modellierung von Wänden und steilen Hangbe- reichen	53
3.2 Geeignete Repräsentation der Geometrie	55

3.2.1	Grenzen von flächenhaften und volumenhaften Objekten	58
3.2.2	Modellierung der Topologie mit der Klasse <code>GM_Complex</code>	59
3.2.3	Die Klasse <code>GM_Composite</code>	60
3.3	Das semantisch basierte Anwendungsmodell	61
3.3.1	Die Klasse <code>_Geoobjekt</code>	61
3.3.2	Die Klasse <code>Hang</code>	64
3.3.3	Bedarf es einer weiteren Spezialisierung der Klasse <code>Hang</code> ?	74
3.3.4	Die Klasse <code>Wand</code>	75
3.3.5	Die Klasse <code>Felswand</code>	79
3.4	Ein Klassendiagramm für Prozesse	86
3.4.1	Die Klasse <code>_Geoprozess</code>	88
3.4.2	Die Klasse <code>ComplexerGeoprozess</code>	90
3.4.3	Spezialisierungen der Klasse <code>_Geoprozess</code>	91
3.4.4	Modellierung einer Sedimentkaskade	91
4	Umsetzung des Konzeptes zur Repräsentation von Wänden	94
4.1	Abbildung des semantischen Modells auf eine 3D-Geodatenbank	95
4.2	Aufnahme der digitalen Photos am Talschluss des Niggelingtällis	100
4.3	Orientierung und Auswertung der Bilder mit der GeoSamt-Software	106
4.4	Mögliche Visualisierung semantisch definierter Geoobjekte	107
5	Diskussion	110
5.1	Rückblick und Bewertung	110
5.1.1	Repräsentation von Prozessen	112
5.1.2	Implementierung des semantischen Modells in ein Datenbankmanagementsystem	113
5.1.3	Erfassung von Wänden und steilen Hangbereichen mittels terrestrischen Digitalphotos	113
5.1.4	Nutzen der Ergebnisse	114
5.2	Ausblick	115
	Literatur	116
	Sachregister	134
	Anhang A: Beschreibung der Ausgleichung von linearisierten Modellen	136
	Anhang B: Kurzanleitung für das Programm „GeoSamt“	138
	Anhang C: Datenbankdesign der „GeoSamt“-Software	142
	Anhang D: Verwendete Software	144
	Anhang E: Lebenslauf	145

Abbildungsverzeichnis

1.1	Ein Felswand mit Überhang als Bedrohung eines Hauses im Rhonetal	2
1.2	Gesamtkonzept der Modellierung und Erfassung von Wänden und Steilen Hangbereichen.	5
2.1	Erläuterndes Beispiel einer UML-Modellierung	17
2.2	Legende der verwendeten UML-Symbole	19
2.3	Repräsentation von Wänden und Überhängen durch das Rasterformat	21
2.4	Relative Häufigkeit der Hangneigung im Turtmantal	22
2.5	Abhängigkeit der Auflösung der wahren Oberfläche vom Winkel der aufgenommenen Fläche	23
2.6	Formengröße und Existenzdauer von Reliefformen	27
2.7	Vektorparallelogramm der Gewichtskraft und der Druck- und Scherspannung	28
2.8	Drei Typen von Schutthalden	32
2.9	Frequenz der Hangneigungsverteilung gestreckter Hänge aus sechs verschiedenen Regionen	33
2.10	Konzeptmodell verschiedener Speichertypen und Prozesse einer Sedimentkaskade im Reintal	36
2.11	Das alpine Hangsystem	37
2.12	Leiste mit aufsitzendem Sediment an der Barwang im Pipjitalli des Turtmantales	39
2.13	Konzeptmodell der Sedimentkaskade der Wand	40
2.14	Geometriotypen, die von Oracle Spatial zur Verfügung gestellt werden	42
2.15	Das Modell der Zentralperspektive	45
3.1	Profil des ISO-Standards 19107 „Spatial Schema“	57
3.2	Die Boundary-Klassen der ISO 19107	59
3.3	Die Klasse <code>GM_Complex</code> in ihrer UML-Notation	60
3.4	Die Klasse <code>GM_Composite</code> in ihrer UML-Notation	61
3.5	Repräsentation der Klasse <code>_Geoobjekt</code> und <code>Hang</code>	62
3.6	Repräsentation der Klasse <code>Hang</code>	65
3.7	Blockdiagramm eines Hanges	68
3.8	Abgeleitete Assoziationen zur Wahrung der Integrität der <code>ZeitlichenRepräsentation</code> von Geoobjekten	69
3.9	Repräsentation der Klasse <code>Wand</code>	77
3.10	Repräsentation der Klasse <code>Felswand</code> und der mit ihr assoziierten Klassen . .	80
3.11	Geometrische Repräsentation einer Leiste	83
3.12	Modellierung der Klasse <code>Kante</code>	85

3.13	Repräsentation der Klasse <code>_Geoprozess</code>	89
3.14	Vorschlag einer Modellierung der Sedimentkaskade	92
4.1	Relationales Datenbankschema ausgewählter Objekte der semantischen Modellierung	97
4.2	Implementierung der <code>Relieffläche</code> in das Datenbankschema	99
4.3	Übersicht über die Lage des Turtmanntales	104
4.4	Lage der Standorte bei der Durchführung der photogrammetrischen Aufnahme.	105
4.5	Mögliche Visualisierung semantisch definierter Objekte am Talschluss des Niggelingtällis. Durch die Modellierung auf Grundlage internationaler Standards sind die erfassten Objekte interoperabel austauschbar.	108
4.6	Darstellung der prozessualen Beziehungen von Geobjekten am Talschluss des Niggelingtällis nach Abstraktion der Geometrie.	109
B.1	Startmaske der „GeoSamt“-Software	139
B.2	Maske zur relativen Orientierung von Bildpaaren	140
C.3	Datenbankdesign der „GeoSamt“-Software in UML-Notation.	143

Tabellenverzeichnis

2.1	Anteil ausgewählter Hangneigungsgrößen an der Gesamtfläche des Turtmanntales über 2400 NN.	21
2.2	Klassifikation von Fallprozessen	31
2.3	Typische maximale Hangneigung von verfestigtem Material	33
3.1	Geometrische Klassen zur Attributierung von Features nach ISO 19019 . . .	54
3.2	Beschreibung von Wänden in der gesichteten Literatur	76
4.1	Kalibrierungsergebnisse der digitalen Kamera Canon EOS 10D	103

Glossar

Anmerkungen zum Sprachgebrauch

In Übereinstimmung mit der angegebenen Fachliteratur werden ausgewählte Fachausdrücke in ihrem originalen englischen Sprachgebrauch belassen beziehungsweise mit angegeben.

Klassennamen der geometrischen und semantischen Modellierung sowie Tabellennamen sind in *Courier* gesetzt, Attributnamen im Modell- und Datenbankschema 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
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
engl.	englisch
et al.	et alii (und andere)
GIS	Geoinformationssystem
GML	Geography Markup Language
GPS	Global Positioning System
IKG	Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn
IPB	Institut für Photogrammetrie Bonn
IS	Informationssystem

ISO	International Organization for Standardization
m	Meter
min	Minute
Mio.	Million
mm	Millimeter
OCL	Object Constraint Language
pel	Picture element oder auch Pixel
SQL	Structured Query Language
TIN	Triangulated Irregular Network (<i>deutsch: Unregelmäßige Dreiecksvermaschung</i>)
UML	Unified Modelling Language
v. h.	vor heute (Geologische Zeitangabe)
XML	Extensible Markup Language

Danksagung des Autors

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 möchte ich mich bei ihm für meine wiederbelebte Freude am Langlauf bedanken.

Ebenfalls möchte ich den Koreferenten dieser Arbeit, Prof. Dr. Förstner und PD Dr. Thomas Glade danken. Während Dr. Glade wesentlich zu meiner geomorphologischen Ausbildung beigetragen hat, fand ich im Institut für Photogrammetrie Bonn unter Leitung von Prof. Dr. Förstner hilfreiche Unterstützung.

Neben den Referenten haben auch andere Personen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. An erster Stelle möchte ich dabei 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 Dr. Thomas H. Kolbe sei für seine Mut machenden Diskussionen aufrecht 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 Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn, insbesondere dem nun doch genannten Dipl. Inform. Victor Stroh.

Die in dieser Arbeit durchgeführte Feldarbeit wurde unter beeindruckendem Engagement von Dipl. Geogr. Jan C. Otto und Dr. Stefan Rasemann zu einem erfreulichen Ende geführt. Dafür und für geomorphologische Diskussionen möchte ich mich bei beiden herzlich bedanken, wie auch bei Wilhelm und Sabine Berghum aus Oberems (Schweiz) für die Hilfe nach dem Verlust eines Autoschlüssels und unzähliger Einladungen zum Streichrackett.

Für die Unterstützung bei der Bearbeitung der digitalen Photos und hilfreicher Diskussion möchte ich mich bei Dr. Heiko Ellenbeck und Bernhard Weber bedanken. Besonderer Dank gilt Dipl. Inform. Thomas Laebe für die Unterstützung bei der Kalibrierung der digitalen Kamera und Dipl. Ing. Marc Luxen für die Bereitstellung seiner in Matlab realisierten Bündelblockausgleichung.

Für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung der Softwarekomponente zur Kartierung von Wänden bedanke ich mich bei Daniel Schumacher, der hoffentlich diese Kompo-

nente in Form einer Diplomarbeit weiter ausbauen wird. Auch danke ich Dipl. Ing. Julian Drerup, der diese Arbeit im GRK 437 angagiert weiterführen wird.

Für die finanzielle Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Graduiertenkollegs 437 „Das Relief – eine strukturiert und veränderliche Grenzfläche“ bin ich ebenfalls sehr dankbar.

Zum Schluss, jedoch nicht an letzter Stelle, möchte ich meiner Frau Kirsten danken. Sie hat den Verzicht auf meine Anwesenheit insbesondere in der letzten Phase dieser Arbeit klaglos ertragen.

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 Die Relevanz von Wänden und steilen Hangbereichen in der 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 es 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 der damit verbundenen schnell ablaufenden Prozesse 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 Hangneigung 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 30000 Todesopfer musste Venezuela im Dezember des Jahres 1999 durch Murgänge beklagen (vgl. DIKAU und GLADE 2002).

Obwohl spektakuläre 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 auf der nächsten Seite zeigt eine Felswand mit Überhang im Rhonetal (Schweiz). Das am Fuße der Wand stehende Gebäude ist durch Felsstürze stark gefährdet. Allein im

Turtmantal (Schweiz) sind mehr als 200 Wände mit rezenter Steinschlagaktivität dokumentiert (OTTO und DIKAU 2004).



Abbildung 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

- 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 geomorphologischen Erkenntnissen fußenden Erfahrungen mit der Vorhersage eintretender Massenbewegungen durchaus möglich. Im Tessin (Italien) kommen optische Monitoringsysteme zum Einsatz, um Gefährdungen von Siedlungen im Be-

reich gravitativer Massenbewegung abzuwenden (vgl. PASUTO et al. 1993; HERVÁS et al. 2003).

Diese Arbeit betrachtet das skizzierte Forschungsfeld der Geomorphologie aus Sicht der Geoinformation. Sie 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 objekt-relationaler 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 Gründe.

Zum einen werden von den Erdwissenschaften häufig Standard-Geoinformationssysteme und damit verbundene geometrische Repräsentationsansätze verwendet, die keine direkte Möglichkeit zur Analyse von Wänden und steilen Hangbereichen bieten. Wände stehen senkrecht zur Horizontalen, sie sind gar überhängend, haben Höhlen, Anrissnischen und Klüftungen (vgl. AHNERT 1995). 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 ESRI's ArcMap erlauben keine Analyse senkrecht stehender oder überhängender Landformen und ihrer Strukturen, obwohl sie vorgeben, 3D-Werkzeuge zu sein. 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 der High Resolution Stereo Camera (HRSC), die in einer Befliegung des Turtmanntales in der Schweiz durch die Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt für das Graduiertenkolleg 437, „das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“, erstellt worden sind, 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. BUR-

ROUGH 1996), erfährt die Erkenntnis 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. Diese prozessuale Erreichbarkeit, die ausgehend vom Klimasystem und der Oberflächenstruktur des Reliefs bestimmt, wie Objekte mit anderen über den Austausch von Masse in Beziehung stehen können, ist elementar für eine verbesserte Kartierung gefährdeter Siedlungsbereiche. Eine semantisch definierte prozessuale Erreichbarkeit muss auf einer topologischen Betrachtung der Reliefs fußen, was wiederum die Bestimmung von Grenzen der einzelnen Objekte voraussetzt. Diese Gedanken finden aber auch in neueren Ansätzen zur Gefahrenkartierung keine entsprechende Würdigung (vgl. KASSEBEER 2002).

Der dritte Grund ist schließlich in der Differenz zwischen dem Formulierungsgrad der Geomorphologie und dem Formulationsanspruch der Geoinformation zu suchen. Hier ist es notwendig, die Schere zwischen der diskursiven Sprache der Fachwissenschaft und den formalen Sprachen der Geoinformation zu schließen. Der Konzeptualisierung als Aufbereitung einer fachwissenschaftlichen Theorie im Sinne von GRUBER (1993) muss eine Klärung der Theorie vorausgehen. Dies ist dabei 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. Die 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.

1.2 Ziele der 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 Arbeit versteht sich als ein Beitrag zur vermittelnden Position zwischen Geomorphologie und Geoinformation. Ziel aus Sicht der Geoinformation muss es dabei sein, die sinnstiftenden Konzepte der Geomorphologie für ihre formalen Anforderungen freizulegen. Mittelfristig muss es gelingen, ein Konzept zu verwirklichen, das die Bedürfnisse der Geowissenschaft in Bezug auf die Erfassung, dauerhafte Haltung und Analyse von Wänden und steilen Hangbereichen befriedigt. Abbildung 1.2 auf der nächsten Seite gibt einen Überblick über die Anforderungen, die an ein solches Konzept gestellt sind (vgl. LÖWNER et al. 2005A). Kern des Konzeptes bildet die semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen, die die Sicht der Geomorphologie als Fachrichtung repräsentiert. Dieses Anwendungsmodell stellt den wesentlichen Punkt der Nutzung geoinformationstechnischer Erkenntnisse durch die Geomorphologie dar. Es erlaubt die Implementierung geomorphologischer Konzepte in ein Datenbankmanagementsystem und damit den internationalen und interdisziplinären Austausch von Erkenntnissen der Fachwissenschaft. In diese Datenbank muss ebenfalls ein Schema für die geometrische Repräsentation der in der semantischen Modellierung definierten Objekte implementiert werden können. Aus Sicht der Geoinformation bietet sich

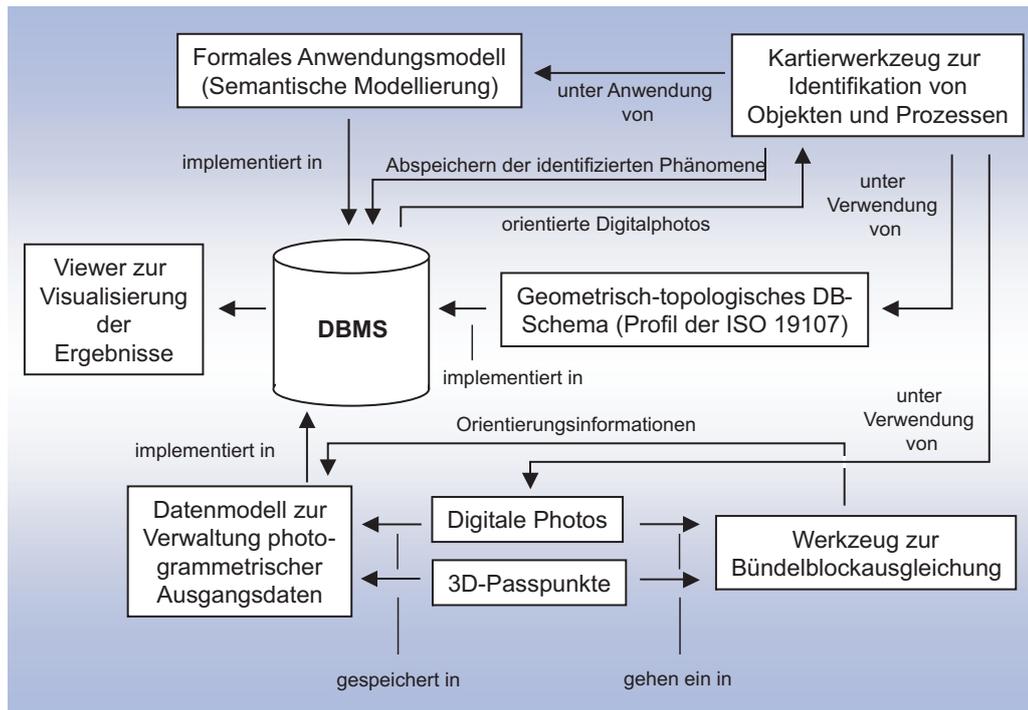


Abbildung 1.2: Gesamtkonzept der Modellierung und Erfassung von Wänden und Steilen Hangbereichen.

für diese Repräsentation das „Spatial Schema“ der ISO 19107 (vgl. HERRING 2001) an. Dieser internationale Standard muss für die Bedürfnisse der hier durchgeführten semantischen Modellierung angepasst werden.

Die oben erwähnten Schwächen der Datenerhebung mittels klassischer Luftbilder können durch terrestrische Digitalbilder ergänzt werden. Dafür soll ein Gesamtkonzept zur Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen die Möglichkeit vorsehen, Digitalphotos mit entsprechenden 3D-Passpunkten durch eine Bündelblockausgleichung zu orientieren und auf ihnen zu kartieren. Schließlich sollten die Ergebnisse der Analyse in einem Viewer visualisiert werden können. Die Verwendung internationaler Standards bei der semantischen und geometrischen Repräsentation der modellierten Objekte ist für diese Zwecke unumgänglich.

Diese Arbeit liefert die wesentlichen Bausteine für die Realisierung dieses Konzeptes. Dabei lassen sich folgende Teilziele formulieren:

- Der wichtigste Punkt ist die Formulierung eines formalen semantischen Modells geomorphologischen Fachwissens. Hierbei liegt der Fokus auf Wänden und steilen Hangbereichen, als besondere Stellen des Reliefs mit dem Ziel der Repräsentation dieser Bereiche in einem GIS. Neben einer geeigneten Repräsentation der Geometrie gilt es, allgemeine Konzepte der Geomorphologie auf der Basis des sog. least commitment zu identifizieren, also diejenigen Aussagen, die unnötige oder strittige Punkte innerhalb der Fachwissenschaft ausblenden. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass die entwickelte semantische Modellierung durch Bezug auf internationale Standards

den Ansprüchen der Interoperabilität genügt und die Geomorphologie damit in die Lage versetzt, Forschungsergebnisse auszutauschen.

- Die Beziehung von Landformen werden neben Nachbarschaftsbeziehungen überwiegend durch Transportprozesse bestimmt. Eine semantische Modellierung muss also zum Ziel haben, die grundlegenden geomorphologischen Prozesse im Bereich von Wänden und steilen Hangbereichen in Form von Konzeptmodellierungen mit einzubeziehen, um sich so dem in der Geomorphologie wichtigen Konzept der Sedimentkaskade zu nähern.
- Informationen über die in der semantischen Modellierung identifizierten und formalisierten Konzepte der Geomorphologie müssen in einer Datenbank gespeichert werden können. Hierzu muss das semantische Modell in Form eines Datenbankschemas in eine räumliche Datenbank implementiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es Teilbereiche der formulierten Semantik in die räumliche Datenbank Oracle Spatial zu implementieren, um die Machbarkeit der Realisierung zu demonstrieren.
- Wände und steile Hangbereiche können durch Verfahren der terrestrischen Photogrammetrie erfasst werden. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Lösungsweg für die Erfassung dieser besonderen Stellen des Reliefs mit Hilfe von Digitalphotos aufzuzeigen. Es soll verdeutlicht werden, dass die weit entwickelte Nahbereichsphotogrammetrie es möglich macht, Digitalbilder zu nutzen, um eine anwenderspezifische Datenerhebung durchzuführen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Aus den oben definierten Zielen leitet sich folgende Gliederung der Arbeit ab. In Kapitel 2 werden die grundlegenden Ansätze zur semantischen Modellierung, der persistenten Datenhaltung und der Erfassung der Bereiche von Wänden und steilen Hangbereichen beleuchtet. Hierbei ist darauf geachtet worden, grundlegende Prinzipien der Fachwissenschaften, die an einer solch interdisziplinären Fragestellung beteiligt sind, für die jeweils andere Fachrichtung verständlich zu machen. Dabei setzt sich Kapitel 2.1 mit den Anforderungen an eine formale semantische Modellierung auseinander und zeigt Probleme auf, die sich insbesondere mit der Modellierung geographischer Entitäten ergeben. In Kapitel 2.2 werden die zu modellierenden Konzepte der Geomorphologie beleuchtet. Diese umfassen neben einer Klärung der Begrifflichkeiten der Objekte auch Klärung über grundlegende Ansätze der Geomorphologie. Dazu gehören prozessuale Beziehungen von Objekten ebenso wie die Diskussion über Sedimentspeicher und ihre Bedeutung im Geosystem. In Kapitel 2.3 wird das räumliche Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial für die persistente Datenhaltung der im semantischen Modell definierten Objekte betrachtet. Kapitel 2.4 erläutert die Grundlagen der Photogrammetrie als Mittel zur Kartierung von Wänden und steilen Hangbereichen.

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, die den Ansprüchen einer semantischen Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen

genügt. Diese wird in Kapitel 3.3 auf der inhaltlichen Ebene für die Objekte dieser Stellen des Reliefs durchgeführt. Darauf folgt in Kapitel 3.4 eine Modellierung 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.

Kapitel 4 ist der Diskussion um die Möglichkeit der Erfassung und Kartierung von Wänden und steilen Hangbereichen gewidmet. Hier werden Wege aufgezeigt, die semantische Modellierung in ein räumliches Datenbankmanagementsystem zu überführen und damit persistent zu machen. Es wird demonstriert, wie die oben angesprochenen Mängel der Datenerhebung mit Werkzeugen der Photogrammetrie aufgelöst werden können. Auch wird ein eigens für die Kartierung orientierter Bilder entwickeltes Kartierwerkzeug vorgestellt.

In Kapitel 5 erfolgt eine kritische Diskussion des Erreichten und ein Ausblick auf weitergehende Forschungsfragen, die im Rahmen des Graduiertenkollegs 437, „das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“ am Institut für Kartographie und Geoinformation angestrebt werden.

2 Konzeptionelle Grundlagen

Sechs blinde Weise versuchen, einen Elefanten durch Tasten zu erkennen. Der erste fühlt seinen Stoßzahn und vergleicht den Elefanten mit einem Speer. Der zweite ertastet die Flanke und beschreibt ihn als Wand. Der dritte hat ein Bein vor sich, was ihn auf die Ähnlichkeit mit einem Baum verweisen lässt. Der vierte fühlt den Rüssel und vergleicht den Elefanten mit einer Schlange, der fünfte betastet das Ohr und zieht den Vergleich mit einem Fächer; der letzte schließlich gerät an den Schwanz und besteht auf der Ähnlichkeit mit einem Seil [...].

(HAMPDEN-TURNER 1982) nach einem buddhistischen Gleichniss

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, den es bei der Lösung von Problemen verspricht, nach zu streben. Dabei beeinflusst ein Paradigma sogar die Wahrnehmung der Wissenschaftler (vgl. KUHN 1967). Die Frage nach der durch Paradigmen gesteuerten Wahrnehmung der Forschungsinhalte ist auch für diese Arbeit wesentlich. Ziel ist es, die Voraussetzung für ein Datenbankschema zu schaffen, die es ermöglicht, die grundlegenden Objekte und Konzepte in ihr abzubilden. Dabei sollen die Fachwissenschaftler auf der Grundlage der ihnen geläufigen Terminologie auf diese Datenbank 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 ausgeblendet und von grundlegenden Erkenntnissen getrennt werden. Der allgemeine Denkansatz innerhalb der Geomorphologie ist dabei das Objekt, das über prozessuale Beziehungen mit anderen in Beziehung steht.

In diesem Kapitel sollen nun die Grundzüge der wissenschaftlichen Richtungen skizziert werden, die an einer semantischen Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen in einem GIS und der Erfassung beteiligt sind, also die Geoinformation, die Geomorphologie und die Photogrammetrie. Den Anfang macht das Kapitel 2.1 in dem die Anforderungen an eine formale semantische Modellierung erläutert werden. Insbesondere wird in Kapitel 2.1.2 auch auf Schwierigkeiten eingegangen, die sich bei der Modellierung räumlich ausgedehnter Konzepte der Geowissenschaften ergeben. Hier stehen sich im Wesentlichen der Feldansatz und objektorientierte Sichtweisen gegenüber, wobei sich letztere als die geeigneteren herausstellen. Als formale Sprache, die zur Repräsentation einer semantischen Modellierung unbedingbar 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 die mächtige Erweiterung durch die Object Constraint Language (OCL). In Kapitel 2.1.4 wird 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 erläutert, 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 Prozesse ständig verändert wird, auf die in Kapitel 2.2.2 eingegangen wird. Wichtig festzuhalten an dieser Stelle ist, dass formenverändernde Prozesse zwar in Übereinstimmung mit der geomorphologischen Literatur als vom Klimasystem angetrieben gesehen werden, die Wirkung des klimatischen Einflusses aber vom Geoobjekt selbst determiniert wird. In beiden Kapiteln wird natürlich auf Wände und steile Hangbereiche fokussiert. Dies geschieht auch im Kapitel 2.2.3.1, in dem auf die besondere Stellung der Wand im Sedimentkaskadensystem, einem grundlegendem Konzept der Geomorphologie eingegangen wird. Im Kapitel 2.2.3 ist eine allgemeinere Veranschaulichung dieses Konzeptes vorangestellt.

Das Kapitel 2.3 ist der Möglichkeit der persistenten Speicherung von semantisch modellierten Konzepten der Geomorphologie gewidmet. Es wird das objekt-relationale Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial mit ihren speziell auf räumliche Information abgestimmten Objekttyp MDSYS.SDO_GEOMETRY vorgestellt. Dieses DBMS erweist sich als mächtiges Hilfsmittel bei der Analyse der Struktur des Georeliefs.

Zur befriedigenden Erfassung von Wänden und steilen Hangbereichen reichen klassische Luftbilder nicht aus. Kapitel 2.4 befasst sich daher mit der Methodik der Photogrammetrie, die als wirkungsvolle Alternative hierzu gesehen wird. Hier werden zunächst die Grundlagen dieses Messverfahrens erläutert und geht neben dem Modell der Zentralperspektive auch auf die für die Orientierung von Photos notwendige Bündelblockausgleichung ein. Die Betrachtung des räumlichen Vorwärtsschnittes zur Kartierung von weiteren Neupunkten auf bereits orientierten Bildern wird anschließend vorgestellt. Da eine sinnvolle Auswertung von Photos nur nach erfolgter Kalibrierung der verwendeten Kamera durchgeführt werden kann, wird ein hierfür am Institut für Photogrammetrie Bonn entwickeltes Verfahren erläutert. Nach erfolgter Kalibrierung kann im Grunde jede Kamera zur Vermessung mit photogrammetrischen Verfahren verwendet werden.

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). In dieser Bedeutung verlässt die semantische Modellierung der Geoinformationswissenschaft 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 dieser 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 wird hier also mit dem der Ontologie synonym verwendet, ohne die Fortschritte der neueren Forschungsrichtungen im Bereich der Ontologien zu übersehen. Ein wesentlicher Grund dies zu tun, entspringt der Berufung beider Ansätze auf die gleichen, durch Aristoteles in dem 4. 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 also bei den Begriffen der semantischen Modellierung und dem der Ontologie offensichtlich nicht um inhaltlich begründete Gegensätze zweier Paradigmen im Sinne von KUHN (1967), also als sich gegenseitig ausschließende grundlegende Überzeugungen in der Wissenschaft.

Beiden Wissenschaftsrichtungen liegt das Prinzip des Konzeptes zu Grunde. Ein Konzept ist nach GENESERETH und NILSSON (1987) eine abstrakte, vereinfachte Sicht auf die Welt, die aus gewissen Gründen repräsentiert werden soll und 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 oder kurz Klasse genannt. Jede Konzeptklasse verfügt über semantische Beziehung (vgl. CHAUFFIN und HERRMANN 1988) zu anderen Konzeptklassen aber auch zu Individualkonzepten.¹ Zu anderen Konzeptklassen sind dies etwa *Teil-von-Beziehungen*, zu den Individualkonzepten sind es *Instanz-von-Beziehung*. Die Instanzen oder Objekte einer Konzeptklasse stellen als Repräsentanten der Objekte der Realwelt die Träger der Information, also die Ausprägung der Merkmalsklassen dar. Wie die Realweltobjekte auch, können solche Objekte während ihrer Lebenszeit verschiedene Rollen einnehmen (vgl. FONSECA et al. 2002), die sie in einem bestimmten Kontext mit den ihnen assoziierten Objekten derselben oder anderer Klassen spielen. Ein Beispiel aus der Geomorphologie wäre die Klasse aller Hänge eines alpinen Tals, die zum einen die Rolle des Sedimentspeichers der Verwitterungsprodukte

¹ Auch hier wird der Begriff der Semantik gegenüber seinen Ursprüngen aus der Linguistik erweitert, indem auch Beziehungen zu anderen Klassen als Semem, also dem kleinsten Träger von Bedeutung, angesehen werden.

einer Wand einnehmen kann, zum anderen aber die der Sedimentquelle für das unterhalb gelegene fluviale System. Die Rolle, die die Klasse der alpinen Hänge annimmt, ist also von der Art der mit ihr assoziierten Objekte abhängig. Die zweistelligen semantischen oder assoziativen Beziehungen zwischen Konzeptklassen, lassen sich in einer Konzepthierarchie oder auch 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 Entitäten der Realität, 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 untersucht, also 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 und anderen Größen, die im Feld des Interesses stehen. GUARINO (2004) verfeinert diese Definition und definiert eine Ontologie als die logische Theorie, die für die intendierte Bedeutung eines formalen Vokabulars steht, wohingegen die Konzeptualisierung die formale, vom Vokabular unabhängige Struktur der in der Ontologie modellierten Realität ist. Während die Konzeptualisierung eine Aufbereitung einer Theorie in 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).² 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 das Design einer 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

² Hierbei ist das allgemeine Fachwissen natürlich nicht mit dem von HORTON (1982) definiert Alltagswissen (*engl.: primary theory*) zu verwechseln, dem SMITH und MARK (2003) die wissenschaftliche Erkenntnis (*engl.: secondary theory*) entgegensetzen, die hier gemeint ist.

Beobachtung ist dabei stark von dem Alltagswissen eines jeden 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 Menge des betrachteten Ausschnitts des Universums der menschenunabhängigen Phänomene (*engl.: universe of discourse*) bilden also 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 unabhängige Bedeutung der definierten Begriffe kommunizieren können. Die Definitionen sollen objektiv sein, wofür ein Formalismus wichtig ist, der mit der natürlichen Sprache kommentiert werden sollte.
2. Logische Stimmigkeit (*engl.: coherence*): Unstimmigkeiten der Definitionen sollten vermieden werden. Diese Stimmigkeit sollte auch zwischen der formalen Definition und der 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*): Eine Ontologie sollte so grundlegend und so offen wie möglich sein, um das gemeinte Wissen zum Ausdruck zu bringen.

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 diametrale Ansätze gibt. Auch wird der Formalismus mitunter gewisse Zugeständnisse im Vergleich zu der 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

Eine Erkenntnis der oben genannten Anforderungen für die erfolgreiche, fachspezifische semantische Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen ist, dass eine zumindest

minimale Übereinstimmung grundlegender Konzepte der Geomorphologie gefunden werden muss (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 (vgl. Kapitel 2.2.1) als Summe von Einzelphänomenen selbst inhärent sind. So stellt LEHMANN (1964) fest, dass zum einen Geländeformen schwer begrifflich zu machen seien, weil man im fließenden Ineinander nicht wisse, wo die eine Form anfangt und die andere aufhört. Zum zweiten sei das habitische Sehen, also der ins Optische übertragene Tastsinn zum Erkennen dreidimensionaler Formen bei den meisten Menschen schwach ausgebildet und zum dritten stelle 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 einer 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 zu einer zwingend 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 der geometrische Analyse des Raumes im Wesentlichen 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 abzugrenzenden Objekte gegliedert ist. Diese Objekte haben Nachbarschaftsbeziehungen und treten über geomorphologische Materialtransportprozesse mit anderen Objekten in Verbindung. Die quantitative Forschungsrichtung der Geomorphologie, die Geomorphometrie hingegen verfolgt die Analyse dieser Objekte überwiegend auf dem Feldansatz

Der Feldansatz basiert darauf, dass jeder Punkt im 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 wahrgenommen (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 Reliefs³ in Einheiten, die mit den untersuchten Phänomenen in Beziehung stehen (RASEMANN 2003). WRIGHT (1972) definiert

³ Zur genaueren Betrachtung des Begriffes Relief in der Geomorphologie sei auf das Kapitel 2.2.1 verwiesen.

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 die 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. Auch hier bleibt fraglich, ob diese 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 Sicht der Geomorphologie auf das Relief in Kapitel 2.2.1 allzu stark vorweg nehmen zu wollen, ist es klar, dass 3D-Objekte, die über funktionale Beziehungen in einem Zusammenhang stehen, nicht allein durch die Verfahren der deskriptiven Statistik, die auf ein 2,5D-Feld der Höhen, die ja allein die Grenzfläche der Objekte zur Atmosphäre repräsentiert, 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 dieser Ansätze ist aber gleichermaßen die Intension des Konzeptes, die mit der assoziativen Beziehung zu anderen Objekten über seinen 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 THORBURY (1956) getan hat.⁴ 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 GRU-

⁴ Dass die planare Darstellung von Entitäten des Reliefs bei gewissen Geoobjekten erhebliche Schwierigkeiten der Repräsentation nach sich zieht, wird insbesondere bei Wänden und Überhängen deutlich (vgl. Kapitel 2.1.4).

BER (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 Mischung der beiden gegensätzlichen Ansätze erscheint. Sie nennen als Beispiel eines Objektes, das aus feldbasierten Daten 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. Auch JAQUEZ et al. (2000) schlagen vor, Grenzen geographischer Objekte 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 zerteilen, innerhalb des Feldansatzes durch Änderungen von Variablen möglich sei. Häufig aber ist 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, da zwar jedermann glaubt, dass jedes Ding eine räumliche Ausdehnung hat, sich die Idee, den Raum in präzise Teile zu zerlegen auf Konzepte, wie etwa das eines „Berges“ nicht gut anwenden lässt. Hier würde der Begriff des Fuzzy sets zur Hilfe genommen, die 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 ein wenig 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 bei der Analyse des geographischen Raumes in der Theorie der Geomorphologie weisen ideale geographische Entitäten exakte (*engl.: crisp*) räumliche Grenzen und wohl definierte Merkmalsklassen auf (BURROUGH 1996). Diese können dann durch Koordinaten in Form von Punkten, Kanten, Flächen oder Volumen angegeben werden. SMITH (2000) führt daher den Begriff des sog. Fiat ein, die im Gegensatz zu klaren, natürlichen Grenzen von Objekten, durch ihre Natur keine eindeutige Begrenzung aufweisen. 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 der Entitäten anwenden. In der normativen Verfahrensweise der semantischen Modellierung ist es daher zunächst nebensächlich, ob Grenzen in der Praxis klar abgegrenzt werden können. Entscheidend ist nur, dass die Objekte der Geomorphologischen Betrachtung in der therotischen Betrachtung, also auch im semantischen Modell eine scharfe Grenze aufweist. Dies ist bei der Ausbreitung eines Sees bei der Betrachtung einer längeren Zeitspanne weniger klar, als bei der Begrenzung eines speziellen Sedimentkörpers. Auch wenn die Grenze 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 (2003) 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 sondern braucht, wie in Kapitel 2.1 diskutiert, einen Formalismus, der die von GUARINO (2004) geforderte logischen Theorie der intendierten Bedeutung eines Wissenschaftsfeldes verdeutlicht. Dieser Formalismus muss in allgemeiner und rechnerverständlicher Form erfolgen, damit die Informationswissenschaft die in der semantischen Modellierung getroffenen Aussagen verstehen und implemetieren 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 Modellen 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 schnell wachsende Anwendergemeinschaft hat,
- eine standardisierte graphische Sprache ist,
- durch XMI (XML Model Interchange) als Standard austauschbar ist und
- mit OCL (Object Constraint Language) eine mächtige Ergänzung erhält, die auf der Prädikatenlogik basiert.

Damit bietet sie die Möglichkeit, den Entwurf und die Entwicklung von semantischen Modellen auf einer einheitlichen Basis zu diskutieren und stellt gleichzeitig die Implementierung durch relationale Datenbankschemata und Anwendungsprogramme sicher. Das gilt auch, wenn 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, die 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 soll. Als weiterer Vorteil kommt auch 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 rege diskutiert werden kann, soll die Syntax der UML hier kurz erläutert werden. Leser, denen die Arbeitsweise mit UML vertraut ist, können dieses Kapitel 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.

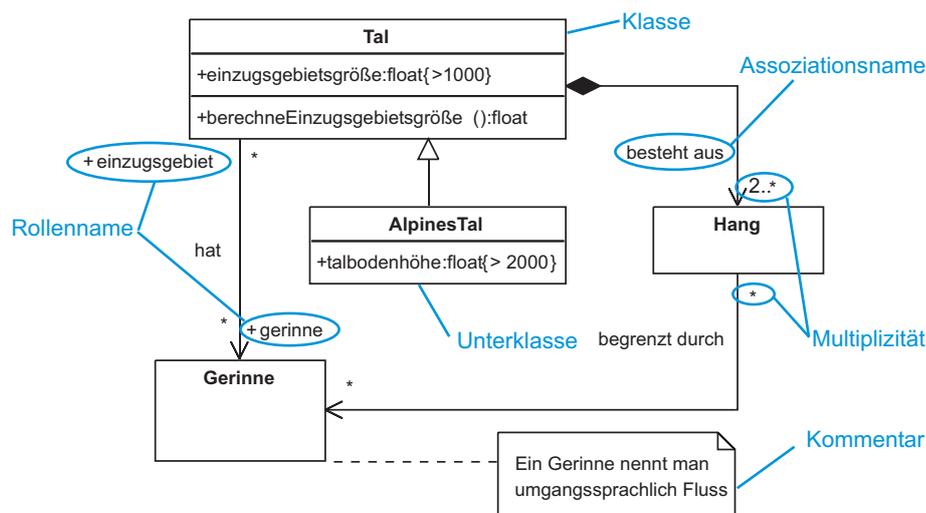


Abbildung 2.1: Erläuterndes Beispiel einer UML-Modellierung. Dargestellt sind ausschließlich Klassen, die Eigenschaften ihrer Objekte definieren, nicht aber reale Instanzen. Durch Pfeilnotationen werden die Beziehungen zwischen Klassen dargestellt.

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, die 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* für die Werte der Attribute definiert werden. So mag es sinnvoll erscheinen eine Hohlform erst als Tal anzusprechen, wenn seine Einzugsgebietsgröße größer als 1000 ist. Die Festlegung dieser 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` beigegeben, 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 Form der beteiligten 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 auf der nächsten Seite). 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 sehr 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 Beziehung einnehmen. 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 mehrere `Gerinne` haben, das jeweilige `Gerinne` aber gehört genau einem Objekt 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.

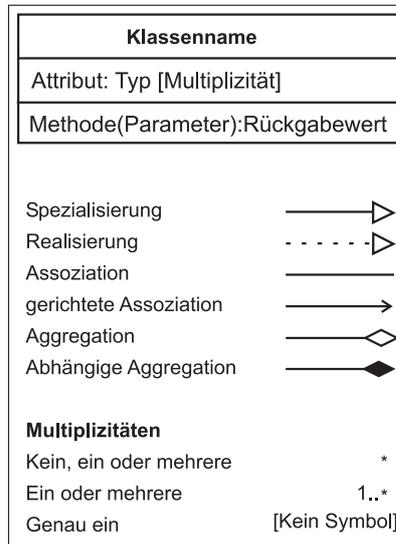


Abbildung 2.2: Legende der verwendeten UML-Symbole

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 anderen 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 auf Seite 17). 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 in dem 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

gen Sprachumfanges von OCL an entsprechender Stelle der Modellierung in Kapitel 3 bei der Behandlung konkreter Fälle gegeben.

2.1.4 Die geometrische Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen

Jedes Objekt der Geowissenschaften weist eine assoziative Beziehung zu einer repräsentierenden Geometrie auf, die seine Ausdehnung im Raum manifestiert. AHNERT (1995) sieht Landformen als Entitäten der Erdwissenschaften durch ihre Lage, ihre Grundrissform und ihre Größe gekennzeichnet. Die Konsequenz aus dieser Beobachtung muss eine räumliche Repräsentation sein, die es ermöglicht, die assoziativen Beziehungen, die ein jedes Objekt im Betrachtungsfeld der Geowissenschaften zu jeder dieser Eigenschaften hat, befriedigend abzubilden. An dieser Stelle soll nun der Bedarf von Wänden und steilen Hangbereichen in Bezug auf ihre geometrische Repräsentation beleuchtet werden.

Die am häufigsten verwendete Repräsentation des Raumes in den Geowissenschaften erfolgt durch regelmäßige Raster, die auch Grids genannt werden und einem Feldansatz entsprechen (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.

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

(2.1) ist damit eine rechtseindeutige und im Falle eines digitalen Höhenmodells (DHM), also einer rechnergestützten Repräsentation der Geländeoberfläche, eine linkstotale Relation (vgl. PLÜMER et al. 2002), 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 auf der nächsten Seite zeigt dabei die Limitierung der Repräsentation der Erdoberfläche durch regelmäßige Raster auf. Ein Überhang (Abbildung 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 Werte von z aufweist. Beide Oberflächenphänomene sind also durch die Funktion 2.1 und damit in einem Raster nicht korrekt abzubilden. Die Repräsentation der beiden Formen wäre in diesem Falle sogar gleich.

Ein weiterer negativer Aspekt der Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen durch Raster ist die für die Definition dieser Bereiche wichtigen Hangneigung. Diese wird in Rastern durch Nachbarschaftsanalyse im Ortsraum berechnet (vgl. DEMERS 2000), die in der Geomorphometrie oft durch ein gleitendes Fenster (*engl.: moving window*) realisiert wird (vgl. RASEMANN 2003).⁵ Die Methode ist in den kommerziellen GIS in Form des gleitenden Fensters als Standardmethode implementiert. Hangneigungswerte können in Rastern

⁵ Aus der digitalen Bildverarbeitung kommend wird das Verfahren der Nachbarschaftsanalyse hauptsächlich zur geometrischen Verbesserung von Grauwertbildern oder der Kantenextraktion verwendet (vgl. HABERÄCKER 1987).

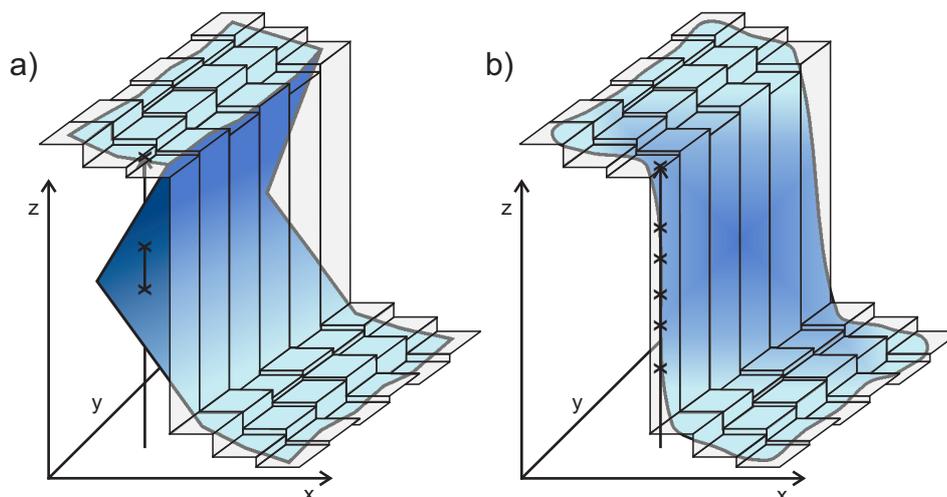


Abbildung 2.3: Probleme der Repräsentation von a) Überhängen und b) senkrechten Wänden durch das Rasterformat. Während sich die repräsentierten Phänomene augenscheinlich unterscheiden, ist die Repräsentation durch ein Raster hier identisch.

durch diese Methoden allein aus geometrischen Gründen nie Werte von 90° annehmen (vgl. EVANS 1980).

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 auf der nächsten Seite). Das hieße also, dass man es hier mit Bereichen untergeordneter Wichtigkeit zu tun hat. 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

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

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

und Tabelle 2.1 dargestellten Flächenanteile sich auf die Horizontalprojektion beziehen, nicht aber auf die wahre Oberfläche des Gebietes. Die von AHNERT (1995) angegebene wichtige Eigenschaft der Grundrissform kann also nicht unbedingt als Indikator der Wichtigkeit einer Form gelten (s. a. Fußnote 11 auf S. 27). Dies ist insbesondere für Wände und Überhänge ein Problem, da sie ein weit größeres Gebiet durch die an ihnen stattfindenden Prozesse beeinträchtigen, als ihre kleinen Flächen in der Horizontalprojektion dies vermuten lassen (vgl. Abbildung 2.11 auf Seite 37).

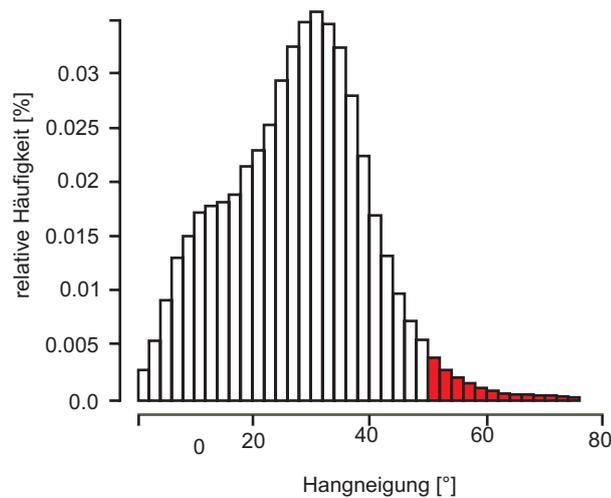


Abbildung 2.4: Relative Häufigkeit der Hangneigung im Turtmantal, die aus einem Grid der Auflösung von 1m abgeleitet wurde. Deutlich zu erkennen ist, dass der Anteil der steilen Hangneigungen ($>50^\circ$, hier rot dargestellt) offensichtlich keinen großen Anteil an der Gesamtfläche des Tales hat. Der Mittelwert der Hangneigung liegt bei $27,28^\circ$ (verändert nach RASEMANN 2003).

Ein Hauptproblem bei der Erfassung von Wänden, die auch Überhänge beinhalten können, ist die Verwendung von klassischen Luftbildern. Während Überhänge damit schlicht gar nicht erfasst werden können, sinkt die Auflösung der realen, geneigten Fläche mit dem Kosinus der Hangneigung (vgl. Abbildung 2.5 auf der nächsten Seite). Daran können auch die von WEIBEL und BRÄNDLI (1995) entwickelten adaptiven Verfeinerungsmethoden für aus Höhenliniendaten erhobenen DGMs nichts ändern. FÖRSTNER (1995) fordert daher eine differenzierte Datenerhebung in Abhängigkeit der Sichtbarkeit der Objekte. Neben der terrestrischen Photogrammetrie (vgl. Kapitel 2.4) können aber auch schräg aufgenommene Luftbilder zur Erfassung von Wänden herangezogen werden, wie BUCHROITHNER et al. (2000) es für die Eiger Nordwand tun.

Eine Möglichkeit, die so erhobenen Daten zu repräsentieren, bieten GRÖGER und PLÜMER (2003) sowie GRÖGER und PLÜMER (2005) an. 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 Flächen, bei denen GRÖGER und PLÜMER (2003) Maschen zulassen, die nicht zwingend Dreiecke sein müssen. Diese Maschen werden von genau einem simplen Kantenzzyklus 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 Kleidungsstück über das Gelände gezogen werden kann, ist, das eine 2D-Topologie auf sie angewendet werden kann. Eine

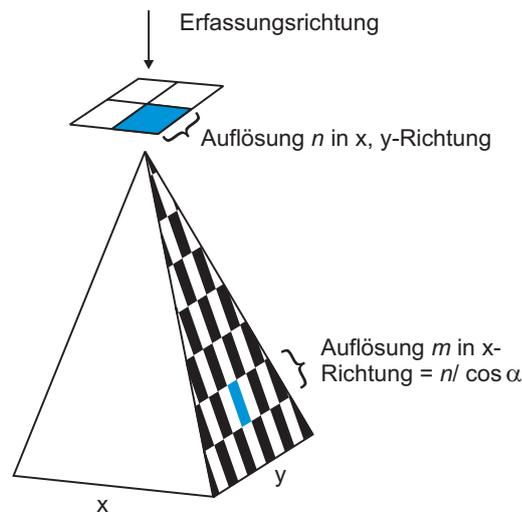


Abbildung 2.5: Abhängigkeit der Auflösung der wahren Oberfläche vom Winkel der aufgenommenen Fläche. Überhänge sind mit klassischen Luftbildern nicht zu erfassen (verändert nach BUCHROITHNER et al. 2000).

Nachbarschaftsanalyse auf einem 2,8D-Datenmodell ist also wie auf 2D-Daten durchführbar. Henkel und Volumen dürfen dabei allerdings nicht vorkommen.

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

Zur Repräsentation der von AHNERT (1995) 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“ angewendet. Der Standard ermöglicht die Modellierung 0-D bis 3-D geometrischer und topologischer Primitive, Komplex und Aggregate (vgl. GRÖGER und KOLBE 2005), die zu der 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). Erweiterungen dieses Standards sind auch am Institut für Kartographie und Geoinformation (IKG) der Universität Bonn im Rahmen der Special Interest Group 3D des Landes NRW durchgeführt worden. Der Zweck der Modifikation des Standards durch die SIG-3D zielt im Gegensatz zu der hier vorgestellten Arbeit allerdings auf die dreidimensionale 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 dabei der Beschreibung der Landform nach Geometrie, Größe und räumlicher Lage, der Erfassung ihrer materiellen Beschaffenheit (AHNERT 1995) 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.: commonense knowledge*) (vgl. REIMER 1991) entspringt. Reliefform enthält hingegen einen Bezug zu einem Konzept des Begriffes Relief, dessen Definition vom Anwender abhängt.⁶ 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 ihr stattfinden, einem ständigem Wandel unterzogen ist. Im Blickfeld der Geomorphologie stehen also neben der qualitativen und quantitativen Beschreibung der Erdoberfläche, auch die physischen Abläufe, die letztere verändern (MACHATSCHEK 1973). Diese Beschreibung der gegenwärtigen Beziehung zwischen formenveränderndem Prozess und Landformen, Gesteins- und Bodenmaterialien wird als funktionale Geomorphologie bezeichnet (AHNERT 1995).

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.⁷ Schumm weist in seinen Arbeit 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).

⁶ Im 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).

⁷ Landformen 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).

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 der Landformen bewirkt Änderungen der benachbarten Formen, die zu einem großen Teil, aber nicht nur klimatisch angetrieben und determiniert wird. Die Nachbarschaft von Landformen ist also ein wesentlicher Aspekt bei der Betrachtung ihrer Geomorphogenese. Sediment, also Masse verlässt eine Landform durch einen auf sie wirkenden Prozess und akkumuliert auf einer anderen Form und verändert diese, falls es die Ausprägung der Form unter gegebenen klimatischen Bedingungen zulässt. 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, i. d. R. klimatischer 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 2003). 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 geomorphologisch relevanten äußeren Bereichen der Lithosphäre⁸, der Atmosphäre und der Hydrosphäre⁹ verstanden. (vgl. DIKAU und SCHMIDT 1999; DIKAU 1996; RASEMANN 2003). 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.

⁸ Der Begriff Lithosphäre bezeichnet die bis in eine Tiefe von 50 - 100 km reichende Kruste und 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.

⁹ Der Begriff Hydrosphäre bezeichnet die Wasserhülle der Erde, die Meere, Binnengewässer und das Grundwasser einschließt. Ebenso zählen Eis und Schnee dazu (LESER et al. 1992A).

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 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 2.6 auf der nächsten Seite) und provoziert damit unnötige Missverständnisse mit den benachbarten Naturwissenschaften.¹⁰ 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 2.6 auf der nächsten Seite schematisch dargestellt ist. Das heißt also, dass kleinere Landformen häufiger neu gebildet, verändert oder aufgelöst 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 einheitlich. 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 2003). Hierbei ist zu beachten, dass senkrechte Wände in ihrer

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

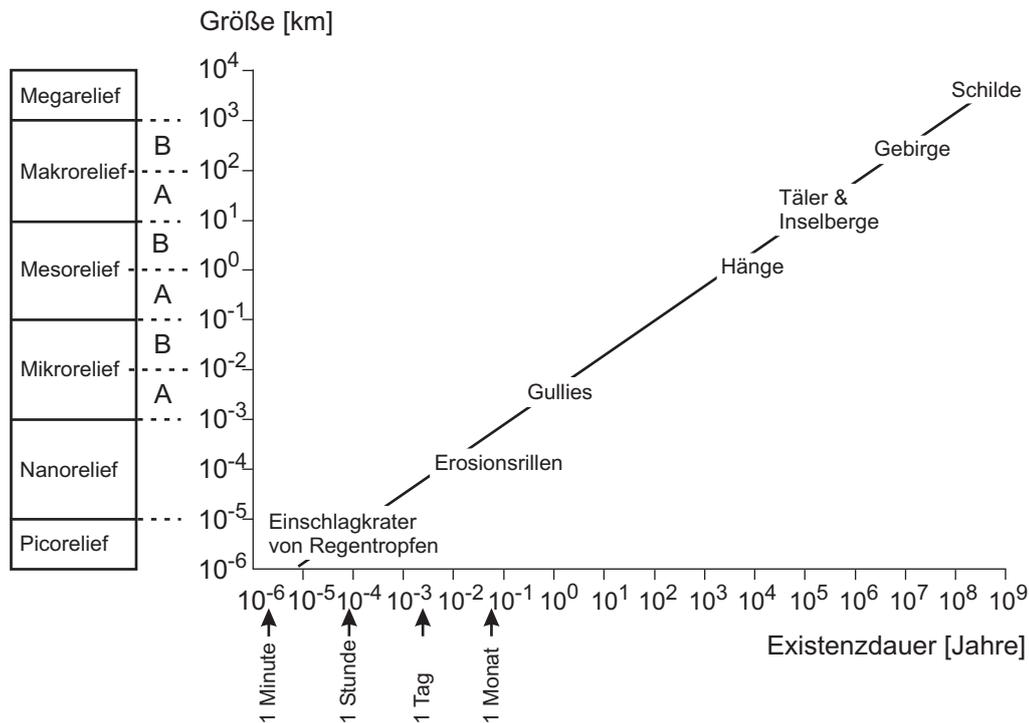


Abbildung 2.6: Formengröße und Existenzdauer von Reliefformen. Normalerweise existieren große Formen länger als kleine, die allerdings häufiger auftreten. Kleinere Formen sitzen auf großen, älteren Formen auf und treten über materialbewegende Prozesse mit ihnen in Beziehung. Zeit ist also ein wesentlicher Faktor bei der Betrachtung von Geoobjekten (verändert nach DIKAU 1989 und AHNERT 1995).

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 Oberfläche ist dies durchaus der Fall.¹¹

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 Geoobjekt 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 Form nicht verändernder Prozess ist, führen die beiden anderen Gruppen durch Massentransport Anpassungen 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 geo-

¹¹ Dabei soll die Einheit der Ordinate in Abbildung 2.6 nicht weiter verwirren. Natürlich ist die korrekte Einheit einer Fläche m². 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.

morphologischer und geologischer Prozesse, der Geomorphogenese. Aktualistische Analogieschlüsse erlauben es sogar, den formenbildenden Prozess aus der Form, d. h. aus ihrer Geomorphometrie selbst zu rekonstruieren.¹² 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 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 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 2.7 dargestellte Scherspannung in Abhängigkeit von der Hangneigung α die Druckspannung übersteigt.¹³ Das Auftreten von

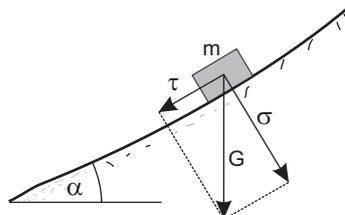


Abbildung 2.7: Vektorparallelogramm der Gewichtskraft und der Druck- und Scherspannung (verändert nach AHNERT (1995)).

Steinschlag aus einer Felswand ist also nicht einmal zwingend an Niederschlag gebunden, sondern an 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

¹² 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).

¹³ AHNERT (1995) 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.

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. Damit bilden Relief und Prozess sog. Prozessdomänen (*engl.: process domain*)¹⁴, 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 also das im Raum ausgedehnte Relief und den Prozess in der Zeit und kann als hierarchisch übergeordnete Klassifizierung 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 Reliefs, den 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 werden¹⁵ ein entscheidendes Charakteristikum dieses Raumes und, unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung desselben, den Nachweis vergangener glazialer Prozesse dar (vgl. BARSCH und CAINE 1984; EVANS 1997).

¹⁴ Die 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).

¹⁵ Der im europäischen Kontext wohl berühmteste Karling ist das Matterhorn in der Schweiz.

Felswände unterliegen wie alle Landformen der Oberfläche der Verwitterung und Erosion. Das Festgestein erfährt dabei zunächst eine Zergliederung durch Klüfte¹⁶, die infolge der Druckentlastung durch zuvor erodiertes Material parallel zur Landoberfläche entstehen (AHNERT 1995). 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.¹⁷ Damit sind Klüfte für die Entstehung und Entwicklung von Felswänden nicht zu unterschätzen (vgl. KIMBER et al. 2002).

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).¹⁸ 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 Abschattung zu mehreren Frostwechseln an Wänden kommen (MORTENSEN 1960). Die optimale Kluftbildung vollzieht sich nach HAEBERLI et al. (1997) dabei im Temperaturintervall von -3° – -6° . 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 entscheidenden 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).¹⁹ Durch die Zunahme der kurzwelligen Globalstrahlung mit der Höhe (vgl. FLIRI 1975; SCHROTT 1991) wirkt dieser Prozess in alpinen Regionen stärker als in den Tiefebenen. Die Insulationsverwitterung dringt im

¹⁶ Synonym zu Kluft werden auch die Begriffe Diaklase, Lithoklase, Riss oder Fuge verwendet (vgl. LESER et al. 1992A).

¹⁷ Obwohl 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.

¹⁸ Dabei entspricht der Wert von einem Pascal als SI-Einheit für den Druck einem Newton pro Quadratmeter ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$).

¹⁹ Dies 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).

Vergleich zur Frostsprengung aber nur 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 sind jedoch die 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 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 2003), 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) an (vgl. Tabelle 2.2). LESER et al. (1992A)

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

Tabelle 2.2: Klassifikation von Fallprozessen nach WHALLEY (1974).

und LESER et al. (1992B) 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 Massenkonzentrat 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 dass 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 2.12 auf Seite 39) eine große Rolle bei der Zwischenspeicherung des Wandmaterialies 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 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).

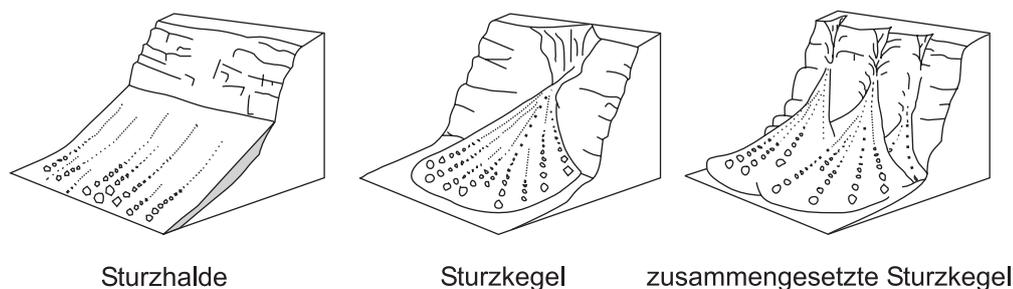


Abbildung 2.8: Drei Typen von Schutthalden (BALLANTYNE und HARRIS 1994).

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 (*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 2003) entstehen in der Horizontalen konvexe Schuttkegel (*engl.: talus cone*). Durch das *Zusammenwachsen* einzelner Schuttkegel können zusammengesetzte Schuttkegel (*engl.: coalescing talus cone*) entstehen (vgl. Abbildung 2.8). Die Form des exponierten Objektes, der Wand, ist also ausschlaggebend für die geometrische Form des erodierten Materiales 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 Sturzhalden 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 2.9 auf der nächsten Seite). CAINE (1974) nennt die drei Hangneigungsintervalle $37 - 40^\circ$ für Blocksturzhalden, $30 - 40^\circ$ für aluviale Schutthalden und $3 - 30^\circ$ für Lawinhalden. 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

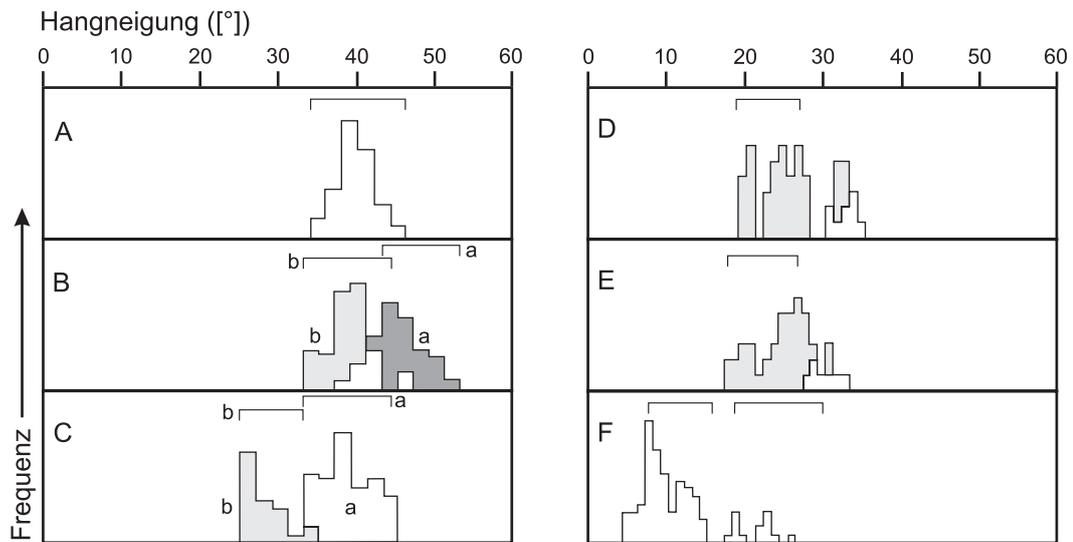


Abbildung 2.9: Frequenz der Hangneigungsverteilung gestreckter Hänge aus sechs verschiedenen Regionen zur Verdeutlichung der maximalen Hangneigung von Schutthalden.
A: Schieferhänge, Mesa Verde, Colorado, USA. **B:** Unterschrittene (a) und geschützte Hänge, Verdugo Hills, Kalifornien, USA. **C:** Hänge 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).

abhängigen Maximalneigung anpassen kann. Werden diese Hänge durch Prozesse anderer Objekte, etwa einem angrenzenden Gerinne unterschritten und damit übersteilt, wie dies für die in Abbildung 2.9 (B) gemessenen Hangneigungen 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.

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

Tabelle 2.3: Typische maximale Hangneigung von verfestigtem Material nach CARSON und KIRKBY (1972).

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 Prozessresponsssystem wird diese überschrittene kritische Hangneigung durch Schuttrutschungen ganzer Haldenteile oder einzelner Blöcke wieder ausgeglichen (vgl. AHNERT 1995). 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*)²⁰, die ebenfalls den gravitativen Massenbewegungen 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 infiltrierte 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 Murenbgänge führen zu der Akkumulationsform des Murkegels mit der charakteristischen Hangneigung von etwa 8 – 12° (vgl. AHNERT 1995). Auch 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 Wände und steilen Hangbereiche von besonderem Interesse wären. So kann durch Niederschlags- oder Schmelzwasser Feinmaterial von Schutthalden ausgewaschen werden (COOKE und REEVES 1972) oder lockeres Oberflächenmaterial 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 Infiltrationsrate 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

²⁰ Muren werden in der medialen Welt auch gerne Schlammlawinen genannt, was ihre Bedrohlichkeit für besiedelte Gebiete nicht schmälert.

der Wände agierenden Leisten. Hier ist die Infiltrationsrate in Abhängigkeit der Korngröße des Substrates zwar ähnlich hoch, durch den oberflächennahen, felsigen Untergrund ist der subkutane Abfluss jedoch nur eingeschränkt wirksam. Auch inaktive Schutthalden, die Bodenbildung aufweisen, sind eher für die Generierung von Oberflächenabfluss geeignet.

2.2.3 Sedimentspeicher und das System der Sedimentkaskade

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 Landform mit den dazugehörigen inneren Zuständen 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) und finden in den Arbeiten von JÄCKLI (1957) und RAPP (1960B) ihren Anfang für den alpinen und periglazialen Raum.

Bei 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 2.10 auf der nächsten Seite). 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, das in Abhängigkeit des transportierenden Prozesses und nicht näher spezifizierten Regulatoren im jeweiligen Subsystem über einen gewissen Zeitraum verbleibt oder aber in das nächste Subsystem der Kaskade weitertransportiert wird.

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 fluviatile 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 2.10 auf der nächsten Seite angestellte Systemanalyse stellt eine starke Vereinfachung der Realität im betrachteten System dar. Zwar werden die Prozesse, die die

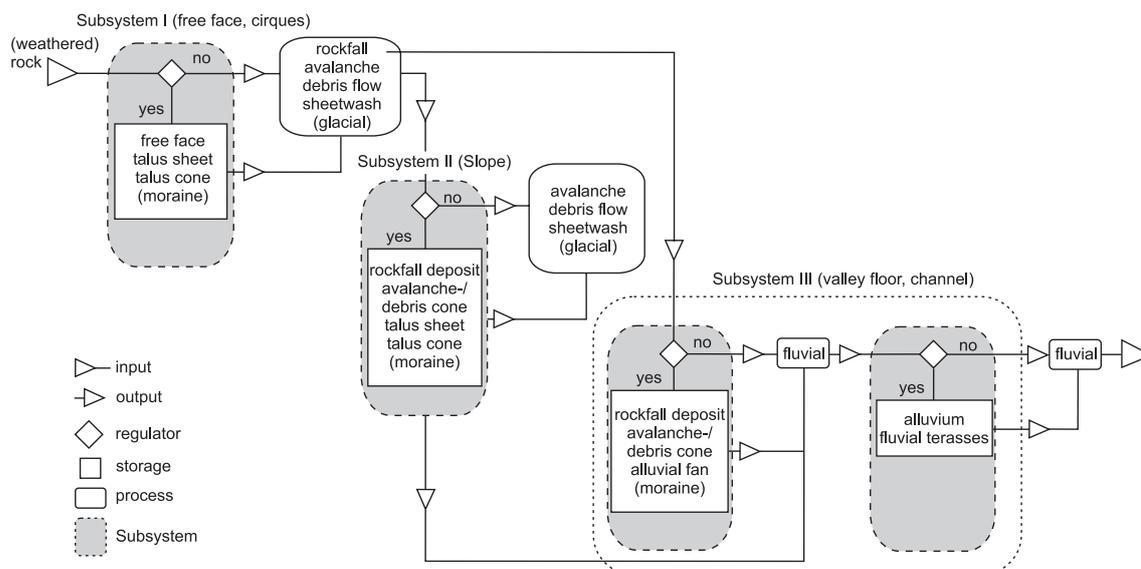


Abbildung 2.10: Konzeptmodell verschiedener Speichertypen und Prozesse einer Sedimentkaskade im Reintal (aus SCHROTT et al. 2003). Das Kaskadensystem der Felswand (*engl.: free face*) ist nur unzureichend repräsentiert.

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 der Wand in Form von Bänken oder Leisten berücksichtigt wird. Auch ist die Wand als Teil des Anstehenden nicht von den Sekundärspeichern differenziert. Gleiches bleibt auch dem Modell von CAINE (1974) vorzuwerfen, der das Schema einer alpinen Sedimentkaskade bildlich illustriert (vgl. Abbildung 2.11 auf der nächsten Seite). 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.²¹

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

Die Akkumulationsrate kann für ein System auch als Sedimentbudget bezeichnet werden, für dessen Quantifizierung sämtliche Akkumulations- und Erosionsprozesse eines Systems

²¹ Die 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. 2005B).

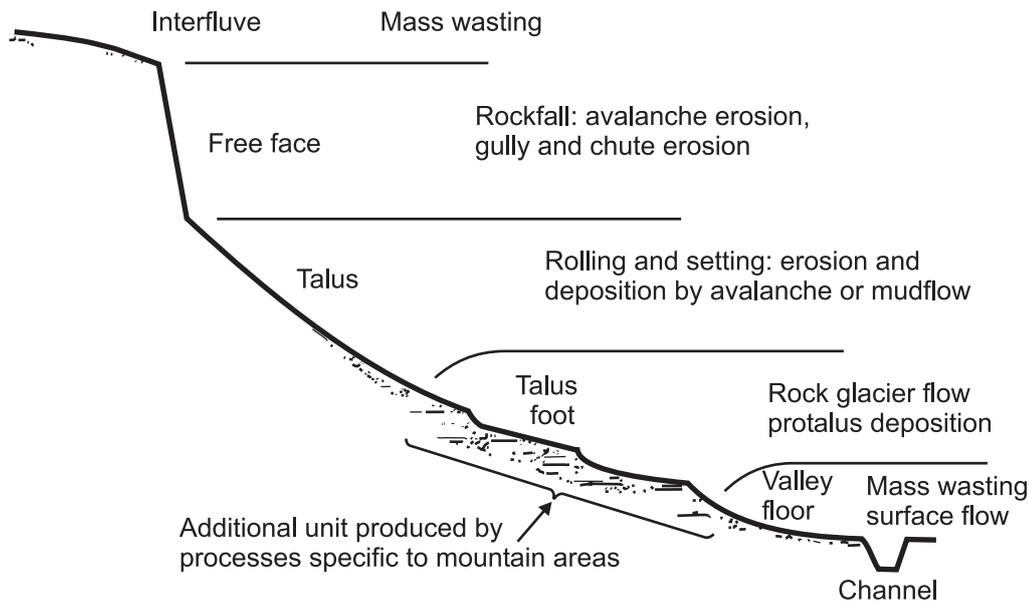


Abbildung 2.11: Das alpine Hangsystem nach CAINE (1974). Der Talus und der Talusfuß werden durch Fallprozesse der Wand ebenfalls mit beeinflusst.

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 DOORKAMP 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 und WEBB 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 eines 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 sind. Die Systemzustände der an der Sedimentkaskade beteiligten Subsysteme sind also einer zeitlichen Veränderung unterworfen (vgl. HARDISTY 1987; SLAYMAKER 1991), die sich auf ihre Regulatoren und inneren Zustände auswirken. Diese internen Zu-

stände 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 Standfestigkeitsverringering führen, die einen Bergsturz zulässt, obwohl die Hangneigung in der Zeit konstant geblieben ist.

2.2.3.1 Die Wand am Rand der Sedimentkaskade

Hänge als Bestandteile von Einzugsgebieten sind offene Systeme, die durch Energie- und Masseflüssen 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)²² von denen also jedes durch Verwitterung gelöste Material durch Sturzprozesse sofort abtransportiert wird, ohne dass es dabei vom Auftreten eines externen Ereignisses abhängig wäre. Die Felswand ist damit ein wesentlicher, weil isolierter Bestandteil der Sedimentkaskade. Wie schon bemerkt wurde, ist die Gleichung (2.2), wenn die Wand als Ganzes und ohne ihre Zwischenspeicher betrachtet wird immer negativ. 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 1974), stufenförmige Absätze, die durch differenzierte Erosion in der Wand entstehen (vgl. Abbildung 2.12 auf der nächsten Seite). 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 2.13 auf Seite 40 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 wiederum durch Steinschlag oder aber aquatische Spülprozesse auf Leisten oder aber auf die Halde akkumuliert werden. Das verwitterte Ausgangsgestein kann aber nicht auf den Zwischenspeichern der Wand akkumuliert werden, wenn es

²² Das Prinzip der Verwitterungslimitierung ist bereits von Gilbert in die Geomorphologie getragen worden. Es besagt, dass aus einem System kein Sediment transportiert werden kann, weil 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 1995).



Abbildung 2.12: Leiste mit aufsitzendem Sediment an der Barwang im Pipjitälli des Turtmanntales. Die unterschiedliche Färbung des aufliegenden Sedimentes spricht für eine allochthone Herkunft (Aufnahme vom Juli 2004).

durch Fels- oder Bergstürze transportiert wird. Hierbei wird 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 der Abbildung 2.13 wird neben der inhaltlichen Aussage auch die Limitierung der Darstellungsform sichtbar. Es kann im Sinne der Modellierung der Landschaftsgenese weder die vollständige Zerstörung noch deren Generierung 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 dies 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.

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.

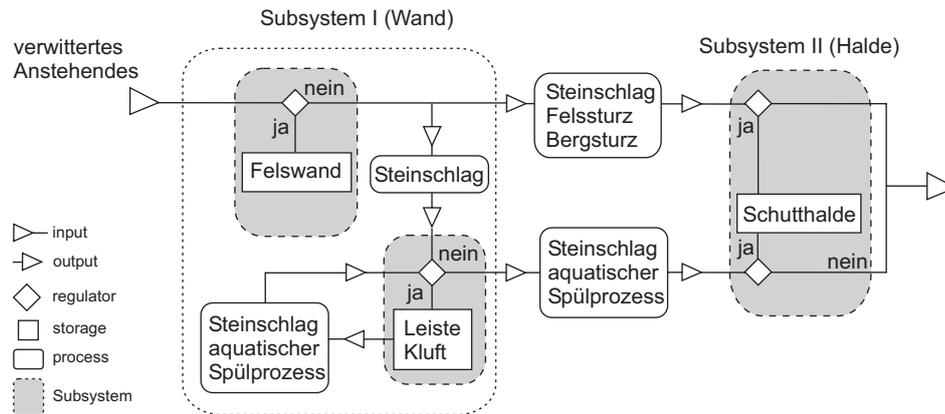


Abbildung 2.13: Konzeptmodell der Sedimentkaskade der Wand. Trotz erhöhter Detailgenauigkeit lassen sich einige Aspekte der Sedimentkaskade in dieser Darstellungsart nicht verdeutlichen (siehe Text für weitere Erläuterungen).

2.3 Persistente Datenhaltung in der räumlichen Datenbank Oracle Spatial

Das in Kapitel 1 skizzierte Gesamtkonzept zum Modellieren, Repräsentieren und Erfassen von Wänden und steilen Hangbereichen kommt ohne eine sinnvolle und geordnete Organisation der erhobenen Daten nicht aus. Hierfür werden Datenbankmanagementsysteme verwendet, die die Daten zu organisieren helfen. Der Vorteil durch die Verwendung von Datenbanken²³ lassen sich am eindrucksvollsten mit einer Auflistung der Nachteile dokumentieren, die entstehen würden, wenn man versuchen würde, Daten großer Menge und Komplexität ohne diese Systeme halten und verwalten zu wollen, dokumentieren. Die gravierendsten Nachteile wären nach KEMPER und EICKLER (1999) dabei

- eine Redundanz und Inkonsistenz der Daten,
- beschränkte Zugriffsmöglichkeiten,
- die Gefahr von Inkonsistenzen,
- und schließlich gar der Verlust von Daten.

Hinzu kommen Vorteile der Wiederverwertbarkeit und der Interoperabilität (vgl. BISHR (1998) GRÖGER und KOLBE (2003)) zwischen unterschiedlichen Anwendungssystemen zur Visualisierung oder Analyse von räumlichen Daten.

In einem Datenbanksystem können drei Abstraktionsebenen unterschieden werden (vgl. ORTMANN 1999):

1. Die physische Ebene auf der festgelegt wird, wie die Daten gespeichert werden. Diese Ebene wird von allen DBMS eigenständig übernommen und ist hier irrelevant.

²³ Genau gesprochen, ist eine Datenbank nur eine Sammlung von Daten, während ein Datenbankmanagementsystem (DBMS) ein Produkt, das die Organisation und Abfrage von Daten händelt und Beschädigungen durch die z. T. gleichzeitige Nutzung der Datensammlung verhindert (vgl. ULLMAN 1988).

2. Die logische Ebene, die das Datenbankschema festlegt. Hier wird organisiert, welche Daten gespeichert werden und welche Beziehungen zwischen den Daten bestehen. Das Datenbankschema ist ein wesentlicher Bestandteil der Implementierung z. B. semantischer Modelle, ist allerdings nicht mit ihm gleichzusetzen. Ein semantisches Modell muss Implementierungsfragen nicht berücksichtigen.
3. Die Ebene der Sichten auf die Teilmengen der auf der logischen Ebene definierten Gesamtheit aller Daten dargestellt werden. Sichten werden auf die Benutzergruppen oder Anwendungen, etwa einem Kartierwerkzeug, die auf das DBMS zugreifen, zu-recht geschnitten.

Auf Datenbanken wird i. d. R. mit der Structured Query Language (SQL) zugegriffen, die sich mit der Data Definition Language (DDL) und der Data Manipulation Language (DML) in die zwei Bereiche der Datendefinition und der Datenabfrage untergliedern lässt (vgl. KEMPER und EICKLER 1999). SQL stellt einen allgemeinen Standard in der Arbeit mit DBMS dar.

2.3.1 Die räumliche Datenbank Oracle Spatial

Das Datenbankmanagementsystem (DBMS) Oracle Spatial (9.2i) ist eine objekt-relationale Datenbank die neben den Eigenschaften einer relationalen Datenbank, wie etwa Microsofts Access (vgl. ORTMANN 1999) auch objektorientierte Funktionen aufweist. Relationale Datenbanken basieren auf Tabellen, die aus Spalten, den einzelnen Attributen und Zeilen, den einzelnen Datensätzen bestehen. Ein exklusiver Primärschlüssel (*engl.: primary key*) dient der Identifikation des entsprechenden Datensatzes und zur Verknüpfung mit anderen. Darüber hinaus kann ein Datensatz Spalten mit Fremdschlüsseln (*engl.: foreign key*) beinhalten, die auf andere Datensätze verweisen. Der Primärschlüssel des referenzierten Datensatzes ist damit der Fremdschlüssel des Datensatzes, von dem auf ihn verwiesen wird. Bei dem objektrelationalen DBMS Oracle Spatial können neben den relationalen Tabellen auch Objekttypen mit entsprechenden Objekttabellen erzeugt werden (vgl. ORACLE COOPERATION 2002). Hierbei werden Objekte und Attribute gekapselt und über Methoden zugänglich gemacht. Es können neben atomaren Daten also auch komplexe Objekte in einzelnen Spalten der Datenbank abgelegt und auf deren Attribute mittels Methoden zugegriffen werden. Ein Fremdschlüssel in einer Tabelle verweist dann also nicht auf einen anderen Datensatz, sondern auf ein Objekt, in dem die Daten gehalten werden. Abstrakte Objekttypen werden in Oracle Spatial Objekttypen genannt, die zur Definition von Objekttabellen verwendet werden können. Die Spalten der Objekttabellen entsprechen dabei den Attributen des Objekttyps. Der praktische Unterschied einer relationalen Tabelle besteht nun darin, dass Objekttabellen keine weiteren Spalten hinzugefügt werden können.

Die objektrelationale Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial weist gegenüber relationalen Datenbankmanagementsystemen einen weiteren Vorteil auf. Werden in relationalen DBMS m:n-Beziehungen, durch eine zusätzliche Tabelle realisiert, löst Oracle Spatial dieses Problem durch sog. nested tables. Der Inhalt einer solchen eingebetteten Tabelle ist in ein Objekt eingebettet, wobei bei der Anzeige dieses Objektes nur die Zeilen aufgelistet werden, die zu ihm gehören. Dieses Verfahren vereinfacht die Handhabung mit M:N-

Beziehungen und setzt den Gedanken der Objektorientierung konsequent um (vgl. REUTER 2003).

2.3.1.1 Der Objekttyp MDSYS.SDO_GEOMETRY

Mit MDSYS.SDO_GEOMETRY stellt Oracle Spatial einen besonderen Objekttyp zur Verfügung, der es erlaubt, räumliche Datentypen auf Grundlage von Koordinaten abzuspeichern.²⁴ Die verwendeten Geometriertypen in MDSYS.SDO_GEOMETRY entsprechen dabei der Simple feature Specification des Open GIS-Consortium (OGC) (vgl. OPEN GIS CONSORTIUM 1999) und sind damit den in der ISO 19107 verwendeten Geometrien (vgl. Kapitel 3.2) ähnlich. Abbildung 2.14 zeigt die durch den Objekttyp MDSYS.SDO_GEOMETRY zur Verfügung gestellte Geometrien. Dabei aggregiert der Typ „Arc line String“ im Gegensatz zum „Line string“ gebogene Elemente, während ein „Compound line string“ gebogene und gerade Elemente zulässt. Analog verhält es sich mit dem „Polygon“ und dem „Compound polygon“. Jedes Objekt von MDSYS.SDO_GEOMETRY

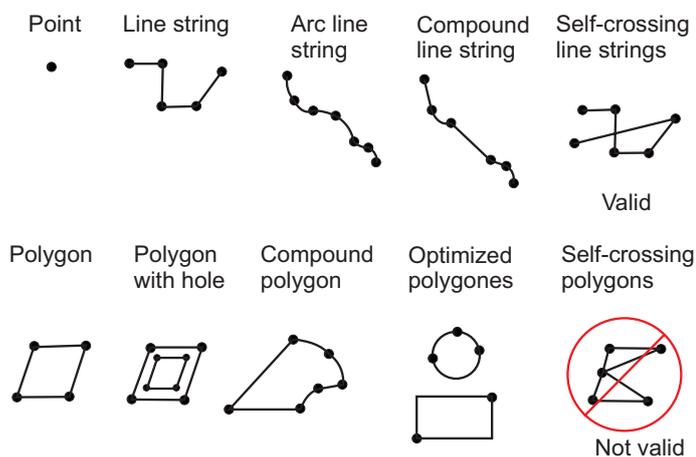


Abbildung 2.14: Geometriertypen, die von Oracle Spatial durch den Objekttyp MDSYS.SDO_GEOMETRY zur Verfügung gestellt werden (verändert nach ORACLE COOPERATION 2003).

hat fünf Attribute, die anhand des nachfolgenden Beispiels erläutert werden sollen (vgl. ORACLE COOPERATION 2003; SCHMITTWILKEN 2004).

```

1  MDSYS.SDO-GEOMETRY(
2  3003,
3  Null,
4  Null,
5  MDSYS.SDO_ELEM_INFO_ARRAY(1, 1003, 1),
6  MDSYS_SDO_ORDINATE_ARRAY(
7  6, 8, 13,
8  3, 7, 18,
```

²⁴ Neben Oracle Spatial haben mittlerweile auch andere DBMS, wie etwa IBM DB2, Informix und Ingres räumliche Datentypen implementiert. Dabei fehlen allerdings Objekttypen zur Beschreibung von Volumina (vgl. STOTER und ZLATANOVA 2003).

9 6, 19, 4,
10 6, 8, 13
11)

1. **Zeile 2:** `SDO_GTYPE`: Eine vierstellige Zahl (**abcd**), die den Typ der tatsächlich abgespeicherten Geometrie angibt.
 - a:** Dimension des Objektes (hier 3D)
 - b:** ID der Dimension des linearen Referenzsystems, wobei 0 die letzte Dimension des Referenzsystems bezeichnet, hier die z-Achse.
 - c, d:** zweistellige ID des Geometrietyps
 - ab00 Unbekannte Geometrie
 - ab01 Punkt
 - ab02 Line oder Curve
 - ab03 Polygon
 - ab04 Collection
 - ab05 Multipoint
 - ab06 Multiline oder Multicurve
 - ab07 Multipolygon
2. **Zeile 3:** `SDO_SRID`: ID des Referenzkoordinatensystems. Dabei muss die ID einem Wert der Tabelle `MDSYS.CS_SRS` entsprechen, in der beliebige räumliche Bezugssysteme definiert werden und alle Größen frei definiert werden können. Der Wert `NULL` verwendet ein rechtwinkliges, karthesisches Koordinatensystem.
3. **Zeile 4:** `SDO_POINT`: Objekt zur Speicherung von Punkten, das effektiver ist als die Alternativen der Geometrietypen 2001 oder 3001.
4. **Zeile 5:** `SDO_ELEM_INFO`: Information über das Attribut `SDO_ORDINATES` (siehe 5.) mit beliebig vielen Trippeln von Teilgeometrien (**o, p, q**), die jeweils eine Teilgeometrie des hier abgespeicherten Geometrietyps näher spezifizieren.
 - o:** `SDO_STARTING_OFFSET`: Index des `MDSYS.SDO_ORDINATE_ARRAY`, der bei 1 beginnt. Hier beginnt eine neue Teilgeometrie des Gesamtobjektes, wie etwa ein Loch in einem Polygon.
 - p:** `SDO_ETYPE`: Typ der Teilgeometrie.
 - q:** `SDO_INTERPRETATION`:
 - Beschreibt **p** zu Geometrien, so wird die Anzahl der Unterelemente dieser Assoziation angegeben.
 - Anderenfalls wird die Art der Interpolation zwischen den Eckpunkten angegeben, wobei hier nur 1 als lineare Interpolation Verwendung findet.
5. **Zeile 6-10** `SDO_ORDINATES` Koordinatenwerte der Geometrie, die durch Kommata getrennt sind. Zur Gewährleistung der Orientierung muss der letzte Punkt dem ersten entsprechen.

Ein Nachteil der sich aus obiger Struktur ableiten lässt, ist, dass Objekte des Typs `MD-SYS.SDO_GEOMETRY` keine topologische Informationen von Knoten, Kanten oder Flächen beschreiben. Es werden lediglich Geometrien festgehalten und somit bspw. eine benachbarte Kante zweier flächenhafter Objekte doppelt gehalten. Die Überprüfung der Datenkonsistenz wird also nicht von Oracle Spatial selbst, sondern muss durch externe Funktionen geleistet werden.

Ebenfalls nachteilig ist, dass Oracle Spatial 3D-Daten nur unzureichend unterstützt. Zwar können alle Geometrien mit 3D-Koordinaten erzeugt werden, die mit Oracle ausgelieferten Operatoren und Funktionen auf diese Daten sind jedoch stark eingeschränkt (vgl. SCHMITTWILKEN 2004). Dennoch bietet der räumliche Datentyp von Oracle Spatial eine gute Möglichkeit, um die in dieser Arbeit angestrebte Teilimplementierung des semantischen Modells zu unterstützen. Ein besonderer Vorteil ist, dass man davon ausgehen kann, dass ein kommerziell gepflegtes Produkt in der nächsten Version entsprechende Funktionen zur Verfügung stellt. Die Datenhaltung selbst sind durch solche Neuerungen nicht betroffen.

2.4 Erfassung von Wänden mittels terrestrischer Photos

Der Begriff Photogrammetrie, der seit dem späten 19. Jahrhundert verwendet wird (vgl. ALSPAUGH 2004), steht für die Beschreibung und Rekonstruktion eines Objektes durch ein oder mehrere Bilder mit dem Ziel der exakten 3D-Rekonstruktion dieses Objektes (LUHMANN 2003). Dies beinhaltet die Erfassung des Objektes in Form von Koordinaten und geometrischen Elementen, wobei das Bild als Informationsquelle weiterhin für ergänzende Bildanalysen, der optischen Analyse zur Verfügung steht (MIKHAIL et al. 2001). Damit stellt die Photogrammetrie ein berührungsloses 3D-Messverfahren dar, das sich besonders dann eignet, wenn ein Objekt nicht oder schwer erreichbar ist, es veränderbar ist und die aktuellen Ausmaße von Bedeutung sind. Da selbst mit der Aufnahme einer geringen Anzahl von Bildern sehr viel Informationen über ein Objekt zu erhalten sind, eignet sich dieses Verfahren insbesondere dann, wenn zur Zeit der Aufnahme nicht abschließend klar ist, welche Messungen benötigt werden (FRYER 2001). Der letzte Punkt ist von besonderer Bedeutung, da hier ein semantisches Modell über Wände und steile Hangbereiche dialektisch aus geomorphologischem Fachwissen und Geodaten abgeleitet werden soll.

In diesem Kapitel soll nun eine Übersicht über die Grundlagen und Verfahren gegeben werden, die zur Analyse der im Turtmantal (Schweiz) aufgenommenen Bilder herangezogen worden sind. Dabei ist die Nomenklatur im Wesentlichen der von LUHMANN (2003) entnommen, die ggf. durch die von NIEMEIER (2002) ergänzt wird.

Den meisten photogrammetrischen Messungen liegt das mathematische Modell der Zentralperspektive zugrunde. Danach legt jeder Bildpunkt P' zusammen mit dem Projektionszentrum O die Raumrichtung des entsprechenden Strahls zum Objektpunkt P fest (siehe Abbildung 2.15 auf der nächsten Seite).²⁵ Sind die reale Abbildungsgeometrie der Kamera, die innere Orientierung und die Lage des Aufnahmesystems, also die äußere Orientierung

²⁵ Das Projektionszentrum ist mathematisch gesehen der Punkt, durch den alle Bildstrahlen verlaufen (LUHMANN 2003). In der optischen Abbildung eines oft mehrlinsigen Objektivs ist jedoch der objekt-

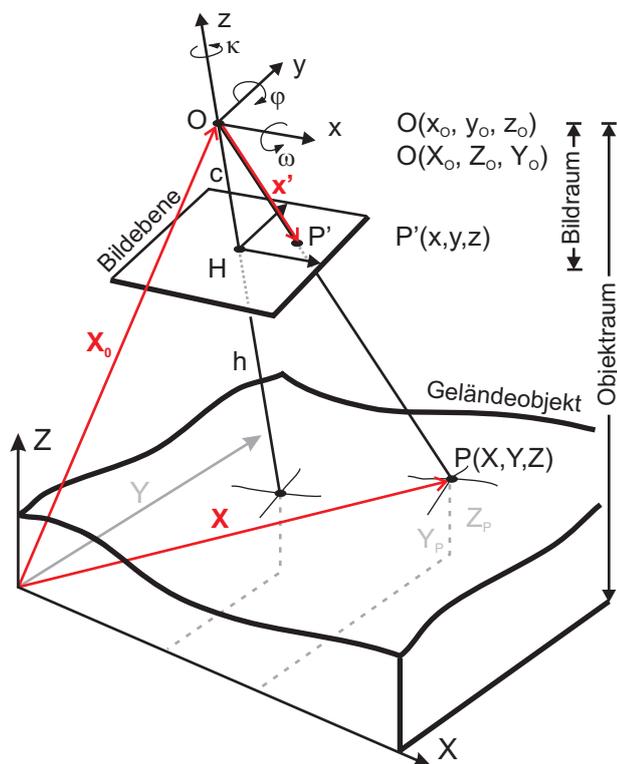


Abbildung 2.15: Das Modell der Zentralperspektive (verändert nach SCHWIDEFSKY und ACKERMANN (1976) und LUHMANN (2003)(siehe Text für weitere Erläuterungen).

der Kamera im Raum bekannt, kann jeder Bildstrahl im Raum beschrieben werden. Er entspricht damit der Messung eines Theodoliten. Aus dem Schnitt mindestens zweier korrespondierenden, räumlich verschiedener Strahlen, die denselben Objektpunkt abbilden, also homolog sind, kann ein Objektpunkt dreidimensional bestimmt werden. Dabei ist die Anzahl der beteiligten Bilder theoretisch unbegrenzt.

Die innere Orientierung beschreibt die Lage des Projektionszentrums O im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie die Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive (KONEZNY und LEHMANN (1984); LUHMANN (2003)). Die Parameter der inneren Orientierung sind

- die wichtigste Kenngröße, die Kamerakonstante c , die den lotrechten Abstand der Bildebene vom Projektionszentrum O in negativer z' -Richtung beschreibt²⁶,
- die Lage des Bildhauptpunktes H , also den Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem mit den Koordinaten (x'_H, y'_H) , der näherungsweise in der Bildmitte liegt

seitige Einfallswinkel τ nicht gleich dem bildseitigen Ausfallwinkel τ' . Diese Abweichung muss u. a. durch die Bestimmung der inneren Orientierung ausgeglichen werden.

²⁶ Landläufig wird die Kamerakonstante auch als Brennweite bezeichnet, die sich aber nur bei Fokussierung auf unendlich näherungsweise entsprechen (vgl. LUHMANN 2003).

- sowie die Parameter von Bildfehlern durch Verzeichnung der Linse, hauptsächlich sind dies radial-symmetrische Verzeichnungen $\Delta r'$.

Die innere Orientierung muss durch eine Kamerakalibrierung festgelegt werden (vgl. Kapitel 2.4.4).

Die äußere Orientierung der Kamera beschreibt die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem, das durch die Bildebene und durch die Kamerakonstante aufgespannt wird. Dabei beschreibt der Vektor \mathbf{X}_0 in Abbildung 2.15 auf der vorherigen Seite die drei Translationen des Kamerakoordinatensystems, die in einer Rotationsmatrix \mathbf{R} abgebildet werden.

Die Abbildung eines Bildpunktes in den Objektraum ist dann durch (2.3) gegeben.

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}' \quad (2.3)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}$$

Der Ortsvektor des Objektpunktes im Objektkoordinatensystem \mathbf{X} setzt sich danach also aus der Addition des Ortsvektors des Projektionszentrums im Objektkoordinatensystem und dem rotierten 3-Vektor des Bildpunktes \mathbf{x}' im Kamerakoordinatensystem zusammen, wobei aus rechnerischen Gründen hier z' für $-c$ geschrieben wird. Der Faktor m ist ein für jeden Objektpunkt individueller, unbekannter Maßstabsfaktor. Daher kann aus einem einzelnen Bild zunächst nur die Richtung zum Objektpunkt P festgelegt werden.

2.4.1 Die Kollinearitätsgleichungen

Nach Umkehrung der Rotationsmatrix und der Erweiterung um den zur inneren Orientierung gehörigen Hauptpunkt $H(x'_H, y'_H)$ sowie der Korrekturterme für die Verzeichnung $\Delta x'$ und $\Delta y'$ lassen sich die Kollinearitätsgleichungen aufstellen.

$$x' = x'_H + z' \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \quad (2.4)$$

$$y' = y'_H + z' \cdot \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Durch sie kann eine Transformation von Objektkoordinaten (X, Y, Z) in entsprechenden Bildkoordinaten (x', y') eines Bildes durchgeführt werden. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, müssen die Parameter der inneren Orientierung aus einer Kamerakalibrierung ermittelt werden.

Der Maßstabsfaktor m in (2.3) taucht in den Kollinearitätsgleichungen nicht mehr auf, weil er durch Division bei der Umformung des Gleichungssystems eliminiert worden ist (vgl.

LUHMANN 2003). Der Vorteil der Kollinearitätsgleichungen²⁷ liegt darin, dass die auf der linken Seite stehenden Bildkoordinaten, also die beobachteten Messgrößen als Funktion der auf der rechten Seite stehenden Unbekannten formuliert werden. Sie eignen sich damit unmittelbar als Beobachtungsgleichungen für eine überbestimmte Ausgleichung nach dem Verfahren kleinster Quadrate und wird damit zum grundlegenden Element einer Bündelblockausgleichung (vgl. Kapitel 2.4.2). Auch wird durch die Gleichung zum Ausdruck gebracht, dass in der Photogrammetrie *Winkelmessungen* durchgeführt werden, wodurch auch bei unterschiedlichen Einheiten des durch (x', y', z') aufgespannten Bildkoordinatensystems in Pixeln und des Objektsystems in Metern direkt gemessen werden kann. Aus diesem Grund kann die Angabe der durch die Kalibrierung gegebene Kamerakonstante in Pixel erfolgen (vgl. Kapitel 2.4.4).

2.4.2 Das Verfahren der Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung²⁸ (*engl.: bundle adjustment*) ist ein Verfahren zur direkten rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (vgl. KRAUS 1994). Berücksichtigt werden dabei photogrammetrisch gemessene Bildpunkte und geodätische Beobachtungen im Objektkoordinatensystem (vgl. LUHMANN 2003). Die einzelnen Bilder werden dabei über korrespondierende, also homologe Punkte miteinander zu einem Gesamtmodell verknüpft und Passpunkte mit dem übergeordneten Koordinatensystem in Beziehung gebracht. Ziel der Bündelblockausgleichung ist es, die Orientierung des Kamerasystems und die Passpunkte so zu beschreiben, dass sich die homologen Punkte möglichst gut in ihrem Objektpunkt schneiden. Dabei wird der Fehler der Rückprojektion der homologen Bildpunkte minimalisiert. Durch die Berücksichtigung aller beobachteten Größen und aller unbekannt Parameter eines Bildverbandes in einem simultanen Berechnungsschritt ist die Bündelblockausgleichung das leistungsfähigste und genaueste Verfahren zur Bildorientierung und Punktbestimmung in der Photogrammetrie (LUHMANN 2003). Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit unkonventioneller Aufnahmepositionen und Amateuraufnahmen, wie sie im Nahbereich häufig vorkommen, auswerten zu können (KRAUS 1994).

Die Probleme der Bündelblockausgleichung ergeben sich trotz des nicht linearen Problems (vgl. KRAUS 1994) nicht in der Formulierung des mathematischen Modells als vielmehr im praktischen Bereich. Dabei sind insbesondere

- die Lösung großer Normalgleichungssysteme,
- die Aufdeckung und Elimination grober Datenfehler und
- die Beschaffung von Näherungswerten

zu nennen (vgl. LUHMANN 2003).

²⁷ Die direkten Kollinearitätsgleichungen werden auch als Grundgleichungen der Photogrammetrie bezeichnet (vgl. LUHMANN 2003).

²⁸ Neben der Bezeichnung der Bündelblockausgleichung werden auch Bündeltriangulation, Mehrbildtriangulation oder Mehrbildorientierung für das hier beschriebene Verfahren genannt (vgl. LUHMANN 2003).

Insbesondere der letzte Punkt stellt für die Auswertung von in der Tiefenausdehnung sehr variabler Objekte, wie sie Wände und steile Hangbereiche darstellen, eine schwierige Aufgabe dar. Aus diesem Grund wurde die Bündelblockausgleichung hier nur zur Bestimmung der sechs Parameter der äußeren Orientierung verwendet, wobei die Passpunkte als Neupunkte in die Ausgleichung eingehen. Die innere Orientierung der verwendeten Kamera liegt durch eine am IPB erfolgte Messfeldkalibrierung vor (vgl. Kapitel 4.2).

Das mathematische Modell der Bündelblockausgleichung basiert auf den Kollinearitätsgleichungen nach (2.4) mit den in Kapitel 2.4.1 genannten Vorteilen. Fehlerbehaftete Passpunkte können danach also auch ausgeglichen werden, weil sie als Näherungswerte für Neupunkte in die Ausgleichung eingehen. Das funktionale Modell der Bündelblockausgleichung ohne die Parameter der inneren Orientierung ist in (2.5) gegeben.²⁹

$$x'_i + v_{x'_i} = F_x \left(\underbrace{X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j}_{\text{Unbekannte}}, \underbrace{X_i, Y_i, Z_i}_{\text{Neupunkt}} \right) \quad (2.5)$$

$$y'_i + v_{y'_i} = F_y (X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, X_i, Y_i, Z_i)$$

- mit v : Kompensationsgröße wegen der Messungenauigkeit
 i : Punktindex
 j : Bildindex

Zur Ausgleichung oder Schätzung von Parametern in linearen Modellen (vgl. KOCH 1997) werden die Kollinearitätsgleichungen jeweils nach den entsprechenden Parametern umgestellt und mit Hilfe von genügend guten Näherungswerten für den Parameter- oder Unbekanntenvektor \mathbf{X}_0 durch Reihenentwicklung nach Taylor (vgl. NIEMEIER 2002) linearisiert. Da dieses Verfahren für photogrammetrisch gebildete Leser nicht weiter interessant ist, sei zur näheren Erläuterung auf Anhang 5.2 verwiesen.

Das Ergebnis Bündelausgleichung mit anschließender Ausgleichung sind vor allem die Parameter der äußeren Orientierung (LUHMANN 2003), die für das Verfahren des räumlichen Vorwärtsschnittes zur Ermittlung weiterer Neupunkte im Objektraum (vgl. Kapitel 2.4.3) benötigt werden.

2.4.3 Der räumliche Vorwärtsschnitt

Der räumliche Vorwärtsschnitt ist eine direkte geometrische Lösung zur Ermittlung eines Punktes im Objektraum durch die Verwendung zweier Bildpunkte. Diese spannen mit den Projektionszentren zwei Raumstrahlen \mathbf{r} und \mathbf{s} auf, die i. d. R. windschief stehen, sich also nicht berühren. Der zu ermittelnde Punkt H ist derjenige Punkt, der in der Mitte der kürzesten Verbindung dieser beiden Raumstrahlen liegt. Diese Verbindung ist zu beiden

²⁹ Obwohl bei der Formulierung des funktionalen Modells Parameter eingehen, deren wahre Werte nicht bekannt sind, wird aus Gründen der Lesbarkeit auf eine entsprechende die Kennzeichnung verzichtet (vgl. NIEMEIER 2002).

Raumstrahlen rechtwinklig. Mit den in Formel (2.6) gegebenen zwei linearen Gleichungssystemen lässt sich H bestimmen (vgl. FÖRSTNER et al. 2004).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} & -\mathbf{r} \cdot \mathbf{s} \\ -\mathbf{r} \cdot \mathbf{s} & -\mathbf{s} \cdot \mathbf{s} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\mathbf{q} - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{r} \\ (\mathbf{q} - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{s} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Dabei sind \mathbf{r} und \mathbf{s} die beiden Raumstrahlen sowie \mathbf{p} und \mathbf{q} die beiden Projektionszentren. Für den räumlichen Vorwärtsschnitt sind die beiden äußeren Orientierungen der Kameras und die Bildkoordinaten der Objektpunkte erforderlich.

2.4.4 Kamerakalibrierung

Eine reale Kamera weicht immer von dem in Kapitel 2.4 beschriebenen Modell der Zentralperspektive ab, sie muss also kalibriert werden. Unter einer Kalibrierung versteht man die Bestimmung des geometrischen Kameramodells, das durch die Parameter der inneren Orientierung gegeben ist (LUHMANN 2003) sowie die Korrektur nicht-linearer Verzeichnungseffekte des Linsensystems (vgl. LAEBE und FÖRSTNER 2004).³⁰ Bei rechnerischen Verfahren wird dies durch die Erweiterung der in (2.3) gegebenen Abbildungsfunktion durch zusätzliche Parameter, etwa einer radial symmetrischen Verzeichnung erreicht. Ergebnisse einer Kalibrierung sind also neben den Parametern der inneren Orientierung wie Kamerakonstante c , der Lage des Hauptpunktes (x_H, y_H) und einer Maßstabsdifferenz der x - und y -Achse $(\Delta x, \Delta y)$ auch eine Positionskorrektur für jedes Pixel eines kalibrierten Systems in Form einer Look-Up-Tabelle. Diese Positionskorrektur verbessert die Abbildung der realen Kamera dann zu einer geradentreuen Abbildung, nicht aber zu einer idealen Abbildung. Eine Kalibrierung kann zum einen durch die Aufnahme von Punkten im Raum, deren Koordinaten bekannt sind erfolgen, und somit einen Umkehrprozess der photogrammetrischen Punktbestimmung darstellen (KÜLÜR 1998). Zum anderen kann sie durch Selbstkalibrierung erfolgen, wenn die Koordinaten der zur Kalibrierung verwendeten Punkte nicht bekannt sind. Letzteres wurde hier durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2).

2.4.5 Tauglichkeit handelsüblicher Kameras für photogrammetrische Messverfahren

Die in Kapitel 2.4 besprochenen Grundlagen können streng genommen nur für in ihrer inneren Orientierung sehr stabilen und baulich hochwertigen Messkameras zum Einsatz kommen. Zur Erfassung von Wänden und steilen Hangbereichen im Zuge einer semantischen Klassifizierung und Datenakquise sollten aber leichte, handelsübliche Kameras, wie die hier verwendete Digitalkamera Canon EOS 10D verwendet werden können. Während die verwendete digitale Kamera Canon EOS 10D im Kapitel 4.2 vorgestellt wird, sollen

³⁰ PAPPA et al. (2001) nennen auch die Sensorgröße als Anforderungen an eine Kalibrierung. Dies ist bei der vorliegenden Aufgabenstellung aber nicht relevant.

hier kurz und die in der Literatur beschriebenen Anwendungen handelsüblicher Kameras für photogrammetrische Zwecke skizziert werden.

Nach der ersten Verwendung von CCD-Sensoren für photogrammetrische Zwecke seit den 80er Jahren wurde diese Technik bald für handelsübliche Kameras eingesetzt. Seit der ersten Amateur CCD-Kamera MVC-C1 von Sony mit ca. 0,28 Megapixel im Jahre 1988 nahm die Auflösung der verwendeten Chips seit 1998 rapide zu (NAKADA und CHIKATSU 2003; KUNII und CHIKATSU 2001). Die geometrische Genauigkeit der verwendeten Flächensensoren wird dabei durch die Genauigkeit der Sensorelementpositionen bestimmt. Durch den lithographischen Herstellungsprozess der Halbleiterbausteine ist die Regelmäßigkeit der Detektorposition besser als 0,1 - 0,2 μm . Das entspricht 1/60 bis 1/100 der Größe eines Sensorelementes (LUHMANN 2003). Ein weiterer Einfluss auf die Lagegenauigkeit im Bild ist durch den Einfluss von Unebenheiten der Sensorfläche gegeben. Für einen Sensor mit $1500 \cdot 1000$ Pixel wurden dabei Unebenheiten von weniger als 10 μm nachgewiesen (ebd.). Dennoch kommen Digitalkameras immer häufiger für photogrammetrische Messungen im Nahbereich zum Einsatz (LUHMANN 2002).

Dass handelsübliche Kameras (*engl.: consumer cameras*) für photogrammetrische Belange durchaus zu nutzen sind, zeigen vielfältige Publikationen über 3D-Objektrekonstruktion. So wenden PAPPA et al. (2001) die 2,1 Megapixel Kamera Kodak DC290 an, um Veränderungen einer im Durchmesser 5 m großen, ausklappbaren Antenne für Raumfahrzeuge zu detektieren. Hauptargument einer Anwendung kleiner Kameras ist hier das Gewicht, das auch bei einem Einsatz im Hochgebirge ein nicht zu unterschätzender Faktor ist. PAPPA et al. (2001) kommen zu dem Schluss, dass auch Kameras in dieser Qualität für Fragestellungen der Materialverformung eingesetzt werden können. WIGGENHAGEN et al. (2004) vergleichen die handelsüblichen Digitalkameras Nikon D1200 mit 6 Megapixeln und die 5 Megapixel Messkamera Rollei D7 mit der analogen Messkamera SMK 120. Nach Kalibrierung aller Kamerasysteme mittels eines 3D-Kalibrierfeldes kommen auch sie zum Schluss, dass die digitalen Kameras wegen der Brennweitenverlängerung zwar mehr Bilder benötigen, für Objektrekonstruktion mit hinreichender Genauigkeit aber zu nutzen sind. Zu derselben Erkenntnis gelangen auch LI und KING (2002) nach der Anwendung der Kamera Fujifilm MX2700 mit $1800 \cdot 1200$ Pixel. Insbesondere heben sie die Kostenvorteile dieser Methode im Vergleich zu konventionellen, tachymetrischen Vermessungen hervor. FEDAK (N.D.) vergleicht die mit einer Fujifilm MX-2900 photogrammetrisch ermittelte 3D-Punktkoordinaten mit tachymetrisch gemessenen Werten. Dabei kommt er bei einem $8 \cdot 19$ m großen Objekt zu Abweichungen 2,5 mm in x-, 5,2 mm in y- und 2,5 mm in z-Richtung. Er bewertet diese Ergebnisse als ausreichend für Anwendungen in der Architektur. Auch FEDAK (N.D.) hebt dabei die enorme Zeitersparnis der photogrammetrischen Methode im Vergleich zu Messungen mit einer Feststation hervor.

Die Eignung von handelsüblichen Digitalkameras ist im Wesentlichen von einer vorausgehenden Kalibrierung zur Wiederherstellung der inneren Orientierung abhängig (vgl. Kapitel 2.4.4). Dabei ist zwischen 2D- und 3D-Messfehlern mit Stempel zu unterscheiden. Einige photogrammetrische Softwareprodukte, wie etwa PhotoModeler[©] der Version 4.0 und 5.0 Pro, erlauben es, ein 2D-Testfeld auszudrucken mit dem eine Kalibrierung durchgeführt werden kann. WIGGENHAGEN (2002) vergleicht die beiden Methoden mit einer Olympus E-10 mit 4 Megapixel und eine Nikon Coolpix 990 mit 3.34 Megapixel. Er kommt zu dem

Schluss, das in jedem Fall eine Kalibrierung mit einem 3D-Messfeld, wie es auch in Kapitel 2.4.4 verwendet wurde, zu bevorzugen ist.

Handelsübliche Kameras sind also nach erfolgter Kalibrierung in der Lage, hinreichend genaue Ausgangsdaten für photogrammetrische Verfahren zu liefern (vgl. KUNII und CHIKATSU 2001). GUARNIERI et al. (2004) stellen bei einem Vergleich einer 5 Megapixel Olympus E20P mit einem Laserscanner Riegl LMS-Z360 gar Genauigkeitsvorteile der handelsüblichen Kameras fest. Eine Kalibrierung zur Wiederherstellung der inneren Orientierung ist dabei eine unbedingte Voraussetzung. Diese kann auch durch die Erweiterung des funktionalen Modells (A.2) um die Parameter der inneren Orientierung und einer entsprechenden Anzahl von Beobachtungen mit dem Verfahren der Bündelblockausgleichung geschätzt werden (vgl. Kapitel 2.4.2). MATSUOKA et al. (2002) stellen eine Methode zur Kalibrierung von handelsüblichen Kameras ohne vermessenes Testfeld vor. Hierbei wird die Regelmäßigkeit von Bodenfliesen zur Kalibrierung genutzt. Dass auch handelsübliche Kameras in ihrer inneren Orientierung vergleichsweise stabil bleiben, weisen LAEBE und FÖRSTNER (2004) nach. Sie untersuchten drei digitale Kameras der preislichen Mittelklasse mit wiederholten Kalibrierungen in einem Zeitraum von vier Monaten.

3 Semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen

Science is predicated upon the belief that the Universe is algorithmically compressible [...] a belief that there is an abbreviated representation of the logic behind the Universe's properties that can be written down in finite form by human beings.

(BARROW 1991)

Zusammenfassung

Hauptanliegen dieser Arbeit ist das Aufstellen einer formalen semantischen Modellierung als Beitrag zur Interdisziplinarität. 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 zu repräsentieren. Formale Grundlage der Modellierung bildet die ISO 19109, die zur Repräsentation der geometrischen Eigenschaften von räumlich ausgedehnten Objekten die Geometrietyper der ISO 19107 als verbindlich erklärt. Kapitel 3.2 widmet sich dann einer ausgiebigen Diskussion dieser verwendeten Geometrietyper. Es wird ein Profil der in 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 aller modellierten Konzepte 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 skalenunabhängig. Die **Wand**, die sich zunächst rein geometrisch definiert, ist eine Ableitung des **Hanges** mit der Eigenschaft, dass sich verwittertes Material auf Grund der 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 Verfahren zur semantischen 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 und 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 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 Wissenschaftsrichtungen 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 For-

malismen 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 zur Interoperabilität, also zum 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 model*) der ISO 19109 im Grunde der in Kapitel 2.1 abgehandelten Diskussion über das Zustandekommen semantischer Modelle und muss hier nicht wiederholt werden. 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

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

Tabelle 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).

3.2 besprochen.

Neben der Klärung 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. Das hat zwei Gründe. 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 Surrogat 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 Grenzflächenrepräsentationen (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 semantische Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen im Kapitel 3.3 relevant sind. Es muss also eine Auswahl, gegebenenfalls eine Anpassung des Standards für die hier angestrebte Modellierung 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 Sachverhalten entwickelt wurde, ermöglicht diese Implementierung durch z. B. Überführung in ein Datenbankschema und damit die Integration in ein übergeordnetes Informationssystem. Die Verwendung internationaler 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).³¹

³¹ GML ist eine aus der Extensible Markup Language (XML) entwickelte Datenformat im Ascii-Code und damit für Maschinen und Menschen gleichermaßen lesbar (vgl. RAY 2001).

Im Folgenden wird ein Profil eines existierenden Standards im Sinne einer Vereinfachung und leichter Modifikation erstellt, das trotz der Modifikation für den externen Zugriff Dritter interoperabel ist.³² 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 auf der nächsten Seite 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 Primitive³³ 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 Körpern (`GM_Solid`) wichtig, deren Inneres durch die Orientierung der ihn begrenzenden Flächen festgelegt wird.

Die Klasse `GM_Curve` zur Repräsentation einer linienhaften Geometrie ist eine Komposition von einer oder mehrerer `GM_CurveSegments`. Dabei darf ein `GM_CurveSegment` zu nicht mehr als einer Instanz der Klasse `GM_Curve` gehören. Die Assoziation „Segmentation“ listet die Komponenten der `GM_Curve` in der Reihenfolge ihrer Orientierungen auf. Von der Klasse `GM_CurveSegment` abgeleitet, ist die Klasse `GM_LineString`, die als Attribute zwei oder mehrere Objekte der Klasse `GM_Position` besitzt. Die Klasse `GM_LineSegment` als Spezialisierung von `GM_LineString` wird nicht aus der ISO 19107 in das hier verwendete Profil übernommen. 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 Assozia-

³² Für 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).

³³ Die 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.

`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`, einer Spezialisierung von `GM_Surface`, zusammen und entspricht damit einer allgemeinen Tessellation.³⁵ 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-Algorithmusses 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 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`. Diese Methode 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 auf der nächsten Seite). 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

³⁵ 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.

aber disjunkt. Eine `GM_SolidBoundary` besteht in Analogie dazu aus einer äußeren und keiner, einer oder mehreren `GM_Shell` (deutsch: *Hülle*).

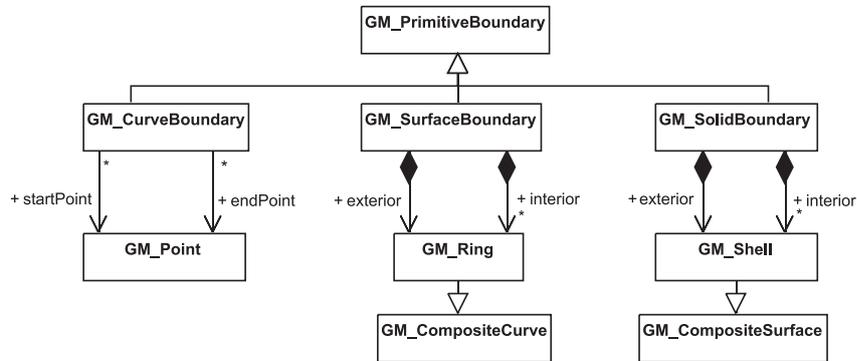


Abbildung 3.2: Die Boundary-Klassen der ISO 19107 (siehe Text für weitere Erläuterungen).

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. Auswirkungen dieses Modellierungsschrittes auf die Interoperabilität sind nicht vorhanden, da die Methode `boundary()` die geforderten Klassen weiterhin liefert (siehe Abbildung 3.1 auf Seite 57).

3.2.2 Modellierung der Topologie mit der Klasse `GM_Complex`

Die in Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite 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` existieren. 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` also 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 in diesem Bereich.

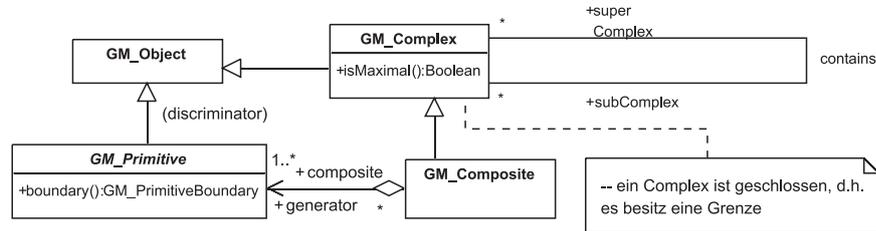


Abbildung 3.3: Die Klasse `GM_Complex` in ihrer UML-Notation (siehe Text für weitere Erläuterungen).

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 gelegenem 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 muss (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.

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 Geoobjekten verwendeten geometrischen Modells, scheint dies angebracht.

Die Forderung nach der Geschlossenheit eines `GM_Complex`, 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 auf der nächsten Seite 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`

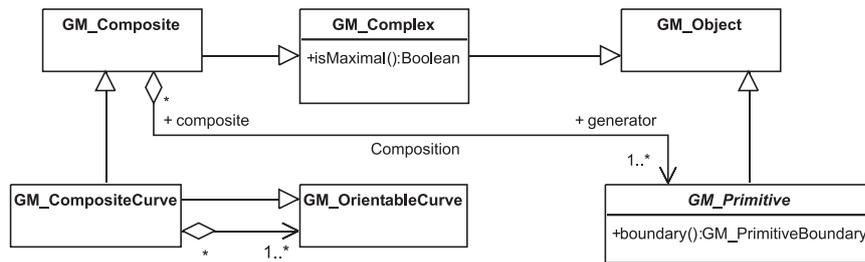


Abbildung 3.4: Die Klasse `GM_Composite` in ihrer UML-Notation (siehe Text für weitere Erläuterungen).

zusammenhängend sein müssen und eine äußere Grenze aufweisen. Innere Grenzen werden nicht redundant gehalten.³⁶

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`.

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 auf der nächsten Seite, die Oberklasse aller in der hier vorgestellten Modellierung repräsentierten, geomorphologisch relevanten 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

³⁶ GRÖGER und KOLBE (2005) weisen hier im Übrigen darauf hin, dass dies bei volumenhaften Verbunden zu inkonsistenter Modellierung der Orientierung begrenzender Flächen führte. Sie führen an, 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.).

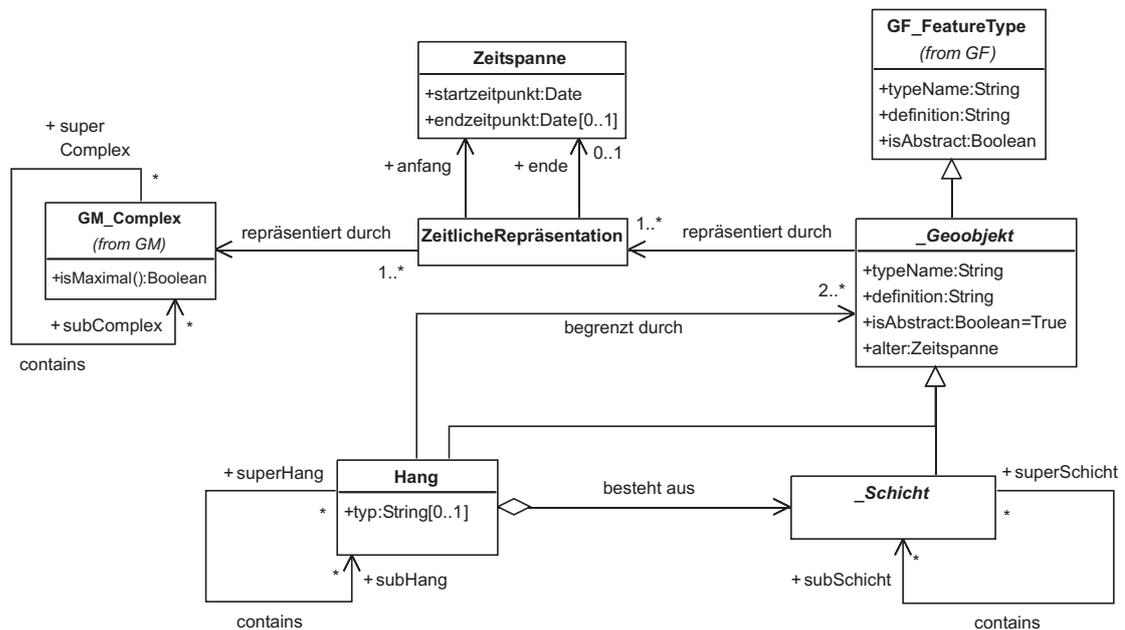


Abbildung 3.5: Repräsentation der Klasse `_Geoobjekt` und `Hang` (siehe Text für weitere Erläuterungen).

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.³⁷ 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.

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

³⁷ Die Benennung dieses Ereignisses als Felssturz folgt in der allgemeinen Wahrnehmung der Definition von LESER et al. (1992B) und nicht der in Tabelle 2.2 auf Seite 31 von WHALLEY (1974) verwendeten Nomenklatur.

gilt auch für die Attribute der *Zeitspanne*. Während ein *endzeitpunkt* optional erfüllt 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 in der Zeit der photographischen oder andersartigen Aufnahme derselben. Hier kann also bspw. 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 Deglaziation³⁸ 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 54 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* mit einer Klasse *ZeitlicheRepräsentation* ist im Übrigen auch die Forderung von RAPER und LIVINGSTONE (1995), die die Zeit als Eigenschaft des Objektes sehen, und nicht das Objekt in einer übergeordneten Zeit, zu erfüllen. 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

³⁸ Der Begriff Deglaziation bezeichnet das massive Zurückschmelzen der Gletscher nach einer Kaltzeit.

GF_FeatureType verwendeten Attribute *typeName*, *definition* und *isAbstract*.³⁹ 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. 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, des Hanges in Abbildung 3.5 auf Seite 62 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.⁴⁰ 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 sie von der Ebene und der Wand abgrenzt. SAVIGEAR (1960) benennt den maximalen Winkel eines Hanges ohne Angaben von Gründen mit 40° , der einen Hang von einem Kliff⁴¹ trennt. 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 2.7 auf Seite 28).

Ausgehend von obigen Versuchen einer Definition und dem in Abbildung 2.11 auf Seite 37 dargestellten Hangsystem von CAINE (1974), das eine hierarchisch übergeordnete Sicht auf den Begriff Hang in Form eines Hangsystems 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

³⁹ Hier liegt im Vergleich zur ISO 19109 allerdings eine Änderung des Variablentyps vor. Im Gegensatz zum Standard wird das Attribut *typeName* nicht als **LocalName**, sondern als **String** realisiert (vgl. ISO/DIS 19109 2002).

⁴⁰ Zur allgemeinen Verwirrung der Definition mag auch die Isophonie des englischen Begriffes *slope* beitragen, der im Englischen sowohl Hang als auch Hangneigung bedeuten kann.

⁴¹ Zur Verwendung des Begriffes Kliff siehe Kapitel 3.3.4.

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 Geobjekten. So ist die orographisch rechte Talflanke⁴² 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_Complexes* (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).

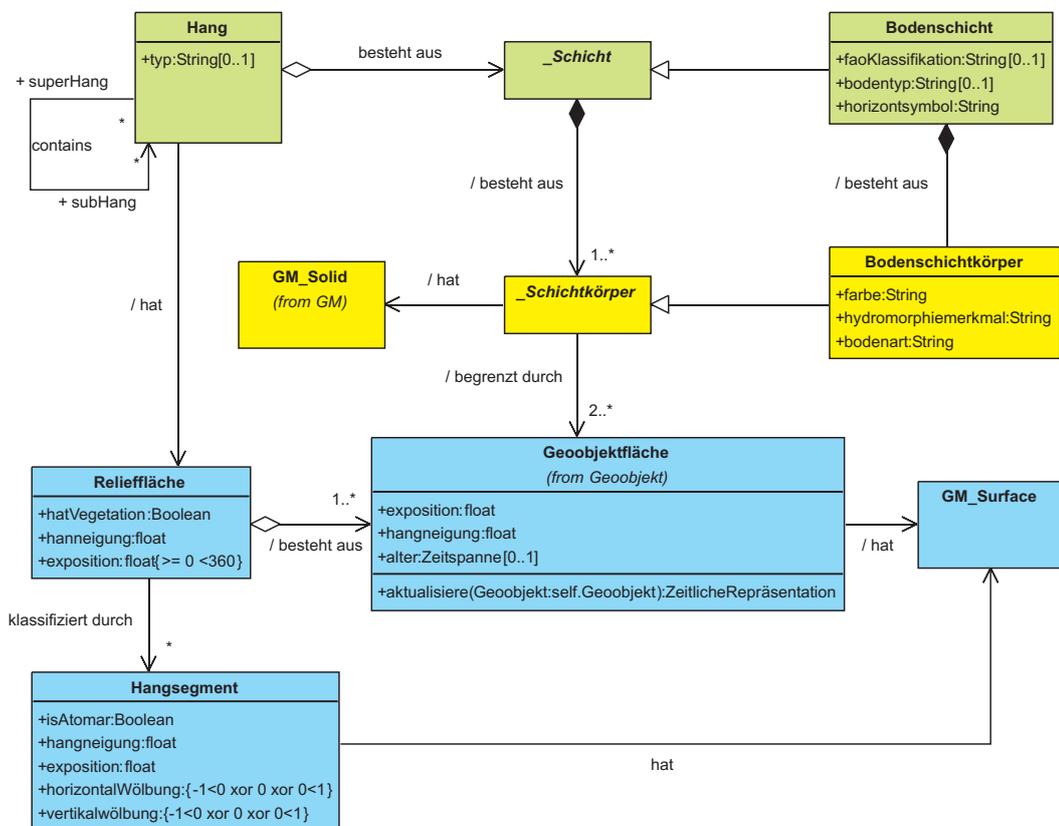


Abbildung 3.6: Repräsentation der Klasse *Hang*. Deutlich sichtbar dargestellt sind die verschiedenen Ebenen der Geometrien, die der obersten des *GM_Complexes* (grün) über die des *GM_Solids* (gelb) bis zu der des *GM_Surface* (blau) herunter reicht (siehe Text für weitere Erläuterungen).

Aus der Betrachtung des Georeliefs im Sinne eines geomorphosphärischen Komplexes nach KUGLER (1974) kann gefolgert werden, dass ein Hang ein dreidimensionaler Körper ist, der

⁴² Die 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.

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 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 auf der vorherigen Seite 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_Complexes` ist, der die Geometrie des `Hanges` repräsentiert, der aus diesen Schichten besteht. Dieser Sachverhalt ist durch die Assoziation eines `GM_Complexes` mit einem weiterem `GM_Complex` in der ISO 19107 implizit gefordert. Er stellt aber keine Methode zur Überprüfung 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 booleschen 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 Anwendung einer solchen Methode ein Ausdruck der Object Constraint Language (OCL)⁴³ (vgl. Kapitel 2.1.3) angewendet werden. Dabei müsste der boolesche Operator der Methode `contains(GM_Complex):Boolean` der Klasse `GM_Complex` den Wert `TRUE` 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

⁴³ Ein OCL-Ausdruck kann direkt im graphischen UML-Diagramm oder als externer Textfile notiert werden.

```
this.repräsentiertdurch.repräsentiertdurch.contains(  
    this.bestehetaus.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.⁴⁴

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 insbesondere bei komplexeren 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 auf Seite 62 ist dabei analog zu der des `Hanges`.

Eine `_Schicht` selbst besteht aus einem oder mehreren Objekten der Klasse `_Schichtkörper`, die ebenfalls abstrakt ist und durch ihre Assoziation von der Klasse `GM_Solid` die eigentliche 3D-Geometrie zur Verfügung gestellt bekommt (vgl. Abbildung 3.6 auf Seite 65). Auch hier muss in der Implementierung des Modells gewährleistet sein, dass die `_Schichtkörper` Teil des `GM_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 67 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.

In der geomorphologischen Sichtweise ist es klar, dass die `_Schichtkörper` 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 einzel-

⁴⁴ Umgangssprachlich meint der OCL-Ausdruck: „Hang, wende deine vom `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“.

ne, sich nicht berührende Volumina führen, deren Zugehörigkeit zu der ehemals akkumulierten Schicht dabei unangetastet bleibt. Die räumliche Trennung von Geometrie 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.

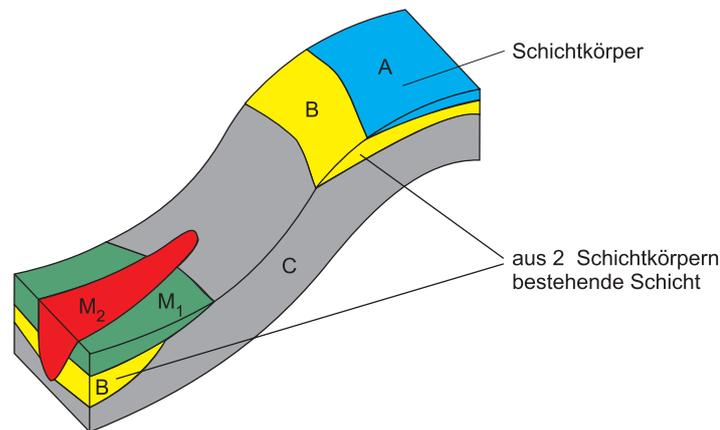


Abbildung 3.7: Blockdiagramm eines Hanges, der sich aus vier Objekten der Klasse `_Schicht` zusammensetzt. Eine genetisch homogene Schicht kann aus mehreren Objekten der Klasse `_Schichtkörper` bestehen, wie dies bei Schicht B der Fall ist. Die Abbildung zeigt einen typischen, vom Prozess der Bodenerosion veränderten Hang in einem Lössgebiet (vgl. BORK 1988; LÖWNER et al. 2005B). Dabei waren Schicht A und B ehemals flächendeckend vorhanden, wurden aber durch hangaquatische Prozesse zerschnitten. Die Schichten M_1 und M_2 sind aus dem Material der Schichten A, B und C aufgebaut.

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.⁴⁵ 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.⁴⁶ Die Geometrie, aus denen die `Bodenschicht` aufgebaut ist, sind Objekte der Klasse `GM_Solid`, die mit den entsprechenden `BodenSchichtkörpern` assoziiert sind, ist aber in dieser Modellierung keine zeitlich abhängige Klasse. `BodenSchichtkörper` sind nicht von `_Geoobjekt` abgeleitet und haben damit keine Assoziation zu einer Instanz der `ZeitlichenRepräsentation`. Abbildung 3.8 auf der nächsten Seite macht die daraus entstehenden Probleme in Form eines Instanz-

⁴⁵ 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).

⁴⁶ Die 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.

modells⁴⁷ deutlich. Das Objekt Ranker der Klasse Bodenschicht besteht zum Zeitpunkt

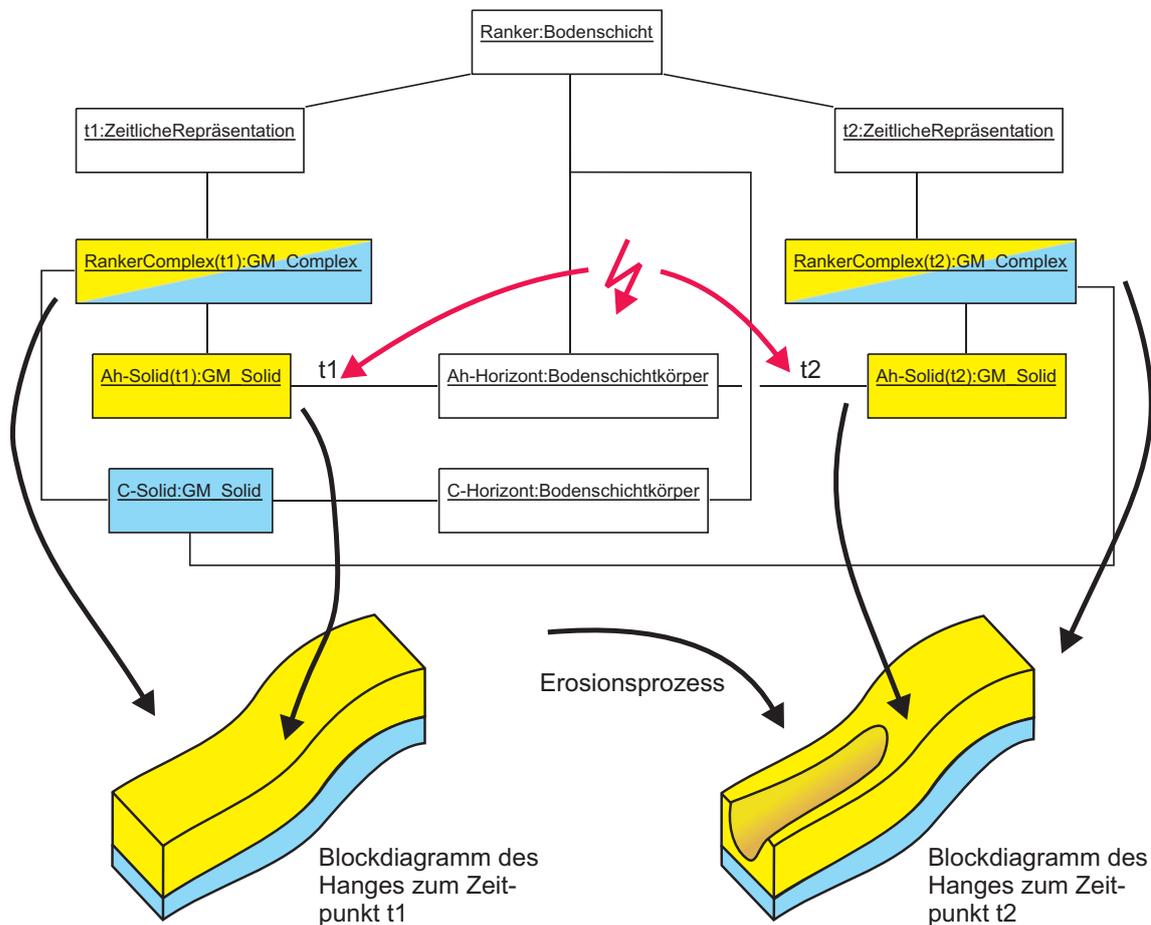


Abbildung 3.8: Abgeleitete Assoziationen zur Wahrung der Integrität der ZeitlichenRepräsentation von Geobjekten. Das Objekt Ah-Horizont kann nicht direkt mit seinen Geometrieobjekten assoziiert werden (siehe Text für weitere Erläuterungen).

t1, einer Instanz der Klasse ZeitlicheRepräsentation, auf der semantischen Ebene aus den Objekten der Klasse 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 Ah-Solid durch einen Erosionsprozess verändert, wird ein neues Objekt der ZeitlichenRepräsentation t2 angelegt, das mit dem Objekt 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 über-

⁴⁷ Ein 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).

schrieben 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, weil keine Historie der alten Geometrie von `Ah-Horizont` mehr vorhanden wäre. 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 die Datenbank gestellt würde. Das Objekt der Klasse `BodenSchichtkörper` hat ja keine Information über den zeitlichen Zusammenhang seiner nunmehr mehreren Geometrien.

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 `ZeitlichenRepräsentation` eines `_Geoobjektes` 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 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 Attribute `faoKlassifikation`, `bodentyp` und `horizontsymbol`, die auf die Genese des Bodenkörpers verweisen (vgl. SEMMEL 1993B).⁴⁸ Der Umstand, dass ein Bodentyp aus mehreren Horizonten besteht, stellt für die Modellierung kein Problem dar. Die `_Schicht` als Vererbung der Klasse `_Geoobjekt` kann durch die geometrische Repräsentation als `GM_Complex` wiederum Objekte derselben Klasse enthalten. Die Attribute `faoKlassifikation` und `bodentyp` dürfen allerdings 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.⁴⁹

```
context _Schicht
this.repräsentiertdurch.repräsentiertdurch.isMaximal():
Boolean = False implies (
  (
```

⁴⁸ Die 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. AGBODEN 1996).

⁴⁹ Dabei ist der Wert „Null“ ein Nullpointer, der besagt, dass ein entsprechender Wert nicht gesetzt ist. „Null“ ist dabei in keinem Falle mit der Zahl 0 gleichzusetzen.

```
(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`.

Die von `_Schichtkörper` abgeleitete Klasse `BodenSchichtkörper` enthält nun die eigentlich geomorphologisch relevanten Eigenschaften des Materials, das die Schicht aufbaut. Für das Beispiel der Klasse `BodenSchichtkörper` ist dies eine Reihe von Attributen, die sich u. a. aus `farbe`, `hydromorphiemerkmale` und `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 allerdings nicht beeinflusst. Das Modell ist an dieser Stelle im Sinne von GRUBER (1993) monoton, d. h. ohne Änderungen, 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 auch 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 augenscheinlich 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 auf Seite 68 durch Akkumulation gebildet, definiert dieser Vorgang ihr genetisches Alter, das Attribut des `_Geoobjektes` `_Schicht`. Durch einen Erosionsprozess, der den zukünftigen Platz für eine weitere 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.⁵⁰ 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.

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 **ZeitlicheRepräsentation** aktualisiert werden. Dies ist durch die Methode *aktualisiere(Geoobjekt:self.Geoobjekt):ZeitlicheRepräsentation* ausgedrückt. Hierbei wird durch die Bezeichnung *self* die **ZeitlicheRepräsentation** des **_Geoobjektes** geändert, zu der die **Geoobjektfläche** gehört. Es handelt sich hier also um die Formulierung eines 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.

Neben der Eigenschaft, aus Objekten der Klasse **_Schicht** aufgebaut zu sein, hat die Klasse **Hang** 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* auf. 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 an Felswänden kann Vegetation auf das Vorhandensein 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 ebenfalls nicht von **_Geoobjekt** abgeleitet sondern weist lediglich eine Assoziation zur Klasse **GM_Surface** auf. Neben den Attributen *hangneigung* und *exposition* ist das **Hangsegment** durch zwei Attribute für die Wölbung (*engl.: curvatur*) charakterisiert. Dabei meint *horizontalwölbung* die Veränderung der Exposition, die der Isohypse gleich kommt, die *vertikalwölbung* die der

⁵⁰ 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. AITKEN 1998; LANG 1996).

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.⁵¹ Das **Hangsegment** repräsentiert damit die in der Geomorphometrie wichtige Einheit des Formenelementes, die durch eine einheitliche Wölbung in vertikaler und horizontaler Richtung gekennzeichnet ist (DIKAU 1988). Ihm kommt damit als Analyseergebnis der Oberflächeneigenschaft eines **_Geoobjektes** eine vergleichbare Funktion wie die der Signatur in der Kartographie nahe. Die Assoziation der **Relieffläche** zum **Hangsegment** infolgedessen im Gegensatz zu den auf Seite 68f. diskutierten Assoziationen ist keine abgeleitete. Einem **Hang** sind der Anzahl seiner **ZeitlichenRepräsentationen** entsprechend viele **Reliefflächen** zugeordnet. Das 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 auf Seite 57 gleich.

Die weitere Begrenzung der Klasse **Hang** nach oben, unten oder zur Seite erfolgt durch mindestens zwei Objekte der Klasse **_Geoobjekt** (vgl. DEHN et al. 2001). Diese Assoziation lässt natürlich auch Spezialisierungen der Oberklasse, also etwa eine Klasse **Kante** (vgl. Abbildung 3.12 auf Seite 85) oder aber einen weiteren **Hang** oder seiner Unterklassen zu (vgl. Kapitel 3.3.5). Die dem **Hang** assoziierte Klasse **Relieffläche** zählt nicht zu den mindestens zwei geforderten Begrenzungen, sie sind keine Spezialisierung von **_Geoobjekt**. 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 **Geoobjekte**.

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 2.11 auf Seite 37). 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 Gélisolifluktion von WILLIAMS und SMITH (1991) und AHNERT (1995) 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

⁵¹ Dass die Bestimmung der Wölbung unabhängig vom verwendeten Algorithmus hinreichend stabil ist, zeigen SCHMIDT et al. (2003).

hinreichendes Kriterium für die Klassifizierung als *Hang* und eignet sich folglich auch nicht für die semantische Definition. Die tatsächliche Hangneigung eines *Hanges* wird, wie oben beschrieben, als Attribut der *Geoobjektfläche*, aus denen sich die *Relieffläche* 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, 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 Schutzzufuhr und -abtransport in etwa ausgeglichen sind. 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 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 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 die 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 wesentlich an der inneren 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 Assoziationen, 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 zunächst 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 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 (2003) definiert **Steilwand** als freie Felsflächen im Hochgebirge, bei denen die Hangneigung so groß ist, dass sich lösendes Verwitterungsmaterial nicht in situ verbleiben kann. Es stürzt herab und bildet am Fuß der Steilwand eine Schutthalde. Dabei variierte 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 Geoobjektes 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 mit einbezogen. SELBY et al. (1988) verwendet den Begriff Felshang (*engl.: rock slope*), den er im Wesentlichen frei von Boden- und Schuttbedeckung und als einen nahezu einheitlichen Körper von exponierten Fels sieht. LUCKMAN (1976) betont die Interaktion der besonderen Form der Wand mit dem Prozess. So steuerten geologische Kontrollgrößen den Charakter des Schuttes 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.⁵²

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 (2003)	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°

Tabelle 3.2: Beschreibung von Wänden in der gesichteten Literatur.

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

⁵² LUCKMAN (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.

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 ein Begriff der hier nicht näher betrachteten Küstengeomorphologie dar.

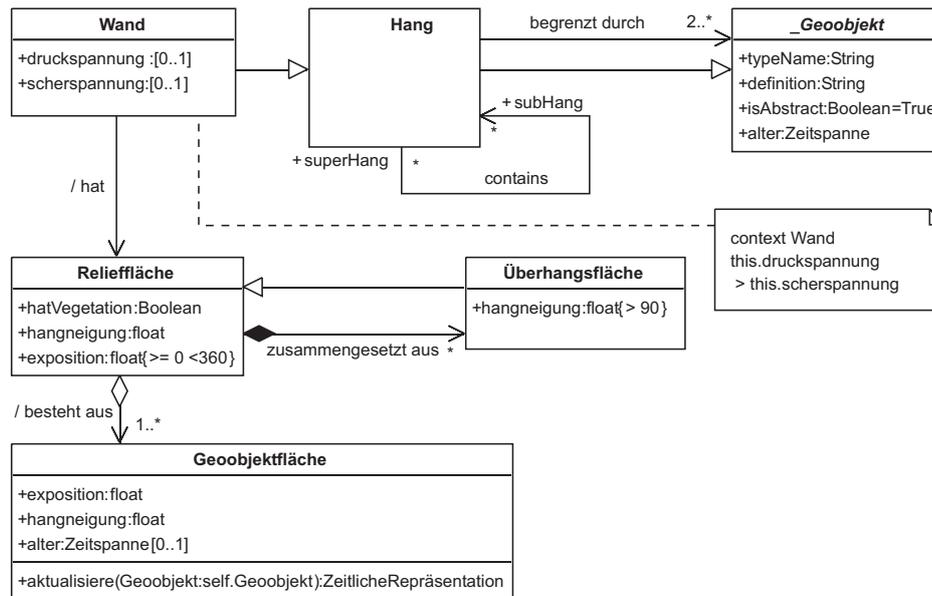


Abbildung 3.9: Repräsentation der Klasse Wand (siehe Text für weitere Erläuterungen).

Der expliziten Lesart von LESER et al. (1992B) folgend, dass Wände 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 angegeben. 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 2.9 auf Seite 33 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 (2003) 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 weggeführt. Hierbei ist es völlig nebensächlich, ob das verwitterte Material durch einen primären Fall oder aber 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 2.7 auf Seite 28 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 auf der vorherigen Seite formuliert.

Für eine **Wand** besteht, wie für einen **Hang** auch eine Assoziation zur Klasse **Relieffläche**, die sich aus Objekten der Klasse **Geoobjektfläche** 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 **Geoobjektfläche** 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 **Geoobjektfläche** besteht.⁵³ 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**.

⁵³ Die 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.

3.3.5 Die Klasse Felswand

Die in Abbildung 3.10 auf der nächsten Seite 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 Geröll⁵⁴ 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 **GeologischeSchichtkörper** 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. 68 f. diskutiert wurde. Die Attribute der Klasse **GeologischeSchicht** sind *gesteinsart*, *lithologie*, *äon*, *ära*, *periode*, *epoche* und *alter* weiter charakterisiert werden. Die Werte der *gesteinsart* werden durch eine `<<codelist>>`⁵⁵ 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 Attribute *äon*, *ära*, *periode* und *epoche* geben das Entstehungsalter des Ausgangsgesteins der **GeologischenSchicht** 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 1995).⁵⁶ 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 **GeologischerSchichtkörper** von mindestens zwei Instanzen der Klasse **Geoobjektfläche** begrenzt⁵⁷. Die Klasse **Reliefffläche**, 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*

⁵⁴ Der Begriff Brekzie bezeichnet ein aus kantigen Bruchstücken zusammengesetztes Gestein, wohingegen Geröll durch fluviale Prozesse abgelagert wird.

⁵⁵ Eine `<<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.

⁵⁶ Wir 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).

⁵⁷ Das Alter einer an der Oberfläche ausbeißenden (s. Fußnote 59 auf S. 81) Felswand kann anders als eine unterirdische Geoobjektfläche (vgl. Fußnote 50 auf S. 72) 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).

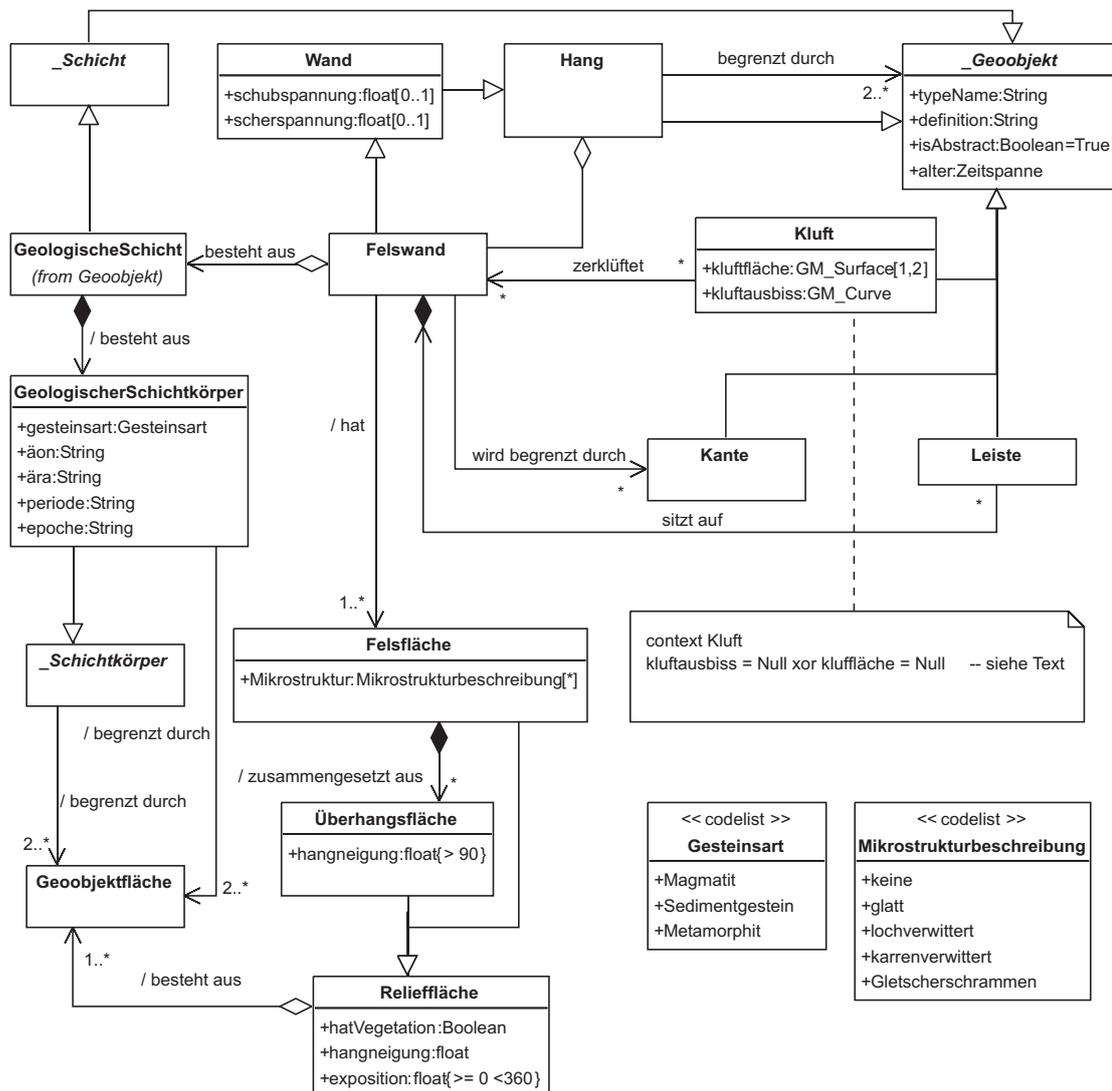


Abbildung 3.10: Repräsentation der Klasse **Felswand** und der mit ihr assoziierten Klassen. Die im vorangegangenen Kapitel und Abbildungen schon diskutierten Attribute, Methoden und Assoziationen sind aus Gründen der Übersicht teilweise nicht dargestellt.

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 2.6 auf Seite 27), wie die Karrenverwitterung im Karst⁵⁸ und Lochverwitterung, die bei Sandsteinen zu beobachten ist

⁵⁸ Unter 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

(vgl. AHNERT 1995). Die **Felsfläche** charakterisiert dabei die besondere Stelle des Reliefs, an der das Anstehende als Primärspeicher 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).

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 auf der vorherigen Seite 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 hier in Kapitel 4.2 aufgezeigten Methoden möglich. Vielmehr sind Klüfte durch ein linienhaftes Ausbeißer⁵⁹ an einer **Felsfläche** charakterisiert. Die Repräsentation kann also unter

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.

⁵⁹ 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.

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. Dies erfolgt in Form eines OCL-Ausdrucks in Abbildung 3.10 auf Seite 80, der ein gleichzeitiges Setzen beider Attribute durch ein „exklusives Oder“ verhindert.⁶⁰ Diese Repräsentation der Käfte durch ein 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 auf ihnen akkumulieren kann (vgl. Abbildung 2.12 auf Seite 39). Die Leisten stellen in der Wand also Lokalisationen für Sedimentspeicher innerhalb der alpinen Sedimentkaskade dar (vgl. Abbildung 2.13 auf Seite 40). 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 3D-Objekten 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.

⁶⁰ Hierbei ist zu bemerken, dass der Sprachumfang von OCL kein *exklusives Oder* ($\underline{\vee}$) umfasst. Dies lässt sich aber leicht aus der Kombination von *Negation*, *Und* und *Oder* konstruieren. Dabei gilt $a \underline{\vee} b = (a \vee b) \wedge \neg(a \vee b)$ (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.

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 2.6 auf Seite 27 dargestellten Hängen keine räumliche Skala zugeordnet. Eine Klasse **Hang** kann über die Assoziation *contains* (vgl. Abbildung 3.6 auf Seite 65) 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 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.

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. 2002). 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

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.

dies also eine signifikante Änderung der Hangneigung auf 5.08 m der Hangfalllinie. Eine **Kante** ist also 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 auf Seite 80 mit Hilfe eines OCL-Ausdruckes gelöst (vgl. Fußnote 60 auf S. 82).

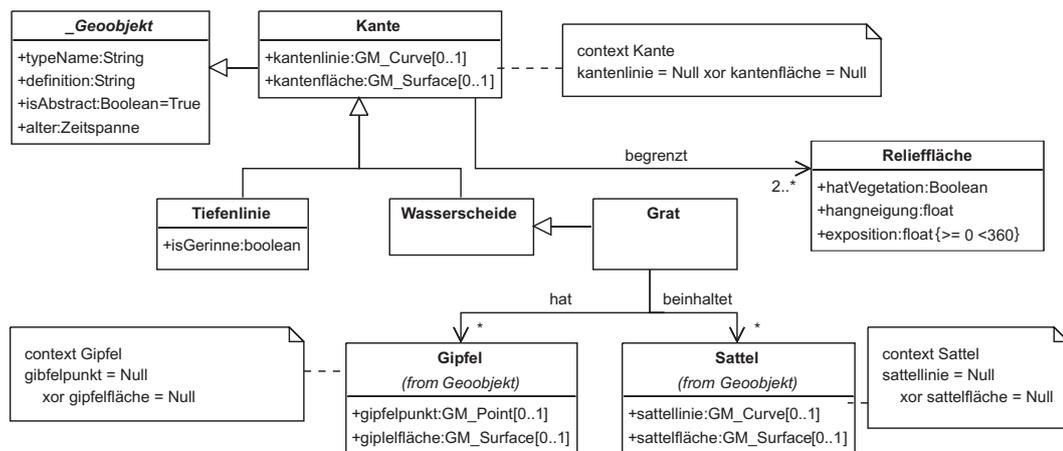


Abbildung 3.12: Modellierung der Klasse **Kante** und ihre Spezialisierungen mit alternativer Repräsentation der Geometrie (siehe Text für weitere Erläuterungen).

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 die 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 **Reliefflächen** 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*.⁶² 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.⁶³ 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 punkthafes oder linienhaftes Objekt *Gipfelpunkt* oder *Gipfelfläche* 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 35 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 bewegt⁶⁴ 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 Hang im übergeordneten 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 formenverändernde Prozesse führen in dem in Kapitel 3.3.1 entwickelten formal semantischen Modell also zwangsläufig zu einer Veränderung der Klasse *ZeitlicheRepräsentation* der beteiligten Instanzen 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,

⁶² Die 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.

⁶³ Natürlich 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.

⁶⁴ Die 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, BOTSCHKEK und SKOWRONEK 1999; BOTSCHKEK et al. 2001), aber auch bei der Auswaschung des Feinmaterials aus Schutthalden beteiligt (COOKE und REEVES 1972).

zumeist verringert. Die Verwitterung kann aber auch zu einer veränderten Anfälligkeit eines Geobjektes 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 klein körniger Gesteinsbruchstücke an seiner Oberfläche neigt. Auch die signifikante Veränderung durch interne Prozesse führt also zu einer neuen Instanz der Klasse *ZeitlicheRepräsentation* für das entsprechende *_Geobjekt*.

Geoprosesse, die formenverändernd wirken, werden immer durch eine von außen einwirkende Kraft ausgelöst und angetrieben. Bei hangaquatischen Prozessen ist es die Schleppkraft 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 modifiziert durch die Eigenschaften der Infiltrationsrate des vom Niederschlag betroffenen Substrates und der Hangneigung eines oder mehrerer *Geobjekte* bzw. deren *Reliefflächen* modifiziert wird.⁶⁵ Geomorphologisch wirksam wird der Oberflächenabfluss allerdings nur, wenn seine Schleppkraft ausreicht, um Partikel des Geobjektes tatsächlich zu transportieren. Dies wiederum ist abhängig von der Korngrößenzusammensetzung des Geobjektes, z. B. eines Hanges und der Kohäsion der ihn aufbauenden Partikel. Fließendes Wasser allein ist also noch *kein* Geoprosesse, sondern wird es erst dann, wenn die vom Geobjekt abhängenden inneren Faktoren eine geomorphologische Arbeit zulassen. Ähnlich verhält es sich auch mit der Schwerebeschleunigung der Erdanziehungskraft. Sie wirkt ständig auf ein Geobjekt, 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 Geoprosesse ist also ein Prozess, der das Geobjekt in seinen inneren Zuständen oder seiner äußeren Form verändert. Die auslösenden Kräfte sind klimatischen, gravitativen oder chemischen Ursprungs.⁶⁶ und werden in ihrer Wirkungsweise vom Geobjekt 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 *_Geobjekt* ein interner oder formenverändernder Prozess ist, hängt also vom betrachteten Objekt ab und kann nicht regelhaft vorgegeben werden.

⁶⁵ Obwohl 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).

⁶⁶ Es 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.

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.

3.4.1 Die Klasse `_Geoprozess`

Die in Abbildung 3.13 auf der nächsten Seite 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 80 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. Dies ist etwa bei der Schleppkraft des Wassers der Fall, die abhängig von einem Niederschlagsereignis und der darauf folgenden Generierung von Oberflächenabfluss 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 2.7 auf Seite 28 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`

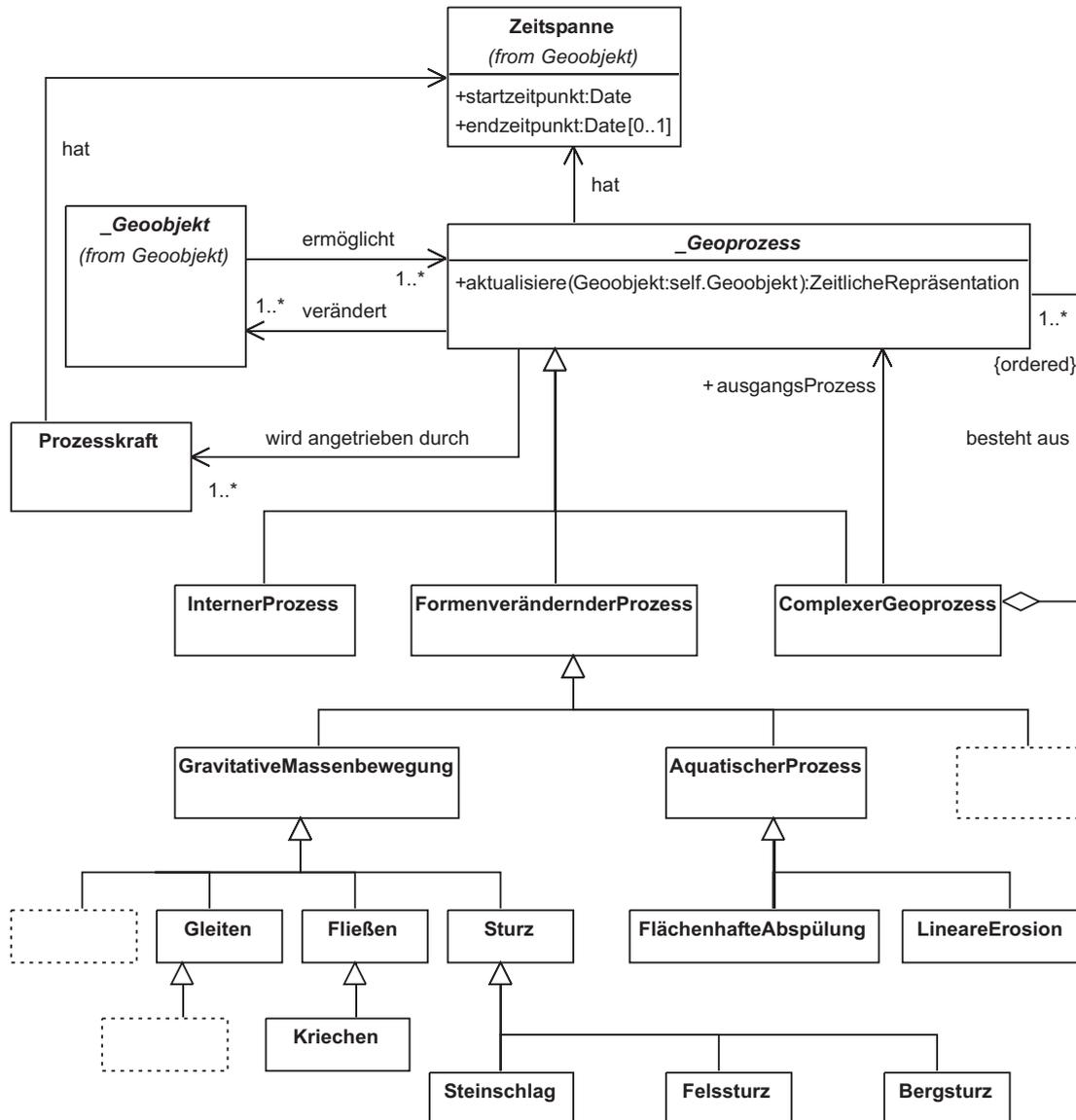


Abbildung 3.13: Repräsentation der Klasse `_Geoprozess` und der von ihr abgeleiteten und mit ihr assoziierten Klassen (siehe Text für weitere Erläuterungen).

ausreicht, um ein `_Geobjekt` in seiner äußeren Form zu verändern, hängt allein von ihrem Verhältnis zu den haltenden Kräften des `_Geobjektes` selbst und damit von seinen internen Schwellenwerten bzgl. äußerer Krafteinwirkung ab.

Die in Abbildung 3.13 wichtigsten Assoziationen bestehen zwischen dem `_Geoprozess` und dem `_Geobjekt`. Ein `_Geoprozess` verändert ein oder mehrere Objekte der Klasse `_Geobjekt`. Diese Veränderung kann in Abhängigkeit der Art, also der Spezialisierung der abstrakten Klasse `_Geoprozess` unterschiedlich ausfallen. Zum einen kann der interne Zu-

stand 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 auf Seite 80) 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 auf der vorherigen Seite 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 **ComplexerGeoprozess**

_Geoprozesse laufen i. d. R. nicht isoliert sondern häufig mit anderen **_Geoprozessen** 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 auf der vorherigen Seite modellierte Klasse **ComplexerGeoprozess** 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 **ComplexerGeoprozess** ist also die Modellierung einer Prozesskette und hat, wie der **Geoprozess** auch, eine Assoziation zu einer **Zeitspanne**. Dabei müssen die im **ComplexenGeoprozess** aggregierten **_Geoprozesse** nicht zwingend gleichzeitig ablaufen, sie tun es sogar in den seltensten Fällen. Jeder **_Geoprozess** hat auch in der Klasse **ComplexerGeoprozess** seine eigene Assoziation zu einer **Zeitspanne**. Die **Zeitspanne** der Klasse **ComplexerGeoprozess** 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 2.11 auf Seite 37 dargestellte Hangsystem ließe sich also neben der Erweiterung durch eine verbesserte geometrische Repräsentation auch durch die vorgestellte Modellierung 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 `ComplexerGeoprozess` hat deshalb eine Assoziation zu einem `_Geoprozess` bzw. einer Spezialisierung derselben, die die Rolle des *ausgangsProzesses* einnimmt. Dies ist in der durch die Klasse `ComplexerGeoprozess` repräsentierten Prozesskette verständlicher Weise der, der in der Zeit vor den anderen aggregierten `_Geoprozessen` steht.

3.4.3 Spezialisierungen der Klasse `_Geoprozess`

Die in Abbildung 3.13 auf Seite 89 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, da sie für den in Kapitel 4.2 vorgestellten Kartierungsansatz ohne Relevanz sind.

Im Wesentlichen lässt sich ein `_Geoprozess` in die Klassen `GravitativeMassenbewegung` und `AquatischerProzess` spezialisieren.⁶⁷ Der erstere ist für die hier im Fokus stehenden Wände und steilen Hangbereiche 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 auf Seite 31 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 wesentlichen 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 `_Geoobjekten` 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 Klassen derselben oder anderer Klassen spielen.

Dies birgt für die Beschreibung in Analyse der funktionalen Beziehung 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

⁶⁷ Wie auch die Modellierung des `_Geoobjektes`, 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.

oder prozessuale Aspekte von Geoobjekten und Geoprozessen weiter ausmodelliert werden. Insbesondere die Beschreibung der inneren Widerstände gegen Veränderungen von Geoobjekten gegenüber formenverändernden Prozessen bergen hier noch großes Potential. Die Beziehungen von `_Geoobjekt` 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 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 2.11 von CAINE (1974) und auch gegenüber den dort diskutierten Konzeptmodellen in Abbildung 2.10 und 2.13.

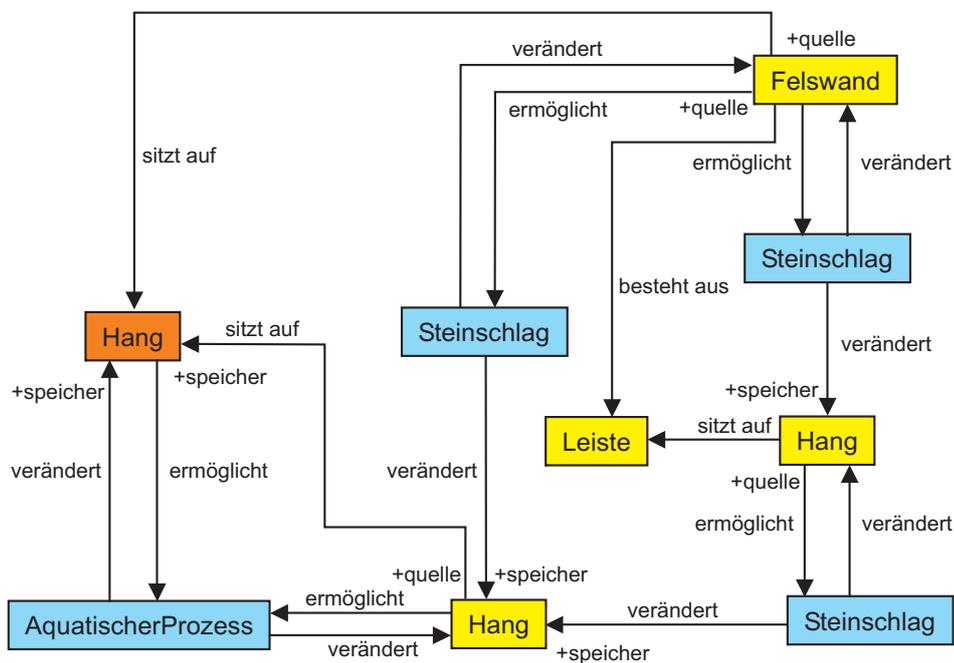


Abbildung 3.14: Vorschlag einer Modellierung der Sedimentkaskade, wie sie etwa in Abbildung 2.13 auf Seite 40 als Konzeptmodell vorliegt. Hier ist die Repräsentation als Klassenmodell der in Kapitel 3.3 diskutierten Geoobjekte (gelb dargestellt) und der in Kapitel 3.4 (blau dargestellt) beschriebenen Geoprozesse verwirklicht.

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

Der in der Skalenhierarchie übergeordnete `Hang` (orange dargestellt) 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 übergeordneten `Hang` auf. Eine `Felswand` besteht nun neben anderen `_Geoobjekten` auch aus Objekten der Klasse `Leiste`. Das Sediment,

das auf der Leiste liegt, sitzt ihr in Form einer Klasse *Hang* auf.⁶⁸ Über den *_Geoprozess Steinschlag* 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 den unterhalb gelegenen *Hang* direkt beliefern. Auch hier übernimmt die *Felswand* 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, tritt nun seinerseits mit dem hierarchisch übergeordneten *Hang*, etwa über die Spezialisierung des *_Geoprozesses*, dem *AquatischenProzess*, in der Rolle der *Quelle* auf.

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 gebräuchlichen Repräsentationen hat also eindeutige Vorteile. Der wesentlichste ist, dass sich so auch über die rein geometrischen Phänomene hinausgehende Konzepte, wie das des Sedimentkaskadensystems 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.

⁶⁸ Erneut soll hier darauf hingewiesen werden, dass das Konzept des Hanges in der hier vorgestellten Modellierung sich von der in der Geomorphologie herrschenden Vorstellung unterscheidet, als dass ihm, anders als in Abbildung 2.6 auf Seite 27, a priori keine Skala zugeordnet ist.

4 Umsetzung des Konzeptes zur Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen

Die Ergebnisse der Philosophie sind die Entdeckung irgendeines schlichten Unsinnns und die Beulen, die sich der Verstand beim Anrennen an die Grenze der Sprache geholt hat. Sie, die Beulen, lassen uns den Wert jener Entdeckung erkennen.

(WITTGENSTEIN 1982)

Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels ist einerseits zu zeigen, dass die in Kapitel 3 entwickelte semantische Modellierung für Objekte von Wänden und steilen Hangbereichen sich prinzipiell in ein Datenbankmanagementsystem implementieren lässt. Andererseits soll demonstriert werden, dass auch für Fachfremde die Möglichkeit besteht, die für das in Kapitel 1.2 vorgestellte Gesamtkonzept erforderlichen Daten mit photogrammetrischen Methoden und handelsüblichen Kameras zu erheben. Dabei kann das semantische Modell hier weder gänzlich implementiert, noch der Leser mit einer Flut von erhobenen Daten überhäuft werden. Primäres Ziel ist die Demonstration der Durchführbarkeit des in Abbildung 1.2 auf Seite 5 entwickelten Gesamtkonzeptes auf der Grundlage internationaler und in der Geoinformation gebräuchlicher Standards.

Folglich werden im Kapitel 4.1 Teilaspekte der Implementierung der geometrischen Repräsentation des semantischen Modells aus Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3 beleuchtet und durchgeführt. Dabei stehen die Konzepte im Fokus, die durch eine optische Erfassungsmethode auch tatsächlich zu erheben sind. Wesentliche Änderungen gegenüber der objektorientierten Modellierung ergeben sich bei der Überführung in ein relationales Datenbankschema vor allem im Bereich der Vererbung. Auf eine Implementierung des in Kapitel 3.4 entwickelten Klassenmodells für Geoprozesse wurde hier verzichtet. Sie lässt sich leicht analog zu der gezeigten Implementierung durchführen.

In Kapitel 4.2 wird das Verfahren zur photogrammetrischen Aufnahme von Wänden und steilen Hangbereichen mittels terrestrischer Photos in ihren wesentlichen Arbeitsschritten diskutiert. Neben dem Ablauf der Erhebung im Gelände, wird hier auch die Kalibrierung der verwendeten Digitalkamera Canon EOS 10D beschrieben. Weiter wird die Schätzung der Rotationsmatrix mittels vermessener Passpunkte für die in Kapitel 2.4.2 beschriebene Bündelblockausgleichung erläutert.

In Kapitel 4.4 werden schließlich Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software „GeoSamt“ vorgestellt. Diese Java-Anwendung erlaubt die Orientierung der digitalen Bilder auf einer graphischen Oberfläche unter Verwendung der vom IPB bereit-

gestellten Bündelblockausgleichung. Es kann demonstriert werden, dass es auch für photogrammetrisch unerfahrene Anwender möglich ist, die aus der Luft schlecht zu erhebenden Bereiche von Wänden zum Zwecke der geomorphologischen Analyse selbst zu kartieren.

4.1 Abbildung des semantischen Modells auf eine 3D-Geodatenbank

Das in Kapitel 3 erstellte semantische Modell elementarer Konzepte der Geomorphologie soll insbesondere zur Erfassung und Repräsentation von Wänden und steilen Hangbereichen dienen. Dafür muss es in eine Datenbank implementiert werden können, damit man erhobenen Daten nicht verlustig wird und es einen Austausch im Sinne der ISO 19107 für räumliche Objekte geben kann (vgl. Kapitel 3.1). Zur Erfassung von Wänden und steilen Hangbereichen im Sinne des in Kapitel 1.2 vorgestellten Gesamtkonzeptes müssen allerdings nicht alle modellierten Klassenkonzepte umgesetzt werden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass nötige Informationen über die dreidimensionale Ausdehnung der modellierten Geoobjekte durch ein optisches Messverfahren nicht zu erhalten sind. Es können nur Oberflächenphänomene erfasst werden. Der zweite Grund für eine Auswahl aus der Menge der modellierten Konzepte ist der Begrenztheit dieser Arbeit geschuldet, die eine exemplarische Auswahl der interessanten Aspekte für die Umsetzung der Implementierung des semantischen Modells fordert. Die modellierten Objekte mit den dazugehörigen Klassen der geometrischen Repräsentation, die in das Datenbankschema für das Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial (vgl. Kapitel 2.3) implementiert wurden, sind im Folgenden aufgelistet:

- Felswand
repräsentiert durch eine Felsfläche
- GeologischerSchichtkörper
- Geoobjekt
- Geoobjektfläche
- Grat
- Kante
repräsentiert durch eine Kantenlinie
- Kluft
repräsentiert durch einen Kluftausbiss
- Leiste
repräsentiert durch einen Leistenausbiss
- Relieffläche
- Überhangsfläche
- Wand

- **Wasserscheide**
- **ZeitlicheRepräsentation**

Zusätzlich wurde eine Tabelle **Schuttschichtkörper** implementiert, um Hänge, die aus Felsschutt bestehen, entsprechend semantisch einzuordnen.⁶⁹ Diese Klasse ist in der semantischen Modellierung in Kapitel 3.3.2 nicht diskutiert worden. Dass eine über das semantische Modell hinausgehende Klasse dennoch implementiert werden kann, entspricht der Forderung von GRUBER 1993 nach einer monoton erweiterbaren Ontologie, ohne die Bestehende verändern zu müssen. Anwender der Fachwissenschaften können hier also die von ihnen identifizierten Schichtkörper in das Modell einfügen. Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite zeigt das relationale Schema⁷⁰ der implementierten Geoobjekte und ihre Relation mit der Tabelle **ZeitlicheRepräsentation**.

Zur Übertragung eines objektorientierten Modells in eine relationale Datenbank⁷¹ müssen nun einige Anpassungen vorgenommen werden, die im Folgenden kurz angesprochen werden sollen. Eine Abänderung betrifft das Konzept der Vererbung. So übernehmen alle spezialisierten Klassen die Eigenschaften ihrer Oberklasse in Form von Attributen. Dies lässt sich in einem relationalen Schema auf zwei Arten verwirklichen. Zum einen kann eine Tabelle mit dem Namen der Oberklasse mit ihren Attributen angelegt werden, in der alle Unterklassen mit deren zusätzlichen Attributen vertreten sind. Wird nun ein Datensatz einer bestimmten Unterklasse gespeichert, werden nur die Attributspalten der Oberklasse und der entsprechenden Unterklasse gefüllt. Alle anderen Spalten bleiben leer. Dies hat Performanzvorteile, gilt aber als unsauberer Ansatz. Anschaulicher ist das Anlegen jeweils einer Tabelle für Ober- und Unterklasse. Neben ihren eigenen Attributen erhält die Unterklasse eine Spalte für den Fremdschlüssel zu einem Objekt ihrer Oberklasse und hat so Zugriff auf deren Attribute. Dieser Weg wurde bei der Erstellung des Datenbankschemas gewählt.

Eine weitere Änderung ergibt sich dadurch, dass man in Oracle Spatial keine `<<codelist>>` anlegen kann, wie dies etwa bei Microsofts Access möglich ist (vgl. ORTMANN 1999). Dieser Mangel kann durch das Anlegen einer Tabelle umgangen werden, in der neben dem Primärschlüssel ein Attribut vom Typ `Character`, also einer Zeichenkette, angelegt ist, der einem Wert aus der `<<codelist>>` entspricht. Das Objekt, das durch einen Eintrag der `<<codelist>>` näher spezifiziert werden soll, erhält dann eine Spalte mit einem Fremdschlüssel auf diese Tabelle. In dem in dieser Arbeit entwickelten semantischen Modell sind hiervon die Tabelle **Felswand** mit der `<<codelist>>` **Mikrostrukturbeschreibung** und die **GeologischeSchicht** mit der `<<codelist>>` **Gesteinsart** betroffen.

⁶⁹ Im semantischen Modell besteht die Klasse **Hang** zunächst aus **_Schichten**, die sich wiederum aus **_Schichtkörpern** zusammensetzen. Da es aber schwer ist, auf Grund von optischen Beobachtungen auf die Zugehörigkeit eines **_Schichtkörpers** zu einer **_Schicht** zu schließen, wurde hier nur das Konzept des **_Schichtkörpers**, bzw. seine Spezialisierung implementiert. Dies gilt insbesondere dann, wenn das beobachtete Objekt auf Grund seiner Steilheit nicht direkt zugänglich ist.

⁷⁰ Ein relationales Schema ist trotz der äußeren Ähnlichkeit nicht mit einer UML-Notation zu verwechseln.

⁷¹ Auch wenn Oracle Spatial auch selbst definierte Objekttypen verwalten kann (vgl. ORACLE COOPERATION 2003), bleibt das Schema ein relationales.

4 Umsetzung des Konzeptes zur Repräsentation von Wänden

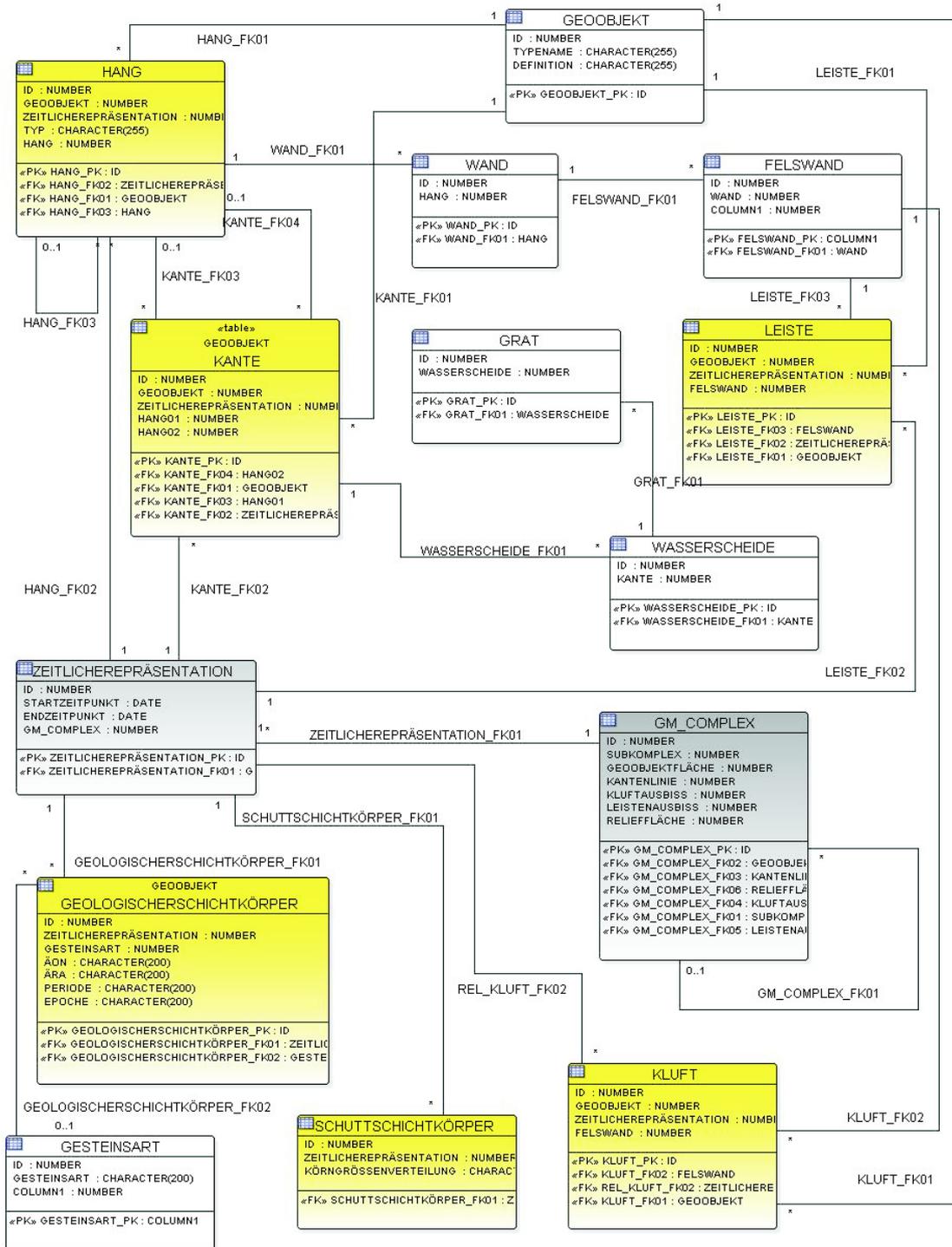


Abbildung 4.1: Relationales Datenbankschema ausgewählter Objekte der semantischen Modellierung. Die Tabellen der ZeitlichenRepräsentation und des GM_Complexes sind in Blau, diejenigen, die eine Assoziation zur ZeitlichenRepräsentation aufweisen, in Gelb dargestellt.

Auch die Aggregation der **Relieffläche** aus Objekten der Klasse **Geoobjektfläche** bedarf der kurzen Erläuterung. Eine **Relieffläche** besteht aus mehreren **Geoobjektflächen** (vgl. Abbildung 3.6 auf Seite 65).

In einem relationalem Schema wird diese Aggregation auf eine andere Weise realisiert als dies intuitiv zu erwarten wäre. In der Tabelle **Geoobjektfläche** wird über einen Fremdschlüssel der entsprechende Datensatz der **Relieffläche** abgelegt. Jede **Geoobjektfläche** „weiß“ also, welche **Relieffläche** sich aus ihr zusammensetzt. Da nicht jedes Objekt der Klasse **Geoobjektfläche** zwingend zu einer Instanz von **Relieffläche** gehören muss, etwa bei unterirdischen Flächen, ist das Setzen dieses Fremdschlüssels optional implementiert.

Bei der Implementierung des in Kapitel 3.3 entwickelten semantischen Modells in die Datenbank wird die Klasse **_Geoobjekt** und jedes von ihr spezialisierte Objekt prinzipiell mit einer Tabelle repräsentiert. Zwar ist **_Geoobjekt** in der Modellierung als abstrakte Klasse definiert, die nicht instanziiert werden kann, in einem relationalem Datenbankschema macht dies aber wenig Sinn. In der Tabelle **Geoobjekt** sind Informationen enthalten, die durch die modellierte Vererbung in jeder anderen Tabelle einer abgeleiteten Klasse erneut implementiert werden müssten.⁷² Alle in der Modellierung von **_Geoobjekt** direkt abgeleiteten Klassen erhalten eine Relation zu einer Zeile der Tabelle **Geoobjekt**. Diese Tabellen sind in Abbildung 4.1 auf der vorherigen Seite in Gelb dargestellt. Nach dem Prinzip des Fremdschlüssels (vgl. Kapitel 2.3.1) weisen alle diese Tabellen eine Spalte mit dem Namen *geoobjekt* auf, in der als Fremdschlüssel der Primärschlüssel des Datensatzes, also einer Zeile der Tabelle **Geoobjekt** abgespeichert ist. Somit wird also auf die Attribute der Oberklasse der einzelnen Geoobjekte verwiesen. Nicht direkt von **_Geoobjekt** abgeleitete Klassen erhalten einen Fremdschlüssel ihrer direkten Oberklasse. Eine Abfrage nach der Definition des Geoobjektes zu der eine Wand mit der *id* 1 gehört, muss also durch eine verschachtelte SQL-Abfrage erfolgen.

```
SELECT DEFINITION
FROM GEOOBJEKT
WHERE
(
  SELECT GEOOBJEKT
  FROM HANG
  WHERE
  (
    SELECT HANG
    FROM WAND
    WHERE ID = 1
  )
)
```

In der inneren Klammer wird zunächst die *id* des **Hanges** der **Wand** mit *id* = 1 abgefragt. Dieser Rückgabewert wird verwendet, um die *id* des **Geoobjektes** zu erhalten. Schließlich wird die Eigenschaft *definition* aus der Tabelle **Geoobjekt** abgefragt.

⁷² Hier zeigt sich nicht zum letzten Mal der Unterschied zwischen semantisch begründeter Modellierung und praktischer Implementierung.

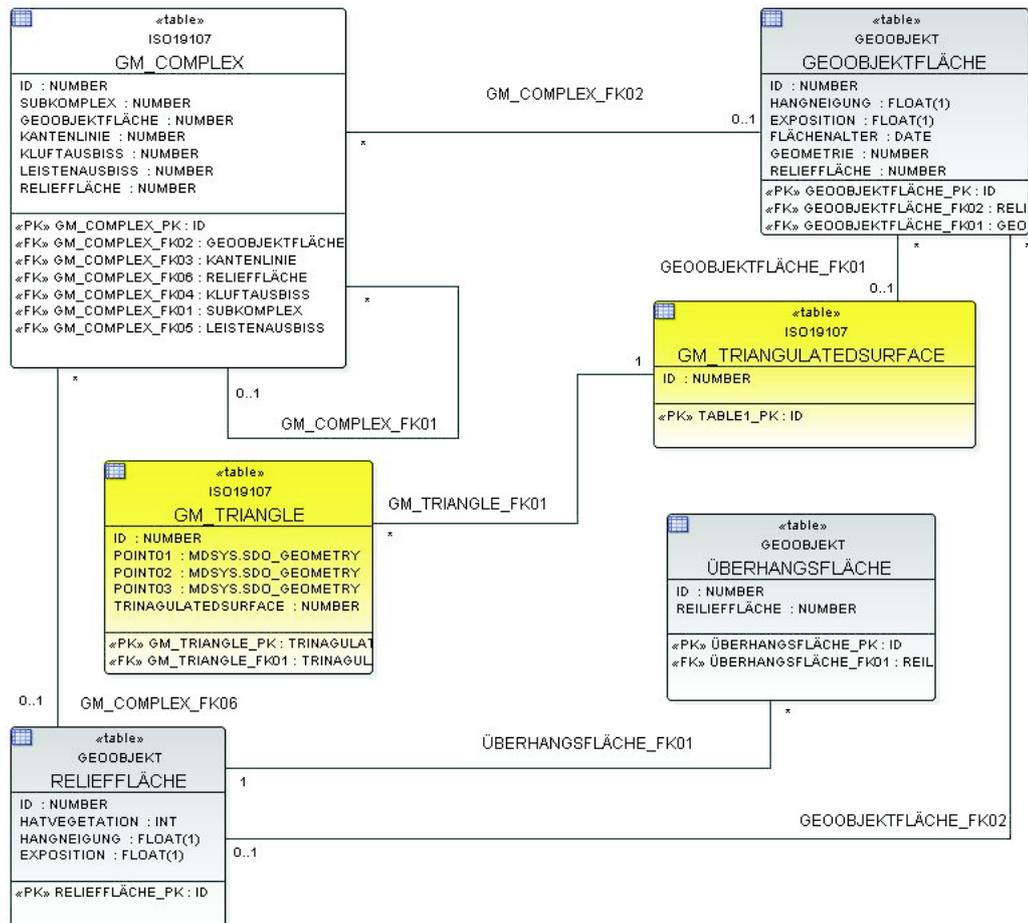


Abbildung 4.2: Implementierung der Relieffläche in das Datenbankschema.

Alle mit *Geoobjekt* assoziierten Tabellen haben eine relationale Verknüpfung mit einem Datensatz aus der Tabelle *ZeitlicheRepräsentation*. In den Zeilen der *ZeitlichenRepräsentation* ist ein Fremdschlüssel eines Datensatzes der *GM_Complex*-Tabelle enthalten. Diese Tabelle enthält nun Spalten für Fremdschlüssel auf Geometrien, die für die implementierten Objekte benötigt werden (vgl. Abbildung 4.2). Für die Repräsentation der Geometrie wurden aus dem Profil der ISO 19107 in Kapitel 3.2 die folgenden Klassen in das relationale Schema überführt (vgl. Abbildung 4.2):

- *GM_Complex*
- *GM_Curve*
- *GM_Triangle*
- *GM_TriangulatedSurface*

Dabei enthält ein Datensatz der Tabelle *GM_Complex* optional alle Geometrien in Form von Fremdschlüsselfeldern. Eine Anwendung, etwa ein Java-Programm, die die Datenbank

füllt, muss dabei die Zuordnung der Geometrien zu den entsprechenden Geoobjekten organisieren. Dies wird hier nicht auf der Ebene des Datenbankschemas festgelegt. So muss bspw. darauf geachtet werden, dass einer **Kante** auch tatsächlich eine **Kantenlinie** zugeordnete wird, und nicht etwa eine **Relieffläche**.

Eine **Relieffläche** wird aus **Geoobjektflächen** zusammengesetzt. Damit wäre die geometrische Repräsentation für die **Relieffläche** augenscheinlich ein **GM_CompositeSurface**. Die objektorientierte Sichtweise aber lehrt uns, dass diese Assoziation auch durch Spezialisierung der assoziierten Klasse befriedigt werden kann. In diesem Falle ist also ein **GM_TriangulatedSurface** als geometrische Repräsentation implementiert worden.

In den Tabellen, die auf Koordinaten basierende geometrische Repräsentationen speichern, ist dies durch die Verwendung des in Kapitel 2.3.1 erläuterten Objekttyp **MDSYS.SDO_GEOMETRY** von Oracle Spatial erfolgt. Das bedeutet aber auch, dass z. B. die Assoziation von **GM_Position** zu **GM_DirectPosition** nicht verwirklicht werden muss, weil die Koordinaten der **GM_DirectPosition** durch die **MDSYS.SDO_GEOMETRY** repräsentiert werden können. Bei der Kommunikation dieses Datenbankschemas mit anderen auf der ISO 19107 basierenden Anwendungsprogrammen muss auf einen entsprechenden Export geachtet werden. Der Vorteil dieser Art der Speicherung ist, dass sich prinzipiell die hier abgespeicherten Geometrien mit Funktionen, die in Oracle Spatial integriert sind, analysieren lassen. Eine automatische Überprüfung der topologischen Beziehungen der Geometrien ist auf Grundlage dieser Funktionen, wie in Kapitel 2.3.1 angesprochen noch nicht möglich. Hierfür muss auf Verfahren der Geoinformation verwiesen werden, wie sie etwa GRÖGER und PLÜMER (2003) für 2,8D-Oberflächen vorgestellt haben.

4.2 Aufnahme der digitalen Photos am Talschluss des Niggelingtällis

Neben der semantischen Modellierung von Wänden und steilen Hangbereichen soll ein Weg zur Kartierung dieser besonderen Bereiche des Reliefs mittels terrestrischen Digitalphotos aufgezeigt werden. Primäres Ziel dabei ist die Demonstration der Machbarkeit einer solchen Erhebung mit einer handelsüblichen Kamera, nicht aber die massenhafte Produktion von Daten. Die Durchführung der Datenerhebung gliedert sich dabei im Wesentlichen in die unten stehenden sieben Punkte:

1. Auswahl und Kalibrierung der handelsüblichen Digitalkamera Canon EOS 10D,
2. Auswahl eines geeigneten Objektes,
3. Auswahl der Photostandorte unter Berücksichtigung einer sinnvollen Basislänge und Sichtbarkeit des Objektes,
4. Photographie des Objektes,
5. Identifikation von markanten Objektpunkten auf Photo und Objekt,
6. Vermessung der Photo- und Tachymeterstandorte mittels GPS und schließlich
7. die tachymetrische Vermessung der markanten Objektpunkte.

Auswahl und Kalibrierung der Kamera

Die in dieser Arbeit verwendete Canon EOS 10D ist eine digitale Kamera der oberen Mittelklasse im Werte von etwa 1700 Euro⁷³. Sie ist mit einem CMOS-Sensor⁷⁴ mit $3072 \cdot 2048$, also etwa 6,3 Megapixeln ausgestattet (vgl. CANON DEUTSCHLAND N.D.)⁷⁵. Die effektive Sensorgröße beträgt $15,1 \cdot 22,7$ mm (DIGITAL PHOTO SYSTEME N.D.) und ist damit kleiner als die Bildfläche einer analogen Kleinbildkamera mit $24 \cdot 36$ mm. Als Speichermedium verwendet die Canon EOS 10D eine Compact Flash Karte, auf die bei einer Größe von einem Gigabyte 72 Bilder des größten Bildformats im RAW-Dateiformat gespeichert werden können. Trotz erhöhtem Speicherbedarf ist dieses Dateiformat zu bevorzugen, um einer nicht leicht abzuschätzenden Beeinträchtigung durch eine JPEG-Komprimierung zu entgehen. Neben den Eigenschaften einer Spiegelreflexkamera in der für Canon-Produkte bekannten Qualität, wie etwa einem robusten Kameragehäuse aus einer Magnesiumlegierung, automatischer Belichtungsmessung, sieben Messfeldern für den Autofokus usw. bietet das Gehäuse einen Bajonettverschluss zum Wechseln von Objektiven. Es können bei Bedarf also beliebig hochwertige Objektive für eine photogrammetrische Aufnahme verwendet werden.

Das während der photogrammetrischen Aufnahmen verwendete Zoomobjektiv mit einer Brennweite von 28-50 mm wurde an einer im Spannungsfeld der Auflösung der fotografierten Objekte und der Erfassung eines möglichst großen Teilausschnittes als sinnvoll erachteten Zommfaktorens mit Gaffatape fixiert. Dieselbe Konfiguration wurde bei der direkt im Anschluss an die Feldaufnahme erfolgten Kalibrierung verwendet.

Bei der Aufnahme der Bilder im Gelände wurde ein standfestes Stativ der Firma Manfrotto verwendet, um Verwacklung zu vermeiden. Ein weiterer Vorteil in der Verwendung eines Stativs ist die ungefähre Horizontierung der Kamera durch eine Dosenlibelle. Damit kann die Drehung um die optische Achse (κ) in erster Näherung vernachlässigt werden.

Wegen der in Kapitel 2.4 beschriebenen Abweichung einer realen von einer idealen Kamera muss die verwendete Canon EOS 10D nach der Aufnahme der fotografierten Objekte kalibriert werden (vgl. Kapitel 2.4.4). Dies erfolgte für die hier verwendete digitale Kamera Canon EOS 10D am Institut für Photogrammetrie Bonn (IPB) und gliedert sich in drei Arbeitsschritte, der photographischen Aufnahme eines 3D-Testfeldes, der Anwendung der im IPB entwickelten Software TCC⁷⁶ und der Korrektur der im Gelände aufgenommenen Bilder.

⁷³ Der Kaufpreis bezieht sich auf das Jahr 2002.

⁷⁴ Die Abkürzung CMOS steht für **C**omplementary **M**etal **O**xide **S**emiconductor (*deutsch: komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter*). Im Vergleich zu einem herkömmlichen CCD-Sensor lassen sich auf einem CMOS-Sensor weitere Funktionalitäten, wie etwa Belichtungssteuerung, Kontrastkorrektur oder die Analog-Digital-Wandlung integrieren. Im Besonderen besitzen CMOS-Sensoren einen höheren Dynamikumfang und ein geringeres Rauschen, was sich in einer verringerten Anfälligkeit gegenüber Überstrahlungseffekten, dem sog. Blooming zeigt (vgl. LUHMANN 2003).

⁷⁵ Die genannte Anzahl der Pixel entspricht in jedem Fall der des größten zu wählenden Bildes im TIFF-Format. Dies muss nicht der Anzahl der Sensoren auf dem Chip entsprechen.

⁷⁶ Die Abkürzung TCC steht für **T**est field based self-**C**alibration for multi-**C**amera Systems. Für eine ausführliche Dokumentation dieses Softwarepaketes sei auf (ABRAHAM und HAU 1997) verwiesen.

Die Aufnahme des Testfeldes erfolgte mit demselben Kamerasystem, das auch für die photogrammetrischen Aufnahmen der Wand- und Hangbereiche im Untersuchungsgebiet Turtmantal in der Schweiz verwendet wurde (vgl. Kapitel 4.2). Das 3D-Testfeld selbst hat die Maße $700 \cdot 700 \cdot 700$ mm auf und ist mit 40 reflektierenden Objektpunkten, von denen vier auf einem Stempel angebracht sind, ausgestattet. Damit liegt die Anzahl der Beobachtungen pro Aufnahme weit über den drei für die äußere Orientierung benötigten. Alle weiteren Beobachtungen können zur Schätzung weiterer Parameter der inneren Orientierung herangezogen werden. In jeweils unterschiedlichen Orientierungen wurden insgesamt 24 Aufnahmen durchgeführt, um alle Bildbereiche abzudecken. Die zuverlässige Bestimmung des Bildhauptpunktes (x_H, y_H) wurde durch jeweils drei Drehungen um die optische κ in einer Position sichergestellt. Mit der so gewonnenen Anzahl von Beobachtungen sind die Parameter der inneren Orientierung hochgradig überbestimmt.

Die Aufnahmen erfolgte mit Blitzlicht, um die Belichtungszeit kurz und eine mögliche Verwackelung gering zu halten. Zur besseren Identifikation der Objektpunkte auf den Bildern wurden die Photos, ebenso wie die photogrammetrische Aufnahme der Objekte im Gelände, mit eingeschaltetem Autofokus durchgeführt. Die Variation die sich hierbei in der Kamerakonstante c ergibt, sind bei einer eingehaltenen Entfernung von jeweils mehr als zwei Metern zum Objekt irrelevant (LAEBE und FÖRSTNER 2004).

Die automatische Kalibrierung der Kamera wurde mit der am IPB entwickelten Software TCC durchgeführt (vgl. ABRAHAM und HAU 1997, ABRAHAM und FÖRSTNER 1997, ABRAHAM 2000). Die Vorteile dieses Kalibrierwerkzeuges liegen in der automatischen Erkennung und örtlichen Bestimmung der Testfeldmarkierungen, aus denen Bildkoordinaten abgeleitet werden. Für jedes Bild wird nach erfolgreicher Zuordnung eine lineare Transformation berechnet, um Näherungswerte der inneren und äußeren Orientierung abzuleiten. Die nachfolgende Bündelausgleichung mit automatischer Fehlererkennung und -eliminierung, in der alle Bilder berücksichtigt werden liefert verbesserte Werte für die äußere Orientierung der einzelnen Bilder und ein endgültiges Ergebnis für die in allen Bildern identische innere Orientierung. Des Weiteren ergeben sich Koordinaten der 3D-Punkte, die zu Beginn der Kalibrierung nur annähernd bekannt sind (vgl. LAEBE und FÖRSTNER 2004). Es handelt sich also um eine Selbstkalibrierung.

Die Korrektur der im Gelände aufgenommenen Bilder erfolgt mit der durch die Software erstellten Look-Up-Tabelle. Hierbei handelt es sich um eine Matrix, die für jedes Pixel eines Bildes eine Positionskorrektur in x- und y-Richtung enthält. Diese Korrektur beinhaltet neben der radialsymmetrischen Verzeichnung des Linsensystems auch die Verschiebung des Hauptpunktes und den Skalierungsfaktor für die x- und y-Achse.

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 4.1 auf der nächsten Seite zusammengefasst. Neben den bekannten Parametern der Kamerakonstante und des Versatzes des Hauptpunktes x_H und y_H ist mit s_{xy} ein Affinitätsfaktor (vgl. GODDING 2002) berechnet worden, der den Größenunterschied der zwischen Länge und Breite der Pixel auf dem Bildsensor ausgleicht.

Parameter	Ergebnis der Kalibrierung [Pel]	Standartabweichung [Pel]
c	3,73316103E+03	7,71256692E-01
s_{xy}	9,99627206E-01	2,33961061E-05
x_H	1,29778911E+01	3,44748259E-01
y_H	-4,47267952E+00	3,56153231E-01
A1	-7.64193835E-09	6,10972562E-11

Tabelle 4.1: Kalibrierungsergebnisse der digitalen Kamera Canon EOS 10D

Auswahl eines geeigneten Objektes und der Photostandorte

Als Objekt zur photogrammetrischen Aufnahme mit der Canon EOS 10D wurde ein steiler Hangbereich im Niggelingtälli, einem Seitental des Turtmanntales in der Schweiz gewählt (vgl. Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite). Die Auswahl dieses Objektes hat mehrere Gründe. Zum einen ist es über Wanderwege recht gut erreichbar. Der etwa zweistündige Fußmarsch steht dabei in Relation zu den Photostandorten, die nahe genug an dem aufgenommenen Objekt sind. Andere Objekte, wie etwa die Wand des Pipjitälli sind für einen alpin erfahrenen Wanderer zwar ebenfalls erreichbar, jedoch können Standorte für die photogrammetrische Aufnahme und Vermessung nicht in erforderlicher Nähe zum Objekt eingenommen werden. Zum einen besteht unterhalb einer Wand erhebliche Steinschlaggefahr, die der Autor fast am eigenen Leibe erfahren hätte. Zum anderen sind für die hier vorgestellte Methode tachymetrisch vermessene Passpunkte zur Orientierung der Photos am Objekt erforderlich. Ein sehr naher Standort an einer sehr steilen Wand führt zu einem spitzen Winkel der auftreffenden Laserstrahlen des Tachymeters und damit zu einer geringen Reflexion. An den besten Standorten im Pipjitälli konnten keine Passpunkte in der Barwang gemessen werden.

Bei der Wahl der Standorte (vgl. Abbildung 4.4 auf Seite 105) für die photogrammetrische Erfassung konkurrieren der Bedarf an einer möglichst langen Basislänge zum Erreichen einer ausreichenden Tiefengenaugkeit der photogrammetrisch erfassten 3D-Punkte mit der optischen Abschattung durch das Objekt. Wände und steile Hangbereiche in alpinen Tälern sind stark gegliedert. Bei einer nur geringen Standortverlagerung zum Zwecke der stereoskopischen Aufnahme werden Objektpunkte, die von einem Standort aus zu sehen sind, wenige Meter weiter vom Objekt selbst abgedeckt. Nach Begehung der vorgefundenen Situation konnte für die Photostandorte eine Basislänge von etwa 45 Metern als sinnvoll erachtet werden. Das Verhältnis von Basislänge zur Objektentfernung entspricht damit etwa 1:2 und kann als ausreichend angesehen werden (vgl. KONEZNY und LEHMANN 1984).

Nach Auswahl der Photostandorte wurde das Objekt am Talschluss des Niggelingtälli von drei Standorten aus fotografiert. Dabei ist darauf geachtet worden, dass sich die Bilder eines Standortes um mindestens 60% überlappen. Damit wird eine gute relative Orientierung der Bilder sichergestellt. Zusätzlich wurden auch Bilder jeweils zehn Meter links und rechts der Standorte aufgenommen.

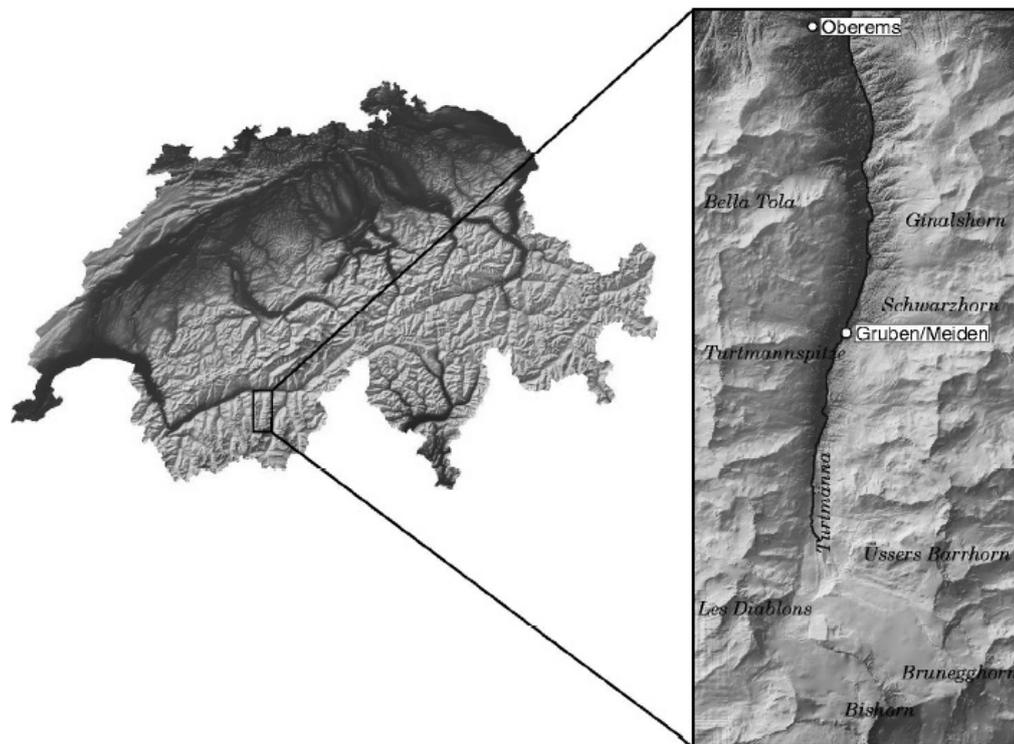


Abbildung 4.3: Übersicht über die Lage des Turtmanntales in der Schweiz (aus RASEMANN 2003).

Tachymetrische Vermessung der markanten Objektpunkte

Zur Berechnung der äußeren Orientierung (vgl. Kapitel 2.4) werden Passpunkte benötigt, die im 3D-Objektraum und im 2D-Raum der Bildebene bekannt sind. Die drei Photostandorte wurden deshalb unter Anwendung des Global Positioning System (GPS) differenziell vermessen, um von dort eine tachymetrische Messung am Objekt durchzuführen.⁷⁷ Zur Anwendung kamen zwei Empfänger des Typs Ashtech Z-Surveyor. Der Ashtech Z-Surveyor ist ein 12-Kanal-Empfänger, der sowohl den C/A-Code als auch den P-Code und die Phasen L1- und L2-Trägerwellen empfangen und auswerten kann (vgl. GEBIG GIS o.D.). Die Messungen wurden mit der Software Ashtech Office suite 2.0 ausgewertet. Ein Referenzpunkt zur differenziellen GPS-Vermessung lag im Punkt 814 der „Grundbuchvermessung Turtmanntal“ auf dem Minugrat zur Verfügung.

Zur Skizzierung der Referenzpunkte wurden die Photos ausgedruckt und markante Punkte am Objekt vermessen. Die tachymetrische Vermessung wurde mit dem reflektorlosen Tachymeter Zeiss Elta RL des Geodätischen Institutes der Universität Bonn durchgeführt. Es hat laut Herstellerangabe ohne Reflektor eine Reichweite von bis zu 300 m. In der Praxis erwies sich dieser Wert als wohlwollende Übertreibung. Objektpunkte mit einer Entfernung von mehr als 90 m konnten nicht eingemessen werden. Die vermessenen Punkte wurden

⁷⁷ Zur Einführung in die Methoden der GPS-Vermessung sei an dieser Stelle auf ACKROYD und LORIMER (1994) und STRANG und BORRE (1997) verwiesen.

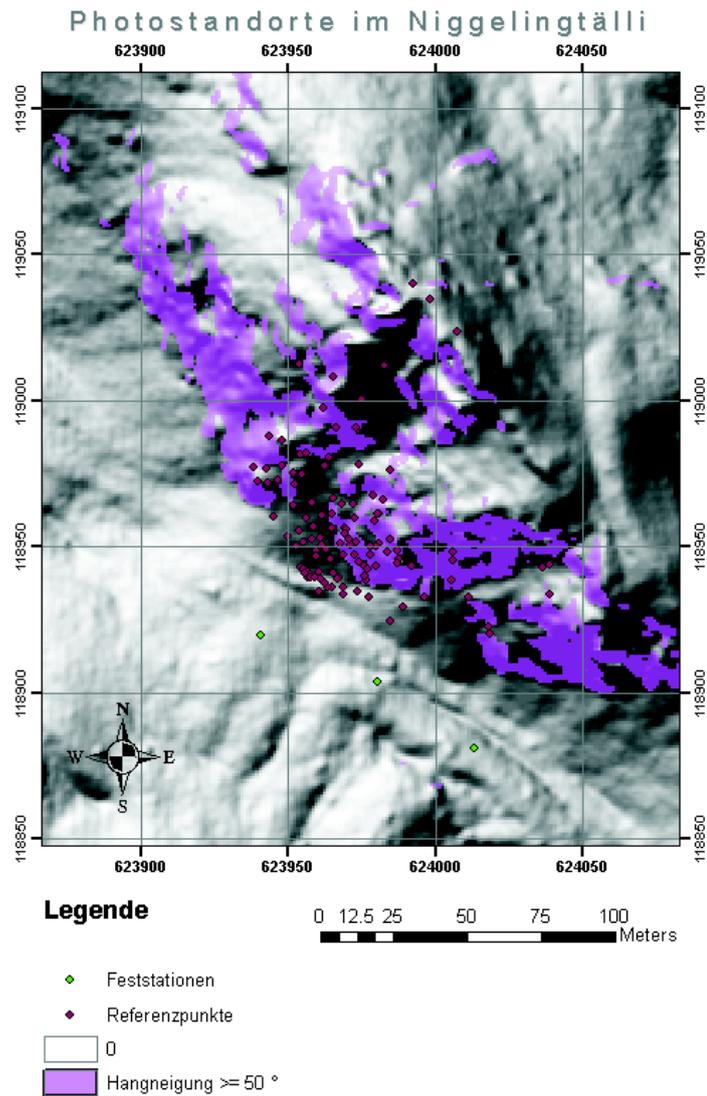


Abbildung 4.4: Lage der Standorte bei der Durchführung der photogrammetrischen Aufnahme.

nach dem Polarverfahren an den DGPS-Punkten (vgl. WITTE und SCHMIDT 1995) in das Landessystem der Schweiz eingehängt. Abbildung 4.4 zeigt eine Lageskizze der Photo-standorte sowie die am Objekt vermessenen Punkte. Ebenfalls sind die Bereiche des Hanges eingefärbt, die eine Hangneigung von über 50° aufweisen und somit aus der Luft schlechter zu erfassen sind als mit terrestrischer Photogrammetrie. Insgesamt wurden so 422 Punkte am Objekt vermessen. Auf jedem der etwa 150 Bilder sind in jedem Fall sieben, häufig mehr Passpunkte zu sehen. Damit ist die Anzahl groß genug um eine äußere Orientierung herzustellen.

4.3 Orientierung und Auswertung der Bilder mit der GeoSamt-Software

Zur Auswertung der durch Digitalphotos aufgenommenen Wände wurde eine Java-Anwendung entwickelt, die es möglich macht, die aufgenommenen Bilder zu orientieren⁷⁸ und zusätzliche Neupunkte im 3D-Raum zu messen. Die Orientierung der Bilder erfolgt dabei unter Verwendung der am IPB entwickelten MatLab-Routinen (LUXEN 2003). Die Messung wird durch das Verfahren des räumlichen Vorwärtsschnittes durchgeführt (vgl. Kapitel 2.4.3). Eine Kurzanleitung zur Installation und Bedienung der Software findet sich in Anhang A auf Seite 138.

Um die in Kapitel 2.4.2 diskutierte Bündelblockausgleichung durchzuführen bedarf es der Beschaffung von Näherungswerten für die Rotationsmatrix \mathbf{R} . Die Rotationsmatrix wird hier durch die Zuordnung von Passpunkten zu den entsprechenden Bildpunkten ermittelt. Dabei werden die in (4.1) notierten Informationen benötigt.

$$\begin{aligned}
 (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad , \quad X_i &\in \mathbb{R}^3 & (4.1) \\
 (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad , \quad x_i &\in \mathbb{R}^2 \\
 \text{Projektionszentrum} \quad , \quad X_o &\in \mathbb{R}^3 \\
 \text{Kamerakonstante} \quad , \quad c &\in \mathbb{R}
 \end{aligned}$$

Die Kamerakonstante c ist durch die in Kapitel 4.2 beschriebene Kalibrierung gegeben. Auch die Lage des Projektionszentrums X_o liegt durch die differenzielle Vermessung der Photostandorte und die Kenntnis der Stativhöhe in ausreichend guter Näherung vor. Das Verfahren um \mathbf{R} zu schätzen, stellt sich wie folgt dar.

Man wählt wie in (4.2) drei Passpunkte

$$\begin{aligned}
 X_1, X_2, X_3 \quad , \quad X_i &= \begin{pmatrix} o \\ X_i \\ o \\ Y_i \\ o \\ Z_i \end{pmatrix} & (4.2) \\
 x_1, x_2, x_3 \quad , \quad x_i &= \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

⁷⁸ Vereinfacht gesprochen kann man für den Begriff „orientieren“ auch „georeferenzieren“ nehmen, der im GIS-Verständnis der Geomorphologie eher gebräuchlich sein dürfte.

und normiert die Richtungsstrahlen des Kamera- und des Objektsystems (4.3).

$${}^k r_i = N \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ c \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^o r_i = N (X_i - X_o)$$

$$\text{mit } N = \text{Normierung} = (\vec{x}) = \frac{\vec{x}}{\|\vec{x}\|}$$

Damit gilt für die Rotationsmatrix das in (4.4) gegebene lineare Gleichungssystem.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} {}^k r_1 & {}^k r_2 & {}^k r_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{U}} = \mathbf{R} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} {}^o r_1 & {}^o r_2 & {}^o r_3 \end{pmatrix}}_{\mathbf{T}} \quad (4.4)$$

Die Rotationsmatrix kann nun wie in (4.5) geschätzt werden.

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{T}^{-1} \quad (4.5)$$

Jetzt wird eine Singulärwertzerlegung (*engl.: singular value decomposition*) durchgeführt und \mathbf{R} kann angegeben werden.⁷⁹ Dieses Verfahren wird für jede beliebige Kombination der zur Verfügung stehenden Passpunkte durchgeführt, wobei jedes Mal die Güte der Schätzung ermittelt wird und die beste Schätzung an die MatLab-Routinen der Bündelblockausgleichung (vgl. LUXEN 2003) übergeben wird. Die Güte der Schätzung wird geschätzt, in dem alle vorhandenen Passpunkte mit der geschätzten Rotationsmatrix vom Objektraum in das Kamerakoordinatensystem gedreht werden. Dann werden die Abweichungen der projizierten Koordinaten mit den tatsächlichen Beobachtungen summiert. Die beste Schätzung hat den kleinsten Summanden.

4.4 Mögliche Visualisierung semantisch definierter Geobjekte

Die in den vorhergehenden Abschnitten diskutierte Vorgehensweise ermöglicht es, mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software „GeoSamt“ Bilder zu orientieren und Neupunkte zu vermessen. Durch die Implementierung des in Kapitel 3 vorgestellten semantischen Modells in Bezug auf ausgewählte flächenhafte Objekte (vgl. Kapitel 4.1) lassen sich die vermessenen Neupunkte semantisch definierten Klassen zuordnen. Informationen über 3D-Koordinaten werden also nicht im bedeutungsleeren Raum erhoben, sondern als die geometrische Ausprägung geomorphologisch relevanter Objekte. Die Verwendung internationaler Standards ermöglicht es, die so kartierten Objekte auszutauschen und in Viewern,

⁷⁹ Die Einzelwertzerlegung ist im Java-Paket Jama bereits implementiert, sodass sich darum nicht weiter gekümmert werden muss.

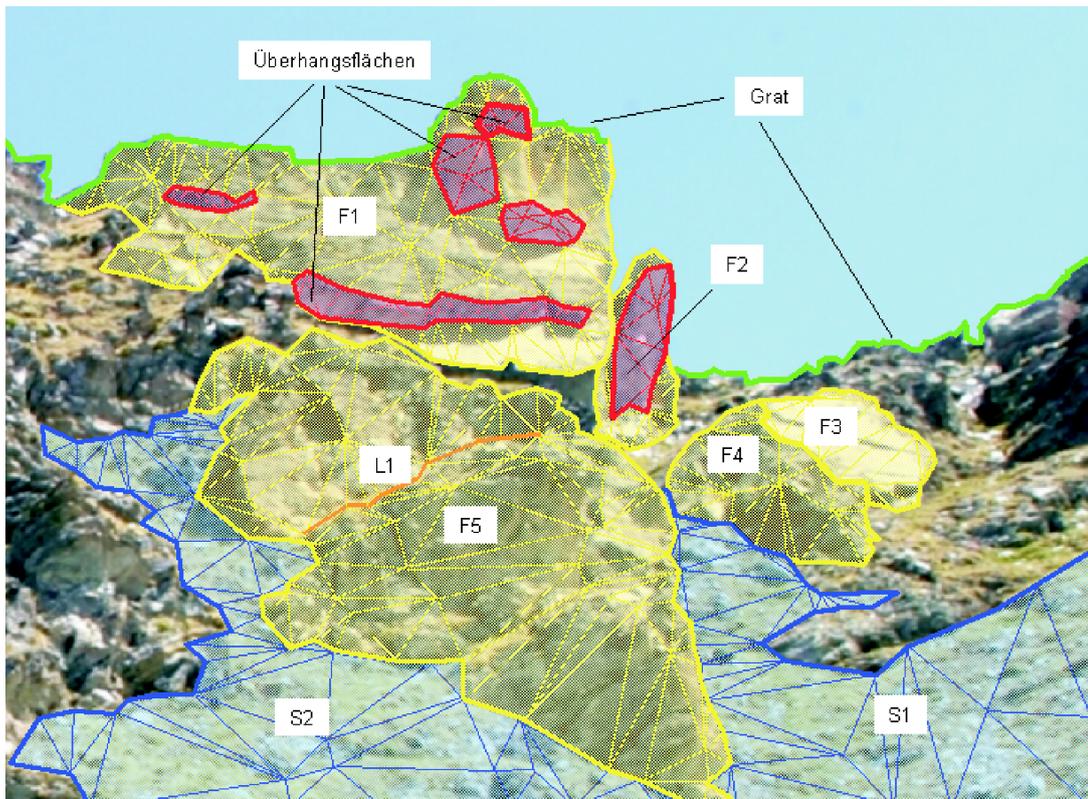


Abbildung 4.5: Mögliche Visualisierung semantisch definierter Objekte am Talschluss des Niggelingtällis. Durch die Modellierung auf Grundlage internationaler Standards sind die erfassten Objekte interoperabel austauschbar.

die ebenfalls diesem Standard folgen, zu visualisieren. Als Austauschformat des ISO 19107 dient die Geography Markup Language (GML) (vgl. LAKE et al. 2004). Eine Anwendung zur Visualisierung von GML stellt bspw. die am Institut für Kartographie und Geoinformation entwickelte Software „Aristoteles“ dar (DÖRSCHLAG 2005).

Abbildung 4.5 zeigt eine mögliche Visualisierung der Situation am Talschluss des Niggelingtällis. Die Zuordnung gemessener Punkte zu Instanzen des semantischen Modells ermöglicht die Analyse eines Bereiches starker Hangneigung mit überhängenden Flächen. Unterhalb des Grates (in Grün dargestellt) (vgl. Kapitel 3.3.5.3) wurden fünf Felsflächen (F1-F5) identifiziert (vgl. Kapitel 3.3.5) und gelb eingefärbt. F1 und F2 beinhalten zudem Überhangsflächen (in Rot dargestellt). Auch eine Leiste L1 (in Orange dargestellt) kann kartiert werden, sie ist ein Teilbestand der Felsfläche F5. Neben den Felsflächen sind die Reliefflächen zweier Schuttschichtkörper S1 und S2 in violetter Farbe markiert (vgl. Kapitel 4.1).

Die Form einer auf einer semantischen Modellierung fußenden Erhebung von Geoobjekten, die zudem auf der Basis des internationalen Standards der ISO 19107 erfolgt ist, birgt den Vorteil, die identifizierten Geoobjekte interoperabel auszutauschen. Zudem lassen sich die Beziehungen der einzelnen Geoobjekte in Bezug auf ihre prozessuale Interaktion analysie-

ren und mittels der in Kapitel 3.4.1 vorgestellten Modellierung von Geoprozessen weiter analysieren. Abbildung 4.6 zeigt dieselbe Situation nach Abstraktion der Geometrie. Zu-

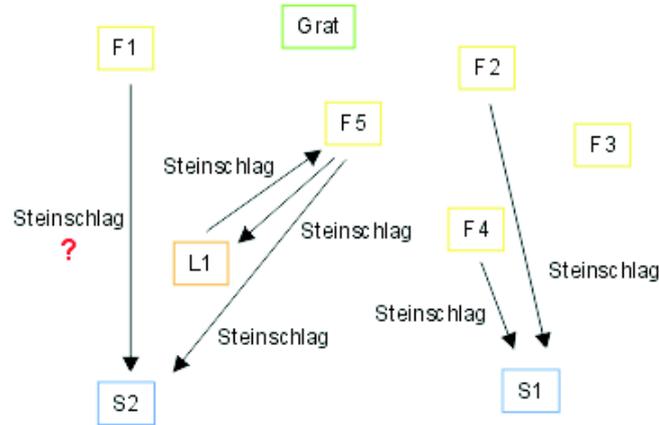


Abbildung 4.6: Darstellung der prozessualen Beziehungen von Geoobjekten am Talschluss des Niggeltälis nach Abstraktion der Geometrie.

sätzlich sind die verbindenden Geoprozesse eingezeichnet. Hier wurde als einziger Prozess der des Steinschlages angenommen. Wichtig ist aber die Erkenntnis, dass die Geoobjekte über ihre Nachbarschaftsbeziehungen hinaus prozessual erreichbar sind. Während der Grat und die Felsfläche F3 mit keinem der durch die Schuttschichtkörper repräsentierten Speicher in Verbindung zu stehen scheinen, stellt sich die Situation bei den Felsflächen F1, F2, F4 und F5 anders dar. Die Felsflächen F4 und F5 stehen über den Prozess des Steinschlages mit den Schuttschichtkörpern S1, bzw. S2 in Beziehung. Felswand als Sedimentquelle und Schuttschichtkörper als Sedimentspeicher sind in beiden Fällen jeweils benachbart, teilen also eine gemeinsame Grenze. Zudem steht die Felsfläche F5 mit der Leiste L1 in prozessualer Beziehung und umgekehrt. Zur genaueren Analyse der prozessualen Beziehung von L1 und F5 könnte F5 in Teilflächen zerlegt werden. Anders verhält es sich mit der Felsfläche F1. Sie kann durchaus mit Schuttschichtkörper S2 in prozessualer Beziehung stehen. Ob diese Beziehung zwischen F1 und S2 durch den Geoprozess Steinschlag direkt besteht, kann auch durch die Analyse der geometrischen Ausprägung von F1 nicht abschließend geklärt werden. Zumindest aber kann Material von F1 über einen hier nicht identifizierten Zwischenspeicher auf S2 gelangen. Einen endgültigen Beweis würde die Analyse des Materials des Schuttschichtkörpers ergeben. Deckt es sich mit dem der Felsfläche F1, wäre der Nachweis erbracht. Damit stünde F1 mit S2 in einer prozessualen Verbindung, S2 wäre also in der prozessualen Erreichbarkeit von F1, ohne direkt mit ihr benachbart sein zu müssen. Eine solches Analyseergebnis wäre ohne geomorphologisches Fachwissen schwerlich durchführbar, der interoperable Austausch der Analyseergebnisse aber lässt sich nur über die in dieser Arbeit vorgestellten formalen semantischen Modellierung durchführen.

5 Diskussion

Zwei Monologe, die sich gegenseitig immer und immer wieder störend unterbrechen, nennt man eine Diskussion.

Charles Tschopp

5.1 Rückblick und Bewertung

Die wesentlichen Ziele dieser Arbeit waren zum Ersten die Formulierung eines formalen, semantischen Modells von Wänden und steilen Hangbereichen unter Berücksichtigung des geomorphologischen Fachwissens. Dabei sollte die Repräsentation der in der Fachwissenschaft identifizierten Objekte 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 sollte eine geeignete Möglichkeit gefunden werden, mit dem Ziel diese Interaktion von Geoobjekten über Prozesse zu repräsentieren. Zum Dritten musste gezeigt werden, dass die formal semantische Modellierung in ein Datenbankschema überführt und damit im Sinne eines Geoinformationssystems persistent gemacht werden kann. Hierbei stand insbesondere die prinzipielle Machbarkeit im Vordergrund. Zum Schluss sollte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, die aus der Luft schwer zu erfassenden Wände und steilen Hangbereiche mittels terrestrischer Digitalphotos für eine Analyse zugänglich zu machen. Auch hier sollte ausgeleuchtet werden, inwieweit dies für photogrammetrisch unerfahrene Anwender mit handelsüblichen Kameras möglich ist.

Formulierung eines formal 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 der Landformen 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. Diese 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 hier durch die semantische Modellierung aufgestellte Ordnung wird damit als allgemein genug bewertet, um auch speziellere Konzepte als die hier modellierten in Erweiterung einzubinden.

Aus Sicht der Geoinformation ist ein Formalismus für die Repräsentation der Konzepte unumgänglich. Hierfür wurde die 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 in allen Bereichen 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 Wänden und steilen Hangbereichen. Das führte zu der Suche nach einer Möglichkeit, diese durch ihre Steilheit in ihrer Oberflächencharakteristik einmaligen Phänomene der Landoberfläche geometrisch zu repräsentieren. Generell musste auch, der Semantik der Geoobjekte gerecht werdend, eine 3D-Repräsentation der Geometrie sichergestellt werden. Da ein wesentlicher Aspekt moderner Geoinformationssysteme die Interoperabilität ist, wurde der in der Modellierung von Städten schon erprobte ISO-Standard 19107 für die Lösung dieses Problems herangezogen. Neben seiner in Kapitel 2.1.4 ausgiebig diskutierten Überlegenheit gegenüber dem in der Geomorphologie überwiegend verwendetem Rasterformat bei der Repräsentation von überhängenden Flächen und 3D-Geometrien, sichert er als international anerkannter Standard den Austausch von Geometrien. Dabei gewinnt er durch seine Implementierung in Form der 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 in der Zeit verändern. Diese Veränderung ist für die Analyse der Genese des Georeliefs von entscheidender Wichtigkeit. Durch die Modellierung einer zeitlichen Repräsentation lässt sich eine solche Analyse gut durchführen. Sie ermöglicht es, Versionen des Zustandes des Georeliefs zu repräsentieren, abzuspeichern und zu untersuchen.

5.1.1 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 Geoobjekt 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 Konzept der Sedimentkaskade. Zur Repräsentation dieser prozessualen Beziehungen und des weiter reichenden Konzeptes der Sedimentkaskade wurde das semantische Modell um die Modellierung eines Geoprozesses erweitert, der direkt mit den Geoobjekten assoziiert werden kann. Über diese assoziative Beziehung können Geoprozesse mit einem oder mehreren Objekten der Landoberfläche in Beziehung stehen, wobei sie sie in ihrem inneren Aufbau oder in ihrer Form verändern können. Bei der assoziativen Beziehung zwischen Geoprozess und Geoobjekt war es wichtig, festzuhalten, dass die Veränderung eines Geoobjektes nur dann erfolgt, wenn dieses den Geoprozess 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 Geoobjekten bezüglich der Wirksamkeit von Geoprozessen nicht en detail ausmodelliert worden sind. Auch hier gilt, 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, können über das Konzept des komplexen Geoprozesses repräsentiert werden.

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 der Felswand gegeben werden. Die Repräsentation in Form des in Abbildung 3.14 auf Seite 92 gegebenen Klassenmodells geht dabei weit über die Möglichkeiten der in der Geomorphologie gebräuchlichen Konzeptmodelle, wie etwa Abbildung 2.13 auf Seite 40 eines zeigt, hinaus. Alle im Klassenmodell repräsentierten Geoobjekte weisen nämlich eine der ISO 19107 entsprechende Assoziation zu einer Geometrie auf, sind also als Form tatsächlich und in ihrer Veränderung über die Zeit 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 Konzepten innerhalb einer geoinformatischen Anwendung zu validieren.

5.1.2 Implementierung des semantischen Modells in ein Datenbankmanagementsystem

Semantische Modellierungen werden erstellt, um formalisiertes Wissen in ein maschinenlesbares Format zu übertragen (vgl. Kapitel 2.1.1). Im Rahmen dieser Arbeit musste also untersucht werden, ob das erstellte semantische Modell diesen Anforderungen gerecht werden kann. Dabei waren die auf Grundlage der ISO 19107 modellierten Geometrien und die semantischen Klassen zumindest teilweise in ein geeignetes Datenbankmanagementsystem zu überführen. Zu diesem Zweck wurde das objekt-relationale Datenbankmanagementsystem Oracle Spatial ausgewählt. Der Vorteil dieses Systems liegt neben einer professionellen Wartung vor allem in dem räumlichen Objekttyp MDSYS.SDO_GEOMETRY, der es erlaubt, Geometrien direkt abzuspeichern, ohne deren Aggregationen aus Punkten oder Kanten in jedem einzelnen Fall einzeln implementieren zu müssen. Die Wahl der UML als Formalismus zur Repräsentation des geometrischen und semantischen Modells erwies sich hierbei als großer Vorteil, da sie generell in ein relationales Schema überführbar ist. Änderungen gegenüber dem objektorientierten Ansatz der UML ergeben sich nur in Bezug auf Vererbung und die Repräsentation des Stereotyps `<<codelist>>` und sind akzidenziell.

Die Implementierung des semantischen Modells, das weit über die Repräsentation von Wänden hinausgeht, wurde zum Nachweis der Machbarkeit einer Implementierung auf eine Auswahl auf die Objekte eben dieser Stellen des Reliefs beschränkt. Dementsprechend wurden auch nur die mit diesen Objekten assoziierten Geometrien in das Datenbankschema überführt. Hier kam es zu einer weiteren Einschränkung in Bezug auf die Datenakquise. Es wurden nur diejenigen Geometrien implementiert, die durch optische Messverfahren auch tatsächlich zu erhalten sind. Für die ausgewählten Objekte konnte ein positives Fazit der Implementierung in dem Wissen gezogen werden, auch weitere Objekte erfolgreich überführen zu können.

5.1.3 Erfassung von Wänden und steilen Hangbereichen mittels terrestrischen Digitalphotos

Wände und steile Hangbereiche sind aus der Luft ungenügend bis gar nicht zu erfassen. Mit der Aufnahme eines steilen Hangbereiches mit einer handelsüblichen Kamera sollt ein Weg aufgezeigt werden, wie diese Bereiche auch von photogrammetrisch unerfahrenen Anwendern dennoch analysiert werden können. Nach Erläuterung der photogrammetrischen Grundlagen in Kapitel 2.4 wurde die Erhebung von Daten im Niggelintäli, einem Seitental des Turtmantales in der Schweiz, dokumentiert. Es zeigt sich, dass auch unter widrigen Umständen, wie sie im Hochgebirge vorherrschen, Daten von Wänden und steilen Hangbereichen mit der handelsüblichen Kamera Canon EOS 10D erhoben werden können. Einschränkungen ergeben sich hauptsächlich in der Zugänglichkeit des Objektes zur Beschaffung der für die in der hier vorgestellten Methode benötigten Passpunkte am Objekt. Auch muss eine Kamera zur Wiederherstellung der inneren Orientierung kalibriert werden. Während das erste Problem durch Weiterentwicklung der photogrammetrischen Techniken

zunehmend an Bedeutung verliert, können auch mit kleineren kommerziellen Tools schon heute Kalibrierungen von Digitalkameras durchgeführt werden.

Zur Auswertung der digitalen Bilder ist im Rahmen dieser Arbeit eine Software entstanden, die auf einer graphischen Oberfläche die relative und absolute Orientierung der Bilder ermöglicht. Dabei muss allerdings auf am IPB implementierte Bündelblockausgleichung zurückgegriffen werden. Dennoch konnte gezeigt werden, dass es auch für Geomorphologen möglich ist, im wissenschaftlichen Rahmen Photogrammetrie zu betreiben, was auch ein Ausdruck der guten Zusammenarbeit innerhalb der am Studiengang der Vermessungslehre beteiligten Institute der Universität Bonn ist.

5.1.4 Nutzen der Ergebnisse

Mit dem vorgestellten semantischen Modell für Geoobjekte von Wänden und steilen Hangbereichen ist eine formalisierte Form geomorphologischen Fachwissens auf der Grundlage internationaler Standards zur Repräsentation der Geometrie vorgelegt worden. Auf dieser Grundlage ist die Geomorphologie versetzt worden, mittels Konzepten der Geoinformation miteinander in einen formalisierten Diskurs zu treten. Diese Arbeit stellt also einen Beitrag zur Interdisziplinarität dar, der innerhalb des Graduiertenkollegs 437 „das Relief – eine strukturierte und veränderliche Grenzfläche“ gefordert und darüber hinaus wichtig ist.

Der Beitrag für die Fachwissenschaft Geomorphologie ist hierbei 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 dieser Fachwissenschaft zu bringen. Mit der Entwicklung der formal semantischen Modellierung von Geoobjekten und Geoprozessen als monoton erweiterbare Repräsentation ist eine Möglichkeit geschaffen worden, die Inhalte der Geomorphologie weiter 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 differenzierter 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. Die Datenbank muss dafür nicht zwingend die hier verwendete sein.

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.

In folgedessen ist hier ein Anstoß gegeben worden, die in der Geomorphologie 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 hier aufgefordert, die Erkenntnisse der Geoinformation bezüglich der Vorteile interoperabler Formate nicht zu verpassen.

5.2 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 prozessualen Erreichbarkeiten von Geoobjekten unerlässlich.

Weiter ist eine Implementierung der vorgestellten Modelle auch auf mobile Geräte voranzutreiben. Eine portable, auf der Grundlage der hier entwickelten semantischen Modellierung aufbauende Datenbankbindung würde den Anwender in die Lage versetzen, Geoobjekte und Geoprozesse, die sich durch Prozessspuren im Gelände bemerkbar machen, direkt vor Ort zu kartieren. Dazu muss auch die Methode der photogrammetrischen Datenakquise für solche mobilen Geräte weiter ausgebaut werden. Durch die Möglichkeit des entwickelten semantischen Modells, auch zeitliche Variationen der Geometrien zu repräsentieren, kann so auch die Veränderung der Struktur der Landoberfläche erhoben und analysiert werden.

Literatur

- ABRAHAM, S. (2000): *Kamera-Kalibrierung und metrische Auswertung monokularer Bildfolgen*. Shaker Verlag, Aachen. 170 S.
- ABRAHAM, S. und W. FÖRSTNER (1997): Zur automatischen Modellwahl bei der Kalibrierung von CCD-Kameras. PAULUS, E. und F. M. WAHL (Hrsg.): *Mustererkennung*, Springer, Heidelberg, 147–155.
- ABRAHAM, S. und T. HAU (1997): Towards autonomous High-precision calibration of digital cameras. In: *Videometrics V, Proceedings of SPIE Annual Meeting*, Nummer 3174. San Diego, 82–93.
- ACKROYD, N. und R. LORIMER (1994): *Global Navigation. A GPS user's guide*. Lloyd's of London Press Ltd., London. 199 S.
- AGBODEN (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. (1995): *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.
- ALSPAUGH, D. (2004): A brief history of Photogrammetry. MCGLONE, J. C., E. M. MIKHAIL und J. BETHEL (Hrsg.): *Manual of Photogrammetry*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, 1–12.
- 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 16.03.2005).
- 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.
- BARROW, J. D. (1991): *Theories of everything: The quest for ultimate explanation*. Oxford University Press, Oxford. 223 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): . *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.
- BOTSCHKEK, J. und A. SKOWRONEK (1999): Zum Abtragspotential der Tunnelerosion. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **91**: 1175–1178.
- BOTSCHKEK, 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.
- BUCHROITHNER, M., R. SCHENKEL und M. WINKLER (2000): Towards the virtual Eiger North Face. In: BUCHROITHNER, M. (Hrsg.): *Proc. of the 2nd Symposium of the Commission on Mountain Cartography of the International Cartographic Association*. Rudolfshütte, 107–120.
- 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.
- CANON DEUTSCHLAND (N.D): Canon EOS 10D - Technische Daten. http://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_10d/index.asp?specs=1 (Internetseite, zuletzt besucht am 29.03.2005).
- 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. DOORNKAMP (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.
- CRANFIELD, 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 17.06.2005).
- 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/~Ecurry/CurryOntologyGIS.pdf> (Interentseite, zuletzt besucht am 10.02.2005).
- DALRYMPLE, J. B., R. J. BLONG und A. J. CONACHER (1968): An hypothetical nine unit landsurface model. *Z. Geomorph. N. F.*, **12**: 60–76.
- DEKOV, 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 gullyng with special reference to loess areas. *Catena Suppl.*, **17**: 67–72.
- DESAUSSURE, F. (1931): *Grundlagen der allgemeinen Sprachwissenschaft*. DeGruyterClarendon, 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.
- DIGITAL PHOTO SYSTEME (N.D.): Die Technischen Daten der Canon EOS 10D. http://www.digital-photo-systeme.de/produkte/digitalkameras/digitalkamera_eos_10d_td.html (Interentseite, zuletzt besucht am 08.03.2005).
- DIKAU, R. (1988): *Entwurf einer geomorphographisch - analytischen Systematik von Reliefheiten*, 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.
- DÖRSCHLAG, D. (2005): AristotelesViewer – Java based 3D-Viewer for GML 3.x - Data. <http://plg.uwaterloo.ca/~migod/uml.html> (Internetseite, zuletzt besucht am 18.07.2005).
- 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.
- DUMKE, R. R. (ND): UML-Tutorial. <http://ivs.cs.uni-magdeburg.de/~dumke/UML/inhalt.htm> (Internetseite, zuletzt besucht am 09.06.2005).

- DÜRR, E. (1970): *Kalkalpine Sturzhalde und Sturzschuttbildungen in den westlichen Dolomiten*, Band 37 der Reihe Tübinger Geographische Studien. Tübingen. 120 S.
- 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.
- FEDAK, M. (N.D.): 3D Measurement Accuracy of a Consumer-Grade Digital Camera and Retro-Reflective Survey Targets. Technischer Bericht, InSpec Engineering Services, West Vancouver. <http://www.photodeler.com/pdf/fedak1.pdf> (Internetseite, zuletzt besucht am 08.03.2005).
- 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.
- FÖRSTNER, W. (1995): GIS - the third dimension. In: *IUSM WG on GIS/LIS Workshop - Current Status and Challenges of Geoinformation Systems*. Hannover.
- FÖRSTNER, W., B. WROBEL, F. PADERES, R. CRAIG, C. FRASER und J. DOLLOFF (2004): Analytical photogrammetric operations. MCGLONE, J. C. (Hrsg.): *Manual of photogrammetry*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 763–948.
- 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.
- FRYER, J. G. (2001): Intruduction. ATKINSON, K. B (Hrsg.): *Close Range Photogrammetry and Mashine Vision*, Whittles Publishing, Caithness, Kapitel 1, 1–7.
- GARDNER, J. S. (1983): Rockfall frequency and distribution in the Highwood Pass area, Canadian Rock Mountains. *Z. Geomorph. N. F.*, **27**(3): 311–324.
- GEBIG GIS (o.D.): GiPSy Programmbeschreibung. Technischer Bericht, Köln.
- 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.
- GODDING, R. (2002): Geometric calibration and orientation of digital imaging systems. Technischer Bericht, Aicon 3D Systems, Braunschweig. <http://www.falcon.de/falcon/eng/documentation.htm> (Internetseite, zuletzt besucht am 12.11.2004).
- 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 (2003): Interoperabilität einer 3D-Geodateninfrastruktur. BERNHARD, L., A. SLIWINSKI und K. SENKLER (Hrsg.): *Geodaten- und Geodienste-Infrastrukturen – von der Forschung zur praktischen Anwendung*, Ifgi Prints, Münster, 325–344.
- 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*, 6/2005: 343–353.
- GRUBER, T. R. (1993): Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. GUARINO, N. und R. POLI (Hrsg.): *Formal ontology in conceptual analysis and knowledge representation*, Klüwer.
- 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.
- GUARNIERI, A., A. VETTORE, S. EL-HAKIM und L. GONZO (2004): Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey. In: *International Archives of ISPRS*, Nummer XXXV. Istanbul, 154–159.
- 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 Helveticae*, **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.
- HAMPDEN-TURNER, C. (1982): *Modelle des Menschen. Ein Handbuch des menschlichen Bewusstseins*. Beltz, Weinheim.
- 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 Suppl.*, **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.): *Lanslides*, 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).
- 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.
- 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.

- 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, Universität KarlsruheMartin-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.
- KOCH, K. R. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dümmler, Bonn. 366 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.
- KONEZNY, G. und G. LEHMANN (1984): *Photogrammetrie*. Walter de Gruyter, Berlin.
- KOSKO, B. (1993): *Fuzzy Thinking*. Hyperion, New York. 318 S.
- KRAUS, H. (2000): *Die Atmosphäre der Erde*. Vierweg, Braunschweig. 470 S.
- KRAUS, K. (1994): *Photogrammetrie 1 – Grundlagen und Standardverfahren*. Dümmler, Bonn. 394 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*. Verlag Suhrkamp, Frankfurt.

- KUHN, W. (2002): Ontologies in support of activities in geographical space. *International Journal of activities in geographical space*, **15**(7): 613–631.
- KÜLÜR, S. (1998): Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchung eines digitalen Bildaufnahmesystems. In: *Wissenschaftlich- Technische Jahrestagung der DGPF*, Nummer 15. München, 63–72.
- KUNII, Y. und H. CHIKATSU (2001): On the Application of 3 Million Consumer Pixel Camera to Digital Photogrammetry. In: *Proceedings of SPIE*, Nummer 4309, 278–287.
- LAEBE, T. und W. FÖRSTNER (2004): Geometric stability of low-cost digital consumer cameras. In: *International Archives of ISPRS*, Nummer XXXV. Istanbul, 528 – 535.
- LAKE, R., D. S. BURGGRAB, 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 Steinschlagwänden. *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.
- LI, C. und B. KING (2002): Close range photogrammetry for the structural monitoring of the Star Ferry colonnade. *Journal of Geospatial Engineering*, **4**(2): 135–143.
- 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., D. DÖRSCHLAG und PLÜMER L. (2003): Interaktive Geobjekterkennung in digitalen Höhenmodellen mittels Parametervisualisierung. In: *Visualisierung und Erschließung von Geodaten*, Nummer 7 in Kartographische Schriften. Bonn, 59–66.
- LÖWNER, M.-O, D. DÖRSCHLAG und L. PLÜMER (2005A): GeoSaMT – ein Konzept zur Kartierung und semantischen Modellierung von steilen Hangbereichen. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, **2005**(4).

- LÖWNER, M.-O, N. J. PRESTON und R. DIKAU (2005B): 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.
- LUHMANN, T. (2002): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis – Beispiele und Problemlösungen*. Wichmann, Heidelberg. 318 S.
- LUHMANN, T. (2003): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Wichmann, Heidelberg. 586 S.
- LUXEN, MARC (2003): Bündelausgleichung mit Punkten und Geraden. Technischer Bericht, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn.
- MACHATSCHKEK, 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.
- MATSUOKA, R., K. FUKUE, K. CHO, H. SHIMODA und Y. MATSUMAE (2002): A study on calibration of digital camera. In: *IntArchPhRS*, Nummer XXXIV. Graz, 176–181.
- MERCHEL, S. (2005): Kosmogene Nuklide. http://www.meteoroids.de/wiss_met_c.htm (Internetseite, zuletzt besucht am 30.04.2005).
- MIKHAIL, E. M., J. S. BETHEL und J. C. MCGLONE (2001): *Intruduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons, New York. 479 S.
- 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 Entwicklung 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.

- NAKADA, R. und H. CHIKATSU (2003): Generating 3D model of Meguro Residence using Digital Amature Camera. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (CD-Rom)*, Nummer XXXIV-5/W10. Vulpera.
- NIEMEIER, W. (2002): *Ausgleichsrechnung*. Walter de Gruyter, Berlin. 407 S.
- 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.
- OPEN GIS CONSORTIUM (1999): *Open GIS © Simple Feature Specification for SQL, Revision 1.1*. <http://www.opengeospatial.org/> (Internetseite, zuletzt besucht am 24.06.2005).
- ORACLE COOPERATION (2002): *Oracle © Spatial - User's guide and Reference, Release 9.2*. http://download-uk.oracle.com/docs/cd/B10501_01/appdev.920/a96630.pdf (Internetseite, zuletzt besucht am 24.06.2005).
- ORACLE COOPERATION (2003): *Oracle © Spatial - User's guide and Reference, 10g Release 1 (10.1)*.
- ORTMANN, D. (1999): *Access 2000 - Datenbanken professionell aufbauen*. Hanser, München. 898 S.
- 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.
- 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.
- PAPPA, R. S., L. R. GIERSCH und J. M. QUAGLIAROLI (2001): Photogrammetry of a 5m Inflatable Space Antenna with Consumer Digital Cameras. Technischer Bericht, Eos Systems Inc.
- 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., G. GRÖGER, I. PETZOLD und K. BISSELING (2002): 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. (2003): *Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Geographisches Institut. 339 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.
- REUTER, M. (2003): Implementierung eines 3D-Stadtmodells in eine objekt-relationale Datenbank am Beispiel von Oracle Spatial. Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn. http://www.ikg.uni-bonn.de/Publikationen/Diplomarbeiten/markus_reuter.pdf (Internetseite, zuletzt besucht am 20.07.2005).
- 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 Geisteinseigenschaft 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.
- SCHMITTWILKEN, J. (2004): Digitale Geländemodelle und Texturen in einer objektrelationalen 3D-Geodatenbank. Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn. http://www.ikg.uni-bonn.de/Publikationen/Diplomarbeiten/joerg_schmittwilken.pdf (Internetseite, zuletzt besucht am 24.06.2005).
- 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 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.
- SCHWIDEFSKY, K. und F. ACKERMANN (1976): *Photogrammetrie*. Teubner, Stuttgart. 384 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.
- STOTER, J. und S. ZLATANOVA (2003): Visualisation and editing of 3D Objects in a DBMS. In: *Proc. of EUROSDR workshop: Rendering and visualisation*. http://www.gdmc.nl/stoter/publicaties/st_zl.zip (Internetseite, zuletzt besucht am 13.05.2005).
- STRANG, G. und K. BORRE (1997): *Linear algebra, geodesy and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, Maas. 624 S.

- 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 knowle-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. und D. WEBB, B. W.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.
- WEIBEL, R. und M. BRÄNDLI (1995): Adaptive methods for the refinement of digital terrain models for geomorphometric applications. *Z. Geomorph. N. F. Suppl.-Bd.*, **101**: 13–30.
- 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.
- WIGGENHAGEN, M. (2002): Calibration of digital consumer cameras for photogrammetric applications. In: *IntArchPhRS*, Nummer XXXIV. Graz, 301–304.

- WIGGENHAGEN, M., A. ELMHORST und U. WISSMANN (2004): Repeated Object Reconstruction of the Bremen Hanse Cog. In: *IntArchPhRS*, Nummer XXXV. Istanbul, 54–58.
- 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.
- WITTE, B. und H. SCHMIDT (1995): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Konrad Wittwer, Stuttgart. 748 S.
- WITTGENSTEIN, L. (1982): *Philosophische Untersuchungen*. Frankfurt a. M., 3. Ausgabe.
- 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. MALER (2004): *Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Third Edition)*.
- 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.

Sachregister

- Aggregation, 18
- Akkumulationsrate, 36
- Assoziation, 18
- Assoziationsname, 18
- Attribut, 17

- Bestandsteilbeziehung, *siehe* Aggregation
- Bildhauptpunkt, 102

- Canon EOS 10D, 101

- Datenbankmanagementsystem, 41
- DBMS, *siehe* Datenbankmanagementsystem
- Digitalkamera
 - Kodak DC290, 50

- Extensible Markup Language, 23

- Felswand, 30
- Frostsprengrung, 30

- Geodätisches Institut der Universität Bonn, 104
- Geomorphogenese, 24
- Geomorphologie, 24
- Geomorphometrie, 24
- Georelief, 25

- Insolationsverwitterung, 30
- Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn, 101, 106
- International Organization for Standardization, 55
- International Organization for Standardization, 23
- IPB, *siehe* Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn

- ISO, *siehe* International Organization for Standardization
 - 19107, 23
 - ISO 19107, 55
 - Profil, 56
 - ISO 19109, 55
 - ISO 19110, 88

- Kalibrierung, 49
- Kamerakonstante, 45
- Klasse, 17
- Kommentar, 19
- Komplex
 - geomorphosphärischer, 26
- Komposition, 18

- Landform, 24
- Leiste, 31, 38

- Massenbewegung, 28
 - Fall, 31
 - primär, 31
 - sekundär, 31
 - Fließen, 31
 - Kippen, 31
 - Kriechen, 31
 - Mure, 34
- Methode, 18
- Morphometrie, *siehe* Geomorphometrie
- Multiplizität, 18

- Normalgleichungsmatrix, 137

- Oberklasse, 19
- Object Constraint Language, 16, 19
- Objekt, 17
- OCL, *siehe* Object Constraint Language
- Ontologie, 10, 11

- Oracle Spatial, 41
- Orientierung
 - äußere, 46, 102
 - innere, 45, 49, 102
- Photogrammetrie, 44
- Projektionszentrum, 44
- Prozess
 - endogener, 24
 - hangaquatischer, 34
- Prozessdomäne, 29
- Relief, 25
- Rollenname, 18
- Schneelawine, 34
- Schutthalde, 32
- Schuttkegel, 32
 - zusammengesetzte, 32
- Sedimentbudget, 36
- Sedimentkaskade, 35
- Semantik, 9
- Semantisches Netz, 11
- Semiotik, 9
- Sensor
 - CCD, 101
 - CMOS, 101
- Software
 - TCC, 102
- Spatial Schema, *siehe* ISO 19107
- Steinlawine, 31
- Systemtheorie, 35
- Turtmantal, 102
- Typ, 17
- Unterklasse, 19
- Vererbung, 19
- XMI, *siehe* XML Model Interchange
- XML, *siehe* Extensible Markup Language
- XML Model Interchange, 16
- Zentralperspektive, 44
- Zusicherung, 18

Anhang A: Beschreibung der Ausgleichung von linearisierten Modellen

Zur Durchführung der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Bündelblockausgleichung wird das Verfahren der Ausgleichung oder Schätzung von Parametern in linearen Modellen (vgl. KOCH 1997) benötigt. Dabei werden die Kollinearitätsgleichungen jeweils nach den entsprechenden Parametern umgestellt und mit Hilfe von genügend guten Näherungswerten für den Parameter- oder Unbekanntenvektor \mathbf{X}_0 durch Reihenentwicklung nach Taylor (vgl. NIEMEIER 2002) linearisiert. Da dieses Verfahren für photogrammetrisch gebildete Leser nicht weiter interessant ist, sei zur näheren Erläuterung auf Anhang 5.2 verwiesen. Die Koeffizienten- oder Designmatrix setzt sich wie in (A.1) zusammen.

$$\mathbf{A}_{n,1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1u} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nu} \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

mit $a_{ij} : \left(\frac{\partial f_i}{\partial X_j} \right)_{\mathbf{X}^0}$, partielle Ableitung in abgekürzter Schreibweise

\mathbf{X}^0 : nicht stochastische Näherungswerte

Damit lautet das linearisierte funktionale Modell in Matritzendarstellung nun:

$$\mathbf{l}_{n,1} + \mathbf{v}_{n,1} = \mathbf{A}_{n,u} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{u,1} \quad (\text{A.2})$$

mit \mathbf{l} : Vektor der verkürzten Beobachtungen
 \mathbf{v} : Vektor der Verbesserungen
 $\hat{\mathbf{x}}$: Vektor der geschätzten Parameter

Die Kovarianzmatrix Σ_{ll} , die auf der Hauptdiagonalen die Varianzen σ_l^2 enthält und die für jeden Beobachtungsvektor einer Ausgleichung aufgestellt werden muss, beschreibt die Genauigkeitsmaße der Parameter. Wenn keine a priori-Genauigkeiten vorliegen, kann mit Abschätzungen und dem Verzicht auf Korrelationen gearbeitet werden. Liegen nur Annahmen über die Verhältnisse von Genauigkeiten vor, kann die Kovarianzmatrix zur Kofaktormatrix \mathbf{Q}_{ll} vereinfacht werden, die für die Methode der kleinsten Quadrate ausreicht (vgl. NIEMEIER 2002). Die Gewichtsmatrix (A.3) geht als Inverse der Kofaktormatrix in die Ausgleichung ein.

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_0^2/\sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_0^2/\sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_0^2/\sigma_n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & & & 0 \\ & p_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & p_{nn} \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Unter Berücksichtigung von (A.3) kann nun in Erweiterung der Methode der kleinsten Quadrate⁸⁰ die Normalgleichungsmatrix nach dem Gauß-Markov-Modell in (A.4) aufgestellt werden (vgl. LUHMANN 2003).

$$\mathbf{N}_{u,u} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{u,1} + \mathbf{n}_{u,1} = \mathbf{0}_{u,1} \quad (\text{A.4})$$

$$\text{mit } \mathbf{N}_{u,u} = \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{A}_{n,u}$$

$$\mathbf{n}_{u,1} = \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{l}_{n,1}$$

In einer iterativen Ausgleichung wird nun der Lösungsvektor und seine Kovarianzmatrix nach (A.5) bestimmt:

$$\hat{\mathbf{x}}_{u,1} = \mathbf{Q}_{u,u} \cdot \mathbf{n}_{u,1} = (\mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{A}_{n,u})^{-1} \cdot \mathbf{A}_{u,n}^T \cdot \mathbf{P}_{n,n} \cdot \mathbf{l}_{n,1} \quad (\text{A.5})$$

$$\text{mit } \mathbf{Q}_{u,u} = \mathbf{N}_{u,u}^{-1} \quad , \text{ Kofaktor-Matrix}$$

$$\mathbf{K}_{u,u} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{u,u} \quad , \text{ Varianz-Kovarianz-Matrix}$$

⁸⁰ Dieses bereits im Jahre 1797 von C.F. Gauß entwickelte Verfahren wird auch Fehlerquadratmethode oder Schätzung nach L2-Norm (*engl.: Least Squares Method*) genannt (vgl. NIEMEIER 2002).

Anhang B: Kurzanleitung für das Programm „GeoSamt“

Die Anwendung GeoSamt (**Ge**omorphologisch-**S**emanantisches **M**apping **T**ool) wurde von Marc-O. Löwner und Dirk Dörschlag am IKG konzeptionell entwickelt und im Wesentlichen von Daniel Schumacher implementiert. Die hinter der Anwendung stehende Access®-Datenbank wurde von Marc-O. Löwner implementiert.

Das Programm dient als graphische Oberfläche zur Identifikation von Passpunkten zur relativen und absoluten Orientierung digitaler Photos sowie der Vermessung von Neupunkten durch das Verfahren des räumlichen Vorwärtsschnittes. Das im Hintergrund der Anwendung implementierte Datenbankschema speichert neben den Passpunkten auch die Ergebnisse der Orientierung und Kartierung. Zur Durchführung der Bündelblockausgleichung wird auf von Marc Luxen am IPB implementierten MatLab-Methoden zurückgegriffen. Diese Anleitung beinhaltet die Installationshinweise und eine kurze Programmbeschreibung.

Installationshinweise

Zum Ausführen des Programmes sind ein Java Development Kit (JDK) und das Programm MatLab® der Firma Mathworks erforderlich. Das Projekt ist für ausschließlich wissenschaftliche Anwendungen über den CVS-Server des Institutes für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn zu erhalten. Inhalt des Projektes sind:

- die JAVA-Klassen im Verzeichnis „src“,
- die MatLabfiles (*.m) im Hauptverzeichnis,
- eine Access-Datenbank (GeoSamt.mdb),
- die notwendigen icons im Verzeichnis „image“ und
- eine Kurzanleitung

Zur Kommunikation von GeoSamt mit der Access Datenbank muss diese als ODBC-Datenquelle namens „GeoSamt“ eingerichtet werden. Für die reibungslose Kompilierung des Softwarepaketes wird die Bibliothek „JAVA Advanced Imaging“ (JAI) benötigt. Diese ist über die SUN-Homepage erhältlich. Wegen des erheblichen Bedarfs an Arbeitsspeicher wird empfohlen, beim Start der JVM folgende Optionen zu setzen, um einen flüssigen Ablauf ohne „memory exceptions“ zu garantieren.

- -Xmx1024m (entspricht 1024 Mbyte) oder aber
- -Xmx512m (entspricht 512 Mbyte)

Programmbeschreibung

Das Programm besteht aus drei eigenständigen Komponenten, die

- die relative Orientierung,
- die absolute Orientierung und
- das Messen

ermöglichen.

Vorbereitungen

Vor dem Start der Anwendung müssen die Digitalphotos und die zur Orientierung erforderlichen Daten in der Access-Datenbank gespeichert werden. Alle bekannten 3D-Punkte im Objektraum sind in die Tabelle `Point` einzutragen. Die Tabelle `MeasuringPoint` ermöglicht es den Punkten Namen zuzuordnen, sodass der Benutzer die Punkte später über diese identifizieren kann. Die Daten der verwendeten Kamera sind in die Tabelle `Camera` einzutragen. In der Tabelle `Photo` sind folgende Spalten auszufüllen:

- URL : Der Ort der Datei relativ zum Projektverzeichnis
- location : Zeiger auf ein „MeasuringPoint“ - das Projektionszentrum des Bildes
- camera : Zeiger auf eine Kamera
- (optional) PhotoMeta : Zeiger auf Metadaten

Die Anwendung wird über `components.GeoSamt` gestartet. Es erscheint die Startmaske, mit der die einzelnen Komponenten der „GeoSamt“-Software angesteuert werden können (vgl. Abbildung B.1).

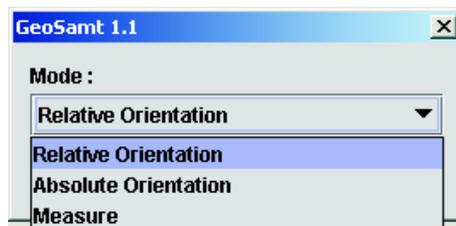


Abbildung B.1: Startmaske zur Auswahl der einzelnen Komponenten der „GeoSamt“-Software

Relative Orientierung

In der Maske „Relative Orientierung“ (vgl. Abbildung B.2 auf der nächsten Seite) können Paare von Photos gebildet und die relative Orientierung zu diesen Paaren bestimmt werden. Dazu müssen homologe Punkte in den beiden beteiligten Bildern markiert werden. Sobald drei solcher homologen Punkte markiert sind, schätzt das Programm eine relative Orientierung durch eine Ausgleichung. Mit jedem neuen homologen Punkt wird die Ausgleichung erneut durchgeführt.

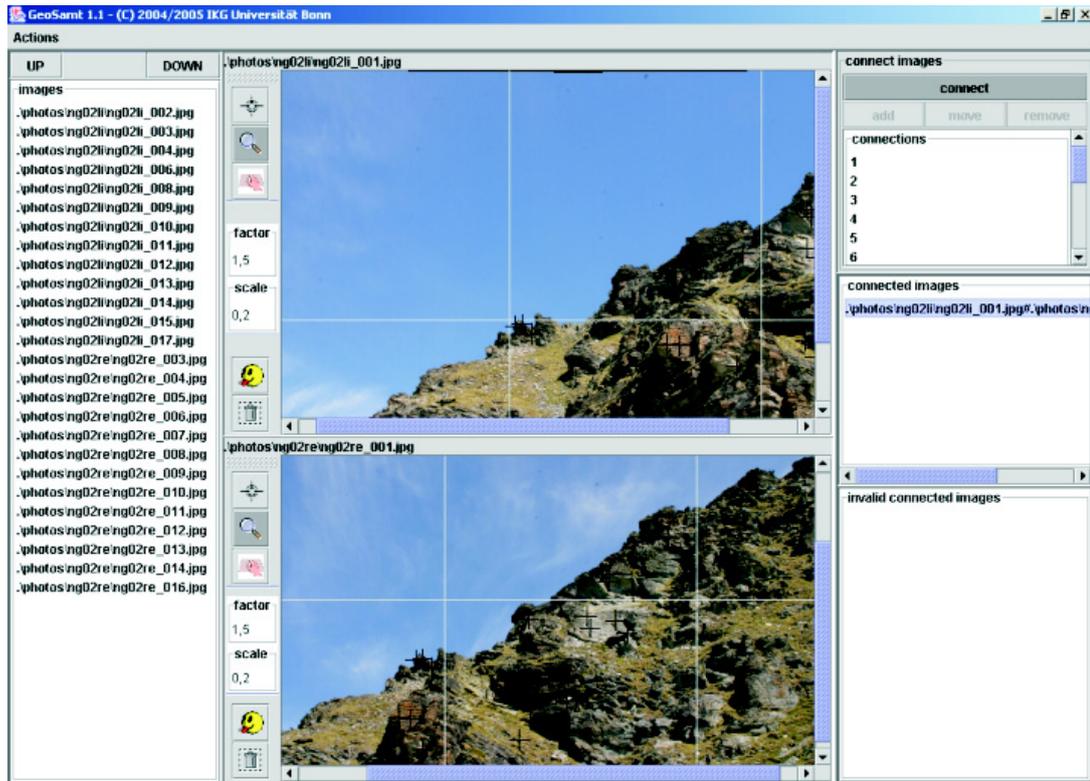


Abbildung B.2: Maske zur relativen Orientierung von Bildpaaren mit der „GeoSamt“-Software

Um ein Bildpaar zu bilden, werden die entsprechenden zwei Bilder mittels der Liste auf der linken Bildschirmseite in den oberen und unteren Bildbetrachter geladen. Sie werden durch Betätigung des connect-Buttons miteinander verknüpft, und in der Liste der „invalid connected images“ aufgenommen. Nach Markierung eines homologen Punktes in beiden Bildern wird dieser durch Betätigung des add-Buttons festgehalten. Alternativ kann auch mit der rechten Maustaste in eines der Bilder geklickt werden. Nach Bestimmung von drei homologen Punkten wird das Bildpaar in die Lister der „connected images“ aufgenommen.

Absolute Orientierung

In der Maske „Absolute Orientierung“ wird eine Bündeltriangulation mit den Bildpaaren durchgeführt. Hierbei werden die äußere Orientierung der Bilder sowie die Koordinaten der Passpunkte im Objektraum geschätzt, indem die vom Benutzer gemessenen Punkte im Objektraum den entsprechenden Bildpunkten zugeordnet werden. Hierzu wird in einem oder zwei Bildern ein gemessener Bildpunkt ausgewählt und mit einem entsprechenden Objektpunkt aus der Liste der „Measuring Points“ durch den add-Button verknüpft. Der gemessene Punkt erscheint nun in der Liste „already connected“. Sind alle Punkte markiert, kann die Bündelblockausgleichung durch Auswählen des Menüpunktes „Bündeltriangulation“ durchgeführt werden .

In der neuen Maske werden alle Bilder, die in die Ausgleichung einbezogen werden sollen, ausgewählt. Des Weiteren wird ein Name der Operation und die maximale Anzahl der Iterationen angegeben. Es folgt ein Klick auf den go-Button. Die Daten werden nun in .csv-Dateien (Comma-separated-value) exportiert. Nun muss zu MatLab gewechselt und die Routine start.m gestartet werden. Diese liest die Daten aus den .csv-Dateien und startet die Bündeltriangulation. Nach erfolgreichem Durchlauf exportiert MatLab die Resultate wiederum in .csv-Dateien. In GeoSamt muss das Durchführen der Bündelblockausgleichung durch Mausklick lediglich bestätigt werden. Die Resultate werden importiert und in der Datenbank abgespeichert.

Messen

Beim Starten der Mess-Maske muss die entsprechende Bündelblockausgleichung angegeben werden. Mit den Daten aus der gewählten Bündeltriangulation kann nun ein räumlicher Vorwärtsschnitt durchgeführt werden. Dazu werden wie im Falle der relativen Orientierung homologe Punkte markiert. Nach Klick auf den calculate-Button berechnet das Programm zu jedem homologen Punkt einen geschätzten Punkt im Objektraum und legt diesen in der Access-Datenbank in der Tabelle **Measurement** ab.

Anhang C: Datenbankdesign der „GeoSamt“-Software

Abbildung C.3 auf der nächsten Seite zeigt das Datenbankdesign, das hinter der „GeoSamt“-Software steht in UML-Notation. Die in Rot dargestellten Klassen, die in der Access-Datenbank als Tabellen implementiert sind, müssen vor dem Starten der Anwendung vom Anwender gefüllt werden. Die in Orange hinterlegten Tabellen können gefüllt werden.

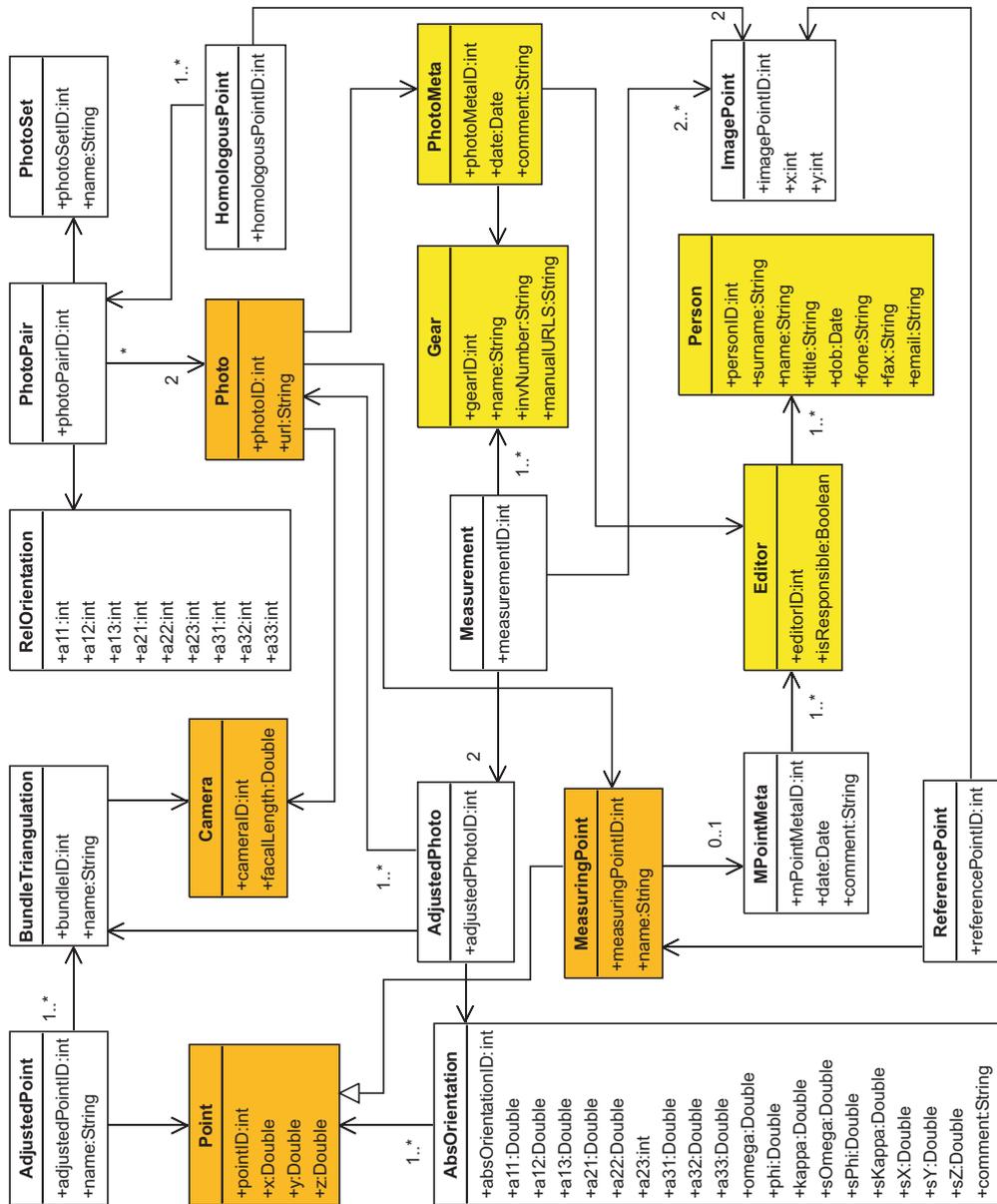


Abbildung C.3: Datenbankdesign der „GeoSamt“-Software in UML-Notation.

Anhang D: Verwendete Software

Die in dieser Arbeit verwendete Software, die zum Teil als freie Software (*engl.: freeware*) oder als ausgiebige Testversion (*engl.: shareware*) erhältlich ist, soll hier eine Würdigung erfahren:

Produkt	Verwendung	Vertrieb
ArcGis 9	Geoinformationssystem	http://www.esri-germany.de/
CorelDRAW 9	Graphikprogramm	http://www.corel.de
Eclipse 3.0	Editor für Java-Code	Als Freeware unter www.eclipse.org/
IrfanView	Bildeditor	Als Shareware unter www.irfanview.de/
JDeveloper10 ^g	Tool zur Erstellung von Oracle Spatial Datenbankschemata	http://www.oracle.com/global/de/index.html
Matlab 7.0	Numerisches Rechenprogramm	http://www.mathworks.com
Microsoft Access 2000	Datenbankmanagementsystem	http://office.microsoft.com/en-us/default.aspx
Miktex	Latex-Paket	Als Freeware unter http://www.miktex.org/
Oracle Spatial 9 ⁱ	Objekt relationales Datenbankmanagement System	http://www.oracle.com/global/de/index.html
Poseidon for UML Professional Edition	Tool zur Modellierung von UML	Auch als Shareware unter http://www.gentleware.com/index.php
TexnicCenter	Editor für Latex-Dokumente	Als Freeware unter http://sourceforge.net/projects/texniccenter/
TextPad	Texteditor	Als Shareware unter http://www.textpad.com/