

Datenbankunterstützung für geologische Anwendungen¹

Andreas THOMSEN, Martin BREUNIG, Wolfgang BÄR,
Armin B. CREMERS, Agemar SIEHL

1 Grundlagen

Der vorliegende Text befasst sich mit Fragen der Verwaltung von 3D-Geometriemodellen des Untergrundes in einem 3D-Geoinformationssystem für geologische und allgemeiner geowissenschaftliche Anwendungen. Geologische Geometriemodelle bilden eine der Grundlagen - etwa als „Randbedingungen“ - für weitergehende problemspezifische numerische und statistische Modellbildungen des Bergbaus, der Erdöl/Erdgasförderung, der Hydrogeologie und der Ingenieurgeologie. Ein wesentlicher Aspekt für das Arbeiten mit einem 3D-GIS ist die Datenmodellierung und die effiziente Datenbankunterstützung zur Verwaltung thematischer und räumlicher Daten. Hierzu muss das 3D-GIS in seinen Datentypen, seiner Datenbankanfragesprache, und seinen Indexen 3D-Objekte, deren Modellierung und Verwaltung, unterstützen. Weiterhin muss es die Formulierung von Integritätsbedingungen für 3D-Objekte, insbesondere die Geometrie oder Topologie der Objekte betreffend, erlauben. Schließlich müssen mittels einer eng oder lose gekoppelten 3D-Visualisierung räumliche Datenbank-Anfrageergebnisse visualisiert werden können.

1.1 Modellierung thematischer und räumlicher Geodaten

Geodaten umfassen sowohl räumliche als auch nicht-räumliche thematische Daten. Bis noch vor wenigen Jahren war die getrennte Modellierung beider Arten von Daten in Geographischen Informationssystemen (GIS) üblich. Thematische Daten wurden meistens in relationalen Datenbanksystemen gehalten. Räumliche Daten dagegen wurden meist nicht vom Datenbanksystem unterstützt, sondern in Dateien direkt vom Betriebssystem verwaltet. Dies bedeutete unter anderem, dass für die im Dateisystem gehaltenen räumlichen Daten keine Mehrbenutzerkontrolle, Crash Recovery oder automatische Integritätskontrolle vorgesehen war. Thematische und räumliche Daten mussten, da sie in zwei verschiedenen Systemen verwaltet wurden, durch einen komplexen Zeigermechanismus miteinander verknüpft werden. Erst während der Ausführung von Datenbankanfragen konnten thematische

¹ Die im Artikel genannten Anwendungsbeispiele stammen aus dem Sonderforschungsbereich SFB 350 „Wechselwirkungen kontinentaler Stoffsysteme und ihre Modellierung“ an der Universität Bonn, und dem Forschungsvorhaben „Geologische Kartierung mit GIS auf der Grundlage von 3D-Modellen“ an der Universität Bonn in Zusammenarbeit mit der Gravimetrie-Arbeitsgruppe an der FU Berlin unter Leitung von H.-J. Götze. Diese Vorhaben wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG gefördert. Das diesem Artikel zugrunde liegende Vorhaben „Weiterentwicklung von Geodiensten“ (<http://www.geoservices.fzg.uni-vechta.de>) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 03F0373B et al. gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

und räumliche Attribute zu „Objekten“ zusammengesetzt werden. Außerdem bewirkte die Schichtenarchitektur dieser GIS (sog. layer-based GIS), dass „Objekte“ (meist als features bezeichnet) stets einer Schicht (layer) zugeordnet werden müssen. Inzwischen basieren viele GIS vollständig auf DBMS, wobei zwischen dem objekt-relationalen Ansatz - einer Erweiterung des klassischen RDBMS - und dem objekt-orientierten Ansatz - der unabhängig von relationaler Datenbanktechnik die Verwaltung persistenter Objekte gleich welcher Art zum Ziel hat – zu unterscheiden ist.

Entwicklungen objekt-orientierter GIS zeigen den Vorteil der integrierten Modellierung thematischer und räumlicher Daten in benutzerdefinierten Klassen. Objekt-orientierte Modellierungstechniken wie die Unified Modeling Language (UML) (BOOCH et al. 1997) können als ein Rahmen dienen, um räumliche und thematische Daten in Geo-Objekten zu integrieren. Dabei können verschiedene Wege beschritten werden. Der erste ist die sog. *Aggregation*, bei der die Geometrie als ein Daten-Member (Teilobjekt) einer thematischen Geo-Objektklasse (*part-of-Beziehung*) modelliert wird. Alternativ hierzu kann eine thematische Klasse mit einer *Vererbungsbeziehung* als *Spezialisierung* einer räumlichen Geoklasse definiert werden. Das bedeutet, dass jede Klasse einer spezifischen Geo-Applikation die räumliche Funktionalität der räumlichen Geo-Objektklasse erbt und ihre eigenen spezifischen Daten-Member und Methoden hinzufügt. Somit kann die geometrische und topologische Beschreibung eines Geo-Objektes als integrierter Teil dieses Objektes in der Geodatenbank modelliert und verwaltet werden. Sie müssen daher – im Gegensatz zu traditionellen GIS – nicht mehr als separate Datenstrukturen behandelt werden. In Abbildung 1 ist ein einfaches Beispiel der beiden Modellierungsansätze gezeigt.

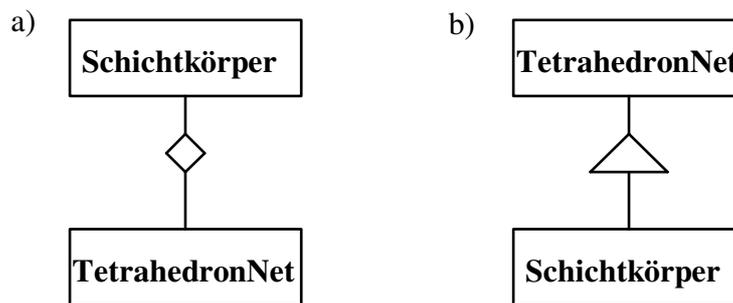


Abb. 1: a) Aggregation: Geometrieklasse *TetrahedronNet* als Teil der thematischen Klasse *Schichtkörper*.
 b) Vererbung: thematische Klasse *Schichtkörper* als eine Spezialisierung der räumlichen Klasse *TetrahedronNet*.

Außerdem können sog. Kollektionen von Geo-Objekten, die räumlich miteinander in Beziehung stehen, im objekt-orientierten Paradigma modelliert werden, um einen effizienten räumlichen Zugriff zu unterstützen. Eine Kollektion kann hierbei beispielsweise eine Menge von Geo-Objekten sein, auf der in der Datenbank gesucht werden kann. Der Fachexperte muss dann noch entscheiden, ob nicht-zusammenhängende Komponenten eines Geo-Objektes als eine Menge einzelner Objekte oder als ein einziges Objekt behandelt werden

sollten. Die Vorteile der objekt-orientierten Modellierung im Kontext Geographischer Informationssysteme wurden bereits von WORBOYS (1994) und von anderen Autoren wie DAVID et al. (1993) ausführlich diskutiert. Als hilfreiche „gemeinsame Sprache“ zwischen Geowissenschaftlern und Informatikern, wenn es darum geht, den Entwurf, die Anforderungen und die Dokumentation von Software im allgemeinen oder Datenbanken im besonderen zu beschreiben, dienen hierfür seit Jahren die graphischen Diagramme der UML.

1.2 Modellierung der Geometrie und Topologie im dreidimensionalen Raum

Die präzise Definition topologischer Beziehungen und geometrischer Operatoren zwischen Geo-Objekten kann als theoretische Basis dienen, um die Ausführung räumlicher Datenbankabfragen zu verstehen. Die minimale Menge topologischer Beziehungen zwischen einfachen Flächen im zweidimensionalen Raum von EGENHOFER (1989) können ebenso für Körper im dreidimensionalen Raum genutzt werden (CLEMENTINI & DI FELICE 1994). Die Definition räumlicher Operatoren durch die Topologie hat den Vorteil, dass nur der Rand und das Innere betrachtet werden muss. Die topologische Sicht abstrahiert so von Implementierungsdetails wie einzelnen Koordinaten oder der Exaktheit einzelner Punkte im Raum. Die relevanten topologischen Beziehungen zwischen Körpern im dreidimensionalen Raum sind *disjoint* (disjunkt), *meet* (Berührung von außen), *overlap* (Überlappung), *covers/coveredBy* (Berührung von innen), *inside* (innerhalb) und *equal* (gleich). Betrachtet man jedoch Objekte mit unterschiedlicher Dimension (zum Beispiel eine Fläche und einen Körper), so sind weitere räumliche Beziehungen von Interesse, wie z.B. die Berührung einer Fläche mit einem Körper in einem Punkt, einer Linie oder einer Fläche.

Obgleich es eine faszinierende Idee ist, von der Geometrie und Metrik zu abstrahieren und alternativ nur die Topologie zu benutzen, werden GIS-Nutzer natürlich immer auch Datenbankabfragen stellen wollen, die explizit die Geometrie der Objekte und eine Metrik voraussetzen.

Die in 3D-GIS benötigten und als abstrakte Datentypen bereitgestellten *räumlichen Datentypen* müssen also die Geometrie und Topologie von Geo-Objekten berücksichtigen. Diese können beispielsweise im Raster- oder Vektor-Modell realisiert sein.

1.3 Verwaltung von 3D-Geodaten

Räumliche Anfragen

Um räumliche Information in einem objekt-orientierten 3D-GIS abfragen zu können, müssen die 3D-Datentypen in der Anfragesprache des Datenbanksystems benutzt werden können. Das bedeutet, dass 3D-Prädikate und 3D-Operatoren in Datenbankabfragen eingesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür ist der Operator zur Verschneidung zweier Tetraedernetze. Ein solcher komplexer Operator liefert nicht nur eine boolesche Antwort, ob ein Schnittergebnis vorliegt oder nicht, sondern berechnet zusätzlich die Ergebnisgeometrie der Verschneidung beider Objekte. Hierbei kann durchaus eine Neuvermaschung erforderlich werden. Im Unterschied zur Schnittmenge zweier Relationen in einem RDBMS, die als Ergebnis entweder eine Relation vom gleichen Typ wie die Operanden, oder die leere Menge liefert, handelt es sich hier um eine komplexe geometrische Operation. Ihr Ergebnis kann je nach Lage der zu schneidenden Tetraedernetze unterschiedliche topologische Ei-

enschaften - z.B. Anzahl der Zusammenhangskomponenten – besitzen, und möglicherweise auch von anderer Dimension als die Eingabegeometrien sein (gemeinsame Teilfläche, Schnittlinien, Schnittpunkte). Dann kann das Ergebnis dieser Operation also von anderem geometrischen Typ sein als die Eingabegeometrien.

Räumliche Integritätsbedingungen

Neben der Formulierung der Datenbankabfragen selbst ist es wichtig, dass der Benutzer in einem 3D-GIS *räumliche Integritätsbedingungen* (integrity constraints) definieren kann, die vom System bei der Dateneingabe oder im laufenden Betrieb während der Ausführung von Datenbankabfragen automatisch überprüft werden. Die Nützlichkeit einer automatischen räumlichen Integritätsprüfung wurde schon von vielen Autoren hervorgehoben. Wir wollen hier insbesondere RAPER (1989), RHIND (1992), SIEHL (1993) und PLÜMER (1996) nennen. Räumliche Integritätsbedingungen überprüfen eine oder mehrere der folgenden räumlichen Beziehungen oder Eigenschaften:

- Existenz räumlicher Objekte;
- topologische Beziehungen zwischen Objekten (Nachbarschaftsbeziehungen etc.);
- metrische Beziehungen zwischen Objekten (z.B. Abstandsmaße);
- Richtungsbeziehungen zwischen Objekten (z.B. Himmelsrichtungen);
- die Beschreibung der Geometrie eines Objektes („Form“ mit Koordinaten der Hülle des Objektes);
- Zugehörigkeit einer Geometrie (Punkt, Kurve, Fläche, Körper etc.) zu einem Objekt.

Die konkret in einem 3D-GIS verwendeten Integritätsbedingungen hängen in der Regel von der jeweiligen Anwendung ab, in der sie benötigt werden. Es gibt jedoch auch räumliche Integritätsbedingungen, die unabhängig von einer speziellen Anwendung die Integrität der Implementierung des benutzten Geometrie- bzw. Topologiemodells überprüfen. Zum Beispiel kann die *Eulersche Charakteristik* in einem Triangle Irregular Network (TIN) benutzt werden, um die Korrektheit der Dreiecksvermaschung zu überprüfen: „Die Anzahl der Knoten plus die Anzahl der Dreiecke minus die Anzahl der Kanten muss gleich eins sein.“. Außerdem spielt die Überprüfung räumlicher Integritätsbedingungen eine zentrale Rolle bei der interaktiven geologischen Modellierung (SIEHL 1993). Ein Beispiel sind hier die Markierung bestimmter Punkte oder Kanten in einem TIN, die bei einer Neutriangulierung nicht verändert werden dürfen.

Effiziente räumliche Zugriffsmethoden

Räumliche Zugriffsmethoden (mehr-dimensionale Indexe) unterstützen die räumliche Selektion, d.h. sie selektieren solche Geo-Objekte aus einer großen Menge von Geo-Objekten, die durch ein räumliches Prädikat spezifiziert werden. Sie organisieren den Raum und die Geo-Objekte in einer Menge von Behältern, um die Menge der zu durchsuchenden Geo-

Objekte zu reduzieren, und somit die für das räumliche Retrieval erforderliche Zeit zu minimieren.

Man kann dabei zwischen sogenannten *sekundären* und *clusternden* Indexen unterscheiden. Die Sekundärindexe speichern nur eine Bounding Box als Approximationen der Objekte zusammen mit einem Zeiger auf die tatsächliche 3D-Geometrie ab. Cluster Indexe dagegen speichern die tatsächlichen 3D-Geometrien der Objekte direkt im Index ab.

Der *Octree* (SAMET 1990) bildet 3D-Objekte in einen eindimensionalen Code (z.B. Z-Code) ab, so dass eine Standard-Zugriffsmethode wie der *B-Baum* (BAYER & MCCREIGHT 1972) für seine Implementierung benutzt werden kann. Andere räumliche Zugriffsmethoden wie das *Grid File* (NIEVERGELT & HINTERBERGER 1984) transformieren n-dimensionale Geometrien in Punkte eines höherdimensionalen Raumes. Im Gegensatz hierzu speichert der *R-Baum* (GUTTMAN 1984) - als weiteres bekanntes Beispiel für räumliche Zugriffsmethoden - die Bounding Boxes der Geo-Objekte. Der R-Baum erlaubt die Überlappung der Bounding Boxes in allen Ebenen. In unterschiedlichen Varianten (z.B. *R+* oder *R*-Baum*) wird mittels verschiedener Strategien versucht, diese Überlappung zu minimieren, um eine effiziente Suche zu ermöglichen.

Typische räumliche Anfragen, die von räumlichen Zugriffsmethoden unterstützt werden, sind die Intersection- und die Containment-Anfrage. Die erstgenannte selektiert alle Geo-Objekte, die eine gegebene Anfragebox schneiden oder ganz in dieser liegen. Die zweite selektiert dagegen nur die Objekte, die komplett innerhalb der Anfragebox liegen. Ferner werden räumliche Zugriffsmethoden als Vorfilter für komplexe geometrische 3D-Operationen oder für die Beschleunigung von *Spatial Join* Berechnungen (BRINKHOFF et al. 1993) benötigt.

Integration von Geodaten

Die Integration von Geodaten wurde vor einigen Jahren als die große Herausforderung der GIS-Forschung erkannt, jedoch sind bis heute die vielschichtigen rechtlichen, ökonomischen, semantischen und datenbanktechnischen Probleme (z.B. Updates auf integrierten Daten) nicht gelöst. Lösungen zu semantischen Problemen der Datenintegration wurden beispielsweise schon von BREUNIG & PERKHOFF (1992) und von WORBOYS & BOFAKOS (1993) diskutiert. ABEL et al. (1994) und BREUNIG (1999) adressieren das System-Integrationsproblem für GIS auf der Datenbankschema-Ebene, indem sie das bekannte 3-Ebenen ANSI/SPARC-Referenzmodell für Datenbanksysteme erweitern. Die immer noch anzutreffende Koexistenz heterogener Datenformate in GIS erschwert allerdings weiter die Lösung des Datenintegrationsproblems.

2 Anforderungen geologischer 3D-Modelle des Untergrundes

Für *geologische* Informationssysteme gelten im Prinzip sehr ähnliche Anforderungen wie für klassische GIS, d.h. für *geographische* Informationssysteme. Schließlich werden hier wie dort Informationen gespeichert und verarbeitet, für welche traditionell die Darstellung durch Karten und Profile typisch ist. Bei näherem Hinsehen zeigen sich jedoch charakteristische Unterschiede: die Ausgangsdaten für geologische Informationen sind notwendiger-

weise unvollständig, und deshalb basieren geologische Modelle des Untergrundes immer auf Schätzungen, geologischer Interpretation und Hintergrundwissen. Vor allem aber sind die betrachteten geometrischen Objekte dreidimensional und lassen sich im allgemeinen nicht ohne Informationsverlust auf die 2- oder 2.5-dimensionalen Darstellungen klassischer GIS reduzieren.

2.1 Voraussetzungen

Bereits die geologischen Basisinformationen weisen eine beachtliche Vielfalt auf. Diese reicht von an Aufschlüssen oder im Bergbau entnommenen Proben und photographischen Aufnahmen über Bohrkerne und Bohrlochmessungen bis zu 2D- und 3D-Seismik. In jedem Falle müssen die so gewonnenen Daten erst interpretiert werden, bevor sie in ein geologisches Modell eingebracht werden können. Mit Ausnahme von 3D-Seismik ist das von den Basisdaten abgedeckte Gebiet verschwindend klein im Vergleich zum Modellgebiet. Daher werden Schätz- und Simulationsverfahren angewendet, um ein flächendeckendes Bild zu erlangen. Dieses weist wiederum weit größere Ungenauigkeiten auf, als z.B. ein auf Satellitenaufnahmen beruhendes Modell der Bodennutzung. Andererseits können seismische Daten erst nach geowissenschaftlicher Interpretation in ein geologisches Modell eingebracht werden – auch hier liegt eine Quelle für Unsicherheiten und Ungenauigkeiten des erzeugten Modells vor. Hinzu kommt die Unsicherheit der Ansprache und Klassifizierung der aufgenommenen Daten, die teilweise selbst erst durch Rückgriff auf das in der Entstehung begriffene Modell gelöst werden kann. Diese Unsicherheiten und Ungenauigkeiten sind bei geologischen Modellen unvermeidlich, und führen dazu, dass man in einem geologischen Informationssystem nicht einfach einen bekannten, höchstens noch zu verbessernden und fortzuschreibenden *Tatbestand* speichert, sondern ein *Modell* – oder eventuell sogar verschiedene konkurrierende Modelle –, die das Ergebnis komplexer Überlegungen, Konstruktionen und Berechnungen sind. Aufgaben einer Datenbank für geologische Anwendungen umfassen neben der Verfügbarmachung der Ergebnisse der geologischen Modellbildung auch die Unterstützung des Geowissenschaftlers beim Aufbau eines komplexen 3D-Modells, und die Unterstützung der Fortschreibung eines sich in der Zeit entwickelnden Untergrundmodells - etwa in der Bergbauplanung.

Bei naiver Betrachtung ist ein 3D-GIS "nichts weiter" als eine Erweiterung eines klassischen GIS um eine weitere Dimension – auch wenn wir gesehen haben, dass die Aufgabe, den weitgehend unzugänglichen Untergrund zu modellieren, ganz neue Unsicherheiten ins Spiel bringt. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass der Übergang von zwei auf drei Dimensionen eine Vielfalt neuer Fragen und Probleme mit sich bringt, welche schon in der Geometrie und Topologie begründet sind - einige Beispiele sollen dies klarmachen.

2.2 Geometrische und topologische Datenstrukturen

Für eine ausführlichere Betrachtung verweisen wir auf die Beiträge „Räumliche Repräsentationen“ und „Räumliche Operationen“ in diesem Band.

Im Vergleich zur Anzahl der üblichen Strukturen zur Darstellung von 2D-Objekten in der Ebene besteht im 3D eine weit größere Vielfalt: neben regelmäßigen und hierarchischen Gittern (Octrees) werden Simplizial-Komplexe, und eine Vielfalt von Techniken der Randdarstellung (Boundary Representation/BRep) verwendet, ergänzt in den letzten Jahren

durch die Generalized Maps (GMaps) für die einheitliche Repräsentation topologischer Beziehungen (LEVY 1999, MALLET 2002). Dagegen spielen Verfahren der Constructive Solid Geometry (CSG) in geologischen Anwendungen keine besondere Rolle, da die hier untersuchten geometrischen Körper im allgemeinen sehr unregelmäßig geformt sind. Die geometrische 3D-Modellierung zeichnet sich ebenfalls aus durch eine größere Vielfalt und Komplexität der geometrischen und topologischen Beziehungen und Operationen. Man vergleiche etwa die möglichen Fälle der Lage zweier Dreiecke (2D-Simplexe) in der Ebene zueinander mit den möglichen Konfigurationen zweier Tetraeder (3D-Simplexe) im Raum. Entsprechend vielfältig sind die möglichen Ergebnisse einer Schnittoperation zweier 3D-Simplexe.

3D-Raster

Während im 2D etwa in einem 1000x1000-Raster eine Million Zellen effizient verarbeitet werden können, wie man an jedem besseren PC-Bildschirm beobachten kann, würde ein 3D-Raster mit entsprechender Intervalleinteilung der Seiten eines Quaders eine Milliarde Zellen besitzen, deren Verwaltung heute immer noch einen gewissen Aufwand darstellt. Mittels hierarchischer Gitter, wie z.B. Octrees, können auch umfangreiche 3D-Geometrien in Rasterdarstellung effizient verarbeitet werden. Allerdings kann die Unregelmäßigkeit der Formen geologischer Körper, sowie ausgeprägte Anisotropien etwa von sedimentären Schichtkörpern Probleme für deren Approximation durch 3D-Raster verursachen. Deshalb werden z.B. in GOCAD (MALLET 1992) deformierbare Gitternetze, sogenannte *Stratigraphic Grids* als Modellierwerkzeug angeboten, welche sich dem Schichtenverlauf anschmiegen können. Die so beschriebenen geometrischen Strukturen lassen sich zwar wie regelmäßige Gitter durchlaufen, benötigen jedoch zusätzlich für jeden Gitterknoten eine explizite Angabe der Koordinaten im Raum.

3D-Netze

Neben der Frage der steigenden Anzahl elementarer Objekte tritt im Vergleich zu den 2D-Netzen noch das Problem der wachsenden Komplexität der Datenstrukturen im dreidimensionalen Raum auf. Im zweidimensionalen Raum kann z.B. eine Einteilung eines ebenen Rechtecks in Zellen durch einen planaren Graphen erfolgen, dessen Zyklen gerade die einzelnen Zellen umranden. Der dazu duale Graph definiert dann die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Zellen. Eine hierzu analoge Einteilung eines 3D-Quaders in 3D-Zellen kann nicht nur aus Knoten und Kanten bestehen, sondern muss auch die Grenzflächen der Zellen umfassen. Beim Übergang zum Nachbarschaftsgraphen wird dann jeder Grenzfläche eine Kante zwischen benachbarten Zellen zugewiesen. Die so entstehende Struktur ist offensichtlich weit komplexer als ihr Analogon im 2D.

2.3 Ergebnisdarstellung, interaktive Geometriemodellierung

Die größere Komplexität von 3D-Modellen resultiert in einer Vielfalt von speziellen, anwendungsspezifischen Werkzeugen zur Kommunikation mit dem Bearbeiter. Diese reichen vom Computer Aided Design (CAD) bis zur Virtual Reality (VR), und neuerdings zur "Augmented Reality", der Überlagerung von VR mit der realen Welt im Gesichtsfeld des

Betrachters. Der Umfang der möglichen Operationen und Parameter zur Manipulation eines 3D-Modells ist so groß, dass eine problemspezifische Auswahl, ergänzt durch spezielle Verfahren des Fachgebietes (z.B. geostatistische Schätzverfahren, oder die sog. Discrete Smooth Interpolation/DSI) (MALLETT 2002) notwendig ist – welche letztlich zu problem-spezifischen Geometrie-Modellierwerkzeugen führt. Daneben sind klassische Verfahren der Projektion (Kartendarstellung) und Schnittbildung (geologische Profile) weiterhin notwendig, die eine traditionelle Ergebnisdarstellung ermöglichen.

Werkzeuge zur geowissenschaftlichen 3D-Modellierung sind z.B. GOCAD (Earth Decision Sciences), Z-MAP Plus (Landmark), SURPAC (Surpac Minex Group), GeoQuest (Schlumberger) und LYNX (Lynx Geosystems). Je nach ursprünglicher Zielanwendung verwenden diese Werkzeuge unterschiedliche Modellstrukturen und unterschiedliche Verfahren zur Modellkonstruktion. Daneben werden auch klassische CAD-Werkzeuge (z.B. Microstation, AutoCAD) mit speziellen Erweiterungen eingesetzt. Spezifische Werkzeuge zur Weiterverarbeitung und Auswertung geologischer Geometriemodelle stellen ebenfalls unterschiedliche Anforderungen an die Datendarstellung und an deren Eigenschaften, z.B. Finite Elemente-Modelle der Hydrogeologie, oder gravimetrische Modellierung.

Eine Datenbank zur Verwaltung geologischer 3D-Modelle befindet sich also in einem heterogenen Umfeld von Anwendungen und interaktiven Modellierwerkzeugen, mit welchen räumliche und thematische Ausschnitte aus einem umfangreichen Bestand an Geometrie-Daten auszutauschen sind. Zusätzlich zu Datenaufnahme, Änderung und Abfrage sind deshalb auch Datentransformationsdienste erforderlich.

2.4 Zeitabhängigkeit von Geometrie-Modellen

Zeitabhängigkeit tritt im 3D-GIS in zwei verschiedenen Formen auf. Zum einen befindet sich jedes 3D-Modell in einem jeweils aktuellen Bearbeitungszustand, welcher fortzuschreiben ist. Dies entspricht weitgehend einem normalen Datenbank-Update, abgesehen von der möglichen Reichweite der Konsequenzen z.B. punktueller Änderungen. Allerdings kann die Dauer der Bearbeitung eines 3D-Modells die Unterstützung sehr langer Transaktionen erfordern. Hier erweisen sich klassische Locking-Mechanismen als ungeeignet, stattdessen wird die koordinierte Verwaltung unterschiedlicher *Versionen* (Versionsmanagement) notwendig, um verschiedene Bearbeitungszustände darzustellen.

Daneben existieren explizit zeitabhängige 3D-Modelle, auch als 4D-Geometrie-Modelle bezeichnet. Tatsächlich bildet hier die Zeit t neben den 3 räumlichen Dimensionen einen unabhängigen Parameter, welcher ein veränderliches 3D-Modell kontrolliert. Zeitabhängige 3D-Modelle können als Ergebnisse einer numerischen Prozessmodellierung, oder aus der geologischen Rückformung gestörter und gefalteter Strukturen entstehen, aber auch z.B. aus in kurzen Zeitabständen gemessenen aktuellen Bewegungen und Verformungen eines geologischen 3D-Körpers. Die graphische Darstellung erfolgt z.B. durch Keyframe-Animation, welche die Verwaltung einer u.U. sehr großen Menge von Zeitschritten erfordert. Schließlich benötigen raum-zeitliche Abfragen spezifische Prädikate und Operatoren, und stellen neue Konstruktionsaufgaben im 4D.

2.5 Interoperabilität und Datenübertragung

Im Bereich der 2D-GIS haben sich in den letzten Jahren eine Reihe von Standards – getragen durch das Open GIS Consortium (OGC²) – etabliert und werden mittlerweile von vielen kommerziellen Herstellern unterstützt. Hier kann im Bereich Interoperabilität die Geographic Markup Language (GML), im Bereich Datenübertragung die Spezifikationen für den Web Map Service (WMS) und Web Feature Service (WFS) und im Bereich der Standardisierung von Anfragen die Spezifikationen der Simple Features for SQL (SFS) und die Filter Encoding Language genannt werden. Mittlerweile sind für 2D-GIS kommerzielle Geo-Datenbanksysteme auf dem Markt, die einen einheitlichen Zugriff über die Simple Features for SQL ermöglichen und die Geodaten im GML 2 Format ausliefern können.

Dagegen ist die Standardisierung von 3D-Geometrie-Modellen und Schnittstellen zu 3D-Geodatenbanksystemen für geologische Anwendungen noch nicht weit fortgeschritten. Kennzeichnend für dieses Gebiet sind Diversität und geringer Marktumfang – dementsprechend existiert kein vergleichbares Angebot an kommerziellen DB-Komponenten.

Mit der auf dem ISO Spatial Schema basierenden Version 3 der Geographic Markup Language hat das OGC seine XML-Datenbeschreibungssprache auch für die Unterstützung der 3. Dimension erweitert. Während mit dieser Erweiterung viele Anwendungen (z.B. 3D-Stadtmodelle) unterstützt werden können, ist die Spezifikation noch ein gutes Stück von einer Verwendbarkeit in geowissenschaftlichen Anwendungen entfernt. Insbesondere unterstützt auch die Version 3 keine Simplizial-Komplexe, da keine Tetraeder als primitive Körper spezifiziert sind. Die eXploration and Mining Markup Language (XMML) (COX 2001) ist beispielsweise eine Erweiterung von GML hin zu den Anforderungen geowissenschaftlicher Anwendungen. Sie bietet weitere Schemata beispielsweise zur Modellierung von Körpern durch Zellzerlegung (Tetraeder-Komplexe) oder für spezifische Objekte wie Bohrungen an.

Weitere und andere Ansätze für Interoperabilität von 3D-Geo-Objekten werden von POSC (Petrochemical Open Standards Consortium) (<http://www.posc.org>) unterstützt. Daneben bietet z.B. die Firma Schlumberger mit GeoQuest eine Plattform zur Integration unterschiedlicher 3D-Geo-Modellierwerkzeuge an.

Viele 3D-Modellierwerkzeuge besitzen eigene Datenformate, die z.T. weitere Verbreitung finden. So wird z.B. das bekannte AUTOCAD Data Exchange Format (DXF) von einer großen Zahl von Anwendungen unterstützt. Dies beruht nicht zuletzt auf der Erweiterbarkeit des Datenformats wie der AUTOCAD-Software selbst. Dagegen bietet z.B. GOCAD ein einfaches und intuitives proprietäres Ascii-Datenaustauschformat, welches allerdings auf die Objektklassen der GOCAD-Software beschränkt ist.

Aufgrund der derzeitigen Beschränkungen bei Volumenmodellen in GML und der Vielzahl an existierenden Datenformaten wurde im Projekt "GeoDienste" (BREUNIG et al. 2003) ein eigenes XML-Datenformat entwickelt. Dieses Format ermöglicht die vollständige Beschreibung der Datenmodelle des Datenbanksystem, z.B. von simplizialen Komplexen mit ihrer internen Topologie. Ziel dieses XML-Formates für das 3D-Datenbanksystem ist es, andere beliebige Datenformate hieraus durch eine Transformation über XSLT zu erzeugen,

² OGC – www.opengis.org

ohne dass Modifizierungen an dem Geo-Datenbanksystem notwendig sind. Derzeit wird über diesen Ansatz das Format VRML zur Verfügung gestellt. Eine Erweiterung hin zu anderen XML- und Ascii-Formaten wie z.B. XMML, X3D oder GOCAD ASCII ist damit problemlos möglich. Allerdings wächst der Datenumfang mit einem (lesbaren) XML-Format gegenüber proprietären Datenformaten wie z.B. GOCAD ASCII oder binären Datenformaten stark an, doch kann dem u.U. durch Einsatz von allgemeinen Datenkompressionsverfahren entgegengewirkt werden.

Neben dem zu übertragenden Datenformat spielt auch die Auflösung und Detaillierung der zu übertragenden Daten eine große Rolle. Je nach Leistungsfähigkeit der verwendeten Rechner im Client-Server-Betrieb soll - z.B. bei mobilen Clients - der Umfang der übertragenen Daten möglichst reduziert werden. So kann z.B. ein Client zuerst eine Übersicht mit geringer Auflösung anfordern, um anschließend in einen ausgewählten Ausschnitt "hineinzuzoomen" und hier einen höheren Level of Detail abzufragen. Hier können Techniken der *progressive transmission* (HOPPE 1996) eingesetzt werden, um Redundanz bei der Übertragung zu vermeiden.

3 Beispielimplementierungen für 3D-GIS und Anwendungen

Aus Gründen eines effizienten Mitteleinsatzes ist es sinnvoll, als Basis für die Entwicklung eines 3D-Geometrie-Datenbanksystems für geowissenschaftliche Anwendungen eine kommerzielle Datenbanksoftware zu verwenden.

Während die Implementierung persistenter Objektklassen für Geometriemodelle mit *objekt-orientierten* Datenbanksystemen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten bereitet, erfordert die Verwendung *objekt-relationaler* Datenbanksysteme aufgrund des sog. "Impedance mismatch" der Repräsentationen jeweils einen Transformationsschritt zwischen transientem Objekt und persistenter objekt-relationaler Darstellung im DBMS. Vor allem bei den komplexen Datenstrukturen für 3D-GIS führt dies zu einem deutlich erhöhtem Entwicklungsaufwand. Ein Vorteil hierbei ist allerdings die weite Verbreitung von objekt-relationalen Datenbanksystemen wie z.B. Oracle, DB2, Informix und PostgreSQL.

Im Folgenden beschränken wir uns hier auf Anwendungen aus der Geologie und geben Beispiele für Implementierungen von 3D-GIS, welche aus dem Bonner Sonderforschungsbereich 350, aus dem DFG-Projekt „InterOperable GIS/3D-Karte“ und aus dem im BMBF-Sonderprogramm „Geotechnologien“ eingegliederten Verbundprojekt „Weiterentwicklung von Geodiensten“ stammen.

3.1 GeoStore/GeoToolKit

Zur Verwaltung von geologischen 3D-Modellen wurden am Bonner Institut für Informatik III das 3D-GIS GeoStore (BODE et al. 1994) und die dazugehörige Bibliothek GeoToolKit (BALOVNEV et al. 2004) entwickelt. Dieses 3D-GIS GeoStore wurde hierbei mit verschiedenen geologischen und geophysikalischen Client-Programmen in Bonn und an der FU Berlin verbunden. Das zugrundeliegende GeoToolKit unterstützt die Verwaltung von persistenten 3D/4D-Geo-Objekten auf der Basis des kommerziellen OODBMS ObjectStore.

Räumliches Datenmodell

Abbildung 2 zeigt die Beziehungen zwischen den Klassen des räumlichen GeoToolKit-Objektmodells. Auf der konzeptuellen Ebene ist ein *spatial object* als eine Menge von Punkten definiert. Alle elementaren mengen-orientierten Operationen (*equality*, *containment*, *intersection*, *union*, etc.) können für räumliche Objekte angewandt werden. In der Praxis jedoch verwenden Applikationen oft nur Submengen räumlicher Objekte wie Liniensegmente, Dreiecke oder Kombinationen von ihnen. Alle Operationen werden von jeder Klasse unter Berücksichtigung der jeweiligen konkreten Repräsentation re-implementiert. Auf der Implementierungsebene ist das objekt-orientierte Datenmodell auf eine C++ Klassenbibliothek abgebildet.

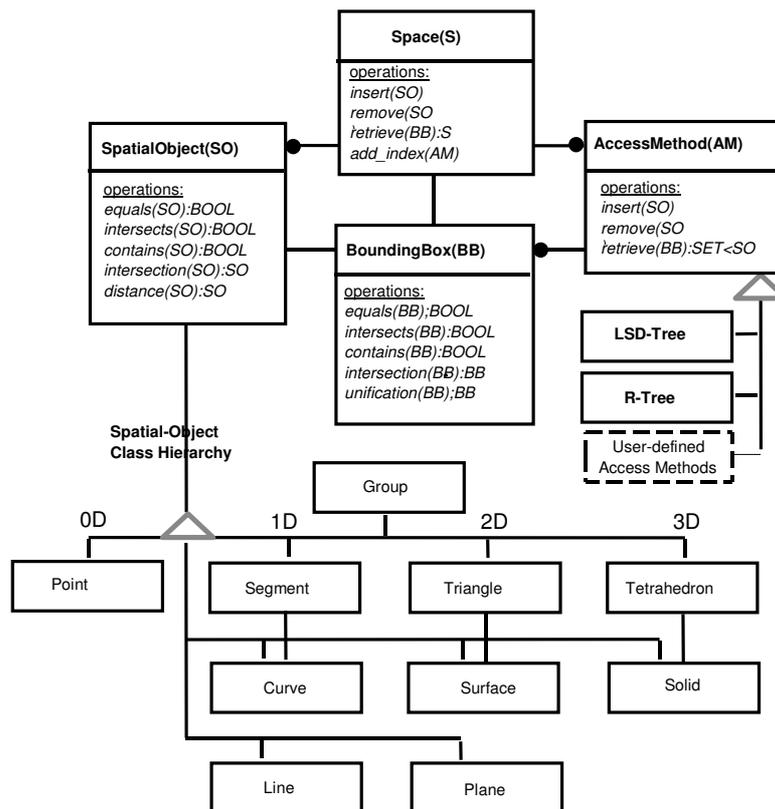


Abb. 2: Räumliches Datenmodell von GeoToolKit

GeoToolKit beinhaltet nur solche räumliche Operationen, die für die interaktive geometrische Modellierung benötigt werden (SIEHL 1993). Es kann jedoch beispielsweise um geowissenschaftliche oder geographische Klassen erweitert werden. Die Klassenhierarchie besteht aus Klassen zur Repräsentation von 0D-3D räumlichen Simplex (*point*, *line*, *triangle*, *tetrahedron*) und 1D-3D Komplexen (*curve*, *surface*, *solid*), die als homogene

Kollektionen der korrespondierenden Simplexe der gleichen Dimension repräsentiert sind. Räumliche Objekte verschiedener Typen können in einer heterogenen Kollektion, der sogenannten *group*, kombiniert werden. Eine *group* wird fortan als ein einziges Objekt behandelt. Typische topologische Beziehungen in GeoToolKit zwischen räumlichen Objekten sind *equals*, *intersects* und *contains*. 3D geometrische Operatoren schließen geometrische *distance*-Operatoren und *intersection*-Operatoren ein, beispielsweise implementiert für Flächen und Körper.

Die Klassen einer speziellen 3D geologischen Anwendung können leicht von den räumlichen Basisklassen des GeoToolKits erben. Die geometrische Beschreibung der Geo-Objekte ist also klar von der thematischen Information getrennt.

Erweiterbare Datenbankfunktionalität

Im GeoToolKit ist ein sog. *space* (Raum) eine spezielle Container-Objektklasse, die das effiziente, exakte oder approximierende Retrieval seiner Elemente nach ihrer Lage im Raum ermöglicht. Das approximierende Retrieval ist mit der Hilfe räumlicher Intervalle realisiert. Ein Intervall im Kartesischen 3D Koordinatensystem (Bounding Box) ist definiert als ein Quader mit achsenparallelen Flächen. Um nun ein effizientes Retrieval zu erreichen, sollte ein Raum einen räumlichen Index besitzen. Der Nutzer des GeoToolKits kann verschiedene räumliche Indexe verwenden: einen R-Baum (GUTTMAN 1984) für den rein räumlichen und einen LSD-Baum (HENRICH et al. 1989) für den gemischten räumlichen und thematischen Zugriff. Wenn kein Index mit einem Raum assoziiert ist, wird der Raum sequentiell durchsucht. Unter der Annahme, dass jedes räumliche Objekt eine Bounding Box besitzt, ist im GeoToolKit das Interface für die räumlichen Zugriffsmethoden auf drei Basisoperationen reduziert: *insertion*, *removal* und *retrieval* einer Menge räumlicher Objekte. Mit der Vererbung dieses Interfaces von der abstrakten *AccessPath*-Klasse kann jede beliebige benutzerdefinierte Zugriffsmethode an einen Raum gebunden werden. Damit ist das GeoToolKit erweiterbar für neue räumliche Zugriffsmethoden.

3.2 Geodienste

Ein ähnliches Konzept wird im Projekt "GeoDienste" (BREUNIG et al. 2003, 2004) verfolgt: Auf der Grundlage eines kommerziellen OODBMS wird ein Geodatenserver für 3D-Geodienste entwickelt, welcher insbesondere mobile Endgeräte unterstützen soll. Im Unterschied zu GeoStore/GeoToolKit ist dieser 3D-Geodatenserver von vornherein auf Interoperabilität und mobilen Zugriff ausgerichtet. Als Programmiersprache wird Java verwendet, der Datenaustausch erfolgt über XML und der mobile Zugriff wird über eine Dienst-Architektur unterstützt.

Der 3D-Geodatenserver setzt sich aus mehreren Schichten zusammen. Auf der untersten Ebene erfolgt die Verwaltung von 3D-Geometrie-Objekten und thematischen Daten in einem 3D-Geodatenbanksystem auf der Basis des OODBMS ObjectStore. Auf diesem 3D-Geodatenbanksystems beruht eine Bibliothek zur Implementierung von komplexeren Operationen auf dem persistenten Objektmodell, das von dem Datenbanksystem zur Verfügung gestellt wird. Die Bereitstellung von Funktionalität für beliebige externe Clients erfolgt durch spezifische Dienste über eine Dienstarchitektur.

Ausgehend von Erfahrungen mit "GeoStore/GeoToolKit" und mit dem Modellierwerkzeug GOCAD erfolgt die geometrische und thematische 3D-Geometriemodellierung auf der Grundlage von simplizialen Komplexen und wahlweise von Volumenmodellen in Randdarstellung. Dabei können Geometrie-Objekte zusätzlich mit thematischen Attributen für ihre Simplex-Geometrien versehen werden. Räumlicher Zugriff wird durch R-Bäume unterstützt. Zusätzlich zu einem Kern von Geometrie-Operationen erlauben spezielle 3D/2D-Transformationsdienste die Ableitung von 2D-Darstellungen aus dem 3D-Modell (Schnitte und Projektionen) und unterstützen damit eine Koppelung des 3D-Datenbanksystems mit einem 2D-GIS. Zukünftig ist eine Erweiterung der unterstützten Datenmodelle auf 3D-Zellkomplexe und zeitabhängige Geometrien vorgesehen.

4 Geologische Anwendungsbeispiele

Wie bereits oben bemerkt, erfordert die geowissenschaftliche 3D-Modellierung je nach Aufgabenstellung den Einsatz besonderer, problemspezifischer Verfahren und oftmals sehr komplexer Modellierwerkzeuge. Deshalb ist die Realisierung eines „Standard“-3D-Geoinformationssystems (d.h. inkl. standardisiertem Datenmodell, Verwaltung, Analyse und Visualisierung) des Untergrundes zur Zeit nicht realistisch. Während manche Modellierwerkzeuge sehr unterschiedliche geowissenschaftliche Verfahren integrieren, wie z.B. interaktive geologische 3D-Modellierung, Geostatistik und seismische Interpretation in GOCAD, erscheint den Autoren das Konzept eines verteilten, offenen und interoperablen Systems aus miteinander vernetzten 3D-Datenbanken, Modellier- und Visualisierungswerkzeugen und anderen aufgabenspezifischen Clients erfolgversprechender. Die Vorteile sind Skalierbarkeit - nur was tatsächlich gebraucht wird, wird eingesetzt -, Offenheit - neue Werkzeuge können möglichst ohne Veränderung bestehender Komponenten hinzugefügt werden -, Interoperabilität - mit möglichst geringem Aufwand können bestehende Werkzeuge in das Rechnernetz eingefügt - und schließlich die Möglichkeit, ortsfeste und mobile Komponenten zu koppeln. Selbstverständlich sollten auch die klassischen Datenbankmerkmale wie Mehrbenutzerzugriff, Konsistenzüberwachung, Datensicherheit etc. realisiert sein. Die folgenden Beispiele aus Forschungsprojekten in Bonn, Berlin (FU) und Vechta sollen diese Aspekte der Koppelung von Modellierwerkzeugen und 3D-Datenbanken näher erläutern.

4.1 Kopplung zweier kinematischer 3D-Modelle in der Niederrheinischen Bucht mit dem 3D-Geoinformationssystem Geostore

Kinematisches 3D-Modell GeoDeform der Erftscholle und 3D-Geoinformationssystem GeoStore/GeoToolKit

Im Rahmen des Bonner DFG-Sonderforschungsbereichs 350 wurden am Institut für Geologie mehrere kinematische 3D/4D-Modelle zur Untersuchung von Bewegungsvorgängen bei der Entstehung der Niederrheinischen Bucht erstellt. Hierfür wurde ein großräumiges volumenbilanziertes kinematisches Modell der Erftscholle erstellt (s. Abb. 3), welches die Bewegung und Verformung seit dem Oligozän von mehreren Schichtgrenzflächen an einigen Störungen wiedergab. Schichtgrenzen und Verwerfungen wurden dabei durch dreiecksvermaschte Flächen (simpliziale 2-Komplexe) im Raum dargestellt. Mit einem im

Projekt entwickelten (ALMS et al. 1997, 1998) auf 3D erweiterten *Inclined Simple-Shear*-Verfahren (WHITE et al. 1986) wurden aufeinander folgende Zustände des Modells als Sequenz von *Keyframes* dargestellt, die in einem sog. Zeitszenenbaum (POLTHIER & RUMPF 1994) verwaltet werden. Jedes einzelne Keyframe ist dabei ein eigenes 3D-Modell zu einem Zeitpunkt t_i . Für einen beliebigen Zeitpunkt t im Intervall $]t_i, t_{i+1}[$ wird der Zustand des Modells durch Interpolation der Koordinaten erzeugt. Voraussetzung hierfür ist, dass sich die Vermaschung zwischen benachbarten Keyframes nicht ändert. Dieses *kinematische Modell* wurde mit dem im Projekt entwickelten Programm *GeoDeform* unter Einsatz der im SFB 256 am Institut für angewandte Mathematik entwickelten Software GRAPE – Graphics Programming Environment (GRAPE 1999) aufgebaut und visualisiert.

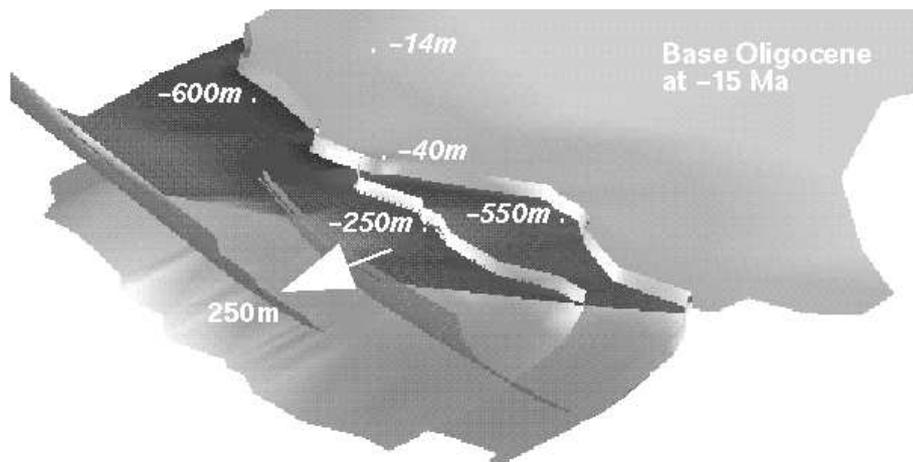


Abb. 3: Kinematisches Modell der Erftscholle (ALMS et al. 1998). Dargestellt ist die Basis des Oligozäns vor 15 Millionen Jahren, sowie zwei listrische Antitheter-Störungen und eine listrische Syntheter-Störung. Der Pfeil gibt die Richtung der Extension an. Darstellung mittels der Graphik-Bibliothek GRAPE.

Das geologische Werkzeug *GeoDeform* wurde über Basis-Kommunikationsdienste (Unix-Sockets) mit *GeoStore* verbunden, so dass der Geologe die Ergebnisse in die Datenbank einlagern und nach geometrischen (Lage) und thematischen Kriterien (Schichtgrenze, Störung) abfragen konnte. Hinzu besteht die Möglichkeit, gezielt Modellzustände, sogenannte *Keyframes*, zu definierten Zeitpunkten auszuwählen. Abgefragte Objekte konnten mittels einer Visualisierungskomponente über X-Windows am Client graphisch dargestellt werden, während für die animierte Darstellung des kinematischen Modells am Client wieder *GeoDeform*/*GRAPE* benutzt wurde.

Bei der Nutzung ergeben sich analog zu klassischen Datenbanken die folgende Sequenz von Bearbeitungsschritten:

- Aufnahme der Ausgangsdaten - hier nicht weiter behandelt

- interaktiver Aufbau verschiedener Zustände eines zeitabhängigen 3D-Modells durch den Geowissenschaftler mittels des Modellierwerkzeuges GeoDeform (Client)
- Einlagerung in die 3D/4D-Datenbank GeoStore (Client -> Server)
- Vorhaltung des zeitabhängigen 3D-Modells in GeoStore (Server)
- Abfrage nach thematischen, räumlichen und zeitlichen Kriterien (Server -> Client)
- Auswertung und Darstellung in GeoDeform (Client)

Während hier die Interaktion nur zwischen einem Client und einem Server stattfindet, ist es selbstverständlich möglich, eine Abfrage- und Darstellungskomponente aus dem Modellierwerkzeug GeoDeform herauszulösen, um Abfrage, Darstellung und Auswertung für Dritte zugänglich zu machen, ohne ihnen die Möglichkeit zu geben, das Modell zu verändern.

Kinematisches 3D-Modell „Tagebau Bergheim“ und 3D-Geodatenbanksystem auf der Basis von GeoToolKit

Im Gegensatz zum großräumigen kinematischen Modell der Erftscholle aus dreiecksvermaschten 3D-Flächen wurde ein zweites, kleinräumiges Modell (ca. 2 km Durchmesser) des *Tagebaus Bergheim* von vornherein als Volumenmodell in Randdarstellung als sog. GOCAD-Model3D konzipiert. Ziel des kinematischen Modells Bergheim war die detaillierte Untersuchung der Bewegungen an einer größeren Anzahl (ca. 100) Störungen auf engem Raum. Hierbei wurde das Arbeitsgebiet als ein System von mehreren hundert, in bis zu zehn Schichten eingeteilten Volumenblöcke dargestellt, die durch die Verwerfungen und durch künstliche Grenzflächen getrennt waren (Abb. 4). Zur Rekonstruktion der Bewegungen der Blöcke wurde das Verfahren der palinspastischen Rekonstruktion in der Kartenebene (ROUBY et al. 1996) und das Programm *yeah* von Rouby eingesetzt. Bei diesem Projekt wurde zuerst ein 3D-Geometriemodell in Randdarstellung mit GOCAD erzeugt, welches in einem 3D/4D-Geodatenbanksystem auf der Basis des GeoToolKits gespeichert wurde. Jeder Knoten im zeitlich variierenden 3D-Modell trug seine verschiedenen Positionen als ein Array sogenannter (vektorieller) „Properties“ mit sich, während die Vermaschung der einzelnen Schichten konstant blieb, und nur ihr zeitliches Gültigkeitsintervall - ihre „Lebensdauer“ - je nach Schichtalter variierte.

Die Kopplung Bergheim/GeoToolKit unterscheidet sich jedoch wesentlich von der Kopplung GeoDeform/GeoStore (SHUMILOV et al. 2002):

- Volumenobjekte in Randdarstellung anstelle von Dreiecksnetzen.
- Verwaltung der Zeitschritte und deren Interpolation innerhalb der 3D-Geometrie-Datenbank.
- Kopplung von Client und Server über CORBA (Common Object Request Broker) und spezifische auf die Datenbank aufgesetzte Software.

- Ein aufgabenspezifischer Klient, der aus Gründen der Portabilität in Java geschriebener ist, der sowohl das Einlagern von 3D-Objekten, als auch ihre Abfrage nach Block, Schicht, Störung sowie nach Zeitpunkt oder –Intervall erlaubt, sowie die logische Kombination mehrerer solcher Kriterien unterstützt.
- Wahlweise Umwandlung abgefragter Geometrie-Elemente in anwendungsspezifisches Format (hier GOCAD-Ascii) oder nach VRML 2.0 und Visualisierung mittels um zusätzliche Funktionen erweitertem VRML-Browser.

Zusätzlich unterstützte der Client die Datenreduzierung mittels *progressiver transmission*: zur Visualisierung großer Datenmengen konnte zuerst eine vereinfachte, generalisierte Version übertragen und bei Bedarf eine detailliertere Version unter Vermeidung von Redundanz nachgeladen werden. Diese Funktion wurde u.a. im Vorgriff auf einen möglichen späteren Einsatz in mobilen Geräten implementiert.

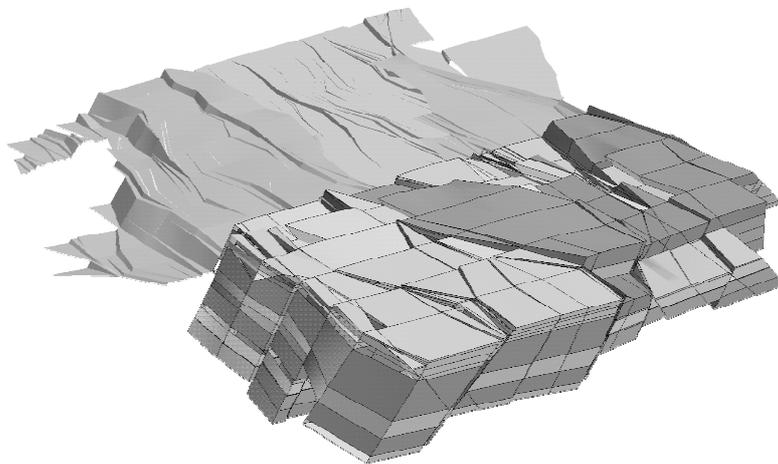


Abb. 4: Geometriemodell Tagebau Bergheim (THOMSEN & SIEHL 2002). Dargestellt sind im Vordergrund die Volumenblöcke, die begrenzenden Störungsflächen, sowie die parallelen dem Verlauf der geologischen Schnitte folgenden künstlichen Begrenzungsflächen und im Hintergrund zwei Schichtgrenzflächen. Modellierung mittels GOCAD.

4.2 Kopplung von geometrischem Modellierer, 3D-Datenbank und gravimetrischem Modell mittels CORBA

Im DFG-Projekt „Geologische Kartierung mit GIS auf der Grundlage von 3D-Modellen“ (BREUNIG et al. 1999, 2000) wurde in Zusammenarbeit mit der Geophysik-Arbeitsgruppe von H.-J. Götze an der FU Berlin die Kopplung einer 3D-Geometrie-Datenbank auf der Basis des GeoToolKits mit dem 3D-Modellierwerkzeug GOCAD einerseits und dem gra-

vimetrischen Modell IGMAS (GÖTZE & LAHMEYER 1988) andererseits realisiert. Geologisches Anwendungsgebiet war die Schaumburg-Lippesche Kreidemulde, deren 3D-Modellierung auf der Basis des Geotektonischen Atlas erfolgte (BREUNIG et al. 1998). Dabei wurden zuerst digitales Höhenmodell, Schichtgrenzen und Störungsflächen durch dreiecksvermaschte Flächen im 3D repräsentiert und in einem zweiten Schritt Volumen als geschlossene, von einer durchgehenden Randfläche begrenzte, voneinander unabhängige 3D-Zellen modelliert (Abb. 5). Diese Darstellung der 3D-Objekte wird vom gravimetrischen Modellierer IGMAS als Eingabe erfordert.

Der - hier stark vereinfachte - Arbeitsablauf ist folgender:

- Ein erstes 3D-Modell der erwähnten Volumen-Zellen wird entwickelt, jede Zelle mit Angaben über die spezifische Dichte des Zelleninhalts versehen.
- Mit dem gravimetrischen Modellierer IGMAS wird daraus ein Modell des Gravitationsfeldes an der Oberfläche berechnet und mit realen Messwerten verglichen.
- Durch Modifikation des Geometriemodells und ggf. der Dichtewerte wird versucht, das modellierte Schwerefeld an die Messwerte anzugleichen.

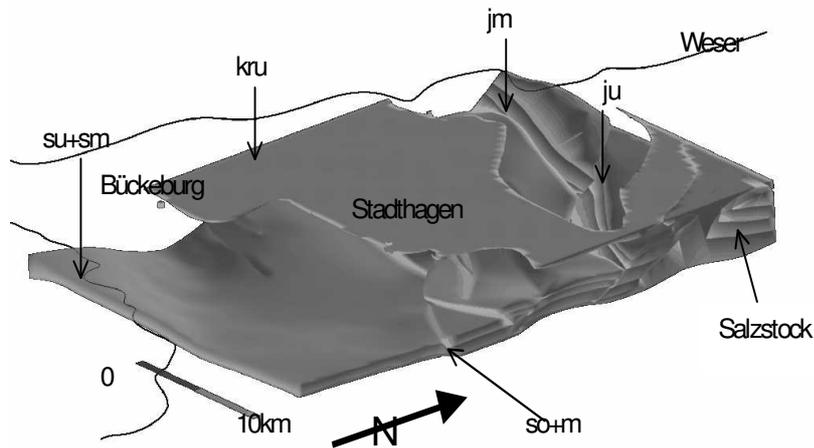


Abb. 5: Überhöhte Darstellung des Volumenmodells der Schaumburg-Lippeschen Kreidemulde. Für die gravimetrische Modellierung mit IGMAS wird jede Volumenzelle durch ihre geschlossene Hülle repräsentiert.

In der Untersuchung zur Interoperabilität wurde die 3D-Datenbank zur Kopplung zwischen Geometrie-Modellierer in Bonn und Gravimetrie-Modellierer in Berlin eingesetzt. Sowohl der in FORTRAN geschriebene Client IGMAS, als auch das in C++ geschriebene GOCAD wurden dabei als monolithische Programme behandelt, welche mittels zweier sog. CORBA-Wrapper für die Datenbank zugänglich gemacht wurden, die ihrerseits mit entsprechenden Adaptern versehen war (siehe Abb. 6) (SHUMILOV 2003).

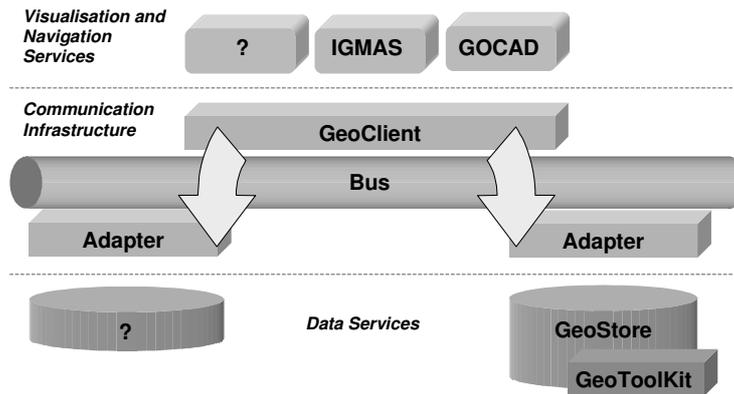


Abb. 6: GeoStore/GeoToolKit im Verbund mit Clients IGMAS und GOCAD.

4.3 Mobile Geodienste

Im Gegensatz zu dieser Vorgehensweise wird im schon genannten Projekt „mobile Geodienste“ bereits vom Ausgangskonzept an auf Interoperabilität und Nutzbarkeit in einer mobilen Umgebung abgezielt. Dem Anwender wird über eine Dienstarchitektur eine Reihe von elementaren Basisdiensten zur Verfügung gestellt, welche dann zu komplexen anwendungsspezifischen Diensten zusammengefügt werden können. Zu den Basisdiensten gehören beispielsweise die Anfrage von Objekten (nach Lage und Thematik), der Import und Export von Datenobjekten und Operationsdienste. Diese kann man unterteilen in einfache Operationsdienste, wie z.B. Berechnung von Eigenschaften der Geoobjekte (Volumen, Flächeninhalt) und komplexere Operationsdienste wie Schnitt mit einer Ebene, Projektion auf eine Ebene und affine Transformation von 3D-Geoobjekten.

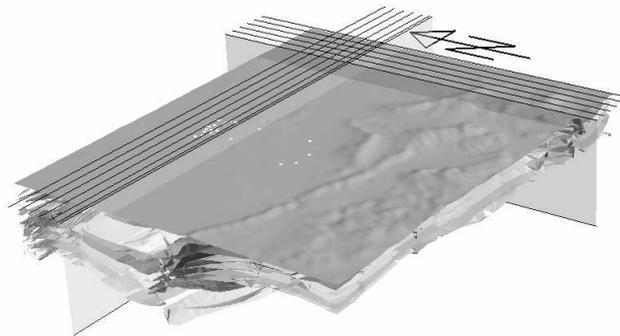
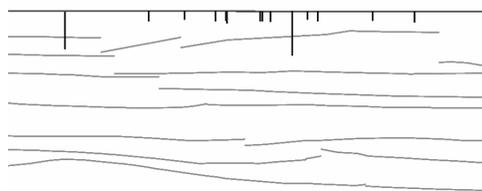


Abb. 7: 3D-Flächenmodell des Arbeitsgebietes mit Erdoberfläche, 3D-Schicht- und Störungsflächen, Lage der Profilschnitte und der Bohrungen.

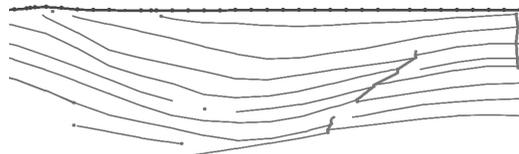
Ein anwendungsspezifischer Dienst erzeugt beispielsweise aus der Definition einer Schnittebene und einer Auswahl komplexer geologischer 3D-Objekte einen zweidimensionalen Profilschnitt, wahlweise mit der Projektionsdarstellung weiterer relevanter Objekte (z.B. Bohrungsprofilen) in diese Ebene. Der Profilschnitt-Dienst wurde anhand von Beispieldaten aus dem Projekt IOGIS-3D-Karte getestet (siehe Abb. 7) und wird im folgenden dargestellt.

Der komplexe Profilschnitt-Dienst hat folgenden Arbeitsablauf:

- Definition der Schnittebene und des Puffers um die Schnittebene
- Auswahl der zu schneidenden Objekte
- Auswahl der zu projizierenden Objekte (Bsp. Bohrungen)
- Berechnung der zu projizierenden Objekte/Teilobjekte innerhalb des Puffers
- Berechnung des Profilschnittes
- Berechnung der Projektion der Objekte in die Schnittebene
- Rotation der Ergebnisobjekte in die xy-Koordinatenebene (lokale Koordinaten)
- Speicherung bzw. Ausgabe als 2D-Objekt und graphische Darstellung



a) Schichtgrenzen und projizierte Bohrungen



b) Schichtgrenzen und Störungsgrenzen

Abb. 8: Ergebnisse des Profilschnitt-Dienstes als 2D-Geometrien dargestellt.

Zwei Beispiele für Ergebnisprofile sind in der Abbildung 8 zu sehen. Bild a) zeigt ein berechnetes Profil mit den Schichtgrenzen, wobei im Umfeld der Schnittebene vorhandene Bohrungen auf diese projiziert wurden. Bild b) zeigt ein Profil, in dem keine Bohrungen innerhalb des Puffers um die Schnittebene existierten, jedoch neben den Schichtgrenzen auch Störungsgrenzen zu sehen sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben in die Grundlagen der Modellierung und Verwaltung von 3D-Geodaten eingeführt und Anforderungen geologischer 3D-Modelle des Untergrundes aufgezeigt. Charakteristisch für geowissenschaftliche 3D-Anwendungen ist dabei die integrierte Modellierung und Verwaltung von Sachdaten und geometrisch/topologischer 3D-Geodaten. Wichtig ist daher sowohl die Entwicklung geeigneter geometrisch/topologischer 3D-Datenstrukturen als auch die graphische Ergebnisdarstellung für die interaktive Geometriemodellierung. Basierend auf den beiden vorgestellten Beispielimplementierungen für geowissenschaftliche Datenbanksysteme wurden verschiedene geologische Anwendungen vorgestellt. Hier stand die im geowissenschaftlichen Bereich besonders wichtige Kopplung von Datenbanksystemen und externen Modellier- und Simulationswerkzeugen im Vordergrund. Zukünftige Entwicklungen müssen vermehrt den Gedanken der Interoperabilität und der Mobilität Rechnung tragen. Ansätze hierfür wurden mit dem aktuellen Projekt „Weiterentwicklung von Geodiensten“ skizziert. Mit mobilen Geodiensten soll der Geowissenschaftler in der Lage sein, im Gelände auf existierende Geodatenbestände zuzugreifen und die bereits existierenden Daten durch mobile Datenerfassung vor Ort zu ergänzen. Ferner existiert die Zukunftsvision, mit Hilfe moderner Augmented Reality-Methoden (AR), die reale Sicht im Gelände mit einem 3D-Modell zu überlagern.

Danksagungen

Wir danken den Mitarbeitern der genannten Arbeitsgruppen in Bonn und Berlin für eine langjährige und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Literatur

- Abel, D., P. J. Kilby und J. R. Davis (1994): The systems integration problem. – In: *Int. Journal of Geographical Information Systems*, 3, 291-301.
- Alms, R., T. Jentzsch und A. Siehl (1997): 3D-Modelling of geological structures from the Lower Rhine Basin. – In: *Zbl. Geol. Paläont.*, Teil I, 11/12, Stuttgart, 1125-1131.
- Alms, R., O. Balovnev, M. Breunig, A.B. Cremers, T. Jentzsch und A. Siehl (1998): Space-time modeling of the Lower Rhine Basin supported by an object-oriented database. – In: *Phys. Chem. Earth*, 23, 251-260.
- Balovnev, O., T. Bode, M. Breunig, A.B. Cremers, W. Müller, G. Pogodaev, S. Shumilov, A. Siehl und A. Thomsen (2004): The Story of the GeoTookKit - An Object-Oriented Geodatabase Kernel System. *Geoinformatica* 8:1, Kluwer Academic Publishers, 5-47.
- Bayer, R. und E. McCreight (1972): Organization and Maintenance of Large Ordered Indexes. - In: *Acta Informatica* 1, Springer, Berlin et al., 173-189.
- Bode T., M. Breunig und A.B. Cremers (1994): First Experiences with GeoStore, an Information System for Geologically Defined Geometries. - In: *IGIS '94: International Workshop on Advanced Research in Geographic Information Systems*, Monte Verita, Ascona, Switzerland, LNCS 884, Springer, Heidelberg, 35-44.

- Booch, G., J. Rumbaugh und I. Jacobson (1997): Unified Modeling Language, Notation Guide, Version 1.0, Rational Software Corporation.
- Breunig, M. (1999): An Approach to the Spatial Data- and Systems Integration for a 3D Geo-Information system. – In: Special Issue on Systems Integration within the Geosciences, Computers and Geosciences, Vol. 25, No. 1, 39-48, Elsevier Science, Oxford.
- Breunig, M., W. Bär und A. Thomsen, (2004): Usage of Spatial Data Stores for Geo-Services. - In: Proceedings of the 7th AGILE Conference on Geographic Information Science, April 29th - May 1st, Heraklion, Greece, 687-696.
- Breunig, M., A. B. Cremers, H.-J. Götze, S. Schmidt, R. Seidemann, S. Shumilov und A. Siehl (1999): First Steps Towards an Interoperable 3D GIS - An Example From Southern Lower Saxony, Germany. - In: Physics and Chemistry of the Earth, Part A, Vol. 24, No 3., 179-190.
- Breunig, M., A. B. Cremers, H.-J. Götze, S. Schmidt, R. Seidemann, S. Shumilov und A. Siehl (2000): Geological Mapping based on 3D models using an Interoperable Geo-Information-System. – In: Journal for Spatial Information and Decision Making, Vol. 13, 12-18.
- Breunig, M., R. Malaka, W. Reinhardt und J. Wiesel (2003): Advancement of Geoservices. - In: Information Systems in Earth Management, Kick-Off-Meeting University of Hannover, February 19th 2003, Geotechnologien Science Report No. 2, 37–50.
- Breunig, M. und A. Perkhoff (1992): Data and System Integration for Geoscientific Data. - In: Proceedings SDH'92, Charleston, South Carolina, 272-281.
- Brinkhoff, T., H.-P. Kriegel und B. Seeger(1993): Efficient Processing of Spatial Joins Using R-Trees. - In: Proc. ACM SIGMOD, Washington.
- Clementini, E. und P. Di Felice (1994): A Comparison of Methods for Representing Topological Relationships. - In: Information Sciences 80, 1-31.
- Cox, S. J. D. (2001): Geologic Data Transfer Using XML – In: International Association of Mathematical Geology (IAMG 2001), Cacun, 17 S.
- David, B., L. Rayal, G. Schorter und V. Mansart (1993): GeO₂: Why Objects in a Geographical DBMS? - In: Proc. of the 3rd Int. Symposium on Large Spatial Databases SSD'93, Singapore, LNCS 692, Springer, Heidelberg, 264-276.
- Egenhofer, M. J. (1989): A Formal Definition of Binary Topological Relationships. - In: W. Litwin und H.-J. Schek (Hrsg.): Foundations of Data Organisation and Algorithms, Proc. FODO'89, Paris, LNCS 367, Springer, Berlin, 457-472.
- Götze, H.-J. und B. Lahmeyer (1988): Application of Three-dimensional Interactive Modeling in Gravity and Magnetics. – In: Geophysics, Vol. 53, No. 8, 1096-1108.
- GRAPE (1999): “Graphics Programming Environment”, Manual Version 5.3, SFB 256, IAM Bonn, <http://www.sfb256.iam.uni-bonn.de/grape>
- Guttman, A. (1984): R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching. - In: Proc. ACM SIGMOD, Boston, MA, 47-57.
- Hoppe, H. (1996): Progressive Meshes. – In: Proceedings of the SIGGRAPH'96, Addison Wesley, 99-108.
- Henrich, A., H.-W. Six und P. Widmayer (1989): The LSD tree: spatial access to multidimensional point and non point objects. - In: Proc. VLDB, Amsterdam.

- Levy, B. (1999): Topologie Algorithmique: Combinatoire et Plongement. PhD. Thesis, INPL, Nancy, 202 S.
- Mallet, J.-L. (1992): GOCAD: a computer aided design program for geological applications. In: A.K. Turner (ed.), Three-Dimensional Modeling with Geoscientific Information Systems, NATO ASI 354, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 123-142.
- Mallet, J.-L. (2002): Geomodeling, Oxford University Press, 599 S.
- Nievergelt, J. und H. Hinterberger (1984): The GRID FILE: An Adaptable, Symmetric Multi-Key File Structure. - In: ACM Transactions on Database Systems, 9(1), 38-71.
- Polthier, K. und M. Rumpf (1994): A concept for Time-Dependent Processes. - In: Goebel et al. (Hrsg.): Visualization in Scientific Computing, Springer, Vienna, 137-153.
- Plümer, L. (1996): Achieving Integrity of Geometry and Topology in Geographical Information Systems. - In: Proc. of the 1st Internat. Conference on Urban Regional and Environmental Planning, Samos, Greece.
- Rouby, D., Th. Souriot, J. P. Brun und P. R. Cobbold (1996): Displacements, Strains, and Rotations within the Afar Depression (Djibouti) from Restoration in Map View. - In: Tectonics, Vol. 15, No. 5.
- Raper, J. F. (Hrsg.) (1989): Three dimensional applications in Geographical Information Systems, Taylor & Francis, London.
- Rhind, D. W. (1992): Spatial data handling in the geosciences. - In: Turner (1992).
- Samet, H. (1990): The design and analysis of spatial data structures, Addison-Wesley.
- Shumilov, S. (2003): Integrating existing Object-Oriented Databases with distributed Object Management Platforms. Developed and evaluated on the example of ODBMS ObjectStore and CORBA, PhD Thesis, University of Bonn, Department of Computer Science III.
- Shumilov, S., A. Thomsen, A. B. Cremers und B. Koos (2002): Management and visualisation of large, complex and time-dependent 3D objects in distributed GIS. - In: Proc. of the 10th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, McLean, USA, November 2002.
- Siehl, A. (1993): Interaktive geometrische Modellierung geologischer Flächen und Körper. - In: Die Geowissenschaften, No. 10-11, 342-346.
- Thomsen, A. und A. Siehl (2002): Towards a Balanced 3D Kinematic Model of a Faulted Domain - the Bergheim Open Pit Mine, Lower Rhine Basin. - In: Netherlands Journal of Geosciences / Geol. Mijnbouw, 81(2), 241-250.
- White, N., J. A. Jackson und D. P. McKenzie (1986): The relationship between the geometry of normal faults and that of the sedimentary layers in their hanging walls. - In: Journal Struct. Geol., 8, 897-909.
- Worboys, M. F. und P. Bofakos (1993): A Canonical Model for a Class of Areal Spatial Objects. - In: Proc. of the 3rd Int. Symposium on Large Spatial Databases SSD'93, Singapore, LNCS 692, Springer, Heidelberg.
- Worboys, M. F. (1994): A Unified Model for Spatial and Temporal Information. - In: Computer Journal, 37(1).