

Integriertes Informationssystem für dreidimensionale geowissenschaftliche Modelle und Primärdaten

Marcus Apel

Technische Universität Freiberg
marcus.apel@geo.tu-freiberg.de

Abstract: Zweidimensionale Informationssysteme werden in den Geowissenschaften intensiv genutzt, um geologische Karten zu erzeugen, zu analysieren und zu interpretieren. Jedoch sind solche Systeme nicht in der Lage den geologischen Untergrund in drei räumlichen Dimensionen darzustellen. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, ein drei-dimensionales geowissenschaftliches Informationssystem zu entwickeln.

Ein integriertes Datenmodell für geologische Primärdaten und Geomodelle bildet die Voraussetzung für komplexe topologische, geometrische und geologisch-semantische Abfragen. Weiterhin werden durch ein standard-orientiertes, komponentenbasiertes Datenmanagementsystem komplexe, rechenintensive räumliche Datenbankabfragen effizient ermöglicht. Das resultierende Informationssystem erlaubt es Geowissenschaftlern, dreidimensionale Geomodelle zu manipulieren, zu analysieren und zu verwalten.

1 Einleitung

Geowissenschaftliche Informationssysteme (GIS) werden vorwiegend genutzt, um Modelle der realen Welt zu kreieren und zu analysieren, die auf Daten basieren. In traditionellen zweidimensionalen (2d) GIS werden geologische Situationen als Kartenmodelle in zwei räumlichen Dimensionen abgebildet. Diese Systeme sind nicht für dreidimensionale (3d) geologische Anwendungen geeignet, da sie räumlich dreidimensionale geologischen Situationen und räumlich variierende Eigenschaften nicht abbilden können. Zweidimensionale GIS und sogenannte 2.5-dimensionale GIS stellen das Höhenwert z von Geobjekten als stetige Funktion der geographischen Koordinaten dar: $z = f(x, y)$. Solche Systeme können nicht Geobjekte in 3d modellieren, die Punkte mit gleichen x , y -Koordinaten und unterschiedlichen z -Werten besitzen.

Neben GIS findet in den Geowissenschaften Geomodellierungssoftware Anwendung die es erlaubt, komplizierte geologische Situationen dreidimensional zu modellieren und dabei heterogene Ausgangsdaten zu berücksichtigen. Geomodellierungssoftware beruht im Allgemeinen auf einem diskreten topologischen Datenmodell sowie speziellen Interpolationsverfahren, wie beispielsweise Discrete Smooth Interpolation [JL02]. Derartige Geomodellierungssoftware kann als grundlegender Bestandteil eines 3d GIS fungieren.

Die Zunahme digitaler Geodaten und die Möglichkeit der Erstellung detaillierter regiona-

ler geologischer 3d Geomodelle (vgl. Abbildung 1) resultiert in neuen Erfordernissen und Möglichkeiten für das Geodatenmanagement und die Auswertung von Geodaten. Jedoch sind diese Felder in existierenden Geomodellierungs-Anwendungen kaum entwickelt. Das wird umso offensichtlicher, wenn man Geomodellierungs-Software mit gegenwärtigen 2d geographischen Informationssystemen vergleicht.

Die Zielstellung der dieser Arbeit ist die Entwicklung von räumlich-geologischen Abfragefunktionen und Operationen an Geomodellen sowie die Integration von Geomodellierungssoftware und Datenmanagement-Komponenten in einem generischen, standardorientierten Framework. Das zugrunde liegende Datenmanagementsystem sollte sich maximale Interoperabilität, Flexibilität und langfristige Nutzbarkeit auszeichnen. Dazu gehören insbesondere komplexe topologische, geometrische und geologisch-semantische Abfragemöglichkeiten.

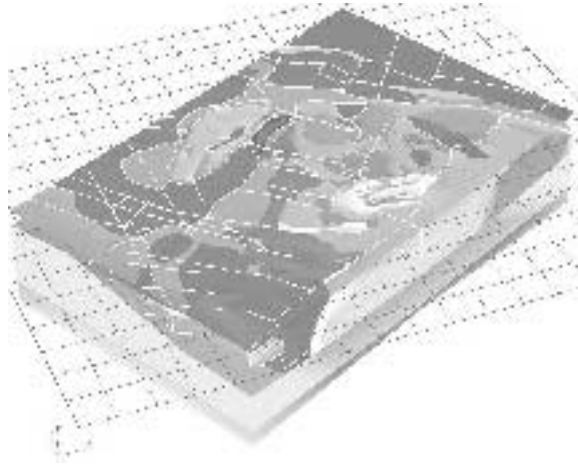


Abbildung 1: Ein beispielhaftes 3d Geomodel basierend auf geologischen und geophysikalischen Daten: das Erzgebirge. Ausdehnung des Modells: ca. 80km x 50km x 30km

2 Räumliche geowissenschaftliche Datenmodelle

Für ein 3d GIS ist ein integriertes Datenmodell erforderlich, das sowohl geologische Primärdaten als auch davon abgeleitete Geomodelle beinhaltet. Die vorliegende Arbeit folgt der etablierten Geomodellierungstheorie von Mallet [JL02]. Ein Geomodel ist eine abstrakte digitale Darstellung eines Teils des geologischen Untergrundes. Geomodelle werden durch Interpolation und Interpretation aus Daten abgeleitet, die an Punkten im 3d-Raum gewonnen wurden. Wissen und geophysikalische Modelle beispielsweise können als zusätzliche Bedingungen für die Modellerstellung genutzt werden.

Es existieren zwei Hauptansätze zur Erzeugung von Geomodellen: Geobjekt-basierte Modelle und auf regelmäßigen Gittern basierte Modelle. Um ein digitales Geobjekt-

basiertes Modell zu kreieren, wird der geologische Untersuchungsraum aufgrund gewählter Parameter, wie Strukturen oder Stratigraphie, in Teilräume partitioniert. In der gegenwärtigen Praxis besteht ein vollständiges Geomodel aus einem strukturellen Modell, welches die Topologie und die Geometrie der Geoobjekte speichert, und einem dazugehörigen Eigenschaftsmodell um die materiellen Eigenschaften der Geoobjekte zu modellieren [JL02]. In der gegenwärtigen Praxis besteht ein vollständiges Geomodel aus einem strukturellen Modell, welches die Topologie und die Geometrie der Geoobjekte speichert, und einem dazugehörigen Eigenschaftsmodell um die materiellen Eigenschaften der Geoobjekte zu modellieren [JL02]. Zwei räumliche Datenmodelle existieren, die erfolgreich für die Modellierung komplizierter geologischer Verhältnisse verwendet wurden:

1. Grenzflächen - Modelle (Boundary-Repräsentation, BRep), wie beispielsweise die triangulierte Weiler - Repräsentation [Wei88], und
2. zellulare Modelle, wie beispielsweise hierarchische Generalized Maps [Lie94].

Neben räumlichen Datenmodellen existieren seit einigen Jahren Ontologie-basierte Datenmodelle für geologische Primärdaten, z.B. NADM [Com04]. Solche Datenmodelle werden in zunehmendem Maße für Geodatenbanken und GIS-basierte Kartenerstellung genutzt.

Datenbank-gestützte 3d GIS sind bereits in der vorgeschlagen worden [Zla94]. Diese Konzepte haben gemeinsam, das sie nicht auf einem Datenmodell basieren, das 3d Geomodelle und geowissenschaftliche Primärdaten integriert. Solch ein einheitliches Datenmodell ist erforderlich, um konsistente, reproduzierbare, wartbare Geomodelle zu generieren und auf benutzerfreundliche Weise den Zugang zu geologischen Primärdaten zu ermöglichen.

Die Integration eines Datenmodells für Geomodelle, das die Topologie, Geometrie und andere Eigenschaften von Geomodellen [JL02] einschließlich deren Semantik beinhaltet, und eines Datenmodells für Primärdaten wird vorgeschlagen. Das resultierende objekt-orientierte Datenmodell enthält

- ein hierarchisches zellulares topologisches Modell, das den Raum in Geoobjekte partitioniert,
- die Geometrie ("embedding") der topologischen Zellen in einem kartesischen Koordinatensystem,
- einen Eigenschaftsvektor für die Zellen,
- die Semantik des Geomodells und der Menge der Geoobjekte und
- eine Referenz auf die geologischen Primärdatenbank für entsprechende Zellen (vgl. Abb. 2).

Dieses Datenmodell unterscheidet zwischen Modellzellen (z.B. Stützpunkte, Dreiecke) die eine Interpolation der Daten mit geringer Rauigkeit unterstützen, sowie Zellen die

Primärdaten repräsentieren. Diese Zellen enthalten eine Referenz auf ein XML-Dokument (z.B. eine Aufschlussbeschreibung) in der Primärdatenbank. Von einer Primärdatenbank kann ein Menge unterschiedlicher möglicher Modelle erzeugt werden, insbesondere

- stochastische Simulationen,
- Modelle, die konzeptionell unterschiedliche geologischen Szenarios darstellen, oder
- Modelle, die für spezielle Anwendungen bestimmt sind, wie beispielsweise Hydrogeologie oder Bergbauexploration.

Das bedeutet, das sich Geomodelle in ihrer Semantik und in ihren räumlichen und nicht-räumlichen Eigenschaften unterscheiden können. Solche Geomodelle beinhalten eine Menge von Geoobjekten, definieren ihre Semantik und die explizite Topologie. Ein Geomodelle speichert Informationen über sich selbst, insbesondere eine Beschreibung von der geologischen Situation und von der geologischen Konzepte, Modellierungsparameter, eine Legende und Metadaten. Das Resultat ist eine Synthese des räumlichen Datenmodells und des semantischen geologischen Modells.

Für die Definition der Semantik von Geoobjekten und für das Datenmodell von Primärdaten, lässt sich das NADM - Datenmodell [Com04] adaptieren.

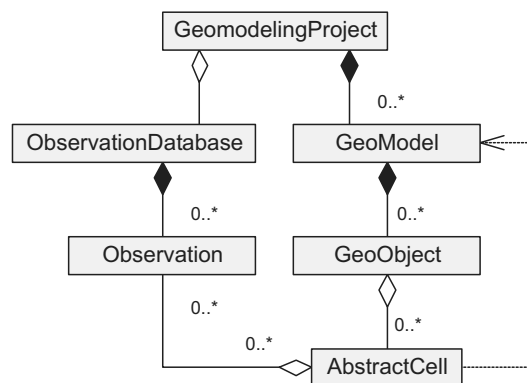


Abbildung 2: Übergeordnetes Datenmodell in UML: Geomodelle sind aus Geoobjekten aufgebaut, welche eine Aggregation von Zellen verschiedener Dimension darstellen. Zellen können Primärdaten in einer Datenbank referenzieren.

3 Abfragen in einem 3d GIS

Anforderungen. Eine wesentliche Funktionalität von GIS ist die Fähigkeit der Selektion und der Analyse von Geodaten mit Hilfe von Abfragen. Während die Aspekte räumlicher geowissenschaftlicher Abfragen im Kontext von 2d GIS [BC94] intensiv studiert worden

sind, existieren wenige Arbeiten über räumliche Abfragen in 3d GIS, wie beispielsweise [Bre96]. Die Untersuchung von 3d Geomodellen von umfangreichen und komplizierten geologischen Situationen mit Abfragen kann zu neuen Einblicken führen und die systematische Suche von Erkundungszielen unterstützen. Die folgenden Beispiele veranschaulichen mögliche Abfragen im 3d Raum, die nicht in 2d GIS möglich sind:

- *“Selektiere die Menge der Störungsflächen mit gegebener Normalenrichtung UND einer geochemischen Anomalie innerhalb eines bestimmten Entfernungspuffers.“*
- *“Selektiere die Menge der Geoobjekte mit einer gegebenen Permeabilität UND Störungen als Begrenzung.“*
- *“Selektiere die Menge der Geoobjekte mit einem gegebenen minimalen Volumen UND dem Kontakttyp 'intrusiv' UND der Lithologie 'Granit' UND die in Kontakt mit Schichten mit der Lithologie 'Kalkstein' sind.“* Diese Art von Abfragen kann für die Suche von Lagerstätten verwendet werden.

Abfragen die für geologischen Zwecke wichtig sind basieren im Allgemeinen auf räumlichen Eigenschaften (Geometrie und Topologie) und nicht-räumlichen geologischen Eigenschaften (z.B. geologische Semantik, stoffliche Beschaffenheit) einzelner Geoobjekte und den räumlichen und nicht-räumlichen geologischen Verhältnissen zwischen Geoobjekten (z.B. Altersbeziehungen). Räumliche und nicht-räumliche Abfragenoperatoren können durch logische Ausdrücke zu einer umfassenden Abfragesprache kombiniert werden.

Geoobjekt-basierte räumliche Abfragealgebra. Räumliche Abfragen angewandt auf eine Menge von Geoobjekten oder ein Geomodell basieren auf geometrischen und topologischen Eigenschaften. Für den abstrakten punktmengen-topologischen Fall entwickelte Paredaens [13t94] eine komplette und geschlossene Algebra für generische räumliche Abfragen. Er schlug eine Hierarchie der Abfragentypen bei Zunahme der Invarianz vor: Topologieinvarianz, Ähnlichkeitsinvarianz, Isometrieinvarianz und Translationsinvarianz. Für die Umsetzung in einem kombinatorischen topologischen Datenmodell wie beispielsweise GMaps, können wir diese Theorie für zelluläre Geoobjekt-Topologie nutzen.

Ein Geomodell M kann betrachtet werden als eine Punktmengentopologie definiert für den geologischen Untergrund. Ein Geoobjekt korrespondiert dabei mit der Schließung \bar{O} einer Punktmenge $O \subset M$. Die Schließung ist definiert als die Vereinigungsmenge des Inneren und der Grenze einer topologischen Menge. Wir können eine Abfrage Q formulieren die auf eine Menge von Geoobjekten angewendet wird:

$$Q(\bar{O}) = \{\bar{O} | \Lambda(\bar{O})\} \tag{1}$$

, wobei $\Lambda(p)$ eine Kombination von Termen mit Quantoren über \bar{O} , Funktionen, Booleschen Operatoren, und Prädikaten ist. Ein Term enthält eine Relation oder eine räumliche Funktion. Es ist möglich mehrere räumliche und nicht-räumliche Abfragen mit logischen

Operatoren zu kombinieren: “*Selektiere die Geoobjekte \bar{O} die mindestens teilweise innerhalb eines 30m-Buffers von Störung F sind und ein Volumen über $v > 100m^3$ besitzen.*“ kann folgendermaßen formuliert werden:

$$Q(\bar{O}) = \{\bar{O} | v(\bar{O}) > 100m^3 \wedge \exists o \in \bar{O} \wedge \exists f \in \bar{F} \wedge d(o, f) < 30m\}, \quad (2)$$

wobei o, f in \bar{O} beziehungsweise \bar{F} enthaltene Punktvariablen sind. \bar{O} und \bar{F} bezeichnet die topologische Schließung von O beziehungsweise F .

Topologische Abfragen. Topologische Abfragen an Geoobjekten sind Mengenoperationen, die auf topologischen Beziehungen zwischen Geoobjekten basieren, sowie topologische Eigenschaften wie Homomorphie und Genus. Die Theorie der räumlichen topologischen Beziehungen ist für Punktmengen und simpliziale Komplexe bereits untersucht worden [EF91, Bre96].

Durch die in einem Geomodell gespeicherte expliziten topologischen Informationen können Abfragen nach topologischen Verhältnisse sehr effizient berechnet werden. Beispielsweise für Weiler BRep-Modelle lassen sich die Inzidenz- und Adjazenzbeziehungen der topologischen Elemente in doppelt-verbundenen Listen speichern. Für Abfragen kann man über Iteratoren auf die Elemente mit linearer Komplexität zugreifen. Z.B. kann man Abfragen wie “*Selektiere die Menge der Geoobjekte Q im Inneren eines gegebenen Geoobjektes g* “ berechnen, indem man durch alle Geoobjekte eines Geomodells iteriert und die Geoobjekte selektiert die nur eine Grenze besitzen und diese Grenze mit g gemeinsam haben. Analoge kann Abfragen können auch auf zelluläre [JL02] Geomodelle angewandt werden.

Topologische Geomodelle erlauben effiziente Berechnung von Abfragen an topologischen Eigenschaften ohne aufwendige geometrische Algorithmen. Demgegenüber müssen topologische Abfragen an Modellen ohne explizite Topologie aus der Geometrie berechnet werden, was sehr aufwendig sein kann. Angenommen, wir haben ein Modell bestehend aus einer Menge triangulierter Flächen. Für das Beantworten der Abfrage “*Selektiere die Menge von Schichten Q , die von einer gegebene Störung f geschnitten werden.*“ ist es erforderlich, paarweise die Flächen auf geometrische Intersektion zu testen. Binäre topologische Beziehungen können aus den geometrischen Verhältnissen der zwei Simplex-Mengen [Bre96] der Flächendreiecke berechnet werden.

Geometrische und metrische Abfragen. Diese Abfragearten werden häufig in 2d GIS benutzt und bilden wichtige Abfragen für ein 3d GIS. Die Geometrie eines Punktes eines Geoobjekt kann durch ein Koordinatentripel $[x, y, z]$ in einem euklidischen Koordinatensystem definiert werden. Basierend auf ihren geometrischen Eigenschaften können Teilmengen von Geoobjekten (Pufferabfragen, relative Positionsabfragen) oder reale Zahlen (Eigenschaftsabfragen) als Ergebnis erhalten werden. Geometrische und metrische Abfragen an Geoobjekten können wie folgt gegliedert werden:

1. Abstands-Puffer, z.B.: “*Selektiere die Menge von Geoobjekten, die wenigstens teilweise innerhalb einer gegebenen Entfernung eines gegebenen Geoobjektes befin-*

den.“

2. Eigenschaftsfragen, die geometrische oder metrische Eigenschaften zurückliefern
3. Orientierungsabfragen, z.B.: *“Selektiere die Menge von Störungen mit einer gegebenen mittleren Flächennormalen.“*
4. relative Lageabfragen

Aufgrund des erforderlichen diskreten Datenmodells lassen sich effiziente näherungsweise Abfragen, die nur 0d-Zellen (z.B. Stützpunkte einer triangulierten Fläche) für die Berechnung verwenden, und rechenintensive *“exakte“* Abfragen unterscheiden, die auf Zellen höherer Dimension angewendet werden bei denen die Geometrie durch Interpolation definiert wird (z.B. die Menge der Dreiecksflächen triangulierten Fläche).

Eine Abstandspuffer-Abfrage an einem Geomodell mit Hilfe von zwei Parametern formuliert werden: ein Geoobjekt O und ein realer Abstandswert d . Die Menge von Geoobjekten innerhalb des gegebenen Abstandspuffer b von O erhält man indem man den paarweise den Abstand zwischen der Menge der Zellen der Geoobjekte berechnet. Drei unterschiedliche Fälle euklidischer Abstandspufferabfragen können betrachtet werden:

1. *“Selektiere die Menge von Geoobjekten, die vollständig innerhalb des Puffers liegen.“* Hier müssen alle Zellen des Geoobjekts innerhalb des Puffers liegen.
2. *“Selektiere die Menge von Geoobjekten, die mindestens teilweise innerhalb des Puffers liegen.“* Diese Abfrage liefert alle Geoobjekte bei denen mindestens eine Zelle teilweise innerhalb des Puffers ist.
3. *“Selektiere alle Punkte von Geoobjekten, die innerhalb des Puffers liegen.“* Durch diese Abfrage kann man entweder die Zellen selektieren die innerhalb des Puffers liegen (näherungsweise Abfrage), oder man teilt das Geoobjekt durch Verschneiden mit dem Pufferraum, aktualisiert die Zellentopologie (z.B. Re-triangulation hinzugefügter Stützpunkte) und selektiert genau die Zellen innerhalb des Puffers (*“exakte“* Abfrage).

4 Geodatenverwaltung.

Für 3d Geomodellierungsprojekte muss gewöhnlich eine große Menge an Geodaten langfristig gespeichert und bereitgestellt werden. Folglich ist es für ein 3d GIS, eine leistungsfähige und zuverlässige Datenverwaltung zu besitzen. Gegenwärtig existiert keine passende Lösung für integriertes, standardorientiertes (XML) und räumlich-geologisch abfragefähiges Datenmanagement für Geodaten und Geomodelle. Aus dieser Notwendigkeit wird ein n Datenverwaltungssystem vorgeschlagen, das kennzeichnet ist durch:

1. eine Client-Server-Architektur, in der Anwendungen wie z.B. Geomodellierungssoftware als Klienten eines Datenbankmanagementsystems agieren,

2. XML-basierte Datenspeicherung und Abfragen einschließlich 3d-räumlichen Abfragen.

Die Koppelung von 3d Geomodellierungs-Anwendungssoftware mit einem Datenbank-Managementsystem in einem komponenten-orientierten Framework bildet ein 3d geowissenschaftliches Informationssystem. Um die Möglichkeit komplexer räumlich-geologische Abfragemöglichkeiten zu schaffen, ist die Erweiterung der XML Abfragesprache um räumlichen Operatoren 3d erforderlich. Räumliche Abfragen können mit Hilfe eines XQuery-Ausdruck formuliert werden und mit anderen räumlichen und nicht-räumlichen Abfragen kombiniert werden. Der Rückgabewert einer XQuery Abfrage ist ein gültiges XML-Dokument, das von einer Anwendersoftware weiterverarbeitet werden kann. Das folgende einfache Beispiel liefert Geoobjekte einer Projektdatenbank zurück, die von der Störungsfläche "faultA" geschnitten werden:

```
FOR $GeoObject IN /gtx:DB[@ID="project1"]//gtx:GeoObject
WHERE intersect($GeoObject, gtx:GeoObject[@ID="faultA"])
= true
RETURN $GeoObject;
```

Um komplexe, rechenintensive räumliche Abfragen effizient verarbeiten zu können, wird die Nutzung eines leistungsfähigen Applikationsservers vorgeschlagen. Das Design des Systems wird in der Abbildung 3 dargestellt. Datenbankabfragen können durch Benutzeranwendungen wie z.B. Gocad formuliert werden. Danach wird die Abfrage entweder direkt zur Datenbank als Standard-XQuery oder zu einem Applikationsserver als spezielle räumliche XQuery geschickt. Der Applikationsserver bildet eine leistungsfähige Middleware-Komponente, die die Daten eines Projektes von der Datenbank erhält und das Resultat der Benutzeranwendung zu Verfügung stellt. Der Applikationsserver und alle Schnittstellen wurden in C++ in einer generischen, standard-konformen Weise implementiert und können mit verschiedenen XML-unterstützenden Datenbanken und Anwendungen verwendet werden. Das Resultat ist eine integrierte Plattform für geowissenschaftliche 3d Modellierung, Abfrage und Analyse.

5 Schlussfolgerungen und Resultate

Die Erweiterung von räumlichen Datenmodellen für Zwecke der Geomodellierung um geologischer Semantik und die Integration mit Primärdaten öffnet die Tür für komplizierte räumliche und nicht-räumliche Abfragen und folglich der Entwicklung eines 3d GIS, analog existierenden 2d GIS. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Framework für ein 3d GIS entwickelt das durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet ist:

- Ein integriertes Datenmodell für geologische Primärdaten und 3d Geomodelle ist vorgeschlagen worden.
- Abfragefunktionalitäten für Primärdaten und 3d Geomodelle, die auf geometri-

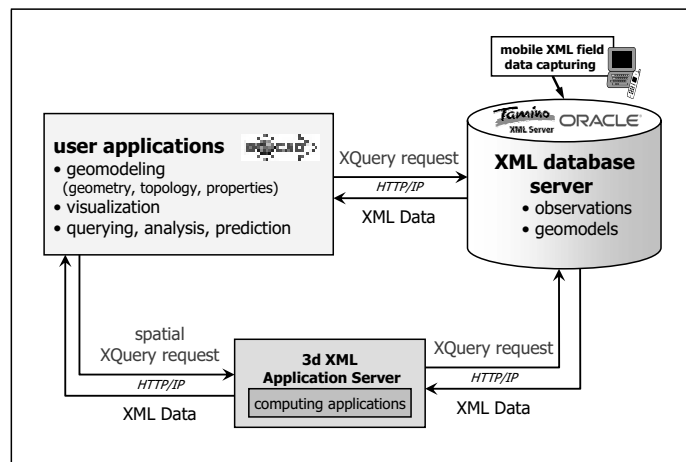


Abbildung 3: Architektur des vorgeschlagenen 3d GIS Frameworks.

schen, topologischen, materiellen und semantischen geologischen Eigenschaften basieren, sind entwickelt worden.

- Für räumliche Abfragen und 3d Datenbanken wurde die XML-Abfragesprache XQuery um räumliche Operatoren erweitert, und ein schneller Applikationsserver für räumliche Abfrageberechnung wurde entwickelt. Diese Technologie erlaubt komplizierte 3d-räumliche und geologische Datenbankabfragen.

Das entwickelte 3d GIS Framework ist für die Datenverwaltung und die Datenanalyse von großen 3d Geomodellierungsprojekten konzipiert. Es konnte gezeigt werden, daß 3d geowissenschaftliche Informationssysteme bestehende Geomodellierungssoftware und XML-unterstützende Datenbankserver kreiert werden können. Als Hauptresultat ist ein funktionierendes Software-System für Geowissenschaftler geschaffen worden, das dazu dient, 3d Geomodelle der komplizierter geologischen Situationen zu erzeugen, zu analysieren, abzufragen, zu überprüfen und zu verwalten.

Literatur

- [13t94] 13th Symposium on Principles of Database Systems. *Towards a theory of spatial database queries.*, Minneapolis, 1994.
- [BC94] G. F. Bonham-Carter. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS.*, Jgg. 398 pp. Pergamon Press, Oxford, 1994.
- [Bre96] M. Breunig. *Integration of Spatial Information for Geo-Information Systems.*, Jgg. 61, 171pp of *Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer, 1996.
- [Com04] North American Geologic Map Data Model Steering Committee. *NADM Conceptual Model 1.0*. Open-file report 2004-1334, U.S. Geological Survey, 2004.

- [EF91] M. J. Egenhofer und R.D. Franzosa. Point-set topological spatial relations. *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(2):161–176, 1991.
- [JL02] Mallet J.-L. *Geomodeling*. Oxford University Press., 2002.
- [Lie94] P. Lienhardt. N-Dimensional Generalized Combinatorial Maps and Cellular Quasi-Manifolds. *Journal on Computational Geometry and Applications*, (4):275–324, 1994.
- [Wei88] K. Weiler. The radial edge structure: a topological representation for non-manifold geometric boundary modeling. *Geometric Modeling for CAD Applications*, Seiten 3–36, 1988.
- [Zla94] S. Zlatanova. *3D GIS for Urban Development*. Dissertation, ICGV Graz/ Austria and ITC Delft/ Netherlands, 1994.

Marcus Apel, geboren am 7. Mai 1972 in Dresden, studierte Geologie mit Schwerpunkt mathematische Geologie und Geoinformatik an der University of Cape Town (B.Sc. Honours, 1997) und an der Technischen Universität Freiberg (Diplom, 1999). Gefördert von der Robert-Bosch-Stiftung, begann er 2001 seine Dissertation als “Co-tutelle de thèse“ am Institut National Polytechnique de Lorraine in Nancy/ Frankreich, und setzte diese Arbeit an der Technischen Universität Freiberg fort. Er wurde 2004 mit seiner Dissertation zum Thema “A three-dimensional geoscience information system framework“ Dr. rer. nat. mit Prädikat “summa cum laude“ im Fach Geoinformatik promoviert. Gegenwärtig ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Freiberg (www.geo.tu-freiberg.de/~apelm).