

Altbergbau – Gefahr für Mensch und Umwelt?

Neue Ansätze für die dynamische Modellierung untertägiger Salzlösungsprozesse im Kalialtbergbaugebiet Staßfurt

Von Wolfgang Busch, Caroline Hanusch, Steffen Knospe und Klaus Maas

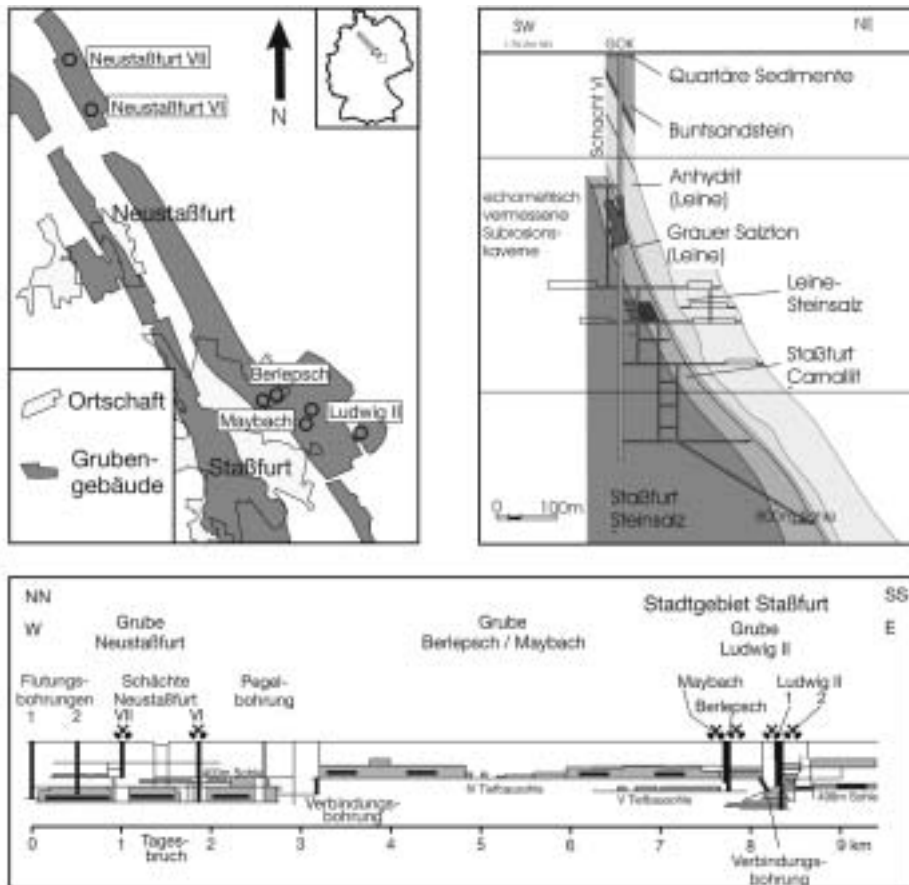


Bild 1 a: Grundrisskarte der Grubenengebäude im Bereich der Ortschaften Staßfurt und Neustaßfurt (oben links)

Bild 1 b: Geologischer Schnitt durch die Grube Neustaßfurt, Schacht VI (oben rechts)

Bild 1 c: Flutungsschema der Gruben Neustaßfurt, Berlepsch-Maybach und Ludwig II (nach SCHWAND & SEIFERT 1999) (unten)

Die Anzahl von Standorten in Deutschland, an denen untertägig Bergbau betrieben wird, nimmt ab. Dagegen steigt die Bedeutung von Aufgabenstellungen, die die Folgen aktiven Bergbaus auf die Umwelt betreffen. Von besonderer Problematik sind Hinterlassenschaften des Bergbaus, für deren Verwahrung kein Rechtsnachfolger verantwortlich gemacht werden kann. Oft sind diese Grubenbaue unzugänglich und ihre Ausdehnung unbekannt. Für eine Verwahrung dieser Grubenbaue sind Modelle zu entwickeln, die die Geometrie der Hohlräume und die Komplexität der geochemischen und geomechanischen Wirkungsgefüge abbilden und die nachhaltige Wirkung möglicher Verwahrungsmaßnahmen darlegen.

Das Institut für Geotechnik und Markscheidwesen der TU Clausthal entwickelt ein solches Modell. Als Untersuchungsraum wurde das weltweit älteste Kalirevier im sächsisch-anhaltinischen Staßfurt gewählt (**Bild 1a**). Das Projekt mit dem Thema *Analyse, Modellierung und Simulation rezenter Subrosionsprozesse in altbergbaulichen Hohlräumen mit Hinblick auf mögliche Steuerungsmaßnahmen* hat Anfang diesen Jahres unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Busch begonnen und läuft über zunächst zwei Jahre. Es wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), Förderkennzeichen BU 1283/4-1, gefördert und ist Teil des DFG-Forschungsverbunds *Entwicklung und Einsatz informationswissenschaftlicher Methoden zur Wirkungsanalyse, Prognose und Steuerung anthropogen beeinflusster Prozesse in Geosystemen*. Zu diesem Verbund gehört ein parallel laufendes Projekt, in dem unter gleicher Leitung die Thematik *Analyse landschaftsökologischer Änderungen in Folge dynamischer bergbaubedingter Bodenbewegungen – Entwicklung von Prognose und Steuerungsverfahren zur Minimierung ökologisch relevanter Auswirkungen*, Förderkennzeichen BU 1283/3-1, bearbeitet wird. Kooperationspartner für beide Projekte ist eine Arbeitsgruppe von Univ.-Prof. Dr.-Ing. D.P.F. Möller, Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme ▶

der Universität Hamburg, in der die informationstechnischen Anforderungen untersucht werden.

Das Bergbaurevier Staßfurt

Staßfurt gilt als die Wiege des Kalibergbaus. Die ersten Salinen, so vermutet man, entstanden vor etwa 1200 Jahren (FESTSCHRIFT STASSFURT 2002). Der Tiefbau entlang der steilstehenden Flanken des Staßfurt-Oscherslebener-Sattels wurde 1852 aufgenommen. Um 1900 erschufen die ersten Kaligruben auf der SW-Flanke des Sattels, was zu enormen Bergschäden an der Tagesoberfläche führte. Ende des Jahres 1972 wurde der aktive Kalibergbau im Revier Staßfurt entlang der nordöstlichen Sattelflanke endgültig eingestellt. Um weitere Bergschäden zu vermeiden, wurden die Gruben Neustaßfurt, Berlepsch-Maybach und Ludwig II (**Bild 1a**) mit insgesamt 21 Mio. m³ luftgefülltem Hohlraum durch kontrollierte Flutung verwahrt. Die Flutung führte zu bis heute anhaltenden untertägigen Salzlösungsprozessen (Subrosion) und damit zu Spannungsumlagerungen im Gebirge. Die Folge sind Senkungen an der Tagesoberfläche und Tagesbrüche.

Regionalgeologischer Überblick

Das Bergbaurevier Staßfurt gehört regionalgeologisch zur Subherzynen Senke, die sedimentäre Schichten vom Zechstein bis zum Känozoikum enthält. Die Salinarfolgen des Zechsteins lassen sich in sechs salinare Zyklen untergliedern (Werra- bis Friesland-Serie, Z1 bis Z6). Das abbauwürdige Kaliflöz *Staßfurt* (K2) der Staßfurt-Serie (Z2) ist im Bereich der Grube Neustaßfurt (Schacht VI, **Bild 1a**) als Lagencarnallit ausgebildet und erreicht hier eine Mächtigkeit von 45 bis 55 m (KNAK 1958). Die Grube Neustaßfurt befindet sich an der bis zu 80° einfallenden NO-Flanke des Staßfurt-Oscherslebener-Sattels, dessen Sattelkern aus Staßfurt-Steinsalz (Na₂) besteht (**Bild 1b**). Die Sattelstruktur wird im Hangenden diskordant vom Hauptanhydrit überlagert, der mit quartären Lockergesteinsedimenten bedeckt ist.

Hydrogeologische Situation

Das hydrogeologische System im Bereich der gefluteten Gruben ist hinsichtlich der Quantität und Qualität der zirkulierenden Wässer unzureichend bekannt. Im Zuge der planmäßigen Flutung der Grube Neustaßfurt wurde Anfang der 70-er Jahre durch Verbindungsbohrungen hydraulischer Kontakt zu den südöstlich anschließenden Grubengebäuden von Berlepsch-Maybach und Ludwig II hergestellt (**Bild 1a, 1c**). Die Menge und die Zusammensetzung des Flutungsmediums wurden teilweise dokumentiert.

Der Fall eines Tagesbruchs zwischen den Schächten VI und VII der Grube Neustaßfurt im März 1975 bewirkte den hydraulischen Kontakt des Grubengebäudes zum Oberflächen- und

Grundwasser des den Salzstock überlagernden Lockergesteinsaquifers. Die Bilanzierung der im System strömenden Wassermassen und der durch Subrosion geochemisch umgesetzten Stoffmassen ist dadurch erschwert; das System ist offen.

Bergschadenkundliche Problemstellung

Untertägige Salzlösungsprozesse können zu Spannungsumlagerungen im Gebirge und in Folge dessen zu Bodenbewegungen und Tagesbrüchen führen. Derzeitige Bruch- und Senkungsereignisse im Raum Staßfurt überlagern sich mit bereits in der Vergangenheit eingetretenen Bergschäden. In weiten Teilen hat sich die Tagesoberfläche des Stadtgebiets unter das Niveau des natürlichen Grundwasserspiegels abgesenkt. Um eine flächige Vernässung zu vermeiden, werden täglich rund 1000 m³ Wasser gehoben. Dadurch kommt es neben dem ökologischen Problem der Vorflutversalzung zu einer Selbstanregung der Salzlösungsprozesse. Zudem befinden sich innerhalb des potenziellen Vernässungsbereichs teilweise hochtoxische Altablagerungen der chemischen Industrie, des Kalibergbaus sowie militärische Altlasten.

Mittels Flutungsbohrungen ca. 7 km nordwestlich der Stadt wurde schwach gesättigte Sole in die Grubenbaue eingeleitet (vgl. **Bild 1c**). Durch Verpumpen in die Hohlräume unterhalb der Stadt sollte sich die Sole auf ihrem Fließweg aufsättigen und lösungsaktiv die Grubenbaue auffüllen. Dies führte in den Hohlräumen unterhalb des Stadtgebiets zur Abschwächung der Salzlösungsprozesse, jedoch im Einleitungsbe- reich zu bis heute anhaltender Subrosion.

Chemisch-thermodynamische Berechnungen und Kinetik

Hydrogeochemische Situation

Der Lösungsprozess salinarer Gesteine kann unter Annahme bestimmter Randbedingungen durch *chemisch-thermodynamische* Gleichgewichtsberechnungen nachvollzogen werden (HERBERT & REICHELT 1992, SANDER 1988). Dabei ist die Annahme eines geschlossenen Systems hinsichtlich der Menge der Sole sowie der chemisch umgesetzten Stoffmassen unabdingbar (Kontinuitätsgesetz). In offenen Systemen sind entsprechende Randbedingungen abzuschätzen bzw. durch Heuristiken zu ersetzen.

Die Lösung carnallitischer Salze ist ein *kinetischer* Prozess, in dessen Verlauf sich innerhalb mehrerer metastabiler Zwischenphasen chemisch-thermodynamische Gleichgewichte einstellen. Das sich jeweils einstellende Gleichgewicht ist für einen bestimmten Zeitraum stabil. Unter gleich bleibender Zusammensetzung der Sole kann dabei gleichzeitig Auflösung und Ausfällung von Salzmineralen erfolgen (*dynamisches* Gleichgewicht).

Weiterhin beeinflussen *mechanische* Vorgänge den untertägigen Salzlösungsprozess. Durch die kontinuierliche Auflösung und Ausfällung von Salzen findet eine Veränderung der Oberfläche des zur Solung zur Verfügung stehenden Salzgesteins statt. Zum einen führen Kristallisationsvorgänge zur teilweisen Versiegelung (Maskierung), zum anderen wird durch Absetzen unlöslicher Substanzen Salzgestein dem Lösungsangriff entzogen (Blockierung). Diese Vorgänge verändern das Verhältnis zwischen dem Volumen der Lösung und der Oberfläche des zu lösenden Salzgesteins, welches auf die Entwicklung des Lösungsprozesses entscheidenden Einfluss hat.

Kinetische und mechanische Einflussgrößen können in aktuell verfügbaren geochemischen Rechenmodellen nur indirekt berücksichtigt werden. Diesem Umstand ist bei der Entwicklung neuer Ansätze zur dynamischen Modellierung von Salzlösungsprozessen Rechnung zu tragen.

Kinetische und mechanische Vorgänge sind zudem bislang nicht ausreichend untersucht, um mathematisch formulierbare Zusammenhänge abzuleiten, was die Veranlassung zur Planung und Durchführung eines untertägigen Salzlösungsversuchs (in situ) ist.

In situ-Versuch

Ziel des in situ-Versuchs ist es, durch die Beobachtung eines geschlossenen hydrogeochemischen Systems funktionale Zusammenhänge zwischen chemisch-thermodynamischen, kinetischen und mechanischen Abläufen eines Salzlösungsprozesses abzuleiten. Dazu ist vorgesehen, mehrere untertägige Bohrlöcher mit Sole zu füllen und zeitabhängig die Zusammensetzung der Sole und die geometrische Veränderung und Beschaffenheit des Bohrlochs zu untersuchen.

Temporales Geoinformationssystem

Notwendigkeit neuer Lösungsansätze

Prognosen von Standfestigkeiten und Bodenbewegungen im Raum Staßfurt sind schwierig, da eine Vielzahl benötigter geometrischer und geomechanischer Parameter fehlt, die wegen des komplexen Flutungs- und Ersaufensprozesses nicht gegeben sind (ENGELMANN & KLAMSER 1996).

Deshalb wird hier ein neuer Lösungsansatz vorgeschlagen, der bergschadenkundliche Prognosen und Bewertungen stützen kann. Dies soll durch Zusammenführen von geologischen, hydrogeochemischen und bergbaulichen Daten mit einer geochemischen Modellierung und Einbettung in ein *Informationssystem* erreicht werden (**Bild 2**).

Bei der Entwicklung dieses Systems werden Erfahrungen und Daten genutzt, die in dem Projekt Fernerkundungs-GIS unter Leitung von ▶

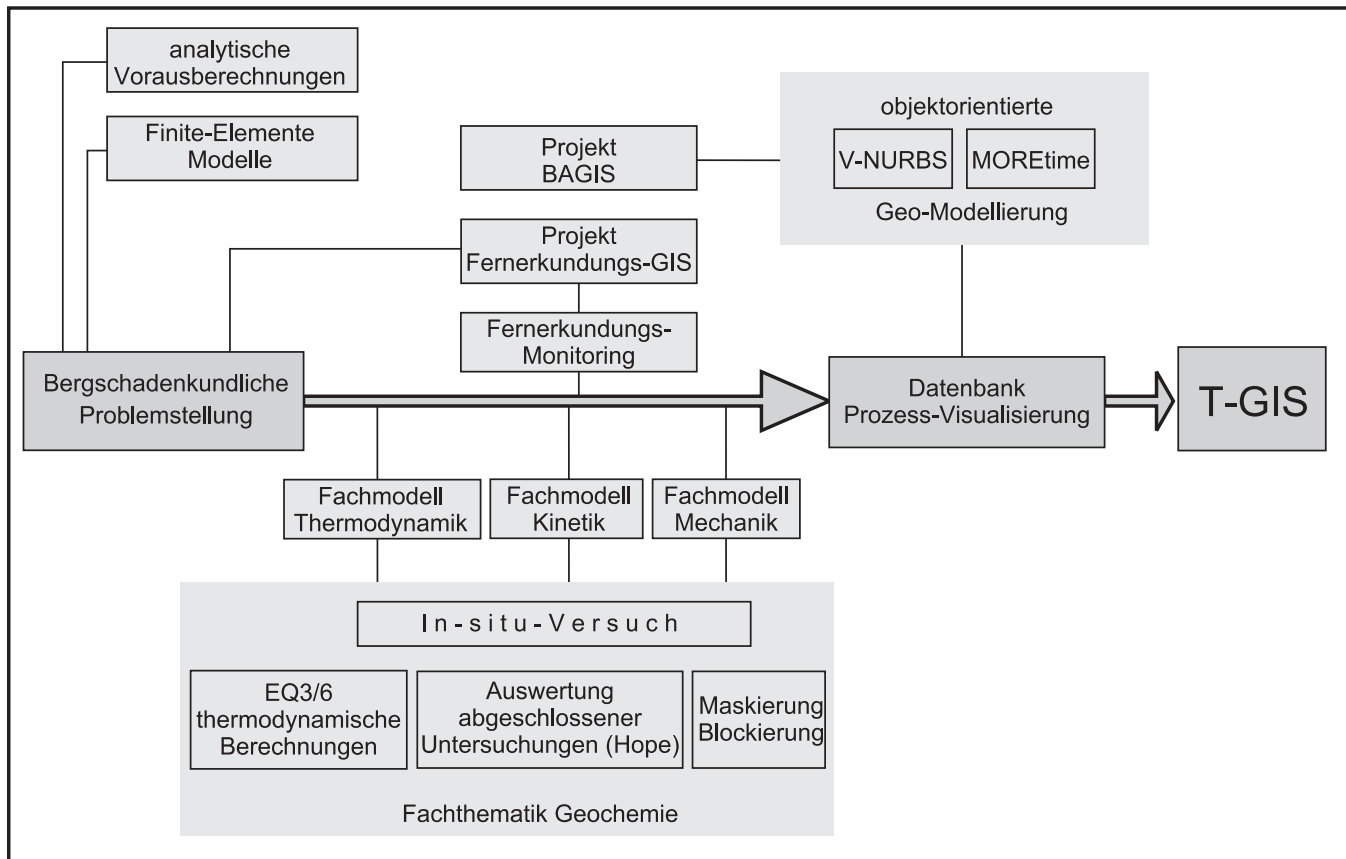


Bild 2: Geplanter Projektverlauf

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Busch gesammelt werden konnten (SCHLUSSBERICHT FE-GIS 2002). Es erfolgte eine umfangreiche Recherche raum- und bergbaubezogener Daten im Altbergbaugbiet Staßfurt, welche eine wertvolle Grundlage für die fachthematische Modellierung im laufenden DFG-Projekt darstellen. Das Projekt wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) gefördert. Kooperationspartner waren die Firma Kali-Umwelttechnik (K-UTEC) GmbH, Sondershausen, und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin.

Der Aufbau eines Temporalen GIS (T-GIS) in der laufenden DFG-Projektgruppe stützt sich auf Konzepte, die für das Baugeologisch-Geotechnische Informationssystem BAGIS aufgestellt worden sind (SCHÖTTLER ET AL. 1998). Das Projekt BAGIS wurde durch die Volkswagenstiftung gefördert und mit BAGIS_{VR} erweitert. Im Kern ist darin das objektrelationale Datenbankmodell CORE und die Fachschale MORE (HÖRNER 1999) zur Verwaltung thematischer Daten umgesetzt. Mit dem Modul Geo-CORE (BERGSTEDT 1999) erfolgt die Integration räumlicher (topologischer und metrischer) Informationen.

Für die Modellierung zeitlich und räumlich variierender Salzlösungsprozesse sind diese Konzepte zu dem T-GIS auszubauen. Dafür notwendige Erweiterungen umfassen die Schale

MOREtime (LICHTSINN 2000) zur Integration der Zeit und die Anpassung des Moduls Geo-CORE (KESPER 2001), wobei die Geo-Objekte einheitlich durch *Temporale Volumen-NURBS* (V-NURBS) repräsentiert werden, sowie ein Versionenkonzept.

Dynamische Modellierung

Mit der fachthematischen Auswertung des in situ-Versuchs und mit Expertenwissen lassen sich Rahmenbedingungen und Beschränkungen für den Salzlösungsprozess ableiten. Diese werden zusammen mit Daten und Berechnungsvorschriften des dynamischen Lösungsprozesses im T-GIS als *Konsistenzkriterien* persistent verwaltet. Zusätzlich lassen sich zeitliche, metrische und topologische Randbedingungen festschreiben, die die Modellierungen realistisch begrenzen. Entsprechend der Konzepte einer objektorientierten Modellierung wird der Untersuchungsraum durch ein System von Geo-Objekten repräsentiert, deren Form und Position durch Messwerte gestützt vorgegeben sind.

Der *Modellraum* umfasst den weiter oben beschriebenen in situ-Versuch und soll in einer Weiterentwicklung die Grube Neustaßfurt und benachbarte Grubenbaue vom Beginn der Flutung 1972 bis in die nahe Zukunft umfassen.

V-NURBS sind eine Erweiterung der bekannten und in CAD-Systemen zur kontinuierlichen Beschreibung und Darstellung von Oberflächen

eingesetzten NURBS-Freiformflächen (PIEGL & TILLER 1997). V-NURBS erlauben eine funktionale Beschreibung der Geometrie und der räumlich differenzierten Kennwertverteilungen. Es ergibt sich die Möglichkeit zur methodischen Behandlung des „Inneren“ und der „Oberfläche“ von Geo-Objekten ohne erzwungene Diskretisierung des Raums. Die Darstellung von Merkmalsausprägungen erfolgt durch explizite Farbzuzuweisung an den Knoten des Kontrollgitters und durch Interpolation der Zwischenräume (Bild 3). Die Visualisierung ist durch die Anwendung von level-of-detail Techniken (KÖRBER 2002) beliebig skalierbar.

Die temporale Erweiterung der V-NURBS erlaubt die kontinuierliche Beschreibung der geometrischen Veränderungen in der Zeit.

Thematik, Geometrie und Zeit

Das Zusammenwirken der fachthematisch beschriebenen Zustandsgrößen und Abhängigkeiten (vgl. Kap. „Chemisch-thermodynamische Berechnungen und Kinetik“) wird als dynamischer Geoprozess auf der *thematischen Ebene* des Informationssystems abgebildet. Dynamische Wechselwirkungen und Interaktionen zwischen den Geo-Objekten sowie Restriktionen und Konsistenzkriterien werden als Methoden formuliert und implementiert. Diese beschreiben den voranschreitenden Lösungsprozess unter Nutzung physikalischer und geochemischer ▶

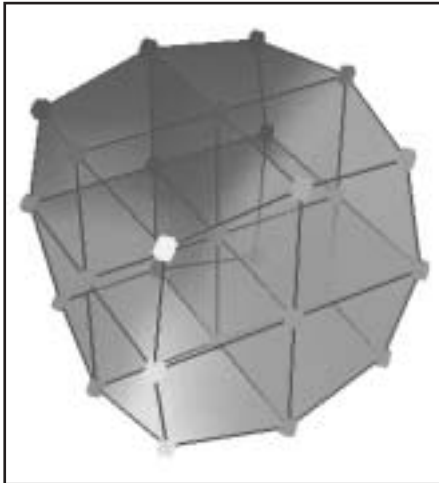


Bild 3: V-NURBS-Darstellung eines Geo-Objektes

Attribute sowie gebiets- und raumspezifischer Parameter (Steigung, Volumen, Exposition).

Grundlage für die zeitlichen Modellierungen ist die Aufstellung eines geometrischen 3D-Modells des Ausgangszustands anhand vorhandener Messdaten. Das Modell wird visualisiert und kann durch „Expertenwissen“ am Bildschirm interaktiv ergänzt und modifiziert werden. Übergeordnete *topologische* und thematische Restriktionen finden dabei Berücksichti-

gung und bilden die Grundlage für eine permanente regelbasierte Überwachung der geometrischen Modellierung. Diese Konditionierung durch das System ist persistent und wird mit einem aktiven Datenbankkonzept realisiert. Topologische Eigenschaften und Beziehungen der Geo-Objekte (Nachbarschaft, Überlappung, Beinhaltung, etc. sowie Richtungen und Reihenfolgen) werden auf einer der Metrik übergeordneten Ebene definiert.

Es sind zwei orthogonale Zeitdimensionen in das Datenmodell einzufügen. Mit der *Transaktionszeit* wird die Historie der Geo-Objekte in der Bearbeitung, Modellierung und Simulation verwaltet. Ein Zu(rück)greifen auf vergangene Bearbeitungs- und Systemzustände wird damit möglich. Die *Gültigkeitszeit* beschreibt die Geschichte der Geo-Objekte in der natürlichen Zeit und ist die Dimension für dynamische Modellierungen. Im Datenmodell wird die Zeit über Zeitstempel eingefügt, wobei Objekte, Relationen und einzelne Attribute zeitgestempelt werden können.

Die zeitliche Modellierung von Lösungs-Szenarien wird durch die Vorgabe von Zustandsänderungen gesteuert und in *Versionen* gespeichert und verwaltet. Eine kontinuierliche Visualisierung der Szenarien unterstützt die Analyse und Beurteilung von Interventionen.

In geowissenschaftlichen Anwendungen vorhandene *Unsicherheiten* und unterschiedliche

Genauigkeiten der Messwerte und Abhängigkeiten müssen im System über die Einführung von fuzzyfizierten oder stochastischen Datentypen und Methoden Berücksichtigung finden.

Der hier vorgestellte Modellansatz unterscheidet sich von Systemen, die auf rein thermodynamischen Berechnungen basieren, durch die kontinuierliche Beschreibung von Raum und Zeit und die Bindung der Prozessmodellierung an Geo-Objekte in ihrer räumlichen und zeitlichen Umgebung (Topologie).

Anm. d. Red.: Ausführliche Literaturangaben sind auf Wunsch bei den Verfassern erhältlich.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Busch

Dipl.-Geol. Caroline Hanusch

Dipl.-Geol. Steffen Knospe

Dr.-Ing. Klaus Maas

Institut für Geotechnik und Markscheidewesen

Erzstraße 18

38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel.: 05323/72-2076 (Busch)

05323/72-3790 (Hanusch)

05323/72-2236 (Knospe)

05323/72-3515 (Maas)

Fax: 05323/72-2479