

Entwicklung eines GIS zum Monitoring und zur Prognose von Senkungs- und Bruchrisiken über Kalialtbergbau, unter besonderer Verwendung fernerkundlicher Daten

Wolfgang Busch, Michael Busch,
Christian Fischer, Klaus Maas

Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal,
Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld
www.igmc.tu-clausthal.de

In Teilbereichen der gefluteten Grubenbaue des ehemaligen Staßfurter Salzbergbaus verursacht rezente Subrosion Spannungsumlagerungen, die zu erheblichen Gebirgsdeformationen und aktiven Senkungs- und Brucherscheinungen an der Tagesoberfläche führen. Die derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Gefährdungen der Infrastruktur und Bausubstanz, sowie die Beeinträchtigungen von Landnutzung, Agrarstruktur und des regionalen Wasserhaushalts sind erheblich. Dies beeinträchtigt auch die sozio-ökonomische Situation, da Stadt- und Raumentwicklung gehemmt sind. Daher besteht die Notwendigkeit bergschadensmindernder Maßnahmen, die den selbstanregenden Wirkungskreis von Stümpfung, Grundwasserzufluss und Subrosion nachhaltig dämpfen. Zur Überwachung der Tagesoberfläche und zur Erfassung potenziell gefährdeter Flächen ist in einem ersten Schritt der Aufbau eines Fachinformationssystems notwendig. Da die Auswirkung technisch möglicher, zudem kostenintensiver Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich ihres Effekts auf das Wirkungsgefüge nicht eindeutig abgeschätzt werden können, ist in einem weiteren Schritt für die Planung von Maßnahmen die Erstellung eines Modells zur raum- und zeitvarianten Erfassung des untertägigen Wirkungsgefüges wichtig, damit die Wirkungen geotechnischer Eingriffe zunächst simuliert werden können. Diese Arbeiten erfolgen vor dem Hintergrund, dass einerseits Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen notwendig sind, deren Planung aber schwierig und deren Umsetzung kostspielig ist.

Bei den zu simulierenden Verfahren zur Sicherung stillgelegter Kali- und Steinsalzbergwerke muss zwischen der Stilllegung von Bergwerken im Rahmen des Abschlussbetriebsplanverfahrens nach §53 Bundesberggesetz (BBergG)¹ und der Sicherung von stillgelegten bergbaulichen Gewinnungsbetrieben ohne Rechtsnachfolger unterschieden werden. Im ersten Fall ist der Unternehmer zu Sicherungsmaßnahmen verpflichtet. Im zweiten Fall, und dieser liegt im Staßfurter Revier vor, ist das Bergamt im Rahmen der geltenden Zuständigkeitsregelungen für die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit (Gefahrenabwehr) zuständig [17].

¹ Die Stilllegungsmaßnahmen der Bergbauunternehmer im Rahmen des Abschlussbetriebsplanverfahrens [1] werden von [14] beschrieben.

Vor dem zuvor geschilderten Hintergrund entwickelt das Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (IGMC) der TU Clausthal im Rahmen eines Verbundprojekts, gefördert durch das Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), FKZ 50EE9920, ein GIS-basiertes System zur Umweltüberwachung im Bergschadensgebiet Staßfurt, unter besonderer Verwendung fernerkundlicher Daten (FE-Daten). Verbundpartner sind die Firma K-UTEC Kali-Umweltechnik, Sondershausen, die ihrerseits eine operationell anwendbare Methode zum Monitoring von Bruch- und Senkungsrisiken für das Gebiet Staßfurt entwickelt, sowie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Dienstbereich Berlin, die eine Erfassung von Destabilisierungsprozessen durch Auswertung von Fernerkundung erprobt hat. [18] Auf Basis der bisherigen Entwicklungen beginnt das IGMC in 2001 im Rahmen einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungskoooperation die Entwicklung einer Methode zur Modellierung und Simulation des der Subrosion zu Grunde liegenden Wirkungsgefüges. Kooperationspartner sind der Arbeitsbereich Technische Informatiksysteme der Universität Hamburg und das Institut für Geologie und Paläontologie der TU Clausthal.

1 Problemstellung

1.1 Bergschadenkundliche Situation

Nach jahrhundertlangem Salinenbergbau wurde im Raum Staßfurt seit 1861 planmäßig Kalisalz gefördert. Der Teil des Grubengebäudes im Bereich der sogenannten Südwestflanke liegt unterhalb des heutigen Stadtzentrums und ist zwischen 1878 und 1922 durch Süßwasserzuflüsse wild ersoffen. Auf der Nordostflanke wurde bis 1972 Bergbau betrieben. Ausgehend von der Südwestflanke wurde das Grubengebäude bis 1979 mit Halbsole planmäßig geflutet. Das Absaufen bzw. planmäßige Fluten hat zu einem solegefüllten Hohlraumvolumen von ca. 20 Mio. m³ und damit zu untertägigen Salzlösungsvorgängen (im Weiteren als Subrosion bezeichnet) geführt². Dieser Lösungsprozess führt zu Spannungsumlagerungen im Gebirge und damit zu aktiven Einwirkungen an der Tagesoberfläche. Es ist derzeit von anhaltenden Senkungen und stellenweise dem Auftreten von Tagesbrüchen auszugehen. Die Bruch- und Senkungereignisse überlagern sich mit den bereits in der Vergangenheit eingetretenen Bergschäden. In diesem Zusammenhang sind vor allem drei Anfang des Jahrhunderts gefallene Tagesbrüche zu nennen. Der größte dieser Tagesbrüche hat einen Durchmesser von 140 Meter und eine Tiefe von 40 Meter. Insgesamt ist im Stadtgebiet von Staßfurt ein Senkungsbereich von ca. 200 ha, mit Senkungsbeträgen von stellenweise über 6 Meter zu verzeichnen. Es sind inzwischen weitere Tagesbrüche gefallen, weswegen weitere Brüche und eine Zunahme der Senkung zu befürchten sind. In Folge der Bodenbewegungen sind seit 1960 über 850 Gebäude im Stadtgebiet von Staßfurt abgerissen worden. In weiten Teilen hat sich die Tagesoberfläche des Stadtgebiets unter das Niveau des natürlichen Grundwasserspiegels abgesenkt. Um eine flächige

² Die Zahlenangaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf [17].

Vernässung zu vermeiden wird zentral im Stadtgebiet insgesamt täglich rund 1000 m³ Wasser gehoben (vgl. folgende Abbildung 1).

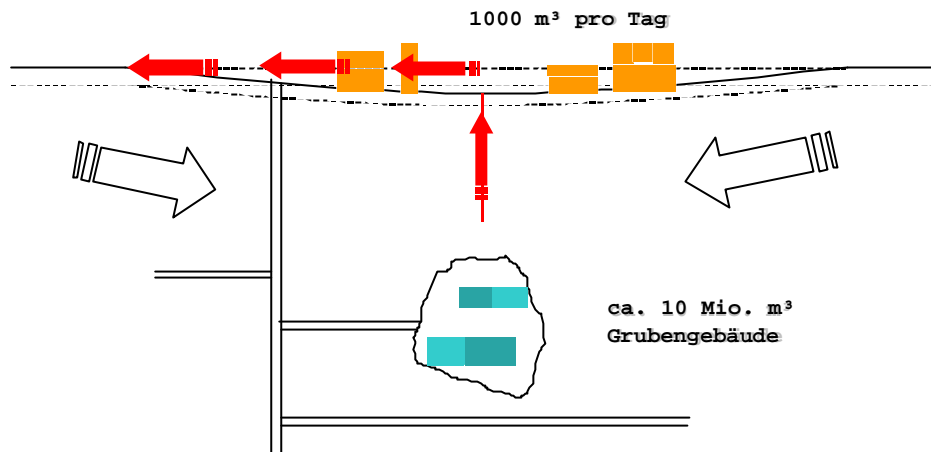


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Bodensenkung, Sumpfung (kleine Pfeile), Grundwasserzufluss (große Pfeile) und Subversionsprozess in einem gefluteten Kalibergwerk.

Durch die Wasserhebung kommt es, neben dem ökologischen Problem der Vorflutversalzung, zu einer Selbstanregung des oben geschilderten Subversionsprozesses. Zudem befinden sich innerhalb des potenziellen Vernässungsbereichs 26 teilweise hochtoxische Altablagerungen der chemischen Industrie, des Kalibergbaus und deutscher und russischer militärischer Altlasten. Die Situation kann für die Stadt Staßfurt und die Region als schwer beherrschbar eingestuft werden. Hierzu ist vom Land Sachsen-Anhalt eine interministerielle Arbeitsgruppe gegründet worden [6]. Dies verdeutlicht die Dringlichkeit von nachhaltigen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen.

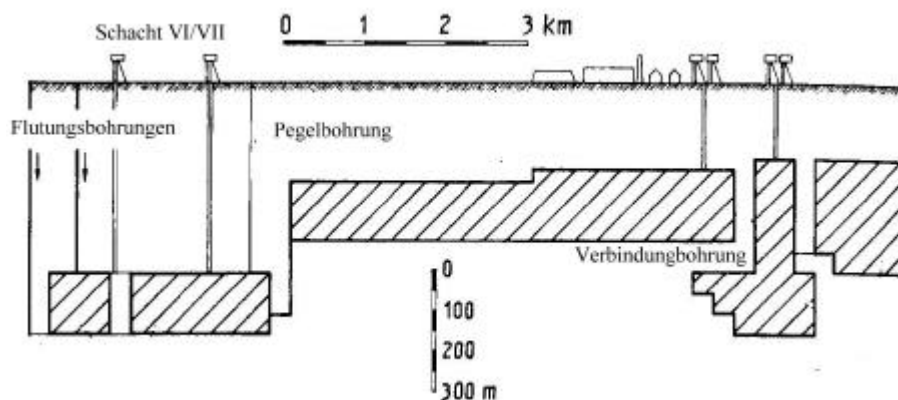


Abbildung 2: Flutungsschema Neustaßfurt, Schacht VI/VII [3].

Abbildung 2 zeigt einen Schnitt zur Flutungssituation Neustaßfurt Schacht VI/VII [3] im Jahr 1972. Die schraffierten Flächen stellen schematisch die ursprüngliche Ausdehnung der Grubenbaue dar. Durch Einleitung von schwach gesättigter Sole mittels Flutungsbohrungen im Umfeld der von der Stadt Staßfurt entfernten Schächte VI/VII und Verpumpen dieser Sole in die Grubenbaue unterhalb der Stadt, sollte sich die Sole auf dem Transportweg aufsättigen und unter dem Stadtgebiet als lösungsinaktive Sole die Hohlräume auffüllen. Dies führte zwar in den Hohlräumen unterhalb des Stadtgebiets zur Abschwächung des Subrosionsprozesses, führte jedoch im Einleitungsbereich zu bis heute anhaltender erheblicher Subrosion.

1.2 Analytische Prognoseverfahren

Die zuvor beschriebene Bergschadensproblematik schildert eine untypische Anwendung analytisch-markscheiderische Verfahren zur Vorausberechnung von Bodenbewegungen über untertägigen Hohlräumen, da die den analytischen Verfahren zugrundeliegenden Einflussfunktionen nicht geeignet sind, stark ortsvariante subrosionsbeeinflussende Eigenschaften des Salzgebirges, sowie zeitvariantes Lösungspotenzial von hohlraumfüllender Sole, zu berücksichtigen. Die genannten Einflussfaktoren sind jedoch mit entscheidend bei der Subrosionsproblematik.

1.3 Numerische Prognoseverfahren³

Die Methode der finiten Elemente bietet, unter der Voraussetzung eines die Tagesoberfläche einschließenden Berechnungsmodells, die Möglichkeit einer Vorausberechnung der Bodenbewegungen in Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften des Gebirges, der bergmännischen Auffahrung und Verfüllung von Grubenbauen sowie der subrosionsbedingten Ablaugung salinärer Gebirgsbereiche. Methodisch bedingt liefert die gebirgsmechanische Berechnung den Verlauf und die Verteilung der Verschiebungen und Verformungen nicht nur für beliebige Lokationen des Berechnungsausschnitts, sondern auch ihren zeitabhängigen Verlauf. Die messtechnisch erfassten Oberflächenabsenkungen werden maßgeblich durch folgende Parameter beeinflusst:

- Mächtigkeit und Einfallen der das Gebirgsmodell aufbauenden Gesteine (Homogenbereiche)
- stoffmodelltheoretische Abbildung der Homogenbereiche durch elastische, plastische oder viskose Stoffmodelle
- singuläre Schwächezonen (Trennflächen, Klüfte, Scherzonen)
- Größe, Lage und Konfiguration von Grubenbauen

³ Vgl. Antragstext zum DLR-Vorhaben, FKZ 50EE9920.

- zeitliche Entwicklung von Grubenbau-Auffahrungen und -verfüllung bzw. Verbruch.

Diese Parameter und Randbedingungen sind für den Untersuchungsraum Staßfurt aufgrund der komplexen Flutungs- und Ersaufensprozesse nicht ausreichend gegeben. [5] Eine genaue Prognose von zukünftigen Oberflächenabsenkungen ist auf Grundlage des heutigen Kenntnisstands der Senkungsproblematik, des ausgewerteten Sekundärmaterials und der Ergebnisse bisheriger Kontrollbohrungen nicht möglich. In der Literatur veröffentlichte Ergebnisse von Senkungs- und Bruchprognosen über bergbaulichen Hohlräumen im Salzgebirge auf Grundlage der finiten Elemente Methode gehen von vereinfachenden Annahmen aus (z. B. Rotationssymmetrie), die auf die Subrosionsproblematik in Staßfurt nicht übertragbar sind. [6]

Die Darstellung der Methoden zur Bergschadensprognose zeigt, dass mit bisherigen Ansätzen keine quantifizierbare und gesicherte Senkungs- und Bruchprognose über den ersoffenen bzw. gefluteten Hohlräumen möglich sind. Dadurch besteht für das zuständige Bergamt eine erhebliche Unsicherheit hinsichtlich der Festlegung von Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen und der Stadt Staßfurt ist es nicht möglich, schadensfreie Stadtgebiete für raumplanerische Maßnahmen zur Verfügung zu stellen.

2 Ziele

2.1 DLR-Forschungsverbund

Aus marktscheiderischer Sicht ist wegen der zuvor genannten Gründe in Staßfurt mit konventionellen Methoden keine verlässliche Schadensprognose möglich. Bisherige analytische marktscheiderische Vorausberechnungen und numerische gebirgsmechanische Standfestigkeitsberechnungen benötigen eine Vielzahl geometrischer und geomechanischer Parameter, die, wie zuvor beschrieben, für den Untersuchungsraum nicht gegeben sind. Statt dessen soll durch das Zusammenführen ausgewerteter höchstauflösender Fernerkundungsdaten mit Daten zur geologischen, hydrogeologischen und bergbaulichen Situation das Schadensmonitoring unterstützt werden. Im Rahmen dieses Monitorings ist ein wesentlicher Baustein die fachgerechte und effektive Integration aller projektrelevanten Datenebenen und die Bereitstellung notwendiger Funktionalitäten und Analysewerkzeuge zur Bearbeitung der FE-Daten. Dieser Baustein wird im Rahmen des DLR-Forschungsverbunds durch das IGMC in Form eines Fach-Informationssystems realisiert. Das System fungiert als Kern für eine edv-gestützte Bearbeitung von Fragestellungen im Altbergbau und der Umweltüberwachung.

2.2 DFG-Forschungskooperation

Die raum- und zeitvariante Modellierung und Visualisierung des der Subrosion zugrunde liegenden Lösungsprozesses soll im Rahmen der DFG-Forschungskooperation

Forschungskooperation mit temporalen räumlichen NURBS (Non Uniform Rational Basic Splines) erfolgen. Mit dem Modellierungsverfahren werden auf Grundlage geometrischer Informationen Objekte definiert. Diesen Objekten werden dann die thematischen Eigenschaften Löslichkeit (Salzgestein) bzw. Lösungspotential (Sole) zugewiesen. Darauf aufbauend wird die geometrische und thematische Änderung der Objekte zwischen den diskreten bekannten Zuständen mathematisch formuliert. Dazu werden funktionale hydrologische und geochemische Ansätze, sowie Auswertungen zahlreicher Beprobungen und Messungen herangezogen und angepasst, die in der Vergangenheit für den Untersuchungsraum oder unter vergleichbaren Bedingungen aufgestellt bzw. durchgeführt worden sind. Die so einem Morphing-Prozess zugrunde liegenden Algorithmen werden unter Verwendung von Virtual-Reality-Methoden (VR) schrittweise optimiert. Anschließend lassen sich innerhalb des Modellzeitraums durch Manipulation der Geometrien und thematischen Eigenschaften geotechnische Steuerungsmaßnahmen, wie z.B. Vergelung, Injektion oder Verfüllung bestimmter Bereiche, simulieren. Die Manipulation führt zu Änderungen gegenüber dem bekannten Modellergebnis, wodurch eine Beurteilung der Auswirkung der geotechnischen Maßnahme, ohne Extrapolation der Datenbasis, möglich ist. Das in iterativen Schritten validierte Modell dient anschließend der Simulation geotechnischer Maßnahmen, welche über den Modellzeitraum hinaus in die Zukunft gerichtet sind.

3 Angewendete Methoden

Die Entwicklung des FE-GIS gliedert sich in Daten- und Funktionsmodellierung, Aufbereitung von Fernerkundungsdaten (hochauflösende Luftbilder, Satellitenbilddaten, bildgebende Scanner- und Laserscannerdaten), Modellierung und Visualisierung der untertägigen Situation auf Basis der geotechnischen und markscheiderischen Daten, Kopplung der aufbereiteten Fernerkundungsdaten mit den Daten der modellierten untertägigen Situation, sowie der Abschätzung von bruch- und senkungsgefährdeten Bereichen.

3.1 Anwendungsfallanalyse

Die Entwicklung einer an die Bedürfnisse der Anwender angepassten Applikation wurde mit Hilfe einer Anwendungsfallanalyse nach UML [2] modelliert. Damit wird das gewünschte Systemverhalten, z. B. durch die Zusammenarbeit zwischen Endanwendern und Entwicklern, ermittelt. Anhand dieser Analyse wurde das FE-GIS in vier Anwendungsfälle, welche das wesentliche System- bzw. Teilsystemverhalten beschreiben, aufgeteilt: Der Datenverwaltung, dem Monitoring, der Darstellung geometrischer Objekte sowie Verschneidungen. Die ermittelten Anwendungsfälle wurden anschließend analysiert und geeignete Teilanwendungsfälle abgeleitet (vgl. die folgende Abbildung 3). Anhand der Anwendungsfälle werden die benötigten Funktionalitäten entwickelt und in das FE-GIS implementiert.

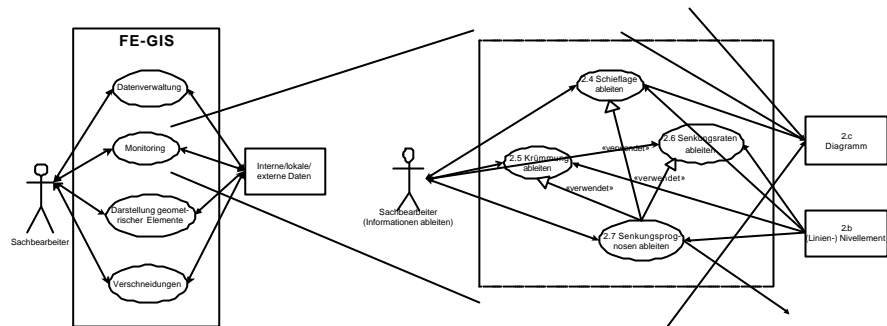


Abbildung 3: Exemplarischer Darstellung des Teilanwendung „Monitoring“.

3.2 MetaSys

MetaSys erweitert das FE-GIS um Funktionalitäten der Datendokumentation und ermöglicht die Datenqualität (beispielsweise Genauigkeit, Auflösung der Daten) anzugeben. Diese sogenannten Metadaten werden nach ISO Spezifikation 11179 wie folgt definiert: „*The information and documentation which makes data sets understandable and shareable for users*“. Anhand einer Diplomarbeit [16] wurde ein Datenmodell für Metadaten eines GIS entwickelt und implementiert. In der nachfolgenden Abbildung 4 wird die Integration von MetaSys in das FE-GIS veranschaulicht. MetaSys bietet auch die thematische Suche über den kompletten, über die Daten eines einzelnen Views hinausgehenden, Datenbestand des FE-GIS.

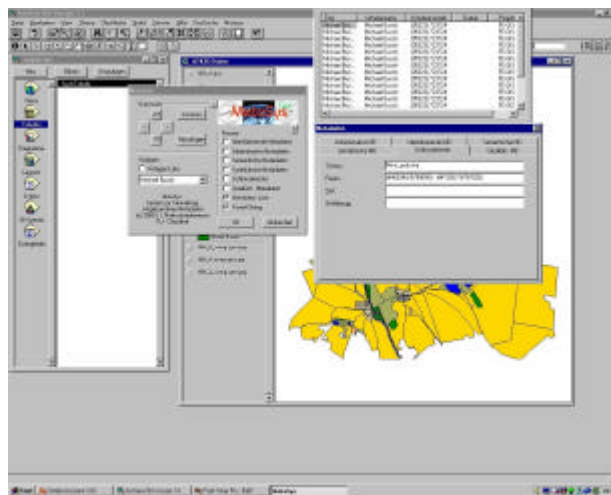


Abbildung 4: Anzeige der zu einem Punkt, einer Linie oder einer Fläche gehörenden Metadaten.

3.3 Einbindung fernerkundlicher Daten

Eine multisensorale und multitemporale Auswertung von Fernerkundungsdaten ist eine Methode, effizient Basisdaten für eine Überwachung betroffener Flächen bereitstellen zu können.⁴ Im Rahmen des Monitorings wird u.a. Bildmaterial von kommerziellen hochauflösenden flugzeug- und satellitengetragenen Sensoren verwendet, was Anwendungen im Bereich großmaßstäbiger Umweltüberwachungen ermöglicht. Eine umfassende und automatische Verknüpfung dieser Daten mit weiteren fachbezogenen Daten ist nur auf Basis eines Geo-Informationssystems möglich. Damit wird der Aufbau und die Entwicklung eines Fach-Informationssystems möglich, das zukünftigen Anwendern alle notwendigen Informationen und Funktionalitäten für eine Erfassung, Analyse und Bewertung von Gefährdungsbereichen in Altbergbaugebieten zur Verfügung stellt.

Eine wesentliche Komponente des zu entwickelnden Informationssystems umfasst die Integration unterschiedlicher Fernerkundungsdaten. Für eine effektive GIS-gestützte Auswertung und für eine fachgerechte Kopplung mit den bergbaurelevanten Daten müssen die Originaldaten und die ausgewerteten Daten analysiert und im Hinblick auf ihre thematische und geometrische Aussageschärfe, z. B. mit dem entwickelten Modul MetaSys, bewertet werden. Damit ist für zukünftige Anwender eine Kontrolle der Analysen möglich. Zu Fragestellungen im Bereich der Integration von Fernerkundungsdaten in Geo-Informationssystemen wird beispielhaft auf [4, 12, 18] verwiesen.

3.4 Abschätzung eines Einwirkungsbereichs

Aufgrund der komplexen geotechnischen Rahmenbedingungen ist die Ableitung eines direkten kausalen Zusammenhangs zwischen den untertägigen Hohlräumen und den übertägigen Senkungs- und Bruchereignissen nicht möglich. Nur durch eine Berücksichtigung der Geometrie der ursprünglichen Grubenbaue, der Erfassung der durch Subrosion bewirkten räumlichen Veränderungen der Grubenbaue, der gebirgsmechanisch relevanten Parameter und der an der Tagesoberfläche aufgetretenen Veränderungen, ist ein Zusammenhang ableitbar und eine Bewertung des Gefährdungspotenzials möglich. Auf Grund der Unbefahrbarkeit der Grubenbaue und damit verbundenen Unkenntnis über die tatsächliche Ausdehnung der subrodierenden Hohlräume, sind die zuvor beschriebenen Bedingungen nicht gegeben. Um dennoch Schadensabschätzungen zu ermöglichen, wird über die Festlegung von Teufe und lateral verschiedenen Grenzwinkeln die Abschätzung eines Einwirkungsbereichs an der Tagesoberfläche realisiert. Mit diesem Einwirkungsbereich können im FE-GIS raum- und attributbezogene Analysen durchgeführt werden. Die Anwendung ersetzt keine analytischen oder numerischen Senkungsvorausrechnungen, sondern kann geotechnisch

4 Ergebnisse bereits erfolgter Untersuchungen [18] haben u.a. für den Raum Staßfurt gezeigt, dass die Ausweisung von durch untertägige Destabilisierungsprozesse gefährdeten Bereichen möglich ist.

oder gebirgsmechanisch erfahrenen Anwendern einen ersten Überblick möglicher Einwirkungsbereiche liefern. Vor Vorteil hinsichtlich der Plausibilität ist, dass gemeinsam mit einem projizierten Einwirkungsbereich auch Grubenbaue und lösungsrelevante geologische Körper dreidimensional dargestellt werden können.

3.5 Aufbereitung der echometrischen Messdaten

Wegen des Senkungs- und Bruchgeschehens in der Umgebung des Schachts VI ist im Jahr 1998 eine echometrische Hohlraumvermessung durchgeführt worden. Zum Zeitpunkt der echometrischen Vermessung war der Schacht bereits subrodiert und es deuteten sich weitreichende Hintersolungen an. Die Hintersolungen treten in vergleichsweise subrosionsaktiven Bereichen auf, die für die Analyse der Lösungsprozesse besonders untersuchungswürdig sind. Die rund 7500 Messwerte sind systematisch nach Horizontal- und Vertikalvisuren angeordnet. Die Horizontalvisuren können einzelnen Horizonten zugeordnet werden. Allerdings werden im Bereich von Hintersolungen mehrere Echos von einer Sondenposition aus erfasst. Vertikalvisuren sind Messungen mit gekippter Echosonde, um zusätzlich zu den horizontalen Visuren, z. B. hintersolte Bereiche besser erfassen zu können. Wegen der Form der Hintersolungen kann die Kontur auch mit Unterstützung durch gekippte Visuren nicht immer vollständig erfasst werden. Demnach sind die Hintersolungen wahrscheinlich weiter fortgeschritten, als durch Interpolation der Messwerte ermittelt wird. Die Messwerte aller horizontalen und gekippten Visuren, inklusive der Mehrfachreflexionen in hintersolten Bereichen, stellen räumlich eine Messpunkt Wolke dar. Die Interpolation dieser Messpunkt Wolke zu einer Fläche ist mit bisher angewendeten Verfahren automatisiert nicht möglich, sondern bedarf der fachlich interpretierten Klassifizierung von Messwerten. Gemäß dem markscheiderischen Verständnis bei der Anfertigung risslicher Unterlagen unterbleiben Extrapolationen in offensichtlich hintersolten, aber nicht erfassten Bereichen. Um die Informations- und Methodenlücken bzw. die Risiken einer Interpretation im Bereich der Hintersolungen nicht als Fehlerquelle in das Modell des Lösungsprozesses zu übertragen, werden bei der Festlegung der Messwertreihenfolge, sowie der Interpolation und Extrapolation der Messwerte softcomputing basierte Methoden, wie Growing Neural Gases, eingesetzt. Neben den echometrischen Rohdaten als Raumkoordinaten für die von Neuronen zu besetzenden Positionen werden als Trainingsmuster die ursprüngliche Schachtform und der aus geologischen Schnitten konstruierbare Verlauf des leicht löslichen Carnallitflözes verwendet. Bei Growing Neural Gases kann definiert werden, dass alle Neuronen einen bestimmten Wert, im vorliegenden Fall einen Messwert, einnehmen sollen. Hinsichtlich der späteren Interpolationsreihenfolge der Messpunkt Wolke wird dabei festgehalten, welche Nachbarschaftsverhältnisse sich beim Neuronenwachstum ergeben. Das Zellwachstum selbst wird durch Gewichte beeinflusst. Gewichtsklassen ergeben sich aus der Information darüber, ob sich ein Messwert geochemisch betrachtet im Bereich eines löslichen, oder weniger löslichen Salzgesteins befindet. Zudem werden Informationen darüber verarbeitet, ob ein einzelner Messwert aus einem Mehrfachecho, bzw. aus einer gekippten Visur hervorgegangen ist. Die Theorie neuronaler Netze wird an

dieser Stelle nicht vertiefend wiedergegeben und statt dessen auf entsprechende Literatur bzw. Quellen verwiesen.⁵

Im markscheiderischen Sinn stellt der Einsatz Neuronaler Netze bei der Interpolation dreidimensionaler Messwerte zu einer Fläche einen neuen methodischen Ansatz dar. Hierzu muss die Methode auch hinsichtlich der behördlichen Anforderungen an u. a. Richtigkeit, Plausibilität und Nachvollziehbarkeit geprüft werden.

3.6 Geometrische Modellierung und Attributierung

Auf Grund nahseismischer Messungen [13], gravimetrischer Untersuchungen [23], der Daten zur bergbaulichen Abbautechnologie [5], Langzeitnivellements und einer echometrischen Hohlraumvermessung liegen für den Untersuchungsraum umfangreiche geotechnische Rauminformation vor. Angesichts der Ausdehnung des Grubengebäudes und der Vielzahl einwirkender Parameter muss das Modell jedoch räumlich und funktional begrenzt bzw. abstrahiert werden. Ziel der Modellierung ist daher nicht die Abbildung des gesamten komplexen mechanischen und hydrologischen Zusammenwirkens, sondern sie konzentriert sich auf die Ursache der Subrosion, nämlich den Lösungsprozess, und deren Eindämmung. Eine geeignete räumliche Eingrenzung des Modellraums ist durch Schacht VI des Grubengebäudes gegeben, der durch die bergmännische Auffahrung, die vorbereitenden Untersuchungen zur Flutung und durch die bereits erwähnte echometrische Hohlraumvermessung (eine zweite ist geplant) im bereits subrodierten Zustand, hinsichtlich Geologie bzw. Geometrie gut dokumentiert ist.

Die raum- und zeitvariante Modellierung des Lösungsprozesses im gefluteten Schacht erfolgt mit raum- und zeitvarianten NURBS, der Datenbank ObjectStore und dem Virtual-Reality-Kern-System der DFG-Forschungskooperation. Mit dem Verfahren werden auf Grundlage der bekannten Parameter Objekte definiert. Diesen Objekten werden dann für die unterschiedlichen Salzgesteine das Attribut „Löslichkeit“ zugewiesen. Die unterschiedlichen Konvektionszellen der Sole erhalten das Attribut „Lösungspotential“. Zunächst prototypisch, wird für eine begrenzte Anzahl von Objekten und Konvektionszellen das zwischen ihnen herrschende Wirkungsgefüge mathematisch formuliert. Dabei steht vor allem die mathematische Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Lösungsaktivität im Vordergrund. Wichtig erscheinen dabei folgende Fragen:

- Welches sind die beschleunigenden und begrenzenden Strukturmerkmale des Salzgesteins?
- Wie unterscheiden sich diese Merkmale entlang des Schachts?
- Welches sind die für die Lösungsaktivität der Sole wichtigen Parameter (zum Beispiel partielle Sättigung, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit [3, 9, 10])?

⁵ Vgl. z.B. [15, 22], <http://www.genetic-programming>

Der Beginn des Modellzeitraums stellt die Schachtgeometrie zum Zeitpunkt der Flutung dar. Das Ende des Modellzeitraums ist durch die echometrische Vermessung des zwischenzeitlich subrodierten Schachts gegeben. Die Auswertung einer geplanten weiteren echometrischen Vermessung würde den Modellaufbau verbessern. Um auch ohne diesen weiteren geometrischen und zeitlichen Stützpunkt modellieren zu können, werden die entwickelten Algorithmen unter Verwendung von Virtual Reality hinsichtlich Plausibilität und Richtigkeit überprüft. Virtual Reality umfasst dabei nicht nur die Visualisierungskomponente, sondern auch die interaktive Abfrage von Objektinformationen während der Visualisierung.

3.7 Simulation geotechnischer Maßnahmen

Untertägige Sicherungsmaßnahmen werden durch die Bergbehörde als unabwendbar eingestuft und sind im Gegensatz zu einer weitgehenden Verfüllung des Grubengebäudes weniger kostenintensiv. Zu den konventionellen Verfahren zählen:

- Abfördern von Salzlösung durch Bohrungen
- Abdichten von Fließwegen der Salzlösung durch Einpressen von Dichtungsmitteln über Bohrungen (Injektion)
- Abdichten betroffener Feldesteile durch Bau von Streckendämmen⁶
- Schachtverfüllung [21, 8]
- Injektion bestimmter Salzlösung, um eine lokale Aussalzung und damit Verstopfung von Zuflusswegen zu erreichen [11]
- Einbringen von Versatz, um lokales Zirkulieren von Wässern zu mindern [14].

Grundsätzlich zielen die genannten Verfahren auf die Eingrenzung der Lösungs- und Stofftransportvorgänge bzw. auf die Abdichtung von Wegsamkeiten. Die Verfahren sind zwar für den Einsatz im deutschen Kalibergbau geplant und teilweise auch eingesetzt worden, sind jedoch meist Bestandteil eines Verwahrungskonzepts noch offener Bergwerke. Die Übertragung der Verfahren auf das geflutete Grubengebäude im Staßfurter Revier bedarf der Berücksichtigung spezifischer Besonderheiten, wie beispielsweise dem Ziel der Einstellung der Wasserhebung im Stadtgebiet, ohne dass dadurch der Salzlösungsprozess intensiviert wird. Zudem birgt die Schachtverfüllung eines gefluteten Salzschachts das Problem, dass bei einer nicht vollständig erfolgten Verfüllung das anstehende Gebirge weiterhin stellenweise gelöst wird. Dadurch kann eine Instabilität der Verfüllmassen eintreten. Möglichkeiten zur Absenkung des Laugenspiegels in einem Salzschacht, zwecks anschließenden Einbaus eines Schachtpropfens, werden in [20] beschrieben.

Ist eine plausible Abbildung der raum- und zeitbezogenen Änderungen des Objekts „Schacht“ erreicht, können mit gezielten Manipulationen der raumbezogenen und thematischen Eigenschaften geotechnische Maßnahmen simuliert werden. So kann

⁶ Hinweise zu den drei erstgenannten Verfahren [19]

beispielsweise eine Vergelung oder Injektion in einer bestimmten Tiefe simuliert werden, in dem die Lösungsaktivität einer Strömungszelle herabgesetzt wird. Aufwendiger ist die Simulation einer teilweisen Schachtverfüllung, wodurch ein neues Objekt eingefügt wird, welches Auswirkungen auf die räumliche Ausprägung der Strömungszellen im Schacht hat und damit deren Lösungspotenzial ändert. Die simulierten geotechnischen Maßnahmen bewirken eine Abweichung im Modellablauf gegenüber dem bekannten Endzustand, der durch die echometrische Vermessung dokumentiert ist, ohne dass die Modelldaten extrapoliert werden müssen. Die Abweichungen verschiedener simulierter Maßnahmen können qualitativ beurteilt werden und der Zusammenhang zwischen Parameteränderung im Modell und Aufwand der realen geotechnischen Maßnahme (z.B. Verfüllmasse, technischer Aufwand der Verfüllung usw.) kann abgeschätzt werden. Auf Grundlage der Simulation können dann Umfang und Wirkung einer geeigneten geotechnischen Maßnahmen diskutiert werden. Das validierte Modell, die Erfahrung mit Simulationen verschiedener geotechnischer Maßnahmen und deren Wirkung innerhalb des Modellzeitraums, sowie der Fachaus-tausch mit anderen Wissenschaftlern kann anschließend genutzt werden, um eine geotechnische Maßnahme, die sich im Modell als geeignet erwiesen hat, über den Modellzeitraum hinaus zu extrapolieren und die Wirkung der Maßnahme abzuschätzen.

4. Quellen

- [1] Bundesberggesetz (BBergG) vom 13.8.1980, *Bundesgesetzblatt Teil 1*, S. 1310 vom 20.8.1980, zuletzt geändert durch Gesetz vom 6.6.1994, *Bundesgesetzblatt Teil 1*, S. 1170.
- [2] Booch, G.; Rumbaugh, J.; Jacobson, I.: *Das UML-Benutzerhandbuch*. Addison Wesley Longman 1999.
- [3] Brückner, G.; Knitzschke, G.; Spilker, M., Pelzel, J.; Schwandt, A.: Probleme und Erfahrungen bei der Beherrschung von Karsterscheinungen in der Umgebung stillgelegter Bergwerke des Zechsteins in der DDR. In: *Neue Bergbau-technik*, Heft 8, 1983.
- [4] Busch, W.; Fischer, C.: Nutzung von Fernerkundungsdaten bei einer GIS-gestützten Modellierung hydrologischer Parameter im Rahmen der großräumigen Umweltüberwachung bergbaulicher Tätigkeiten. In: Haasis, H.-D., Ranze, K.C. (Hrsg.): *Umweltinformatik '98. Vernetzte Strukturen in Informatik, Umwelt und Wirtschaft*. 12. Int. Symposium Informatik für den Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik (GI), Bremen 1998, Band II, Metropolis - Verlag, Marburg 1998, S. 553 – 561.
- [5] Engelmann, D.; Klamser, P.: Die Tätigkeit des Bergamts Staßfurt im Hinblick auf die Bergbaufolgeschäden am Beispiel des Staßfurter Sattels. Vortrag zum 2. *Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften*, Staßfurt, 20.-21. September 1996.
- [6] Fokker, P. A.; Urai, J. L.; Steeneken, P. V.: Production-induced convergence of solution mind caverns in magnesium salts and associated subsidence. In:

- Land Subsidence*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence. A. A. Balkema, The Hague, 1995.
- [7] Forker, A.: Die Bedeutung der Bergbaufolgelandschaften des Kali- und Steinsalzbergbaus für die wirtschaftliche Entwicklung der Region. Vortrag zum 2. *Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften*, Staßfurt, 20.-21. September 1996.
 - [8] Funke-Oberhag, H.-W.: Special work for environmentally friendly closure and redevelopment of the Sangershausen copper mine. In: *Glückauf* 132, Heft 7, 1996.
 - [9] Herbert, H.-J.; Sander, W.: Die Flutung des Kalibergwerks Hope – Ergebnisse des geochemischen Meßprogramms. In: *Kali und Steinsalz*, Band 9, Heft 10, 1987.
 - [10] Herbert, H.-J.; Reichelt, C.: Sieben Jahre Laugenentwicklung im gefluteten Kalibergwerk Hope – Geochemische Messungen und rechnerische Modellierung. In: *Kali und Steinsalz*, Band 11, Heft 1/2, 1992.
 - [11] Kühn, R.: Bekämpfung von Zuflüssen durch gezielte Anwendung der ozeanischen Lösungsgleichgewichte. In: *Kali und Steinsalz*, Band 11, Heft ¾, 1993.
 - [12] Kühn, F.; Trembich, G.; Hoerig, B.: Satellite and Airborne Remote Sensing to Detect Hazards Caused by Mining. *Proceedings of the 13th International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, Vancouver 1999.
 - [13] Küstermann, W.; Seitz, R.; Wolff, H.: Hochauflösende nahseismische Messungen unterstützen die Untersuchungen im Deckgebirge von Kali- und Steinsalzlagerstätten. Vortrag zum 2. *Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften*, Staßfurt, 20.-21. September 1996.
 - [14] Menzel, W.; Minkley, W.; Schreiner, W.: Evaluation criteria and measures to prevent surface damages during closure of the potash mine in the Southern Harz region. In: *Glückauf* 132, Heft 7, 1996.
 - [15] Möller, D. P. F. (Hrsg.): *Mitteilungen des Arbeitsbereichs Technische Informatiksysteme im Fachbereich Informatik der Universität Hamburg*, Berichtsjahr 1999. Hamburg, 2000.
 - [16] Moßgraber, J.: *Konzeption, Entwurf und Umsetzung eines Metadatenmodells zur Interpretation und Verwaltung von Informationen mit geographischem Bezug*. <http://aragon.iitb.fhg.de/moss/publications/Diplomarbeit/Diplomarbeit.html>.
 - [17] N.N.: Bergamt Staßfurt. *Pressemitteilung des Bergamts Staßfurt zum Bergschadensgebiet Staßfurt*, September 1998.
 - [18] N.N.: *Erprobung von Methoden der Fernerkundung zur Erkennung von Destabilisierungsprozessen an der Erdoberfläche*. Endbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Dienstbereich Berlin, Förderkennzeichen 50 EE 9526, unveröffentlicht.
 - [19] Schwerter, R.: Die Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen. In: *Kali und Steinsalz*, Band 11, Heft 1/2, 1992.
 - [20] Sitz, P.; Bartl, H.; Geißler, D.; Hebestreit, G.; Herzel, G.; Schott, E.; Vorwerk, W.: Erfahrungen bei der Wiederinbetriebnahme der abgesoffenen Schächte

Bernterode I und Bernterode II (Teil 1). In: *Neue Bergbautechnik*, Heft 6, 1981.

- [21] Spier, H.-H.; Ruck, H.: Verwahrung von Salzbergwerken - Ergebnisse und Konzepte. In: *Kali und Steinsalz*, Band 12, Heft 5, 1997.
- [22] Zell, A.: *Simulation neuronaler Netze*. 1. Auflage, Addison-Wesley, 1994.
- [23] Zenk, J.: Gravimetrische Untersuchungen in Gebieten des Kupferschiefer- und Kalibergbaues zur Erkundung setzungsgefährdeter Bereiche. Vortrag *zum 2. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgelandschaften*, Staßfurt, 20.-21. September 1996.