

Geologische 3D-Modellierung und ihre Anwendungsmöglichkeiten in Berbau- und Industriefolgelandschaften

Peter Wycisk¹, Wolfgang Gossel¹, Holger Fabritius²

¹Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geologische Wissenschaften, FG Hydro- und Umweltgeologie, Von-Seckendorff-Platz 3, D-06120 Halle (Saale), E-Mail: peter.wycisk@geo.uni-halle.de

²UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Dept. Groundwater, Theodor-Lieser-Str. 4, D-06020 Halle/Saale

Zur Erfassung, Bewertung und Behandlung großräumiger Grundwasserkontaminationen ist die Kenntnis des geologischen Aufbaus und der Zustand regionaler Grundwasserbelastungen für eine Vorhersage des Schadstoffverhaltens eine unabdingbare Voraussetzung. Zur Entwicklung weiterführender nutzungsbezogener Bewertungsmaßstäbe wurde im Rahmen des SAFIRA-Projektes für ein Modellgebiet ein GIS-basiertes digitales Raummodell erstellt, das aus einzelnen thematischen Teilmodulen aufgebaut ist. Besondere Bedeutung hat hierbei die Entwicklung eines echten 3D-Untergrundmodells für den Untersuchungsraum Bitterfeld -Süd mit 16 km² mit einer Auflösung von 10 x 10 m und 31 individuellen Schichtkörpern. Das detaillierte Volumenmodell wurde zur Beurteilung von Schadstoffausstragsbahnen in das Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell (Visual Modflow / MT3D) integriert.

Am Beispiel von mehreren erstellten hochauflösenden 3D Raummodellen, die in den letzten Jahren im Rahmen von unterschiedlichen BMFT-Projekten (SAFIRA I, II und Ad-Hoc Mulde/Elbe) entwickelt und eingesetzt wurden, werden Möglichkeiten der sich vor dem Hintergrund neu entwickelnder Methoden und Techniken der modernen Datenverarbeitung mittels unterschiedlicher Visualisierungstechniken, Nutzung von Geoinformationssystemen und echten 3D und 4D Modellierungen aufgezeigt. Die Verknüpfung von 3D Modellen mit GIS-basierten Werkzeugen schafft dabei eine neue Möglichkeit der Informationsanalyse und Ergebnisdarstellung. Aufgrund neuer Quantifizierungsmöglichkeiten werden künftig u.a. speziell in den Bereichen der numerischen hydrogeologischen Modellierung, der Sanierungsforschung und der Landschaftsanalyse weitergehende Anwendungsmöglichkeiten gesehen.

1 Einführung

Die Erfassung, Bewertung und Behandlung großräumiger Grundwasserkontaminationen in heterogenen Aquiferen, die z.T. durch großflächige Braunkohletagebaue noch zusätzlich überprägt wurden, ist sowohl von der flächendeckenden Informationsverarbeitung, wie auch von der modelltechnischen Handhabung räumlich konsistenter Aussagen eine Herausforderung. Vor dem Hintergrund der regionalen Schadstoffbelastung von Grundwasserleitern und den komplexen hydraulischen Verhältnissen aufgrund es eingestellten Braunkohlebergbaus im Raum Bitterfeld wachsen jedoch die Ansprüche sowohl an die Aussagegenauigkeit als auch an die flächendeckende Verfügbarkeit von digitalen geologischen Daten zu hydraulisch relevanten Schichtkörpern, die Einfluss auf die Beurteilung des Strömungs- und Transportverhaltens der Kontaminanten haben und somit einen Einfluss auf die Umwelt- und Raumverträglichkeit von nutzungs- und sanierungsrelevanten Fragestellungen haben. Die

Fragestellung wird im Rahmen des Teilprojektes E1.1 „Umwelt- und Raumverträglichkeit“ innerhalb des SAFIRA und Ad-Hoc Elbe/Mulde Verbundvorhabens bearbeitet. Eine Übersicht zu den Zielen des Verbundvorhabens und dem Modellstandort wurde in WEISS et al. (1999, 2001, 2002) zusammenfassend dargestellt. KASCHL et al. (2002) und WYCISK et al. (2003b) geben einen Überblick über die entsprechend vorliegenden Untersuchungsstände.

2 Regionales Modellkonzept

Die Komplexität der Fragestellung zur Ableitung von Bewertungsansätzen zur „Umwelt- und Raumverträglichkeit“ von Gefährdungsabschätzungen und sanierungsrelevanten technischen Entscheidungen erfordert einen integrativen raumbezogenen Modellansatz. In dem zu entwickelnden digitalen Raummodell „Bitterfeld-Süd“ werden dafür in einem Teilmodellraum exemplarisch die unterschiedlich strukturierten und aufbereiteten Informationen integriert:

- geologischer Untergrund
- hydrogeologische Situation
- Grundwasserkontaminanten
- Schutzgüter
- Flächennutzung

Die vollständige GIS-Fähigkeit des Systems unter ArcView und ArcGIS sowie die ortskonkrete Darstellung in hoher Auflösung bieten die notwendigen Grundlagen für lokale und regionale Aussagen zur hydrostratigraphischen Situation und zur Regionalisierung von Kontaminationsdaten.

Die langjährige Nutzungsgeschichte des Standortes Bitterfeld bezüglich diverser Stoffeintragsquellen erfordert den Aufbau eines digitalen Raummodells zur Bearbeitung der komplexen Datenlage und Fragestellung. Dies betrifft sowohl die heterogene Situation der Grundwasserleiter und -geringleiter bezüglich ihrer Stoffaus-

tragspfade in Abhängigkeit wechselnder Grundwasserstände, als auch das komplexe und lokal differenzierte Schadstoffgemisch des ehemaligen Industrie- und Chemie-Standortes, das nur bei ausreichend detaillierter Darstellung auf der Ebene von Einzelstoffen bzw. repräsentativen Stoffgruppen beurteilt werden kann. Dieser Aspekt ist um so bedeutsamer, da der Untersuchungsraum aufgrund der heterogenen hydraulischen Bedingungen, sowie durch ehemals wechselnde großräumige Wasserhaltungen und dem nachfolgenden Grundwasserwiederanstieg, als dynamisch wirkendes System mit seinen Wechselwirkungen verstanden werden muss. Weiterführende Aussagen zur Regionalisierung der Kontaminanten und ihrer „fate and pathway“ Beziehungen in dem Expositionsbereich können nur GIS-basiert und mittels Strömungs- und Transportmodellierungen beurteilt werden.

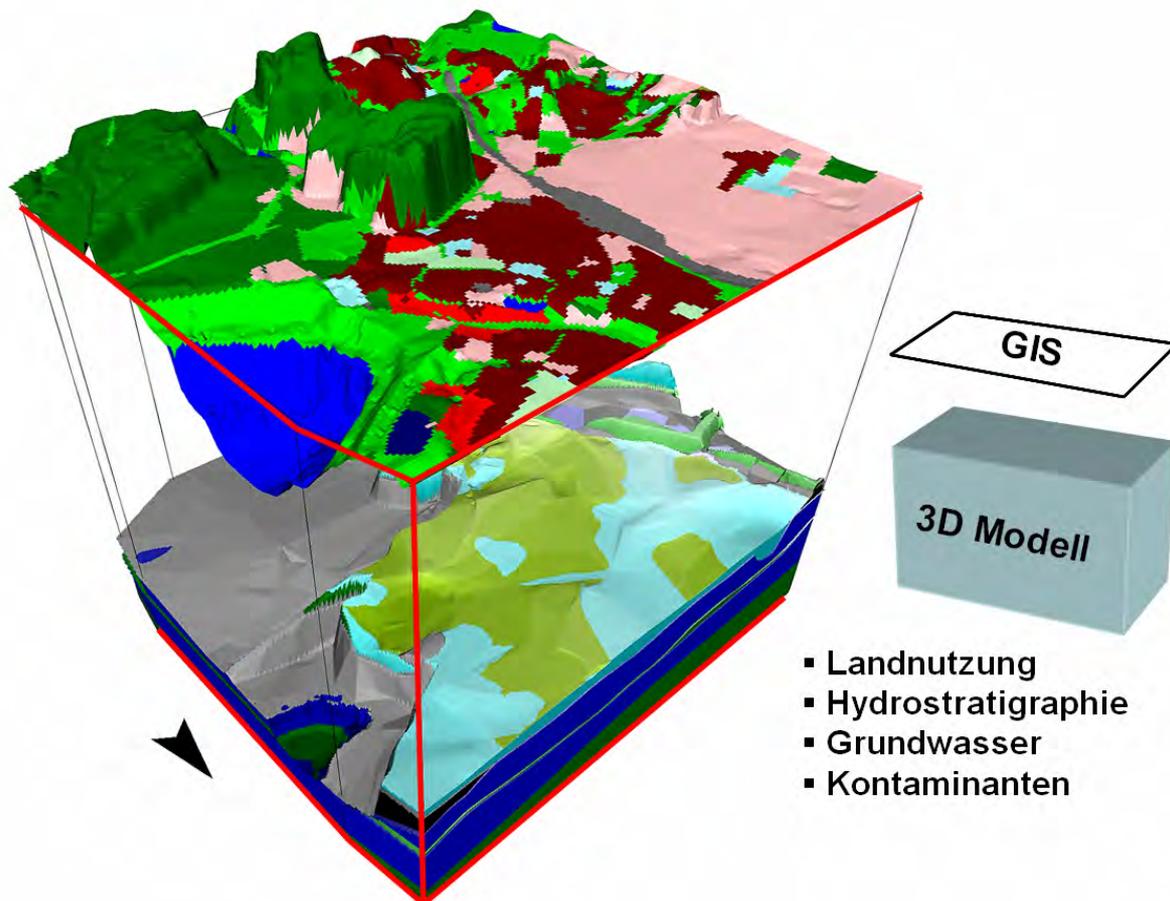


Abb. 1: Hochauflösendes 3D-Modell mit der Verteilung von Grundwasserleitern und Nichtleitern innerhalb des Quartärs mit der überlagernden Landnutzung (ATKIS 2002). Teilmodell Bitterfeld Süd mit 4 x 4 km Kantenlänge des Modellausschnitts.

3 Hochauflösende 3D geologische Strukturmodelle

3.1 Methodische Ansätze

Die Anwendung von 3D Strukturmodellen erfolgt seit einigen Jahren mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Neben den ursprünglich aus der Lagerstättenkunde entwickelten Ansätzen, finden digitale 3D-Modelle zunehmend Einzug im Angewandten Geologischen Bereich, speziell in der Hydrogeologie. Auf die Bedeutung und konsequente Umsetzung verweist u.a. Culsaw (2003). Die Notwendigkeit von möglichst wirklichkeitsgetreuen Geologiemoellen nimmt durch die steigenden Anforderungen in der hydrogeologischen Modellierung zu. Die Realisierung der Modelle erfolgt durch z.T. unterschiedliche Wege, die sowohl über 2,5D-Flächenmodellen mittels Geoinformationssystemen, wie auch über „echte“ 3D-Modelle (Volumenmodelle). Visualisierungen und Modellschnitte lassen dabei häufig nicht mehr die Entstehungsgrundlage erkennen. Da sich noch keine einheitliche Terminologie

etabliert hat, begegnet man zunehmend häufiger auf Tagungen oder in Publikationen sogenannten „3D Modellen“, die angefangen von bildhaften 3D Darstellungen über 2,5D GIS-basierten Abbildungen zu echten 3D Modellen (Volumenmodellen) reichen.

Der Einsatz von digitalen 3D Untergrundmodelle ist z.Z. für regionale Anwendungen zunehmend in Diskussion, obwohl der Arbeitsaufwand zur Modellerstellung als auch der Datenbedarf sehr hoch ist. Die verfügbaren Programme wie z.B., GoCad, GeoObjekt 2, GIS-3D, GMS, OpenGeo, EVS/MVS, Earth Vision ermöglichen mit unterschiedlichen thematischen Einsatzfeldern eine reale 3D Modellierung von Gesteinskörpern. Gleichzeitig haben die jeweiligen Software-Lösungen je nach ursprünglichem Einsatz, z.T. unterschiedliche Stärken bezüglich der Anwendung und Problemlösung. Mittlerweile liegen uns methodische und technische Erfahrungen, sowie an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichen Software-Produkten (Geoobjekt 2 / GSI-3D, GMS, EVS/MVS) vor.

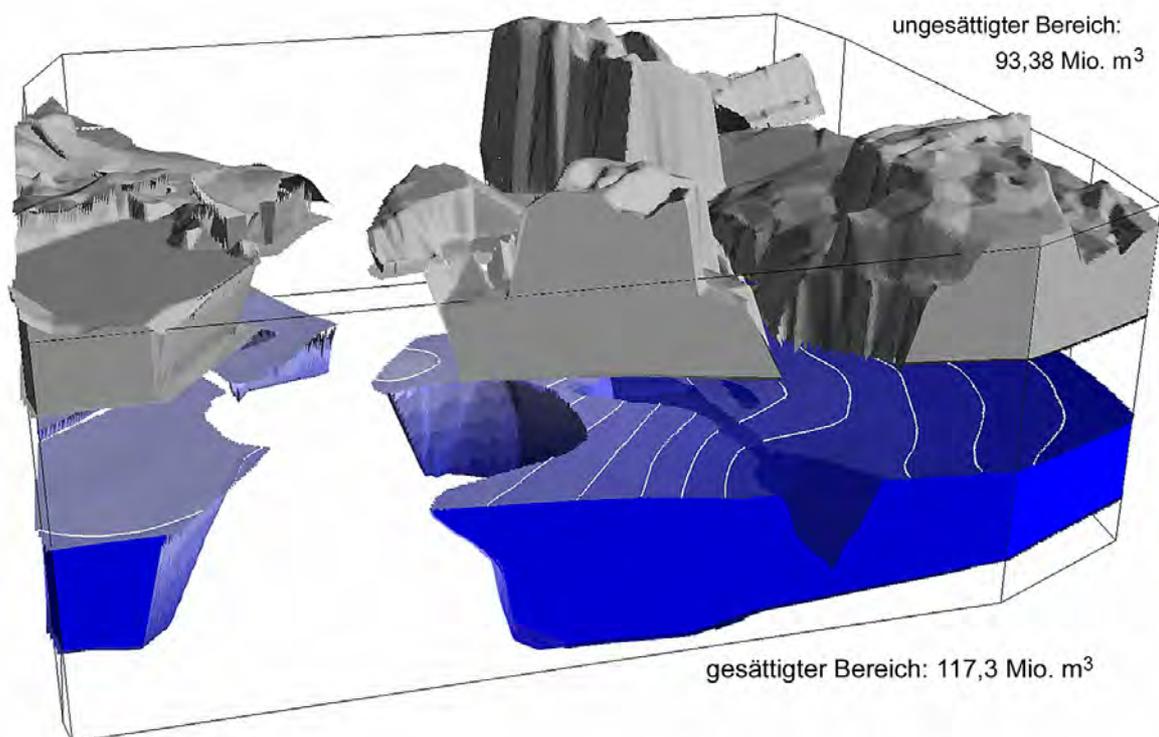


Abb. 2: Anwendungsbeispiel der Schichtkörpermodellierung. Die Kippenkörper wurden im Bereich der Grundwasseroberflächen (GW-Gleichen Stand 2000) vor der Goitzschefflutung getrennt und die jeweiligen Volumina des ungesättigten und gesättigten Bereichs berechnet.

3.2 Datengrundlagen „Bitterfeld-Süd“

Die Datengrundlage des geologischen Teil-Modells Bitterfeld-Süd basiert auf 125 nach Repräsentanz selektierten Bohrungen, die in 28 Profilschnitten auf einer Fläche von 16 km² vernetzt wurden. Aufgrund der stratigraphischen Untergliederung und starken Heterogenität der quartären Einheiten wurden 31 lithostratigraphische Horizonte (Körper) auf der Basis von 37 modellierten Höhenrasterflächen bearbeitet (FABRITIUS 2002, WYCISK et al. 2002). Die im Modell verwendete Rasterzellengröße von 10 x 10 m orientiert sich an der Auflösung des zur Verfügung stehenden amtlichen digitalen Höhenmodells (DGM). Das hier dargestellte Modell wird aus Visualisierungsgründen als Teilmodell abgebildet. Das Gesamtmodell umfasst mittlerweile eine Fläche von ca. 50 km² bei gleich bleibendem Detaillierungsgrad der lithofaziellen Körper und der horizontalen Auflösung.

Im Vorfeld einer digitalen geologischen Raummodellierung mit GeoObject 2 / GSI-3D (SOBISCH 2000) wird auf der Basis vernetzter Profilschnitte ein konventionelles Schichtenmodell des Modellgebietes erstellt. Die stratigraphische und lithofazies-orientierte Bearbeitung der Schnitte ermöglicht eine vollständige Plausibilitätskontrolle bei der Schnittvernetzung und eine mögliche differenzierte Parametrisierung im Modell. Das Zusammenfassen von lithologischen Einheiten ist bei einer nachfolgenden Modellkopplung mit Strömungs- und Transportmodellen problemlos möglich. Eine detaillierte Darstellung der 3D-Modellierung wird in FABRITIUS (2002) und WYCISK et al. (2002) wiedergegeben.

3.3 Projektbezogene Anforderungen

Die digitale 3D-Bearbeitung von geologischen Strukturmodellen in heterogenen Aquiferen, die z.T. durch großflächige Braunkohletagebaue

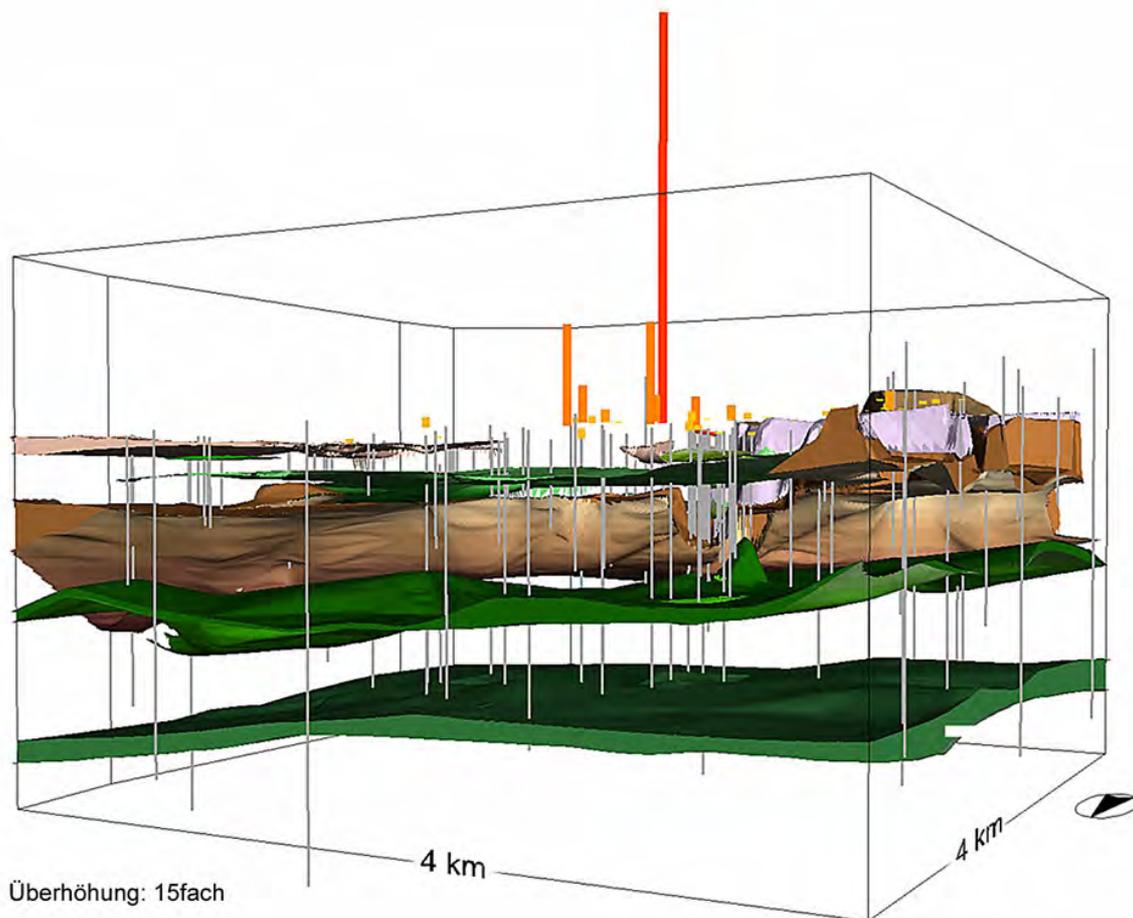


Abb. 3: Grundwassernichtleiter und Geringleiter des Tertiär und Quartär im hochauflösenden 3D-Modelle. Die Grundwasserleiter wurden ausgeblendet.

noch zusätzlich überprägt wurden, ist bis heute sowohl von der flächendeckenden Informationsverfügbarkeit, als auch von der modelltechnischen Handhabung nach wie vor schwierig und sehr aufwendig. Vor dem Hintergrund der regionalen Schadstoffbelastung von Grundwasserleitern und den komplexen hydraulischen Verhältnissen aufgrund des eingestellten Braunkohlebergbaus im Raum Bitterfeld, wachsen jedoch die Ansprüche sowohl an die Aussagegenauigkeit als auch an die flächendeckende Verfügbarkeit von digitalen geologischen Daten. Hier muss hervorgehoben werden, dass aufgrund der Bergbauaktivitäten und der großräumigen Verfüllung mit Kippenmaterial besondere Anforderungen an die 3D Modellierung gestellt werden. Gleichzeitig muss die Möglichkeit bestehen beliebige Informationen aus thematischen Karten und plausibilitätsgestützte Experteninformationen einbinden zu können. Nicht zuletzt werden in einem solchen Zusammenhang an das räumliche Verständnis bezüglich der Heterogenität und Lagebeziehung hydraulisch relevanter Schichtkörper besondere Anforderungen gestellt, die Einfluss auf die Beurteilung des Strömungs- und Transportverhaltens der Kontaminanten haben.

Die nachfolgenden Voraussetzungen und Auswertefunktionen sind für die regionalen Fragestellungen zur Beurteilung der standortabhängigen Situation zu erfüllen (WYCISK et al. 2002). Hierzu gehören die optimale Erfassung und möglichst reale Abbildung der sedimentologischen Körper, auch bei sehr unterschiedlicher

Bohraufschlussdichte, die realitätsnahe, d.h. echte 3D-Modellierung sowohl von natürlichen als auch anthropogenen lithostratigraphischen Körpern, sowie die Abbildung der Mächtigkeitsverteilung und Berechnung der Kubaturen, einschließlich der Höhenlage NN der Schichtunterseiten.

Die Auswertungsmöglichkeiten sollten dabei auch die Positionierung beliebiger vertikaler und horizontaler Profilschnitte sowie deren Verknüpfung im Modell und das Erstellen von virtuellen Bohrungen ermöglichen. Die Einbindung von hydrogeologischen Messwerten und Kontaminanten, sowie die Parametrisierung der Zellen einzelner Schichtkörper nach unterschiedlichen Anforderungen. Die Übernahme des digitalen Datensatzes über Schnittstellen in die Strömungs- und Transportmodellierung (MODFLOW und FEFLOW), einschließlich der vollständigen GIS-Fähigkeit mit konventionellen Systemen, wie z.B. ArcView, sollte gegeben sein.

4 Auswertung und Modellnutzung

4.1 GIS-basierte Modellnutzung

Aufgrund der komplizierten geologisch/hydrogeologischen Ausgangssituation im Modellgebiet hat die 3-D Modellierung von Schichtkörpern nicht nur einen plausibilitätsprüfenden Charakter, sondern dient sowohl dem Verständnis kom-

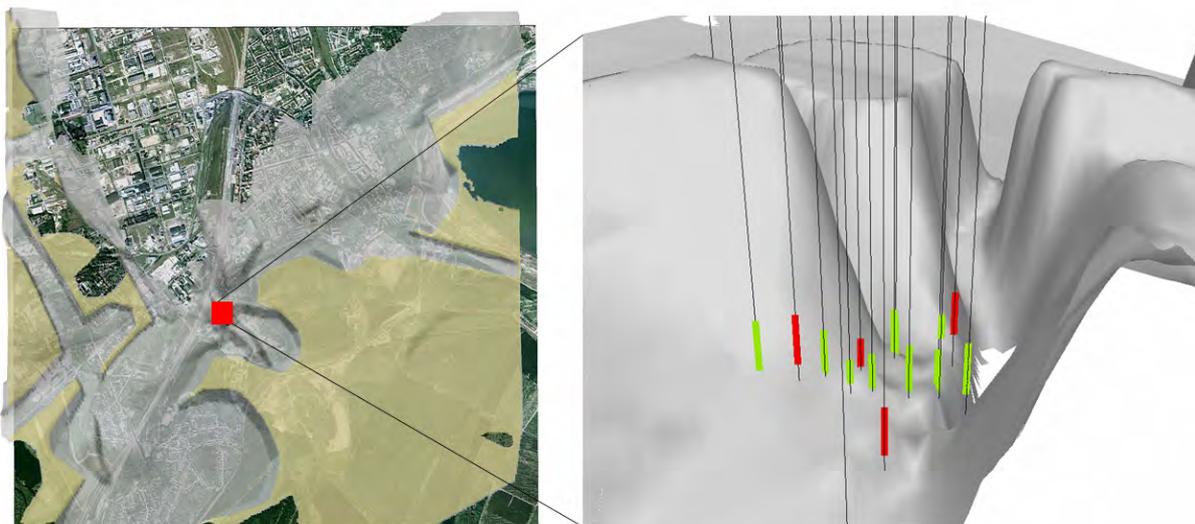


Abb. 4: Nutzung des hochauflösenden 3D-Modells in Kombination mit einem Orthofoto für die Verbreitung der verbliebenen Braunkohle im Untergrund. Der rechte Bildausschnitt zeigt die Erosionsstruktur einer quartären Rinne innerhalb der Braunkohle und die Filterpositionen von Beobachtungsbrunnen (Überhöhung 25-fach).

plexer räumlicher Zusammenhänge als auch der Konsistenzbeurteilung in Bereichen geringer Informationsdichte. Die Informationsverschneidung des geologischen Strukturmodells mit weiteren Sachthemen erweitert die verfügbare (abrufbare) Information in einer beliebigen räumlichen Auflösung grundlegend. Ein wesentlicher Aspekt in der Nutzung von digitalen Raummodellen ist die Zusammenführung von georeferenzierten Raum- und Flächeninformationen, die durch Informationsüberlagerung und Verschneidungsoperationen nicht nur eine effizientere, sondern auch eine grundlegende Qualitätssteigerung in der ortskonkreten Informationsnutzung ermöglichen (vgl. WYCISK et al. 2002, WYCISK et al. 2003a)

Grenzen des Modells ergeben sich durch die Zellgröße (10x10 m) und durch die maximale Schichtanzahl. Daher ist bei der Modellerstellung ein höchstmöglicher Detaillierungsgrad anzustreben. Dadurch ist die digitale Umsetzung von Schichten mit einer lateralen Ausdehnung geringer als 10 m, z.B. Bachbetten, nicht realitätsnah möglich. Ebenfalls von Bedeutung für nachfolgende Auswertungen ist die horizontale und vertikale Auflösung und Untergliederung der Schichten nach stratigraphischen, lithologischen und hydrogeologischen Aspekten. Grenzen der Auflösung und der Aussagegenauigkeit ergeben

sich sowohl aus der Qualität der zur Verfügung stehenden digitalen Höhenmodelle, als auch den Abdeckungsgrad und Qualität (Alter) der Bohraufschlüsse in Relation zur Heterogenität der Sedimentkörper. Zur weitere Diskussion s. FABRITIUS (2002) und WYCISK et al. (2002). Die kontinuierliche Fortschreibung des Modells durch neue Bohraufschlüsse und daraus ggf. resultierende Korrekturen können nachfolgend durchgeführt werden.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten wird für den SE Bereich des Gebietes eine Rest-Kohlenmächtigkeit von <2 m als ungleichmäßiger Abbaurest auf der ehemaligen Tagebausohle angenommen. Die unverritzten Bereiche weisen scheinbare Mächtigkeiten von bis zu 20 m auf. Die Abbaugrenzen wurden aus Karteninformationen plausibilitätsgeprüft umgesetzt. Auf diesem Wege gelingt es erstmals, annäherungsweise das Volumen der verbliebenen Restkohle mit $71 \times 10^6 \text{ m}^3$ auf einer Gesamtfläche von $12,35 \text{ km}^2$ im Teil-Modellgebiet anzugeben. Ausgehend von diesen ersten konkreten Abschätzungen lassen sich weitergehende Fragestellungen bezüglich der Sorptions- und Desorptionspotenziale der Kohle im Hinblick auf das Schadstoffverhalten der organischen Kontaminanten im Raum konkretisieren. Nimmt man z.B. eine Kontamination der Braunkohle für 1 m von der Oberfläche aus-

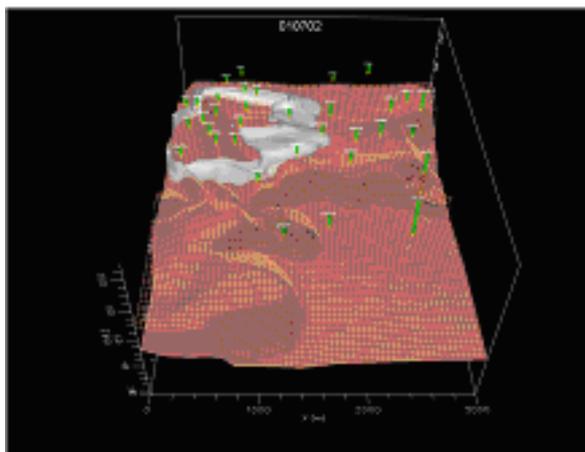


Abb. 5a: zeigt die Ergebnisse der numerischen Grundwassermodellierung eines konservativen Tracers. Die Grenzfläche oberer/unterer Grundwasserleiter wurde aus dem geologischen 3D Modell übernommen.

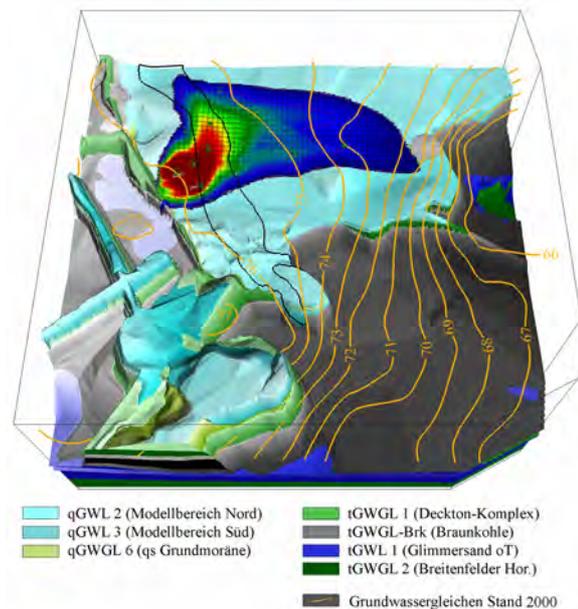


Abb. 5b: bildet Oberfläche des Geologischen Modells mit abgedeckten Kippenfüllungen ab. Die Informationsüberlagerung im digitalen Raummodell kombiniert die Grundwassergleichen, die Rinnenverbreitung und die modellierte Schadstoffausbreitungsfahne.

gehend an, so ergeben die errechneten Teilvolumina an belasteter Kohle ca. 12 Mio. m³ unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen flächenhaften Belastung. Für weitergehende modelltechnische Anwendungen lassen sich die Einzelkörper in unterschiedlicher Form zusammenfassen und auswerten.

4.2 Hydrogeologische Modellnutzung

Die Generierung eines numerischen Grundwassermodells aus den Daten des geologischen Modells scheint zunächst nahe liegend. Das Strukturmodell kann tatsächlich bei ausreichenden Import- und Exportmöglichkeiten des geologischen Modellsystems auf der einen und des numerischen Grundwassermodellierungssystems auf der anderen Seite relativ leicht generiert werden. Hierbei gilt es jedoch einige Rahmenbedingungen zu beachten:

- Die Abmessungen des geologischen Modells können in gewissen Grenzen beliebig gewählt werden, ein numerisches Grundwassermodell sollte sich unbedingt an sinnvollen Randbedingungen orientieren.
- In einem geologischen Modell werden alle stratigraphischen Einheiten ausgehalten, in einem numerischen Grundwassermodell sollten Grundwasserleiter und –geringleiter implementiert werden, wobei durchaus mehrere stratigraphische Einheiten zusammengefasst werden können.
- In einem numerischen Grundwassermodell müssen alle „Schichten“ („layer“, „slices“) für das gesamte Modellgebiet definiert werden, in einem geologischen Modell gibt es die Möglichkeit, Schichten auskeilen zu lassen oder sie nur in linsenartigen Strukturen zu definieren.

Die Parameterisierung des numerischen Grundwassermodells kann sich zwar in einem ersten Schritt an der lithologischen Beschreibung der stratigraphischen Einheiten orientieren, jedoch wird dies spätestens bei der Kalibrierung verbessert werden müssen. Im vorliegenden Fall wurde ein durch sinnvolle hydrogeologische Randbedingungen definierter Ausschnitt des geologischen Modells als Grundlage für die Erstellung des Strukturmodells für das numerische Grundwassermodell genutzt. Die 38 geologischen Einheiten wurden jedoch auf 13 numerische „Layer“ reduziert. Die Parameterisierung wurde zunächst auf der Grundlage der lithologischen Beschrei-

bung der einzelnen Einheiten vorgenommen, musste jedoch unter Zuhilfenahme von Bohrdaten im Verlauf der Kalibrierung verfeinert werden.

Abbildung 5a zeigt auf der Grundlage der quartären Schichten ohne die für den Raum Bitterfeld wichtigen Bergbaukippen die modellierten Grundwassergleichen und die Ergebnisse eines auf dem Strömungsmodell aufgebauten Transportmodells für einen konservativen Tracer. Deutlich sichtbar sind hier die Kontaktbereiche mit den tertiären Schichten im Bereich einer quartären Rinne, die aufgrund ihrer höheren Durchlässigkeit zu einem Transport Richtung Norden führt, der einzig auf der Grundlage der Grundwassergleichen sicher nicht zu erwarten wäre. In der Analyse des Modells zeigt sich, dass der Eintrag in den tertiären Grundwasserleiter sehr langsam geschieht und ein Austrag aus diesen Schichten aufgrund der hydrogeologischen Situation und vor allem der hydrodynamischen Veränderungen durch die Flutung des Tagebaus Goitzsche, die mit dem Modell ebenfalls modelliert werden konnten, in Zeiträumen von mehreren Jahrzehnten abläuft (siehe Abbildung 5b). Die Modellierung eines idealen Tracers hat darüber hinaus zur Folge, dass aufgrund von Adsorptions- und Desorptionsprozessen noch mit erheblich längeren Austragszeiten zu rechnen ist.

5 Dank

Teilen der Arbeit liegen die Ergebnisse der Vorhaben SAFIRA I und Ad-Hoc Schadstoffaustrag Elbe zugrunde, gefördert mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WT0023 und PTJ 0330492.

6 Literatur

- CULSHAW M. (2003): Bridging the gap between geoscience providers and the user community. – In: ROSENBAUM M.S. & TURNER A.K. (Eds.): *New Paradigms in subsurface prediction*. – Lecture Notes in Earth Sciences 99, Springer: pp. 7–26.
- FABRITIUS H. (2002): Entwicklung eines digitalen geologischen Raummodells im Raum Bitterfeld-Süd. – Dipl.-Arbeit am FB Geowissenschaften, MLU Halle-Wittenberg, FG Umweltgeologie, 131 S. u. Anhang, unveröffentlicht.
- KASCHL A., HEIDRICH S., WEIß H. (2002): EU-Projekt WELCOME: Prävention und Sanierung der Grundwasserkontamination an großflächigen Standorten. – *altlasten spektrum*, **11**(3): 111–119.

- SOBISCH H.-G. (2000): Ein digitales räumliches Modell des Quartärs der GK 25 Blatt 3508 Nordhorn auf der Basis vernetzter Profilschnitte. – D38 (Diss. Universität Köln), Shaker Verlag, Aachen.
- WEIß H., SCHIRMER M., TEUTSCH G., MERKEL P. (2002): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) – 2. Projektüberblick und Pilotanlage. – *Grundwasser*, **7**(3): 135–139.
- WEIß H., DAUS B., TEUTSCH G. (HRSG., 1999): SAFIRA (2. Statusbericht). UFZ-Bericht **17/1999**, Leipzig, 176 S.
- WEIß H., TEUTSCH G., FRITZ P., DAUS B., DAHMKE A., GRATHWOHL P., TRABITZSCH R., RUSKE R., BÖHME O., SCHIRMER M. (2001): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) – 1. Information zum Forschungsschwerpunkt am Standort Bitterfeld. – *Grundwasser*, **3**/6: 113–122.
- WYCISK P., SOMMERWERK K., FABRITIUS H., RUSKE R., WEIß H. (2003 a): Groundwater contaminated mega sites – 3-D Modelling of geological structures and its relevance for a risk based management and remediation approach. – *CONSOIL Proceedings 2003*, pp. 557–563.
- WYCISK P., WEISS H., KASCHL A., HEIDRICH S., SOMMERWERK K. (2003 b): Groundwater pollution and remediation options for multi-source contaminated aquifers (Bitterfeld / Wolfen, Germany). – *Toxicology Letters*, **140/141**: 343–351.
- WYCISK P., FABRITIUS H., RUSKE R., WEIß H. (2002): Das digitale geologische Strukturmodell Bitterfeld als neuer Baustein in der Sanierungsforschung. – *Grundwasser*, **7**(3): 165–171.