

## Qualitätsentwicklung der Grubenwässer bei der Flutung von Steinkohlen- und Erzbergwerken

Dr. Michael Eckart<sup>1</sup>, Dipl.-Geol. Peter Rüterkamp<sup>1</sup>, Dr. Christoph Klinger<sup>1</sup>, Dipl.-Math. Holger Kories<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Gregor Gzyl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Deutsche Montan Technologie GmbH & Co. KG, Am Technologiepark 1, D-45307 Essen

<sup>2</sup> Glowny Instytut Gornictwa (GIG), Plac Gwarków 1, PL-40 166 Katowice

Bei der Weiterentwicklung des DMT-Prognosewerkzeuges „Boxmodell“ für die Mengenströmung und Abbildung komplexer Strukturen bei Grubenflutungen des Kohle- und Erzbergbaus gilt die Aufmerksamkeit besonders der Prognose der qualitativen Entwicklung der Grubenwässer. Es wurden internationale Flutungsbeispiele des Steinkohlenbergbaus und der Wismut GmbH analysiert und die resultierenden Auswaschfunktionen (e-Funktionen) zur Kalibrierung numerisch diskreter Flutungsmodelle genutzt. Neuere Messungen und parallele numerisch-diskrete Untersuchungen zeigen, dass die Dichteschichtung einen sehr bedeutenden Einfluss auf das Austragsverhalten von Wasserinhaltstoffen haben kann. Dazu wurden Laborversuche und Strömungsmessungen in realen Schächten durchgeführt, Rechnungen mittels CFD-Verfahren zur hochauflösenden Beschreibung der dichte- und wärmeabhängigen Strömung mit Doppeldiffusion „Wärme-Salinität“ realisiert und eigene Entwicklungsarbeiten geleistet. Um diese Erkenntnisse auch für große Feldbeispiele anwendbar zu machen, wurden die gewonnenen Erfahrungen so verallgemeinert, dass sie im Boxmodell programmiert werden konnten.

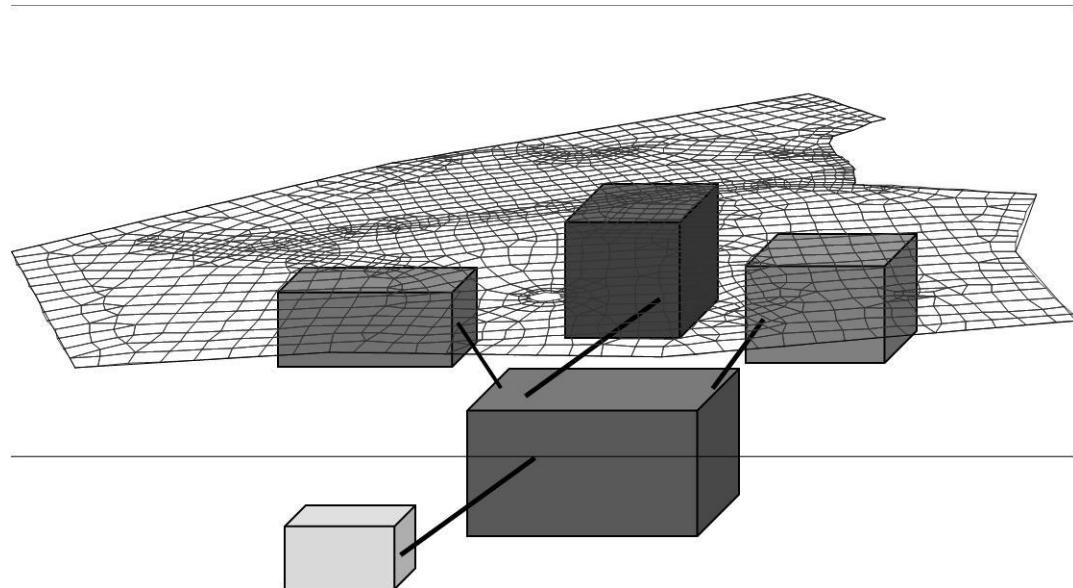
Prognosis of mine water quality evolution during and after the flooding of coal and ore mines has been focus of enhancements of the DMT prognosis tool „Boxmodel“ which is in other aspects used for flow rate quantification and representation of complex mine structures. International flooding data of coal mining and Wismut GmbH could be analysed. The resulting flushing functions (e-functions) have been used for calibration of numeric discrete flooding models. New data and additional numeric discrete investigations indicate the major impact of density layering on discharge of dissolved matter. This assessment bases on laboratory tests, flow rate measurements in open mine shafts, CFD calculations for high-resolution modelling of density and thermal controlled flow with double diffusion (heat-salinity) and own development work. These features have been converted and generalised for the Boxmodel program code to allow implementation into site models of large and interconnected mining areas.

---

### 1 Das Prognosewerkzeug Boxmodell

Numerische Modelle wurden in den letzten Jahren Standardwerkzeuge im Bereich des Grubenwassermanagements. Um die räumliche Ausdehnung der zu betrachtenden Lagerstätten beherrschen zu können, sollte das numerische Modell relativ große Bilanzzellen -Boxen- berücksichtigen, innerhalb derer jedoch eine sinnvolle Mittelwertbildung hydraulischer Parameter möglich sein muss (PAUL et al. 1998). Mit dem Konzept einer bestmöglichen Anpassung an die hydrogeologischen Bilanzeinheiten bzw. geologischen Strukturen kann eine drastische Verringerung der Zellzahlen gegenüber klassischen Grundwassermodeilen erreicht werden, ohne an Aussagekraft zu verlieren. Es wird nur so fein in räumliche Bilanzeinheiten unterteilt, wie zur Beantwortung der gestellten Fragen notwendig und aus hydraulischer Sicht möglich. Weiterhin soll die Geometrie der Bilanzeinheiten den praktischen Erfordernissen entsprechen. Dies schafft wiederum Freiraum, andere wichtige im Bergbau vorherrschende Verhältnisse zu berücksichtigen, wie turbulente und dichteabhängige Strömung, genaue Überlaufniveaus, Zeitfunktionen von hydraulischen Eigenschaften und Pumpenkennlinien/Rohrleitungsverluste.

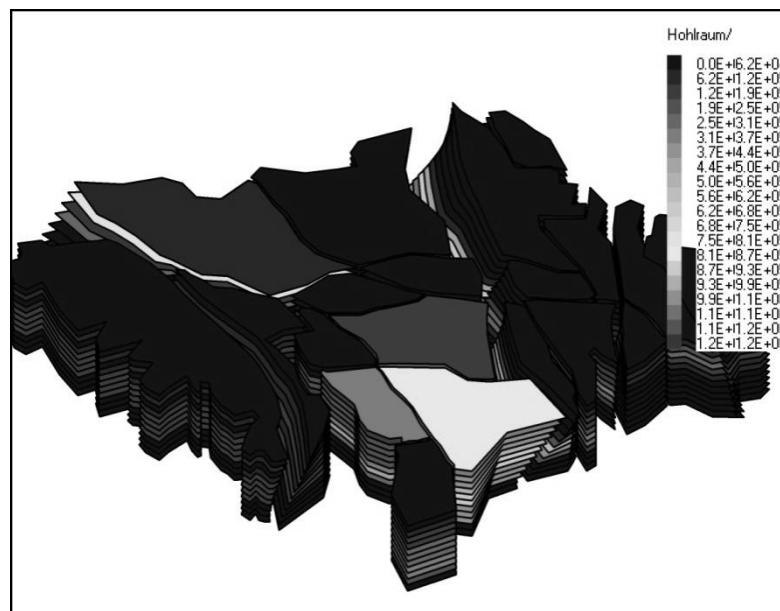
Im Beispiel Abbildung 1 wurde ein zweidimensionales Finite-Elemente-Grundwassermodeil in die Volumenbilanzmethode überführt und als oberste Schicht eines dreidimensionalen Modells verwendet. In den darunter liegenden Modellscheiben wurden fiktiv Boxen für Grubenfelder installiert. Alle Boxen oder Zellen der 1. Modellscheibe sind beliebig mit Boxen anderer Modellscheiben hydraulisch koppelbar.



**Abb. 1: In Boxmodell überführtes Finite-Elemente-Grundwassermodell Grottenbach und Ankopplung von Boxen eines Grubengebäudes**

Letztlich entstand ein äußerst flexibles Werkzeug, bei dem jede Bilanzzelle mit jeder anderen Bilanzzelle, unabhängig von der Modellscheibe, hydraulisch gekoppelt werden kann. Die Anzahl und Form der Bilanzzellen je Modellscheibe kann völlig unterschiedlich sein kann. Somit ist das Boxmodell in der Lage, sich kompliziertesten geologischen Strukturen ohne Genauigkeitsverlust bei geringen Zellzahlen anzupassen. Voraussetzung, um diese Strukturen effektiv verwälten zu können und damit den Nachteil gegenüber anderen Modellsystemen mit regelmäßigen Nachbarn zu kompensieren, ist ein leistungsfähiges CAD-System incl. Prä-Prozessing.

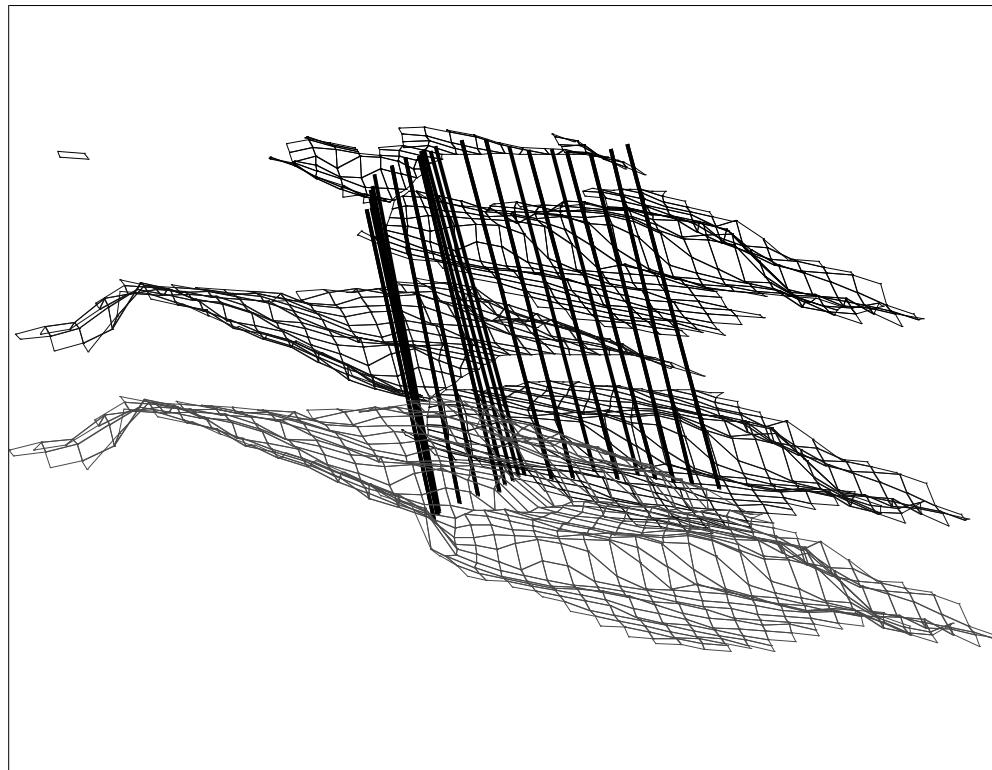
Abbildung 2 stellt das Boxmodell für das Steinkohlenbergwerk Lugau-Oelsnitz mit einer speziellen Anpassung des Einfallens der Störungssysteme dar. Die Abbauteile befinden sich stets innerhalb ungestörter Flözteilflächen, die Störungen werden nur durch Hauptstreckensysteme durchquert und können ansonsten vorrangig als hydraulisch dichte Elemente angenommen werden.



**Abb. 2: Boxmodell Steinkohle Lagerstätte Lugau/Oelsnitz (Sachsen)**

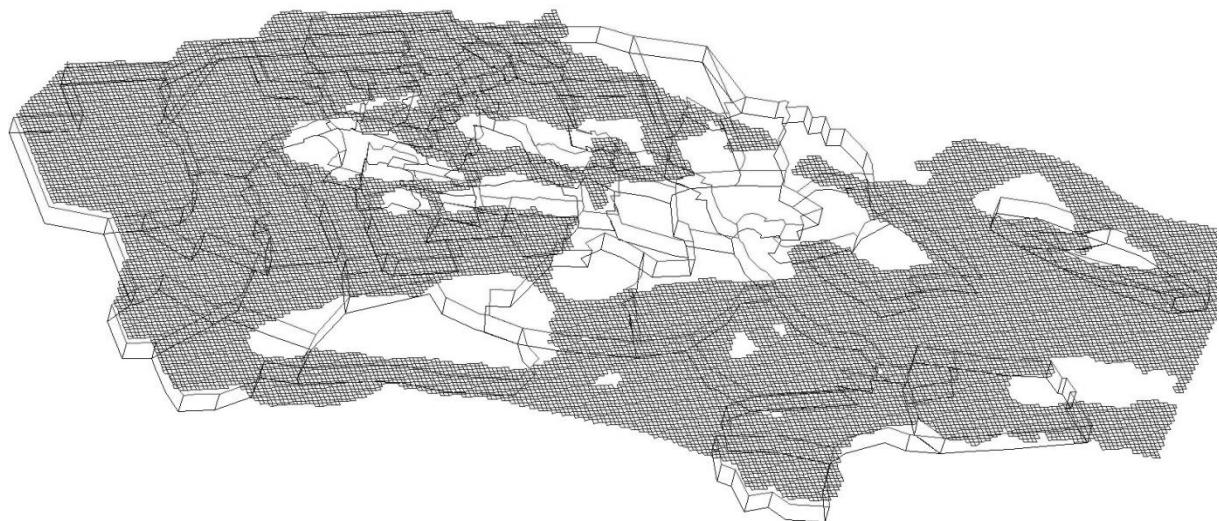
Z.B. für Fragen der Geothermie hat sich eine Strukturbildung mit dem Programmsystem PETREL bewährt. Das Boxmodell ist in der Lage die PETREL-Strukturen ohne Qualitätsverlust für geoströmungstechnische Simulationen direkt zu übernehmen (Abb. 3). Dabei ist es möglich, Störungen mit

flachem Einfallen mit besonderen hydraulischen Wegsamkeiten direkt in die betreffenden Modellzellen zu integrieren, unabhängig davon, ob diese Modellzellen vertikal übereinanderstehen oder nicht.



**Abb. 3:** Boxmodell, erstellt aus PETREL-Strukturmodell mit hydraulischer Verbindung über Störung

Abbildung 4 zeigt das Boxmodell „Oberschlesien“ mit angekoppelten Grundwasserleitern. Oberhalb von Modellscheiben, die das Grubengebäude abbilden, befinden sich 3 Modellschichten für die Grundwasserleiter im Hangenden. Es erfolgte eine Kalibrierung unter Berücksichtigung der gemessenen Grundwasserstände in den Grundwasserleitern, den vorher konstruierten Grundwassergleichen und den bekannten Versinkungsraten in das Grubengebäude. Das Modell besitzt eine Erstreckung von 69 km x 42 km und besteht aus 26 Modellscheiben.



**Abb. 4:** Boxmodell Oberschlesien mit 3 an die Gruben gekoppelten Deckgrundwasserleitern

## 2 Geochemische Stoffprognosen

Die Berücksichtigung der chemischen Entwicklung des Grubenwassers ist unverzichtbar für eine langfristige Planung der Drainagemaßnahmen nach Flutung der Grubenbaue. Es verändern sich mit der

Flutung auch die Konzentrationen der Flutungswasserinhaltsstoffe, die durch Pyritoxidation im Bereich der Abbaue und Strecken und z.T. sehr salzhaltige Zuflüsse aus dem geologischen Körper beeinflusst werden. Zusätzliche Substanzen werden aktiviert, welche während des aktiven Bergbaus in Porenwässern und sogenannten „Totbereichen“ gespeichert wurden. Dies führt zu den bekannten Anstiegen der Konzentrationen und Frachten infolge der Flutung.

Monitoringdaten von historischen und gegenwärtigen Grubenflutungen bilden die wesentliche Grundlage für Grubenwasserqualitätsprognosen. Zahlreiche internationale Beispiele für Konzentrationsentwicklungen in Grubenwasserströmen wurden für statistische Untersuchungen aufbereitet. Die spezifischen betrachteten Daten sind das flutbare Volumen, Neubildungsrate und Zusammensetzung des zuströmenden Wassers. Dies führte zu empirisch abgeleiteten Exponentialfunktionen, welche für vereinfachte Grubenwasserqualitätsprognosen verwendet werden. Die Gültigkeit dieser Kurven wurde für verschiedene Anwendungsfälle überprüft. Hierbei deutet sich an, dass die empirischen Funktionen relativ einfache Geometrien und hydrogeologische Bedingungen gut beurteilen. Abbildung 5 zeigt drei verschiedene Auswaschkurven aus dem französischen Steinkohlebergbau.

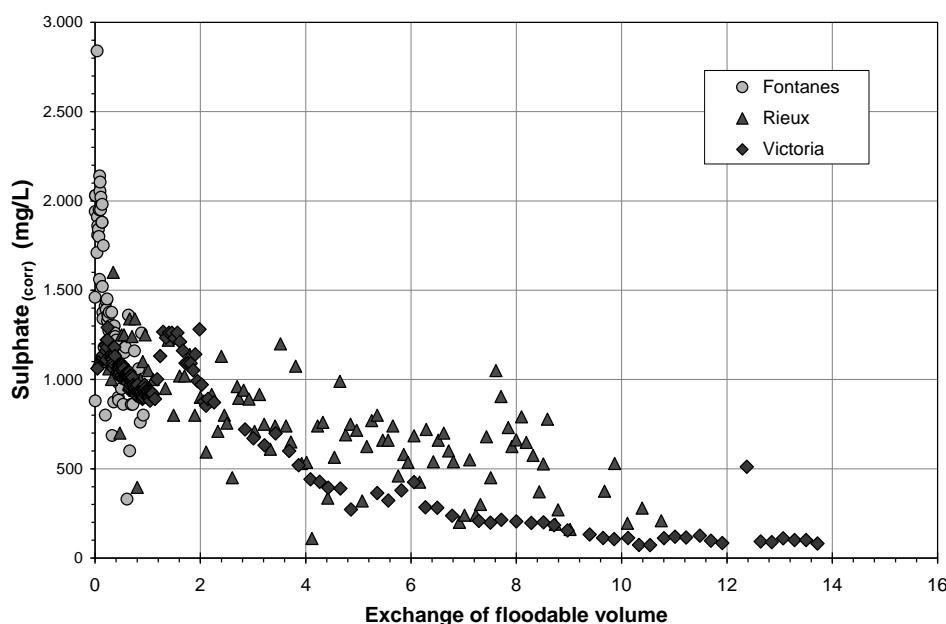


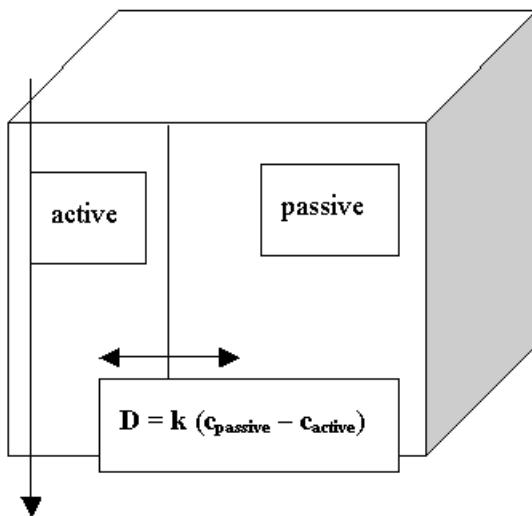
Abb. 5: Gemessene SO<sub>4</sub>-Konzentration minus SO<sub>4</sub>-Konzentration des Wasserzustromes von 3 Gruben

Die Prognose der Entwicklung der Grubenwasserqualität großer Grubenfelder mit komplizierten Fließzuständen ist sehr komplex, worauf das Prognoseinstrument abgestimmt sein muss. Das Modell muss den scharfen anfänglichen Anstieg des Konzentrationsniveaus mit und nach Flutung sowie die langfristige exponentielle Abnahme beschreiben. Dabei muss ein ausreichender Massenspeicher zur Verfügung stehen, um die lange und langsame Konzentrationsentwicklung zu ermöglichen bis hin zu nahezu unveränderten Werten. Die Beladung des Grubenwassers mit den höchsten gemessenen Werten durch einmalige Aufkonzentrierung des Flutungswassers ist hierbei nicht ausreichend, da dies nicht mit vielfach beobachteten ausgetragenen Gesamtmassen übereinstimmt. Wir griffen zur Lösung dieses Problems auf ein vereinfachendes Doppelporositätssystem zurück (Abb. 6).

- Das flutbare Volumen wird in einen leicht durchströmhbaren Anteil (aktive Phase) und in einen stagnierenden Bereich unterteilt (passive Phase).
- Die aktive Phase bezieht sich auf die offenen Strecken und die stagnierende Phase auf Teile des Abbaus, Bruchbereiche einschließlich der angrenzenden Porenräume.
- Konvektion findet nur zwischen den aktiven Porositäten der Boxen statt.
- Die passive Phase enthält leicht lösliche Salze in hohen Konzentrationen.
- Weitere Lösungsprozesse neben den sofort in der flüssigen Phase gespeicherten Komponenten finden in der passiven Porosität statt.

- Der Massenaustausch zwischen der passiven und aktiven Porosität folgt dem Diffusionsgesetz.

Dieses Modellkonzept ist in das geochemische Reaktionsmodell integriert worden. Es erlaubt höhere Aufspeicherung von Ausgangsmassen in der passiven Porosität, ohne dass daraus berechnete Ausflusskonzentrationen resultieren, welche mit Messwerten nicht übereinstimmen:



**Abb. 6: Unterteilung in aktive und passive Teile einer Box**

Als sehr wichtiger Einflussfaktor auf den Flutungsprozess hat sich zudem die Herkunft der Grubenwasserzuflüsse erwiesen. Hierbei wird in Tiefenzuflüsse, welche meistens hoch aufgesalzen sind (z.B. Ba, Cl, Na) und Zuflüsse aus den hangenden Grundwasserleitern unterschieden. Die Zuordnung der Herkunft beeinflusst die Funktion einer hydraulischen Verbindung im Laufe der Flutung bezüglich der hydraulischen Gradienten und damit der Zuflussmengen und auch der Strömungsrichtung beim Modellaufbau eines geschlossenen hydraulischen Systems, welches die Grubenbaue und den oberflächennahen Grundwasserleiter umfasst.

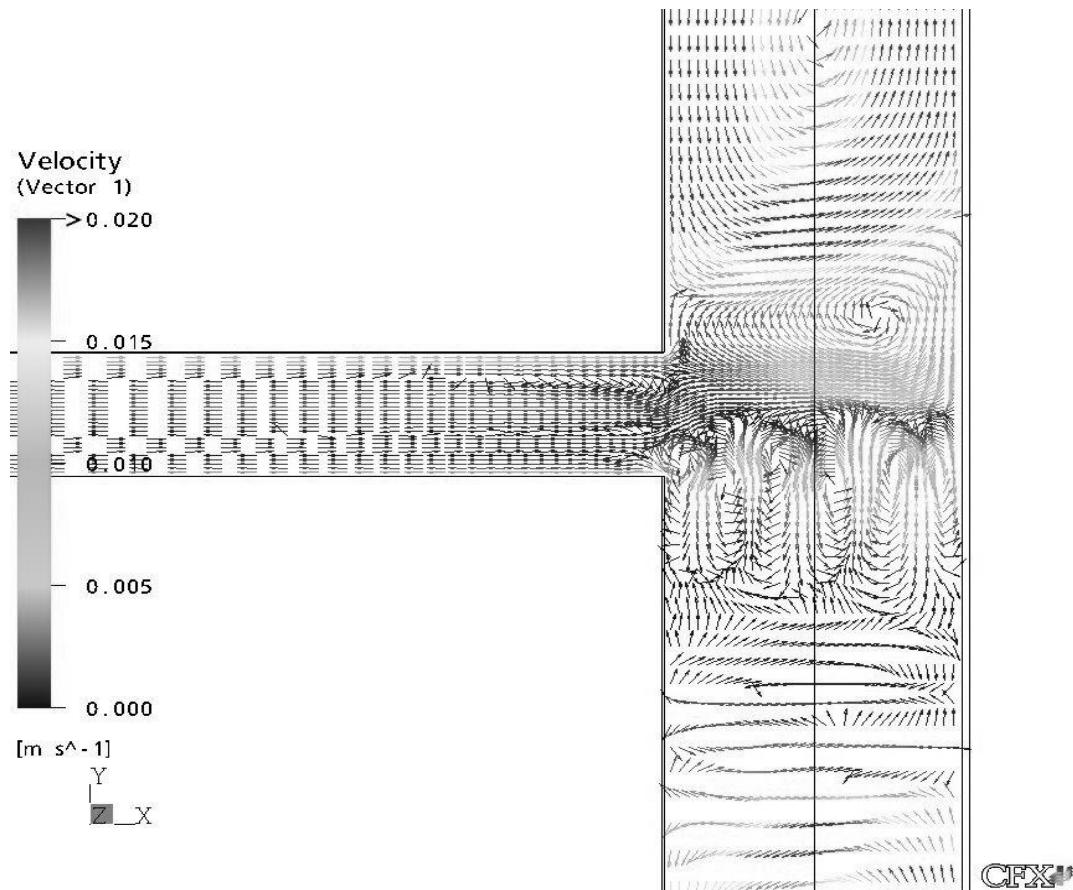
Die Modellierung von chemischen Wechselwirkungen (Lösung, Fällung, Sorption) in diesen Strömungs- und Mischungssystem zwischen den verschiedenen Wässern und mit dem umgebenden Gestein mittels eines reaktiven Stofftransportmodells ist unverzichtbar, um eine realitätsnahe Prognose abgeben zu können und daher auch kontinuierlich weiter entwickelter Bestandteil des Boxmodells.

### 3 Einfluss der Dichteschichtung

Da die oben beschriebenen Lösungsprozesse zu einer Aufmineralisation des Grubenwassers führen und aus tieferen geologischen Formationen erfahrungsgemäß die höher salzhaltigen Grubenwässer zufließen, liegt nach dem Flutungsprozess anfänglich meistens ein typisches mit der Tiefe zunehmendes Mineralisationsprofil vor. Diese hoch mineralisierten Wässer haben wegen ihrer großen Dichte das Bestreben in der Tiefe zu beharren und nicht am hydrogeologischen Kreislauf teilzunehmen. Die mit der Tiefe zunehmende Gebirgstemperatur hat einen gegenteiligen Einfluss auf die Dichte der Grubenwässer, so dass sich aus dem Zusammenwirken von Temperatur und Mineralisation die Stabilität von Standwasserschichtungen in gefluteten Bergwerken ergibt.

Da die Wirkung der Dichte für Flutungsprozesse als außerordentlich bedeutsam eingeschätzt wird, müssen diese in den Prognosewerkzeugen in geeigneter Weise berücksichtigt werden. So wurde bereits mit Unterstützung des Landes NRW im Jahre 2000 begonnen (KORIES, RÜTERKAMP & SIPPEL 2004), die Effekte der Dichteschichtung an realen Schächten zu messen und mittels CFD-Modellen (Computational Fluid Dynamics) nachzurechnen (Abb. 7).

Die Berechnung mit hochauflösenden CFD-Modellen offenbarte einerseits die Möglichkeit, derartige Prozesse numerisch-diskret zu beschreiben, gleichzeitig wurden aber auch die Grenzen dieser Art der Beschreibung für komplexe Bergwerke und langzeitliche Prognose-Rechnungen bei gängigen Rechnerkapazitäten offensichtlich.



**Abb. 7: Berechnung der Dichteschichtung mit CFD-Modell, realer Schachtanschluss, Vektoren der Geschwindigkeit**

Zur näheren Problembeleuchtung der Prozesse und Möglichkeiten der Beschreibung wurde folgendes Konzept verfolgt: Anhand von Technikumsversuchen werden die dichteabhängigen Strömungsprozesse im vereinfachten „Verbundbergwerk“ (im Modellmaßstab) praktisch gemessen. Diese maßstabsreduzierten Versuche werden einerseits mittels CFD-Modellen (RANS-Methode) rechentechnisch nachvollzogen und andererseits auch mit dem grobauflösenden Boxmodell berechnet. Zur Berechnung mit dem Boxmodell müssen geeignete makroskopische Prozessbeschreibungen gefunden werden, auf die unten näher eingegangen wird.

Abbildung 8 zeigt einen Technikumsversuch, bei dem eine künstliche Dichteschichtung durch Salzwasserzugabe im unteren Teil initiiert wurde. Anschließend wird anhand zahlreicher Versuche mit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit in den Schächten und Temperaturgradienten ermittelt, ob die obere oder untere Strecke durchströmt wird und wie sich die Dichteschichtung zeitlich entwickelt.

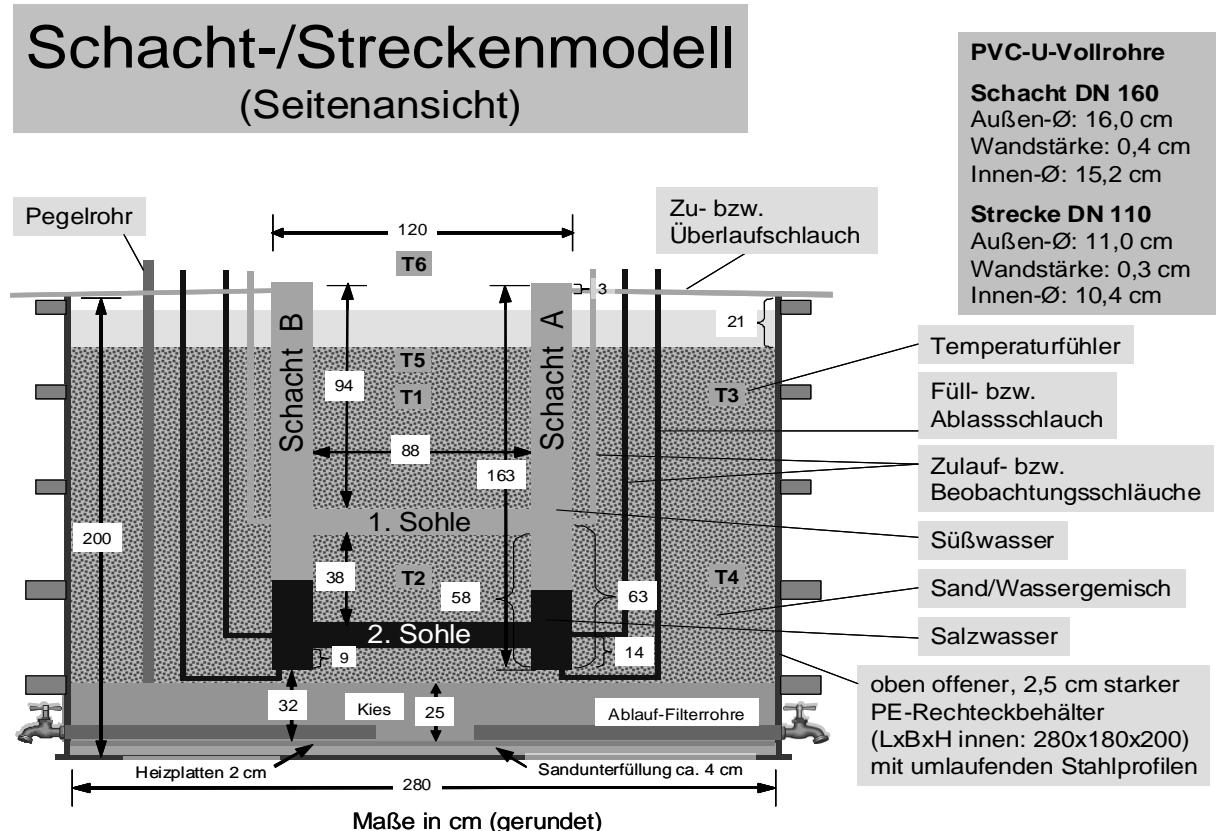


Abb. 8: Technikumsversuch zur Dichteschichtung

Das erwartete Ergebnis bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturgradienten und hohen Salzkonzentrationen im unteren Teil der Anlage zeigt Abbildung 9. Danach strömt das Grubenwasser nur in der oberen Strecke. Die Salze im unteren Teil der Schächte nehmen nur in einem äußerst geringen Umfang am Stoffaustausch teil.

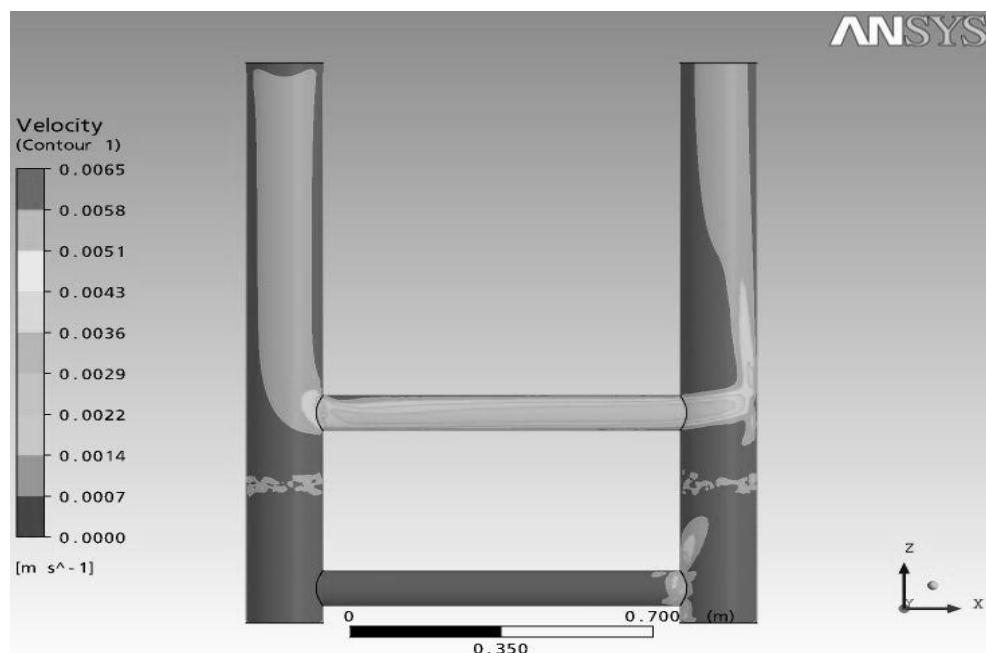


Abb. 9: Berechnung des Technikumversuchs mittels CDF-Modellen: Konturen der Absolutgeschwindigkeit

Anschließend werden die einkalibrierten CFD- und Boxmodelle an einem einfachen Feldbeispiel getestet, auf Maßstabseffekte überprüft und es werden Schlussfolgerungen für die Anwendung für große Feldbeispiele gezogen.

Im Gegensatz zur hochauflösenden Beschreibung turbulenter Strömungsprozesse (z.B. RANS-Verfahren mit Knotenabständen im mm-Bereich) bildet das Boxmodell mittlere Verhältnisse über größere Bilanzbereiche ab. Mit der Erkenntnis, dass die hochauflösenden Verfahren zur Beschreibung komplexer Bergbauverbundsysteme an Kapazitätsgrenzen stoßen, erhob sich die Frage, ob die Prozesse mit vertretbaren Vereinfachungen bei größeren Diskretisierungen, z.B. im Boxmodell, abgebildet werden können. Eine zentrale Rolle für eine vereinfachte modelltechnische Beschreibung bilden semi-empirische Gleichungen wie z.B. die Theorie der Doppeldiffusion an Grenzflächen mit hohen Dichte- und Wärmegradienten, s. z.B. (Wüest, 2004), entwickelt in den Fachgebieten der Limnologie und Ozeanographie.

Im Bereich gefluteter Gruben wie auch in tiefen Seen ist oftmals eine gegenläufige Wirkung von Temperatur- und Dichtegradienten zu beobachten. Die mit der Teufe zunehmende Salinität wirkt stabilisierend und die mit zunehmender Teufe ansteigende Temperatur destabilisierend auf die Dichteschichtung (diffusives Regime). Eine Maßzahl für die Wirkung der Doppeldiffusion bzgl. Masseaus tausch über Dichtegrenzen hinweg ist das Stabilitätsverhältnis  $R_p = (\beta dS/dz) / (\alpha dT/dz)$  gleich „Stabilität der stabilisierenden Komponente geteilt durch Instabilität der destabilisierenden Komponente“

$R_p$  Stabilitätsverhältnis der stabilisierenden (Salz) zur destabilisierenden (Wärme) Komponente

Die Stabilitätsverhältnisse wurden in den Technikumsversuchen ermittelt und die zugehörige Konzentrationsentwicklung aufgezeichnet. Anschließend wurden diese Verhältnisse mit den beiden Modelltypen „CFD-Modell“ und „Boxmodell“ nachgerechnet. Die Berechnungen zum Aussüßen der ursprünglichen Salzwasserlamelle im Vergleich zu den realen Messungen zeigen, dass das Boxmodell generell in der Lage ist, die komplexen Vorgänge der Dichteschichtung mit scharfen Grenzflächen nachzubilden.

## 4 Literatur

BLACHERE, A. (2003): PREVISION DE LA QUALITE DES EAUX DE LA MINE DE LA HOUE - PROPOSITION D'UN DISPOSITIF DE TRAITEMENT PASSIF. CESAME, FRAISSES.

ECKART, M., KORIES, H., RENGERS, R. & UNLAND, W. (2004): APPLICATION OF A NUMERICAL MODEL TO FACILITATE MINE WATER MANAGEMENT IN LARGE COAL FIELDS IN GERMANY. / MINE WATER 2004 - PROCESS, POLICY AN PROGRESS, NEWCASTLE UPON TYNE, VOL. 2, 209-218.

ECKART, M., KLINGER, C., RENGERS, R., UNLAND, W., METZ, M., BLACHERE, A. (2006): FORMATION PROGNOSIS DER FLUTUNGSAUSWIRKUNGEN IM STEINKOHLENBERGBAU, ALTBERBAUKOLLOQUIUM, CLAUSTHAL-ZELLERFELD, 2005

KLINGER, C. (2003): CHEMISCHE PROZESSE UND MONITORING BEI DER FLUTUNG VON PYRITHALTIGEN LAGERSTÄTTEN. / WORKSHOP WISMUT: FLUTUNGSBEDINGTE BESCHAFFENHEIT VON GRUBENWÄSSERN, CHEMNITZ.

KORIES, H., & RÜTERKAMP, P. & SIPPEL, M. (2004): FIELD AND NUMERICAL STUDIES OF WATER STRATIFICATION IN FLOODED SHAFTS. – IN: JARVIS, A.P., & DUDGEON, B.A., & YOUNGER, P.L. [EDS.]: MINE WATER 2004 – PROCESS, POLICY AND PROGRESS. INTERNATIONAL MINE WATER ASSOCIATION, PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM, VOL. 1: 149-159; UNIVERSITY OF NEWCASTLE, NEWCASTLE UPON TYNE, UK, 19-23 SEPTEMBER 2004

PAUL, M., SÄNGER, H.-J., SNAGOWSKI, S., MÄRTEN, H., ECKART, M. (1998): PREDICTION OF THE FLOODING PROCESS AT THE RONNEBURG SITE - RESULTS OF AN INTEGRATED APPROACH. / URANIUM MINING AND HYDROGEOLOGY II, FREIBERG, 130-139.

YOUNGER, P.L. (2000): DEEP MINE HYDROGEOLOGY AFTER CLOSURE: INSIGHTS FROM THE UK. / URANIUM MINING AND HYDROGEOLOGY III - URANIUM IN THE AQUATIC ENVIRONMENT, FREIBERG, 25-40.

YOUNGER, P.L. & BLACHERE, A. (2003): FIRST-FRUSH, REVERSE FIRST-FRUSH AND PARTIAL FIRST-FRUSH: DYNAMICS OF SHORT- AND LONG-TERM CHANGES IN THE QUALITY OF WATER FLOWING FROM ABANDONED DEEP MINE SYSTEMS. / ANNUAL BRITISH COLUMBIA ML/ARD WORKSHOP, VANCOUVER.

WÜEST, A., SCHMID, M. (2004): FORMATION AND RAPID EXPANSION OF DOUBLE DIFFUSIVE LAYERING IN LAKE NYOS, EAWAG, 6047 KASTANIENBAUM