

Peter Czolbe, Hans-Jürgen Kretzschmar, Michael Klafki, Freiberg und Horst Heidenreich, Leipzig

Strömungszellen im gefluteten Salzschacht

Salzbergwerke unterliegen der Flutung, wenn sie entweder während der Betriebsphase durch Wasser- bzw. Laugeneinbrüche ersaufen oder nach ihrer Stilllegung aus bergbau-sicherheitlichen Gründen mit einem hydrostatischen Ausbau durch gezielte Flutung verwahrt werden müssen. Eine solche Verwahrungstechnologie ist in verschiedenen Gruben des Harzvorlands realisiert worden [1].

Ausgewählte Salzlager werden als Endlager für toxische oder radioaktive Abfälle genutzt [2], [3] oder befinden sich in der Planungsphase für eine Deponieverwendung. Sicherheitsanalysen zu solchen Objekten müssen für das Szenarium einer ungewollten oder gezielten Flutung die Barrierefunktion des solegefüllten Schachts bewerten, um den eventuellen Schadstofftransport von der Schachtsohle zum Schachtmund oder -pfropfen zu erfassen.

Durch Messungen in einem Typschacht und mathematische Modellsimulationen lässt sich prinzipiell klären, welches Strömungsbild im Schacht als Verbindungspfad zwischen der Montan- und der Biosphäre vorherrscht, um die verschiedenen Vorstellungen von ruhender Sole über zusammenhängende Zirkulationsströmung bis hin zu einzelnen Konvektionszellen zu verifizieren.

Die Meß- und Berechnungsergebnisse liefern zumindest einen qualitativen Strömungsnachweis, der generell zur Sicherheitsbewertung von Flutungstechnologien im Salzbergbau heranziehbar ist.

1. Methodik

Die geophysikalischen Messungen erfolgten im zur Mitteldeutschen Stein- und Siedesalz GmbH gehörenden Schacht Peißen bei Bernburg, dessen montanistisches Schema im Bild 1 dargestellt ist. Seine Teufe liegt bei ≈ 400 m. Der Durchmesser beträgt etwa 5 m. Die Grube Peißen wurde im Zeitraum 1972 bis 1974 durch Flutung planmäßig verwahrt.

Folgende Schachtlogs sind gezogen worden:

- Temperaturprofile
- Dichteprofile
- Komponentenverteilung in der Sole
- Tracermarkierungen in verschiedenen Teufen mit Gammamessungen.

Videotechnische Aufnahmen wurden versucht, blieben jedoch erfolglos hinsichtlich Indikation von Strömungsbildern.

Zur mathematischen Simulation der Schachtströmung liegt das Strömungsmodell KASOMO [4] vor, das aus der Kavernensolung kommend für die Strömung von Sole und Schadstoffen in Endlager-Bergwerken weiterentwickelt wurde.

Diese Software ist fähig, die Strömung und den Stofftransport unterschiedlich zusammengesetzter Sole unter Einfluss natürlicher und technisch erzeugter Temperaturfelder in Strecken und Schächten näherungsweise zu berechnen [5].

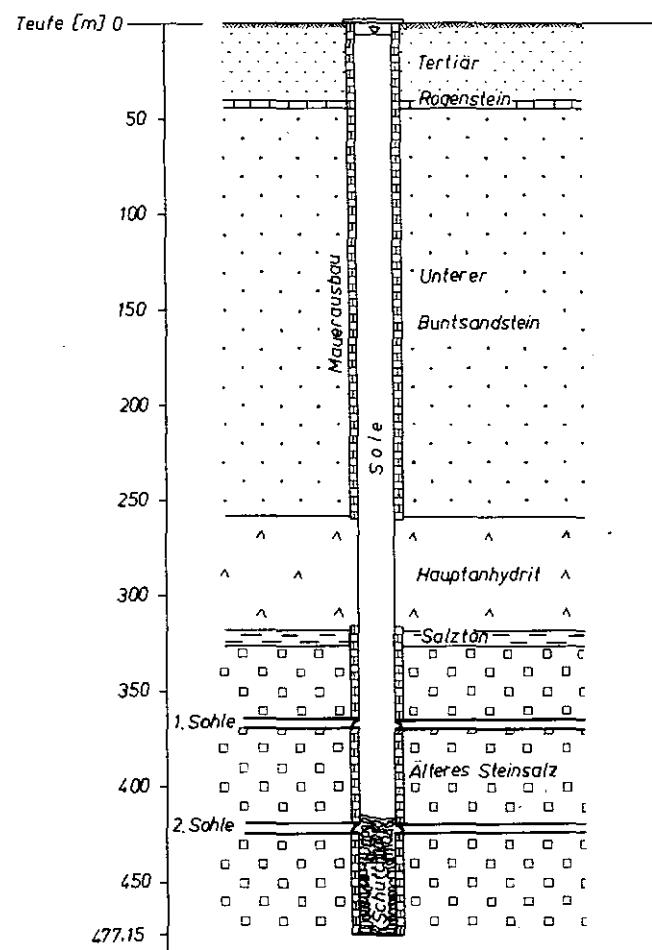


Bild 1. Schema des Schachts Peißen

2. Schachtlogs

2.1. Temperaturlog

Das Ergebnis der Temperaturmessungen ist im Bild 2 dargestellt. Es hat sich über die Meßdauer von 4 Monaten nicht verändert.

Die Sprünge in den Meßwerten sind ein charakteristisches Ergebnis.

Die Temperatur steigt von $13,2^{\circ}\text{C}$ in 7,5 m Teufe auf $30,5^{\circ}\text{C}$ bei 414,6 m. Ausgeprägte Isothermebereiche über größere Teufenerstreckung liegen zwischen 28,5 und 82 m ($\Delta h = 53,5$ m), 92 und 261 m ($\Delta h = 169$ m) sowie 308 und 368 m ($\Delta h = 60$ m).

2.2. Dichtelog

Das Dichteprofil der Schachtsäule folgt aus den zwei Meßreihen

- Kontinuierliches Log mit der bohrlochphysikalischen Sonde (Bild 3)

Aus den Bohrlochmessungen ergeben sich fünf scharf voneinander abgrenzende Flüssigkeitsdichtezeonen

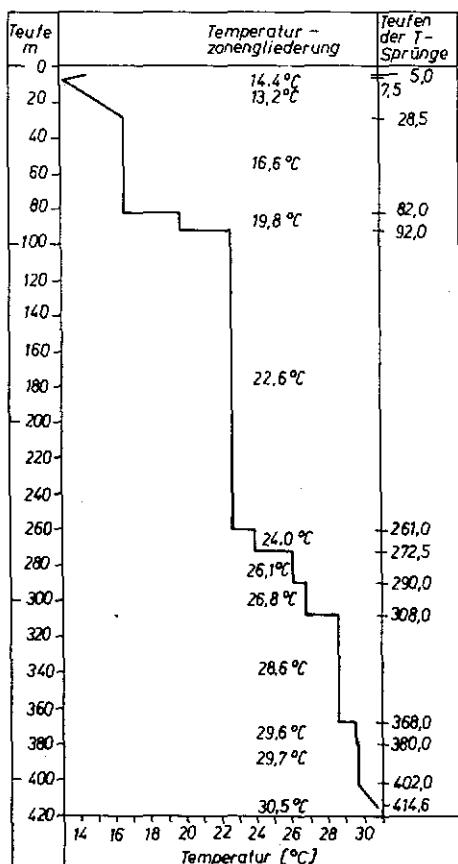


Bild 2. Temperaturprofil des Schachts Peißen

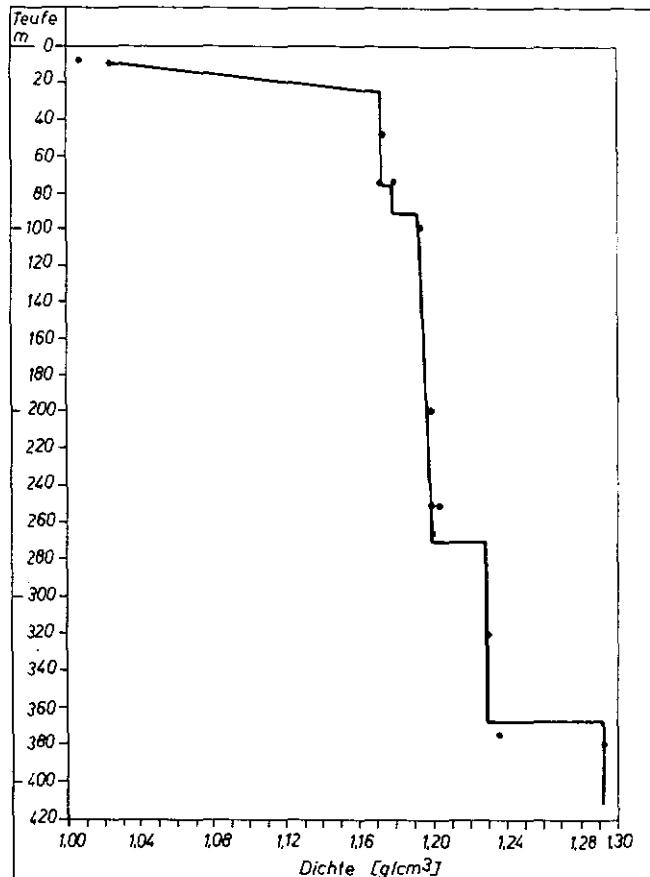


Bild 4. Dichteprofil des Schachts Peißen nach Probennahme

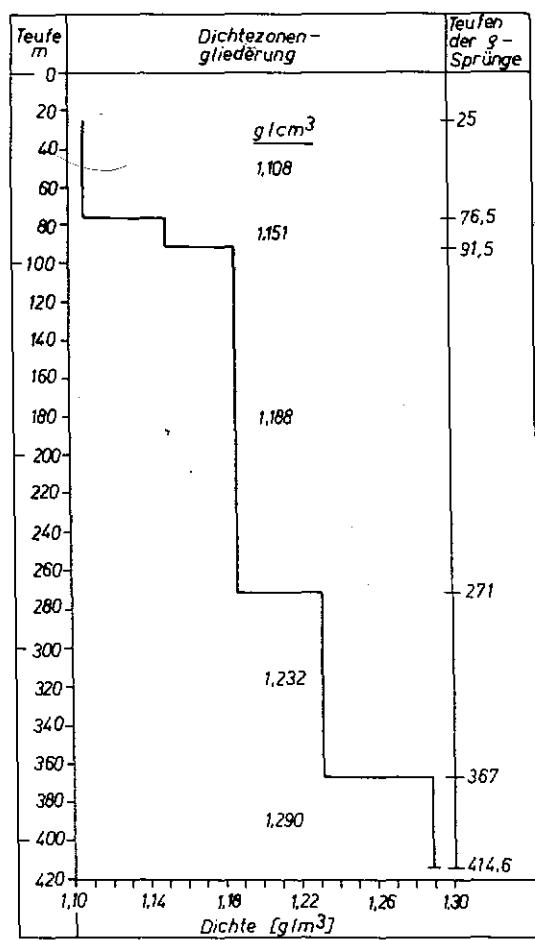


Bild 3. Dichteprofil des Schachts Peißen nach Log

zwischen 1,108 und 1,290 g/cm³. Die Sprünge fallen mit den markanten Temperaturänderungen zusammen.

- Punktweise Tiefenprobennahme mit Verschlußzelle (Bild 4)

Die höchste Zone der Wassersäule im Schacht ist fast ausgesüßt (1,007 g/cm³). Bis zu einer Teufe von 25 m steigt die Dichte stark auf 1,17 g/cm³ an. Die Dichten der tiefer entnommenen Proben ergeben wiederum eine Kurve mit dem charakteristischen stufenförmigen Verlauf (Bild 4). Bei ≈ 370 m Teufe zeigt sich ein auffallend starker Anstieg von 1,23 auf 1,29 g/cm³ und lässt einen Vergleich der Meßwerte zu.

2.3. Solekomponenten

Bis zu einer Teufe von ≈ 270 m ist die Dichtezunahme auf den ansteigenden NaCl-Gehalt zurückzuführen; unterhalb dieser Teufe tritt bei weiterer Dichtezunahme ein Wechsel im Komponentenbestand von NaCl zu MgCl₂ + KCl auf (Bild 5). Bei 380 m sammeln die Mg²⁺ – und SO₄²⁻-Anteile hoch: MgCl₂ und MgSO₄ dominieren in der Sole.

Diese Ergebnisse werden durch die berechneten Gehalte an NaCl-Äquivalenten aus den Messungen des spezifischen elektrischen Spülungswiderstands bestätigt. Für den mittleren Teil des Schachts (91 bis 271 m) ergeben sich die höchsten Werte. Trotz weiteren Dichteanstieges verringert sich die Leitfähigkeit relativ (Abnahme des NaCl-Äquivalentanteils). Die Solesäule ist somit zu gliedern in:

- bis 20 m „Süßwasser“
- bis 270 m NaCl-Vorherrschaft
- bis 365 m Na-K-Mg-Chlorid
- unterhalb 365 m Mg-(K) Chlorid und -Sulfat.

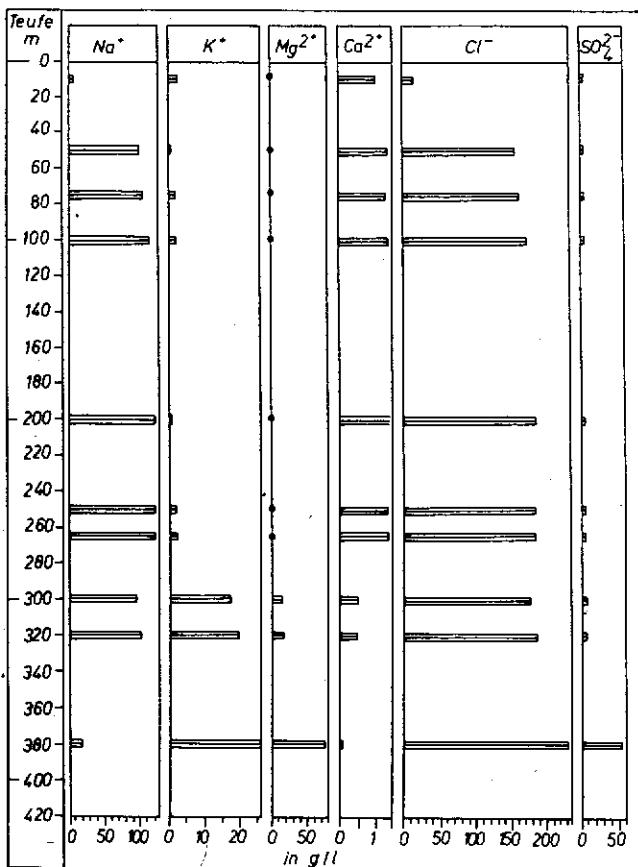


Bild 5. Komponentenanteile der Sole im Schacht Peißen

Die Ergebnisse der Temperatur-, Dichte- und Salinitätsmessungen belegen das Vorhandensein einer „Schichtung“ der Solesäule. Innerhalb der einzelnen Homogenitätszonen – ca. 20 bis 169 m mächtig – muß eine Flüssigkeitskonvektion ablaufen, weil sonst z. B. ein derart vollkommener Temperaturaustausch nicht zu erklären wäre.

Aufbauend auf diese Messungen und Beobachtungen erfolgte die Wahl der Tracerabschußteufen, um die Konvektionsströmung zu quantifizieren.

2.4. Tracermarkierung

Mit dem Freisetzen von radioaktiven Tracern in 10 unterschiedlichen Teufen und der Beobachtung ihrer Ausbreitung werden die Existenz mehrerer Konvektionszellen unterschiedlicher Größe belegt (Bild 6) und erste Aussagen über Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb dieser Zellen ermöglicht. Zur Klärung der Zirkulationsrichtung erfolgen der Abschuß in Schachtmitte, die Messung aber über zwei an gegenüberliegenden Schachtwänden positionierte Sonden.

Nach dem Abschießen des Tracers sind vielfach eine Auf- und eine Abwärtsbewegung zu beobachten, wobei jeweils eine Richtung dominiert, d. h., die Sole ist zweifellos in Bewegung. Grenzen, die mit den Sprüngen der Temperatur-, Dichte- und Salinitätsmessungen zusammenfallen, werden von der Tracerwolke nicht überwunden. Die Beobachtungen geben Hinweise auf die Aufwärtsbewegung in Nähe der Schachtwand und die Abwärtsbewegung in Schachtmitte. Aus der Ausbreitung der Tracerwolke errechnen sich Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen 0 und 70 m/h in der größten Konvektionszelle.

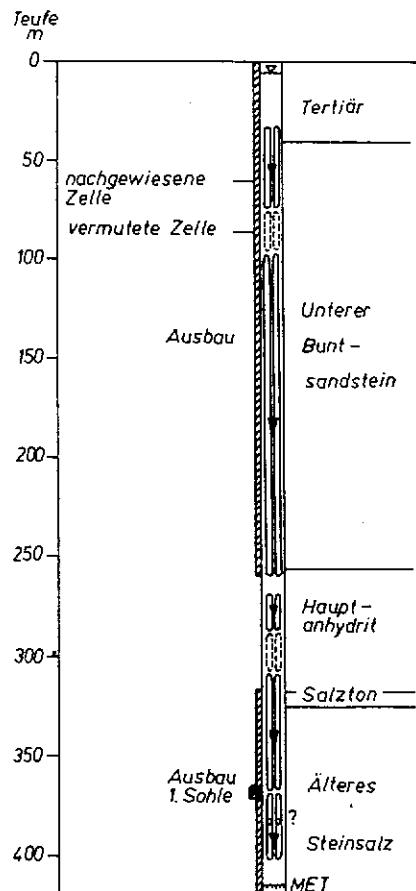


Bild 6. Erfaßte Konvektionszellen mittels Tracermarkierung

2.5. Strömungsmeßbild

Zusammenfassend im Bild 7 dargestellt führen die Schachtlogs zu folgenden strömungsmechanischen Aussagen:

- Die Sole des gefluteten Schachts weist eine „Schichtung“ auf. Diese spiegelt sich in markanten Sprüngen in den bohrlochgeophysikalischen Temperatur-, Flüssigkeitsdichte- und Spülungswiderstandsmessungen, aber auch in den Laboranalysen zur Salzzusammensetzung und Dichte wider.
- Die Temperatursprünge können innerhalb von 20 m Teufenänderung bis zu 6°C, Dichtesprünge bis 0,06 g/cm³ betragen.
- Die Solezusammensetzung ändert sich mit zunehmender Dichte
 - von Süßwasser
 - über NaCl-Hauptauftreten
 - zur MgCl₂ (MgSO₄)-Dominanz.
- Starke Flüssigkeitsbewegungen finden innerhalb der Homogenitätsbereiche statt, mit einem Aufwärtsströmen an der Wand der Schachtröhre und einem Abwärtsfließen in der Schachtmitte.
- Die Grenzen dieser Bereiche – markiert durch die abrupten Temperatur-, Dichte- und Komponentenänderungen – werden von den radioaktiven Tracerwolken nicht überschritten.
- Aus den Tracer-Gammamessungen wird auf eine maximale Geschwindigkeit von 70 m/h geschlossen. Im mittleren Bereich einer Konvektionszelle scheint die Geschwindigkeit am höchsten zu sein.

Der geothermische Gradient ist die auslösende Ursache für die Flüssigkeitsbewegung in einem gefluteten Schacht. Es

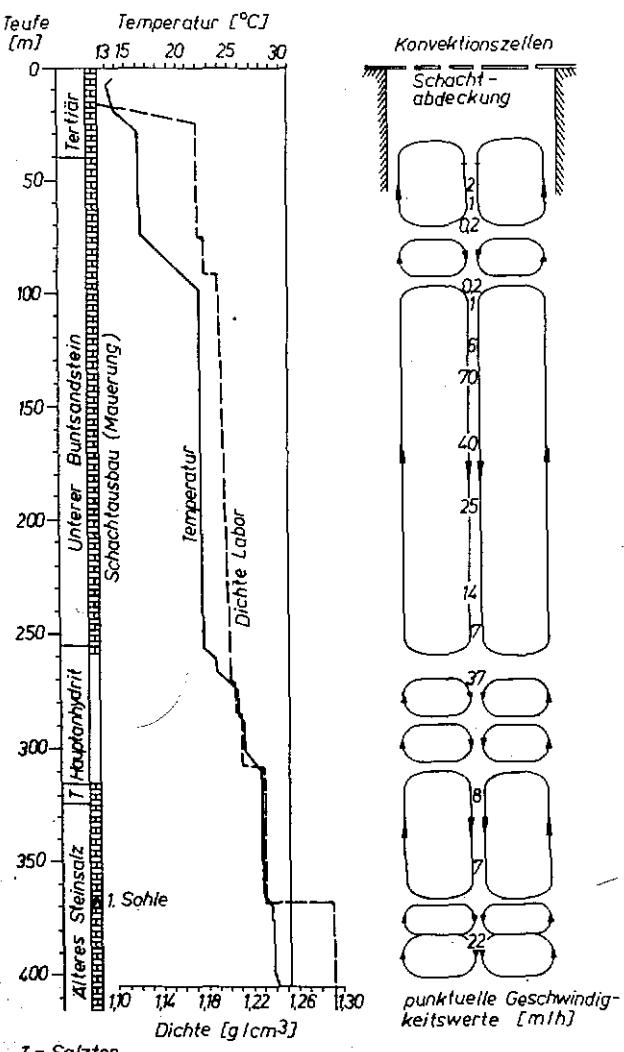


Bild 7. Gemessenes Strömungsfeld im Schacht Peißen

bestehen zweifellos Zusammenhänge zwischen der Zerlegung des Flüssigkeitsstroms in mehrere (6 bis 8) unterschiedlich hohe (20 bis 163 m) Konvektionszellen und

- dem anstehenden Gebirge mit seinen unterschiedlichen gesteinsspezifischen Wärmeleitfähigkeiten, Klüftigkeiten und möglichen Wasserzuflüssen
- dem (teilweisen) Ausbau des Schachtes durch Mauerung mit isolierender ausgleichender und vor Ablaugung schützender Wirkung
- den am Schacht mündenden Auffahrungen als Thermo- und Chemoanomalien.

2.6. Interpretation

Verschiedene, scheinbar unerhebliche Anomalien zerlegen die thermisch ausgelöste Flüssigkeitszirkulation in mehrere Konvektionszellen, die sich als Homogenitätsbereich bezüglich der Temperatur, Dichte und des Solechemismus stabilisieren. Auf die Grenzen der Konvektionszellen – die primär vorhandenen Anomaliebereiche – beschränken sich die starken thermischen und chemischen Änderungen. Der thermische Gradient, die sich einstellenden Konvektionsgeschwindigkeiten und der freie Schachtquerschnitt bestimmen neben den geologischen Gegebenheiten (Klüftigkeit, Zuflüsse, Wärmeleitfähigkeit) maßgeblich die Höhe der entstehenden Konvektionszellen.

Bei der Bewertung der Sicherheit eines „flüssigkeitsverwahrten Endlagers“ bleibt nach dem Nachweis einer Bewegung der Flüssigkeit im Schacht das Problem offen, ob einzelne Substanzen die Grenzen der Konvektionszellen langzeitig überwinden und somit ein Stofftransport bis an die Tageoberfläche möglich ist. Die Fronten radioaktiver Substanzen haben während der mehrmonatigen Meßeinsätze am Schacht die Zellengrenzen („Ruhezonen“) nicht überschritten.

Auch die geringen K^{+} -, Mg^{2+} - und SO_4^{2-} -Gehalte in der oberen Schachthälfte sprechen für eine Barrierewirkung, die längs der Schachtsäule einen durchgehenden konvektiven Stofftransport ausschließt und einen dispersiven Stoffübergang infolge „Fingerbildung“ an den Grenzen der Konvektionszellen als gegenwärtig nicht nachweisbar charakterisiert.

Damit bleibt als alleiniger Transportmechanismus über die Konvektionszellen hinweg die molekulare Diffusion übrig, für die ausführliche Messungen des Diffusionskoeffizienten vorliegen. Aus einer damit ableitbaren Berechnung der konzentrationsabhängigen Diffusionsgeschwindigkeiten ist die Schadstoffankunft am Schachtmund bzw. am Kontakt zur grundwasserführenden Geosphäre kalkulierbar und mit den vorgegebenen Grenzwerten vergleichbar.

3. Modellsimulation des Strömungsfelds

3.1. Grubengebäude

Die Strömungsvorgänge in einer gefluteten Grube lassen sich näherungsweise auch durch mehrdimensionale Simulationsmodelle mittels der Finite-Differenzen-Verfahren erfassen. Prinzip und Anwendung der Simulationssoftware KASOMO auf den Schadstofftransportpfad Einlagerungs-ort – Strecken – Schacht in einem gefluteten Bergwerk vermitteln die Ergebnisse von [5].

Ein weit verzweigtes Grubenbauwerk ist als strömungsmechanisches Netzwerk natürlich nur in den wesentlichen Strömungsbahnen, überwiegend als 2D-Querschnitt, simulierbar wie im Bild 8 angedeutet. Eine wichtige montantechni-

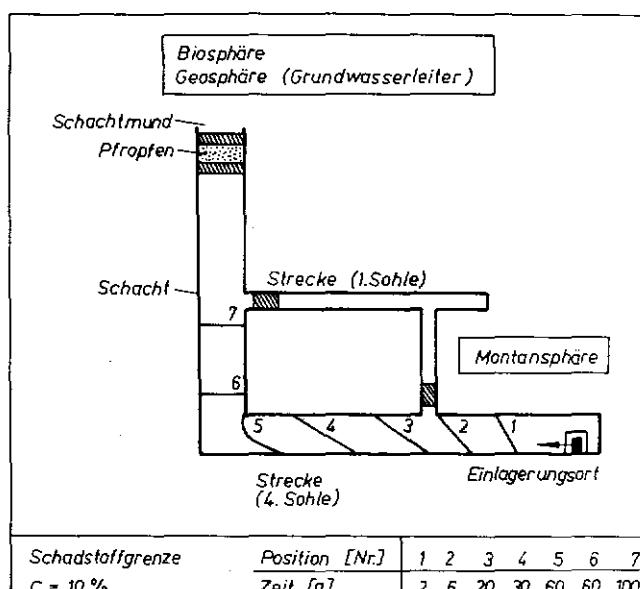


Bild 8. 2D-Schema eines Salzbergwerks für die Modellsimulation als Endlager

sche Barriere auf diesem Transportpfad stellt die Schachtsäule dar.

Die Modellberechnungen weisen aus, daß der natürliche geothermische Gradient ausreicht, um längs einer horizontalen Strecke freigesetzte Schadstoffe migrieren zu lassen und daß die Konzentration mit zunehmender Transportzeit infolge Vermischung in der Sole abnimmt. Simulationen für ein Grubenschema nach Bild 8 ergeben für das Beispiel eines mit homogener NaCl-Sole gefluteten Salzbergwerks in 400 m Teufe und einer Streckenlänge von 700 m die Ankunft von Schadstoffspuren am Kontakt Strecke-Schacht nach ungefähr 10 Jahren ihrer Freisetzung im Einlagerungsort. Ein Gesenk mit Verbindung zum höher gelegenen Streckensystem beschleunigt die Transportgeschwindigkeit.

Wenn der Schadstoff am Schachtfuß angelangt ist, wird er im Strömungsfeld dieses vertikalen Barriereelements weitertransportiert. Die Strömungsverhältnisse im Schacht entscheiden über das weitere Schadstoffausbreitungsverhalten bis zum Schachtmund.

3.2. Schacht

Die aufgeführten Schachtlogs sind neben ihrer quantitativen Beschreibung der Schachtströmung eine wesentliche Grundlage zur Verifizierung des Simulationsmodells.

Für den hypothetischen Fall eines mit homogener Sole gleichmäßig gefüllten Schachtes ergibt sich ein Strömungsfeld nach Bild 9a. Der geothermische Gradient führt zu einem geschlossenen Zirkulationsfeld im gesamten Schacht. Die relativ hohe Konvektionsgeschwindigkeit würde den Schadstoff in einigen Tagen von der Sohle zum Schachtmund transportieren.

Bei inhomogener Soleschichtung wird auch im mathematischen Modell das Auftreten von Konvektionszellen (Bild 9b) nachgewiesen. Die Nachbildung der im Schacht Peißen herrschenden Strömungs- und Vermischungsfelder mit dem Simulationsmodell zeigen die im Bild 10 dargestellten Ge-

schwindigkeitsverteilungen. Analog zu den Messungen weist auch das Modell keinen vertikalen Konvektionstransport im Schacht nach, d. h., eine durch den geothermischen Gradienten induzierte Thermokonvektion überwindet nicht die Dichtesprünge in der Sole, so daß sich im Schacht keine geschlossene Zirkulationsströmung über die gesamte Schachtlänge einstellen kann.

Das Simulationsmodell stößt in der genauen Quantifizierung des Strömungs- und Vermischungsfelds im Schacht an die beiden Anwendungsgrenzen:

- Die numerische Dispersion des mathematischen Lösungsverfahrens zum Stofftransport verstärkt den physikalischen Diffusionsprozeß und muß durch Sensitivitätsvarianz im konkreten Fall ermittelt werden.
- Von den Konvektionszellen lassen sich nur die wesentlichen „großen“ Zellen nachbilden, für die von der Eingabe im Gitternetz entsprechende signifikante Unstetigkeiten in Dichte und/oder Temperatur vorliegen. Für kleinere Anomalien, wie beispielsweise Wasserzuflüsse oder Schacht-ausbauänderungen, fehlen die Inputinformationen.

4. Schlußfolgerungen

Der vorliegende Komplex aus Meß- und Simulationsverfahren ist für die prinzipielle Erfassung des Strömungsfelds in gefluteten Schächten anwendbar, um die Barrierefunktion zu bewerten.

Der strömungsmechanische Nachweis der existierenden Konvektionszellen charakterisiert diese als Vertikalbarriere, deren Blockierungseffekt näherungsweise im Modell quantifizierbar ist.

Der Einfluß der gebirgsmechanischen Grubenkonvergenz auf das Strömungsfeld als Überlagerung einer lokal differenzierten Kolbenströmung wurde hier nicht betrachtet.

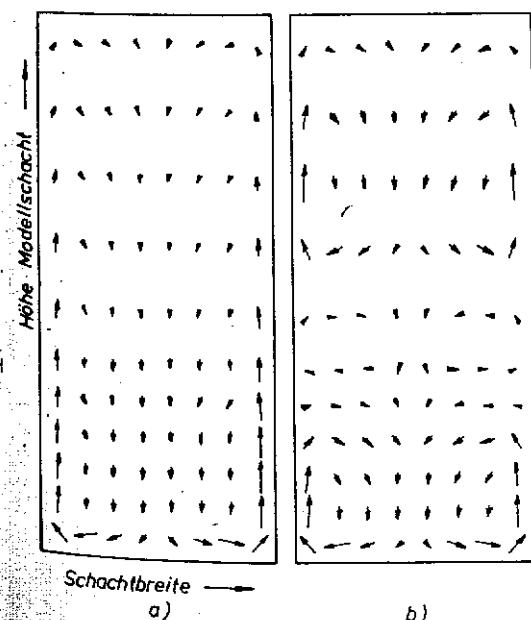


Bild 9. Berechnetes Vektorenfeld der Strömungsgeschwindigkeiten in der Schachtsäule a) für homogene Sole und linearer geothermischen Gradienten b) für Sole mit Dichteschichtung

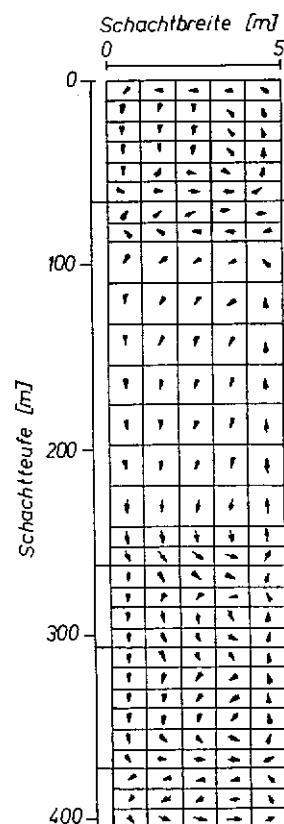


Bild 10. Diskretisierung und Geschwindigkeitsfeld im Modell Peißen

Zusammenfassung

Geophysikalische Messungen in einem gefluteten Schacht weisen auf die Zirkulationsströmung der Sole in mehreren Konvektionszellen hin. Die Strömungsbedingungen im Schacht können mit einem Simulationsmodell erfaßt werden, und Aussagen über den Stofftransport im Strömungsfeld der Sole sind möglich. Diese sind für eine Sicherheitsanalyse bei vorgesehener Nutzung eines Bergwerks als Endlager oder Deponieobjekt wesentlich. Es wird gezeigt, daß die Konvektionszellen als Barrieren gegen einen Schadstofftransport von der Schachtsohle zum Schachtmund wirken.

Literatur

- [1] Pelzel, H.: Symposium Bergbau chemischer Rohstoffe, Krakow 1984
- [2] Ebel, K.: 22. Fortschrittsberatung zum Transport und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, Weimar 1989
- [3] Kelm, U.: Glückauf 127 (1991) 3/4, S. 127–131
- [4] Kretzschmar, H.-J., u. H. Heidenreich: Neue Bergbautechnik 11 (1981) 2, S. 94–99
- [5] Heidenreich, H., u. a.: Kernenergie 34 (1991) 6, S. 270–275

NBT 5664

Helmut Garleb, Nordhausen

Das hydrogeologische Versuchsfeld Nordhausen – ein Beitrag zur Erfassung komplexer Einflüsse auf eine Grundwasserlagerstätte

1. Allgemeine Grundsätze

Das Grundwasser stellt unbestritten in allen Industrieländern eine der wichtigsten Ressourcen dar. Seine nach Menge und Beschaffenheit ausreichende Bereitstellung kann durchaus zum begrenzenden Faktor der gesellschaftlichen Entwicklung werden.

Kommunalwirtschaft, Industrie und Landwirtschaft beeinflussen entsprechend ihrer Entwicklung in zunehmendem Maß die Hydrosphäre und damit auch das Grundwasser sowohl hinsichtlich der Menge als auch der Beschaffenheit. Die daraus resultierenden Gefahren der Überbeanspruchung und der Kontamination des Grundwassers erfordern eine umfassende Analyse und Kontrolle der das unterirdische Wasser betreffenden sehr komplexen Prozesse.

Die Einzelprozesse, die auf das unterirdische Wasser während seiner Entstehung, seiner Bewegung in der Lithosphäre und seiner Veränderungen hinsichtlich Menge und Beschaffenheit einwirken, sind im wesentlichen sowohl theoretisch als auch experimentell recht intensiv untersucht worden. Eine hochentwickelte Methodik und Technik der mathematischen Modellbildung und computergestützten Simulation hydrogeologischer Prozesse gestatten deren begründete Epignose und Prognose und ermöglichen eine rationelle wissenschaftlich begründete Bearbeitung auch komplizierter praktischer hydrogeologischer Tagesaufgaben. Aber gerade bei dieser Arbeit wird immer wieder deutlich, daß die zur Verfügung stehenden Werkzeuge durchaus noch unvollkommen sind und auch die theoretischen Grundlagen oftmals nicht ausreichen. Diese Situation wird dadurch weiter verschärft, daß in intensiv genutzten Gebieten die natürlichen Grenzen der Grundwassernutzung erreicht und diese infolge anthropogener und technogener Einflüsse immer enger gezogen werden. Deshalb kann trotz des genannten hohen Entwicklungsstands der Hydrogeologie nach wie vor

und auch künftig nicht auf Labor- und Feldexperimente verzichtet werden. Diese dienen sowohl dem Erkenntnisgewinn bei der weiteren Erforschung grundlegender hydrogeologischer Prozesse als auch der Erprobung neuer Methoden und Verfahren sowohl aus technisch-technologischer als auch geologisch-methodischer Sicht und nicht zuletzt der Eichung von neuen und weiterentwickelten Verfahren der hydrogeologischen Prozeßsimulation und der Gewinnung der dazu erforderlichen Ausgangsparameter. Bei der Entscheidung über die Durchführung von Labor- oder von Feldexperimenten sind insbesondere Aspekte der Übertragbarkeit und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, der Komplexität der zu untersuchenden Prozesse und nicht zuletzt der Zeitspanne und der Aufwendungen für die Experimente zu berücksichtigen.

Laborversuche dienen vorrangig der Untersuchung von Einzelprozessen und sind dementsprechend gut reproduzierbar. Problematisch ist dagegen die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Parameter auf Feldbedingungen. Auch die Komplexität der auf das unterirdische Wasser einwirkenden Faktoren und Prozesse in ihrer teils synergistischen, teils antagonistischen Wirkung läßt sich im Laborversuch praktisch kaum realisieren. Diese Komplexität schränkt andererseits aber die Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit von **Feldexperimenten** weitgehend ein, die darüberhinaus infolge der geringen Geschwindigkeit hydrogeologischer Prozesse relativ große Zeiträume für ihre Realisierung erfordern.

Eine Lösung dieser Widersprüche bietet sich in der Errichtung eines **Labors**, in dem **Feldbedingungen** gegeben sind zur Durchführung hydrogeologischer und technisch-technologischer **Experimente** und zur **Beobachtung** der auf das Grundwasser einwirkenden natürlichen und anthropogenen bzw. technogenen initiierten Faktoren. Eine derartige Einrichtung soll als **Versuchsfeld** bezeichnet werden. Dieses muß zugleich die Aufgaben eines Feldlabors und eines Observatoriums erfüllen. Für die Einrichtung eines derartigen Versuchsfelds kommt eine Fläche innerhalb einer typischen hydrogeologischen Einheit in Frage, die eindeutig definierte