

Dr.habil. Ralf E. Krupp  
Flachsfeld 5  
31303 Burgdorf

---

Telefon: 05136 / 7846 — e-mail: ralf.krupp@cretaceous.de

An: Arbeitsgruppe Optionenvergleich (AGO)

CC: Stimmberechtigte Mitglieder, Begleitgruppe Asse II (A2B)

CC: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

**29.12.2009**

## **Strömungs- und Transportmodell, Langzeitsicherheit Asse II**

Sehr geehrte Kollegen,

Für den Optionenvergleich ist die Langzeitsicherheit ein entscheidendes Kriterium. Für die Option Vollverfüllung, die in jedem Fall eine Flutung und einen Kontakt des Grundwassers mit den Abfällen impliziert, sind daher Betrachtungen zur Ausbreitung der radioaktiven und toxischen Bestandteile in die Biosphäre von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund habe ich ein einfaches vertikales, 2-dimensionales Strömungs- und Transportmodell entlang des Schnittes S2 (markscheiderisches Risswerk) erstellt und teile Ihnen hier die vorläufigen Ergebnisse mit. Ich bin mir bewusst, dass dieses Modell in Details noch verbesserungsfähig ist, jedoch sind die Ergebnisse hinsichtlich der Langzeitsicherheit auch jetzt schon eindeutig. Angesichts des erforderlichen Zeitaufwandes für solche Modellrechnungen werde ich weitergehende Verfeinerungen und Ergänzungen nur im Bedarfsfall vornehmen.

Das Modell:

In meinem Sondervotum vom 26.11.2009 zur AGO-Stellungnahme zu den drei Machbarkeitsstudien (hier als Anhang 1 nochmals beigelegt) habe ich die Randbedingungen für ein hydrogeologisches Strömungs- und Transportmodell bereits erörtert. Zur Herleitung und Begründung der angesetzten Zahlenwerte wird daher auf das Sondervotum verwiesen.

Die Lage des vertikalen zweidimensionalen Modellschnitts entspricht dem Schnitt 2 des markscheiderischen Risswerks der Schachanlage Asse II. Der Modellbereich ist in Abbildung 1 eingetragen. Der im Rechenmodell zugrunde gelegte geologische Aufbau (Abbildung 2) folgt im Wesentlichen diesem Schnitt S2. Die jeweiligen Gebirgsdurchlässigkeiten (kf-Werte) wurden aus COLENCO (2006) übernommen. Für die Gesteins-Porositäten wurden in allen Fällen Werte von 7,5 Prozent angesetzt.

Das Modell wurde mit der Berechnungssoftware ASM6 (Kinzelbach und Rausch, 1995; Chiang, Kinzelbach und Rausch, 1998) durchgeführt.

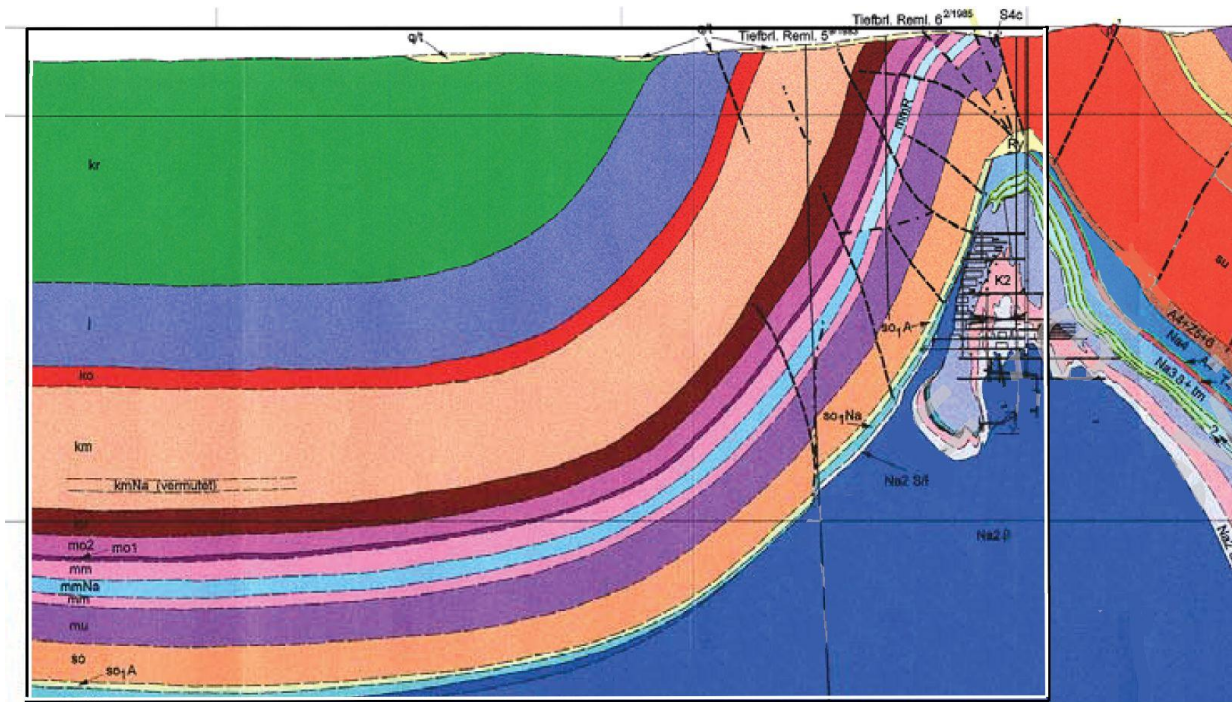


Abbildung 1 – Schnitt S2 des Risswerkes Asse II mit eingetragenem Modell-Bereich.

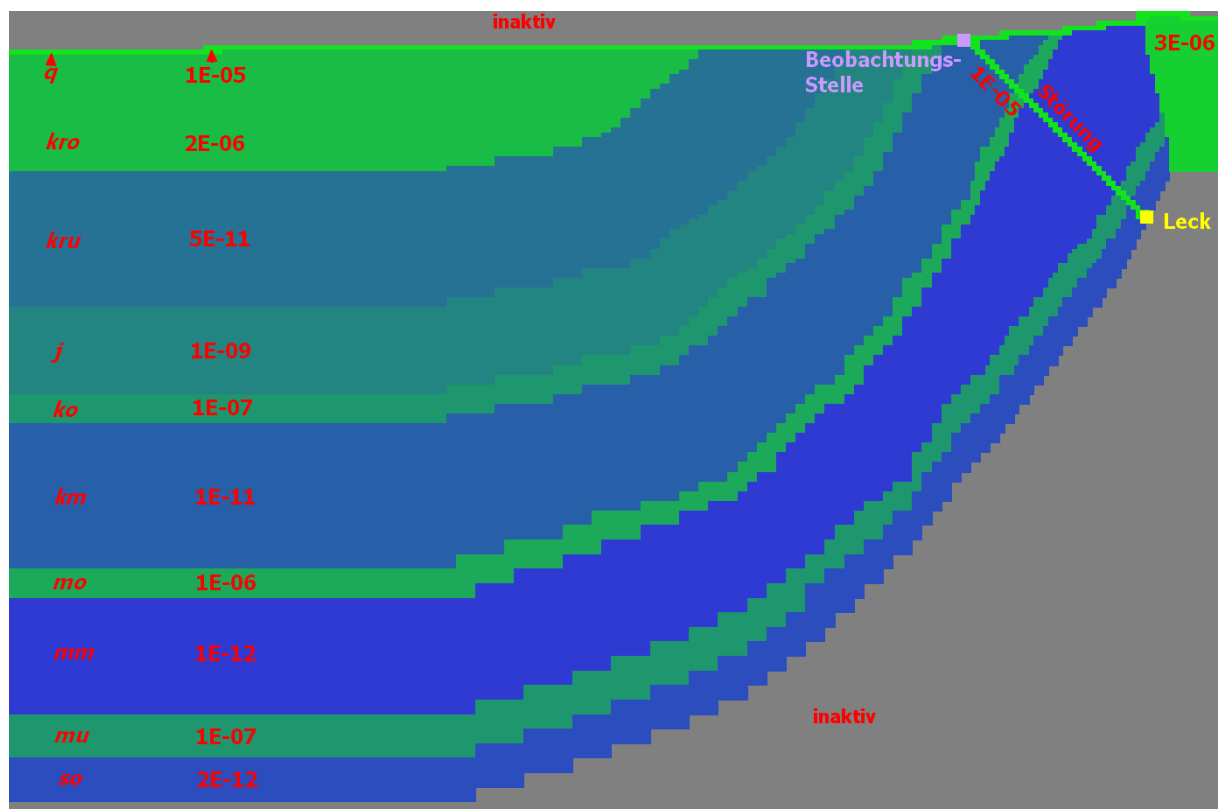


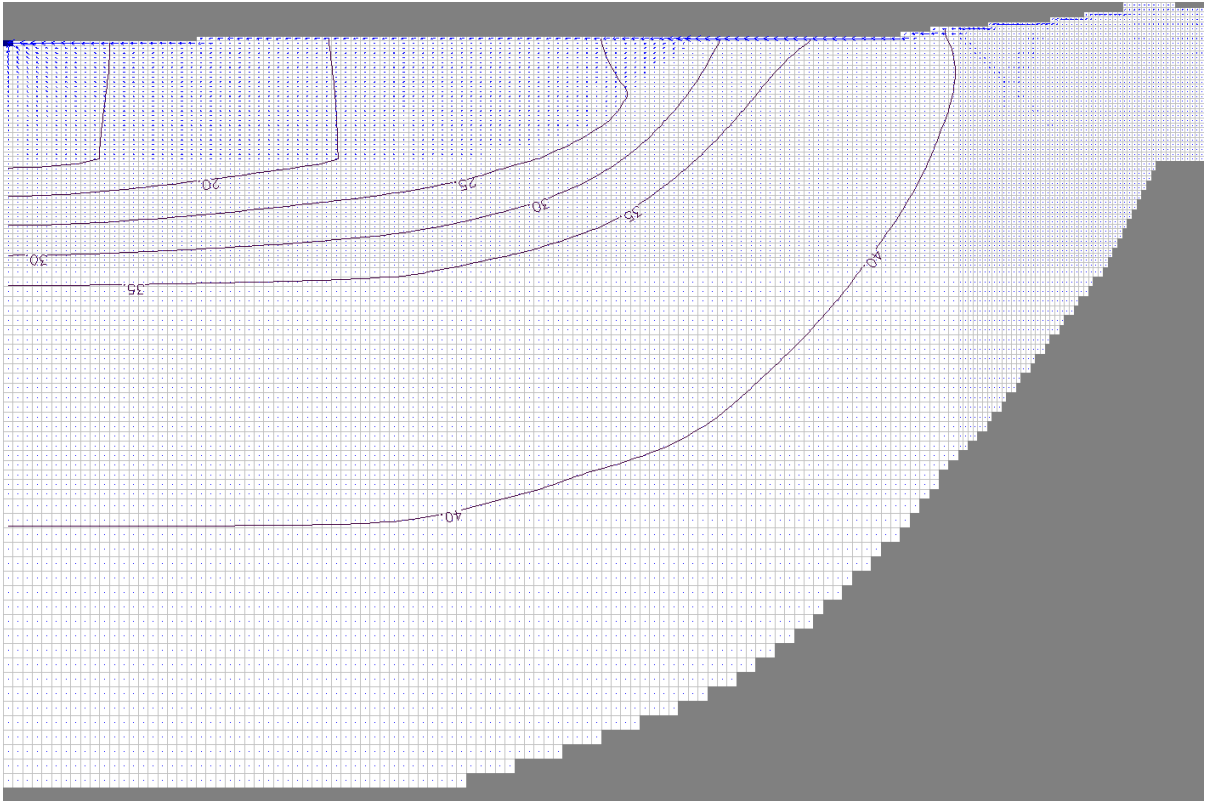
Abbildung 2 – Digitales geologisches Modell mit den jeweiligen  $k_f$ -Werten. Graue Bereiche (Salzstock, Luft) sind inaktive Zellen.

Zur Modellierung wurde ein Finite Differenzen Modell mit 150 Spalten in x-Richtung und 100 Reihen in z-Richtung, somit 15000 Zellen, erstellt, das im Bereich der Störungszone (Asse-Bezeichnung: S3D9) verdichtet wurde (Abbildung 3). Das Modell entspricht einer vertikalen, in y-Richtung 10 m dicken und nach beiden Seiten undurchlässigen Scheibe. Die Modellierung erfolgt für den stationären Fall.

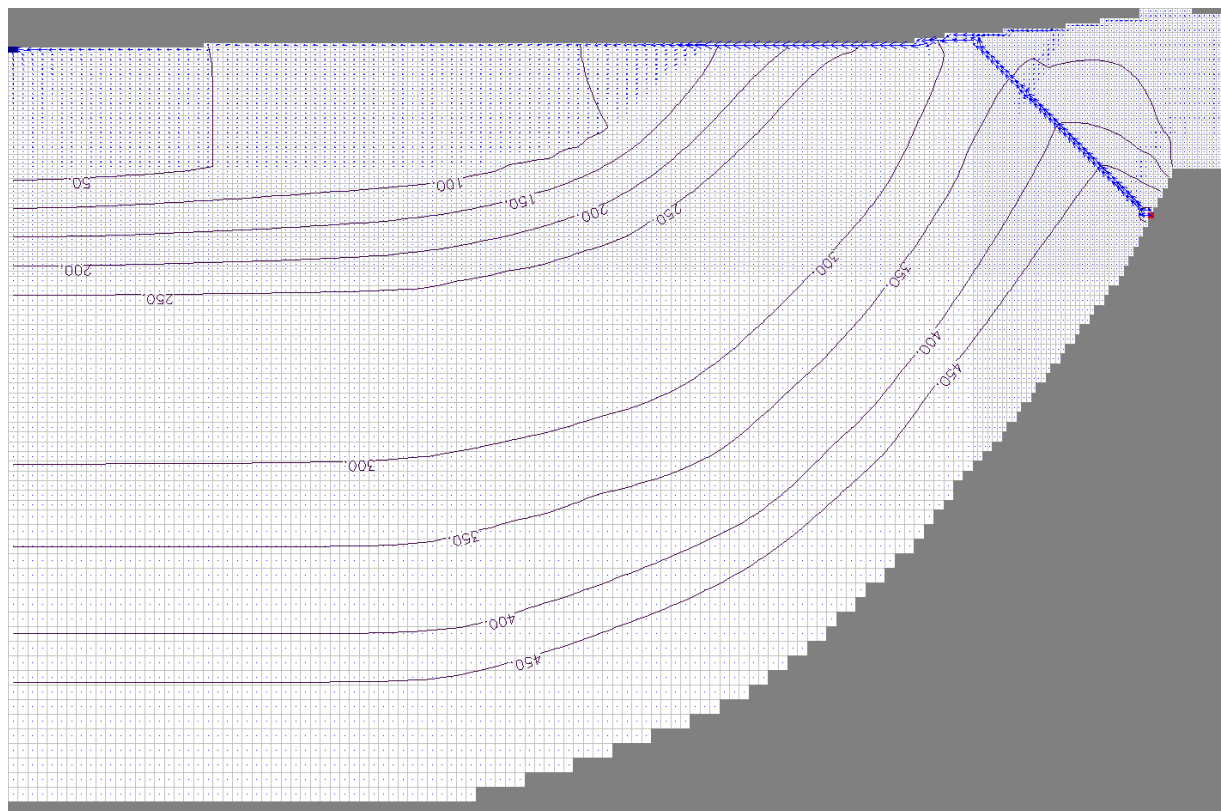
Der Salzstock und die nach links (Süden) sich fortsetzenden Röt-Salze wurden als undurchlässiger Rand modelliert (inaktive Zellen). Der linke Modellrand entspricht einer Randstromlinie (Grundwasser-Konvergenz) unterhalb eines Vorfluters, z.B. Rothenbach; ebenso der rechte (nördliche) Modellrand oberhalb des Salzstockes, der einer Wasserscheide im Bereich des Asse-Höhenzuges entspricht. Der obere Modellrand wurde an die Topographie des Geländes angepasst und wird durch inaktive Zellen begrenzt. Entlang dieses Randes findet Grundwasserneubildung statt (100 mm/a). Die oberste geologische Deckschicht wurde relativ durchlässig modelliert. Die linke (südliche) obere Modellecke wird von einer Festpotentialzelle gebildet, die dem Vorfluter entspricht.

Zwei Rechenfälle wurden betrachtet:

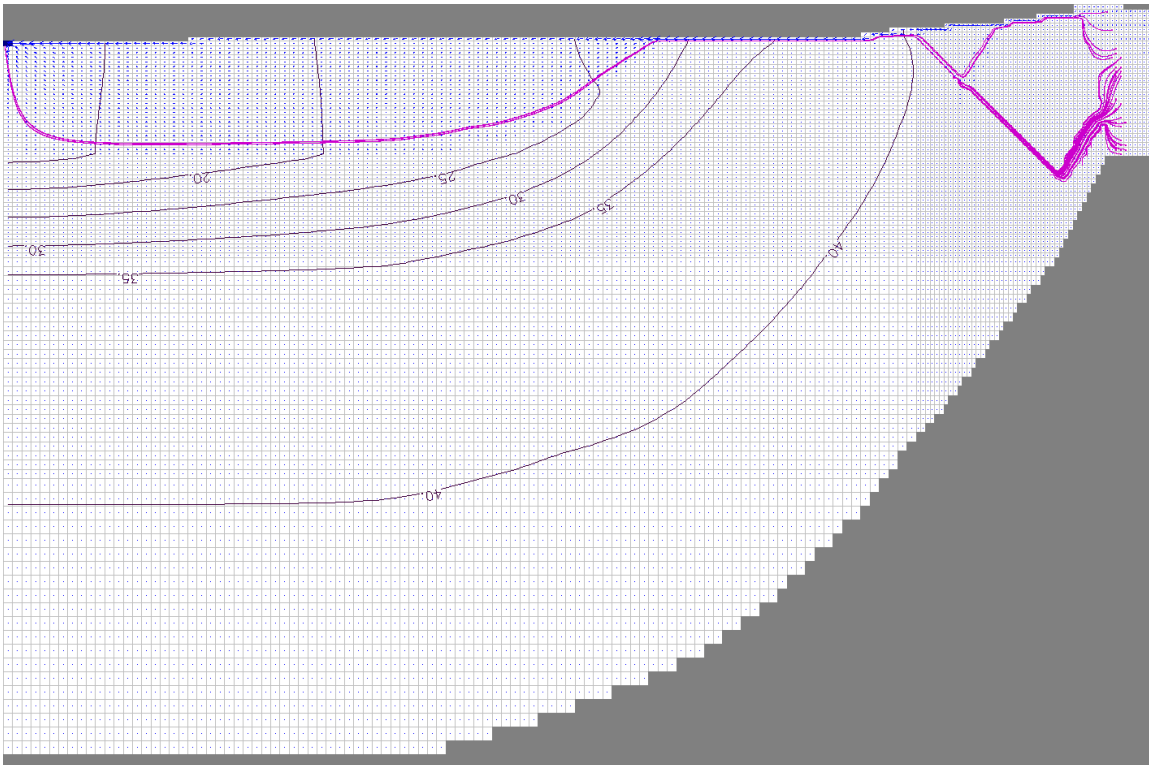
- **Fall A:** Derzeitiger Zustand – Die Zuflüsse beschränken sich auf die Grundwasserneubildung am oberen Modellrand, die Abflüsse auf den Vorfluter (Festpotentialzelle).
- **Fall B:** Phase der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude – Zusätzlich wurde an der derzeitigen Zutrittsstelle des Grundwassers ins Grubengebäude ein Schluckbrunnen mit einer jährlichen Einspeisung (Auspressung aus dem Grubengebäude) von 10 000 m<sup>3</sup>/a modelliert. Für die Transportmodellierung wurde an der Ausbiss-Stelle der Störung (S3D9) an der Erdoberfläche eine Beobachtungszelle implementiert, die den zeitlichen Verlauf der Schadstoff-Konzentration registriert.



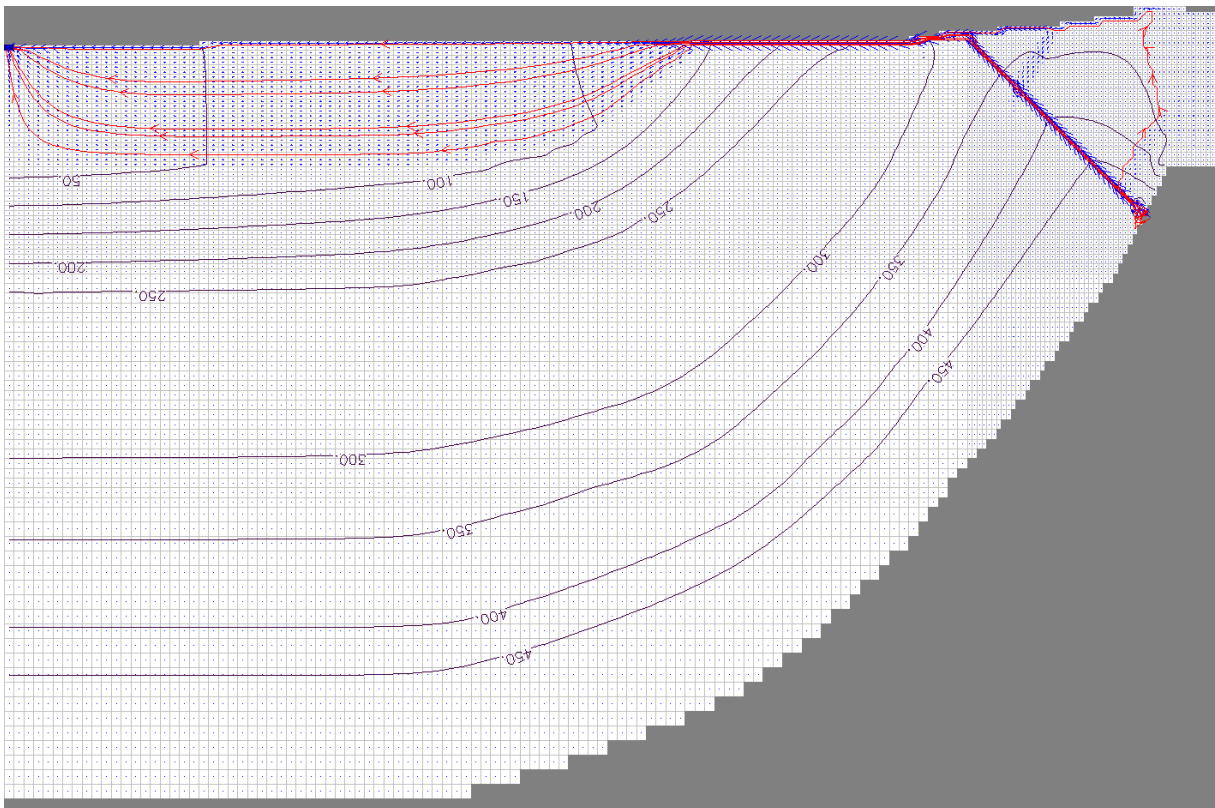
**Abbildung 3** – Finite Differenzen-Netz mit berechneten Piezometerhöhen (**Fall A**). Die berechneten Werte bis über 40 m ergeben sich aus der topographischen Hochlage des Speisungsgebietes Asse. Blau (kaum erkennbar): Strömungsvektoren.



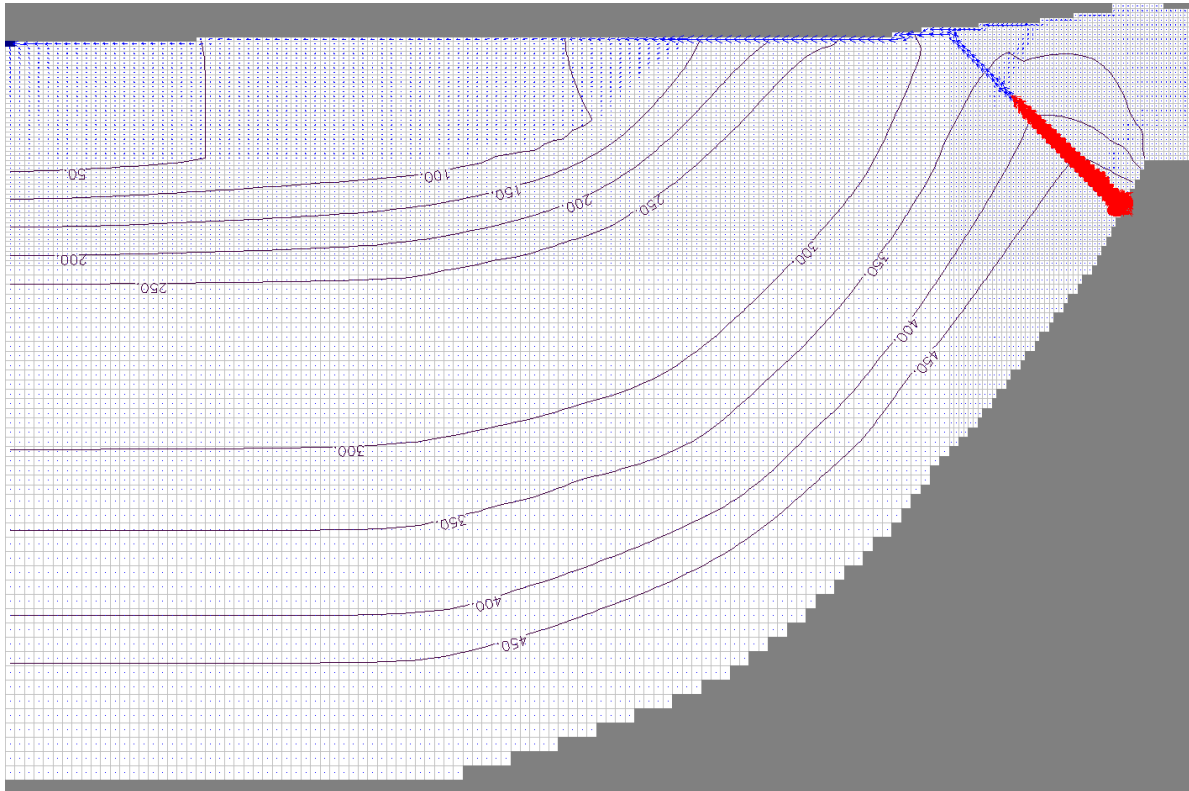
**Abbildung 4** – Finite Differenzen-Netz mit berechneten Piezometerhöhen (**Fall B**). Der Druckaufbau mit berechneten Werten bis 505 m ist eine Folge der Auspressung von Lösung (Schluckbrunnen) mit definierter Rate bei geringen Gebirgsdurchlässigkeiten. Blau Strömungsvektoren. Rot: „Brunnenzelle“.



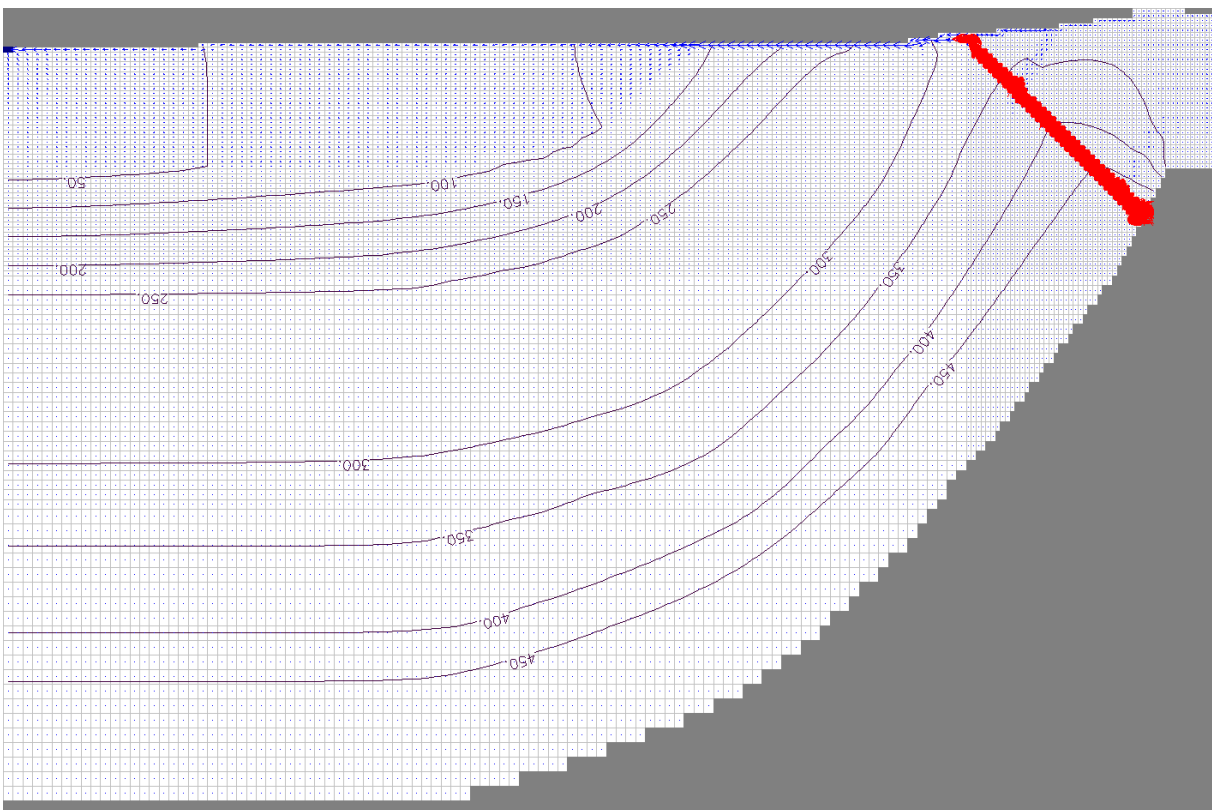
**Abbildung 5** – Wie Abbildung 3 (**Fall A**). In violett sind einige Bahnlinien dargestellt, die im rechten Modellbereich (Einsturzgebirge) starten und im Vorfluter (links) enden. Man erkennt die konzentrierende Wirkung von Zonen und Schichten mit erhöhten Durchlässigkeiten.



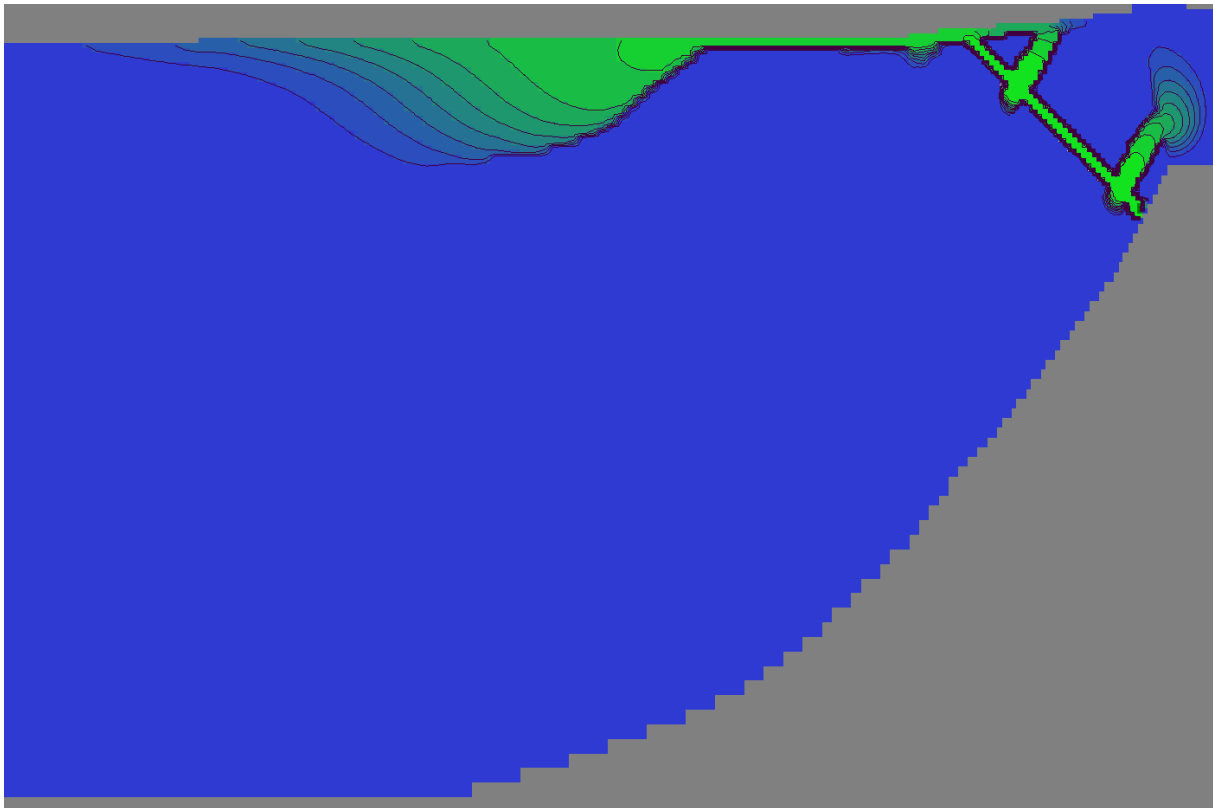
**Abbildung 6** – Wie Abbildung 4 (**Fall B**). In rot sind einige Bahnlinien dargestellt, die an der Leckstelle beginnen und im Vorfluter (links) enden. Interessant ist der Seitenpfad über das Einsturzgebirge, neben dem Hauptpfad über die Störung.



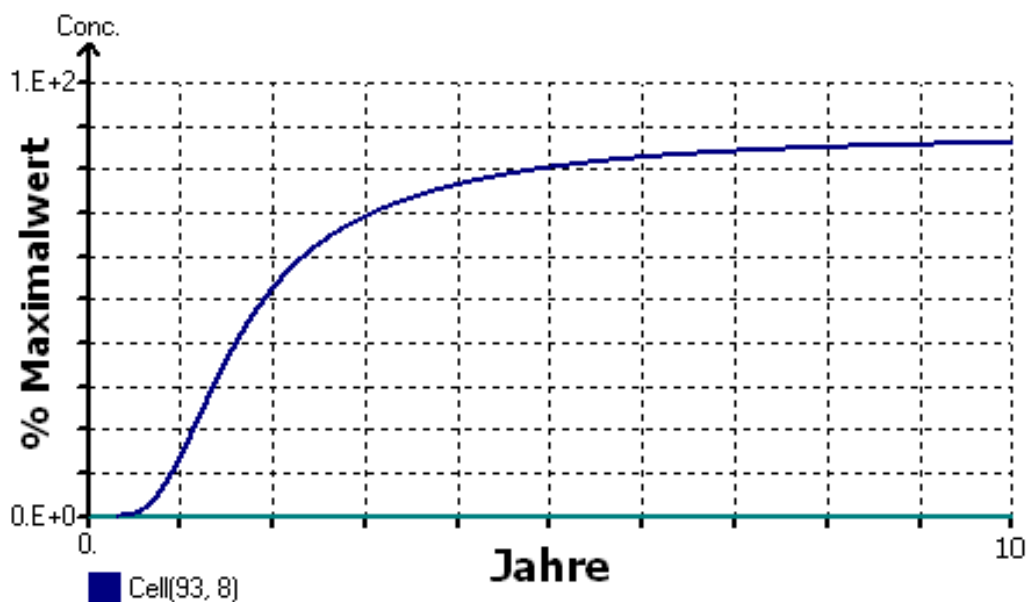
**Abbildung 7** – Wie Abbildung 6 (**Fall B**). 100-Tage-Isochrone (Einhüllende der roten Bahnlinien)



**Abbildung 8** – Wie Abbildung 6 (**Fall B**). 200-Tage-Isochrone (Einhüllende der roten Bahnlinien). Die ausgepresste Lösung erreicht die Erdoberfläche.



**Abbildung 9 – (Fall B).** Schadstoff-Verteilung nach 10 Jahren, in 10-er Prozentschritten der Ausgangskonzentration (an der Leckstelle). Man beachte die beiden von der Störung abzweigenden Seitenäste entlang relativ durchlässiger Schichten, sowie die Ausbreitung entlang oberflächennaher Schichten und in der Oberkreide-Mulde, mit jeweils ebenfalls relativ durchlässigen Gesteinen.



**Abbildung 10 – (Fall B).** Verlauf der Schadstoffkonzentration in der Beobachtungszelle (Vgl. Abbildung 2), ausgedrückt als Prozentanteil der Maximalkonzentration an der Leckstelle.

Diskussion:

Die Geometrie des 2-dimensionalen Modells bildet im Prinzip die Schnittspur der Modellebene mit der streichenden Störung (S3D9) nach, die im Modell eine Breite (in y-Richtung) von 10 m hat und in der Modellebene (x-z) durch zickzackartig aneinander grenzende 10 mal 10 Meter große Zellen dargestellt ist. Insofern wird die Strömung entlang eines linear ausgedehnten Korridors mit erhöhten kf-Werten modelliert und die laterale Ausbreitung der Grundwasserströmung (in y-Richtung) verhindert. Diese Situation würde in der Natur einer Kreuzungslinie von zwei Störungen entsprechen, beispielsweise der streichenden Störung S3D9 mit einer der zahlreichen Querstörungen. Insofern ist die Modellgeometrie berechtigt.

Der Rechenfall A ergibt eine plausible Druckverteilung im Untergrund, die im Wesentlichen von topographischen Höhenunterschieden der jeweiligen Speisungsgebiete geprägt ist.

Im Rechenfall B wird, bei ansonsten identischen Bedingungen, mit konstanter Rate ein Volumen von 10.000 m<sup>3</sup>/a Lösung in das Nebengebirge gepresst. Aufgrund der generell niedrigen Gebirgsdurchlässigkeiten baut sich von der Leckstelle aus ein hoher hydrostatischer Überdruck auf. Die Wasserbilanz des Systems bleibt dabei ausgeglichen, das heißt, die über die Festpotentialzelle (Vorfluter) abfließende Wassermenge ist gleich der Grundwasserneubildung plus der Injektionsrate an der Leckstelle (Schluckbrunnen). Bei den hohen Überdrücken und den niedrigen Gebirgsdurchlässigkeiten spielen Dichteunterschiede verschieden hoch mineralisierter Wässer keine Rolle. Die hohen Überdrücke würden in der Natur durch hydraulische Rissbildung dazu führen, dass ggf. neue Wegsamkeiten aufreißen oder bestehende aufgeweitet werden.

Im Gegensatz zum Modell würden in der Natur die hohen, weit über den Ortshöhen liegenden Piezometerhöhen (Fall B) abgebaut, indem es an der Oberfläche zu kontaminierten Salzwasser-Austritten kommt, und zwar primär entlang des Störungsausbisses (S3D9), aber auch entlang der Ausbisse von durchlässigen Schichten, die von der Störung geschnitten werden (Unterer Muschelkalk, Einsturzgebirge).

In den Abbildungen 7 und 8 sind für den Fall B die für 100 bzw. 200 Tage berechneten Isochronen dargestellt, die entlang der Störung stark in die Länge verzerrt sind. Man erkennt jedoch, dass nach ca. 200 Tagen das erste aus der SchachanlageASSE II ausgepresste Salzwasser die Oberfläche erreicht. Die Zeit läuft etwa ab dem Moment, an dem an der Leckstelle (Südflanke der SchachanlageASSE II) die Strömungsrichtung sich umkehrt, von Zuflüssen zu Abflüssen, wobei die maximale Auspress-Rate (hier im stationären Modell 10 000 m<sup>3</sup>/a) nicht instantan erreicht werden wird.

Neben diesen Strömungs-Berechnungen wurden auch Transport-Berechnungen durchgeführt, mit dem Modul ASMPATH. Die Abbildung 9 zeigt die räumliche Verteilung der Schadstoffe nach 10 Jahren. Man erkennt, dass neben dem Hauptausbreitungspfad entlang der Störung auch die von der Störung angeschnittenen, höher durchlässigen Gesteine (Oberer und Unterer Muschelkalk, Einsturzgebirge) kontaminiert werden. Wo die Störung ausbeißt, würden in der Natur die durchlässigen Decksedimente vermutlich durchdrungen und es würde zu Quellaustritten kommen. Die Schadstoff-Konzentrationen sind relativ zur Maximal-Konzentration an der Leckstelle (also in Prozentwerten) angegeben. Dadurch ist das Modell unabhängig von den Absolut-Konzentrationen der Schadstoffe.

Der zeitliche Verlauf der Schadstoff-Konzentrationen wurde durch eine registrierende Zelle im Abstrombereich des Störungsaustritts ermittelt (Abbildung 10). Man erkennt, dass nach



etwa 5 Jahren ein Plateau beginnt, bei dem die Schadstoff-Konzentrationen bereits ca. 80 Prozent des Maximalwertes betragen. Bei den Transport-Berechnungen wurden keine Retardierung und kein Schadstoff-Abbau, z.B. durch radioaktiven Zerfall, berücksichtigt.

Fazit:

Diese vorläufigen Berechnungen zeigen, dass bei der „Option Vollverfüllung“ der Schachanlage Asse II bereits nach wenigen Jahrzehnten mit Kontaminationen im Bereich der Biosphäre gerechnet werden müsste. Sobald infolge Gasbildung und Konvergenz radioaktive Lösungen ins Nebengebirge ausgepresst würden, würden diese innerhalb eines oder weniger Jahre auch in hoher Konzentration die Oberfläche erreichen. – Von einer Vollverfüllung der Schachanlage Asse II muss daher dringend abgeraten werden.

Quellenangaben:

Chiang, Kinzelbach und Rausch (1998) <http://www.ihw.ethz.ch/soft/asm12.pdf>

COLENCO (2006) Hydrogeologische Modellvorstellungen. Bericht 4956/07 Revision 3. GSF, Forschungsbergwerk Asse, (Tabelle 18).

Kinzelbach und Rausch (1995) Grundwassermodellierung. 283p. Borntraeger, Stuttgart

Mit freundlichen Grüßen,



Ralf Krupp

Arbeitsgruppe Optionenvergleich (AGO)

**26.11.2009**

**Sondervotum  
zur Langzeitsicherheit der Stilllegungsoption „Vollverfüllung“**

Auf der gestrigen Sitzung der Arbeitsgruppe Optionenvergleich (AGO) wurde unter großem Zeitdruck die Stellungnahme zu den drei Machbarkeitsstudien zur Stilllegung der Schachanlage Asse II verabschiedet. Die Diskussion der Langzeitsicherheit konnte daher nicht in ausreichender Tiefe geführt werden.

Aus Sicht des Verfassers ist der Aspekt der Langzeitsicherheit ein unabdingbares Entscheidungskriterium im Optionenvergleich und bedarf daher einer weitergehenden Betrachtung, auch wenn aus Zeitgründen umfassende Sicherheitsstudien vor dem anstehenden Optionenvergleich nicht mehr möglich sind. Leider sind in den Machbarkeitsstudien entweder keine Aussagen zur Langzeitsicherheit enthalten, oder es gibt, wie im Fall der Vollverfüllungsstudie, sogar quantitative Aussagen, die jedoch einer seriösen Grundlage entbehren. Diese quantitativen Aussagen sollten daher nicht berücksichtigt werden!

Bei der Option Vollverfüllung wären aus Sicht des Verfassers mindestens zwei kritische Szenarien zur Kontamination der Biosphäre zu betrachten, die sich in ihrer Wirkung zeitlich überlappen und partiell summieren:

**Szenario 1 (Gasantrieb)**

Mit einsetzender Flutung werden die radioaktiven und toxischen Abfälle einem wässrigen Reaktionsmedium ausgesetzt, wodurch sich nach Aufzehrung des verbliebenen Luftsauerstoffs rasch anoxische Bedingungen einstellen. Die Korrosion der eingelagerten Metalle und der mikrobielle Abbau der organischen Substanzen werden zur Bildung größerer Gasmengen, zur Entstehung einer Gasphase und zum Aufbau eines Gasdrucks führen. Sobald der Gasdruck im Grubengebäude den hydrostatischen Druck des Deckgebirgs-Grundwassers in der Tiefe der Zutrittsstelle an der Südflanke übersteigt, wird kontaminiertes Grubenwasser und Gas ins Nebengebirge ausgepresst. Beim Aufstieg dieser unter Druck gasgesättigten Lösungen kommt es mit abnehmendem hydrostatischen Grundwasserdruck zur Bildung von

Gasblasen, so dass ein zweiphasiges, flüssig – gasförmiges Fluid mit abnehmender Gesamtdichte und zunehmendem Auftrieb entsteht. Es ist sowohl eine stationäre (konstante Austrittsrate) wie auch eine eskalierende (eruptives Entweichen des Grubengases bei abgemindertem hydrostatischem Grundwasserdruck) Ausbreitung zur Biosphäre denkbar. Als möglicher Aufstiegs Pfad wird z.B. die Störungszone S3/D9 (Schnitt 2 im Risswerk) angesehen.

#### Gasbildung:

Aus den ca. 19 000 Tonnen Eisenmetalle/Stahl ( $340E+06$  mol Fe) entstehen nach der Reaktion



Insgesamt ca.  $340E+06$  mol Wasserstoff.

Wenn man annimmt, dass der Stahl in der Asse überwiegend in Form von 1mm-Blech vorliegt, welches unter anaeroben Bedingungen beidseitig mit ca.  $10 \mu\text{m/a}$  korrodiert, bildet sich diese Gasmenge über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren ( $1000 \mu\text{m} / 20 \mu\text{m/a} = 50 \text{ a}$ ).

Aus den ca. 5000 Tonnen organischen Stoffen (Cellulose  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ ; ca. 2222 Tonnen C; ca.  $185E+06$  mol C) entstehen ca.  $185E+06$  mol Methan. In Analogie zu Hausmüll-Deponien, wo die methanogene Phase einige Jahrzehnte dauert, kann abgeschätzt werden, dass sich das Methan in der Asse ebenfalls über einen Zeitraum von ca. 50 Jahren bildet.

Sonstige Gase können für die Abschätzung des Gasvolumens vernachlässigt werden. In Summe wird mit der Bildung von rund  $525E+06$  Mol Gas über 50 Jahre gerechnet. Bei  $25^\circ\text{C}$  und 50 bar Druck (etwa der hydrostatische Druck des Grundwassers über dem Leck) nimmt diese Gasmenge ein Volumen von rund  $260\,000 \text{ m}^3$  ein und füllt somit einen erheblichen Anteil des Resthohlraumes aus. Die Löslichkeit von Wasserstoff und Methan in wässrigen Lösungen kann bei der Gasvolumen-Abschätzung vernachlässigt werden.

#### Stationäre Freisetzung:

Dividiert man die  $260\,000 \text{ m}^3$  entstehende Gasphase ( $25^\circ\text{C}$ ; 50 bar) durch den Zeitraum von 50 Jahren, so ergibt sich eine zeitlich gemittelte, stationäre Leckage-Rate für kontaminierte Grubenlösungen von  $5200 \text{ m}^3/\text{a}$ . Die Bildung von Gas ist also in den ersten fünfzig Jahren nach Flutung ein wichtiger Antriebsmechanismus zur Auspressung von kontaminierten Lösungen ins Deckgebirge und in die Biosphäre. Hinzugerechnet werden muss die konvergenzbedingte Auspressungs-Rate. Außerdem muss auch mit dem direkten Entweichen von radioaktiver Gasphase gerechnet werden.

#### Eruptive Freisetzung:

Nach Verlassen des Grubengebäudes geraten die kontaminierten und gasgesättigten Grubenwässer in Bereiche mit geringerem hydrostatischem Grundwasserdruck. Dies führt zur Entmischung gelöster Gase und zur Bildung eines 2-Phasen-Fluids mit geringer Dichte. Bis zur Erreichung der Erdoberfläche dehnt sich das Volumen des 2-Phasengemisches aus; seine Gesamtdichte fällt ab. Dieses 2-Phasen-Fluid verdrängt entlang des Aufstiegs Pfades das Grundwasser, so dass lokal geringere hydrostatische Drücke herrschen. Dies führen wieder zur weiteren Entmischung gelöster Gase, zur Zunahme des Gasvolumens und zur Abnahme der Gesamtdichte des Fluids, wodurch der hydrostatische Druck weiter abfällt, usw. Solche Prozesse sind aus Geothermalgebieten oder von gasreichen Quellen bekannt. Auf diesem Wege könnten innerhalb kurzer Zeit (Tage) erhebliche Gasmengen in die Biosphäre

freigesetzt werden. Gleichzeitig würden nicht quantifizierbare Mengen kontaminierter Lösungen mitgerissen.

### **Szenario 2 (Konvergenz-Antrieb)**

Mit auflaufender Konvergenz gerät das kontaminierte Grubenwasser unter Druck und wird an der früheren Zutrittsstelle ins Nebengebirge ausgepresst. Die Auspressraten entsprechen der Volumenkonvergenz. Der Austrittspfad der Lösungen ist eine streichende Störung, die eine Wegsamkeit zur Oberfläche bildet. Diese Störungszone hat hohe kf-Werte, so dass nur eine geringe Durchmischung der kontaminierten Lösungen mit dem Grundwasser erfolgt.

#### Modellierungs-Ansatz (nur Konvergenz)

Numerisches zweidimensionales vertikales Strömungs- und Ausbreitungsmodell, z.B. entsprechend dem markscheiderischen Schnitt 2, mit folgenden Randbedingungen: Unterer Modellrand und Salzkontakt undurchlässig; linker und rechter Modellrand als Wasserscheide (Randstromlinie); oberer Modellrand als aktive Zellen mit Grundwasserneubildung. Zutrittsstelle am Salzkontakt wird zur Brunnenzelle mit Zuflussrate entsprechend Konvergenzrate. Abbildung des Nebengebirges und der streichenden Störung durch realistische kf-Werte.

#### **Fazit:**

Im Falle einer Weiterverfolgung des Konzeptes „Vollverfüllung“ müssen als unverzichtbare Entscheidungsgrundlage Abschätzungen zu den radiologischen Konsequenzen der oben skizzierten Prozesse vorgelegt werden.



Burgdorf, 26.11.2009

Dr. Ralf Krupp