



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Gutachten zur Beurteilung der Auswirkungen der Gasentwicklung im Tiefenlager

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Etappe 1, Sachplan geologische Tiefenlager

Emch+Berger AG

Dezember 2009

**Sachplan Geologische Tiefenlager SGT,
Etappe 1**

**Gutachten zur Beurteilung der
Auswirkungen der Gasentwicklung
im Tiefenlager**

Version 3.1 Dezember 2009

**Expertenbericht
zuhanden
des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI**

Impressum

Auftragsnummer BE.N.08069.2
Datum Dezember 2009
Version 3.1
Autor(en) Dr. Georg Klubertanz
Freigabe M. Feller
Verteiler
Datei D:\ENSI\Review SGT1-Gas_v3_1.doc
Seitenanzahl 39
Copyright © Emch+Berger AG Bern

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung	1
1.2	Vorgaben	1
1.3	Vorgehen	1
2	Grundlagen	2
3	Relevante Berichte und deren Beziehungen	3
4	NTB 08-05	3
4.1	Ansatz	3
4.2	Beurteilung	4
4.2.1	HAA-Lager	4
4.2.2	SMA-Lager	4
4.3	Bewertungsskala	5
5	NTB 08-03	6
5.1	Ansatz	6
5.2	Beurteilung	6
5.2.1	SMA-Lager	7
5.2.2	HAA-Lager	7
5.3	Zusammenfassende Bemerkungen zu 08-03	8
6	NTB 08-07	8
6.1	Ansatz	8
6.2	Exkurs: Anforderungen	9
6.3	Beurteilung	10
6.3.1	Überlegungen zum Gastransport	10
6.3.2	Hydromodell (RM)	13
6.3.3	2D Gasmodell (HR)	14
6.3.4	3D Gasmodell ohne Gastransport im Gestein (EBS)	15
6.3.5	3D Gasmodell mit Gastransport im Gestein (CM)	16
6.4	Erfüllung der Berichtsziele	17
7	Einbezug im Standortauswahlverfahren	18
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	20
8.1	Einordnung und Bewertung	20
8.2	Generische Sicherheitsbetrachtungen und Sicherheitsnachweis	20

8.3	Ergebnis der sicherheitstechnischen Überprüfung	21
8.4	Bewertung im Hinblick auf die Standortfindung	22
A	Übersicht Materialparameter (nach NTB 08-07)	24
B	Zusammenfassung der Fragen an die Nagra	25
C	Diskussion Gastransportmechanismen	34

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich mit den Überlegungen und Schlussfolgerungen der Nagra zur Frage des Gastransportes und des Gasdruckaufbaus in einem Tiefenlager im Rahmen der Berichterstattung zu Etappe 1 des Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager (SGT). Dabei werden die verschiedenen relevanten Dokumente zu Händen des ENSI formal und inhaltlich begutachtet und es wird auf eventuelle Lücken oder noch unklare Sachverhalte aufmerksam gemacht.

Insbesondere werden die relevanten Stellen der von der Nagra im Rahmen der Arbeiten zum Sachplan, Etappe 1, verfassten Berichte NTB 08-03 „Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse“ [1], NTB 08-05, „Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie“ [2] und NTB 08-07 „Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland“ [3] betrachtet.

1.2 Vorgaben

NTB 08-07 [3] betrachtet die Gasfreisetzung und -transport für ein SMA-Lager im Opalinuston. Er ist damit die de facto Grundlage für die Behandlung eines Aspekts von Kriterium 2.3 „Lagerbedingte Einflüsse“ des Sachplans [4] und unterliegt damit den in [4] formulierten Anforderungen an die generische Sicherheitsbetrachtung für Etappe 1 des Auswahlverfahrens. Diese schliessen u.a. ein:

„Die generische Sicherheitsbetrachtung ist eine orientierende quantitative Analyse des Einschluss- und Rückhaltevermögens des Gesamtsystems oder einzelner Teile davon.“

Sie muss es der Behörde erlauben

„aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zu(zu)stimmen“

Damit dient insbesondere [3] dem prinzipiellen quantitativen Nachweis, dass ein potentiell sicherheitsrelevanter Prozess im Lager unter generischen Bedingungen beherrscht werden kann.

1.3 Vorgehen

Für die vorliegende Review wurde ein mehrstufiges Vorgehen gewählt:

- zunächst wird eine formale und inhaltliche Prüfung der Texte vorgenommen
- dann werden spezifische, als relevant identifizierte Sachgebiete diskutiert
- weiter wird die Berücksichtigung der Berichtsergebnisse im Standortauswahlverfahren des Sachplans beurteilt

Es existieren keine normativen Vorgaben für Aufbau und Inhalt der zu prüfenden Berichte oder für die Begutachtung. Allerdings sollten zu prüfende Berichte aus Sicht der Gutachter mindestens folgenden Minimalanforderungen genügen:

-
- Formal korrekt
 - Sachlich richtig und dem Stand der Technik entsprechend
 - Vollständig und nachvollziehbar
 - Keine unbelegten Behauptungen
 - Klare Trennung zwischen gesicherten Erkenntnissen und Hypothesen

Insbesondere wird beurteilt, ob das Vorgehen und die Dokumentation folgenden Ansprüchen genügen:

- Stufengerecht
- Plausibel

„Stufengerecht“ bedeutet hierbei, dass eine der Etappe 1 SGT angemessenen Bearbeitungstiefe erreicht wurde: es muss gewährleistet sein, dass die dargelegten Überlegungen stichhaltig, konsequent und nachvollziehbar sind, dass alle wesentlichen verfügbaren Datenquellen herangezogen wurden.

Notwendigerweise verbleibt bei stufengerechter Bearbeitung innerhalb der Etappe 1 SGT eine gewisse Unsicherheit in den Aussagen: Diese Unsicherheit ist angesichts der Zielsetzung der Etappe 1 tolerierbar, es ist lediglich zu gewährleisten, dass potentielle Wirtgesteine nicht unbegründet zu früh ausgeschlossen werden oder offensichtlich ungeeignete im Auswahlverfahren verbleiben. Dies bedeutet aber auch, dass noch berücksichtigte regionale Einheiten sich anhand der vertieften Betrachtungen in späteren Phasen des SGT-Verfahrens noch als weniger günstig als angenommen erweisen können.

„Plausibel“ bedeutet, dass die gewonnenen Ergebnisse im Licht bisheriger Erkenntnisse sinnvoll und glaubhaft sind: allein schon aufgrund des noch unvollständigen Kenntnisstandes bezüglich der möglichen konkreten Standorte können exakte Ergebnisse und Vorhersagen nicht erwartet werden und wären auch nicht stufengerecht. Es ist aber zu fordern, dass die gemachten Aussagen in sich und im Bezug auf den Stand der Technik stimmig sind.

2 Grundlagen

Folgende Dokumente standen zur Verfügung:

- [1] Nagra NTB 08-03, Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager
- [2] Nagra NTB 08-05 Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie - Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit
- [3] Nagra NTB 08-07 Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland
- [4] Bundesamt für Energie BFE, 2008, Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil
- [5] Nagra NTB 02-05, Project Opalinus Clay: Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis).
- [6] Nagra NTB 02-03, Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.

-
- [7] Nagra NTB 04-06, Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus Clay.
 - [8] Nagra NAB 07-31, SGT-OPA/SMA: Hydrodynamische Modellierung der Lageraufsättigung, U. Kuhlmann, P. Marschall
 - [9] Nagra NIB 06-13, orientierende Modellrechnungen zum Gasdruck-Aufbau in den Lagerkavernen eines SMA-Lagers im Opalinuston, J. Poppei, J. Croisé
 - [10] Nagra NAB 08-40, Gas-L/ILW: Gas pressure buildup and transport in a deep geologic L/ILW repository on opalinus clay, R. Senger, J. Ewing
 - [11] Nagra NTB 09-06, The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland
 - [12] Nagra NAB 09-29, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen 2010

3 Relevante Berichte und deren Beziehungen

Die in Kapitel 2 genannten Nagra-Berichte beziehen sich aufeinander und stellen untereinander Grundlagen bereit, so dass sie nicht unabhängig gelesen und beurteilt werden können. Bezüglich der Gasfrage ergeben sich die nachfolgend dargestellten Zusammenhänge:

[1] stellt Vorgehen und Ergebnisse des Auswahlverfahrens dar.

[2] ergänzt und erläutert das Vorgehen nach [1]

[3] Liefert die Argumentation zur Behandlung der Gasfrage für SMA in [1]

[8][9][10] dokumentieren Einzelaspekte aus [3]

[5][6][7] behandeln die Gasfrage für HAA in [1]

4 NTB 08-05

4.1 Ansatz

Das Vorgehen bezüglich des Einflusses der Gasbildung wird in Kapitel 4.6.4 von [2] erläutert: die Nagra postuliert, dass, falls es gelingt, die Unbedenklichkeit der Gasproduktion für das dichteste untersuchte Wirtgestein, den Opalinuston, zu zeigen, daraus geschlossen werden kann, dass die Gasproduktion bei allen anderen, höher durchlässigen Gesteinen ebenfalls kein Problem darstellt.

Implizit wird dabei vorausgesetzt, dass es keine signifikanten wirtgesteinspezifischen Einflüsse auf die Gasproduktionsrate, z.B. durch eine gesteinspezifische Geochemie oder erhöhte Wasserzufuhr, gibt. Sind solche möglichen, signifikanten gesteinspezifischen Einflüsse sicher auszuschliessen bzw. bei der Berechnung der Gasproduktion für alle untersuchten Gesteine konservativ berücksichtigt, so ist dieses Vorgehen als stufengerecht zu werten. Dass solche Einflüsse tatsächlich vernachlässigbar sein dürften, geht aus der Antwort der Nagra zu Frage 1 (s. Anhang B) hervor.

4.2 Beurteilung

4.2.1 HAA-Lager

Für das HAA-Lager wird angegeben, der Nachweis der Unbedenklichkeit der Gasproduktion sei im Rahmen des Entsorgungsnachweises ([5][6][7]) erbracht worden. Im Gutachten zum Entsorgungsnachweis hat die HSK allerdings einige Fragen formuliert, die noch einer abschliessenden Klärung bedürfen.

Die für den Entsorgungsnachweis dargelegten Überlegungen der Nagra zur Beherrschbarkeit der produzierten Gasmengen im HAA-Lager können als Grundlage für die Etappe 1 des Sachplansverfahrens, die ja noch keine Sicherheitsanalyse fordert, stufengerecht herangezogen werden. Die Gasfrage im HAA-Lager bedarf aber bei der Realisierung eines Tiefenlagers einer vertieften Behandlung, die den Forderungen der HSK zum Entsorgungsnachweis gerecht wird.

4.2.2 SMA-Lager

Für das SMA-Lager verweist die Nagra neben den Studien zum Wellenberg auf den Bericht NTB 08-07 ([3]), der die Auswirkungen der Gasbildung in einem hypothetischen SMA-Lager im Opalinuston untersucht. Auf diesen Bericht wird unten im Detail eingegangen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Bericht [3] zeigt, dass zur Beherrschung der Gasbildung bauliche Massnahmen notwendig sein könnten, die in dieser Form in der Dokumentation der Nagra neu sind und noch nicht im Rahmen einer detaillierten Sicherheitsanalyse untersucht wurden. Konkret sieht das Konzept vor, einen Teil des Gases durch das verfüllte Tunnelsystem (EGTS - engineered gas transport system) abzuleiten, wobei die Eigenschaften der Verfüllung so gewählt werden sollen, dass der Gasdruck im Lager unter einem vorgegebenen Wert bleibt.

Die Nagra führt in [3] (Zusammenfassung, Seite III und IV) aus, dass das EGTS bezweckt, die Gastransportkapazität der verfüllten Untertagebauwerke zu erhöhen, ohne die Radionuklid-Rückhaltefunktion der technischen Barrieren zu beeinträchtigen. Mit Hilfe von numerischen Modellierungen legt die Nagra in [3] dar, dass für die erwarteten Gasproduktionsraten die gewählte Lagerauslegung und für eine typische Gasdurchlässigkeit des Wirtgesteins der Gasüberdruck in den Kavernen unterhalb des Schwellendrucks für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung bleiben (gem. Nagra ca. 6.5 MPa für die angenommenen Standortbedingungen) dürfte. Für solche Bedingungen müssten keine zusätzlichen technischen Massnahmen zur Gasabführung getroffen werden.

Die Berechnungen der Nagra zeigen, dass unter der Annahme konservativer Gasproduktionsraten oder wenn die Gasdurchlässigkeit des Gebirges sehr gering ist ($k_{OPA} \leq 10^{-21} \text{ m}^2$), der Gasdruck über den Schwellendruck für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung ansteigen könnte. Dann wäre die Verwendung geeigneter Verfüll- und Versiegelungsmaterialien zur Gewährleistung der Freisetzung der Gase auch über den Zugangsstollen eine geeignete Massnahme, um den Gasdruck zu begrenzen.

Das Vorgehen der Nagra ist für Etappe 1 als insgesamt stufengerecht zu bezeichnen. Die vorgelegten Überlegungen der Nagra sind als „proof of concept“ einzustufen. Für die weitere Realisierung des Tiefenlagers sind die Auswirkungen eines EGTS auf die Lang-

zeitsicherheit zu untersuchen und der Nachweis der korrekten Funktionsweise eines EGTS zu erbringen. Dabei tragen die Entsorgungspflichtigen selbstverständlich das Risiko, falls das EGTS in einer konkreten Konfiguration nicht so umsetzbar ist, wie dies in [3] angenommen wurde.

Die Nagra hat in NTB 09-06, Seite 71, denn auch festgehalten, dass sie in den letzten Jahren Fortschritte im Verständnis des Gastransports in geringdurchlässigen Gesteinen erreicht hat, die beteiligten Prozesse aber komplex sind und das mechanische Verständnis noch nicht vollständig ausgereift ist¹. Die geplanten Forschungsaktivitäten der Nagra haben deshalb u.a. zum Ziel, das Wissen über Gastransportprozesse in dichten Wirtgesteinen zu vertiefen² [11].

4.3 Bewertungsskala

Die Bewertungsskala wird in Tabelle 5.4-1 (S. 210) bzw. in Anhang A1.31 erläutert. Dabei ist auffällig, dass lediglich auf Stufe „sehr günstig“ davon ausgegangen werden kann, dass das Gas ohne zusätzliche bauliche Massnahmen durch das Wirtgestein abgeführt wird. Bei allen anderen Stufen sind bauliche Massnahmen erforderlich, um das Gas ausreichend schnell abzuführen. Bei den Stufen „bedingt günstig“ und „ungünstig“ ist gar eine Beeinträchtigung des Gesteins zu befürchten, wenn keine (oder unzureichende) bauliche Massnahmen getroffen werden. Je nach Wichtigkeit der baulichen Massnahmen wird eine Abstufung vorgenommen, die Massnahmen fliessen somit in die Bewertung ein.

Unter der Voraussetzung des Nachweises der Machbarkeit und hinreichenden Langzeitstabilität der baulichen Massnahmen kann aber akzeptiert werden, dass sie in die Bewertung mit einfließen, da so eine sinnvolle, sachdienliche Abstufung der möglichen Wirtgesteine erreicht werden kann.

Damit ist die Bewertungsskala nachvollziehbar und stufengerecht gewählt und für die Zwecke der Etappe 1 ausreichend.

¹ Nagra has achieved significant improvements in understanding of gas transport in low-permeability rocks in recent years, but the processes involved are complex and mechanistic understanding is not yet fully mature (NTB 09-06, Seite 71).

² A series of long-term in-situ experiments are being performed at the Mont Terri URL. The HG-A experiment will provide information on gas transport through the Opalinus Clay and along sealing sections (including the excavation-damaged zone). In-situ water and gas injection tests in boreholes are being conducted as part of the HG-C experiment, aimed at investigating the changes in gas and water permeabilities at elevated injection pressures (pathway dilation and gas fracturing). Diffusive and advective transport of dissolved gas (hydrogen) in Opalinus Clay is being investigated as part of the HT experiment. Desaturation and resaturation processes in the unsaturated zone of a microtunnel are being studied in the ongoing VE experiment. As part of the EU 7th Framework Programme, the experiment proposal PEBS has been prepared, aimed at investigating non-isothermal resaturation processes in the near-field of a HLW/SF disposal system (including the unsaturated zone of the host rock). The HG-D experiment will also be initiated at Mont Terri, which deals with studying reactive transport of gas (CO₂) and associated modelling work. Finally, further gas injection tests are planned in large diameter boreholes in the context of the Mont Terri research programme (NTB 09-06, Seite 72).

5 NTB 08-03

5.1 Ansatz

Im NTB 08-03 ([1]) erfolgt die eigentliche Ausscheidung der Standortgebiete. Im Folgenden soll hier nur die Argumentation bezüglich der Gasfrage betrachtet werden, auf andere Aspekte und Kriterien des Sachplans [4] sowie grundsätzliche Fragen zum Verfahren wird nicht eingegangen.

Das Kriterium 2.3 „Lagerbedingte Einflüsse“, unter dem auch das Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas bewertet wird (s. [4], Anhang I) kommt dabei erstmals auf Stufe „Evaluation der Wirtgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche“, Kap. 4 in [1], zum Tragen.

Für die diskutierten „bevorzugten Wirtgesteine“ für ein SMA-Lager, Opalinuston, Brauner Dogger, Effinger Schichten und Mergel des Helvetikums, lautet die Beurteilung uniform, die Effekte der Gasproduktion „können mit baulichen Massnahmen kontrolliert werden“.

Eine Argumentation oder Referenz wird nicht angegeben, offensichtlich wird hier jeweils implizit auf Kapitel 4.6.4 in [2] und somit auf [3] Bezug genommen. Die dort jeweils relevante Argumentation wird im vorliegenden Bericht in den Kapiteln 4 bzw. 6 diskutiert. Die dort gemachten Anmerkungen und Vorbehalte sind somit direkt auf die hier angestellten Beurteilungen übertragbar, insbesondere die in Kapitel 6.2 dargelegten Vorbehalte zur Machbarkeit und Langzeitstabilität der in [3] betrachteten „baulichen Massnahmen“ (EGTS).

Für das HAA-Lager verbleibt in Kap 4 in [1] lediglich der Opalinuston. Dessen Verhalten im Zusammenhang mit einem HAA-Lager wurde bereits im Entsorgungsnachweis (s. [5] - [7]) diskutiert. In ihrem Gutachten hatte die HSK bezüglich der Gasfrage folgende Anmerkungen:

„Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager, hauptsächlich aber zur Abfuhr des entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston führen, sind eingehender zu untersuchen.“

Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen (siehe Fussnote 2) und sind für die Realisierung eines HAA-Lagers unerlässlich. Bezüglich der LMA-Stollen vermerkt NTB 08-03 „Für LMA ist die Situation vergleichbar mit SMA“ (Seite 159). Falls dies bedeutet, dass ein EGTS für die LMA-Stollen erforderlich sein könnte, muss dies in einem Sicherheitsnachweis berücksichtigt werden.

5.2 Beurteilung

Zunächst ist festzustellen, dass kein Wirtgestein aufgrund des Gesteinverhaltens bezüglich Gas von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wird. Die Gasfrage spielt also, folgt man der Argumentation der Nagra, auf dieser Ebene noch keine Rolle. Da allerdings zu erwarten ist, dass sich dies in den weiteren Phasen des SGT-Verfahrens ändert, wird unten dennoch zur Bewertung der Nagra Stellung genommen.

5.2.1 SMA-Lager

Die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine wurde auf der Basis der in [2] (s. Kap. 4) dokumentierten Kriterien vorgenommen: im Wesentlichen wurde ein Referenzgebiet mit dem Wirtgestein Opalinuston (NTB 08-07, S. 10) angenommen und argumentiert, dass besser durchlässige Gesteine eher günstiger sind. Da vom Opalinuston angenommen wird, er sei das Gestein mit der geringsten Gaspermeabilität aller betrachteten Wirtgesteine stellt er eine untere Schranke für die zu berücksichtigende Gastransportkapazität dar. Nennenswerte Auswirkungen des Gesteintypes auf die Funktion des EGTS werden von der Nagra nicht erwartet (s. Antwort zu Frage 3a). Die diesbezügliche Argumentation ist nachvollziehbar.

Dieses Vorgehen ist stufengerecht und a priori plausibel (vorbehaltlich der in Kapitel 6 gemachten Anmerkungen). Es ist aber anzumerken, dass im Rahmen der entsprechenden Diskussionen in [1] an keiner Stelle Gaspermeabilitäten abgeschätzt oder referenziert werden – es werden lediglich im Rahmen der hydraulischen Barrierewirkungen Grössenordnungen hydraulischer Durchlässigkeiten angegeben. Auch dies ist noch stufengerecht, aber es sei hier auf die potentiell erheblichen Unsicherheiten dieses Vorgehens hingewiesen: in den späteren Phasen werden hier vertiefte Betrachtungen anzustellen sein.

In Tabelle 4.7-1, S. 176 in [1] wird die Gesamtbewertung der Kriterien vorgenommen. Alle untersuchten Wirtgesteine erhalten für Kriterium 2.3 die Bewertung „günstig bis sehr günstig“. In Kapitel 4.6.1.1 wurde unter Buchstabe B) der Opalinuston bezüglich Gas noch mit „bedingt günstig“ gewertet: offensichtlich wurden zur Ermittlung der Bewertung von Kriterium 2.3 die Ergebnisse für die verschiedenen Indikatoren gemittelt. Dies wäre zulässig, wenn sich die Effekte der Indikatoren gegenseitig kompensieren könnten. Das ist hier allerdings nicht der Fall, das gewählte Vorgehen scheint fragwürdig. In ihrer Antwort auf Frage 4, die dieses Problem behandelt (s. Anhang B) geht die Nagra nicht auf die Problematik von Indikatoren ein, die bereits nur für sich genommen ein Wirtgestein als ungeeignet erscheinen lassen könnten, jedoch zusammen mit anderen bewertet werden.

Da allerdings ungünstigstenfalls ein weniger geeignetes Wirtgestein im Auswahlverfahren verbleibt, dessen eventuell zu optimistische Einschätzung in Phase 2 bzw. 3 erkannt würde, stellt das Vorgehen der Nagra kein fundamentales Problem dar, sondern führt allenfalls dazu, dass in späteren Phasen eventuell mehr Untersuchungen als vorgesehen durchgeführt werden müssen.

5.2.2 HAA-Lager

Die Einordnung des einzigen für ein HAA-Lager noch betrachteten bevorzugten Wirtgesteins Opalinuston wird analog zu SMA vorgenommen. Dies scheint zwar stufengerecht und plausibel, aber sehr konservativ. Es wäre wünschenswert, wenn hier oder an anderer Stelle ein Bezug zum Entsorgungsnachweis hergestellt und abgeschätzt würde, inwieweit die damals erhaltenen Ergebnisse noch gültig oder zu revidieren sind. Dies wird in einer späteren Phase, dann im Licht einer zu erstellenden Sicherheitsanalyse, noch erfolgen müssen.

Bei der Aggregation der Bewertungen der Indikatoren zur Bewertung des Kriteriums 2.3 besteht dasselbe Problem wie beim SMA: die Bewertung „bedingt günstig“ der Gaseigenschaften ist im erteilten „günstig“ der lagerbedingten Einflüsse nicht mehr erkennbar.

5.3 Zusammenfassende Bemerkungen zu 08-03

Die Gasfrage spielt im Ausscheidungsverfahren nur eine sehr untergeordnete Rolle: dies ist auf die Konstruktion der Kriterien und Bewertungsskalen zurückzuführen. Die Argumentation auf den Nachweis der Beherrschbarkeit des Gastransportes für einen Fall Opalinuston unter Berücksichtigung baulicher Massnahmen abzustützen, ist etwas minimalistisch, für Etappe 1 aber vertretbar. Damit kommt allerdings dem Nachweis der bezüglich der Gasfrage sicherheitsrelevanten Mechanismen und falls relevant insbesondere dem Nachweis der Machbarkeit, Wirksamkeit und Langzeitstabilität der baulichen Massnahmen eine erhebliche Bedeutung zu.

6 NTB 08-07

6.1 Ansatz

NTB 08-07 ([3]) befasst sich mit dem Druckaufbau in einem SMA-Lager im Opalinuston unter typischen Bedingungen (bezüglich Geometrie, Parametern, Gasproduktion...). Dabei wird meist davon ausgegangen, dass das entstehende Gas nicht alleine durch das Gestein abgeführt werden kann, sondern die Verfüllung der Hohlräume so gewählt werden muss, dass sie eine minimale Gasdurchlässigkeit aufweist und einen wesentlichen Beitrag zum Gastransport liefern kann.

Der Bericht versucht mittels einer Reihe von Berechnungen darzulegen, dass die Gasabfuhr mittels baulicher Massnahmen (EGTS: Verfüllung der Kavernen und Zugangsstollen mit geeignetem Material sowie Anbringen von entsprechend dimensionierten Verschlussbauwerken) beherrschbar ist. Er stützt sich dabei auf 4 Modelle:

- Hydrodynamisches Modell (RM): reines Grundwassermodell, Rechnungen dokumentiert in [8]
- Gastransport Gestein (HR): Zwei-Phasen Fluss, 2D Modell einer Kaverne, Rechnungen dokumentiert in [9]
- Gastransport EGTS (EBS): Zwei-Phasen Fluss, 3D Modell des Stollensystems, Rechnungen dokumentiert in [10]
- Gastransport Gesamtsystem (CM): Zwei-Phasen Fluss, 3D Modell des Gesamtsystems (Stollen und Gestein), Rechnungen dokumentiert in [10]

Der Bericht stützt sich dabei exemplarisch auf die Verhältnisse im Tafeljura und betrachtet ein SMA-Lager unter typischen dort zu erwartenden Bedingungen.

Eine Bewertung der einzelnen Aspekte des Vorgehens erfolgt unten.

6.2 Exkurs: Anforderungen

Das Konzept des EGTS stellt ein neues Element im Lagerdesign der Nagra dar. Es scheint daher angemessen, kurz zu entwickeln, welche Elemente aus Sicht der Gutachter nötig scheinen, um einen Funktionsnachweis führen zu können.

Die Aufgabe des EGTS besteht darin, mindestens soviel Gas aus dem Lager abzuführen, damit der Gasdruck im Lager dauerhaft und sicher unter einem für die Barrierewirkung des Wirtgesteins als kritisch zu wertenden Grenzwert verbleibt.

Dies bedingt die (quantitative und belastbare) Kenntnis von mindestens drei unabhängigen Prozessen, nämlich der Gasentwicklung im Lager, der hydromechanischen Vorgänge im Gestein und der Gastransporteigenschaften des Verfüllmaterials. Die quantitative Kenntnis dieser Prozesse erfordert nicht nur die Berücksichtigung eines Referenzfalls, sondern ebenfalls die Untersuchung von extremen (für den Gastransport bzw. die Langzeitsicherheit) günstigen und ungünstigen Parameterkombinationen in einer realistisch-konservativen Bandbreite. Im Rahmen eines Sicherheitsnachweises wäre zu zeigen, dass die abgedeckten Parameterkombinationen alle vernünftigerweise zu erwartenden ungünstigen Einflüsse (mindestens Unsicherheiten in den Parametern, den Prozessen, deren Modellabbildung und die zeitlichen Wechselwirkungen) umfassen. In Anbetracht des Standes der Technik (s. unten) wird es notwendig sein, den Unsicherheiten in der Modellbildung besonderes Augenmerk zu widmen, da hier eventuell relevante Einflüsse vorhanden sein könnten (s. auch Fragen 5 bis 7 in Anhang B).

Neben diesen eher theoretischen Aspekten im Bezug auf den Nachweis der Funktionstauglichkeit des EGTS ist weiter zu analysieren, wie genau die Auslegungsanforderungen an das EGTS definiert werden können, so dass sie auch im Grossmassstab baulich realisierbar, mit den vorhandenen oder zu entwickelnden Materialien zuverlässig erreichbar und vor Ort überprüfbar sind: ist die Umsetzung auf der Baustelle später ungenügend kann das EGTS seine Funktion offensichtlich nicht wie geplant erfüllen.

Des Weiteren ist natürlich der Einfluss des EGTS auf die Sicherheitsanalyse explizit zu betrachten, insbesondere bezüglich möglicher Rückwirkungen (mechanisch, chemisch...) oder im Hinblick auf mögliche Ausbreitungspfade.

Zusammenfassend ist also (mindestens) zu zeigen:

Bezüglich des EGTS

- Anforderungen (physikalisch begründetes „Pflichtenheft“ für die Langzeiteigenschaften)
- Bauliche Machbarkeit (genügende Qualität, räuml. Homogenität der erforderlichen Eigenschaften)
- Hydraulische Funktion (Barriere gegen Eindringen von Wasser)
- Gastransport: (Fähigkeit, genügend Gas abzuführen)
- Langzeitstabilität (Beibehaltung der nötigen Funktionalität über 100'000 Jahre für SMA)

Bezüglich der Nachweisführung

-
- Adäquate Wahl der Parameterbandbreiten und Kombinationen
 - Adäquate Wahl der Modellbildung
 - Durch die Modellbildung eingeführte Hypothesen und deren quantitativen Auswirkungen

Der Sachplan sieht in Etappe 1 nur generische Sicherheitsbetrachtungen vor. Es ist daher stufengerecht, sich damit zu begnügen zu zeigen, dass gemäss aktuellem Kenntnisstand zu erwarten ist, dass das EGTS funktioniert. Die oben aufgeführten Anforderungen sind also zum jetzigen Zeitpunkt nicht zwingend zu erfüllen, es ist als ausreichend zu betrachten, wenn gezeigt wird, dass das vorgelegte Konzept in einem typisch konservativen Fall funktioniert.

6.3 Beurteilung

Im Folgenden wird auf ausgewählte sachliche Inhalte von NTB 08-07 [3] eingegangen. Nicht weiter diskutiert werden z. B. die Ausführungen zum Lagerdesign, das als gegeben angenommen wird, oder zur Gasbildung, die in einem separaten Bericht betrachtet wird. Teilweise detailliert diskutiert wird jedoch das Theorieverständnis (Kap. 3.2 in [3]) und die vier oben angeführten Rechenmodelle (Kap. 4.2 und 4.3 in [3]) sowie die daraus gezogenen Schlussfolgerungen.

6.3.1 Überlegungen zum Gastransport

Im Folgenden wird der Inhalt von Kapitel 3.2 in [3] diskutiert und bewertet. Auf eine ergänzende Zusammenfassung des aktuellen Wissensstandes wird an dieser Stelle verzichtet.

Kapitel 3.2 in [3] stellt einige Modellannahmen zusammen. Dabei wird im Wesentlichen auf Konzepte zurückgegriffen, die bereits im Entsorgungsnachweis benutzt wurden, teilweise mit eher semantischen Modifikationen.

Es werden wieder die 4 bereits im Entsorgungsnachweis postulierten Transportmechanismen diskutiert:

- Advektiv-diffusiver Transport gelöster Gase im Porenwasser
- „visko-kapillarer“ Zweiphasenfluss
- Dilatanzgesteuerter Gasfluss
- Gastransport in Makrorissen

Advektiv-diffusiver Transport

Die wesentlichen klassischen Grundlagen sind angegeben. Ebenso werden einige mögliche Abweichungen und Unsicherheiten angesprochen. Es fehlt aber eine systematische und vollständige Zusammenstellung dieser möglichen Abweichungen und vor allem eine Diskussion ihres möglichen Einflusses sowie eine übersichtliche Darstellung der schliesslich für die Berechnung herangezogenen Modellvariante.

Die Darlegungen der Nagra sind aber für Etappe 1 stufengerecht.

Eine Aufarbeitung der vorhandenen theoretischen Grundlagen mit konkretem Bezug auf lagertypische Verhältnisse (Druck, Temperatur etc.) wäre dennoch wünschenswert.

„visko-kapillarer“ Zweiphasenfluss

Die Diskussion zum „klassischen“ Zweiphasenfluss gibt eine spezifische Modellkombination wieder. In der Literatur existieren auf gleicher Stufe andere, meist ähnliche Ansätze. So ist z.B. nicht unmittelbar ersichtlich, warum die relativ wahrscheinlich ähnlich wichtigen Grundlagen zu Permeabilität – Sättigung und Relativpermeabilitäten nur sehr summarisch angesprochen werden, die Hysterese aber einen eher breiten Raum einnimmt. Insgesamt ist die Darstellung des Zweiphasenfluss-Modells sehr kurz und weitgehend ohne Begründung für konkrete Modellvarianten. In Anbetracht der Wichtigkeit dieses Mechanismus für die weiteren Betrachtungen scheint dies unangebracht.

Dilatanzgesteuerter Gasfluss

Das Konzept des sog. “dilatancy-controlled gas flow” oder “pathway dilation” ist in der wissenschaftlichen Literatur zum Thema Gasfluss in porösen Medien weniger etabliert und wahrscheinlich weniger gut erforscht als der klassische Zweiphasenfluss.

Die genannten Referenzen aus dem Bereich natürlicher Lagerstätten von Gas oder Öl bedürften einer eingehenden Würdigung: so bezieht sich z.B. BGS RR605 häufig auf Salzgesteine bzw. ist auch die Übertragbarkeit der Beispiele bezüglich Druck und Geschichte nicht immer eindeutig klar.

Die Einbindung in mögliche geomechanische Modelle (hier wird die critical state theory genannt) ist lückenhaft und teilweise irreführend. Es fehlt insbesondere eine konsistente quantitative Einbindung plastischer volumetrischer Deformation (=Mikrorissbildung) in ein Materialmodell, oder wenigstens die Referenz hierauf.

Insgesamt wird dieser Transportmechanismus nicht so dargestellt, dass er als solcher plausibel oder seine Abbildung in einem numerischen Modell erkennbar oder gar nachvollziehbar wäre.

Gastransport in Makrorissen

Die Erläuterungen zu diesem Transportmechanismus stützen sich auf eine einzelne Referenz und enthalten einige zumindest überraschende Aussagen zum Mechanismus der Rissentstehung und Rissausbreitung (z.B. das statement „macroscopic tensile fracture (hydrofrac / gasfrac) develops when the gas pressure is larger than the sum of the minimum principal stress and the tensile strength of the rock“, das die Rolle des Porenwassers und der Effektivspannungen im Gestein gänzlich vernachlässigt). Die gemachte Aussage zu den zu erwartenden Druckverhältnissen im späteren Lager wäre als Ergebnis des Berichts, nicht als Grundlage für die Konzeptbildung zu erwarten. In Anbetracht der zahlreichen und divergierenden Literatur zur Physik und Modellierung von Rissbildung auch in vergleichsweise einfachen Materialien bedürfte die Aussagen „conceptual, theoretical and experimental framework for fracture propagation is well documented in standard hydrocarbon exploration literature“ einer tiefergehenden Begründung und des Nachweises der Übertragbarkeit auf typische Lagerverhältnisse.

Bewertung

Die Diskussion der Gastransportmechanismen ist angesichts des Standes der Technik und der gesicherten Kenntnisse lückenhaft. Wie schon mehrfach betont, fordert Etappe 1 allerdings noch keine Sicherheitsanalyse. Es ist daher stufengerecht, sich auf beispielhafte Überlegungen zu beschränken. Unter diesem Aspekt sind die Betrachtungen in Kapitel 3 in [3] zu rechtfertigen. Für einen Sicherheitsnachweis sind sie jedoch zu vertiefen und theoretisch fundiert abzustützen. Dies hat dabei über isolierte Zitate einzelner Literaturstellen hinauszugehen. Die Antworten der Nagra auf Fragen 2 und 7 (s. Anhang) gehen teilweise in diese Richtung, die dort angeführten Argumente bedürfen aber der Vertiefung und Diskussion. Insbesondere bezüglich des in 2c) erwähnten Grenzwertes von Betriebsdruck = max. 80% Fracdruck wäre eine Auswertung von Zwischenfällen beim Betrieb von Gasspeichern und eine Analyse der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse nötig.

In ihren Antworten auf Fragen 2 und 3 (s. Anhang) bemüht die Nagra intensiv das Konzept der pathway dilation bzw. die Eigenschaften von Sand/Bentonit-Materialien. Referenzen werden keine angeführt, die Diskussion bleibt lückenhaft und auf dem Niveau von blossen Behauptungen. Zu Frage 3 ist anzumerken:

3a und b): den Gutachtern sind keine S/B-Materialgesetze bekannt, die *“die Entwicklung der geotechnischen Eigenschaften von S/B Gemischen unter verschiedensten Umweltbedingungen zuverlässig vorhersagen“*. Der Nachweis der Existenz, der Anwendbarkeit und der Zuverlässigkeit solcher Modelle wäre zu erbringen.

In 3c) wird behauptet *„Es existieren auch umfangreiche Labor- und in-situ Erfahrungen zum Einbringen von Sand/Bentonit-Gemischen (z.B. GMT Experiment im Felslabor Grimsel)“*. Den Gutachtern sind ausser dem GMT keine vergleichbaren Experimente der Nagra bekannt.

Die Nagra selbst hat die Resultate des GMT immer als durch von einbaubedingten präferentiellen Gaspfaden geprägt interpretiert. Dass das GMT jetzt als Beweis für die Nichtexistenz genau solcher Strukturen angeführt wird, ist stark erklärungsbedürftig. Das *„S/B-Gemische (...) auch im bautechnischen Massstab homogen eingebracht werden“* können bleibt eine blosser Behauptung, es existieren nach Kenntnis des Gutachters keine geeigneten Nachweise, die dies in der für das EGTS erforderlichen Grössenordnung zeigen würden. Der Nachweis der technischen Realisierbarkeit ist deshalb basierend auf zusätzlichen und falls möglich, unabhängigen Forschungsergebnissen in späteren Etappen zu erbringen.

Scale dependence

Dieser Abschnitt enthält zahlreiche unbelegte (z. B. *„Small-scale heterogeneities may have a distinct impact on the large-scale transport processes“*) oder schlicht falsche (z.B. *the spreading of the saturation distribution can be considered as a mixing effect*) Aussagen. Sollten die postulierten Skaleneffekte aber existieren, wäre eine quantitative Diskussion ihres Einflusses auf die vorgestellten Modelle unerlässlich – eine solche findet nicht statt.

6.3.2 Hydromodell (RM)

Das erste vorgestellte Modell ist ein reines Grundwassermodell mit passiver Gasphase, es soll dazu dienen Hinweise auf die Aufsättigung eines SMA-Lagers zu liefern. A priori ist ein solches Modell im Zusammenhang mit der Gasfrage wenig hilfreich. Der viel später im Text vorgenommenen Rückgriff auf einzelne Ergebnisse zur Beurteilung der Auswirkung der unterschiedlichen Geometrieimplementation in den betrachteten Modellen und die Möglichkeit der groben Abschätzung einer minimalen Aufsättigungsdauer rechtfertigt aber die Aufnahme dieses Modells in den Gasbericht zumindest im Grundsatz.

Das Modell ist im vorliegenden Bericht [3] nur skizziert und in [8] detaillierter dargestellt. Im Folgenden wird daher teilweise auch auf [8] Bezug genommen.

6.3.2.1 Modellaufbau und –annahmen

Das geometrische Modell berücksichtigt 8 Lagerkavernen plus das Pilotlager, sowie den Lüftungsschacht. Die Lagergeometrie wird relativ genau abgebildet (beispielsweise annähernd runde Tunnel und unterschiedliche Durchmesser). Die Druckentwicklung wird über die verschiedenen Bauphasen des Lagers berechnet. Dabei kommt es rechen-technisch bedingt zu relativ grossen Sprüngen in den Anfangs- und Randbedingungen. Auf eventuelle Probleme in diesem Zusammenhang gehen [3] oder [8] nicht ein.

Das verwendete Programm scheint nicht in der Lage zu sein, Wasserfluss unter ungesättigten Verhältnissen mit seinen physikalischen Konsequenzen, insbesondere sich ändernder Permeabilität, zu berücksichtigen. Das aufzufüllende Porenvolumen scheint über einen Hilfsansatz berücksichtigt.

6.3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in [3] als Isoplots „hydraulic head“ im Bereich der Lagerstollen dargestellt, angegeben sind für den Basisfall 4 Zeiten, für die Varianten jeweils eine. Das ist zu wenig, um sich ein Bild der Abläufe zu machen. Der NAB [8] ist hier etwas detaillierter und liefert auch Zeitverläufe (teilweise sehr schwer lesbar) an ausgewählten Punkten und Vertikalschnitte (leider aber sehr klein), beschränkt sich aber ebenfalls auf Potentiale. In einem Bericht zur Wiederaufsättigung wären Ergebnisdarstellungen in Form des Sättigungsgrades durchaus wünschenswert.

6.3.2.3 Bewertung

Die Modellierung als solche scheint, auch wenn sich die Ergebnisse nur schwer und unvollständig nachvollziehen lassen, konsistent und plausibel. Es stellt sich allerdings die Frage nach dem Beitrag eines solchen Modells: angesichts der vielen vereinfachenden Annahmen können die Ergebnisse weder für ein Szenario mit Gasbildung (was auch nicht beansprucht wird) noch für die Aufsättigung eines entsättigten Lagers ab Atmosphärenbedingungen mit oder ohne Gaseinschluss als repräsentativ betrachtet werden.

6.3.3 2D Gasmodell (HR)

Das 2D Modell berechnet die Gasausbreitung aus einer Lagerkaverne durch das Wirtgestein unter Vernachlässigung eventueller horizontaler Gaspfade (insbesondere entlang der EDZ/Verfüllung der Zugangsstollen) sowie anderer Lagerkomponenten. Mit diesem Modell sollen obere Grenzwerte für die zu erwartenden Gasdrücke abgeschätzt werden.

Das Modell ist im vorliegenden Bericht nur skizziert und in [9] detaillierter dargestellt. Im Folgenden wird daher teilweise auch auf [9] Bezug genommen, allerdings nur soweit, als es für das Verständnis von [3] erforderlich ist. Die weitergehenden Überlegungen in [9] werden nicht betrachtet.

6.3.3.1 Modellaufbau und –annahmen

Leider wurden in keinem der vorgestellten Simulationsfälle die Referenzparameter angesetzt sondern lediglich spezifische Abweichungen berechnet. Dies erschwert die Interpretierbarkeit.

Der Modellbereich scheint sinnvoll gewählt, einzelne Geometriedetails des Kavernenquerschnitts sind wohl entbehrlich.

Für die Gasbildung greift [9] auf von [3] bzw. [1] abweichende Raten zurück. Dies sollte in [3] mindestens erwähnt und diskutiert werden.

6.3.3.2 Ergebnisse

In [3] sind lediglich Druckverläufe in einer Lagerkammer dargestellt. In vielen Fällen wird der gesetzte Grenzwert für den max. Gasdruck überschritten. Die Darstellung der Ergebnisse in [9] ist erfreulich detailliert und meist lesbar. Insgesamt ist der Modellansatz sinnvoll, es kann aber nicht klar entschieden werden, ob das gesamte Gas allein durch das Wirtgestein abgeführt werden kann oder nicht. Dies motiviert die Untersuchung eines EGTS ausreichend.

6.3.3.3 Bewertung

Die Rechnungen zeigen, dass das Gas oft in ausreichender Menge durch das Wirtgestein abgeführt werden kann. Dieses Ergebnis wird aber wahrscheinlich stark von einigen Modellannahmen beeinflusst, z.B.:

- Maximal zulässiger Druck durch lithostatischen Gebirgsdruck bestimmt
- Gas-Randbedingungen an den oberen und unteren Modellrändern: realistischerweise ist hier eine den Rahmengesteinen entsprechende Gastransportkapazität anzusetzen statt – wie vermutlich geschehen – Atmosphärendruck (RB im Bericht nicht ausreichend beschrieben)

Das Modell scheint für die vorliegende Fragestellung von Relevanz und grundsätzlich zur Bewertung der Gasfrage geeignet. Nicht angesprochen werden allerdings Fragen nach

Gastransport bei sehr kleinen Sättigungen im Wirtgestein und die Parametrisierung der Zweiphasengesetze: ob und wie gut hier klassische Modelle greifen ist durchaus umstritten.

Inwieweit die Ergebnisse für ein konkretes SMA Lager aussagekräftig sind, ist aufgrund der vielen untereinander und von [1] abweichenden Modellannahmen schwer zu sagen.

6.3.4 3D Gasmodell ohne Gastransport im Gestein (EBS)

Das EBS Modell dient der Bestimmung des Gastransports durch die (verfüllten) Lagerstrukturen. Das Wirtgestein wird nicht abgebildet, die einzige hydraulische Randbedingung liegt an V4 an. Das Modell dient also der Bestimmung der Leistungsfähigkeit des EGTS und ist damit für die Argumentation in Bericht [3] zentral. Das Modell ist im vorliegenden Bericht nur skizziert und in [10] detaillierter dargestellt. Im Folgenden wird daher teilweise auch auf [10] Bezug genommen.

6.3.4.1 Modellaufbau und –annahmen

Das Modell vereinfacht aus rechentechnischen Gründen die Geometrie erheblich, jedoch unter Beibehaltung der relevanten Querschnitte. Dies scheint zulässig. Einige Vereinfachungen sollten aber noch näher begründet und einige Parameterannahmen vertieft diskutiert werden.

Für die Gasentstehungsraten wird (wie auch für die folgenden Modelle) auf MIRAM 2005 und fiktive konservative Annahmen zurückgegriffen, leider wird kein Bezug zum im Rahmen des Sachplans herangezogenen MIRAM 2008 hergestellt (s. z.B. [1]).

Als Gas wird hier -ohne weitere Begründung- Luft angesetzt, statt wie im 2D Modell Wasserstoff.

Es existiert kein Fall mit Referenzparametern, sondern es wird nur mit als konservativ eingeschätzten Datensätzen gearbeitet. Dies erschwert die Vergleichbarkeit mit den übrigen Rechenmodellen. Es fehlt in [3] und [10] eine geschlossene, übersichtliche Darstellung der Modellparameter zumindest für den Basisfall.

6.3.4.2 Ergebnisse

Die Darstellung der Modelsergebnisse ist wiederum sehr knapp gehalten und wird kaum diskutiert. Es werden nur Druckverläufe über die Zeit für eine Stelle im Lager angegeben: Sättigungen an verschiedenen repräsentativen Orten wären wünschenswert.

Es ist unklar, warum verfüllte Strecken und Versiegelungen im Referenzfall dieselbe Permeabilität aufweisen: Die Versiegelung ist damit zumindest von diesem Standpunkt aus keine mehr. Welchen Sinn dann Variationen machen, die die Permeabilität der Versiegelungen erhöhen, so dass diese dann über der der Strecken liegen wird ebenfalls nicht kommentiert.

6.3.4.3 Bewertung

Durch die drei verschiedenen Bezeichnungen für ein und denselben Rechenfall und offensichtliche Verwechslungen in Figur 3-3 in [10] sind die Ergebnisse nur schwer nachvollziehbar. Die Beschreibung der Rechenfälle scheint nicht immer schlüssig. Die aus den Modellergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen sind teils derart, dass die gemachten Aussagen vom Modell gar nicht abgeleitet werden können oder sind eine direkte Folge der Modellannahmen und Randbedingungen.

6.3.5 3D Gasmodell mit Gastransport im Gestein (CM)

Dieses Modell simuliert den Gasfluss durch die Verfüllung und das Wirtgestein und kombiniert somit die in den Modellen HR und EBS betrachteten Prozesse. Das Modell ist im vorliegenden Bericht nur skizziert und in [10] detaillierter dargestellt. Im Folgenden wird daher teilweise auch auf [10] Bezug genommen

6.3.5.1 Modellaufbau und –annahmen

Die (vereinfachte) Geometrie entspricht dem Modell EBS, d.h. rechteckige Querschnitte mit äquivalenten Flächen. Im Gegensatz zu EBS ist hier aber auch die Tunneloberfläche zum Wirtgestein wichtig, da sie den Gasübertritt ins Gestein mitbestimmt. Die Vereinfachung hat hier also potentiell Einfluss, der nicht diskutiert wird.

Ein Rechenfall mit Referenzparametern existiert auch hier nicht, die gewählten Materialparameter unterscheiden sich teilweise von den bisher betrachteten, was die Vergleichbarkeit zwischen den Modellen einschränkt.

6.3.5.2 Ergebnisse

Die Variationen sind aufgrund der gewählten Parameter nur eingeschränkt mit den vorher angestellten Berechnungen zu vergleichen. So ist z.B. der erhebliche Einfluss der Permeabilität von Verschlussbauwerk V4 in R_CM2 eine direkte Folge der Modellannahmen (Wirtgestein sehr undurchlässig, verfüllte Strecken relativ durchlässig, V5 im Basisfall durchlässiger als V4), die bisher so nicht getroffen wurden. Ein direkter Vergleich mit äquivalenten EBS-Fällen wäre hilfreich.

6.3.5.3 Bewertung

Das CM-Modell stellt das eigentlich repräsentative Systemmodell dar, da offensichtlich Gastransport durch das Gestein und das EGTS ähnlich wichtig sind, zumindest aber nur ein Mechanismus nicht auszureichen scheint. Der erhebliche Aufwand für dieses Modell ist damit gerechtfertigt. Allerdings wäre eben deshalb eine kritische Würdigung der Ergebnisse nötig.

Die aus den Modellergebnissen gezogenen Schlussfolgerungen sind teils derart, dass die gemachten Aussagen vom Modell gar nicht abgeleitet werden können oder sind eine direkte Folge der Modellannahmen und Randbedingungen. Eine systematische Behand-

lung von Unsicherheiten bezüglich Parametern und Modellen findet auch hier nicht statt, obwohl die punktuell vorgenommenen Variationen eigentlich auf diese Notwendigkeit hindeuten.

6.4 Erfüllung der Berichtsziele

Die Ziele des Berichts werden in Kapitel 1.2 genannt. Es sind:

- *„A complete presentation of the gas-related requirements and project boundary conditions for ensuring long-term safety of an L/ILW repository in the Opalinus Clay formation. Requirements and project boundary conditions are formulated by the engineers and by the PA project team.“*

Wird nicht erreicht, die Darstellung der Anforderungen und Projektrandbedingungen bleibt unsystematisch und unvollständig

- *„Traceable and transparent documentation of the overall assessment approach. The approach is presented for a generic repository concept, i.e. the aforementioned requirements and project boundary conditions are formulated in a way, which allows for adopting the basic assessment procedure to future site specific repository configurations.“*

Wird erreicht. Das Vorgehen ist hinreichend nachvollziehbar und auf andere Standortbedingungen übertragbar.

- *„A complete presentation of the available geoscientific database and of the adopted simulation tools.“*

Wird nicht erreicht, es werden lediglich Teilaspekte diskutiert. Gar nicht behandelt werden die Modellannahmen und Programme.

- *„A discussion of the key arguments, which confirm that gas production and gas release will not impair the long-term radiological safety of an L/ILW repository in the Opalinus Clay formation.“*

Wird erreicht, Diskussion wird geführt. Einzelne Ergebnisse und Argumentationen scheinen aber noch Fragen aufzuwerfen und bedürfen weiterer Abklärungen.

7 Einbezug im Standortauswahlverfahren

Im Sachplanverfahren wird die Gasfrage unter Kriterium 2.3 „lagerbedingte Einflüsse“ berücksichtigt. Im Bericht [1] wird die Bewertung der möglichen Wirtgesteine auch im Hinblick auf die Gasfrage vorgenommen. Die Bewertung erfolgt erst auf Stufe „bevorzugte Wirtgesteine“, d.h. zu einem Zeitpunkt, zu dem schon eine starke Einschränkung der möglichen Gesteine aufgrund anderer Gesichtspunkte stattgefunden hat. Dies scheint vertretbar.

Der Bericht [1] nimmt folgende Bewertung für die bevorzugten Wirtgesteine für das SMA-Lager vor:

Tabelle 1: Bewertung der Wirtgesteine bzgl. Gas (SMA)

Gestein	Bewertung	Bemerkung
Opalinuston	Bedingt günstig	Baul. Massnahmen erforderlich, $K = 10^{-12} - 10^{-13}$ m/s
Brauner Dogger	Günstig	Heterogener, daher günstiger als OPA $K = 10^{-12}$ m/s
Effinger Schichten	Günstig	Heterogener, daher günstiger als OPA $K = 10^{-12}$ m/s
Mergel	Günstig bis sehr günstig	Heterogener, daher günstiger als OPA $K = 10^{-11}$ m/s

Der Bericht [1] nimmt folgende Bewertung für die bevorzugten Wirtgesteine für das HAA-Lager vor:

Tabelle 2: Bewertung der Wirtgesteine bzgl. Gas (HAA)

Gestein	Bewertung	Bemerkung
Opalinuston	Bedingt günstig	Weniger Gas als SMA, daher konservative Bewertung

Die Grundlagen für diese Einordnung sind in Bericht [2], Kapitel 4.6.4 dargelegt. Dabei wird argumentiert, dass bei geführtem Nachweis für gering durchlässige Gesteine höher durchlässige automatisch günstigere Bedingungen bzgl. Gasbildung aufweisen. Weiter wird davon ausgegangen, dass nötigenfalls durch bauliche Massnahmen erreicht werden kann, dass hinreichend viel Gas abgeführt wird.

Damit werden bezüglich Gas keine Mindestanforderungen gestellt, die Bewertung stützt sich einzig auf die Permeabilität und ggf. die Notwendigkeit baulicher Massnahmen. Deren Machbarkeit gilt für die Autoren von [1] mit [3] als erbracht.

Dieses Vorgehen ist etwas minimalistisch, aber wahrscheinlich im Grossen und Ganzen gerechtfertigt und vor allem stufengerecht. Die Permeabilität für Wasser kann wohl in erster Näherung für die Abschätzung der Gasdurchlässigkeit herangezogen werden. Dabei werden allerdings spezifische Zweiphasenparameter (Gaseindringdruck o.ä.) nicht

berücksichtigt. Diese dürften aber grob mit der Permeabilität skalieren, d.h. mit höherer Permeabilität ebenfalls günstiger (im Sinne einfacheren Gastransports) werden.

Es bleibt festzuhalten, dass aufgrund des gewählten Vorgehens keine Gesteine/Gebiete aufgrund des Aspekts Gastransport ausgeschlossen werden, was im Sinne des Sachplanverfahrens ist. Unter diesem Gesichtspunkt erfolgt keine frühzeitige Reduktion der Optionen.

Vor dem Hintergrund der obigen Bemerkungen ist allerdings am Postulat des erbrachten Nachweises der Machbarkeit und Funktionalität der baulichen Massnahmen zur Gasabfuhr ein Fragezeichen anzubringen. Ein diesbezüglicher Nachweis wäre in weiteren Etappen der Tiefenlagerrealisierung zu führen.

Die Ermittlung der generellen Einordnung eines Wirtgesteins erfolgt gem. [1], Anhang C per Mittelwertbildung. Dies ist sinnvoll, wo sich substituierende Kriterien oder Aspekte betrachtet werden. Wie bereits in Kapitel 4 angesprochen ist es fraglich, ob dieses Vorgehen auch bei unabhängigen Kriterien oder Aspekten sinnvoll ist: so kann eine „schlechte Note“ für einen Aspekt, z.B. bezüglich Gastransport, durch gute Eigenschaften bezüglich Wärmeverhalten oder Geochemie wieder ausgeglichen werden, was physikalisch nicht immer Sinn macht. Wahrscheinlich wäre es sinnvoller, zumindest für einige Kriterien bzw. Aspekte die Bewertung am jeweils ungünstigsten Punkt auszurichten.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

8.1 Einordnung und Bewertung

Die Argumentation in [1] stützt sich ausschliesslich auf die in [3] behandelte Funktion des EGTS. Die Funktionsdemonstration des EGTS wird anhand von verschiedenen Modellrechnungen geführt. Dabei sind diese Rechnungen untereinander nicht immer konsistent, insbesondere fehlen ein durchgehaltener Referenzfall und systematische, nachvollziehbar begründete Parametervariationen, die die identifizierten Modellunsicherheiten hinreichend abdecken. [3] ist daher vom Ansatz her eher eine wissenschaftliche Fallstudie im Sinne eines „proof of concept“: als solche entspricht der Bericht durchaus dem Stand der Technik und berücksichtigt die üblichen Gepflogenheiten.

Als sicherheitstechnischer Nachweis ist der Bericht aber nicht geeignet. Das muss er im Moment (Etappe 1) auch noch nicht sein – es ist aber darauf hinzuweisen dass die in [3] dargelegten Konzepte noch erheblich vertieft werden müssen, um einen Sicherheitsnachweis für ein EGTS wie projiziert zu erhalten.

Dabei sind auch in [3] weitestgehend ausgeklammerte Fragen wie bauliche Realisierbarkeit, Langzeitstabilität, Langzeitsicherheit und die Konsistenz der verschiedenen Annahmen für Materialien, deren Eigenschaften, Einbauzustände etc. zu berücksichtigen.

8.2 Generische Sicherheitsbetrachtungen und Sicherheitsnachweis

In [3] wird im Wesentlichen versucht mittels Modellrechnungen zu zeigen, dass mittels der gewählten baulichen Massnahmen die Lagersicherheit des SMA-Lagers gewährleistet werden kann. Dies ist stufengerecht für die generischen Sicherheitsbetrachtungen in Etappe 1. Die Darlegungen der Nagra genügen aber den Anforderungen an einen Sicherheitsnachweis im strengen Sinne nicht.

Um einen solchen Nachweis zu erbringen, wäre eine deutlich sorgfältigere Dokumentation des Modells und Diskussion der Ergebnisse erforderlich. Da sich der Sicherheitsnachweis nur auf rechnerische Modelle stützt, die 1:1 nicht experimentell überprüfbar sind, ist insbesondere bei der Wahl und Verifizierung der Hypothesen und Modellgrundlagen besondere Sorgfalt erforderlich. Aus Sicht des Gutachters ist unklar, wie dies in den folgenden Etappen der Nachweisführung gewährleistet werden kann, insbesondere da der den Gutachtern bekannte Stand der Technik dazu nicht auszureichen scheint und entsprechende Forschungen kaum zeitgerecht abzuschliessen sein werden.

Eine Sicherheitsanalyse dient für den systematischen Nachweis der Einhaltung der Schutzkriterien. Die Analyse hat gemäss der Richtlinie ENSI-G03 auch die folgenden Aspekte zu umfassen:

- Eine Begründung, dass die verwendeten Rechenmodelle auf die vorliegende Situation anwendbar sind. Die Bedeutung von Vereinfachungen in den Rechenmodellen gegenüber den natürlichen Gegebenheiten ist zu erläutern.
- Durchführen einer Sensitivitätsanalyse, um aufzuzeigen, inwiefern Änderungen in den Parameterwerten die Berechnungsergebnisse beeinflussen.

-
- Eine Analyse der vorhandenen Ungewissheiten in den Daten, Prozessen und Modellen und Berechnung der daraus folgenden Bandbreite der Radionuklidfreisetzung resp. Dosen.

Der Gutachter empfiehlt deshalb, dass die Nagra bei den weiteren Schritten der Realisierung der Tiefenlager den Nachweis erbringt, dass die oben erwähnten Aspekte bei der Berechnung von Gasfreisetzung und –transport gemäss ENSI-G03 belastbar berücksichtigt sind.

8.3 Ergebnis der sicherheitstechnischen Überprüfung

Im Hinblick auf die Gasfrage ergibt sich insgesamt folgende Einschätzung:

- Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten Anforderungen an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den Standort nachvollziehbar und genügend?

Insgesamt ja. Die physikalische Begründung einiger Grössen steht aber noch aus.

- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke der Vororientierung?

Die verarbeiteten Informationen sind vor dem Hintergrund des gewählten Vorgehens für die Zwecke der Vororientierung ausreichend.

- Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge geologischer Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?

Es werden Gesteinseigenschaften und Wirkung technischer Massnahmen auf gleicher Stufe behandelt und vermischt. Damit ist eine isolierte Betrachtung des Gesteins nicht mehr gegeben oder möglich. Es besteht die Gefahr, im Vergleich mit anderen Aspekten verzerrte Ergebnisse zu erhalten. Das Vorgehen darf aber noch als stufengerecht gelten.

- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge geologischer Standortgebiete transparent und nachvollziehbar?

Ja

- Können die Gutachter den Vorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

Bezüglich der Analyse des Gastransportes (HAA) sowie an die Machbarkeit und Funktion des EGTS (SMA, ev. HAA) sind noch relevante Fragen zu klären. Dies kann aber im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen erfolgen. Für Etappe 1 ergeben sich, vorbehaltlich vertiefter Abklärungen zu einem späteren Zeitpunkt, keine grundsätzlichen Einwände. Sicherheit und Machbarkeit eines SMA-Lagers mit EGTS können aber nicht als nachgewiesen gelten.

8.4 Bewertung im Hinblick auf die Standortfindung

HAA: es ergeben sich aus Sicht der Gasproblematik in Etappe 1 des Sachplanverfahrens keine Einschränkungen. Es spricht daher gegenwärtig nichts dagegen, die ausgewählten Standortregionen weiter zu verfolgen.

SMA: Die Nagra kommt zu dem Schluss, dass sich auch für das SMA-Lager in Etappe 1 des Sachplanverfahrens keine Einschränkungen aus Sicht der Gasproblematik ergeben. Dazu wird allerdings mit erheblichem Aufwand für den a priori bezüglich der Gasproblematik unvoreilhaftesten Opalinuston gezeigt, dass technische Massnahmen die Eigenschaften des Wirtgesteins kompensieren können. Es stellt sich daher die Frage, ob sich nicht Gesteine finden liessen, bei denen auf solche technischen Massnahmen verzichtet werden kann und die insgesamt mindestens äquivalente Sicherheit bieten. Darauf geht die Nagra in der Nachweisführung nicht ein. Ein SMA-Lager, das aufgrund der Wirtgesteinseigenschaften eine ausreichende Sicherheit bietet und ohne technische Massnahmen auskommt bietet Vorteile gegenüber einem Lager, das technische Massnahmen zur Gewährleistung der (äquivalenten) Sicherheit erfordert. Es wird daher empfohlen, in weiteren Etappen auch Alternativen zum Opalinuston detaillierter zu untersuchen.

Anhänge

A Übersicht Materialparameter (nach NTB 08-07)

	R_RM01	R_HR01	R_EBS01	R_CM01
Host rock				
Kh	1.00E-20 m2	1.00E-20 m2		1.00E-20 m2
Kv	2.00E-21 m2	1.00E-20 m2		2.00E-21 m2
Ss	1.00E-05 1/m	2.60E-06 1/m		1.70E-06 1/m
n		0.12		
1/a		18 Mpa		18 Mpa
n (VG)		1.67		1.67
Swr		0.00		0.30
Sgr		0.003		0.00
K_EDZ	1.00E-19 m2			1.00E-19 m2
n_EDZ				
Cavern backfill				
K	1.00E-10	1.00E-16 m2	1.00E-15 m2	1.00E-15 m2
n	0.25	0.25	0.25	0.25
1/a		0.5 Mpa	0.5 Mpa	0.004 Mpa
n (VG)		1.29	1.29	2.5
Swr		0.25	0.25	0.30
Sgr		0.20	0.20	0.00
Tunnel backfill				
K	1.00E-16 m2		1.02E-16 m2	1.00E-16 m2
n	0.3		0.3	0.3
1/a				0.004 Mpa
n (VG)				2.5
Swr			0.30	0.30
Sgr			0.00	0.00
Plug V5				
K	1.00E-18 m2		1.00E-19 m2	1.00E-18 m2 (V5 + V3)
n	0.3		0.3	0.3
1/a				0.004 Mpa
n (VG)				2.5
Swr			0.30	0.30
Sgr			0.00	0.00
Plug V3/V4				
K	1.00E-19 m2		1.00E-19 m2	1.00E-19 m2 (V4)
n	0.3		0.3	0.3
1/a				0.004 Mpa
n (VG)				2.5
Swr			0.30	0.30
Sgr			0.00	0.00

B Zusammenfassung der Fragen an die Nagra

Im Rahmen der Erstellung dieses Berichts wurden der Nagra folgende Fragen unterbreitet. Soweit sie beantwortet wurden, wurde die Antwort der Nagra in der vorliegenden Version dieses Berichts berücksichtigt.

Frage 1

Das Vorgehen bezüglich des Einflusses der Gasbildung wird in Kapitel 4.6.4 von NTB 08-05 erläutert. Die Nagra postuliert, dass im Falle der Unbedenklichkeit der Gasproduktion für ein SMA-Tiefenlager im dichtesten Wirtgestein (Opalinuston), geschlossen werden kann, dass die Gasproduktion bei allen anderen, höher durchlässigen Gesteinen ebenfalls kein Problem darstellt. Implizit wird dabei vorausgesetzt, dass es keine wirtgesteinspezifischen Einflüsse auf die Gasproduktionsrate, z.B. durch eine gesteinspezifische Geochemie oder erhöhte Wasserzufuhr, gibt.

- a) Sind solche möglichen, gesteinspezifischen Einflüsse sicher auszuschliessen bzw. bei der Berechnung der Gasproduktion für alle untersuchten Gesteine konservativ berücksichtigt?
- b) Sind denkbare wirtgesteinspezifische Einflüsse auf die Gasproduktion konservativ über alle untersuchten Gesteine berücksichtigt?

Antwort der Nagra

Neben materialspezifischen Eigenschaften des korrodierenden/gasbildenden Materials (Materialien, spezifische Oberflächen, etc.) werden die Gasproduktionsraten auch durch die in-situ Bedingungen (pH, Redox, Salinität, Wasserangebot, Temperatur) beeinflusst. Diese in-situ Bedingungen werden teilweise (z.B. chemische Bedingungen) auch stark durch das Nahfeld bestimmt.

pH: Der pH-Wert hat einen grossen Einfluss auf die Korrosionsraten von Metallen (Passivierung der Korrosionsoberflächen). Der Haupteinflussfaktor ist der Gehalt an zementhaltigen Materialien im Nahfeld, weswegen für SMA/LMA bedeutend tiefere Metallkorrosionsraten angenommen werden als für BE/HAA. Hingegen ist der pH-Wert in allen bevorzugten Wirtgesteinen sehr ähnlich und hat nur einen untergeordneten Einfluss auf die Gasproduktionsraten.

Redox: In den Gasproduktionsrechnungen wird angenommen, dass im Nahfeld und allenfalls im Wirtgestein vorhandener Sauerstoff schnell (d.h. innerhalb einiger Jahrzehnte) konsumiert wird, so dass danach die Gasproduktion in allen bevorzugten Wirtgesteinen unter anaeroben Bedingungen erfolgt.

Salinität: Die Salinitäten (insbesondere Cl⁻) in den bevorzugten Wirtgesteinen sind ähnlich (gemäss NAB 09-29 ca. ein Drittel der Meerwasserkonzentration im Opalinuston, Braunen Dogger, Mergel-Formationen des Helvetikums), einzig in den Effinger Schichten wurden höhere Werte im Bereich von ca. ein Drittel bis drei Viertel der Meerwasserkonzentration gemessen. Dies könnte zu leicht erhöhten Korrosionsraten führen.

Wasserangebot: In den Gasproduktionsrechnungen wird angenommen, dass die Metallkorrosion und der mikrobielle Abbau von Organika nicht durch das Wasserangebot begrenzt sind, was für alle bevorzugten Wirtgesteine eine konservative Annahme darstellt.

Temperatur. Die anfänglich hohen Temperaturen im HAA-Lager könnten das Wasserangebot begrenzen, was aber in den Gasproduktionsrechnungen konservativ vernachlässigt wird (vgl. oben). Nach dem Abklingen der Wärmeproduktion durch radioaktiven Zerfall stellt sich wieder die Umgebungstemperatur ein (30-50°, je nach Tiefenlage und Standortgebiet), was aber keinen signifikanten Einfluss auf die Gasproduktionsraten hat (vgl. Fig. 1 in NTB 08-12).

Bezüglich des Themenkreises der Korrosion sei auch auf den Bericht von Kaneko et al. (2004)³ hingewiesen, welcher nützliche Information enthält.

Frage 2

Berechnungen bei Annahme einer realistischen Gasproduktionsrate und mit dem erweiterten Inventar zeigen (NTB 08-07, Fig 4-13, Seite 107), dass die Spitzendrücke über einen langen Zeitraum in einem Bereich befinden mit der mit Gastransport durch Dilatanz zu rechnen ist.

- a) Muss bei Annahme einer *konservativen* Gasproduktionsrate für R_RCM09 mit dem Auftreten von Makrorissen gerechnet werden (Zugfestigkeit Opalinuston gem. NTB 02-03, Seite 606 beträgt vertikal 1.2 MPa)?
- b) Die Druckreduktion zwischen R_RCM09 und R_RCM10 wird durch eine Änderung der Permeabilität der Tiefenlagerversiegelung (repository seal) und der Lagerstollensiegel (cavern plugs) erreicht. Im welchen Umfang kann die Gaspermeabilität von Siegelstrecken verändert werden bei gleichzeitiger Beibehaltung der hydraulischen Barrierenfunktion?
- c) Wodurch ist der (wirtgesteinsspezifische) Grenzwert für den zulässigen Gasdruck im Lager theoretisch und experimentell abgestützt?

Antwort der Nagra

Ein Ziel der Rechnungen in NTB 08-07 war es, festzustellen, ob bei Verwendung eines "engineered gas transport system" als Auslegungsregel eine Begrenzung des Gasdrucks auf den Schwellenwert für pathway dilation machbar ist. Dieses Ziel kann grundsätzlich erreicht werden, auch wenn dies nicht zwingend notwendig ist ("pathway dilation" führt nicht zu einer unakzeptablen Schädigung des Wirtgesteins, vgl. dazu die Dokumentation zum Entsorgungsnachweis).

Die Rechenfälle CM09 und CM10 basieren auf der hypothetischen Annahme, dass das Abfallinventar um den Faktor 2.5 vergrössert wird, ohne jedoch die Lagerauslegung (insbesondere Volumen/Oberflächen von Kavernen und weiteren Untertagbauten) anzupassen. Die Resultate der beiden Rechenfälle sind deshalb hypothetischer Natur und sind entsprechend zu interpretieren, liefern aber durchaus Hinweise für eine optimierte Lagerauslegung für ein SMA-Lager für das umhüllende Abfallinventar.

- a) Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass bei Zunahme des Gasdrucks zuerst 2-Phasenfluss beginnt und dass es bei weiterem Anstieg des Gasdrucks zu "pathway dilation" (an ausgewählten Stellen, insbesondere in der EDZ bei Versiegelungstrecken) kommt, verbunden mit einer erheblichen Zunahme der Gas-

³ Wurde dem ENSI abgegeben

transportkapazität. Zu einem Gasfrac kann es nur kommen, wenn der Gasdruck sehr rasch ansteigt und den Wert für "pathway dilation" deutlich übersteigt. Dabei ist zu beachten, dass bei den Berechnungen (wie generell bei allen in NTB 08-07 dokumentierten Rechnungen) der Prozess der "pathway dilation" ausgeschaltet ist; d.h. bei Erreichen des entsprechenden Drucks ergibt sich keine erhöhte Gastransportkapazität, wie dies effektiv der Fall sein wird. "Pathway dilation" ist wichtig bei der Beurteilung der Möglichkeit von Gasfracs, denn aufgrund von einsetzender pathway dilation (v.a. in der Auflockerungszone um die Versiegelungsbauwerke) wird die Entstehung von Makrorissen verunmöglicht; der Druckaufbau ist langsam und wird bei den vorhandenen spezifischen Gasbildungsraten auf dem Niveau des Schwellendrucks für pathway dilation stabilisiert. Diese Beurteilung wird auch durch die Erfahrungen der Kohlenwasserstoffindustrie gestützt. Für die Berechnungen CM09 und CM10 ist spezifisch zu beachten, dass für ein SMA Tiefenlager, das ein erweitertes Lagerinventar aufnimmt, der zusätzliche Platzbedarf für das vergrösserte Abfallvolumen berücksichtigt werden muss (das jetzige Vorgehen ist wie erwähnt hypothetisch). Das totale Ausbruchvolumen der Untertagebauwerke muss dementsprechend um das 2-3 fache erweitert werden. Durch das zusätzliche Gasspeichervolumen wird der Gasdruckaufbau in den Lagerkavernen begrenzt; es besteht zusätzliches Volumen und auch zusätzliche Flächen für die Gasfreisetzung über das Wirtgestein, so dass auch bei konservativen Gasgenerationsraten keine kritischen Gasdrücke zu erwarten sind. Zusätzlich kann durch spezifische Design-Massnahmen (z.B. zwei Einlagerungsbereiche mit separaten Lagerverschlüssen; Gasabführung entlang des verfüllten Ventilationsschachts; zusätzlicher Schacht) der Gasdruckaufbau reduziert werden.

- b) Die Auswirkungen der Durchlässigkeit der Verfüllung/Versiegelung auf die Radionuklidfreisetzung und auf die resultierenden Dosen sind sehr beschränkt. Dies ist bekannt aus Rechnungen für Wellenberg und für den Entsorgungsnachweis (auch für die LMA-Tunnels) und wird auch durch vereinfachte, generische Berechnungen bestätigt (vgl. NAB 09-29). Dies liegt daran, dass die mit einem geeigneten Material verfüllten Stollen günstige Transporteigenschaften haben (poröses Medium mit guten Sorptionseigenschaften) sowie zusätzlich auch Matrixdiffusion in das umgebende Wirtgestein stattfindet; weiter trägt auch die erhebliche Länge der Stollen zur Rückhaltung bei. Die in diesen vereinfachten Rechnungen verwendeten Wasserflüsse (Wasserflüsse zwischen 0.05 und 5000 l/Jahr) können verglichen werden mit für das SMA-Lager im Opalinuston berechneten Wasserflüssen durch die Versiegelung V4 über einen Zeitraum von 100'000 Jahren (vgl. NAB 08-40). Die Modellrechnungen zeigen, dass für eine angenommene hydraulische Durchlässigkeit der Versiegelung V4 von $1E-11$ der Gesamtwasserfluss durch V4 nach 10'000 Jahren ca. 2 l/Jahr beträgt (NAB 08-40, Rechenfall CM03). Der zulässige Gasdruck in einem geologischen Tiefenlager zur Vermeidung eines Gasfracs hängt in erster Linie vom in-situ Gebirgsspannungszustand und von der (Zug-)Festigkeit des Gesteins ab. Als Faustregel für den Frac-Druck p_f gilt: $p_f \geq \text{Betrag der minimalen Hauptspannungskomponente} + \text{Zugfestigkeit}$. Die theoretischen und experimentellen Grundlagen zur Abschätzung des Frac-Drucks in Tonsteinen sowie empirische Erfahrungen stammen grossenteils aus der Lagerstättenkunde und dem Bergbau. Frac Experimente wurden von der Nagra in der Bohrung Benken (22.7 MPa / ca. 600 m u. GOK) und im Felslabor Mont Terri (an verschiedenen Standorten: 3.5 - 9 MPa) durchgeführt. Auch in der

Untertage-Gasspeicherung sind langjährige Erkundungs- und Betriebserfahrungen vorhanden. Die Canadian Standards Association Guideline Z341 legt in Bezug auf den maximalen Betriebsdruck eines natürlichen Gasspeichers fest: „the maximum pressure shall not exceed 80% of the fracture pressure of the cap rock formation“. Für das Zürcher Weinland wurde als Schwellenwert für pathway dilation ein Wert von 13 MPa festgelegt; dies entspricht ca. 60% des gemessenen Frac Drucks. Die geschätzte Magnitude der minimalen Hauptspannungskomponente auf Lagerniveau liegt bei 15 – 16 MPa.

Generell ist festzuhalten, dass die Schlussfolgerung, dass der Gasdruck auf genügend tiefem Niveau gehalten werden kann (bei dichten Wirtgesteinen unter Berücksichtigung des "Engineered Gas Transport System, EGTS" für den Opalinuston auch für grössere Tiefenlagen und auch für die anderen bevorzugten Wirtgesteine gilt. Dies liegt daran, dass beim Opalinuston bei grösseren Tiefen der Gaseintrittsdruck zwar tendenziell zunimmt, aber gleichzeitig auch die in-situ Spannungen und damit auch der Frac-Druck deutlich zunehmen, sodass die Differenz zwischen Gaseintrittsdruck (insbesondere für das EGTS, aber auch für den Opalinuston) und in-situ Spannungen zunimmt und der "Abstand" zum Gasfrac mit zunehmender Tiefe weiter zunimmt. Für die anderen Wirtgesteine sind wegen der vorhandenen Heterogenität kleinere Gaseintrittsdrücke zu erwarten (vgl. auch Antwort zu Frage 7).

Frage 3

NTB 08-07, Fig 4-13, Seite 107. Die genannten Rechenfälle R_RCM09 und R_RCM10 zeigen, dass die korrekte Funktionsweise der EGTS Komponenten für die Lagersicherheit von Bedeutung sind.

- a) Inwieweit ist sichergestellt, dass keine wirtgesteinspezifischen Einflüsse auf das EGTS zu erwarten sind, die das Potential haben es in seiner Funktion relevant beeinträchtigen zu könnten?
- b) Wie zeigt die Nagra, dass die Langzeitbeständigkeit der Eigenschaften der EGTS-Komponenten für Jahrtausende gegeben ist?
- c) Kann das Auftreten von präferentiellen Fließwegen im EGTS ausgeschlossen werden?
- d) Was sind die Konsequenzen für die Lagersicherheit, falls das EGTS nicht wie geplant funktioniert und ist in diesem Fall konzeptuell der Einsatz eines EGTS mit dem in der G03 geforderten Mehrbarrierenkonzept vereinbar?

Antwort der Nagra

Vergleiche dazu die grundsätzlichen Bemerkungen zu den Rechenfällen CM09 und CM10 in Antwort zu Frage 2, die darauf hinweisen, dass die Resultate der beiden Rechenfälle hypothetischer Natur sind und keine direkte Relevanz für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines SMA-Lagers haben. Sie liefern jedoch Hinweise für eine optimierte Lagerauslegung für ein SMA-Lager für das umhüllende Abfallinventar.

- a+b) Beim EGTS Konzept („technischer Gaspfad“) sind Sand/Bentonitgemische im Mischungsverhältnis 80:20 als Verfüllmaterialien für die Verschlüsse der Lagerkammern sowie für die Zugangs- und Betriebstunnel vorgesehen. In der Bodenmechanik werden die hydromechanischen und hydrochemischen Eigenschaften von Sand/Bentonitgemischen seit Jahrzehnten für verschiedenste geotechnische

Anwendungen intensiv untersucht. Es wurden umfangreiche Materialgesetze entwickelt, die die Entwicklung der geotechnischen Eigenschaften von S/B Gemischen unter verschiedensten Umweltbedingungen zuverlässig vorhersagen. Mögliche hydromechanische und hydrochemische Interaktionen, die zu einer Abdichtung des technischen Gaspfads führen könnten, wurden im NTB 08-07 diskutiert. Eine signifikante Kompaktion als Folge der Konvergenz des Wirtgesteins kann ausgeschlossen werden, da die mechanische Druckfestigkeit des S/B Gemischs sehr hoch ist (Korn-Korn Kontakt). Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass die hydrochemische Abdichtung hauptsächlich über die Fluidphase erfolgt, d.h. signifikante Abdichtungseffekte treten erst auf, wenn das S/B-Gemisch weitgehend wassergesättigt ist. Eine vollständige Aufsättigung der verfüllten Untertagebauwerke ist erst am Ende der Gasgenerationsphase zu erwarten.

Bezüglich der hydrochemischen Abdichtung ("Skin-Bildung") ist weiter zu beachten, dass eine allfällige Reduktion der Durchlässigkeit nur lokal ist, und dass die wegen reduzierter Gasdurchlässigkeit möglicherweise entstehende "pathway dilation" auch nur lokal sein würde und deshalb für das Verhalten des Gesamtsystems von untergeordneter Bedeutung ist.

- c) Grundsätzlich ist zu beachten, dass Sand-Bentonit-Gemische ein homogen poröses Medium bilden ohne präferenzielle Fließpfade für gelöste Stoffe. Es existieren auch umfangreiche Labor- und in-situ Erfahrungen zum Einbringen von Sand/Bentonit-Gemischen (z.B. GMT Experiment im Felslabor Grimsel), welche dies bestätigen. S/B-Gemische können auch im bautechnischen Massstab homogen eingebracht werden, sodass im Versiegelungselement selbst keine bevorzugten Fließpfade für gelöste Stoffe zu erwarten sind.
- (d) Es ist zu beachten, dass es auch ohne EGTS nicht zu einem Gasfrac kommen kann, sondern dass der Gasdruckaufbau höchstens zu "pathway dilation" (an ausgewählten Stellen, z.B. EDZ bei Versiegelungsstrecken) führen kann, verbunden mit einer erhöhten Gastransportkapazität, welche den weiteren Anstieg des Gasdrucks wirksam verhindert,

Die Bedeutung des EGTS Systems als Teil des Multibarrierensystems liegt deshalb vielmehr darin, dass der Gasdruck bei Verwendung eines EGTS unterhalb des Schwellendrucks für "pathway dilation" gehalten werden kann.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Schwellendruck, der zu einer Bildung dilatanter Gaspfade (z.B. Kontaktzone Versiegelung/EDZ) notwendig ist, ist auf jeden Fall deutlich geringer als der Frac-Druck des ungestörten Wirtgesteins (beachte auch, dass in der Gebirgszone in unmittelbarer Umgebung der Versiegelungsstrecke eine ausgeprägte Anisotropie der Gebirgsspannung vorherrscht, d.h. die minimale lokale Hauptspannungskomponente ist geringer als im ungestörten Gebirge)

Frage 4

NTB 08-03, S. 388: Als Beispiel soll Tabelle C.3-1 dienen: Ist es wissenschaftlich begründbar, dass beispielsweise das Potential zur Verkarstung in der Bewertung ein dreimal höheres Gewicht als das Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas hat? In der Gesamtbewertung geht die 2 (Verkarstung) für die Effinger Schichten mit dem Gewicht 1/3 in die Gesamtnote ein, für Opalinuston die 2 (Gas) aber nur mit dem Gewicht 1/9. In der

Tabelle 4.7-1 erhalten dann alle betrachteten SMA-Wirtgesteine die Note 3 für die Langzeitstabilität.

Wie wird bei der Ermittlung der Bewertung eines Kriteriums mit verschiedenen, sich nicht kompensierenden Indikatoren sichergestellt, dass das auslegungsbestimmende, also das ungünstigste, Merkmal berücksichtigt wird?

Antwort der Nagra

Diesen Sachverhalt kann man auch anders formulieren: Alle Kriteriengruppen sollen für die Gesamtbewertung gleiches Gewicht haben, und für jede Kriteriengruppe sollen die jeweils zugehörigen Kriterien gleiches Gewicht haben, und für jedes Kriterium soll wiederum jeder zugehörige Indikator gleiches Gewicht haben. Den so formulierten Grundsatz hat die Nagra befolgt. Dies führt dann gezwungenermassen dazu, dass der Beitrag eines einzelnen Indikators zur Gesamtbewertung unterschiedlich ist (je nach Anzahl Indikatoren bzw. Kriterien); die Nagra hat dies bewusst in Kauf genommen (d.h. das Vorgehen mit stufenweise gleichen Gewichten den Vorzug gegeben).

Mit dem Konzept von Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen wird sichergestellt, dass sehr wichtige Merkmale über den zugehörigen Indikator (und den entsprechenden Anforderungen) zwingend in die Auswahl der weiter zu betrachtenden Optionen einfließen.

Frage 5

In NTB 08-07 wird die Gesamtmenge der gasproduzierenden Materialien in einem SMA-Lager in Tabelle 2-6 aufgelistet. Auf Seite 37 wird festgestellt: "The gas generation rates were calculated as the sum of the hydrogen gas produced by the anaerobic corrosion of the metals and the methane produced by the microbial degradation of the organic components of the waste."

Wie gross sind die Mengen von ebenfalls im Tiefenlager korrodierenden Materialien die nicht Teil der Abfälle sind (bspw. Stahl im Liner, etc.) Wie sieht der Zeitverlauf der Gasproduktion aus diesen Materialien aus?

Antwort der Nagra

Bei den in den Lagerkammern des SMA-Lagers enthaltenen, nicht zu den Abfällen gehörenden korrodierenden Materialien handelt es sich in erster Linie um Armierung und Felsanker. Die Armierung befindet sich in einer "Hoch-pH"-Umgebung mit Korrosionsraten von rund 10^{-4} mm/a, für die Felsanker wird von einer Wirtgesteins-Umgebung ausgegangen mit rund einem Faktor 10 höheren Korrosionsraten.

Die Berechnungen mit den erwarteten Materialmengen zeigen, dass die zusätzlichen Gasbildungsraten verglichen mit den von den Abfällen stammenden Gasbildungsraten vernachlässigbar sind (Beitrag um etwa einen Faktor 10 bis 100 (und anfänglich sogar mehr) kleiner, je nach Zeitpunkt). Schliesslich ist zu beachten, dass bei den schon in den Abfällen (MIRAM) enthaltenen Gasbildungsraten die Armierung für die Endlagerbehälter mit berücksichtigt wurde, die zumindest teilweise durch nicht-korrodierende Materialien (z.B. Glasfasern) ersetzt werden kann, was zu einer erheblichen Reduktion der Gasbildungsraten führt (vgl. NAB 09-29).

Frage 6

In NTB 04-06 Seite 96 wird die Berechnung des Druckaufbaus in einem HAA-Lagerstollen gezeigt (unten links). Es wird dort Folgendes festgehalten: „When capillary leakage by 2-phase flow and gas diffusion from the SF tunnel walls into the Opalinus Clay are taken into account (Fig. 5.2-8), the pressure reaches a steady-state, which corresponds to an equilibrium between gas generation and gas escape.“

Wenn man gemäss NAB 09-29 die Gasproduktionsrate pro Tunnelmeter heranzieht (siehe unten rechts), fällt auf, dass die totale Gasproduktionsrate in den ersten 10000 Jahren rund dreimal so gross ist, wie die der Lagerbehälter.

- Welche Folgen hat dies für den Druckaufbau?
- Bei welchem Druck stellt sich bei einem deutlich erhöhten Gasvolumen das neue Gleichgewicht zw. Gasproduktion und Gasabtransport ein?
- Kommt es durch das grössere Gasvolumen zur Bildung von Makrorissen?

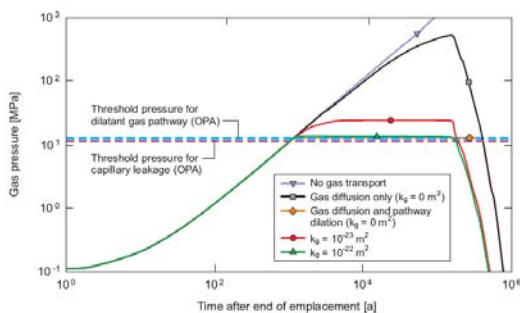
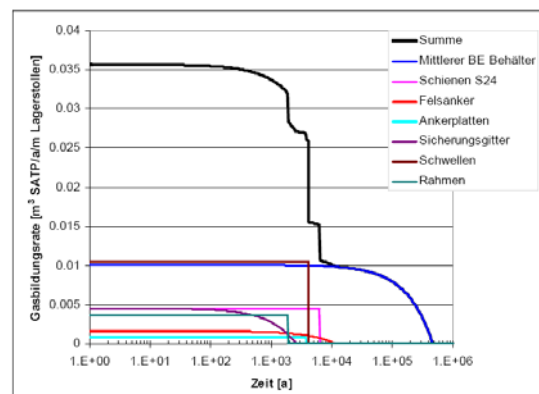


Fig. 5.2-8: Evolution of gas pressure in the SF emplacement tunnel taking gas diffusion and capillary leakage by 2-phase flow into account (steel corrosion rate $1 \mu\text{m a}^{-1}$)



Antwort der Nagra

Im NTB 04-06 werden in Kapitel 3 die Ergebnisse von thermo-hydraulischen Modellierungen zur Entwicklung des HLW/SF Nahfelds diskutiert (basierend auf Poppei et al. 2002). Die Modellierungen berücksichtigen explizit das Phänomen der Aufsättigung der verfüllten Lagerstollen, den Einfluss der Wärmeentwicklung und die Gasgeneration durch Korrosion der Lagerbehälter (vgl. Fig. 3.4-2 in NTB 04-06). In Kapitel 5 des NTB 04-06 wird ein vereinfachtes Gastransportmodell verwendet, in dem thermo-hydraulische Kopplungen nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird im vereinfachten Modell vorausgesetzt, dass (i) Bentonit und Wirtgestein von Anfang an voll gesättigt sind und (ii) kein Gastransport entlang der verfüllten Stollen erfolgt.

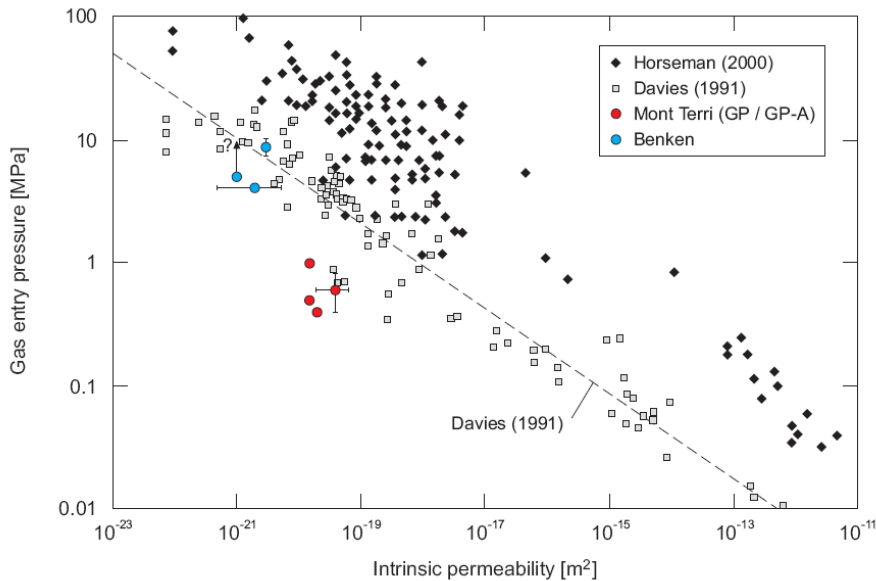
In NAB 09-29 werden Gasbildungsrate für das HLW/BE Nahfeld berechnet, die die Beiträge zusätzlicher Stahlbauteile berücksichtigen. Es wird von einer anfänglichen Gesamtgasbildungsrate von $0.035 \text{ m}^3 \text{ STP/a}$ pro Tunnelmeter ausgegangen. Dies entspricht etwa dem 3 fachen der in NTB04-06 als „realistisch“ bezeichneten Gasbildungsrate, bzw. 1/3 der als „konservativ“ bezeichneten Gasbildungsrate. Bezüglich dieser Gasbildungsrate ist anzumerken, dass diese davon ausgeht, dass Schienen und Bodenbleche im Stollen verbleiben, obschon diese eigentlich auch wieder entfernt werden könnten. Weiter ist daran zu erinnern, dass grundsätzlich auch andere Behältermaterialien mit kleinerer Gasbildungsrate bzw. keiner Gasbildung gewählt werden könnten (z.B. Behälter mit Kupferhülle, Keramikbehälter), wobei deren Verwendung auch von anderen Faktoren abhängt.

In NTB 04-06 wurden mehrere Rechenfälle mit konservativen Gasgenerationsraten durchgeführt (vgl. Fig. 3.4-2), welche die in NAB 09-29 aufgeführten Raten abdecken. Die Resultate zeigen, dass die berechneten Gasdrücke trotzdem unterhalb des Schwellendrucks für pathway dilation bleiben. Nur in einem extremen Rechenfall (RGH5K), wenn eine sehr geringe Wirtgesteinsdurchlässigkeit (vertikale Permeabilität $2E-21 \text{ m}^2$) mit einem hohen Gaseintrittsdruck (21 MPa) und einer konservativen Gasgenerationsrate kombiniert wird, treten nach ca. 5'000 Jahren Drücke im Bereich des Schwellendrucks für pathway dilation auf.

- a) Die anfänglich verstärkte Gasbildung bewirkt eine Verlängerung der Aufsättigungszeit des Nahfelds (und des Wirtgesteins) mit Auswirkungen auf den Aufbau des Gasdrucks. So wird im ungesättigten Nahfeld wegen der erhöhten Gasspeicherkapazität der Gasdruckaufbau stark gedämpft. Darüber hinaus ist die effektive Gasdurchlässigkeit des ungesättigten Bentonits und des ungesättigten Wirtgesteins um mehrere Größenordnungen höher als unter gesättigten Bedingungen. Neben dem Gaspfad durch das Wirtgestein wird erwartet, dass auch die EDZ bzw. der teilgesättigte Bentonit als potenzieller Gaspfad wirken und dadurch den Gasdruck in den Lagerbereichen signifikant reduzieren; dazu sind zurzeit Arbeiten im Gange.
- b) Im NTB 04-06 wurden im Rahmen der Sensitivitätsstudien für die konservativen Gasgenerationen typische Maximaldrücke zwischen 9 und 11 MPa berechnet. Auf jeden Fall werden die Gasdrücke den Schwellenwert für "pathway dilation" nicht überschreiten.
- c) Pathway dilation wurde nur für den extremen Rechenfall (RGH5K) mit sehr geringer Wirtgesteinsdurchlässigkeit (vertikale Permeabilität $2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$), hohem Gaseintrittsdruck (21 MPa) und einer konservativen Gasgenerationsrate erreicht; die Bildung eines Gasfracs kann ausgeschlossen werden.

Frage 7

In NTB 04-06 (Seite 43) werden die Davies Gleichung (3.3-2) und die daraus abgeleiteten Gaseintrittsdrücke diskutiert. Die durch Horseman und Davies gesammelten Daten werden in Fig.3.3-2 dargestellt: „Figure 3.3-2 shows data compilations from Horseman (2000) and Davies (1991) – the results from Mont Terri and Benken are added. The gas entry pressures from Benken fit reasonably well to the Davies relationship, whereas the Opalinus Clay at Mont Terri is characterised by entry pressures which are significantly below the Davies relationship. This deviation may be explained by the superposition of another process: the much lower effective stress at Mont Terri due the low overburden, which gives rise to pathway dilation even for low gas pressure (transition from classical two-phase flow to pathway dilation at low effective stress).”



Mit welchen Gaseintrittsdrücken (resp. Bandbreiten – siehe auch NTB 02-03, Seite 345-aufgrund des gegenwärtig noch unvollständigen Kenntnisstands) rechnet die Nagra in den jeweiligen Standortregionen?

Antwort der Nagra

Die Davies-Beziehung (→ NTB 96-01: Geosynthese Wellenberg 1996: Ergebnisse der Untersuchungsphasen 1 und 2) bzw. die allgemeinere, aus dem kubischen Gesetz (→ De Marsily 1986: Quantitative Hydrogeology) hergeleitete Beziehung zwischen Gaseintrittsdruck und intrinsischer Permeabilität ist sehr nützlich für eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Gaseintrittsdrücke. Für den Opalinuston liegen die erwarteten intrinsischen Permeabilitäten je nach Überlagerung zwischen $5E-20 \text{ m}^2$ und $1E-21 \text{ m}^2$. Gemäss kubischem Gesetz ist dementsprechend mit Gaseintrittsdrücken zwischen 2 und 10 MPa zu rechnen.

Für die anderen vorgeschlagenen Wirtgesteine sind wegen der im Vergleich zum Opalinuston erhöhten Heterogenität tiefere Gaseintrittsdrücke zu erwarten. Insbesondere in Wirtgesteinen mit diskreten wasserführenden Systemen (z.B. Mergelformationen des Helvetikum am Beispiel Wellenberg) ist der Gaseintrittsdruck signifikant herabgesetzt. Im Rahmen der Erkundungsarbeiten am Wellenberg wurden Gaseintrittsdrücke zwischen 0.02 und 4.8 MPa gemessen.

C Diskussion Gastransportmechanismen

Die Nagra führt 4 Gastransportmechanismen an, auf die oben schon eingegangen wurde (s. Kapitel 6.3.1), nämlich:

- Advektiv-diffusiver Transport gelöster Gase im Porenwasser
- „visko-kapillarer“ Zweiphasenfluss
- Dilatanzgesteuerter Gasfluss
- Gastransport in Makrorissen

Die Nachweisführung stützt sich dabei allerdings allein auf die ersten beiden, wobei insbesondere der visko-kapillare Zweiphasenfluss eine entscheidende Rolle spielt.

Dieser Transportmechanismus entspricht der klassischen Zweiphasenflusstheorie in ungesättigten (teilgesättigten) porösen Medien, d.h. porösen Körpern, deren Porenraum mit Wasser und Gas gefüllt ist.

Die aktuell akzeptierte Theorie über den Gastransport in teilgesättigten porösen Medien basiert auf der Annahme kontinuierlicher Phasen. Diese Hypothese wird bereits bei der Herleitung der grundlegenden Zusammenhänge getroffen und ist für das Verständnis des Zweiphasenflusses wesentlich.

Das Anwendungsgebiet dieser Theorien ist daher im Prinzip auf Fälle beschränkt, in denen gleichzeitig nennenswerte Anteil beider Phasen (Gas- und Wasserphase) gleichzeitig vorhanden sind.

Es ist unklar, inwieweit die für den Fall zweier kontinuierlicher Phasen ermittelten Zusammenhänge auch an den Grenzen des eigentlichen Gültigkeitsbereiches bzw. jenseits davon anwendbar sind: im Prinzip wäre zu erwarten, dass im Fall nicht kontinuierlicher Phasen andere Zusammenhänge gelten. Die aktuelle Literatur scheint keine belastbaren Aussagen über die zu erwartenden Vorgänge und gültigen Zusammenhänge, geschweige denn validierte Modelle, hierzu zu enthalten.

Typische Rechenprogramme wie z.B. Tough2 rechnen aber über den gesamten Sättigungsreich (mit S^g nicht identisch 0) mit Zusammenhängen nach dem Prinzip der Phasenkontinuität.

Wahrscheinlich ist der Fall mit nicht-kontinuierlicher Gasphase der für den grössten Teil des Wirtgesteins zutreffend. Ob und falls ja in welchem Ausmass das einen Einfluss auf die Rechenergebnisse hat, ist unklar.

Ab welchen Gas- bzw. Wassersättigungen im Opalinuston bzw. in Sand-Bentonitgemischen von kontinuierlichen, mobilen Phasen ausgegangen werden kann und somit die Voraussetzungen für den Zweiphasenfluss wie in den Rechenmodellen unterstellt gegeben sind, ist ebenfalls weitgehend unklar.

Für den Opalinuston wäre insbesondere zu zeigen, für welche Sättigungen mit frei fließenden Gas- und Wasserphasen gerechnet werden kann und wie der Übergang von der Kavernenverfüllung in den Opalinuston erfolgt, insbesondere bezüglich der Druck- und Sättigungsverhältnisse vor Beginn der (weiteren) Entsättigung des Opalinustons.

Eine ganze Reihe anderer Abweichungen von grundlegenden Annahmen bzw. bekannten oder vermuteten Unzulänglichkeiten in der klassischen Theorie könnten im gegebenen Zusammenhang relevant sein. Dies sind u.a. und ohne besondere Reihenfolge:

- Einfluss der Porenraumstruktur auf den Gastransport
- Klinkenbergeffekt
- Vorgang und Bedingungen des Gaseintritts
- Austrocknung und Rissbildung
- Einfluss der Sättigungsgeschichte (Bau- / Betriebsphase)
- Einfluss der Anfangs- und Randbedingungen
- Einfluss des (im Vergleich zu Laborexperimenten) langsamen Druckaufbaus und der langen Zeitskalen

Diese Liste liesse sich ohne Weiteres fortführen.

Zumindest ein Teil dieser und anderer Fragestellungen ist gegenwärtig Gegenstand von Forschungsarbeiten der Nagra. Es wird allerdings notwendig sein, rechtzeitig vor Fertigstellung des Sicherheitsnachweises für den Lagerstandort einen breiten Konsens über die zur Nachweisführung herangezogenen theoretischen Grundlagen zu erwirken und zu zeigen, dass die Theorie die zu erwartenden physikalischen Vorgänge hinreichend genau und zuverlässig beschreibt ohne übertrieben konservativ zu sein.

Angesichts des im Sachplan vorgesehenen Zeitplans und der typischen Dauer wissenschaftlicher Grundlagenforschung dürfte dies ein überaus ehrgeiziges Ziel darstellen.

Ähnlich stellt sich die Situation bei den beiden letzten Transportmechanismen dar: viele Fragen zum Gültigkeitsbereich des diltanzgesteuerter Gasflusses sind offen, und selbst bei Horseman finden sich unterschiedliche Aussagen (z.B. Horseman 1999 vs. 1996).

Da bezüglich einer eventuellen Rissbildung (sowohl für Mikro- als auch Makrorisse) notwendigerweise der Spannungszustand eine wesentliche Rolle spielt, wäre es notwendig eine klare Vorstellung über die herrschenden Effektivspannungsverhältnisse zu haben. Dies scheint in Anbetracht der aktuellen Diskussion in der relevanten wissenschaftlichen Literatur aber kaum gegeben, insbesondere nicht für die zu erwartenden Permeabilitäts- und Druckverhältnisse. Hier dürfte ebenfalls noch viel Grundlagenforschung zu leisten sein, bevor in einem Sicherheitsnachweis direkt oder indirekt quantitative Aussagen bezüglich Effektivspannungskonzepten (und damit Rissbildung) gemacht werden können.

Insgesamt scheint der in der Literatur dokumentierte Wissensstand zum Gastransport unter typischen Lagerverhältnissen noch unzureichend: zwar wurden in den letzten Jahrzehnten erhebliche Anstrengungen unternommen und wissenschaftlich sehr gute Fortschritte erzielt, die vorliegenden Erkenntnisse enthalten aber Unsicherheiten bzw. werfen Fragen auf, die zwar vom wissenschaftlichen Standpunkt aus zweitrangig sein mögen, in einem formalen Sicherheitsnachweis aber problematisch werden könnten.

ENSI 33/066

Herausgeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), CH-5200 Brugg
Telefon +41(0)56 460 84 00, Telefax +41(0)56 460 84 99

Zu beziehen bei: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Informationsdienst, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg
oder per E-Mail Infodienst@ensi.ch
Abrufbar unter www.ensi.ch