

**Bundesamt für Strahlenschutz
Salzgitter**

**Untersuchung der Gasbildungsmechanismen
in einem Endlager für radioaktive Abfälle
und der damit verbundenen Auswirkungen
auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit**

Abschlussbericht

Colenco Bericht 3161/28

Stand: Januar 2005

Version Mai 2005

**Bundesamt für Strahlenschutz
Salzgitter**

**Untersuchung der Gasbildungsmechanismen
in einem Endlager für radioaktive Abfälle
und der damit verbundenen Auswirkungen
auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit**

Abschlussbericht

Colenco Bericht 3161/28

PSP-Nr. WS 1009 / BfS-Bestell-Nr. 8492-2


J. Skrzypek, G. Mayer, St. Wilhelm, M. Niemeyer
Colenco Power Engineering AG
Baden Schweiz

St. Folle, O. Rolfs
Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH
Hannover, Deutschland

D. Suter
Science Solutions Dr. Daniel Suter
Baden, Schweiz

Baden, 31.05.2005


Dr. Jürgen Skrzypek


Dr. Matthias Niemeyer

Der Bericht wurde im Auftrag des BUNDESAMTES FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf der Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Zusammenfassung

Stichworte: Wirtsgesteine, Geosysteme, Gasbildung, Nachweisverfahren, Gasspeicherung, Entweichen von Gas, technische Maßnahmen, Standortauswahl

Ziel des Teilprojekts zu den sicherheitstechnischen Einzelfrage WS 1009 „Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit“ ist, die möglichen Gasbildungsmechanismen und ihre Wirkung in einem Endlager systematisch zu analysieren und darauf aufbauend ein Nachweiskonzept für die Beherrschbarkeit der Gasbildung zu entwickeln.

In diesem Abschlussbericht werden in verkürzter Form die Arbeitsergebnisse des Teilprojektes dargestellt. Zum vertieften Verständnis der Vorgehensweise, der getroffenen Annahmen, der Detailergebnisse sowie deren Interpretation empfiehlt sich die Lektüre der Berichte zu den Teilaufgaben TA 1 bis TA 7 [Colenco 2003 a-c], [Colenco 2004 a-d].

Nachweiskonzepte

Mittels vereinfachender Modelle werden zwei mögliche Konzepte zur Berücksichtigung der Auswirkungen der Gasbildung in einem Langzeitsicherheitsnachweis untersucht. Dazu wird unterschieden zwischen

1. dem Konzept „Gasspeicherung“ für undurchlässige saline Gesteine, bei denen ein Wasserzutritt von außen in das Endlager a priori ausgeschlossen wird, und
2. dem Konzept „Entweichen von Gas“ in vergleichsweise durchlässigen Wirtsgesteinen, zu denen im Rahmen dieser Studie die Wirtsgesteinstypen sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, Kristallin und Ton/Tonstein zählen. Bei diesen Wirtsgesteinstypen wird mit einem Zutritt von Wasser zum Endlager gerechnet.

Sollte der Nachweis der Gasspeicherung nach dem 1. Konzept nicht erbracht werden können, sind technische Maßnahmen zu ergreifen und/oder das alternative Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ zu untersuchen. Bei diesem Konzept wird ein Entweichen des Gases aus dem Endlager in die Biosphäre unterstellt, und es muss nachgewiesen werden, dass die Schutzziele gleichwohl eingehalten werden. Letzteres Konzept wird standardmäßig für durchlässige Wirtsgesteine angewendet, die einen Einschluss des Gases nicht gewährleisten können.

Als Basis für die Betrachtungen werden die relevanten Prozesse der Gasbildung nachgebildet und Gasbildungsraten und –mengen basierend auf den prognostizierten Abfallmengen und dem Wasserangebot berechnet. Hierbei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Mengen verfügbaren Wassers in salinaren Gesteinen (Konzept „Gasspeicherung“) geringere Gasmengen als in nicht-salinaren Gesteinen (Konzept „Entweichen von Gas“). Der größte Anteil der gebildeten Gasmenge stammt von den vernachlässigbar wärmeentwickelnden (Korrosion und mikrobieller Abbau) und zu einem geringeren Anteil von den wärmeentwickelnden Abfällen.

Für die entwickelten Geosysteme werden die Eingangsparameter und Ergebnisse von Modellrechnungen dargestellt, welche als Grundlage einer Bewertung der Geosysteme dienen. Für die beiden Abfallarten „vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle“ und „wärmeentwickelnde Abfälle“ wird je Geosystem ein Referenzfall untersucht sowie mittels Sensitivitätsanalyse der unterschiedliche Einfluss der einzelnen Parameter ermittelt.

Berechnungsergebnisse für das Salinar

Die Berechnungen ergeben, dass in den untersuchten salinaren Geosystemen die vollständige Gasspeicherung im Endlager ohne technische Maßnahmen nicht möglich ist, da der Gasdruck in den Einlagerungsstrecken, deren Volumen anfänglich durch die Konvergenz abnimmt, aufgrund der Gasbildung über den lithostatischen Druck hinaus ansteigen würde. Es wird davon ausgegangen, dass beim Erreichen des lithostatischen Druckes Bereiche mit erhöhter (sekundärer) Porosität entstehen, in die das Gas eindringen kann.

Aufgrund der Ergebnisse der vereinfachenden Modellrechnungen und Annahmen kann eine vorläufige Wertung der Wirtsgesteine ohne technische Maßnahmen hinsichtlich der Gasbildung wie folgt zusammengefasst werden, die jedoch nicht als absolutes Kriterium für eine Standortwahl aufzufassen ist:

Unabhängig von den radiologischen Konsequenzen sind unter dem Gesichtspunkt der Gasbildung beim Wirtsgestein Salinar Standorte zu bevorzugen, bei denen ein Wasserzutritt ausgeschlossen werden kann. Unter Berücksichtigung eines Bereiches mit einer sekundären Permeabilität/Porosität aufgrund des Überschreitens des lithostatischen Druckes im Endlager ergibt sich eine Eindringtiefe für das Gas, die durch die Gasmenge und das zur Verfügung stehende Speichervolumen des Einlagerungsbereiches bestimmt wird. Eine große Mächtigkeit der Salzschiefer zwischen Einlagerungsbereich und Deckgebirge sowie eine große Grundfläche des Einlagerungsbereiches wirken sich günstig auf das Gasspeichervermögen und die Sicherheit der geologischen Barriere aus. Mit zunehmender Teufe und dadurch zunehmendem lithostatischen Druck reduzieren sich das Gasvolumen und damit die sich einstellende Eindringtiefe. Dem positiven Effekt des geringeren Volumens bei größeren Teufen stehen die üblicherweise höheren Konvergenzraten und damit sich schneller verringern dem Speichervolumen als negative Effekte gegenüber. Die dargestellten Abhängigkeiten der Parameter (Mächtigkeit der Barriere Endlager-Deckgebirge, Grundfläche des Einlagerungsbereiches, Teufe und Konvergenz) verdeutlichen, dass erst nach Kombination dieser geometrischen und geologischen Größen Aussagen hinsichtlich der Eignung eines Standortes unter dem Aspekt der Gasspeicherung möglich werden.

Zur Identifizierung und Bewertung von möglichen technischen Maßnahmen werden Rechnungen mit Parametervariationen durchgeführt. Hierbei ist festzustellen, dass der Nachweis eines vollständigen Einschusses der Gase auch bei der Modifikation verschiedener Parameter nicht vollständig erbracht werden kann. Unter günstigen Voraussetzungen kann aber ein Anteil von bis zu mehr als 50% der Gase im Endlager selbst gespeichert werden. Hierbei wäre es günstig bzw. erforderlich,

- ein Versatzmaterial mit einer definierten, luftgefüllten Restporosität einzubringen,
- ein größeres Streckenanfangsvolumen bereitzustellen (z.B. Zusatzstrecken allein für Gasspeicherung)

- die entstehende Gasmenge zu reduzieren
- das Endlager in größeren Teufen anzulegen (Speicherdruck).

Zu einer Reduzierung der gebildeten Gasmenge ist anzumerken, dass für ein Endlager im Salinar die Gasbildung durch das Wasserangebot begrenzt wird. Darum stehen Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserangebotes im Vordergrund. Der größte Teil des Wassers liegt als Porenwasser in den zementierten Abfällen vor. Durch eine Änderung der Zementrezeptur kann der Wassergehalt verringert werden. Der Einsatz eines wasserfreien Fixierungsmittels ermöglicht eine starke Reduzierung des Wasserangebotes und damit der Gasbildung.

Durch Maßnahmen wie z.B. Bereitstellung von Speichervolumen oder Reduzierung des internen Wasserangebotes wird gewährleistet, dass ein großer Teil der entstehenden Gase im Endlager gespeichert wird und nur noch für die verbleibenden Reste von der Speicherfähigkeit des Wirtsgesteins Gebrauch gemacht werden muss. Dies bedeutet, dass bei der Realisierung eines Endlagers vorzugsweise eine Kombination der dargestellten technischen Maßnahmen zur Gasspeicherung zu betrachten ist.

Damit haben die hier durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass für Endlager im Salinar die Nachweisführung der Gasspeicherung unter Einbeziehung der diskutierten Maßnahmen insgesamt als Erfolgshöflich anzusehen ist.

Berechnungsergebnisse für die nicht-salinaren Wirtsgesteine

Für die Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung (Konzept Entweichen von Gas) werden Durchbruchzeiten für einen gasförmigen und einen flüssigen Tracer als Indikatoren für die Beherrschbarkeit der Gasbildung errechnet. Unter Verwendung der zu Grunde gelegten Bandbreiten für die nicht-salinaren Wirtsgesteine wird deutlich, dass mit zunehmender Durchlässigkeit der Wirtsgesteine der Einfluss der Gasbildung auf die untersuchte Durchbruchzeit abnimmt.

Generell wirkt sich eine lange Transportzeit (Durchbruchzeit) vom Endlager ins Deckgebirge und in die Biosphäre positiv bezüglich der zu erwartenden radiologischen Konsequenzen aus. Unabhängig von dem Einfluss der Gasbildung sind zur Erhöhung der Durchbruchzeiten also solche Standorte positiv zu bewerten, deren antiklinale Struktur oder strukturelle Fallen mit ausreichendem Speichervolumen den Transport von Gasen und von Flüssigkeiten verhindern oder zumindest behindern.

Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass unter dem Aspekt der Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung die betrachteten potenziellen Wirtsgesteine Salinar, Tonstein, kristalline Gesteine sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung unter Zugrundelegung des „Ein-Endlager-Konzeptes“ sowie weiterer Annahmen und Randbedingungen unter dem Aspekt der Gasbildung als geeignet einzustufen sind, d.h. es sind keine Ausschlussmerkmale für einzelne Wirtsgesteine ermittelt worden.

Bei der Durchführung eines Sicherheitsnachweises wird das Szenario „Gasbildung“ beim Wirtsgestein Salinar eine zentrale Rolle spielen. Neben der Mächtigkeit des Wirtsgesteins/dem Abstand Endlager-Deckgebirge und dem Umfang der Zone erhöhter Porosität (Sekundärpermeabilität/-porosität) bildet die Gesamtgasmenge eine weitere bedeutende Einflussgröße für die Standortauswahl und das Nachweisverfahren für das Salinar. Dies bedeutet, dass bei der Realisierung eines Endlagers die Möglichkeiten der Gasspeicherung nicht isoliert betrachtet werden sollten, sondern immer in Kombination mit den Möglichkeiten der Begrenzung der Gasbildung.

Bei den Wirtsgesteinen Tonstein, Kristallin und den sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung zeigt sich, dass Gasmenge und Gasbildungsrate einen Einfluss auf den zu erwartenden Druckaufbau im Endlager haben. Auch haben Gasmenge und Gasbildungsrate einen Einfluss auf die Freisetzung von radioaktiven Stoffen sowohl in der flüssigen als auch in der Gasphase. In Anbetracht der vielen anderen Einflussgrößen, wie z.B. hydraulische und geometrische Eigenschaften des Wirtsgesteins, wird der Einfluss der Gasbildung auf die Nachweisführung jedoch als geringer eingestuft als im Salinar.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Zusammenfassung..... | 3 |
| Tabellenverzeichnis | 9 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 10 |
| Glossar | 11 |
| Abkürzungsverzeichnis | 15 |
| | |
| 1 Einleitung | 16 |
| 1.1 Generelle Methodik der Sicherheitsanalyse für Endlager..... | 18 |
| 1.2 Einordnung der durchgeführten Arbeiten | 21 |
| 2 Analyse der relevanten Gasbildungsmechanismen | 23 |
| 2.1 Gasbildung durch anaerobe Metallkorrosion..... | 23 |
| 2.2 Gasbildung durch mikrobielle Prozesse | 24 |
| 2.3 Radiolytische Gasbildung | 25 |
| 2.4 Weitere gasbildende Prozesse | 25 |
| 2.5 Gasbindende Prozesse | 25 |
| 2.6 Relevanz der Gasbildungsprozesse | 26 |
| 3 Analyse der für die Gasbildung maßgeblichen Szenarien..... | 27 |
| 3.1 Vorgehensweise | 27 |
| 3.2 Gasbildung in durchgeführten Sicherheitsanalysen | 27 |
| 3.3 „Features, Events and Processes (FEPs)“ der Gasbildung und deren Auswirkungen..... | 28 |
| 3.4 Szenarien zur Gasbildung und deren Auswirkungen | 29 |
| 3.5 Bewertungsmatrix für die ausgewählten Szenarien | 31 |
| 3.6 Berücksichtigung der internen und externen Gasbildung | 31 |
| 4 Daten zur Bewertung der Gefährdung der Endlagersicherheit durch Gasbildung | 33 |
| 4.1 Modellinventar | 33 |
| 4.2 Materialparameter für die Wirtsgesteine | 35 |
| 4.3 Einlagerungskonzepte und generische Endlager..... | 37 |
| 4.4 Referenzszenarien für die Gasbildung..... | 39 |
| 4.4.1 Wirtsgestein Salinar (steile oder flache Lagerung)..... | 39 |
| 4.4.2 Wirtsgestein Tonstein | 39 |
| 4.4.3 Wirtsgestein Kristallin | 40 |
| 4.4.4 Wirtsgestein „sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung“..... | 41 |
| 4.5 Gasbildung | 42 |
| 4.5.1 Gasbildung der wärmeentwickelnden Abfälle | 42 |
| 4.5.2 Gasbildung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle..... | 43 |
| 5 Entwicklung von Nachweiskonzepten zur Beherrschbarkeit der Gasbildung für potenzielle Wirtsgesteine..... | 45 |
| 5.1 Nachweiskonzepte und Rechenmodelle | 45 |
| 5.1.1 Konzept der „Gasspeicherung“ | 47 |
| 5.1.2 Konzept „Entweichen von Gas“ | 50 |
| 5.2 Anwendung der Nachweiskonzepte..... | 52 |
| 5.2.1 Salinare Wirtsgesteine..... | 52 |
| 5.2.2 Nicht-salinare Wirtsgesteine | 56 |
| 5.3 Bewertung der Ergebnisse | 62 |
| 5.3.1 Eignung der Wirtsgesteine/Geosysteme als Endlagerstandorte unter dem Aspekt der Gasbildung | 62 |
| 5.3.2 Rolle der Gasbildung bei der Führung eines Sicherheitsnachweises | 63 |
| 6 Bewertung der Realisierbarkeit der Nachweiskonzepte | 65 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.1 | Übertragung der Auslegung von Gasspeichern auf die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe..... | 65 |
| 6.1.1 | Gasspeicherung im Geosystem Salinar..... | 67 |
| 6.1.2 | Speicherung im Wirtsgestein..... | 69 |
| 6.1.3 | Schlussfolgerung zu den technischen Maßnahmen zur Gasspeicherung..... | 70 |
| 6.2 | Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ - günstige struktureologische Eigenschaften für den Gastransport..... | 71 |
| 7 | Konkretisierung von Maßnahmen hinsichtlich der Abfallbehandlung und – konditionierung zur Reduzierung der Gasmengen im Endlager..... | 74 |
| 7.1 | Anforderungen an die Konditionierung aus den Nachweiskonzepten für die untersuchten Wirtsgesteine..... | 74 |
| 7.1.1 | Nachweiskonzept für das Salinar..... | 74 |
| 7.1.2 | Nachweiskonzept für nicht-salinare Wirtsgesteine..... | 75 |
| 7.2 | Modellinventar der konditionierten Abfälle..... | 75 |
| 7.2.1 | Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung..... | 76 |
| 7.2.2 | Wärmeentwickelnde Abfälle..... | 77 |
| 7.3 | Maßnahmen zur Verringerung der Gasbildung..... | 77 |
| 7.3.1 | Abfallbehandlung..... | 77 |
| 7.3.2 | Abfallverpackung..... | 78 |
| 7.4 | Zusammenfassende Schlussfolgerungen für eine Reduzierung der Gasbildung..... | 79 |
| 8 | Formulierung von Anforderungen und Aufgaben hinsichtlich der Umsetzung der vorgeschlagenen Nachweiskonzepte..... | 80 |
| 8.1 | Empfehlungen für Standortauswahlverfahren..... | 80 |
| 8.1.1 | Salinares Wirtsgestein..... | 80 |
| 8.1.2 | Nicht-salinare Wirtsgesteine..... | 83 |
| 8.1.3 | Zusammenfassung der relevanten Kriterien für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung..... | 85 |
| 8.2 | Empfehlungen für die Nachweisführung in Genehmigungsverfahren..... | 87 |
| 8.2.1 | Nachweisführung „Speicherung“..... | 87 |
| 8.2.2 | Nachweisführung „Entweichen von Gas“..... | 87 |
| 8.3 | Themenschwerpunkte für weiterführende Untersuchungen..... | 88 |
| 8.3.1 | Generische Endlager..... | 88 |
| 8.3.2 | Modelle und verwendete Parameter..... | 88 |
| 9 | Wirtsgesteine im Vergleich..... | 95 |
| 9.1 | Salinare Wirtsgesteine..... | 95 |
| 9.1.1 | Speichermöglichkeiten..... | 95 |
| 9.1.2 | Reduzierung der Gasmenge..... | 96 |
| 9.2 | Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin und sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung..... | 96 |
| 9.3 | Zusammenfassende Bewertung..... | 97 |
| 10 | Literaturverzeichnis..... | 99 |
| | Gesamtblattzahl der Unterlage, einschließlich aller Anhänge:..... | 102 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 3-1 | Übersicht über die betrachteten Endlagerprojekte mit deren Randbedingungen..... | 28 |
| Tabelle 3-2 | Berücksichtigung der Gasbildung und des Druckaufbaus in verschiedenen Endlagerprojekten und Sicherheitsanalysen | 31 |
| Tabelle 3-3 | In den verschiedenen Endlagern zugrunde gelegte Gasbildung..... | 32 |
| Tabelle 4-1 | Prognose des Gesamtvolumens und des Inventars der relevante Radionuklide in den bis zum Jahr 2080 anfallenden radioaktiven Abfälle [BfS 2005]..... | 34 |
| Tabelle 4-2 | Wesentliche Wirtsgesteinsparameter | 36 |
| Tabelle 4-3 | Zusammenstellung des Flächenbedarfes und des anfänglichen Porenvolumens für die verschiedenen generischen Endlager | 38 |
| Tabelle 4-4 | Vereinfachte Abschätzung der Gasbildung infolge Korrosion der Behälter der wärmeentwickelnden Abfälle im Salinar [BfS 2005] bei vollständiger Umsetzung..... | 42 |
| Tabelle 4-5 | Vereinfachte Abschätzung der Gasbildung infolge Korrosion der Behälter der wärmeentwickelnden Abfälle in nicht-salinaren Wirtsgesteinen [BfS 2005]..... | 43 |
| Tabelle 4-6 | Gesamtes Gasvolumen aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (ohne Berücksichtigung von gasbindenden Reaktionen) [BfS 2005]..... | 43 |
| Tabelle 5-1 | Eingangsparameter für Nachweiskonzept Gasspeicherung im Endlager | 53 |
| Tabelle 5-2 | Tonstein, Eingangsparameter für den Referenzfall | 57 |
| Tabelle 5-3 | Tonstein, Ergebnisse der Modellrechnungen | 57 |
| Tabelle 5-4 | Kristallin, Eingangsparameter für Referenzfall | 58 |
| Tabelle 5-5 | Kristallin, Ergebnisse der Modellrechnungen | 59 |
| Tabelle 5-6 | Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, Eingangsparameter für Referenzfall..... | 60 |
| Tabelle 5-7 | Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, Ergebnisse der Modellrechnungen | 61 |
| Tabelle 5-8 | Eignung der Wirtsgesteine/Geosysteme gemäß untersuchtem Nachweiskonzept für Endlager hinsichtlich Gasbildung ohne technische Maßnahmen..... | 63 |
| Tabelle 5-9 | Einfluss von Gasmenge / Gasbildungsrate auf Ergebnisse eines Sicherheitsnachweises ohne technische Maßnahmen | 64 |
| Tabelle 6-1 | Eignung des Salinars mit definiertem Restporenvolumen für ein Endlager hinsichtlich Gasbildung | 69 |
| Tabelle 6-2 | Günstige Standorteigenschaften im Hinblick auf die Auswirkungen der Gasbildung..... | 73 |
| Tabelle 7-1 | Maximale Gasvolumina, die sich aus Metallen und Organika in den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und den wärmeentwickelnden Abfällen (Inventar für nicht-salinare Wirtsgesteine) bilden können (Zahlen basierend auf dem Modellinventar) und unbegrenzter Wasserverfügbarkeit | 76 |
| Tabelle 7-2 | Anteile der Abfälle, der Fixierungsmittel und der Verpackung am maximalen Gasvolumen aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Zahlen basierend auf dem Modellinventar) und unbegrenzter Wasserverfügbarkeit | 76 |
| Tabelle 7-3 | Masse und Anteil der verschiedenen Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle gemäß den an die Wirtsgesteine angepassten Modellinventaren..... | 77 |
| Tabelle 8-1 | Kriterien für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung..... | 86 |
| Tabelle 8-2 | Modellierung der Gasbildung, Prozesse, Annahmen und Bewertung | 89 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 8-3 | Nachweisführung „Gasspeicherung im Endlager im Salinar“, Prozesse, Annahmen und Bewertung..... | 91 |
| Tabelle 8-4 | Nachweisführung „Gasspeicherung im Wirtsgestein (Salinar)“, Prozesse, Annahmen und Bewertung..... | 92 |
| Tabelle 8-5 | Nachweisführung „Entweichen von Gas“, Prozesse, Annahmen und Bewertung..... | 94 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1-1 | Schematische Darstellung des iterativen Vorgehens bei einer Sicherheitsanalyse in Anlehnung an [IAEA 1999]..... | 19 |
| Abbildung 1-2 | Zuordnung der Teilaufgaben als Bestandteil einer Sicherheitsanalyse..... | 22 |
| Abbildung 5-1 | Vorgehensweise zum Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung | 46 |
| Abbildung 5-2 | Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse zum Nachweiskonzept der Gasspeicherung. Das Schema der Berechnung der Gasbildung (Gesamtmenge und Rate) ist unabhängig vom Nachweiskonzept..... | 49 |
| Abbildung 5-3 | Schematische Darstellung der Modellrechnungen zum Nachweiskonzept des Entweichens von Gas. Das Schema der Berechnung der Gasbildung (Gesamtmenge und Rate) ist unabhängig vom Nachweiskonzept (siehe Abbildung 5-2). | 51 |
| Abbildung 5-4 | Salinar, steile/flache Lagerung 800 m Teufe, vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle: Entwicklung des (relativen) Drucks im Endlager für verschiedene Parametervariationen..... | 55 |
| Abbildung 5-5 | Schematische Darstellung des Modells des Geosystems Tonstein..... | 56 |
| Abbildung 6-1 | Spannungsaufbau in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne mit überlithostatischem Soledruck im oberen Kavernenbereich (x =Teufe, ρ =Dichte, g =Erdbeschleunigung) [Rokahr 2003] | 66 |
| Abbildung 8-1 | Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der zu speichernden Gasmenge und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche in 800 m Endlagerteufe im Salinar..... | 81 |
| Abbildung 8-2 | Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der Teufe und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche im Salinar | 82 |
| Abbildung 8-3 | Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der Teufe und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche im Salinar..... | 83 |

Glossar

| | |
|----------------------------|---|
| Abfälle | Synonym für „radioaktive Abfälle“ |
| Abfallbehälter | Behälter zur Aufnahme eines Abfallprodukts (z.B. Fass, Betonbehälter, Gussbehälter, Container) |
| Abfallbehandlung | Verarbeitung von radioaktiven Rohabfällen zu Abfallprodukten (z.B. durch Verfestigen, Einbinden, Vergießen oder Trocknen) |
| Abfallgebinde | Endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Verpackung |
| Abfallprodukt | Verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung |
| Adsorption | auch: Sorption; Anhaften einer Substanz an einer Festkörperoberfläche |
| Aerobe Korrosion | Korrosion in Gegenwart von Luftsauerstoff |
| Anaerobe Metallkorrosion | Korrosion von Metallen unter anaeroben Bedingungen, d.h. ohne Verfügbarkeit von Sauerstoff |
| Antiklinale Struktur | Sattelstruktur, aufgewölbte Gesteinsschichten |
| Aquifer | Lagerstätte, eine Gruppe von Lagerstätten oder ein Teil derselben, die vollständig mit Wasser gefüllt sind |
| Begrenzende Störung | Störung, die die physikalische Begrenzung eines Gesteinskörpers bildet |
| Bestimmungsgemäßer Betrieb | Einlagerungsbetrieb, bei dem keine Abweichungen von den geplanten Betriebsabläufen auftreten |
| CASTOR-Behälter | Behälter für die Lagerung und den Transport abgebrannter Brennelemente. (Castor = cask for storage and transport of radioactive material) |
| Closure | Senkrechter Abstand zwischen dem höchsten Punkt einer geologischen Speicherstruktur und dem Spill-Point |
| Deckgebirge | Alle Gesteine, die eine geologische Formation überlagern |
| Deckschicht (caprock) | Gasdichte Schicht, die eine poröse und permeable Formation überdeckt |
| Edukt | Ausgangsstoff einer chemischen Reaktion |
| Ein-Endlager-Konzept | alle Arten radioaktiver Abfälle werden gemeinsam in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen endgelagert |
| Einlagerungsbetrieb | Gesamtheit der betrieblichen Tätigkeiten zur Einlagerung der Abfälle im Endlager |
| Endlagerungsbedingungen | Unter Berücksichtigung von standortspezifischen Gegebenheiten festgelegte Anforderungen an endzulagernde Abfallgebinde |
| Ereignis | Störung/Abweichung von der planmäßigen Entwicklung in der Nachbetriebsphase |
| Externe Gasbildung | Gasbildung, verursacht durch aus dem Wirtsgestein zufließendes Wasser und (zunächst) Korrosion der Abfallgebinde |
| Fermentation | mikrobielle Abbaureaktion unter Luftausschluss |

| | |
|---|--|
| Fixierung | Verfestigen, Einbinden oder Vergießen von radioaktivem Abfall |
| Fixierungsmittel | Material zur Fixierung von radioaktivem Abfall (z.B. Glas, Zement/ Beton, Bitumen, Kunststoff) |
| Flüssigkeit | Flüssigphase in der Grube und nach dem Auspressen aus der Grube, ohne spezifizierte Angaben zum Chemiesmus |
| Formation | Gesteinskörper, der von einer so homogenen Lithologie gekennzeichnet ist, dass er eine erkennbare geologische Einheit bildet. |
| Frac | Künstlich erzeugtes Aufreißen des Gebirges |
| Gasdichtheit | Einhaltung einer minimalen Leckrate in einem zugelassenen Prüfverfahren |
| Generisches Endlager | Endlagerkonzept ohne konkrete Festlegung des Standorts |
| Geosystem | Beschreibung der betrachteten Wirtsgesteine (Salinar, Ton/Tonstein, Kristallin und sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung) mittels hydrogeologischer, geologischer, mechanischer und geometrischer Parameter |
| Hydrolyse | Spaltung einer Substanz durch die chem. Reaktion mit Wasser |
| Inhibition | Hemmung oder Verzögerung einer chemischen Reaktion |
| Interne Gasbildung | Gasbildung, verursacht durch Umsetzung von Wasser, das mit Abfällen und Versatzstoffen in das Endlager eingebracht wird, mit den Abfallinhaltsstoffen und Behältermaterialien |
| Kammer | Untertägiger Hohlraum |
| Kanister | Metallischer Abfallbehälter |
| Kapillardruck | Druckdifferenz zwischen der nicht benetzenden und der benetzenden Phase im porösen Gestein |
| Kapillarer Schwellendruck | Bei homogenem Gebirge oder Gestein der Überdruck, den Gas im Vergleich zu Wasser benötigt, um in die größten Poren einzudringen |
| Kaverne | Gesolter Hohlraum im Salinar |
| Kohlenwasserstofflagerstätte | Poröses und permeables Gestein im Untergrund mit arealen und vertikalen Grenzen, die durch physikalische und geologische Faktoren bedingt sind. Sie enthält flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe, die in Druckzusammenhang stehen. |
| Kohlenwasserstoffvolumen in der Lagerstätte | Gesamte in einer Lagerstätte enthaltene Kohlenwasserstoffmenge, ausgedrückt als Volumen bei Standard- oder Normbedingungen |
| Konditionierung | Herstellung von Abfallgebinden durch Verarbeitung und/oder Verpackung von radioaktivem Abfall |
| Konsequenzanalyse | Quantitative Ermittlung der radiologischen Auswirkungen eines Endlagers und Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen |
| Kristalline Gesteine / Kristallin | Unter dem Begriff kristalline Gesteine werden i.A. die Gesteinsprodukte der Regionalmetamorphose (z.B. Gneise, Granulite, Amphibolite aber auch Marmore) und Gesteinsprodukte aus magmati- |

| | |
|---|--|
| | schen Prozessen, welche ein deutliches Kristallgefüge aufweisen (d.h. saure oder basische Plutonite, z.B. Granit, Diorit, und Ergussgesteine, z.B. Rhyolith, Basalt) zusammengefasst |
| Lithologie | Untersuchung und Beschreibung von Gesteinen hinsichtlich Farbe, mineralischer Zusammensetzung, Korneigenschaften und Kristallisation. |
| Lösungen | Flüssigphase in der Grube und nach dem Auspressen aus der Grube, wenn chemische Zusammensetzung bedeutsam |
| Mikrobielle Zersetzung organischer / kohlenwasserstoffhaltiger Abfallbestandteile | Abbau von organischen Bestandteilen (z.B. Kohlenwasserstoffe) durch Mikroorganismen Synonym: „mikrobielle Zersetzung“ |
| Opalinuston | toniges Sedimentgestein, benannt nach den häufigen Fossilienfunden des Ammoniten <i>Leioceras opalinum</i> |
| Perkolieren | Durchdringung des Salzgebirges mit Sole - ohne Fracbildung. |
| POLLUX-Behälter | Behälter zur direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Namensgebung in Bezug auf CASTOR-Behälter (Transport- und Zwischenlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente) in Anlehnung an die Zwillingbrüder Castor und Pollux der griechischen Sage |
| Radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung | Abfälle, deren Wärmeentwicklung infolge radioaktiven Zerfalls vernachlässigbar ist Synonym: „vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle“ |
| Radiolyse | Zersetzung einer Substanz unter Einwirkung ionisierender Strahlung |
| Restfeuchtigkeit | Die mit den Abfällen oder dem Versatz in das Grubengebäude mit eingebrachte Flüssigkeit |
| Rohabfall | Unverarbeiteter radioaktiver Abfall |
| Salzgestein / Salinar | Salzgesteine oder auch Evaporite bestehen überwiegend aus Chloriden und Sulfaten der Alkali- und Erdalkalimetalle, die sich nach Überschreiten des Löslichkeitsprodukts aus verdunstenden wässrigen Lösungen ausscheiden. |
| Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung | Hierunter werden in diesem Projekt jegliche Gesteinsverbände im tieferen Untergrund zusammengefasst, welche durch eine weitläufig durchgehende Einheit aus Ton bzw. Tonstein überlagert werden. Dabei müssen dieser Gesteinsverband und die überlagernde Toneinheit nicht direkt aneinander grenzen. |
| Spezifische Oberfläche | Oberfläche pro Masseneinheit [m ³ /kg] |
| Spillpoint | Tiefster Punkt einer Speicherformation, unterhalb dessen gasförmige Stoffe entweichen. |
| Störfall | Störung des planmäßigen Betriebs bzw. der planmäßigen Entwicklung |
| Ton/Tonstein | Ton ist ein klastisches Lockergestein mit einem Korndurchmesser bis 0,002 mm. Verfestigte Tone bezeichnet man analog dem Beg- |

| | |
|--|---|
| | riff Sandstein als Tonstein. |
| Transportbehälter | Wiederverwendbarer Behälter, der nur für den Transport der Abfälle verwendet wird |
| Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | Synonym für „Radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ |
| Verpackung | Gesamtheit der ein Abfallprodukt umschließenden nicht wieder verwendbaren Behälter |
| Versatz | Sammelbegriff für eingebrachtes Material zum Versetzen von Hohlräumen |
| Wärmeentwickelnde Abfälle | Synonym für “wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle“ |
| Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle | Abfälle, deren Wärmeentwicklung durch den radioaktiven Zerfall nicht vernachlässigbar ist (BE, HAA) Synonym: „wärmeentwickelnde Abfälle“ |
| Wässer | Flüssigphase bei Zutritt in die Grube |
| Wirtsgestein | Gestein, in dem das Endlager angelegt wird |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|---|
| BE | Brennelemente |
| BFA | Braunkohlenfilterasche |
| ERAM | Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben |
| FEP | Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (englisch: Features, Events and Processes); von einzelnen Autoren wird auch die deutsche Abkürzung ZEP verwendet |
| HAA/HAW | hochaktive Abfälle |
| HAW/BE | hochradioaktiver Abfall / Brennelemente |
| KBS-3 | schwedisches Entsorgungskonzept für BE |
| LMA | langlebige mittelaktive Abfälle |
| MAW (Q) | mittelradioaktiver Abfall |
| MgO | Magnesiumoxid |
| NAGRA | Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz) |
| NBA | Normalbetonausführung |
| NEA | Nuclear Energy Agency |
| OPA | Opalinuston |
| SAFIR | Safety Assessment and Feasibility Interim Report (Zwischenbericht zur Sicherheitsanalyse und Machbarkeit, Belgien) |
| SM | Schwermetall |
| SMAA/SMA | schwach- und mittelaktive Abfälle |
| SFL | Swedish Deep Repository for Spent Fuel |
| SFR | Swedish Final Repository (schwedisches Endlager) |
| STP | Standard-Temperatur und –Druck (273,15 K und 0,1 MPa) |
| TA | Teilaufgabe dieses Auftrags/Projekts |
| TRU | Transuran |
| vWA | vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle |
| WA | wärmeentwickelnde Abfälle |
| WIPP | Waste Isolation Pilot Plant |

1 Einleitung

Ziel des Teilprojekts der sicherheitstechnischen Einzelfragen WS 1009 „Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit“ ist, die möglichen Gasbildungsmechanismen und ihre Wirkung in einem Endlager systematisch zu analysieren und darauf aufbauend ein Nachweiskonzept für die Beherrschbarkeit der Gasbildung zu entwickeln. Dabei sind sowohl deutsche als auch internationale Untersuchungsergebnisse heranzuziehen, die jeweils an die in Deutschland vorliegenden bzw. vorgegebenen Randbedingungen zu adaptieren sind. Die hierzu notwendigen, aber noch nicht durch verfügbare Ergebnisse abgedeckten Einzelnachweise sind zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Machbarkeit zu bewerten.

Die Untersuchungen erstrecken sich auf die potenziellen Wirtsgesteine Salinar, Ton/Tonstein¹, sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung sowie kristalline Gesteine und erfolgen unter Zugrundelegung des „Ein-Endlager-Konzeptes“ (d.h. alle Arten radioaktiver Abfälle werden gemeinsam in einem Endlager in tiefen geologischen Formationen endgelagert).

Daneben sind die mit dem Ein-Endlager-Konzept verbundenen Vor- und Nachteile gegenüber anderen bisher in Deutschland praktizierten und geplanten Konzepten darzustellen, soweit diese Unterschiede Konsequenzen der Gasbildung sind.

Zur Bearbeitung dieser Aufgabenschwerpunkte ist das Gesamtvorhaben in die sieben Teilaufgaben (TA)

- TA 1: Analyse der relevanten Gasbildungsprozesse [Colenco 2003a]
- TA 2: Analyse der für die Gasbildung maßgeblichen Szenarien [Colenco 2003c]
- TA 3: Daten zur Bewertung der Gefährdung der Endlagersicherheit durch die Gasbildung [Colenco 2003b]
- TA 4: Nachweiskonzepte und deren Umsetzung zur Bewertung der Gefährdung der Endlagersicherheit durch die Gasbildung [Colenco 2004a]
- TA 5: Bewertung der Realisierbarkeit der Nachweiskonzepte [Colenco 2004b]
- TA 6: Formulierung von Anforderungen und Aufgaben hinsichtlich der Umsetzung der vorgeschlagenen Nachweiskonzepte [Colenco 2004d]
- TA 7: Konkretisierung von Maßnahmen hinsichtlich der Abfallbehandlung und –konditionierung zur Reduzierung der Gasmenge im Endlager [Colenco 2004c]

untergliedert.

In diesem Abschlussbericht werden die Arbeitsergebnisse des Teilprojektes WS 1009 „Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit“ in verkürzter Form dargestellt. Zum vertieften Verständnis des Vorgehensweise, der getroffenen Annahmen, der

¹ Während der Projektbearbeitung wurde festgestellt, dass Tonformationen für Deutschland aufgrund mangelnder geeigneter Standorte keine Wirtsgesteinsoption darstellt. Daher wird nur noch Tonstein als potenzielles Wirtsgestein weiter betrachtet.

Detailergebnisse sowie deren Interpretation können die Berichte zu den Teilaufgaben TA 1 bis TA 7 [Colenco 2003 a-c], [Colenco 2004 a-d] herangezogen werden.

Zur Einordnung der in diesem Teilprojekt zu Grunde gelegten Nachweisführung und deren Ergebnisse wird in dem Kapitel 1.1 einleitend der generelle Aufbau von Langzeitsicherheitsanalysen skizziert. Zur Abgrenzung zu den Langzeitsicherheitsanalysen werden in Kapitel 1.2 die in diesem Teilprojekt durchgeführten Arbeiten auf der Basis des abgeleiteten Ablaufdiagramms dargestellt.

In einem Endlager für radioaktive Abfälle können verschiedene Prozesse zur Bildung von Gasen führen. Die wesentlichen Prozesse der Gasbildung und deren Grundlagen werden in Kapitel 2 beschrieben.

Zur Identifizierung der verschiedenen Gasbildungsszenarien in den zu betrachtenden Wirtsgesteinen werden in Kapitel 3 bestehende Sicherheitsanalysen für Endlagerprojekte in verschiedenen Ländern ausgewertet.

In Kapitel 4 werden die für die Modellierung mit vereinfachenden Modellen (vgl. Kapitel 5) erforderlichen Eingangsdaten zusammengestellt bzw. für diesen Zweck ermittelt. Zu den Eingangsdaten zählen einerseits das Modellinventar (Abfallkategorien, -mengen und -volumina, Behältertypen, Radionuklidinventar, Inventar der gasbildenden Stoffe) und die sich daraus ergebenden, aus den Abfällen maximal zu bildenden Gasmengen (Kapitel 4.5) sowie andererseits die für die Modellierung der Auswirkungen der Gasbildung wesentlichen Parameter der Wirtsgesteine (Kapitel 4.2). Auf der Basis bestehender Endlagerkonzepte/-projekte in verschiedenen Ländern werden in Kapitel 4.3 generische Endlagerkonzepte für die unterschiedlichen Wirtsgesteine entworfen und in Kapitel 4.4 die Auswirkungen von Referenzszenarien auf die Gasbildung diskutiert.

In Kapitel 5 werden die beiden Nachweiskonzepte „Speicherung“ für undurchlässige saline Gesteine und „Entweichen von Gas“ für vergleichsweise durchlässigere Wirtsgesteine zum Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung dargestellt. Auf deren Basis werden vereinfachende Modellrechnung inklusive Sensibilitätsbetrachtungen durchgeführt, die Ergebnisse bewertet und Konsequenzen diskutiert.

Innerhalb des Kapitels 6 wird dargestellt, inwieweit durch zusätzliche technische Maßnahmen im Endlager oder durch Anforderungen an das Wirtsgestein/Deckgebirge bei der Standortwahl die Auswirkungen der Gasbildung begrenzt werden können.

Die Möglichkeiten zur Reduzierung der Gasmenge im Endlager durch die Abfallbehandlung und -konditionierung werden in Kapitel 7 diskutiert und hinsichtlich ihres Beitrages zur Reduzierung bewertet.

Eine übergreifende Bewertung der Anforderungen an die Standortauswahl- und die Genehmigungsverfahren wird in Kapitel 8 durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Kapiteln 6 und 7 werden in Kapitel 8.1 Empfehlungen für die Standortauswahl und in Kapitel 8.2 Empfehlungen für die Nachweisführung zur Berücksichtigung der Gasbildung in Genehmigungs-

verfahren formuliert. In Kapitel 8.3 werden Themenschwerpunkte, Annahmen und Randbedingungen, die für weiterführende Arbeiten vorrangig betrachtet werden sollten, zusammengestellt.

Ein zusammenfassender Vergleich der betrachteten Wirtsgesteine bezüglich der Auswirkungen der Gasbildung erfolgt in Kapitel 9.

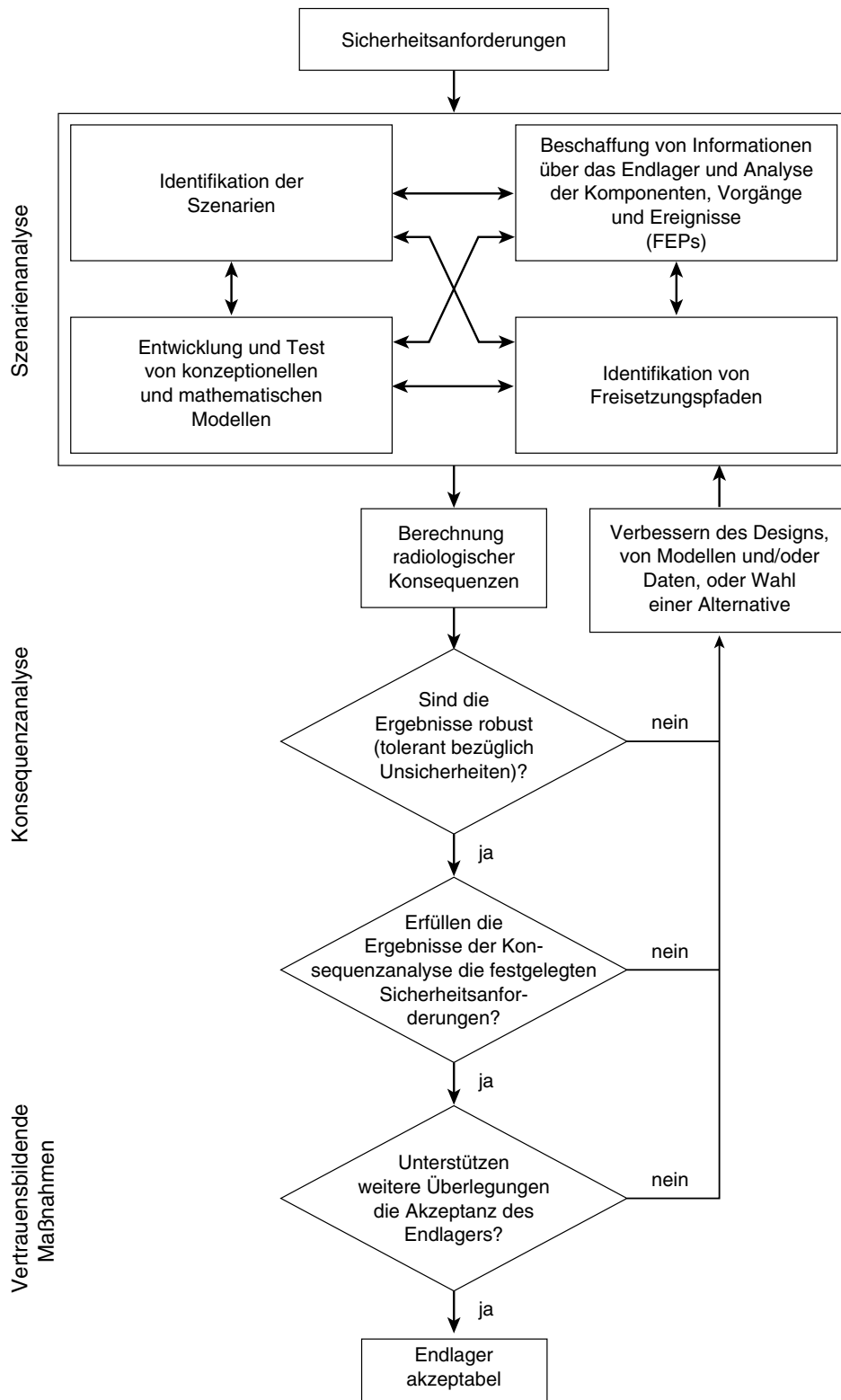
1.1 Generelle Methodik der Sicherheitsanalyse für Endlager

Vor der Realisierung eines Endlagers für radioaktive Abfälle muss die Sicherheit für Mensch und Umwelt überzeugend nachgewiesen werden können. Ausgehend von einem Entwurf des gesamten Endlagers, in dem die wesentlichen Merkmale der einzelnen Komponenten sowie deren Wechselwirkungen aufgezeigt sind, ist die Analyse möglicher zukünftiger Entwicklungen des Endlagers und der daraus resultierenden Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ein wesentlicher Bestandteil einer Langzeitsicherheitsanalyse.

In Abhängigkeit vom Entwicklungsstand eines Endlagerprojektes und der jeweils zur Verfügung stehenden Daten werden mit der Durchführung einer Sicherheitsanalyse unterschiedliche Ziele verfolgt. In der Anfangsphase (Konzeptphase) von standortbezogenen Projekten - aber auch bei generischen Endlagern - steht zunächst die prinzipielle Machbarkeit im Vordergrund. Die Ergebnisse dieser Sicherheitsanalyse dienen somit in erster Linie als eine Entscheidungshilfe für das weitere Vorgehen bei der Realisierung des Endlagers, indem z.B. Anforderungen an die Konditionierung der Abfälle, die Endlagerauslegung und die Art der technischen Barrieren formuliert werden. Mit zunehmendem Bearbeitungsstand und unter Berücksichtigung entsprechend detaillierteren Informationen über das Endlager sind die Ergebnisse erneut durchgeführter Sicherheitsbewertungen entscheidend z.B. bei der konkreten Auslegung der technischen Barrieren oder der Planung von Betriebsabläufen. Letztlich bildet nach Abschluss der Projektierung eines Endlagers eine umfassende Langzeitsicherheitsanalyse die Grundlage für das Genehmigungsverfahren.

Ausgehend von den Sicherheitsanforderungen sowie den zur Verfügung stehenden Daten und Informationen über das Endlagersystem besteht eine Langzeitsicherheitsanalyse aus den Komponenten Szenarienanalyse, Konsequenzanalyse und vertrauensbildende Maßnahmen (vgl. Abbildung 1-1). Vereinfacht dargestellt, dient die Szenarienanalyse dem *Zusammenstellen von relevanten Fragen*, die in etwa so lauten: "Welche radiologischen Auswirkungen folgen, wenn dies und/oder jenes passiert?". Ziel der Konsequenzanalyse ist die quantitative *Beantwortung* derartiger Fragen und die Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass auch alternative Einteilungen möglich sind, wie sie im Rahmen von Sicherheitsanalysen anderer Endlagerprojekte zu finden sind. Über die wesentlichen Arbeitsschritte, die bei einer Sicherheitsbewertung durchzuführen sind, herrscht in internationalen Fachkreisen jedoch Einvernehmen [NEA 1992].



3161/ta6/abbildung_2-1.eps/shu/02.06.05

Abbildung 1-1 Schematische Darstellung des iterativen Vorgehens bei einer Sicherheitsanalyse in Anlehnung an [IAEA 1999].

Szenarienanalyse

In den Zeiträumen, die in einer Sicherheitsbewertung betrachtet werden müssen, werden sich sowohl die geologischen als auch die technischen Barrieren verändern. Dies geschieht als Folge natürlicher Vorgänge, Wechselwirkungen des Endlagersystems mit der Umgebung und als Folge nicht geplanter menschlicher Aktivitäten, die nicht mit dem Bau und dem Betrieb des Endlagers in Zusammenhang stehen (vgl. Teilprojektes WS 1008 „Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit“, z.B. [Colenco 2004d]). Die Szenarienanalyse hat den Zweck, solche Ereignisse oder Prozesse zu identifizieren, die zu einer Strahlenexposition führen bzw. eine solche beeinflussen können.

Ausgangspunkt ist eine Bestandsaufnahme und Charakterisierung des gesamten Endlagersystems. Hierbei ist auf Art und Menge der Abfälle, die technischen Barrieren, den Standort des Endlagers und die sonstigen wesentlichen Merkmale einzugehen.

Darauf aufbauend ist im nächsten Schritt eine umfassende Liste von Ereignissen und Prozessen zusammenzustellen, die möglicherweise einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Endlagersystems haben. Solche Ereignisse und Prozesse werden in der Literatur als FEPs bezeichnet. FEPs steht für den englischen Ausdruck „Features, Events and Processes“ (deutsch: Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse). Als Ausgangspunkt bei der Zusammenstellung der relevanten FEPs ist die internationale und somit breit abgestützte FEP-Liste der NEA [NEA 1998] nützlich.

Die komplexe Wechselwirkung zwischen den FEPs, welche in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden, sowie die häufig unzureichende Präzisierung dieser FEPs führen zu einem breiten Spektrum von möglichen zukünftigen Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems. Um die Auswirkungen quantitativ zu erfassen, ist ein abdeckendes Spektrum von zu betrachtenden Szenarien zu definieren.

Ein Teilaspekt bei der Bestimmung der Szenarien ist die Identifikation der relevanten Ausbreitungspfade von Radionukliden in die Umwelt.

Konsequenzanalyse

In der Konsequenzanalyse werden die radiologischen Auswirkungen des Endlagersystems quantitativ ermittelt. Hierzu werden die Szenarien, welche in der Szenarienanalyse als relevant festgelegt wurden, zunächst getrennt voneinander untersucht. Anschließend folgt eine umfassende Bewertung.

Zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle sind Modelle notwendig, die eine Vorhersage der radiologischen Auswirkungen eines Endlagers auf Mensch und Umwelt ermöglichen. Im Rahmen der Konsequenzanalyse müssen daher geeignete Methoden zur Berechnung ausgewählt oder entwickelt werden. Für die wichtigsten Prozesse, die bei der Freisetzung von Radionukliden eine Rolle spielen, sind die nötigen Grundlagen zur Beschreibung seit langem bekannt, und es existieren darauf aufbauend Modelle, die je nach Art und Umfang der verfügbaren Daten Vorhersagen für das Verhalten von Endlagern erlauben.

Alle Ergebnisse der Modellrechnungen sind mit Unsicherheiten behaftet. Ungenauigkeiten lassen sich zwar durch präzisere Daten und Modelle reduzieren, jedoch niemals ausschließen. Die Frage, welche Daten (Modellparameter) wie genau zu bestimmen sind, kann mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen beantwortet werden. Die Ergebnisse solcher Sensitivitätsanalysen für einen Standort oder ein Endlagerkonzept sind daher Grundlage für ein effizientes Vorgehen bei der Realisierung eines Endlagerprojektes.

Vertrauensbildende Maßnahmen

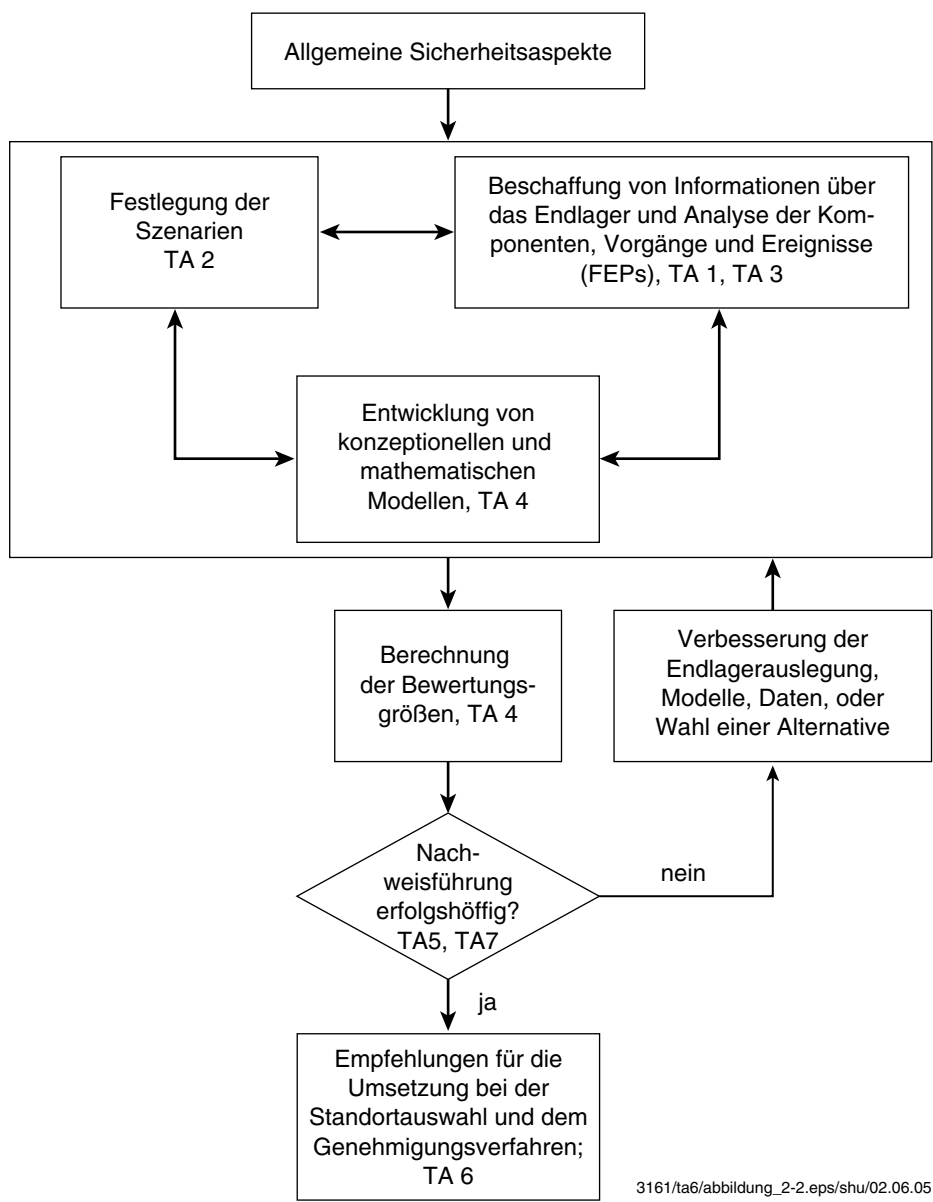
Das übergeordnete Ziel jeder Sicherheitsbewertung liegt in der Ermittlung solider Fakten, die fundierte Entscheidungen im Zusammenhang mit einem Endlager für radioaktive Abfälle ermöglichen. Letztlich ist jedoch ausschlaggebend, ob die an den Entscheidungsprozessen beteiligten Gruppen Vertrauen in die zur Verfügung gestellten Informationen und Ergebnisse der Sicherheitsbewertung haben. Zu den vertrauensbildenden Maßnahmen gehören gemäß [IAEA 1999]:

- Verifizierung, Kalibrierung und Validierung der zugrunde liegenden Modellrechnungen,
- natürliche Analoga,
- Qualitätsmanagement,
- unabhängige Überprüfung der Ergebnisse sowie
- zusätzliche Betrachtungen, welche die öffentliche Akzeptanz fördern.

1.2 Einordnung der durchgeführten Arbeiten

Die innerhalb dieses Teilprojektes der sicherheitstechnischen Einzelfragen WS 1009 durchgeführten Arbeiten orientieren sich an der allgemeinen Methodik einer Sicherheitsanalyse, so wie sie in Kapitel 1.1 dargestellt wurde, konzentrieren sich jedoch auf den Aspekt der Gasbildung und die damit verbundenen Auswirkungen. Dementsprechend werden in den hier durchgeführten Arbeiten keine vollständigen Sicherheitsanalysen dargestellt, sondern einzelne Schritte und Vorgehensweisen im iterativen Prozess eines Sicherheitsnachweises.

Im Folgenden werden anhand des Ablaufschemas in Abbildung 1-2 die Untersuchungsschwerpunkte den Teilaufgaben zugeordnet, um die Einordnung der durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnisse zu verdeutlichen. Im Vordergrund der Untersuchungen steht der wirtsgesteinspezifische Nachweis, dass mit den zu Grunde gelegten Nachweiskonzepten (Speicherung, Entweichen von Gas) die Gasbildung und deren Auswirkungen beherrschbar werden bzw. welche Maßnahmen (z.B. Anforderungen an die geologischen Voraussetzungen, Konditionierung, Endlagerauslegung) zur Nachweisführung erfolgshöflich sind.



3161/ta6/abbildung_2-2.eps/shu/02.06.05

Abbildung 1-2 Zuordnung der Teilaufgaben als Bestandteil einer Sicherheitsanalyse

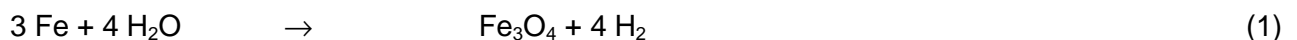
2 Analyse der relevanten Gasbildungsmechanismen

In einem Endlager für radioaktive Abfälle können verschiedene Prozesse zur Bildung von Gasen führen. Die wichtigsten gasbildenden Reaktionen sind die anaerobe Korrosion von unedlen Metallen wie Eisen, Aluminium und Zink sowie der mikrobielle Abbau von organischen Verbindungen. Die Radiolyse ist ein weiterer Prozess, der potenziell zur Gasbildung beiträgt. Das Ausmaß der Gasbildung hängt von der Menge der gasbildenden Stoffe und von den Bedingungen im Endlager ab. Neben den gasbildenden Prozessen können in einem Endlager auch gasbindende Prozesse auftreten, die zur Verringerung des Gasvolumens führen. Der wichtigste dieser Prozesse ist die Bindung von Kohlendioxid durch die Carbonatisierung von Zement.

2.1 Gasbildung durch anaerobe Metallkorrosion

Bei der anaeroben Korrosion werden unedle Metalle wie Eisen, Aluminium und Zink durch Wasser oxidiert. Als Produkte entstehen Wasserstoff und die entsprechenden Metallverbindungen.

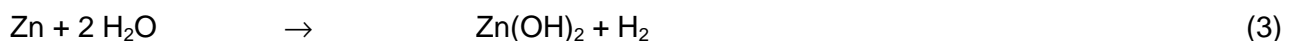
Die anaerobe Oxidation von Eisen mit Wasser führt zur folgenden Bruttoreaktion:



Aluminium wird unter anaeroben Bedingungen durch Wasser nach der folgenden Gleichung oxidiert:



Zink wird unter anaeroben Bedingungen durch Wasser nach der folgenden Gleichung oxidiert:



Als weiteres Metall kann Zirkon durch Wasser korrodiert werden. Zirkon ist im radioaktiven Abfall in den Hüllen von Brennstäben aus Kernreaktoren enthalten. Im Vergleich zu den oben erwähnten Metallen ist die Korrosion von Zirkon sehr langsam. Edlere Metalle wie Kupfer werden durch Wasser unter anaeroben Bedingungen nicht korrodiert. Diese Stabilität kann für die Herstellung von korrosionsresistenten Verpackungen genutzt werden.

Die Korrosionsraten hängen unter anderem von der Metallzusammensetzung ab. Eisen kann als Gusseisen, als Kohlenstoffstahl oder als Edelstahl vorliegen, was sich in unterschiedlichen Korrosionsraten äußert. Auch das chemische Milieu beeinflusst die Korrosionsraten. Wenn die Bildung einer stabilen Oxidschicht auf der Metalloberfläche begünstigt wird, kann diese die Korrosion behindern und die Geschwindigkeit der Reaktion verringern. Da bei den Korrosionsreaktionen Wasser als Edukt verbraucht wird, hängt das Ausmaß der Gasbildung auch vom Wasserangebot im Endlager ab.

Die Korrosionsraten für verschiedene Metalle bei unterschiedlichen Bedingungen müssen durch experimentelle Untersuchungen bestimmt werden. Die über die Versuchszeiträume gemessenen

Werte werden für die langen Zeiträume der Korrosion im Endlager extrapoliert. Die verschiedenen Einflussgrößen und die Bedingungen im Endlager führen zu einer Bandbreite von nicht genau prognostizierbaren Werten für die Korrosionsraten. Für eine Sicherheitsanalyse müssen repräsentative Werte definiert werden. Je nach Modellansatz wird eine Bandbreite oder ein Maximalwert festgelegt. Im Bericht zur TA 1 [Colenco 2003a] sind experimentelle Korrosionsraten aus der Literatur und Werte aus publizierten Sicherheitsanalysen für verschiedene Endlagerprojekte zusammengestellt.

Die Korrosionsreaktion findet an der Oberfläche der Metalle statt. Aus diesem Grund ist die Gasbildung nicht proportional zur Masse, sondern zur Oberfläche der Metalle. Bei der Modellierung der Gasbildung werden entsprechende Daten für das Abfallinventar benötigt. Für die metallischen Abfallbestandteile kann das Oberfläche/Masse-Verhältnis bzw. die Materialdicke eingesetzt werden.

2.2 Gasbildung durch mikrobielle Prozesse

Die in einem Endlager für radioaktive Abfälle enthaltenen organischen Stoffe können durch mikrobielle Prozesse zu Produkten wie Methan, Kohlendioxid und Wasser abgebaut werden. Die Aktivität der Bakterien hängt von der Art der organischen Stoffe und von den lokalen Lebensbedingungen im Endlager ab. Zellulose gilt als relativ leicht abbaubarer Stoff, während polymere Kunststoffe schwieriger abbaubar sind. Diese Unterschiede äußern sich auch in den entsprechenden Gasbildungsraten.

Beim Abbau von polymeren organischen Stoffen wie Zellulose kommt es zuerst zur Hydrolyse der Makromoleküle. Die entstehenden Monomere können durch die Bakterien leichter abgebaut werden. Verschiedene Verbindungen wie Nitrat oder Sulfat dienen dabei als Elektronenakzeptor. Die Fermentation ist eine interne Redoxreaktion, die keinen externen Elektronenakzeptor benötigt. Die stabilen Endprodukte der mikrobiellen Abbaureaktionen sind Methan und Kohlendioxid.

Das Wasser ist für die mikrobiellen Prozesse von zentraler Bedeutung. Es wird nicht nur als Edukt bei der Hydrolyse der organischen Stoffe benötigt, sondern es spielt auch eine wichtige Rolle beim extrazellulären Transport von Edukten und Produkten der mikrobiellen Prozesse. In einem völlig trockenen Endlager können keine mikrobiellen Prozesse stattfinden. Allerdings können die Mikroorganismen auch lange Trockenperioden inaktiv überdauern, so dass bei einem späteren Wasserzutritt die mikrobiellen Prozesse wieder anlaufen werden.

Die Temperatur kann einen großen Einfluss auf die Aktivität von Mikroorganismen haben. Während die optimale Temperatur für die Mehrheit der Mikroorganismen im Bereich von 30 bis 50°C liegt, gibt es auch Arten, die bei Temperaturen bis 100°C gedeihen können. Eine hohe Salinität ist für nicht angepasste Mikroorganismen ungünstig, aber es gibt auch Organismen, die in einer solchen Umgebung aktiv sind.

Für die Modellierung der Gasentwicklung durch mikrobielle Prozesse gibt es mehrere Modellansätze. Die einfachen Modelle beruhen auf einer phänomenologischen Beschreibung der Gasentwicklung durch eine empirische Gasbildungsrate. Dieser Ansatz wurde für verschiedene Sicherheitsanalysen angewendet. Die dabei eingesetzten Gasbildungsraten sind im Bericht zur TA 1 [Co-

lenco 2003a] zusammengestellt. Komplexere Modelle für die Prognose der mikrobiellen Gasbildung erlauben eine detailliertere Modellierung der Prozesse, sie benötigen aber auch eine viel größere Anzahl an Modellparametern, die mit Hilfe von umfangreichen Versuchsreihen erarbeitet werden müssen.

2.3 Radiolytische Gasbildung

Die Bestrahlung der Stoffe im Endlager durch die ionisierende Strahlung der Radionuklide führt zur Bildung von angeregten und ionisierten Spezies. Diese Spezies gehen verschiedene Reaktionen ein, die zur Bildung von gasförmigen Produkten wie Wasserstoff führen können. Das Ausmaß der radiolytischen Gasbildung wird vor allem durch das Radionuklidinventar bestimmt. Da die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung nur ein geringes Aktivitätsinventar aufweisen, ist die radiolytische Gasbildung im Vergleich zu den beiden anderen Gasbildungsmechanismen (anaerobe Korrosion und mikrobielle Prozesse) gering und kann vernachlässigt werden. Das Aktivitätsinventar der wärmeentwickelnden Abfälle ist höher als bei den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und kann potenziell zur radiolytischen Gasbildung führen. Als zweite Einflussgröße ist das Inventar der radiolysierbaren Stoffe im Endlager zu betrachten. Dabei kann es sich um Wasser oder um organische Verbindungen handeln. Wärmeentwickelnde Abfälle enthalten in der Regel kein internes Wasser und keine organischen Stoffe. Wenn kein Wasser von außen zutrifft, ist darum nicht mit einer nennenswerten radiolytischen Gasbildung zu rechnen.

2.4 Weitere gasbildende Prozesse

Es gibt eine Reihe von weiteren chemischen Reaktionen, die zu gasförmigen Produkten führen. Dazu gehört die Hydrolyse von Carbiden, Nitriden und Hydriden, bei der unter Einwirkung von Wasser Gase gebildet werden. Da solche Stoffe in den Abfällen nur in geringen Mengen vorhanden sind, ist der entsprechende Beitrag zur Gasbildung von untergeordneter Bedeutung.

2.5 Gasbindende Prozesse

Das alkalische Porenwasser von Zement, Beton und Filteraschen aus kohlengefeuerten Anlagen im Endlager bindet Gase wie Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff. Bei einem Überschuss dieser Gase kommt es zur Ausfällung von Carbonaten und Sulfiden. Dadurch wird das Gasvolumen im Endlager reduziert.

Als Beispiel lässt sich die Reaktion von Portlandit (alkalische Komponente von Zement) und Kohlendioxid mit folgender Formel darstellen:



Durch ein Mol Portlandit wird ein Mol Kohlendioxid gebunden. Alternativ kann Kohlendioxid auch durch Magnesiumoxid (MgO) gebunden werden, wie es im Endlager WIPP (USA) eingesetzt wird.

2.6 Relevanz der Gasbildungsprozesse

Aus den oben erwähnten Tatsachen kann die Relevanz der einzelnen Gasbildungsprozesse für wärmeentwickelnde Abfälle und für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung abgeleitet werden. Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten sowohl Metalle als auch organische Stoffe. Die Restfeuchtigkeit der Abfälle und (je nach Wirtsgestein) auch von außen zufließende Wässer führen zur Gasbildung durch anaerobe Korrosion und mikrobielle Prozesse. Wegen des relativ geringen Radionuklidinventars ist die radiolytische Gasbildung im Vergleich zu den beiden anderen Prozessen vernachlässigbar.

Von den wärmeentwickelnden Abfällen enthalten vor allem die abgebrannten Brennelemente in der Verpackung korrodierbare Metalle, aber keine organischen Stoffe. Das vergleichsweise große Radionuklidinventar ermöglicht beim Vorhandensein von Wasser eine radiolytische Gasbildung, wegen der Abschirmung durch den Endlagerbehälter aber erst nach dessen Korrosion. Zu diesem Zeitpunkt ist die Radioaktivität der Abfälle allerdings bereits auf einen Bruchteil des anfänglichen Werts abgeklungen. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten keine nennenswerte Restfeuchtigkeit; mögliche Wasserzuflüsse von außen werden vom Wirtsgestein und von der Endlagerauslegung bestimmt. Bei einem Wasserzutritt ins Endlager und dem Kontakt mit den Abfällen kommt es darum zur Gasbildung durch die anaerobe Metallkorrosion und durch die Radiolyse. Ohne Wasserzutritt bleibt die Gasbildung vernachlässigbar.

3 Analyse der für die Gasbildung maßgeblichen Szenarien

Zur Identifizierung der verschiedenen Gasbildungsszenarien in den einzelnen Wirtsgesteinen enthält TA 2 [Colenco 2003c] eine Auswertung bestehender Sicherheitsanalysen für Endlagerprojekte verschiedener Ländern. Im Vordergrund stehen dabei Projekte in den vier Wirtsgesteinen Salinar, Ton/Tonstein, kristalline Gesteine sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung.

3.1 Vorgehensweise

Es werden exemplarisch geplante und realisierte Endlagerprojekte in den vier zu untersuchenden Wirtsgesteinen vorgestellt, für die Sicherheitsanalysen vorliegen. Für jedes Endlager bzw. Endlagerprojekt werden Informationen zur Lage in der Gesteinsformation, zu den Arten der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle und zum Konzept des Endlagers (Abfallverpackung, technische Barrieren) aufgeführt. Ausgehend von den Sicherheitsanalysen werden die für die Gasbildung und deren radiologischen Auswirkungen verantwortlichen Szenarien identifiziert. Von zentraler Bedeutung sind dabei die Abfallzusammensetzung, der Wassergehalt von Abfällen und Versatzmaterial, die Eigenschaften der technischen Barrieren, die Permeabilität des Wirtsgesteins für Wasser und Gas sowie dessen mechanische Eigenschaften.

Wegen der unterschiedlichen Zusammensetzung der wärmeentwickelnden und der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle ergeben sich jeweils unterschiedliche Gasbildungsszenarien. Daraus leiten sich unterschiedliche Anforderungen an das Endlagerkonzept und das Wirtsgestein ab. Die Mehrzahl der Endlagerprojekte sieht nur die Entsorgung von wärmeentwickelnden oder von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen vor. Für ein Ein-Endlager-Konzept müssen die unterschiedlichen Anforderungen innerhalb desselben Wirtsgesteins erfüllt werden.

3.2 Gasbildung in durchgeführten Sicherheitsanalysen

Im vorliegenden Kapitel werden exemplarisch die Sicherheitsanalysen für bisher geplante und ausgeführte Endlager in den vier Wirtsgesteinen Salinar, Ton/Tonstein, kristalline Gesteine sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung vorgestellt. Für jedes Endlager bzw. Endlagerprojekt werden in TA 2 [Colenco 2003c] Informationen zur Lage in der Gesteinsformation, zu den Arten der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle und zum Konzept des Endlagers (Abfallverpackung, technische Barrieren) aufgeführt. Es werden weiter die in der entsprechenden Sicherheitsanalyse berücksichtigten Prozesse und Auswirkungen der Gasbildung zitiert.

Als Zusammenfassung der ausgewerteten Endlagerprojekte sind in Tabelle 3-1 die für die Gasbildung wesentlichen Randbedingungen – nach Abfall-, Wirtsgesteintyp, Verpackungsmaterial, Versatz, wirksame Barriere und Nachweiszeitraum – aufgeführt.

Tabelle 3-1 Übersicht über die betrachteten Endlagerprojekte mit deren Randbedingungen

| Endlager | Land | Wirtsgestein | Abfalltyp | Einlagerungsbereich | Verpackung | Versatzmaterial | wirksame Barriere | Nachweiszeitraum ¹⁾ [Jahre] |
|--------------|------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------|---|-----------------------|--|
| ERAM | D | Salinar | SMA | Kammern | verschieden | Salzgrus, BFA, Zement | Nahfeld, Wirtsgestein | 1 Mio. |
| Gorleben | D | Salinar | LMA HAA BE | Kammern, Bohrlöcher | Stahl, Zement | Salzgrus | Nahfeld, Wirtsgestein | 1 Mio. |
| WIPP | USA | Salinar, flache Lagerung | TRU | Kammern | Stahl | Salzgrus, MgO | Nahfeld, Wirtsgestein | 10'000 |
| KONRAD | D | Sediment unter Tonüberdeckung | LMA | Strecken | Stahl, Zement | Zement, Split | Nahfeld, Wirtsgestein | 100 Mio. |
| OPA | CH | Tonstein | LMA HAA BE | Strecken | Stahl, Zement | Zement, Bentonit, Bentonit | Nahfeld, Wirtsgestein | 1 Mio. |
| Wellenberg | CH | Mergel | SMA | Strecken | Stahl, Zement | Zement | Nahfeld, Wirtsgestein | 1 Mio. |
| SAFIR 2 | B | Plastischer Ton | SMA LMA HAA BE | Strecken | Stahl | Zement, Bentonit/Sand | Nahfeld, Wirtsgestein | 10 Mio. |
| SFR | S | Granit | SMA | Silo, Strecken | Stahl | Bentonit | Nahfeld | 1 Mio. |
| SFL | S | Granit | BE | Bohrungen | Stahl/Kupfer | Bentonit | Nahfeld | 1 Mio. |
| Kristallin-I | CH | Granit | LMA HAA BE | Strecken | Stahl, Zement | Zement/ Bentonit, Bentonit, Bentonit | Nahfeld | 1 Mio. |
| Sellafield | GB | Tuff, geklüftet | SMA LMA | Kammern | Stahl, Zement | Zement, Splitt | Nahfeld | 1 Mio. |

1) Einzelne (quantitative oder qualitative) Betrachtungen wurden auch für längere Zeiträume durchgeführt.

3.3 „Features, Events and Processes (FEPs)“ der Gasbildung und deren Auswirkungen

Die „Features, Events and Processes (FEPs)“ der Gasbildung umfassen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse, welche in den Sicherheitsanalysen als relevant betrachtet wurden.

Die Gasbildungsprozesse stehen am Anfang dieser Betrachtungen. Die Korrosion wird in allen Sicherheitsanalysen als relevant eingeschätzt. Unterschiede in der Verfügbarkeit von Wasser führen zu unterschiedlichen Gewichtungen dieses Prozesses. Der mikrobielle Abbau von organischen Stoffen wird in den meisten Sicherheitsanalysen als relevant betrachtet. Auch bei diesem Prozess stellt das Wasserangebot eine wichtige Randbedingung dar. Die radiolytische Gasbildung wird im Allgemeinen nur für wärmeentwickelnde Abfälle untersucht. Auch bei diesen Abfällen wird sie als vernachlässigbar eingestuft. Andere Gasbildungsprozesse werden nicht betrachtet oder als nicht

relevant eingestuft. Die Reaktionen, welche Gas binden, werden unterschiedlich gehandhabt. Entweder werden sie explizit berücksichtigt oder sie werden konservativ vernachlässigt.

Wie bereits in Kapitel 2 ausgeführt wird, ist das Vorhandensein von Wasser eine wichtige Voraussetzung für die Gasbildung. Das Wasser, welches bereits mit den Abfällen bzw. Versatzstoffen in das Endlager eingebracht wird, führt zu einer internen Gasbildung. Wenn aus dem Wirtsgestein Wasser ins Endlager zufließt, führt dies zu einer externen Gasbildung.

Wenn das gebildete Gas in einem im Primärzustand als dicht zu bezeichnenden Wirtsgestein nicht aus dem Endlager entweichen kann, kommt es zu einem Druckaufbau, der zur Auspressung von kontaminierter Lösung und im ungünstigsten Fall zu einer Beeinträchtigung des Wirtsgesteins führen kann. Wenn kein Gasspeicherpotential vorhanden ist, besteht die Gefahr des Aufreißens des Wirtsgesteins und damit der Bildung von neuen Wegsamkeiten.

Der Gastransport kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Im Porenwasser gelöste Gase können mit diesem transportiert werden. Die Transportrate hängt in diesem Fall von jener der Wässer ab. Der Transport von gelösten, nicht radioaktiven und nicht toxischen Gasen mit der Lösung kann wegen deren geringer Löslichkeit vernachlässigt werden. Wenn die im Endlager gebildete Gasmenge die Lösekapazität der Lösungen überschreitet, kommt es zur Bildung einer freien Gasphase. Dieses Gas kann ggf. durch die Nahfeldbarriere und das Wirtsgestein entweichen. Der Transport kann als reiner Gasfluss oder als Zweiphasenfluss gleichzeitig mit der Lösung erfolgen.

Für permeable Wirtsgesteine ist die Beziehung zwischen Gasbildungsrate (und somit einem möglichen Überdruck) und Sättigung der Einlagerungskammer mit Grundwasser von Bedeutung. Findet die Gasbildung früh (im Vergleich zum Lösungszutritt) statt, kann es dazu kommen, dass durch diesen gesteigerten Gasdruck ein weiterer Zufluss von Lösung ver-/behindert wird und die Gasbildung sich somit selbst begrenzt. Findet die Gasbildung verstärkt erst zu späten Zeiten statt, ist es wahrscheinlich, dass bereits eingedrungene und kontaminierte Lösung durch den Gasdruck ausgepresst wird.

3.4 Szenarien zur Gasbildung und deren Auswirkungen

Im Hinblick auf den Vergleich der vier Wirtsgesteine werden aus den in Kapitel 3.1 aufgeführten Endlagerprojekten jene ausgewählt, welche als repräsentativ betrachtet werden können und für die ausreichend Informationen zur Verfügung stehen. Dazu werden für jedes Wirtsgestein sofern vorhanden ein Endlagerprojekt nach dem Ein-Endlager-Konzept oder ein Endlagerprojekt für vernachlässigbar wärmeentwickelnde und eines für wärmeentwickelnde Abfälle oder identifiziert. In der Auswertung werden die einzelnen Sicherheitsanalysen so weit wie möglich in vergleichbarer Weise dargestellt.

Das Endlager Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) stellt den Modellfall eines Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle im Wirtsgestein Salinar in der flachen Lagerung dar. Das Referenzszenario sieht vor, dass durch die Eigenfeuchte der Abfälle und des Versatzes interne Gasbildung erfolgt.

Begrenzte Lösungszutritte aus der Salzformation führen auch zu einer externen Gasbildung. Als Folge der Gasbildung wird kontaminierte Lösung ins Wirtsgestein ausgepresst.

Das Endlagerprojekt Gorleben stellt den Modellfall eines Endlagers für Brennelemente und hochaktive Abfälle im Wirtsgestein Salinar (Salzstock) dar. Das Wirtsgestein verhindert einen Wasserzutritt ins Endlager. Die wärmeentwickelnden Abfälle enthalten keine Restfeuchtigkeit, so dass es zu keiner Gasbildung kommt.

Das Endlagerprojekt SAFIR 2 repräsentiert ein Endlager in einem Wirtsgestein aus plastischem Ton. Es handelt sich dabei um ein Projekt nach dem Ein-Endlager Konzept für alle Arten von radioaktiven Abfällen (BE/HAA, SMA/LMA). Das Wirtsgestein Ton verhindert einen Wasserzutritt ins Endlager. Bei den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung kommt es zur internen Gasbildung. Bei hoher Gasbildung können sich neue Wegsamkeiten im Ton bilden. Das Gas kann durch diese Wegsamkeiten entweichen; danach führt die Plastizität des Tons zur Selbstheilung.

Das Projekt Opalinuston stellt ein Endlagerprojekt dem Wirtsgestein Tonstein dar. Es sieht die Endlagerung von Brennelementen und hochaktiven Abfällen (HAA) als auch von langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) vor und entspricht dadurch weitgehend einem Ein-Endlager-Konzept (allerdings ohne SMA). Die Eigenfeuchte der LMA-Abfälle führt zur internen Gasbildung. Aus dem Opalinuston ins Endlager zutretendes Wasser führt zur externen Gasbildung. Als Folge des Druckaufbaus kommt es zur Ausbildung von mikroskopisch kleinen Wegsamkeiten, durch welche kontaminiertes Porenwasser in das Wirtsgestein ausgepresst wird. Die Bildung von makroskopischen Wegsamkeiten wird ausgeschlossen.

Das Endlager Schachtanlage Konrad dient als Referenzendlager für ein Wirtsgestein unter einer Tonüberdeckung. In diesem Projekt ist die Endlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen vorgesehen. Es ist repräsentativ für ein Endlager, zu dessen Sicherheit eine mächtige Tonüberdeckung wesentlich beiträgt. Die Restfeuchtigkeit des Gebirges (Korallenoolith) führt zur internen Gasbildung, während der Wasserzufluss von außen gering ist. Das gebildete Gas verlässt das Grubengebäude und steigt bis unter die Tonüberdeckung auf. Der Einfluss der Gasbildung auf die Radionuklidfreisetzung ist vernachlässigbar.

Als Referenzendlager für ein kristallines Wirtsgestein werden das schwedische Endlager SFR für schwach- und mittelaktive Abfälle und das schwedische Endlagerprojekt SFL für hochaktive Abfälle ausgewählt. Gemäß dem Referenzszenario der Sicherheitsanalyse wird das Endlager SFR unmittelbar nach dem Verschluss wassergesättigt, und die Gasbildung beginnt. Das Gas entweicht durch die dafür vorgesehenen Austrittsstellen, so dass es nicht zum Druckaufbau im Endlager und nicht zur Verdrängung von Porenwasser kommt. Der Einfluss der Gasbildung auf die Radionuklidfreisetzung ist darum gering. Das Endlager SFL wird gemäß dem Referenzszenario der Sicherheitsanalyse ebenfalls unmittelbar nach dem Verschluss wassergesättigt. Die hochaktiven Abfälle sind in Kanister mit einem korrosionsbeständigen Kupfermantel verpackt. Dieser verhindert einen Wasserzutritt bis zum inneren Stahlkanister und somit eine Gasbildung.

3.5 Bewertungsmatrix für die ausgewählten Szenarien

Basierend auf den genannten Projekten gibt Tabelle 3-2 eine Übersicht über die zu erwartende interne und externe Gasbildung sowie den Druckaufbau für wärmeentwickelnde und vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle und die jeweiligen Permeabilitäten des Wirtsgesteins im relativen Vergleich.

Tabelle 3-2 Berücksichtigung der Gasbildung und des Druckaufbaus in verschiedenen Endlagerprojekten und Sicherheitsanalysen

| | Interne Gasbildung | Externe Gasbildung | Permeabilität des Wirtsgesteins | Druckaufbau |
|---|--------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------|
| Endlager im Salinar | | | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | X | (X) | gering | X |
| wärmeentwickelnde Abfälle | - | (X) | gering | - |
| Endlager in Ton oder Tonstein | | | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | X | (X) | gering | (X) |
| wärmeentwickelnde Abfälle | - | (X) | gering | - |
| Endlager in kristallinem Gestein | | | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | X | X | hoch | - |
| wärmeentwickelnde Abfälle | - | (X) | hoch | - |
| Endlager in Gesteinen unter Tonüberdeckung | | | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | X | (X) | andere Sedimente: hoch Ton: gering | (X) |
| wärmeentwickelnde Abfälle | - | (X) | andere Sedimente: hoch Ton: gering | k.A. |

X wird als relevant betrachtet

- wird als nicht relevant betrachtet

(X) wird je nach Studie als relevant/ nicht relevant betrachtet

k. A. keine Angaben

3.6 Berücksichtigung der internen und externen Gasbildung

Im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept gibt Tabelle 3-3 eine Übersicht über die zu Grunde gelegte interne und externe Gasbildung. Die Prozesse der Gasbildung sind die Grundlage für die Analyse der Gefährdung der Endlagersicherheit der generischen Modellendlager für die zu untersuchenden Wirtsgesteine (vgl. Kapitel 4.4).

Tabelle 3-3 In den verschiedenen Endlagern zugrunde gelegte Gasbildung

| Ein-Endlager Konzept | Interne Gasbildung | Externe Gasbildung |
|---|---------------------------|---------------------------|
| Endlager im Salinar | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | X | - |
| wärmeentwickelnde Abfälle | X ¹⁾ | - |
| Endlager in Tonstein | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |
| wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |
| Endlager in kristallinem Gestein | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |
| wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |
| Endlager in Gesteinen unter Tonüberdeckung | | |
| vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |
| wärmeentwickelnde Abfälle | (X) | X |

X wird zu Grunde gelegt

(X) Internes Wasser nicht maßgeblich, da externes Wasser immer ausreichend vorhanden ist

- wird nicht unterstellt

¹⁾ Berücksichtigt 0,3 M.-% Feuchte des Salzgruses

4 Daten zur Bewertung der Gefährdung der Endlagersicherheit durch Gasbildung

Innerhalb dieses Kapitels werden die für die Modellierung mit vereinfachenden Modellen (vgl. Kapitel 5) erforderlichen Eingangsdaten zusammengestellt bzw. für diesen Zweck ermittelt [Colenco 2003b]. Hierzu werden

- das Modellinventar für
 - die verschiedenen Abfallkategorien
 - die Abfallmengen und –volumina,
 - die Behältertypen,
 - das Radionuklidinventar
 - das Inventar der gasbildenden Stoffe (Metalle und Organika)ermittelt und dargestellt,
- die für die Gasbildung wesentlichen Parameter der Wirtsgesteine beschrieben und Eingangswerte für die Modellierung abgeleitet,
- bestehende Sicherheitsanalysen für Endlagerprojekte in verschiedenen Ländern ausgewertet und darauf aufbauend generische Endlagerkonzepte für die unterschiedlichen Wirtsgesteine entworfen,
- die Gasbildung in den verschiedenen Referenzszenarien diskutiert und
- die gebildeten Gasmengen berechnet.

4.1 Modellinventar

Mit der Kernenergienutzung verbunden sind die Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken sowie die Abfälle der kerntechnischen Industrie, aus der Wiederaufarbeitung und der Stilllegung. Durch die getroffene Vereinbarung zwischen der Deutschen Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14.06.2000 (Konsensvereinbarung) wird das Kernenergieprogramm zeitlich und in Bezug auf die noch produzierbare elektrische Energie, zukünftigen Abfallmengen und Inventare begrenzt.

Für die Abfälle aus Forschungseinrichtungen, von Landessammelstellen und sonstigen Ablieferungspflichtigen werden als repräsentative Abfallmengen die Mittelwerte der während der 90er Jahre erfassten Abfälle zu Grunde gelegt. Unter diesen Randbedingungen wird das Modellinventar für alle Arten von Abfällen inklusive Verpackung ermittelt.

Das prognostizierte Volumen der insgesamt anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle (aktualisiert nach [AkEnd 2002], [Brennecke 2001]) beträgt ca. 22'000 m³; dasjenige für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle [Brennecke 2001] ca. 302'000 m³. Die Aufteilung auf die einzelnen Verursachergruppen, die Anzahl und die Ausführung der verschiedenen Behälter für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sowie die prozentuale Verteilung der Abfälle auf die Behälter sind in dem Bericht zur TA 3 [Colenco 2003b] aufgeführt. Die Volumina und die Radionuklidinventare der wärmeentwickelnden und der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt und aufsummiert. Die fettgedruckten Werte bezeichnen den höheren Bei-

trag zur gesamten Aktivität des jeweiligen Radioisotops. Für die Modellrechnungen wurde aus dem gesamten Nuklidinventar eine Auswahl relevanter Nuklide getroffen.

Tabelle 4-1 Prognose des Gesamtvolumens und des Inventars der relevante Radionuklide in den bis zum Jahr 2080 anfallenden radioaktiven Abfälle [BfS 2005].

| | | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | Wärmeent- wickelnde Abfälle | Abfälle Gesamt |
|-------------|----------|--|--------------------------------|----------------|
| | | Gesamtvolumen [m ³] | | |
| | | 302'945 | 22'098 | 325'043 |
| Radionuklid | HWZ [a] | Inventar [Bq] ¹⁾ | | |
| H -3 | 1.23E+01 | 3.45E+15 | 1.89E+17 | 1.93E+17 |
| C -14 | 5.73E+03 | 9.98E+12 | 3.18E+14 | 3.28E+14 |
| Cl-36 | 3.00E+05 | 1.30E+11 | 3.08E+12 | 3.21E+12 |
| Co-60 | 5.27E+00 | 3.46E+16 | 1.62E+18 | 1.66E+18 |
| Ni-59 | 7.50E+04 | 1.50E+14 | 8.17E+14 | 9.67E+14 |
| Ni-63 | 1.00E+02 | 1.90E+16 | 3.41E+17 | 3.60E+17 |
| Se-79 | 1.10E+06 | 4.73E+09 | 2.51E+14 | 2.51E+14 |
| Sr-90 | 2.86E+01 | 1.35E+16 | 3.95E+19 | 3.95E+19 |
| Zr-93 | 1.50E+06 | 4.20E+12 | 1.65E+15 | 1.65E+15 |
| Nb-93m | 1.61E+01 | 1.07E+08 | 4.60E+11 | 4.60E+11 |
| Nb-94 | 2.00E+04 | 6.73E+08 | 1.16E+14 | 1.16E+14 |
| Mo-93 | 4.00E+03 | 1.07E+08 | 4.60E+11 | 4.60E+11 |
| Tc-99 | 2.10E+05 | 1.29E+13 | 5.57E+15 | 5.59E+15 |
| Sn-126 | 2.35E+05 | 2.37E+11 | 4.29E+14 | 4.29E+14 |
| I -129 | 1.57E+07 | 7.34E+12 | 1.79E+13 | 2.52E+13 |
| Cs-135 | 2.30E+06 | 1.66E+11 | 4.97E+14 | 4.97E+14 |
| Cs-137 | 3.02E+01 | 2.70E+16 | 6.05E+19 | 6.05E+19 |
| Sm-151 | 9.30E+01 | 1.47E+13 | 6.84E+17 | 6.84E+17 |
| Pb-210 | 2.23E+00 | 4.37E+11 | 1.09E+08 | 4.37E+11 |
| Ra-226 | 1.60E+03 | 4.37E+11 | 1.09E+08 | 4.37E+11 |
| Ac-227 | 2.18E+01 | 0.00E+00 | 1.70E+10 | 1.70E+10 |
| Ra-228 | 5.75E+00 | 4.08E+11 | 4.60E+04 | 4.08E+11 |
| Th-229 | 7.88E+03 | 0.00E+00 | 5.82E+07 | 5.82E+07 |
| Th-230 | 7.54E+04 | 0.00E+00 | 5.37E+10 | 5.37E+10 |
| Th-232 | 1.41E+10 | 4.08E+11 | 4.60E+04 | 4.08E+11 |
| Pa-231 | 3.28E+04 | 0.00E+00 | 1.70E+10 | 1.70E+10 |
| U-233 | 1.59E+05 | 0.00E+00 | 3.26E+10 | 3.26E+10 |
| U-234 | 2.46E+05 | 0.00E+00 | 3.68E+14 | 3.68E+14 |
| U -235 | 7.04E+08 | 8.85E+10 | 4.49E+12 | 4.58E+12 |
| U-236 | 2.34E+07 | 1.91E+11 | 7.65E+13 | 7.66E+13 |
| Np-237 | 2.14E+06 | 4.19E+11 | 2.01E+14 | 2.01E+14 |
| Pu-238 | 8.77E+01 | 2.55E+15 | 2.50E+18 | 2.50E+18 |
| Pu-239 | 2.41E+04 | 2.71E+14 | 1.89E+17 | 1.89E+17 |
| Pu-240 | 6.56E+03 | 4.13E+14 | 4.41E+17 | 4.42E+17 |
| Pu-241 | 1.44E+01 | 5.23E+16 | 7.48E+19 | 7.48E+19 |
| Pu-242 | 3.75E+05 | 7.73E+11 | 3.22E+15 | 3.22E+15 |
| Am-241 | 4.32E+02 | 1.41E+15 | 2.03E+18 | 2.03E+18 |

| | | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | Wärmeent- wickelnde Abfälle | Abfälle Gesamt |
|--------------|----------|--|--------------------------------|-----------------|
| | | Gesamtvolumen [m ³] | | |
| | | 302'945 | 22'098 | 325'043 |
| Radionuklid | HWZ [a] | Inventar [Bq] ¹⁾ | | |
| Am-242m | 1.41E+02 | 1.07E+12 | 1.90E+16 | 1.90E+16 |
| Am-243 | 7.37E+03 | 2.27E+12 | 3.56E+16 | 3.56E+16 |
| Cm-243 | 2.91E+01 | 1.73E+12 | 1.06E+16 | 1.06E+16 |
| Cm-244 | 1.81E+01 | 6.07E+14 | 4.88E+18 | 4.88E+18 |
| Cm-245 | 8.50E+03 | 1.53E+10 | 3.55E+17 | 3.55E+17 |
| Summe | | 1.55E+17 | 1.88E+20 | 1.88E+20 |

¹⁾ Die fettgedruckten Werte bezeichnen den höheren Beitrag zur gesamten Aktivität des jeweiligen Radioisotops.

Für die Modellierung der Gasbildung werden die Angaben über die Massen der gasbildenden Stoffe im Abfall und in der Verpackung benötigt. Dazu gehören die Metalle Eisen, Aluminium und Zink sowie die organischen Stoffe².

Im Bericht zur TA 3 [Colenco 2003b] sind die für die Verpackung der wärmeentwickelnden Abfälle benötigten Behälter und deren Metallmassen aufgeführt. Für die Endlagerung in salinarem Wirtsgestein beläuft sich die Gesamtmasse des Metalls auf 125'000 Mg, für nicht-salinare Wirtsgesteine auf 158'000 Mg [BfS 2005]. Für die vereinfachte Abschätzung der Gasbildung wird von drei Klassen von Stahlbehältern ausgegangen.

Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen tragen sowohl die Verpackungen als auch die Abfallinhaltsstoffe wesentlich zur Gasbildung bei. Das Modellinventar der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle wurde ebenfalls auf der Basis von [BfS 2005] erstellt und umfasst die Rohabfälle (120'529 Mg), die Fixierungsmittel (163'869 Mg) und die Abfallbehälter (807'262 Mg). Für Modellrechnungen für das begrenzte Wasserangebot wurde außerdem der Wassergehalt der Abfälle auf 125'025 Mg abgeschätzt.

Bei den Abfallbehältern kann die Klassifizierung der Schichtdicken der Metalle anhand der Spezifikationen einfach und relativ genau vorgenommen werden. Über die Abfälle und ihre Metallkomponenten liegen keine detaillierten Informationen vor. Aus diesem Grund und wegen Unterschieden in den vorliegenden Datenbasen musste dafür eine Abschätzung vorgenommen werden. Der Vergleich mit anderen Studien [Moreno et al., 2001], [Alder, McGinnes, 1994] zeigt, dass eine Klassifizierung der Schichtdicken, wie sie in [Noack 2000] vorgenommen wurde, anwendbar ist.

4.2 Materialparameter für die Wirtsgesteine

Die in TA 3 [Colenco 2003b] ausgewählten Parameter basieren auf einer umfassenden Literaturrecherche. Die Gesteinseigenschaften für den Wirtsgesteinstyp Salinar werden in Anlehnung an lithologisch vergleichbare Steinsalztypen (z.B. des Zechstein Norddeutschlands, des Tertiär im

² Vgl. TA 1 [Colenco 2003a]: Analyse der relevanten Gasbildungsprozesse

Rheintal, der Permischen Salado-Formation in New Mexico/USA) ermittelt. Für das Wirtsgestein Tonstein wird auf die umfangreichen Untersuchungen am Opalinuston (CH) und Bure-Ton (F) Bezug genommen. Die Parameter zum Wirtsgestein Kristallin basieren im Wesentlichen auf Arbeiten zum Projekt Kristallin I in der Nordschweiz und dem Projekt Äspö in Südschweden. Die Beschreibung der sonstigen Gesteine unter Tonüberdeckung lässt eine große Bandbreite von Möglichkeiten zur Bestimmung des Systems zu. Die vorliegenden Daten stützen sich vornehmlich auf Verhältnisse, wie sie am Standort Konrad vorliegen. Die dort für den rückhaltewirksamen Einschluss wesentliche Barriere „Deckgebirge“ findet im Rahmen dieser Bearbeitung aber keine Berücksichtigung, da dieses nur mit standortspezifischen Parameterwerten charakterisiert werden kann.

Die ermittelten Parameter gehen in die Nachweiskonzepte ein (vgl. Kapitel 5). Im Rahmen dieser Studie wird bei der Aufstellung der für eine mögliche Gasmigration wesentlichen Materialparameter bei dem Wirtsgesteinstyp Salinar nicht in steiler und flacher Lagerung unterschieden. Diese Unterscheidung wird bei den vorgegebenen Geosystemen vorgenommen, um den Einfluss der verschiedenen geometrischen Parameter des Endlagers und verschiedener Einlagerungskonzepte (z.B. Mächtigkeit des Wirtsgesteins, Abstand zum Hangenden, Streckenlagerung, tiefe Bohrlochlagerung) zu untersuchen.

Die für die Untersuchungen zugrunde gelegten Materialparameter der Wirtsgesteine sind in der Tabelle 4-2 zusammengestellt. Neben den hydrogeologischen und mechanischen Parametern sind auch geologische und geometrische Parameter festgelegt worden, die in auch anderer Teilprojekte zu den sicherheitstechnischen Einzelfragen zu Grunde gelegt werden.

Tabelle 4-2 Wesentliche Wirtsgesteinsparameter

| | Salinar | Tonstein | Kristalline Gesteine | Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung |
|--|--------------------------|--------------------------|---|---|
| Petrophysikalische Parameter | | | | |
| Permeabilität | $< 10^{-20} \text{ m}^2$ | 10^{-20} m^2 | $10^{-21} \text{ m}^2 - 10^{-10} \text{ m}^2$ ¹⁾ | $10^{-19} \text{ m}^2 - 10^{-11} \text{ m}^2$ ²⁾ |
| Sekundärpermeabilität ($p_{\text{gas}} \approx \sigma_{\text{min}}$) | $> 10^{-18} \text{ m}^2$ | $> 10^{-19} \text{ m}^2$ | keine | k.A. |
| Fließporosität | | 3,5 - 6,5% | Matrix incl. Alterationszone: 0,25 - 0,5 % Kluft: 0 - 10 % Alterationszone: 1 - 5,6 % | 2 % |
| Gesamtporosität | $\ll 1\%$ | 12 - 14% | k.A. | 2 - 27% |
| Hydrogeologische Parameter | | | | |
| Dichte des Grundwassers | 1,2 g/cm ³ | 1,0 g/cm ³ | 1,07g/cm ³ | ca. 1,15 g/cm ³ |
| Kluftabstände | k.A. | k.A. | 0.04/m | Störungen mit ca. 550 m Abstand; Klüftung vorhanden |

| | Salinar | Tonstein | Kristalline Gesteine | Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung |
|-------------------------------|-----------------------|--|--|---|
| | | | | den |
| Kluftweiten | k.A. | k.A. | 1 mm | Laborangaben < 0,1 - > 0,01 mm |
| Mechanische Parameter | | | | |
| Dichte | 2,2 g/cm ³ | 2,4 g/cm ³ (Trockendichte) | 2,65 – 2,83 g/cm ³ | 2,5 g/cm ³ |
| Zugfestigkeit oder Frackdruck | 2 MPa | 1 - 3 MPa | Klüfte als potenzielle „Sollbruchstellen“ | k.A., bei aktivierbaren Klüften gegen 0 MPa |
| Materialverhalten | elasto-viskoplastisch | elastoplastisch | elastisch, aber: Klüfte als potenzielle „Sollbruchstellen“ | elastisch, elastoplastisch |

- 1) Gesteinmatrix selber ist sehr geringdurchlässig; Permeabilität wird durch Klüftigkeit - soweit vorhanden dominiert
- 2) je nach Standort

4.3 Einlagerungskonzepte und generische Endlager

Basierend auf geplanten und realisierten Einlagerungskonzepten in den verschiedenen Ländern werden in TA 3 [Colenco 2003b] für jedes Geosystem generische Endlager entwickelt, die den weiteren Arbeiten zu Grunde gelegt werden. Unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten Abfallmengen und -volumina und der beschriebenen Geosysteme wird eine mögliche bergmännische Auslegung der generischen Endlager skizziert³.

In allen Endlagerkonzepten – auch beim Ein-Endlager-Konzept – werden die wärmeentwickelnden und die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle räumlich und hydraulisch voneinander getrennt eingelagert, um eine potenzielle gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden.

Die Auslegung der generischen Endlager im Salinar orientiert sich überwiegend an [DBE 1998]. Für die flache Lagerung wird auch auf die Arbeiten zur Waste Isolation Pilot Plant (WIPP [DOE 1996]) zurückgegriffen. Das generische Endlager im Ton basiert im Wesentlichen auf den Untersuchungen im schweizerischen Opalinuston [Nagra 2002a, b]. Für die wärmeentwickelnden Abfälle wird dieses Konzept auch für ein Endlager in sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung zugrunde gelegt. Das Konzept für diesen Wirtsgesteinstyp und die vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle wird zudem auf Angaben in [Plan Konrad 1990] abgestützt.

Auf Grundlage der umfangreichen Studien des JADE-Projekts wurde in Schweden ein Konzept für die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen in kristallinem Wirtsgestein erstellt [SKB 2001c, 2001d]. Im Rahmen einer Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten zwischen den Wirts-

³ Eine konkrete Planung der Endlager kann erst auf der Basis standortbezogener Daten (z.B. Geologie, Geometrie, Zwischenlagerzeit, usw.) erfolgen und ist nicht Untersuchungsziel der durchgeführten Arbeiten.

gesteinen Salinar und Hartgestein wurde ein generisches Endlager im Kristallin entworfen [Papp 1997], welches sich an schwedischen Arbeiten orientiert. In der Schweiz wurde für wärmeentwickelnde Abfälle ebenfalls ein Endlagerkonzept im kristallinen Untergrund entwickelt (Projekt Kristallin-I, [Nagra 1994]).

Für die Einlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle aus Kernkraftwerken ist in Schweden bereits ein Endlager in kristallinem Gestein angelegt worden (SFR, Swedish Final Repository [SKB 2001b]). Die Auslegung des generischen Endlagers im Kristallin orientiert sich an den genannten Arbeiten.

Basierend auf diesen Konzepten für die Endlagerung und den in TA 3 [Colenco 2003b] detaillierter beschriebenen Annahmen ergeben sich für die abgeleiteten generischen Endlager gemäß Tabelle 4-3 der ermittelte Flächenbedarf und das anfängliche Porenvolumen.

Tabelle 4-3 Zusammenstellung des Flächenbedarfes und des anfänglichen Porenvolumens für die verschiedenen generischen Endlager

| Wirtsgestein | Abfallkategorie | Fläche | Anfängliches Porenvolumen |
|--|----------------------|--|---------------------------|
| | | [m ²] | [m ³] |
| Salinar (steil) | wärmeentwickelnd | 1'095'000 | 503'000 |
| | vernachl. wärmeentw. | 404'000 | 276'000 |
| | Summe | 1'499'000 | 779'000 |
| Salinar (flach) | wärmeentwickelnd | 1'224'000 | 748'000 |
| | vernachl. wärmeentw. | 404'000 | 276'000 |
| | Summe | 1'628'000 | 1'024'000 |
| Tonstein | wärmeentwickelnd | 2'170'000 | 142'000 |
| | vernachl. wärmeentw. | 340'000 | 81'000 |
| | Summe | 2'510'000 | 223'000 |
| Kristallin | wärmeentwickelnd | 1'900'000 ¹⁾ (1'300'000) ²⁾ | 470'000 |
| | vernachl. wärmeentw. | 255'000 ¹⁾ (170'000) ²⁾ | 201'000 |
| | Summe | 2'200'000 ¹⁾ (1'500'000) ²⁾ | 671'000 |
| Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung | wärmeentwickelnd | 2'798'000 | 168'000 |
| | vernachl. wärmeentw. | 447'000 | 47'000 |
| | Summe | 3'245'000 | 215'000 |

1) 2-söhlige Einlagerung

2) 3-söhlige Einlagerung

Zu dem ermittelten Flächenbedarf ist anzumerken, dass in verschiedenen Publikationen z.B. [AkEnd 2002], [Papp 1997] auf den unterschiedlichen Flächenbedarf bei Endlagerkonzepten im Salinar und im Hartgestein hingewiesen wird. Als Grund hierfür ist die einzuhaltende Oberflächentemperatur an den Behältern zu nennen, was bei geringerer Wärmeleitfähigkeit der Hartgesteine schneller eine geringere Wärmequellendichte erfordert. Hierzu ist anzumerken, dass es neben der Wärmeleitfähigkeit unterschiedliche Ansätze für die zulässige Grenztemperatur am Übergang Be-

hälteroberfläche zum Bentonit gibt: frühere Arbeiten unterstellen ca. 100 °C [Papp 1997], während für den Entsorgungsnachweis Opalinuston bis zu 160 °C als zulässig angesehen werden [Nagra 2002a]. Die unterstellte Dauer der Zwischenlagerung der Abfälle beeinflusst darüber hinaus stark die abgegebene Wärmeleistung und damit in entscheidenden Maße den möglichen Zuschnitt der Endlager. Der tatsächliche Flächenbedarf ist mit standortbezogenen Daten zu ermitteln.

4.4 Referenzszenarien für die Gasbildung

Auf Basis der in Kapitel 3.5 abgeleiteten generischen FEPs und Szenarien werden Referenzszenarien für die zuvor definierten generischen Endlager in den vier Wirtsgesteinstypen beschrieben. Mit den Referenzszenarien wird festgelegt, welche Prozesse im Folgenden zu berücksichtigen sind (vgl. Kapitel 5).

Die folgenden Referenzszenarien gehen von einer gewissenhaften Planung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers und einer störungsfreien Nachbetriebsphase aus. Gleichwohl sind Fälle zu beachten, in denen eben diese Annahmen nicht zutreffen, da z.B. der reale Endlagerstandort von den Modellendlagern abweichende Eigenschaften besitzt und andere "Störfälle" in einem späteren Nachweis der Langzeitsicherheit für das noch auszuwählende und aufzufahrende Endlager zu berücksichtigen sind.

4.4.1 Wirtsgestein Salinar (steile oder flache Lagerung)

- wärmeentwickelnde Abfälle

Wegen der geringen Permeabilität des Salzgesteins wird ein Zutritt von externem Wasser zu den Abfällen ausgeschlossen. Daher erfolgt keine signifikante Gasbildung und der Druckaufbau im Einlagerungsbereich ist sehr gering. Es findet daher keine Radionuklidfreisetzung statt.

- vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Ein Zutritt von externem Wasser zu den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen ist ebenfalls ausgeschlossen. Gasbildung findet jedoch durch die schon in den Abfällen und im Versatz vorhandenen Wassermengen statt. Es kommt zu einem Druckaufbau im Einlagerungsbereich. Das im Versatz vorhandene Gasspeichervolumen bestimmt – neben der Gasbildung und der Konvergenz – die Höhe des Druckanstiegs.

4.4.2 Wirtsgestein Tonstein

- wärmeentwickelnde Abfälle

Durch den Tonstein und die Bentonitbarriere kann in begrenztem Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Es kommt zu einem Druckaufbau innerhalb der Bentonitbarriere. Bei Überschreitung eines Grenzdruckes kann Gas durch permeable Mikrorisse entweichen. U.a. wegen der Quellfähigkeit der Tonminerale werden diese Wegsamkeiten rasch wieder verschlossen, bevor nennenswerte Mengen an Flüssigkeit durch sie hindurch treten können.

Flüchtige Radionuklide können also auf dem Gaspfad entweichen. Sowohl in der Bentonitbarriere als auch im Wirtsgestein ist advektiver Flüssigkeitstransport kaum möglich. Daher erfolgt die Freisetzung der Radionuklide weitgehend diffusiv.

- vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Durch den Tonstein und die Zementbarriere kann in begrenztem Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Zusätzlich zur internen Gasbildung durch das schon im Einlagerungsbereich vorhandene Wasser kommt es auch zu externer Gasbildung. Daraus resultiert ein Druckaufbau innerhalb der technischen Barriere.

Der Gasdruck wird durch die Gasbildungsrate und durch das Porenvolumen und die Permeabilität in den Einlagerungs- und Infrastrukturstrecken bestimmt. Bei Überschreitung eines Grenzdruckes kann es zur "pathway dilatation" im Wirtsgestein kommen. Gas kann dann durch diese höher permeablen Mikrorisse ins Wirtsgestein eindringen und sich über Zweiphasenströmung ausbreiten.

Leichtflüchtige Radionuklide können also auf dem Gaspfad durch das Wirtsgestein entweichen. Im intakten Wirtsgestein ist advektiver Flüssigkeitstransport nicht möglich. Dagegen kann die Freisetzung gelöster Radionuklide diffusiv durch das Wirtsgestein oder ggf. advektiv/dispersiv durch die Infrastrukturstrecken erfolgen.

4.4.3 Wirtsgestein Kristallin

- wärmeentwickelnde Abfälle (keine Kupferkanister)

Durch die Klüfte im Wirtsgestein und die Bentonitbarriere wird in begrenztem Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Es kommt zu einem Druckaufbau innerhalb der Bentonitbarriere. Daraufhin können Mikrorisse in der Bentonitbarriere entstehen, durch welche Gas und Flüssigkeit entweichen können.

Leichtflüchtige Radionuklide können also auf dem Gaspfad entweichen. Gelöste Radionuklide können nur diffusiv durch die Bentonitbarriere entweichen. Durch das Wirtsgestein findet advektiver/diffusiver Transport statt.

- vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Durch die Klüfte im Granit und die Zementbarriere kann in begrenztem Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Zusätzlich zur internen Gasbildung durch das schon im Einlagerungsbereich vorhandene Wasser kommt es daher auch zu externer Gasbildung.

Daraus resultiert ein Druckaufbau im Einlagerungsbereich. Der Gasdruck wird durch die Gasbildungsrate, das Porenvolumen und die Permeabilität in der Einlagerungs- und Infrastrukturstrecken bestimmt.

Ist der Gasdruck sehr hoch, kann es zur Bildung von Fracs in der Zementbarriere kommen. In diesem Fall ist advektiver Transport von Radionukliden durch die Barriere möglich. Durch Klüfte im Wirtsgestein findet advektiver/diffusiver Transport statt. Advektiver/diffusiver Transport ist auch entlang der Einlagerungs- und Infrastrukturstrecken nicht ausgeschlossen.

Leichtflüchtige Radionuklide können auf dem Gaspfad durch die technische Barriere und das Wirtsgestein entweichen.

4.4.4 Wirtsgestein „sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung“

- wärmeentwickelnde Abfälle (keine Kupferkanister)

Durch das Wirtsgestein und die Bentonitbarriere wird in begrenztem Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Aufgrund von externer Gasbildung kommt es zum Druckaufbau im Einlagerungsbereich. Während das Gas entlang von Mikrorissen durch die Bentonitbarriere entweichen kann, wird Flüssigkeit zurückgehalten.

Leichtflüchtige Radionuklide können also auf dem Gaspfad entweichen. Nach dem Aufstieg durch das Wirtsgestein sammelt sich das Gas unter der Tonüberdeckung an. Die weitere Freisetzung leichtflüchtiger Radionuklide mit der Gasphase richtet sich nach der Geometrie bzw. den Eigenschaften der Tonüberdeckung. Gelöste Radionuklide können nur diffusiv durch die Bentonitbarriere entweichen. Durch das Wirtsgestein findet advektiver/diffusiver Transport statt. Bedingt durch die Tonüberdeckung findet dieser Transport nahezu horizontal mit nur kleinen Gradienten über lange Wegstrecken statt. Die Gasbildung verdrängt jedoch Porenwasser im Wirtsgestein, was als zusätzliche treibende Kraft für den Transport radionuklidhaltiger Lösung wirkt.

Gelöste Radionuklide können advektiv/diffusiv durch das Wirtsgestein transportiert werden.

- vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Durch das Wirtsgestein und die Zementbarriere kann im begrenzten Maß Wasser zu den Abfällen gelangen. Zusätzlich zur internen Gasbildung durch das schon im Einlagerungsbereich vorhandene Wasser kommt es auch zu externer Gasbildung.

Daraus resultiert ein Druckaufbau im Einlagerungsbereich. Der Gasdruck wird durch die Gasbildungsrate, durch das Porenvolumen und die Permeabilität den Einlagerungs- und Infrastrukturstrecken und die Porosität und Permeabilität des Wirtsgesteins bestimmt.

Durch das Wirtsgestein findet Zweiphasenfluss statt. Nach dem Aufstieg durch das Wirtsgestein sammelt sich das Gas unter der Tonüberdeckung an. Die weitere Freisetzung leichtflüchtiger Radionuklide mit der Gasphase richtet sich nach der Geometrie bzw. den Eigenschaften der Tonüberdeckung. Gelöste Radionuklide können advektiv/diffusiv durch das Wirtsgestein transportiert werden. Bedingt durch die Tonüberdeckung findet dieser Transport nahezu horizontal mit nur geringen vertikalen Gradienten über lange Wegstrecken statt. Die Gasbildung verdrängt jedoch Porenwasser im Wirtsgestein, was als zusätzlich treibende Kraft für den Transport radionuklidhaltiger Lösung (auch aus den wärmeentwickelnden Abfällen) wirkt.

4.5 Gasbildung

Zur Gasbildung tragen die korrodierbaren Metalle Eisen, Aluminium und Zink, die abbaubaren organischen Stoffe wie Zellulose, Kunststoffe und Bitumen sowie Wasser als notwendiger Reaktionspartner bei.

4.5.1 Gasbildung der wärmeentwickelnden Abfälle

Bei den wärmeentwickelnden Abfällen wird für die vereinfachte Abschätzung der Gasbildung von drei Klassen von Stahlbehältern (Tabelle 4-4) ausgegangen. Der Massenanteil der dünnwandigen Behälter ist entsprechend Tabelle 4-4 sehr klein, aber während einer Periode von etwa 1'500 Jahren dominieren sie die Gasbildungsrate. Danach sind sie korrodiert, so dass die korrosive Gasbildung nur noch durch die dickwandigen Behälter erfolgt.

Aus der korrodierten Metallmasse kann mit Hilfe der Molmasse des Metalls und des Stöchiometriefaktors (Mol Gas pro Mol Metall) das gebildete Gasvolumen berechnet werden.

$$\Delta V_{\text{Gas}} = - \frac{\Delta m_{\text{M}}}{M_{\text{M}}} \cdot S_{\text{M}} \cdot V_{\text{m}} \quad (5)$$

Molmasse: M_{M} [kg/mol]
 Stöchiometriefaktor: S_{M} [-]
 Molvolumen (STP): $V_{\text{m}} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$

In Tabelle 4-4 und 4-5 sind die Gesamtmassen und der relative Anteil der innerhalb der Klassen sowie die daraus abgeschätzte resultierende maximal Gasmenge bei vollständiger Umsetzung zusammengestellt.

Tabelle 4-4 Vereinfachte Abschätzung der Gasbildung infolge Korrosion der Behälter der wärmeentwickelnden Abfälle im Salinar [BfS 2005] bei vollständiger Umsetzung

| Salinares Wirtsgestein | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Dickenverteilung | Masse Eisen/Stahl [kg] | Anteil in Klasse [%] | Nominaldicke der Klasse [mm] | Gasmenge [m³ STP] |
| 4 - < 7 mm | 3,32E+05 | 0,27 | 3 | 1,77E+05 |
| 7 - < 15 mm | 1,37E+06 | 1,10 | 5 | 7,31E+05 |
| >= 15 mm | 1,23E+08 | 98,63 | 295 | 6,56E+07 |
| Total | 1,25E+08 | 100,00 | | 6,65E+07 |

Tabelle 4-5 Vereinfachte Abschätzung der Gasbildung infolge Korrosion der Behälter der wärmeentwickelnden Abfälle in nicht-salinaren Wirtsgesteinen [BfS 2005]

| Nicht-salinales Wirtsgestein | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Dickenverteilung | Masse Eisen/Stahl [kg] | Anteil in Klasse [%] | Nominaldicke der Klasse [mm] | Gasmenge [m³ STP] |
| 4 - < 7 mm | 1,37E+06 | 0,87 | 5 | 7,31E+05 |
| 7 - < 15 mm | 7,87E+05 | 0,50 | 8 | 4,20E+05 |
| >= 15 mm | 1,56E+08 | 98,63 | 296 | 8,31E+07 |
| Total | 1,8E+08 | 100,00 | | 8,42E+07 |

4.5.2 Gasbildung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle

Die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle haben eine wesentlich komplexere stoffliche Zusammensetzung als die wärmeentwickelnden Abfälle. In Tabelle 4-6 sind die Gesamtmassen der gasbildenden Stoffe und die daraus abgeschätzte resultierende maximal Gasmenge zusammengestellt. Auch bei diesen Abfällen wird der größte Anteil des Gasvolumens (75%) durch die Korrosion der Behälter erzeugt. Der zweitgrößte Beitrag (11%) stammt aus dem mikrobiellen Abbau von organischen Abfallbestandteilen. Weitere Anteile stammen aus der Korrosion der metallischen Abfallkomponenten (6%) und dem unterstellten mikrobiellen Abbau des Fixierungsmittels Bitumen (4%).

Tabelle 4-6 Gesamtes Gasvolumen aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (ohne Berücksichtigung von gasbindenden Reaktionen) [BfS 2005]

| Art | Material | Gesamtmasse [kg] | Umrechnungsfaktor | | Gasmenge [m³ STP] | Anteil Gasmenge [%] |
|------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | | | [mol Gas / kg] | [m³ Gas / kg] | | |
| Abfälle | Organika / Zellulose | 8.15E+05 | 33 | 7.39E-01 | 6.02E+05 | 0% |
| Abfälle | Aluminium | 9.16E+05 | 55.6 | 1.25E+00 | 1.14E+06 | 1% |
| Abfälle | Zirkonium | 1.53E+06 | 21.9 | 4.91E-01 | 7.50E+05 | 0% |
| Abfälle | Kunststoffe / Öle | 7.47E+06 | 142.9 | 3.20E+00 | 2.39E+07 | 11% |
| Abfälle | Stahl / Eisen | 2.51E+07 | 23.8 | 5.33E-01 | 1.34E+07 | 6% |
| Abfälle | Zink | 3.50E+03 | 15.3 | 3.43E-01 | 1.20E+03 | 0% |
| Fixierungsmittel | Bitumen | 2.72E+06 | 142.9 | 3.20E+00 | 8.71E+06 | 4% |
| Fixierungsmittel | Kunststoff | 9.74E+05 | 142.9 | 3.20E+00 | 3.12E+06 | 1% |
| Behälter | Harze | 4.75E+05 | 142.9 | 3.20E+00 | 1.52E+06 | 1% |
| Behälter | Stahl / Eisen | 2.95E+08 | 23.8 | 5.33E-01 | 1.57E+08 | 75% |
| | Summe | 3.35E+08 | | | 2.10E+08 | 100% |

Für die Abfallbehälter kann die Klassifizierung der Schichtdicken der Metalle anhand der Spezifikationen einfach und relativ genau vorgenommen werden. Für die Abfälle und ihre Metallkomponenten liegen keine detaillierten Informationen vor. Aus diesem Grund und wegen verschie-

dener vorliegender Datenbasen wird in TA 3 [Colenco 2003b] dafür eine begründete Abschätzung vorgenommen. Für die weitere Bearbeitung wird von einer Gleichverteilung für Eisen (d.h. jeweils 25%) in die Klassen 1 - < 4 mm, 4 - < 7 mm, 7 - < 15 mm und ≥ 15 mm ausgegangen, letztere ggf. mit einer höheren Wandstärke (z.B. 100 mm).

Für Aluminium und Zink ist die Wandstärke von geringerer Bedeutung, weil die Korrosion (alkalisches Milieu und ausreichendes Wasserangebot vorausgesetzt) bei diesen Metallen in jedem Fall innerhalb weniger Jahre abgeschlossen sein wird. Eine Wandstärke von < 0,1 mm für Zink (verzinkte Oberflächen) und 5 mm für Aluminium erscheint angemessen.

5 Entwicklung von Nachweiskonzepten zur Beherrschbarkeit der Gasbildung für potenzielle Wirtsgesteine

In diesem Kapitel 5 [vgl. Colenco 2004a] werden auf der Basis der in Kapitel 4 [vgl. Colenco 2003b] zusammengestellten Daten mittels vereinfachender Modelle mögliche Nachweisführungen zur Berücksichtigung der Gasbildung in einem Langzeitsicherheitsnachweis untersucht.

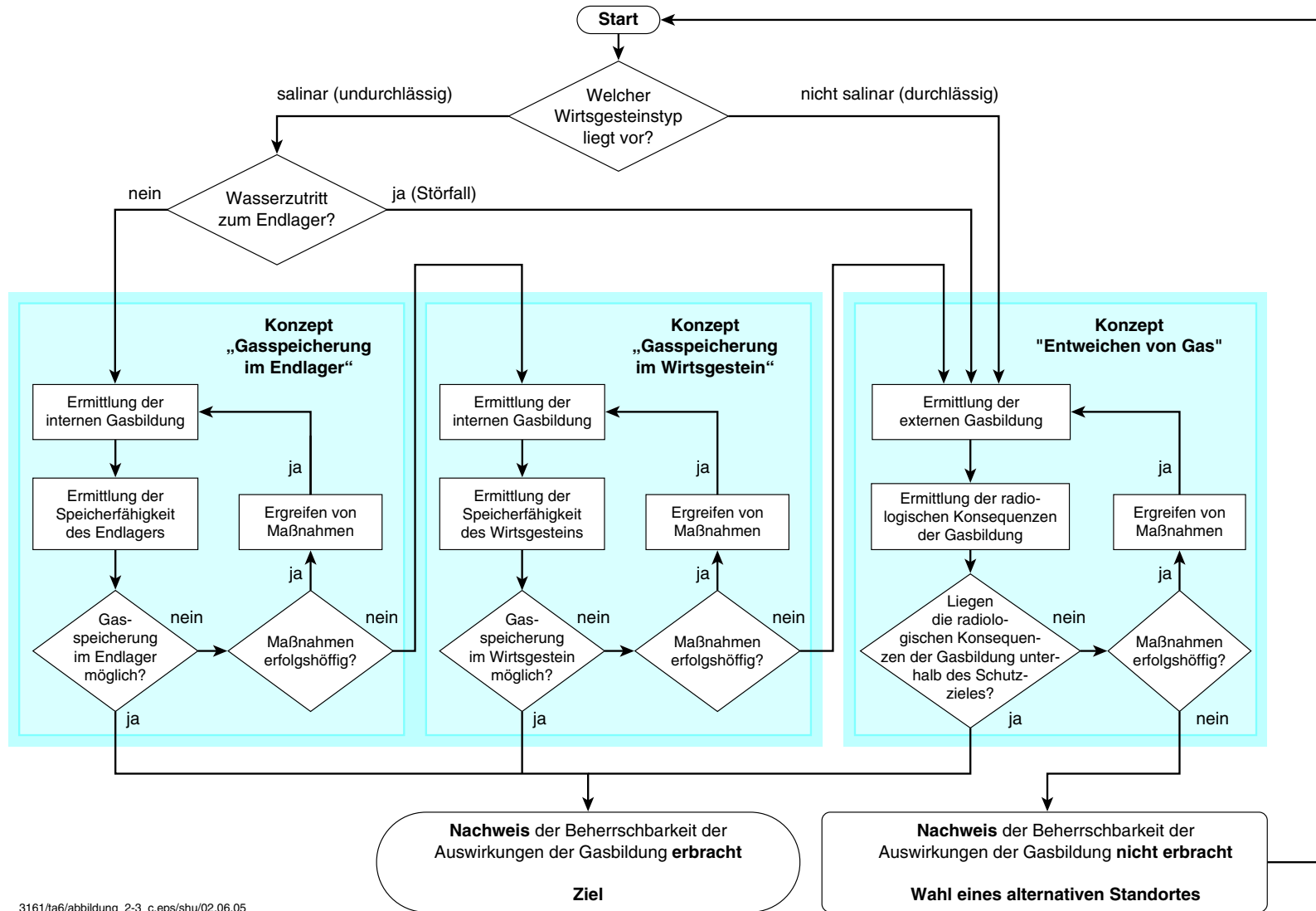
5.1 Nachweiskonzepte und Rechenmodelle

Die Art des Wirtsgesteins, in dem ein Endlager am potenziellen Standort errichtet werden soll, ist zunächst entscheidend für das Vorgehen zum Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung. Hierzu werden zunächst zwei Kategorien von Wirtsgesteinen unterschieden:

1. Zu den undurchlässigen Wirtsgesteinen zählen solche, die den Einschluss von Gasen und Flüssigkeiten im ungestörten Zustand über den Betrachtungszeitraum im Endlager gewährleisten. Hierzu werden im Rahmen dieses Vorhabens die salinaren Wirtsgesteine gerechnet.
2. Im Gegensatz zu 1. können die durchlässigen Wirtsgesteine den Einschluss des Gases im Endlager nicht gewährleisten. Als durchlässig eingestuft werden generell solche Wirtsgesteine, in denen Flüssigkeiten geogen vorhanden sind bzw. durch die Wässer in das Endlager eindringen können. Im Rahmen dieser Studie werden die sonstigen Gesteine, zu denen der Tonstein, das Kristallin sowie die sonstigen Gesteine unter Tonüberdeckung zählen, derart eingestuft.

Eine schematische Darstellung der Nachweisführung zeigt das Ablaufdiagramm in Abbildung 5-1. Darin sind die durchzuführenden Schritte als Rechtecke, zu beantwortende Fragen als Rauten und die möglichen Pfade als Pfeile dargestellt.

Gemäß dieser Unterteilung bieten sich zwei unterschiedliche Nachweiskonzepte an: für die undurchlässigen Wirtsgesteine die „Gasspeicherung“, für die durchlässigen Wirtsgesteine das Konzept „Entweichen von Gas“.



3161/ta6/abbildung_2-3_c.eps/shu/02.06.05

Abbildung 5-1 Vorgehensweise zum Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung

5.1.1 Konzept der „Gasspeicherung“

Im Konzept der Gasspeicherung werden zwei Teilkonzepte unterschieden, das Konzept der „Gasspeicherung im Endlager“ und das Konzept der „Gasspeicherung im Wirtsgestein“.

Konzept der „Gasspeicherung im Endlager“

Zur Gasspeicherung ist zu prüfen, ob eine dauerhafte Speicherung aller entstehenden Gase im Endlager möglich ist. Hierzu ist zunächst die Gasbildung (Menge und Rate) im Endlager aufgrund der internen Gasbildung zu ermitteln. Anschließend ist zu prüfen, ob die entstehenden Gasmengen im Endlager gespeichert werden können. Wenn dies gezeigt werden kann, ist der Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung erbracht, und die Nachweisführung ist beendet (siehe „linker“ Pfad von oben nach unten im Ablaufdiagramm Abbildung 5-1).

Falls die Speicherung aller Gase im Endlager nicht möglich ist (weil die erwarteten Drücke als so hoch sind, dass ein Eindringen der Gase in das Wirtsgestein nicht auszuschließen ist), sind Maßnahmen zu prüfen, die eine Gasspeicherung im Endlager dennoch ermöglichen. Eine Diskussion solcher Maßnahmen findet sich in den Kapiteln 6 und 7. Wenn unter Einbeziehung dieser Maßnahmen eine Gasspeicherung im Endlager möglich ist, ist der Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung im Endlager ebenfalls erbracht.

Konzept der „Gasspeicherung im Wirtsgestein“

Wenn die vollständige Gasspeicherung im Endlager nicht möglich ist, weil durch den erwarteten Druckanstieg die Bildung von Mikrorissen und damit das Eindringen der Gase in das Wirtsgestein erwartet wird, kann alternativ das Konzept der Gasspeicherung im Wirtsgestein verfolgt werden. Dieses beruht auf der Speicherung des Gases in Mikrorissen, die durch den Überdruck im Endlager im angrenzenden Wirtsgestein entstehen. Wenn der Nachweis der Gasspeicherung nicht erbracht werden kann, können auch hier Maßnahmen erwogen werden, bei deren Ergreifung eine Speicherung der entstehenden Gase nachgewiesen werden kann (vgl. Kapitel 6 und 7).

Übergang zum Konzept „Entweichen von Gas“

Wenn für ein im ungestörten Zustand undurchlässiges Gestein keines der Konzepte der Gasspeicherung zum Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen führt, heißt dies, dass Gas aus dem Endlager durch die Bildung von (Mikro)-Rissen durch das Wirtsgestein und ggf. weiterer geologischer Barrieren migrieren und schließlich in die Biosphäre gelangen kann. Dies bedeutet jedoch nicht, dass das betrachtete Wirtsgestein unter dem Aspekt der Gasbildung ungeeignet ist. Das Wirtsgestein ist in diesem Falle als „durchlässig“ zu betrachten und das Konzept „Entweichen von Gas“ anzuwenden (siehe Abbildung 5-1). Dabei ist dann allerdings auch die externe Gasbildung zu berücksichtigen.

Rechenmodelle

Das Rechenmodell für das Konzept der „Gasspeicherung im Endlager“ berechnet unter Berücksichtigung der Gasbildung und des Konvergenzverhaltens der Einlagerungsstrecken die zeitliche Entwicklung des Druckes in den Einlagerungsstrecken. Das Verhältnis aus dem Maximum des Drucks zum Frac-Druck, der hier vereinfachend dem lithostatischen Druck gleichgesetzt wird,

muss kleiner als 1 sein, um die Integrität der Barriere und damit den Einschluss des Gases gewährleisten zu können (siehe Abb. 5-2a)

Das Rechenmodell für das Konzept der „Gasspeicherung im Wirtsgestein“, geht von der Entstehung lokal begrenzter Bereiche erhöhter Porosität und Permeabilität aus, sofern der Gasdruck im Endlager auf den lithostatischen Druck ansteigt (vgl. Kapitel 6.1). Für den Nachweis des vollständigen Einschlusses des Gases im Wirtsgestein muss die relative Eindringtiefe des Gases in das Wirtsgestein (das Verhältnis aus Eindringtiefe des Gases in das Wirtsgestein zum Abstand des Endlagers zum Salzspiegel) kleiner als 1 sein (siehe Abbildung 5-2b).

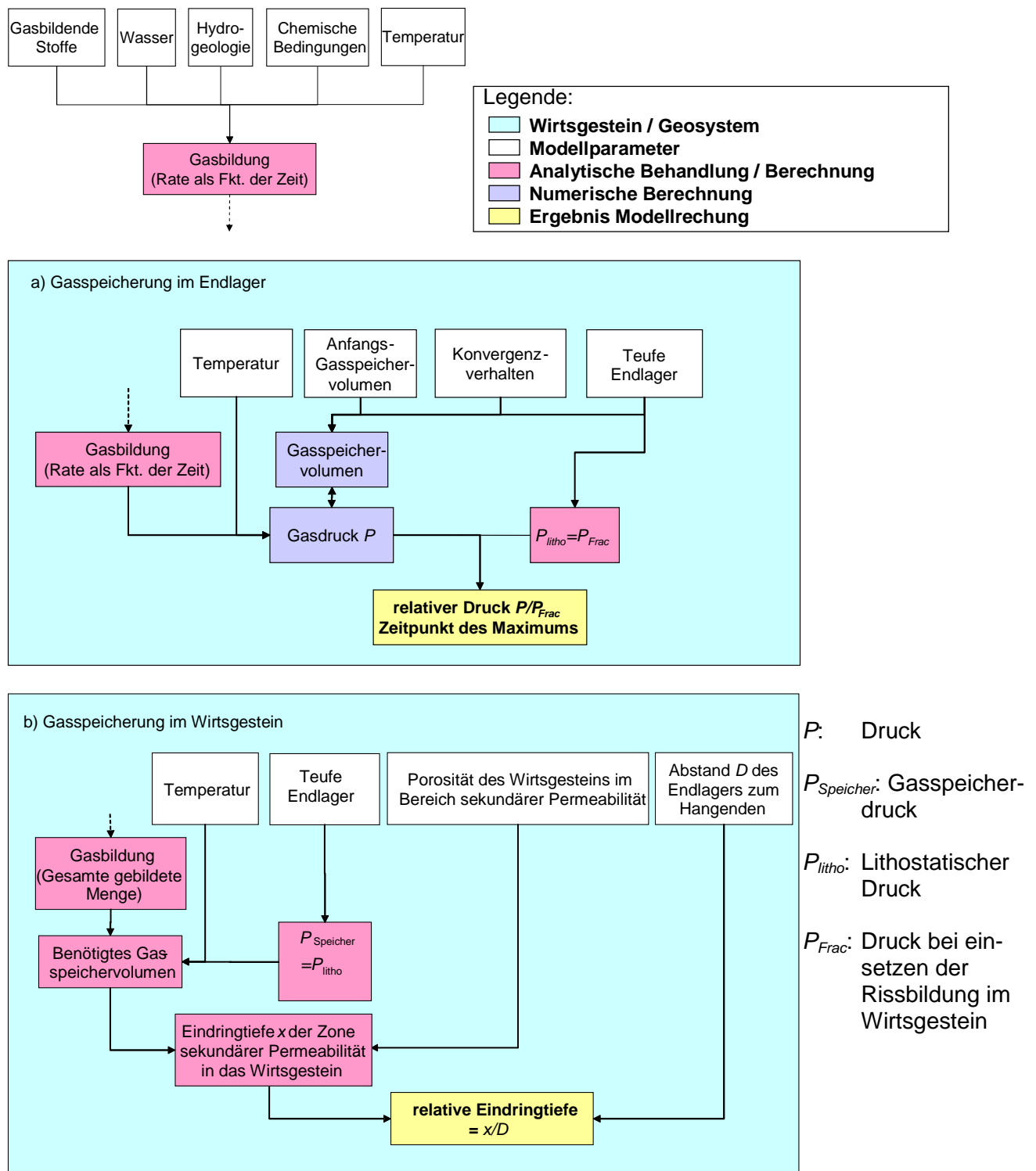


Abbildung 5-2 Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse zum Nachweiskonzept der Gasspeicherung. Das Schema der Berechnung der Gasbildung (Gesamtmenge und Rate) ist unabhängig vom Nachweiskonzept.

5.1.2 Konzept „Entweichen von Gas“

In Wirtsgesteinen, für die ein dauerhafter Gaseinschluss nicht gewährleistet werden kann, ist ein Nachweis gemäß dem Konzept „Entweichen von Gas“ durchzuführen. Hierzu sind die radiologischen Konsequenzen zu ermitteln, die als Folge der Gasbildung zu erwarten sind. Wenn diese die Schutzziele nicht verletzen, dann ist der Nachweis der Beherrschbarkeit der Auswirkungen der Gasbildung auch für diese Wirtsgesteine erbracht.

Wenn der Nachweis nicht gelingt, sind entsprechende Änderungen am Einlagerungskonzept und eine erneute Bewertung vorzunehmen. Wenn unter Einbeziehung aller als geeignet eingestuften Maßnahmen der Nachweis der Beherrschbarkeit der Gasbildung dennoch nicht gelingt, dann ist ein alternativer Standort für das Endlager zu wählen.

Rechenmodell

Beim Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Permeabilität des Wirtsgesteins Stoffe aus dem Endlager durch das Wirtsgestein in die Biosphäre gelangen können. Für derartige Wirtsgesteine muss daher - unabhängig davon, ob Gasbildung stattfindet oder nicht - nachgewiesen werden, dass keine Gefährdung der Umwelt aus einer potenziellen Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Endlager in die Biosphäre resultiert. Um den Einfluss der Gasbildung auf die potenzielle Freisetzung radioaktiver Stoffe einordnen zu können, werden Durchbruchzeiten⁴ für einen Gas- und einen Flüssigkeitstracer sowie der maximale relative Druck berechnet (siehe Abbildung 5-3). Insbesondere die Durchbruchzeiten sind ein Maß für die geologische Gesamtsituation. Je länger diese Durchbruchzeiten sind, umso günstiger ist die geologische Gesamtsituation einzustufen. Diese Größen dienen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse als Indikator beim Vergleich der unterschiedlichen Parametervariationen. Zur numerischen Berechnung der Durchbruchzeiten eines flüssigen und eines gasförmigen Tracers wird das Modul EOS7 des Rechencodes TOUGH2 verwendet.

⁴ Unter der Durchbruchzeit eines Tracers wird in dieser Studie die Zeit verstanden, die vergeht, bis ein bestimmter Anteil des Tracerinventars im Porenraum des Endlagers in einen gewissen Abstand vom Endlager transportiert wurde.

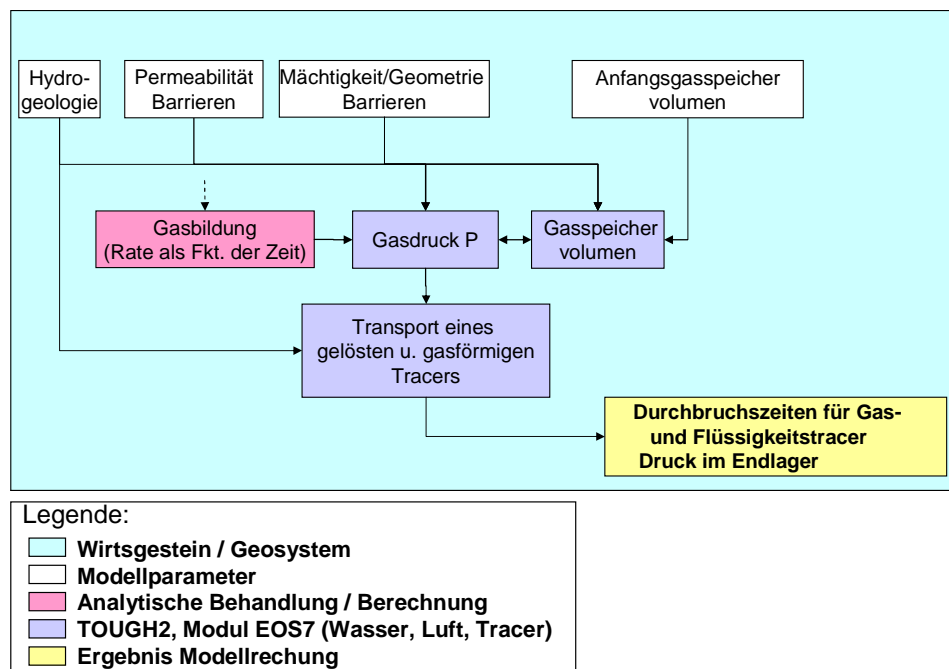


Abbildung 5-3 Schematische Darstellung der Modellrechnungen zum Nachweiskonzept des Entweichens von Gas. Das Schema der Berechnung der Gasbildung (Gesamtmenge und Rate) ist unabhängig vom Nachweiskonzept (siehe Abbildung 5-2).

Als Basis für die weiteren Betrachtungen werden die relevanten Prozesse der Gasbildung nachgebildet und Gasbildungsraten und –mengen basierend auf den prognostizierten Abfallmengen berechnet (vgl. Kapitel 4). Diese Quellterme sind die Grundlage für die folgenden Modellrechnungen zu den Auswirkungen der Gasbildung in den verschiedenen Geosystemen. Basierend auf den prognostizierten Abfallmengen wird für die wärmeentwickelnden Abfälle nur die Gasbildung infolge Korrosion von Eisen und Stahl berechnet. Da nur geringe Gasmengen infolge anaerober Korrosion anderer Metalle und Radiolyse entstehen, werden diese Prozesse bei der Ermittlung der Quellterme nicht hier berücksichtigt.

Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen wird zusätzlich zur Gasbildung durch Korrosion von Eisen auch die Gasbildung infolge mikrobiellen Abbaus berücksichtigt. Des Weiteren werden Methanogenese und Carbonatisierung als gasbindende Prozesse in die Berechnung der Gasmengen und Raten mit einbezogen.

Aufgrund der unterschiedlichen Mengen verfügbaren Wassers ergeben sich in salinaren Gesteinen geringere Gasmengen als in nicht-salinaren Gesteinen. Der größte Anteil der gebildeten Gasmengen stammt von den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen (vgl. Kapitel 4.5).

5.2 Anwendung der Nachweiskonzepte

Es werden unter dem Aspekt der Beherrschbarkeit der Gasbildung insgesamt 6 Geosysteme in 4 verschiedenen Wirtsgesteinstypen untersucht:

1. Salinar, steile Lagerung, Endlager in 800 m Teufe
2. Salinar, flache Lagerung, Endlager in 800 m Teufe
3. Salinar, flache Lagerung, Endlager in 1'300 m Teufe
4. Tonstein
5. Kristalline Gesteine
6. Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung

Die für jedes Geosystem durchgeführten Arbeiten umfassen:

1. Eine Analyse der Konsequenzen aus der Gasbildung anhand der unterstellten Referenzszenarien. Hierzu werden basierend auf dem derzeitigen Kenntnisstand vereinfachende Modellrechnungen mit den in Kapitel 4 festgelegten Parametern durchgeführt.
2. Durchführen einer Sensitivitätsanalyse zur Beurteilung von Unsicherheiten in den Konsequenzen, da
 - a. für viele Parameter eine große Bandbreite an Werten denkbar und möglich ist und
 - b. die Modellparameter generell durch räumliche Veränderungen, Veränderungen mit der Zeit und Ungenauigkeiten in der Methode der Bestimmung mit Unsicherheiten behaftet sind.
3. Identifizierung der zur Umsetzung des Nachweiskonzeptes wesentlichen Parameter. Diese sind Basis zur Bewertung von möglichen Maßnahmen (vgl. Kapitel 6 und 7).

5.2.1 Salinare Wirtsgesteine

Untersucht werden die Fälle der steilen und der flachen Lagerung jeweils in 800 m Teufe und der flachen Lagerung in 1'300 m Teufe. Getrennt betrachtet werden auch die zwei verschiedenen Gasspeichermöglichkeiten in den Einlagerungsbereichen und im Wirtsgestein. Eine Zusammenstellung der Rechenfälle mit den entsprechenden Parametern zeigt Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1 Eingangsparmeter für Nachweiskonzept Gasspeicherung im Endlager

| Geo-system | Abfall-typ | Bezeichnung Rechenfall | Gasbildungsszenario | Anfangsvolumen [m ³] | Konvergenzrate K _r [a ⁻¹] | Teufe [m] | Temperatur [K] | Faktor für Temperatureinfluss auf Konvergenz f ₃ | Abstand Hangendes [m] | | |
|---|---|---|--------------------------|----------------------------------|--|--------------------|--------------------|---|-------------------------|-----|-----|
| Salinar, steile Lagerung (800 m Teufe), Salinar, flache Lagerung (800 m Teufe) | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | Referenzfall | Referenzfall | 5,2x10 ⁵ | 1x10 ⁻³ | 800 | 308 | 1 | steile Lagerung: 500 | | |
| | | hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | |
| | | hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | 5x10 ⁻³ | | | | | | | |
| | | doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 1,0x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | |
| | | keine Konvergenz | Referenzfall | 5,2x10 ⁵ | 0 | | | | | | |
| | | Keine Gasbildung | - | | 1x10 ⁻³ | | | | | | |
| | | 750 m Teufe | Referenzfall | | | | | | | 750 | 307 |
| | | 850 m Teufe | Referenzfall | | | | | | | 850 | 309 |
| | Referenzfall | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | | | 1x10 ⁻³ | 800 | 358 | | 10 | |
| | hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | | |
| | niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | | |
| | hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | | |
| | niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | | |
| | hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | | 1x10 ⁻⁴ | | | | | | | |
| | niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | 1,4x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | | |
| | doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | 0 | | | | | | | |
| | keine Konvergenz | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | 800 | 358 | 10 | | | | |
| | Keine Gasbildung | - | | | | | | | | | |
| | 750 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 750 | | 357 | |
| | 850 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 850 | | 359 | |
| Referenzfall | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | | 1x10 ⁻³ | | | | 800 | 358 | 10 | |
| hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | | | |
| niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | | | |
| hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | | | |
| niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | | | |
| hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | | 1x10 ⁻⁴ | | | | | | | | |
| niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | 1,4x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | | | |
| doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | 0 | | | | | | | | |
| keine Konvergenz | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | 800 | 358 | 10 | | | | | |
| Keine Gasbildung | - | | | | | | | | | | |
| 750 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 750 | 357 | | | |
| 850 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 850 | 359 | | | |
| Referenzfall | Referenzfall | | 7,0x10 ⁵ | | | | 1x10 ⁻³ | 800 | 358 | 10 | |
| hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | | | |
| niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | | | |
| hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | | | |
| niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | | | |
| hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | 1x10 ⁻⁴ | | | | | | | | | |
| niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | 1,4x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | | | |
| doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | 0 | | | | | | | | |
| keine Konvergenz | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | 800 | 358 | 10 | | | | | |
| Keine Gasbildung | - | | | | | | | | | | |
| 750 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 750 | 357 | | | |
| 850 m Teufe | Referenzfall | | | | | | 850 | 359 | | | |

Tabelle 5-1 (Fortsetzung)

| Geo-system | Abfall-typ | Bezeichnung Rechenfall | Gasbildungsszenario | Anfangsvolumen [m ³] | Konvergenzrate [a ⁻¹] | Teufe [m] | Temperatur [K] | Faktor für Temperatureinfluss auf Konvergenz f ₃ | Abstand Hangendes [m] | | |
|--|--|---|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------|---|-----------------------|-------|-----|
| Salinar, flache Lagerung (1'300 m Teufe) | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | Referenzfall | Referenzfall | 5,2x10 ⁵ | 1x10 ⁻³ | 1'300 | 318 | 2 | 75 | | |
| | | hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | |
| | | hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | | | | | | | | |
| | | doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 1,0x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | |
| | | keine Konvergenz | Referenzfall | 5,2x10 ⁵ | 0 | | | | | | |
| | | Keine Gasbildung | - | | | | | | | | |
| | | 750 m Teufe | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | | | | | 1'250 | 317 |
| | | 850 m Teufe | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | | | | | 1'350 | 319 |
| | Wärmeentwickelnde Abfälle | Referenzfall | Referenzfall | | 7,0x10 ⁵ | 1x10 ⁻³ | 1'300 | 368 | | 20 | |
| | | hohe Gasbildungsrate | hohe Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasbildungsrate | niedrige Gasbildungsrate | | | | | | | | |
| | | hohe Gasmenge | hohe Gasmenge | | | | | | | | |
| | | niedrige Gasmenge | niedrige Gasmenge | | | | | | | | |
| | | hohe Konvergenzrate | hohe Konvergenzrate | | | | | | | | |
| | | niedrige Konvergenzrate | Referenzfall | | | | | | | | |
| | | doppeltes Anfangsvolumen des unverfüllten Hohlraums | Referenzfall | 1,4x10 ⁶ | 1x10 ⁻³ | | | | | | |
| | | keine Konvergenz | Referenzfall | 7,0x10 ⁵ | 0 | | | | | | |
| | | Keine Gasbildung | - | | | | | | | | |
| | | 1'250 m Teufe | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | 1'250 | | | | | 367 |
| | | 1'350 m Teufe | Referenzfall | | 1x10 ⁻³ | 1'350 | | | | | 369 |

Ohne besondere Maßnahmen ist die Gasspeicherung im Endlager nicht möglich, da der Gasdruck in den Einlagerungsstrecken aufgrund der Gasbildung und der Konvergenz der Einlagerungsstrecken mit den Auslegungsdaten des Referenzendlagers über den lithostatischen Druck ansteigen würde. Beispielhaft hierzu zeigt Abbildung 5-4 für die Lagerung in 800 m Teufe den zeitlichen Verlauf des Gasdruckes in den Einlagerungsstrecken für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle. Im unterstellten Referenzfall würde der Gasdruck in den Einlagerungsstrecken nach ca. 1'000 Jahren auf den lithostatischen Druck ansteigen.

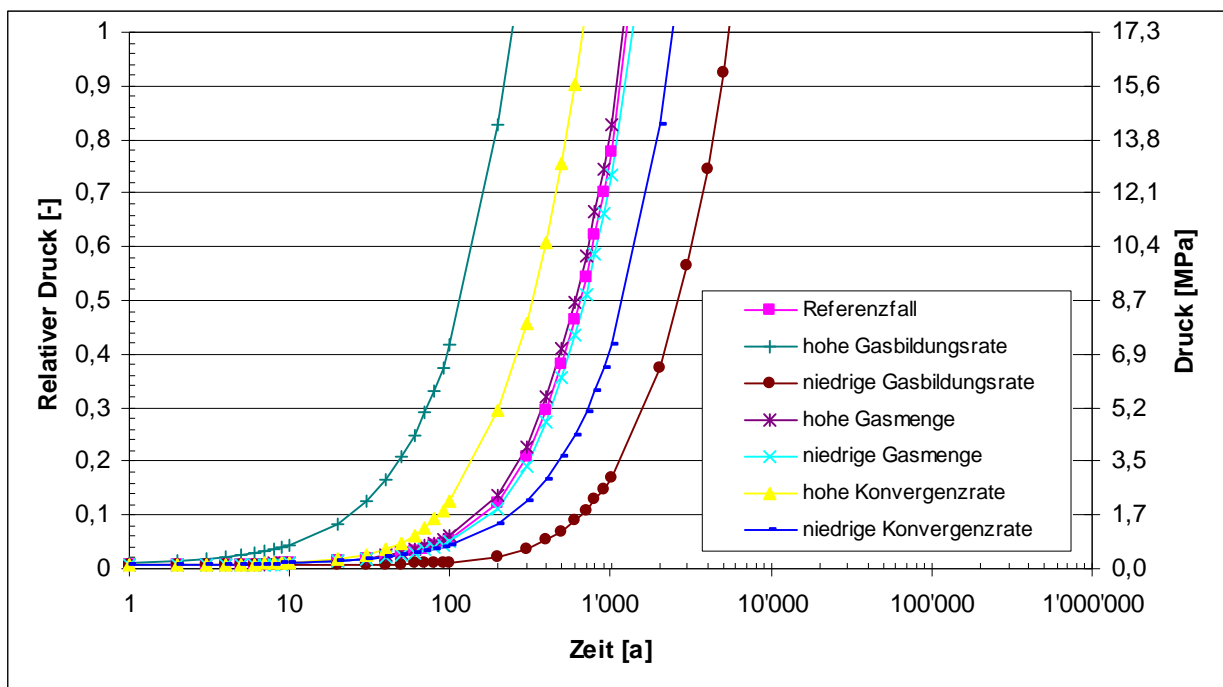


Abbildung 5-4 Salinar, steile/flache Lagerung 800 m Teufe, vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle: Entwicklung des (relativen) Drucks im Endlager für verschiedene Parametervariationen

Die Gasspeicherung im Wirtsgestein ist möglich, wenn die Eindringtiefe des Gases in das Wirtsgestein kleiner als der Abstand des Endlagers zur Hangendgrenze ist. Bei der steilen Lagerung mit einem Abstand zum Hangenden von 500 m kann daher mehr Gas eingeschlossen werden als bei der flachen Lagerung mit einem Abstand zum Hangenden von nur 75 m.

Bei den wärmeentwickelnden Abfällen betragen die ermittelten Eindringtiefen für Gase ins Wirtsgestein weniger als 5 m und liegen damit für die flache und insbesondere für die steile Lagerung deutlich unterhalb des Abstandes zum Hangenden. Die relativen Eindringtiefen sind daher deutlich kleiner als 1.

Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen sind die Eindringtiefen vor allen Dingen aufgrund der hohen Gasmenge deutlich höher als für die wärmeentwickelnden Abfälle. Bei der Lagerung in 800 m Teufe beträgt im Referenzfall die (hypothetische) Eindringtiefe 158 m, in 1'300 m Teufe würde die Eindringtiefe 94 m betragen. Die Gase können daher nur bei der steilen Lagerung, bei der ein Abstand des Endlagers zum Hangenden von 500 m angenommen wird, voll-

ständig eingeschlossen werden, nicht aber im Fall der flachen Lagerung mit einem Abstand zum Hangenden von 75 m.

5.2.2 Nicht-salinare Wirtsgesteine

Für die Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung (Konzept „Entweichen von Gas“) werden Durchbruchzeiten für einen gasförmigen und einen flüssigen Tracer sowie der maximale relative Druck im Endlager als Indikatoren für die Beherrschbarkeit der Gasbildung errechnet.

5.2.2.1 Tonstein

Im hier betrachteten Geosystem „Tonstein“ (siehe Abbildung 5-5, Tabelle 5-2) hat die Gasbildung einen sehr geringen Einfluss auf die Ausbreitung des Flüssigkeitstracers, da der Diffusionsprozess dominiert. Auch die Ausbildung eines Dilatanzbereichs mit einer erhöhten Permeabilität infolge Druckanstiegs führt zu keiner signifikant kürzeren Durchbruchzeit. Die Durchbruchzeit des Gastracers hingegen hängt maßgeblich von der Gasbildung ab und liegt im Referenzfall um ca. eine Größenordnung unterhalb der des Flüssigkeitstracers (vgl. Tabelle 5-2). Aufgrund der geringen Permeabilität des Tonsteins ist mit einem signifikanten Druckanstieg im Endlager zu rechnen.

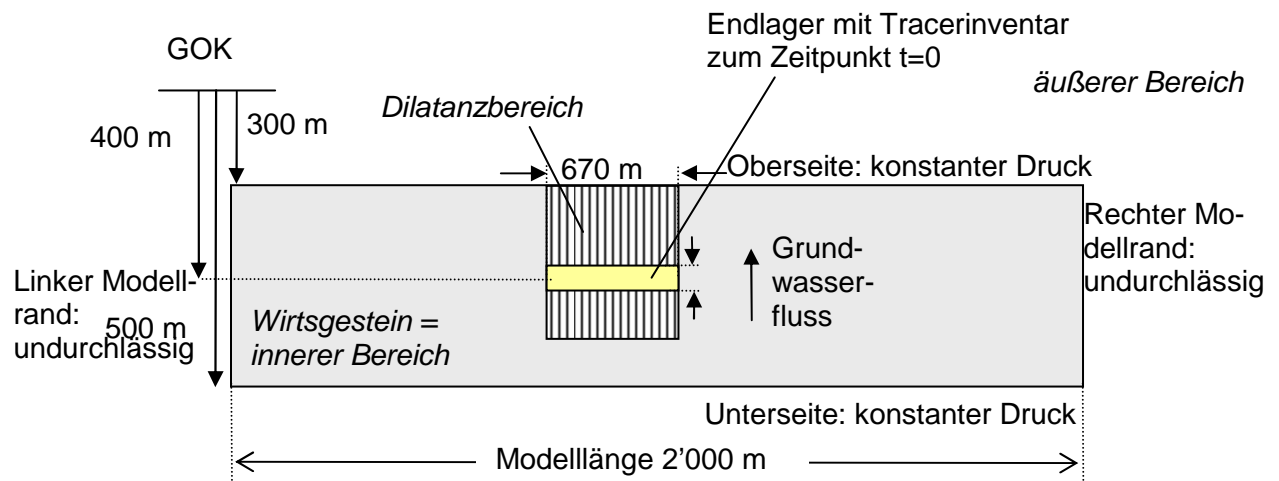


Abbildung 5-5 Schematische Darstellung des Modells des Geosystems Tonstein

Tabelle 5-2 Tonstein, Eingangsparameter für den Referenzfall

| Parameter | Wert | |
|---|---|---|
| Modellbreite [m] | 2'000 | |
| Mächtigkeit Wirtsgestein [m] | 200 | |
| Teufe Oberkante Wirtsgestein [m] | 300 | |
| Endlagerteufe [m] | 400 | |
| Endlagerhöhe [m] | 7 | |
| Länge des Endlagers [m] | 670 | |
| Vertikaler hydraulischer Gradient [m/m] | 0,1 | |
| Gasbildung | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle in nicht-salinaren Gesteinen, Referenzfall | |
| | Wirtsgestein ¹⁾ | Endlager |
| Porosität [-] | 0,12 | $6,5 \times 10^{-2}$ |
| Reindichte [kg/m ³] | 2'600 | 2'600 |
| Permeabilität [m ²] | 1×10^{-20} (1×10^{-19} m ²) | 1×10^{-15} |
| Anisotropie | keine | keine |
| Res. Gassättigung [-] | 0,01 | 0,2 |
| Res. Flüssigkeitssättigung [-] | 0,5 (0,95 für relative Permeabilitätsbeziehung) | 0,2 |
| Gaseindringdruck | 4,7 MPa, abhängig von Permeabilität gemäß Beziehung von Davis | 87'000 Pa, abhängig von Permeabilität gemäß Beziehung von Davis |
| Modell relative Permeabilität | van Genuchten, $n=2$ | Corey |
| Modell Kapillardruck | van Genuchten, $n=2$ | van Genuchten, $n=2$ |
| Anfangsdruckverteilung | Hydrostatisch, überlagert von vertikalem hydraulischen Gradienten | Atmosphärendruck |
| Anfangssättigung mit Gas S_g | 0 | 0,6 |
| Anfangsgehalt Tracer | 0 | 1 |
| Porendiffusionskoeffizient | 2×10^{-10} m ² /s | 2×10^{-10} m ² /s |

¹⁾ Werte in Klammern gelten für den Dilatanzbereich

Tabelle 5-3 Tonstein, Ergebnisse der Modellrechnungen

| | Durchbruchzeit Flüssigkeitstracer [a] | Durchbruchzeit Gastracer [a] | Max. rel. Druck [-] |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Referenzfall | 40'000 | 3'600 | 0.871 |

| Sensitivitätsanalyse | | | | |
|----------------------|----------------------|--------|--------|-------|
| Parameter | Wert bzw. Rechenfall | | | |
| Gasbildungsrate | niedrig | 39'000 | 47'000 | 0,695 |
| | hoch | 40'000 | 340 | 0,960 |

| | | Durchbruchszeit Flüssigkeitstracer [a] | Durchbruchszeit Gastracer [a] | Max. rel. Druck [-] |
|-----------------------------------|--|--|-------------------------------|---------------------|
| Gasmenge | keine | 32'000 | 29'000 | 0,412 |
| | niedrig | 39'000 | 4'900 | 0,773 |
| | hoch | 39'000 | 3'500 | 0,883 |
| Vert. Gradient *) [m/m] | 0,0 | 39'000 | 3'700 | 0,876 |
| | 1,0 | 39'000 | 3'200 | 0,850 |
| Permeabilität*) [m ²] | 1x10 ⁻¹⁹ | 35'000 | 15'000 | 0,781 |
| | 1x10 ⁻¹⁸ | 37'000 | 5'400 | 0,503 |
| Porosität*) [-] | 0,06 | 41'000 | 2'300 | 0,866 |
| | 0,15 | 39'000 | 4'300 | 0,869 |
| Anisotropie*) | k _h = 10 x k | 41'000 | 3'700 | 0,845 |
| | Länge Dilatanzbereich = 2 x Länge Endlager | 41'000 | 4'200 | 0,755 |
| Mächtigkeit*) [m] | 100 | 7'700 | 2'300 | 0,858 |
| | 300 | 97'000 | 4'200 | 0,813 |
| Diffusion | keine | 1'000'000 | 3'800 | 0,877 |

*) Wirtsgestein

5.2.2.2 Kristallin

Im kristallinen Wirtsgestein bilden Klüfte bevorzugte Wegsamkeiten und damit ergeben sich entsprechend kürzere Durchbruchszeiten der Flüssigkeits- und Gastracer als im Geosystem sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung. Ausgehend vom Referenzfall (Parameter siehe Tabelle 5-4) zeigt die Gasbildung einen signifikanten Einfluss auf die Durchbruchszeiten. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des geklüfteten Wirtsgesteins bewirkt die Gasbildung jedoch nur einen geringen Druckanstieg im Endlager (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4 Kristallin, Eingangsparameter für Referenzfall

| Parameter | Wert | |
|---|---|----------|
| Modellbreite [m] | 1'200 | |
| Mächtigkeit Wirtsgestein [m] | 1'000 | |
| Teufe Oberkante Wirtsgestein [m] | 300 | |
| Endlagerteufe [m] | 800 | |
| Endlagerhöhe [m] | 50 | |
| Länge des Endlagers [m] | 500 | |
| Horizontaler hydraulischer Gradient [m/m] | 5x10 ⁻⁴ | |
| Gasbildung | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle in nicht-salinarem Gestein, Referenzfall | |
| | Wirtsgestein | Endlager |
| Hydraulisch wirksame Kluftweite [m] | 0,1 | - |
| Mittlere Porosität des hydraulisch wirksamen Bereichs der Kluft [-] | 0,05 | - |

| Parameter | Wert | |
|---|---|----------------------|
| Fließporosität [-] | 0,0025 | 0,065 |
| Feststoffdichte [kg/m ³] | 2'500 | 2'600 |
| Permeabilität [m ²] | 1x10 ⁻¹⁶ (Klüfte: 2x10 ⁻¹⁵) | 1x10 ⁻¹⁵ |
| Res. Gassättigung [-] | 0,01 | 0,1 |
| Res. Flüssigkeitssättigung [-] | 0,5 | 0,2 |
| Gaseindringdruck [Pa] | 68'000 ¹⁾ | 87'000 ¹⁾ |
| Modell relative Permeabilität | Flüssigkeit: van Genuchten-Mualem Gas: Grant [Pruess 1998] , $\lambda=0,58$ | Corey [Corey 1994] |
| Modell Kapillardruck | van Genuchten [Pruess 1998] | |
| Anfangsdruckverteilung | Hydrostatisch mit horizontalem Gradienten | Atmosphärendruck |
| Anfangssättigung mit Gas S _g | 0 | 0,6 |
| Anfangsgehalt Tracer | 0 | 1 |

¹⁾ Gaseindringdruck gemäß [Davies 1991] in Abhängigkeit der Permeabilität der Klüfte

Tabelle 5-5 Kristallin, Ergebnisse der Modellrechnungen

| | Durchbruchzeit Flüssigkeitstracer [a] | Durchbruchzeit Gastracer [a] | Max. rel. Druck [-] |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Referenzfall | 4'700 | 2'300 | 0,419 |

| Sensitivitätsanalyse | | | | |
|---|------------------------|--------|--------|-------|
| Parameter | Wert bzw. Rechenfall | | | |
| Gasbildungsrate | niedrig | 11'000 | 14'000 | 0,418 |
| | hoch | 3'700 | 240 | 0,423 |
| Gasmenge | keine | 11'000 | 11'000 | 0,413 |
| | niedrig | 4'600 | 3'700 | 0,418 |
| | hoch | 4'600 | 2'200 | 0,419 |
| Hor. Gradient ^{*)} [m/m] | 5x10 ⁻⁵ | 38'000 | 2'300 | 0,418 |
| | 2x10 ⁻³ | 1'400 | 2'300 | 0,419 |
| Permeabilität ^{*)} [m ²] | 1x10 ⁻¹⁸ | 58'000 | 2'200 | 0,455 |
| | 1x10 ⁻¹⁴ | 230 | 2'200 | 0,418 |
| Porosität ^{*)} [-] | 5x10 ⁻⁴ | 780 | 2'200 | 0,418 |
| | 5x10 ⁻³ | 14'000 | 2'300 | 0,419 |
| Länge ^{*)} [m] | 700 | 250 | 2'300 | 0,418 |
| | 2'000 | 31'000 | 2'300 | 0,419 |
| Mächtigkeit ^{*)} [m] | 800 | 5'000 | 2'300 | 0,419 |
| | 1'200 | 4'700 | 2'300 | 0,418 |
| Zweiphasenparameter | van Genuchten – Mualem | 4'700 | 2'300 | 0,419 |
| | S _{gr} =0,0 | 4'300 | 2'200 | 0,418 |

^{*)} Wirtsgestein

5.2.2.3 Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung

Die Sensitivitätsanalyse basierend auf dem Referenzfall (Tabelle 5-6) zeigt im hier untersuchten Geosystem einen gewissen Einfluss der Gasbildung auf die Durchbruchzeit des Flüssigkeits- und Gastracers sowie auf den relativen Druck. Im Vergleich mit den Parametervariationen zur Gasbildung haben diejenigen zu den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteines, zur horizontalen Ausdehnung des Wirtsgesteins sowie zum hydraulischen Gradienten im Grundwasser jedoch einen wesentlich stärkeren Einfluss (vgl. Tabelle 5-7).

Tabelle 5-6 Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, Eingangsparameter für Referenzfall

| Parameter | Wert | |
|--|---|----------------------|
| Modelllänge [m] | 20'000 (Länge des bilanzierten Bereichs beträgt 5'000 m) | |
| Mächtigkeit Wirtsgestein [m] | 200 | |
| Teufe Grenze Wirtsgestein/Tonüberdeckung [m] | 700 | |
| Endlagerteufe [m] | 800 | |
| Endlagerhöhe [m] | 7 | |
| Länge des Endlagers [m] | 670 | |
| Horizontaler hydraulischer Gradient [m/m] | 5×10^{-4} | |
| Gasbildung | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle in nicht-salinarem Gestein, Referenzfall | |
| | Wirtsgestein | Endlager |
| Porosität [-] | 0,1 | 0,065 |
| Feststoffdichte [kg/m^3] | 2'600 | 2'600 |
| Permeabilität [m^2] | 1×10^{-15} | 1×10^{-15} |
| Res, Gassättigung S_{gr} [-] | 0,2 | 0,1 |
| Res Flüssigkeitssättigung S_{rl} [-] | 0,2 | 0,2 |
| Gaseindringdruck [Pa] | 87'000 ¹⁾ | 87'000 ¹⁾ |
| Modell relative Permeabilität | Corey [Corey 1994] | |
| Modell Kapillardruck | van Genuchten [Pruess 1999], $\lambda=0,33$ | |
| Anfangsdruckverteilung | Hydrostatisch mit horizontalem Gradienten | Atmosphärendruck |
| Anfangssättigung mit Gas S_g | 0 | 0,6 |
| Anfangsgehalt Tracer | 0 | 1 |

¹⁾ Gaseindringdruck ist abhängig von Permeabilität [Davies 1991]

Tabelle 5-7 Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, Ergebnisse der Modellrechnungen

| | Durchbruchzeit Flüssigkeitstracer [a] | Durchbruchzeit Gastracer [a] | Max. rel. Druck [-] |
|--------------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Referenzfall | 770'000 | 81'000 | 0,40 |

| Sensitivitätsanalyse | | | | |
|------------------------------------|----------------------|------------|------------|------|
| Parameter | Wert bzw. Rechenfall | | | |
| Gasbildungsrate | niedrig | 740'000 | 480'000 | 0,39 |
| | hoch | 770'000 | 33'000 | 0,42 |
| Gasmenge | keine | 440'000 | 440'000 | 0,39 |
| | niedrig | 740'000 | 140'000 | 0,39 |
| | hoch | 760'000 | 77'000 | 0,40 |
| Hor. Gradient *) [m/m] | 5×10^{-5} | >1'000'000 | 110'000 | 0,40 |
| | $2,5 \times 10^{-3}$ | 160'000 | 49'000 | 0,40 |
| Permeabilität *) [m ²] | 1×10^{-17} | >1'000'000 | >1'000'000 | 0,57 |
| | 1×10^{-13} | 7'600 | 6'700 | 0,39 |
| Porosität *) [-] | 0,02 | 150'000 | 9'800 | 0,40 |
| | 0,15 | >1'000'000 | 210'000 | 0,40 |
| Länge *) [m] | 10'000 | 210'000 | 21'000 | 0,39 |
| | 30'000 | >1'000'000 | 260'000 | 0,40 |
| Mächtigkeit *) [m] | 100 | 780'000 | 71'000 | 0,40 |
| | 300 | 780'000 | 88'000 | 0,39 |
| Zweiphasenparameter | $S_{gr}=0,2$ | 750'000 | 240'000 | 0,40 |
| | $\lambda=0,66$ | 750'000 | 55'000 | 0,40 |

*) Wirtsgestein

5.3 Bewertung der Ergebnisse

Aufgrund der Ergebnisse vereinfachender Modellrechnungen und Annahmen wird eine Bewertung der Geosysteme und der jeweils zu Grunde gelegten Endlagerkonzepte hinsichtlich der Gasbildung ohne Berücksichtigung von technischen Maßnahmen vorgenommen.

5.3.1 Eignung der Wirtsgesteine/Geosysteme als Endlagerstandorte unter dem Aspekt der Gasbildung

Das saline Gestein eignet sich insbesondere für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle, da bei diesen weniger Gas entsteht als bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen. Von den Optionen im salinaren Gestein ist die steile Lagerung mit einem Abstand von 500 m zum Hangenden aufgrund der größeren Speicherkapazität gegenüber der flachen Lagerung mit 75 m Abstand zum Hangenden vorteilhaft (siehe Tabelle 5-8).

Für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle ist im Salinar von den untersuchten Optionen nur die steile Lagerung (500 m Abstand zum Hangenden) geeignet. Die flache Lagerung (75 m Abstand zum Hangenden) ist für die Gasspeicherung ungeeignet.

Die Geosysteme Tonstein und Kristallin werden als geeignet eingestuft (siehe Tabelle 5-7). Wegen der geringen Abhängigkeit der Durchbruchzeiten vom gewählten Gasbildungsszenarium wird das Geosystem sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung im Vergleich zu den anderen Geosystemen als das am besten geeignete bewertet.

Tabelle 5-8 Eignung der Wirtsgesteine/Geosysteme gemäß untersuchtem Nachweiskonzept für Endlager hinsichtlich Gasbildung ohne technische Maßnahmen

| Wirtsgesteinstyp | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | | | Wärmeentwickelnde Abfälle | | |
|--|--|--------------|--------------------|----------------------------|--------------|--------------------|
| | Gasspeicherung im Endlager | Wirtsgestein | Entweichen von Gas | Gasspeicherung im Endlager | Wirtsgestein | Entweichen von Gas |
| Salinar, flache Lagerung 800 m Teufe | - | - | 1) | - | ++ | 1) |
| Salinar, flache Lagerung 1'300 m Teufe | - | - | | - | ++ | |
| Salinar, steile Lagerung 800 m Teufe | - | + | | - | ++ | |
| Tonstein | - 2) | | + | - 2) | | 3) |
| Kristallin | | | + | | | 3) |
| Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung | | | ++ | | | 3) |

++ besser geeignet, + geeignet, - nicht geeignet,

- 1) wurde nicht explizit untersucht, da im Referenzfall das Entweichen von Gas a priori ausgeschlossen wurde (siehe Kapitel 5, Abbildung 5-1).
- 2) wurde nicht explizit untersucht, da ein Einschluss von Gas im durchlässigen Wirtsgestein nicht gewährleistet werden kann (siehe Kapitel 5, Abbildung 5-1).
- 3) wurde nicht explizit untersucht, weil die erwarteten Gasmengen und -raten geringer sind als die der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle. Hinsichtlich Gasbildung sind diese Wirtsgesteine daher grundsätzlich geeignet.

5.3.2 Rolle der Gasbildung bei der Führung eines Sicherheitsnachweises

Bei der Durchführung eines Sicherheitsnachweises spielt die Gasbildung in den salinaren Gesteinen entsprechend diesen Untersuchungen eine zentrale Rolle. Hingegen wird die Rolle der Gasbildung beim Sicherheitsnachweis im Tonstein, Kristallin und insbesondere den sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung als geringer eingestuft (siehe Tabelle 5-8).

Tabelle 5-9 Einfluss von Gasmenge / Gasbildungsrate auf Ergebnisse eines Sicherheitsnachweises ohne technische Maßnahmen

| Nachweiskonzept bzw. Rechenmodell | Salinar | Tonstein | Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung | Kristalline Gesteine |
|-----------------------------------|------------------------|---|--|----------------------|
| Gasspeicherung im Endlager | ① / ① | wird hier nicht untersucht, weil das Wirtsgestein entweder bereits eine ausreichend hohe Permeabilität für Gas- und Wasserfluss aufweist oder anzunehmen ist, dass sich das Gas unter Druck selbst seine Freisetzungspfade erzeugt. | | |
| Gasspeicherung im Wirtsgestein | ① / n.b. | | | |
| Entweichen von Gas | wurde nicht untersucht | ② / ② | ② / ② | ② / ② |

① Von zentraler Bedeutung für Sicherheitsnachweis

② Signifikanter Einfluss auf Sicherheitsnachweis

n.b. Wird im verwendeten Modell nicht berücksichtigt

6 Bewertung der Realisierbarkeit der Nachweiskonzepte

Wie mittels der vereinfachenden Modelle in Kapitel 5 veranschaulicht wird, kann es in Folge der Gasbildung im Endlager zu Druckaufbau und Gasmigration oder auch zur Verdrängung von kontaminiertem Porenwasser aus dem Endlager kommen. Innerhalb des folgenden Kapitels 6 wird dargestellt, inwieweit die Gasbildung sowie deren Auswirkungen durch zusätzliche technische Maßnahmen oder Anforderungen an das Wirtsgestein/Deckgebirge begrenzt werden kann. Da die Speicherung von Gasen in den zu Grunde gelegten Nachweiskonzepten an das Wirtsgestein Salinar gebunden ist, konzentrieren sich die Ausführungen in Kapitel 6.1 hierauf. Speichermöglichkeiten in den nicht-salinaren Wirtsgesteinen beschränken sich in Kapitel 6.2 auf die Diskussion um strukturgeologische Aspekte bei der Standortauswahl. Eine generelle Bestandsaufnahme zur Speicherung in nicht-salinaren Formationen befindet sich im Bericht zur TA 5 [Colenco 2004b].

6.1 Übertragung der Auslegung von Gasspeichern auf die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe

Erdgasspeicher als Analogon zum Endlager für radioaktive Abfallstoffe, die Gas entwickeln, befinden sich in Salzkavernen und porösen Medien. Letztere können durch poröse oder klüftige Karbonate oder auch Sandsteine realisiert werden, die von einem rückhaltewirksamen Deckgebirge (Caprock) zum Hangenden hin abgeschlossen sind. Diese Formationen können sich als Aquifere darstellen, aber auch als leergeförderte Öl- oder Gaslagerstätten. Gasspeicherung im Ton wird derzeit nicht praktiziert.

Salinare Formationen werden für Gas als undurchlässig angesehen. Zudem verheilen Risse oder Störungen im Salinar durch sein viskoplastisches Verhalten unter lithostatischem Druck. Das Salinar stellt somit unter dem Gesichtspunkt der Gasdichtheit eine ideale Barriere dar.

Die Hauptbarriere, die im Falle eines Kavernenspeichers im Salinar den Abschluss des Erdgases von der Biosphäre zu garantieren hat, ist das Salzgestein. Entsprechend muss hier eine ausreichende saline Schwebelage zum Deckgebirge vorgesehen werden. Der Absolutwert ist teufenabhängig und überschreitet normalerweise 100 m, während der Abstand der Kavernen zum äußeren Salzstockrand ebenfalls aus gebirgsmechanischen Gründen wenigstens 200 m betragen sollte.

Da von einer Verringerung eines Hohlraumes im Salinar durch die Konvergenz ausgegangen werden muss, können diese Hohlräume in der Nachbetriebsphase langfristig nicht ohne zusätzliche Stützmittel stabilisiert werden.

In Untersuchungen zum Langzeitverhalten einer endverwahrten Kaverne [Rokahr 2003] wird davon ausgegangen, dass die verschlossenen Kavernen aus Stabilitätsgründen soleggefüllt sind. Aufgrund des Kriechverhaltens des Steinsalzes kommt es zu einem Druckanstieg in der Fluidfüllung. Dies führt zu Spannungszuständen, wo die Spannungen im Fluid aufgrund der geringen Kompress-

sibilität eine ähnliche oder sogar größere Größenordnung annehmen wie die primären Gebirgsspannungen (vgl. Abbildung 6-1).

Solange sich der Spannungsaufbau in der Kaverne moderat vollzieht, ist ein Versagen des Gebirges durch hydraulisch induzierte Bruchbildung auszuschließen.

Das Gebirgsverhalten lässt sich als eine Kombination aus einer Änderung der Permeabilität aufgrund von Zugversagen der Matrix und einer Erweiterung des Porenraumes aufgrund der begrenzten Zugfestigkeit an den Kristallgrenzen beschreiben. Die angenommene Vergrößerung der Ausgangspermeabilität des ungestörten Gebirges auf die Sekundärpermeabilität beträgt in erster Annäherung ca. 3 Zehnerpotenzen.

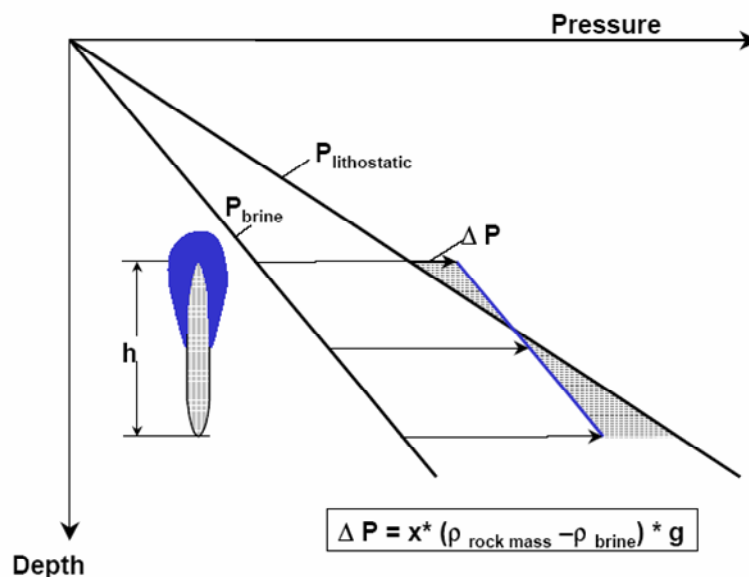


Abbildung 6-1 Spannungsaufbau in einer verschlossenen solegefüllten Kaverne mit überlithostatischem Soledruck im oberen Kavernenbereich (x =Teufe, ρ =Dichte, g =Erdbeschleunigung) [Rokahr 2003]

Untersuchungsergebnisse zeigen, dass auch bei Erreichen bzw. Überschreiten der minimalen Gebirgsspannung bei einem Hohlraum nicht zwangsläufig mit einem Aufreißen des Salzgebirges und damit der Bildung von Wegsamkeiten in die Biosphäre zu rechnen ist. Voraussetzung ist, dass sich der Druckanstieg nicht zu schnell vollzieht. Dann kann es im an den Hohlraum angrenzenden Gebirge zur Bildung einer sogenannten Sekundärpermeabilität kommen, die es dem im Hohlraum befindlichen Medium möglich macht, in das umgebende Gebirge zu migrieren [Stormont 2001].

Die im Rahmen von Untersuchungen [Menzel 1995] an einem Gasspeicherbergwerk beschriebenen Erfahrungen mit den Spannungszuständen lassen den Schluss zu, dass mit einer Migration der im Endlager gebildeten Gase in das umgebende Gebirge bereits vor Erreichen des Gebirgsdruckes zu rechnen ist.

6.1.1 Gasspeicherung im Geosystem Salinar

Unter den in Kapitel 4 [Colenco 2004a] getroffenen Annahmen ist eine vollständige Speicherung des Gasvolumens im Endlager selber nicht möglich. Je nach Wahl der Eingangsparameter liegt z.B. für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle der durch die Gasbildung und die auftretende Konvergenz verbleibende Restporenraum in der Größenordnung von 5% bis 35% des ursprünglichen Streckenvolumens. Dies bedeutet, dass im Endzustand ein Anteil von 15% bis zu 65% der entstehenden Gesamtgasmenge im Endlager verbleiben kann. Diese Größen sind stark abhängig von lokationsspezifischen Parametern, wie dem Verformungsverhalten des anstehenden Salinars oder schwer exakt zu steuernden Mechanismen wie der Gasbildungsrate.

In jedem Fall bedeutet dies, dass ein erheblicher Anteil der entstehenden Gase im Endlager gespeichert werden kann. Die entscheidende Größe bei der Gasspeicherung im Endlagerbereich stellt der nach der Kompaktion verbleibende Porenraum dar. Bei den durchgeführten Sensitivitätsanalysen wird deutlich, dass der zeitliche Verlauf des Druckaufbaues im Endlager und das am Ende des Betrachtungszeitraumes im Versatz verbleibende Porenvolumen in starkem Maße abhängig sind von

- der Gasbildungsrate
- der Konvergenzrate (zeitabhängiges Verformungsverhalten des anstehenden Steinsalzes)

Eine hohe Gasbildungsrate bedeutet einen schnelleren, den Konvergenzerscheinungen entgegenwirkenden Druckaufbau und damit einen größeren, der Gasspeicherung dienenden Porenraum in der Versatzmatrix. Die Gasbildungsrate ist abhängig von den eingebrachten Abfällen selbst und den Einlagerungsbedingungen.

Eine höhere Konvergenzrate hat zur Folge, dass ein größerer Anteil des Porenraumes durch Kompaktion geschlossen wird, bevor durch die Gasbildung ein wirksamer Gegendruck aufgebaut ist. Die Konvergenzrate stellt eine lokationsspezifische Größe dar und ist damit abhängig vom Standort des Endlagers und den Bedingungen im Einlagerungsbereich (z.B. Temperatur).

Wichtige Parameter, die einen definierten Endzustand im Endlager beschreiben, d.h. die absolute entstehende Gasmenge und auch die Speicherrandbedingungen wie z.B. Speichervolumen und Speicherdruck, sind:

- Gasmenge
- Anfangsvolumen
- Teufe des Endlagers
- Kompaktionseigenschaft des Versatzes

Bei diesen Parametern ist die Kompaktionseigenschaft des Versatzes die wichtigste Einflussgröße. Wenn angenommen wird, dass bei ungünstigen Randbedingungen der Versatz am Ende des Betrachtungszeitraumes evtl. nur einen sehr geringen Porenraum aufweist, erweist sich die Nachweisführung hinsichtlich einer Gasspeicherung im Endlagerbereich als wenig erfolgshöufig. Wenn aber durch eine entsprechende Rezeptur und Wahl von Zuschlagstoffen sichergestellt wird, dass, ohne auf die langfristig schwerer exakt zu beschreibenden Eingangsparameter Gasbildungs- und

Konvergenzrate angewiesen zu sein, nach den anfänglichen ca. 40% Porenvolumen noch ein Restporenvolumen von ca. 10% oder mehr verbleibt, gewinnen die anderen o.g. Parameter an Bedeutung, da mit ihnen die entstehende Gesamtgasmenge und die Speicherkapazität des Endlagers beeinflusst werden können. Allerdings kann unter den anderen Aspekten der Langzeitsicherheit eine große Porosität des Versatzmaterials von Nachteil sein, weil sie im Szenario eines Versagens anderer Barrieren einen weitgehend ungehinderten Flüssigkeitszutritt bis zu den Abfällen und eine anschließende Auspressung kontaminierter Lösung aus dem Endlager erlauben würde. Daher wird sonst gerade die Verfüllung mit Salzgrus, der durch die Konvergenz seine Porosität rasch verliert und die Abfälle danach „dicht“ umschließt, als Vorteil bei der Endlagerung im Salinar betrachtet. Dieser Aspekt wird bei den folgenden Überlegungen nicht berücksichtigt.

Das zur Verfügung stehende Anfangsvolumen ist in Zusammenhang mit der Porosität und den Kompaktionseigenschaften des Versatzes entscheidend verantwortlich für das zur Gasspeicherung zur Verfügung stehende Restporenvolumen des kompaktierten Versatzes.

Die Teufe des Endlagers und die damit einhergehenden vorliegenden Gebirgsspannungen sind die wesentlichen Parameter für den maximal möglichen Speicherdruck der Gase im verbleibenden Porenraum, der im Endlagerbereich erreicht werden kann, bevor das Gas in das umgebende Wirtsgestein migriert.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle (WA) reicht schon ein Versatz aus, der auch nach Abschluss der Kompaktion ein Porenvolumen von mindestens 5% gewährleistet. Dies kann durch eine geeignete Wahl von Zuschlagstoffen und entsprechender Rezeptur erreicht werden. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die dadurch eingebrachte Feuchtigkeitsmenge – verglichen mit reinem Salzgrus als Versatzmaterial – nicht signifikant erhöht werden darf, weil sonst mehr Stahl korrodieren und durch die erhöhte Gasbildung den Effekt zunichte machen würde.

Wichtig für die Nachweisführung der Gasspeicherung im Endlager sind die Randbedingungen für die Einlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (VWA). Unter der Voraussetzung, dass der Versatz noch ein gasgefülltes Endporenvolumen von ca. 10% besitzt, können im Endlager in 800 m Teufe ca. 15% und in 1'300 m Teufe ca. 25% der entstehenden Gase gespeichert werden. Hierbei wird nur der für die Einlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle vorgesehene Hohlraum betrachtet. Durch Bereitstellung weiteren versetzten Hohlraumvolumens kann der Anteil der im Endlager gespeicherten Gase noch vergrößert werden.

Dies bedeutet hinsichtlich einer erfolgshöffigen Nachweisführung, dass die Gasmenge selbst zu begrenzen und zusätzlich ein Versatz zu vorzusehen ist, der ein ausreichendes Restporenvolumen gewährleistet. Unter diesem Gesichtspunkt ist einem Endlager in größeren Teufen wegen der höheren Speicherdrücke der Vorzug zu geben. .

Unter Berücksichtigung der technischen Maßnahmen „ausreichendes Restporenvolumen“ ist eine Speicherung der sich bildenden Gase innerhalb des Einlagerungsbereiches der wärmeentwickelnden Abfälle möglich (vgl. Tabelle 6-1). Die Speicherung der Gase aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen erfordert höhere Endporenvolumen. Dies bedeutet hinsichtlich einer

erfolgshöufigen Nachweisführung, dass die Gasmenge selbst zu begrenzen und zusätzlich eine definierte Kompaktionseigenschaften des Versatzes zu gewährleisten ist, die ein ausreichende Restporenvolumen sichert. Des Weiteren ist unter diesem Gesichtspunkt der Einlagerung der Abfälle in einem tiefer gelegenen Endlager wegen der höheren möglichen Speicherdrücke der Vorzug zu geben (Vgl. Tabelle 6-1). Wenn es gleichzeitig möglich ist, die einander beeinflussenden Parameter Gasbildungsrate und Konvergenzrate so zu beeinflussen, dass sie einen positiven Einfluss auf den verbleibenden Porenraum haben, könnte dies darin resultieren, dass der weitaus größte Anteil der Gesamtgasmenge im Bereich des Endlagers verbleiben kann

Tabelle 6-1 Eignung des Salinars mit definiertem Restporenvolumen für ein Endlager hinsichtlich Gasbildung

| Wirtsgesteinstyp | Eignung | |
|--|--|---------------------------|
| | Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle | wärmeentwickelnde Abfälle |
| Salinar, flache Lagerung 800 m Teufe | + | ++ |
| Salinar, flache Lagerung 1'300 m Teufe | + / ++ | ++ |
| Salinar, steile Lagerung 800 m Teufe | + / ++ | ++ |

++ besser geeignet, + geeignet, 0 weniger gut geeignet, - nicht geeignet

6.1.2 Speicherung im Wirtsgestein

Die in Kapitel 5 [Colenco 2004a] durchgeführten vereinfachenden Untersuchungen deuten darauf hin, dass eine sichere ausschließliche Speicherung der Gase der wärmeentwickelnden Abfälle im Salinar generell, der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle nur im Salinar mit steiler Lagerung, d.h. in diesem Fall mit einer ausreichenden Mächtigkeit zum Hangenden, gewährleistet ist. Die Begründung hierfür liegt aber in den gewählten Geosystemen mit den zugehörigen geometrischen Parametern. Das heißt, dass dieser Nachweis in der gleichen Form auch für das Salinar in flacher Lagerung, aber mit einem größeren Abstand zwischen Endlager und Deckgebirge, geführt werden könnte.

Bei den untersuchten Parametern muss unterschieden werden zwischen

- nicht beeinflussbaren Parametern: Größe und Gesetzmäßigkeit der Sekundärpermeabilität
- beeinflussbaren Parametern:
 - Gasmenge (durch Optimierung der Abfallkonditionierung und Wasserangebot),
 - Teufe des Endlagers,
 - Mächtigkeit des Wirtsgesteins bzw. Abstand zum Hangenden (durch Wahl eines entsprechenden Standorts)

Aus den Sensitivitätsanalysen (vgl. Kapitel 5) ist deutlich zu erkennen, dass die durch Maßnahmen bei der Endlagerplanung nicht beeinflussbare sich ausbildende Sekundärpermeabilität bzw. die in

dieser Arbeit betrachtete Sekundärporosität den kritischsten Parameter darstellt. Bei der Bewertung der Nachweisführung „Gasspeicherung im Wirtsgestein“ muss beachtet werden, dass die hier vorliegenden Ergebnisse auf neuesten Untersuchungen aus dem Kavernenbau im Salinar beruhen. Für die Zwecke der Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfälle und insbesondere der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle besteht noch die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen bezüglich der durch das zeitabhängige Materialverhalten bedingten Wechselwirkung zwischen

- Volumenänderung im Bergwerk durch Konvergenz
- Volumenänderung der im Bergwerk entstehenden Gase durch die Gasentwicklung selbst und eine Infiltration in das Gebirge (Sekundär- Porosität/-Permeabilität).

Auch die räumliche Form einer sich entwickelnden Zone erhöhter Permeabilität erfordert eine genauere Betrachtung. Die maximale Eindringtiefe der Gase in das Wirtsgestein und damit der für einen sicheren Einschluss erforderliche Mindestabstand zwischen Endlager und Deckgebirge ist entscheidend von der sich ausbildenden Zone, den das Gas durchdringt, abhängig (z.B. der in Kapitel 5 vereinfachend betrachtete Quader, oder alternativ ein Kugelabschnitt etc.).

Von den beeinflussbaren Parametern stellen alle drei hier untersuchten Größen für die Nachweisführung entscheidende Werte dar, d.h. von ihnen hängt es ab, ob die Nachweisführung gelingen kann oder nicht.

Die geometrischen Randparameter "Teufenlage Endlager" und "Mächtigkeit des Hangendes" sind eng miteinander verbunden. Je tiefer das Endlager angelegt wird, desto geringer muss der Abstand zwischen Endlager und Salzspiegel sein. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Endlager in der Teufe von 800 m mit einem Abstand von 75 m zum Salz-Top in Hinsicht auf die Gasspeicherung im Wirtsgestein nicht nachweisbar erscheint, zumindest wenn allein das Wirtsgestein das Gas aufzunehmen hat ohne jegliche Speicherkapazität des Endlagers selbst. In diesem Teufenbereich kommt daher nur ein Endlager in steiler Lagerung mit einem "Mächtigkeit des Hangendes" von mehreren hundert Metern in Betracht.

Bei einem Endlager in einem tieferen Bereich (hier 1'300 m) erscheint, ggf. in Kombination mit der Reduzierung der entstehenden Gesamtgasmenge (vgl. Kapitel 7), der Nachweis eines sicheren Einschlusses der Gase im Wirtsgestein möglich.

6.1.3 Schlussfolgerung zu den technischen Maßnahmen zur Gasspeicherung

Die im Rahmen der Untersuchungen zur Gasbildung in einem Endlager durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass die aus den wärmeentwickelnden Abfällen gebildeten Gase in den Einlagerungsbereichen gespeichert werden könnten, da hier bei dem geringen Wasserangebot nur ein vernachlässigbarer Anteil der gasbildenden Stoffe umgesetzt wird und die resultierende Gasmenge mit großer Wahrscheinlichkeit durch entsprechende Modifikation der Versatzqualität in dem verbleibenden Porenraum gespeichert werden kann. Die entscheidende Größe ist die Gasmenge, die als Folge von Korrosion und mikrobiellem Abbau der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle entsteht.

Die Auswertung der Rechnungen mit Parametervariationen ergibt, dass für die Gasspeicherung im Endlager durch die Wahl verschiedener Parameter (in erster Linie des Versatzmaterials) der Nachweis eines vollständigen Einschlusses der Gase nicht erbracht werden kann, dass unter günstigen Voraussetzungen aber ein Anteil von über 50% der Gase im Endlager selbst gespeichert wird. Hierbei ist es günstig, bzw. erforderlich

- ein Versatzmaterial mit einer definierten luftgefüllten Restporosität einzubringen,
- ein größeres Streckenanfangsvolumen bereitzustellen (z.B. Hohlräume allein für Gasspeicherung)
- die entstehende Gasmenge zu reduzieren (vgl. Kapitel 7),
- das Endlager in größeren Teufen anzulegen (Speicherdruck).

Durch solche Maßnahmen wird gewährleistet, dass ein großer Teil der entstehenden Gase im Endlager gespeichert wird und nur noch von der verbleibenden Speicherkapazität des Wirtsgesteins Gebrauch gemacht werden muss. Hierbei sind sowohl Formationen in steiler als auch flacher Lagerung denkbar, sofern eine ausreichende Mächtigkeit des Salinars zwischen Endlager und Salzspiegel vorhanden ist. Auch für diesen Ansatz der Gasspeicherung sind eine Reduzierung der Gasmenge (weitere Ausführungen vgl. Kapitel 7) und die Errichtung des Endlagers in größerer Teufe von Vorteil.

Dies bedeutet, dass bei der Realisierung eines Endlagers die hier betrachteten Möglichkeiten der Gasspeicherung nicht isoliert, sondern immer in Kombination zu betrachten sind. Die Größe der Anteile der Speicherung im Endlager selbst und im umgebenden Wirtsgestein sind entscheidend abhängig von der eingebrachten Versatzqualität. Hiermit ist in diesem Fall das Kompaktionsverhalten mit dem nach der Verdichtung verbleibenden Porenraum gemeint.

Damit haben die hier durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass für Endlager im Salinar die Nachweisführung der Gasspeicherung unter Einbeziehung der diskutierten Maßnahmen insgesamt als erfolgshöflich anzusehen ist.

6.2 Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ - günstige struktureologische Eigenschaften für den Gastransport

Das Ziel dieser Betrachtungen ist, den Einfluss struktureologischer Gegebenheiten (Mächtigkeit, antiklinale Struktur usw.) auf die Auswirkungen der Gasbildung darzustellen, wobei hier nur solche Wirtsgesteine für Endlager betrachtet werden, die aufgrund ihrer Durchlässigkeit die Migration von Gasen und Flüssigkeiten zulassen (vgl. TA 5 [Colenco 2004b]). Es sollten also Standorte bevorzugt werden, deren geologischer Aufbau möglichst lange Migrationswege in die Biosphäre bewirkt.

Im Speicherbau wird Ton als abdichtendes Element oberhalb eines Gasspeichers betrachtet. Voraussetzung hierfür ist, dass er nicht stark tektonisch überprägt wurde. Da Tonsteine die Integrität von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten über Jahrmillionen gewährleistet haben, ist unter den entsprechenden Voraussetzungen von einer stark migrationshemmenden Wirkung oder auch von der ge-

forderten Dichtheit auszugehen, die die vertikale Migration von Gas verhindert. Im Falle der „sonstigen Gesteine unter Tonüberdeckung“ wird entsprechend auch von einer derartigen Wirkung ausgegangen.

Dieses in der Lateralen offene System könnte durch die Vorgabe einer domartig aufgewölbten Struktur, bezogen auf den Kontakt Wirtsgestein/Deckgebirge, und ein entsprechendes Volumen des Wirtsgesteins um das Endlager herum, geschlossen werden. D.h. es müsste eine antiklinale Struktur oder auch strukturelle Falle mit ausreichendem Speichervolumen (Closure, Spillpoint) ausgewählt werden, um den Einschluss der Gase sicherzustellen. Ein Wirtsgestein mit ausreichender Porosität und Permeabilität würde darüber hinaus, bezogen auf Gasmenge und kontaminierte Wässer, wie eine Lagerstätte mit der entsprechend notwendigen Kapazität anzusehen sein.

Dies hätte zur Folge, dass es zu einem Druckaufbau kommen dürfte, der an einen Maximaldruckgradienten zwischen 0,013 und 0,017 MPa/m auszurichten wäre, um die Integrität des Caprocks zu gewährleisten.

Geht man bei einer modellhaften gleichmäßig aufgewölbten Struktur von z.B. 2 km² Closure, einem Spillpoint von ca. 50 m unterhalb der Toplage der Struktur (700 m, analog Geosysteme) und einer 10%-igen Porosität des Wirtsgesteins aus, so kann das erwartete Gas im Falle der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, unter der Voraussetzung der o.a. Gradienten und dem entsprechenden Geosystem, gespeichert werden.

Die Eigenschaften einer leergeförderten Kohlenwasserstofflagerstätte sind mit denen eines Aquifers vergleichbar. Sie werden vorzugsweise als Untertagespeicher für große Gasmengen genutzt, da die Dichtheit dieser Lagerstätten bis zum initialen Druck durch die Existenz der Kohlenwasserstoffvorkommen nachgewiesen ist. Allerdings wird innerhalb einer derartigen ausgeförderten Lagerstätte wegen der verbliebenen Produkte kein Endlager eingerichtet werden.

Im Falle einer Aquiferstruktur, die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle eher in Betracht kommt, ist die Dichtheit des Caprock erst nachzuweisen. Selbst bei geringen Undichtheiten ist zumindest von einer deutlichen Verzögerung des Austrages gegenüber einem offenen System, wie dem Geosystem sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung auszugehen.

Die Strukturen sollten entweder keine oder zumindest abdichtende Störungen im Bereich des Speichers aufweisen, der seine Begrenzung durch den Spillpoint im Struktur tiefsten oder, bedingt durch die Druckbegrenzung, oberhalb davon hat.

In klüftigen kristallinen Gesteinen kann das Kluft- bzw. Grundwasser als Dichtelement angesehen werden. Bei diesem kann das Speicherprodukt aus einem konventionellen Kohlenwasserstoffspeicher nicht entweichen, solange der hydrostatische Druck des die Hohlräume umgebenden Wassers über dem Druck liegt, den das gespeicherte Produkt auf die Wände ausübt.

Dies gilt bisher nur für flüssige Kohlenwasserstoffe. Mangels einer in praxi erwiesenen Dichtheit eines solchen Systems bei der Gasspeicherung wird dort ein gewisser Gasverlust zugelassen. Mit

Bezug auf ein Endlager im Kristallin würden diese Verluste das System jedoch als offen klassifizieren (siehe Kapitel 4.2). Andererseits haben Untersuchungen [Lindblom 1997] gezeigt, dass der kritische Gasdruck maximal im Bereich des hydrostatischen Druckes liegt. Die unter Ansatz von verschiedenen Ausgangsbedingungen ermittelten kritischen Gasdrücke lagen in einem Bereich von in einer Größenordnung von 75 – 95 % des hydrostatischen Druckes.

Eine abdichtende Überdeckung, z.B. Tonstein, würde zusammen mit einer strukturellen Geschlossenheit, beispielsweise in Form einer domartigen Aufwölbung des kristallinen Körpers in Analogie zum antiklinalen Aquifer, eine Barriere für die Gasmigration darstellen. Unter der Annahme der erwarteten Gasmenge muss eine derartige Struktur aufgrund der geringeren Porosität des Wirtsgesteins bei gleicher Teufenlage allerdings größer sein. Als Gebirgsdruckgradient würde die auch für den Caprock eines antiklinalen Aquifers vorgeschlagene Bandbreite von ca. 0,013 und 0,017 MPa/m zum Ansatz gebracht können.

Wenn nicht nur der Porenraum im Wirtsgestein als Speicher von Relevanz ist, sondern auch der verbleibende Porenraum im Endlager selbst, verringern sich folglich auch die notwendigen Größen der Strukturen.

Tabelle 6-2 Günstige Standorteigenschaften im Hinblick auf die Auswirkungen der Gasbildung

| Wirtsgestein | Struktur | Mächtigkeit des Wirtsgesteins | Teufe des Endlagers |
|--|--|---|---|
| Tonstein | - | große Mächtigkeit ist wegen der Ausdehnung der erwarteten Zone mit Sekundärporosität vorteilhaft. | große Teufe ist zu bevorzugen, weil das Gas unter höherem Druck weniger Volumen einnimmt. |
| Kristallin | Hydraulische Barriere über dem Wirtsgestein mit hohem Gaseindringdruck, (z.B. Tonstein), Antiklinale Struktur des Deckgebirges, | - | - |
| Sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung | | - | - |

7 Konkretisierung von Maßnahmen hinsichtlich der Abfallbehandlung und –konditionierung zur Reduzierung der Gasmen- gen im Endlager

Die Konditionierung der radioaktiven Abfälle hat einen wesentlichen Einfluss auf das Gasbildungspotenzial. Durch geeignete Maßnahmen können die Gasmengen im Endlager verringert werden. Bei der Konkretisierung der Maßnahmen muss neben dem Gasbildungspotenzial der Abfälle auch eine Vielzahl von Anforderungen bezüglich der Transportfähigkeit, der Zwischenlagerfähigkeit und der Endlagerfähigkeit berücksichtigt werden (vgl. TA 7 [Colenco 2004c]).

7.1 Anforderungen an die Konditionierung aus den Nachweiskonzepten für die untersuchten Wirtsgesteine

Die in Kapitel 5 [vgl. Colenco 2004a] dargestellten Nachweiskonzepte für die Beherrschbarkeit der Gasbildung zeigen eine unterschiedliche Bedeutung der Gasbildung für die Langzeitsicherheit der einzelnen generischen Endlager. Daraus folgen auch unterschiedliche Anforderungen an die Konditionierung der radioaktiven Abfälle.

7.1.1 Nachweiskonzept für das Salinar

Da das Salinar und die Verschlussbauwerke als undurchlässige Barriere für das Gas betrachtet werden, beruht das Nachweiskonzept für ein generisches Endlager auf dem Konzept der Gasspeicherung (vgl. Kapitel 5). Dieses setzt voraus, dass das gesamte Gas im Endlager und dem umgebenden Wirtsgestein gespeichert werden kann. Da das Wirtsgestein einen Wasserzutritt verhindert, steht für die Gasbildung nur das interne Wasser des Endlagers zur Verfügung, und die maximale Gasmenge wird durch das Wasserangebot begrenzt.

Die Gasspeicherung im Wirtsgestein ist gemäß den Berechnungsergebnissen (vgl. Kapitel 5) möglich, wenn die Salzformation hinreichend mächtig ist. Dies ist bei dem untersuchten Geosystem Salinar, flache Lagerung, 800 m Teufe, nicht der Fall, während die Anforderung bei den beiden Geosystemen Salinar, flache Lagerung in 1'300 m Teufe und Salinar, steile Lagerung in 800 m Teufe erfüllt ist. Daraus folgt, dass das hier definierte Geosystem Salinar, flache Lagerung, 800 m Teufe das Einschlusskriterium hinsichtlich der Gasbildung mit den festgelegten Parametern ohne zusätzliche Maßnahmen nicht erfüllt.

Da das Wasserangebot hier begrenzender Faktor für die Gasbildung ist, kann die maximale Gasmenge in erster Linie durch eine Verringerung der Wassermenge im Endlager reduziert werden. Maßnahmen zur Reduzierung der gasbildenden Stoffe (Metalle und organische Stoffe) im Abfall führen erst dann zum Erfolg, wenn die Verringerung so groß ist, dass nicht mehr das Wasser der begrenzende Faktor bei der Gasbildung ist. Dies tritt erst bei einem massiv reduzierten Inventar der gasbildenden Stoffe ein.

7.1.2 Nachweiskonzept für nicht-salinare Wirtsgesteine

Die Nachweisführung für die nicht-salinaren Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin und sonstige Gesteinen unter Tonüberdeckung beruht auf dem Konzept des „Entweichens von Gas“. Dieses geht von der Annahme eines Wasserzutrittes von außen aus, und als Folge davon kommt es zur Freisetzung von kontaminiertem Porenwasser und von Gas aus dem Endlager durch das Wirtsgestein hindurch.

Wegen der vergleichsweise höheren Gasmengen und Gasbildungsraten werden die Berechnungen nur für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durchgeführt. Als Indikatoren für die Beherrschbarkeit der Gasbildung werden die Durchbruchzeiten für einen gasförmigen und einen flüssigen Tracer sowie der maximale relative Druck im Endlager errechnet. Generell ist festzuhalten, dass die Gasbildung für die Nachweisführung mit dem Konzept „Entweichen von Gas“ einen geringeren Einfluss hat als beim Konzept der Gasspeicherung (vgl. Kapitel 5). Aus dem Vergleich der verschiedenen Geosysteme zeigt sich, dass Maßnahmen für ein Endlager in Tonstein eher erforderlich sind als für Endlager in „sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung“ und Kristallin.

7.2 Modellinventar der konditionierten Abfälle

Beim Modellinventar kann zwischen den Inhaltsstoffen der Rohabfälle und den bei der Abfallbehandlung und Verpackung zugefügten Stoffen unterschieden werden. Wegen der unterschiedlichen Voraussetzungen bei der Konditionierung der Abfälle werden die wärmeentwickelnden Abfälle und die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung separat betrachtet.

Die wärmeentwickelnden Abfälle und die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung unterscheiden sich sowohl in der Zusammensetzung der Rohabfälle als auch in der Art der Konditionierung. Die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten neben den gasbildenden Metallen auch organische Stoffe, die zur Gasbildung beitragen.

Die Zahlen in Tabelle 7-1 zeigen, dass rund 28,6% des maximalen Gasvolumens aus den wärmeentwickelnden Abfällen und rund 71,4% aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung stammen. Die Metalle tragen 87,1% und die organischen Stoffe 12,9% zum gesamten Gasvolumen bei.

Tabelle 7-1 Maximale Gasvolumina, die sich aus Metallen und Organika in den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und den wärmeentwickelnden Abfällen (Inventar für nicht-salinare Wirtsgesteine) bilden können (Zahlen basierend auf dem Modellinventar) und unbegrenzter Wasserverfügbarkeit

| Abfallart | Gasvolumen aus Metallen [m ³ STP] | Gasvolumen aus Organika [m ³ STP] | Gesamtes Gasvolumen [m ³ STP] |
|--|---|---|---|
| Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung | 1,72E+08 | 3,79E+07 | 2,10E+08 |
| Wärmeentwickelnde Abfälle (nicht-salinare Wirtsgesteine ⁵) | 8,42E+07 | - | 8,42E+07 |
| Summe der Abfälle | 2,56E+08 | 3,79E+07 | 2,94E+08 |

7.2.1 Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten sowohl gasbildende Metalle als auch organische Stoffe. Bei der Konditionierung werden sie gepresst oder verfestigt. Zur Verfestigung werden als Fixierungsmittel neben Zement auch gasbildende Materialien wie Bitumen oder Kunststoffe eingesetzt. Die behandelten Abfälle werden in Stahlbehältern oder mit in Stahl armierten Betonbehältern verpackt. Die Anteile des Gasvolumens aus den verschiedenen gasbildenden Stoffen in den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gemäß Modellinventar sind in Tabelle 7-2 zusammengefasst. Dabei wird vorausgesetzt, dass das gesamte Inventar der gasbildenden Stoffe umgesetzt wird.

Tabelle 7-2 Anteile der Abfälle, der Fixierungsmittel und der Verpackung am maximalen Gasvolumen aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Zahlen basierend auf dem Modellinventar) und unbegrenzter Wasserverfügbarkeit

| Komponente | Stoffe | Anteil Gas aus Metallen [%] | Anteil Gas aus Organika [%] | Anteil am gesamten Gasvolumen [%] |
|------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Abfälle | Metalle, Organika | 7,3 | 11,7 | 18,9 |
| Fixierungsmittel | Bitumen, Kunststoffe | 0 | 5,6 | 5,6 |
| Verpackung | Stahl, Eisen, Harze | 74,7 | 0,7 | 75,4 |
| Summe | | 82,0 | 18,0 | 100,0 |

Aus diesen Zahlen geht hervor, dass die Verpackungen der Abfälle mit rund drei Vierteln (75,4%) den größten Beitrag zur Gasbildung leisten. Rund ein Fünftel (18,9%) des Gasvolumens stammt aus den gasbildenden Inhaltsstoffen der Rohabfälle, und 5,6% stammen aus den organischen Fixierungsmitteln. Der Beitrag der Metalle zum gesamten Gasvolumen der konditionierten Abfälle liegt bei 82%, während die Organika 18% beitragen.

⁵ Das Inventar der wärmeentwickelnden Abfälle in einem Endlager im Salinar weist ein Gesamtgasvolumen in Höhe von $V_n = 6,65 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ auf.

Bei den Verpackungen handelt es sich um verschiedene Gebinde, die sich in der Wandstärke und der Metallmasse stark unterscheiden. Die dickwandigen Gussbehälter tragen fast vier Fünftel (78,7%) zur Metallmasse der Verpackungen bei, während die dünnwandigen Fässer rund ein Fünftel (19,9%) zur Metallmasse beitragen. Die Fässer tragen jedoch anfänglich rund 90% zur Oberfläche der Verpackungen bei und dominieren damit die Gasbildung zu frühen Zeiten.

7.2.2 Wärmeentwickelnde Abfälle

Die wärmeentwickelnden Abfälle umfassen Brennelemente, verglaste Abfälle sowie mittelaktive Abfälle (MAW). Das Modellinventar für die generischen Endlager in den untersuchten Wirtsgesteinen umfasst die verschiedenen Metallbehälter, deren Masse und Massenanteile in Tabelle 7-3 zusammengefasst sind.

Tabelle 7-3 Masse und Anteil der verschiedenen Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle gemäß den an die Wirtsgesteine angepassten Modellinventaren

| Gebinde | Salinares Wirtsgestein | | Nicht-salinares Wirtsgestein | |
|-----------------------------|------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| | Masse [kg] | Anteil [%] | Masse [kg] | Anteil [%] |
| Kokillen, Fässer, Container | 1,70E+06 | 1,4 | 2,16E+06 | 1,4 |
| Einlagerungsbehälter | 7,35E+06 | 5,9 | 4,01E+07 | 25,4 |
| Castor / Pollux | 1,16E+08 | 92,7 | 1,16E+08 | 73,2 |
| Summe | 1,25E+08 | 100,0 | 1,58E+08 | 100,0 |

Auch bei der Verpackung der wärmeentwickelnden Abfälle wird die Masse durch die dickwandigen Behälter (Castor und Pollux) dominiert, während die Einlagerungsbehälter einen kleineren Anteil ausmachen. Kokillen, Fässer und Container sind dünnwandig und tragen wenig zur Gesamtmasse bei.

7.3 Maßnahmen zur Verringerung der Gasbildung

Maßnahmen zur Verringerung der Gasbildung im Endlager können sowohl bei der Abfallbehandlung als auch bei der Verpackung der Abfälle ergriffen werden. Wegen des großen Beitrags zur gesamten Gasmenge stehen Maßnahmen zur Verringerung der gasbildenden Metalle in der Verpackung im Vordergrund.

7.3.1 Abfallbehandlung

Brennbare radioaktive Abfälle werden nach Möglichkeit verbrannt. Auf diese Weise werden die gasbildenden organischen Inhaltsstoffe entfernt. Aus Gründen des Strahlenschutzes ist dies nur in speziellen Verbrennungsanlagen möglich, bei denen unzulässige Freisetzungen von Radionukliden in die Umwelt vermieden werden. Die gemäß Modellinventar in den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung noch vorhandenen organischen Stoffe tragen etwas weniger als 12% zum gesamten Gasvolumen bei. Eine weitergehende Verbrennung der noch nicht konditionierten

Abfälle könnte darum in Erwägung gezogen werden, falls sie technisch möglich ist und die nötigen Anlagen zur Verfügung gestellt werden können.

Zur Verfestigung und Stabilisierung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung werden zum Teil Stoffe wie Bitumen oder Kunststoffe eingesetzt. Diese tragen gemäß Modellinventar 5,6% zur Gasbildung bei. Ein Ersatz durch nicht-organische Fixierungsmittel würde somit relativ wenig zur Verminderung der Gasbildung beitragen.

Die zementierten Abfälle enthalten eine nennenswerte Menge Porenwasser. Bei einem Endlager im Salinar kann bei einer geeigneten Standortwahl ein externer Zufluss ausgeschlossen werden, so dass die maximale Gasmenge durch das Wasserangebot im Endlager begrenzt wird. In diesem Fall führt die Reduzierung des Wasserangebotes zu einer Verringerung der Gasbildung. Beim Einsatz von Verflüssigern bei der Zementierung der Abfälle kann der Wasseranteil reduziert werden. Alternativ können auch nicht-zementbasierte Fixierungsmittel verwendet werden, die kein Porenwasser enthalten. Organische Ersatzstoffe wie Bitumen können jedoch, wie oben beschrieben, bei ausreichendem Wasserangebot zur Gasbildung beitragen.

7.3.2 Abfallverpackung

Die Verpackung der radioaktiven Abfälle erfüllt verschiedene Funktionen beim Transport, bei der Zwischen- und der Endlagerung. Beim Ersatz einer Verpackung müssen die unterschiedlichen Anforderungen berücksichtigt werden.

Die Fässer sind dünnwandig und tragen zu frühen Zeiten erheblich zur gesamten Gasbildung im Endlager bei, aber wenig zur Gesamtgasmenge (große spezifische Oberfläche bzw. hohes Oberflächen/Massen-Verhältnis). Statt in Fässer können die Abfälle in Container aus Stahl, Gusseisen oder bewehrtem Beton verpackt werden. Container können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Ein Container vom Typ IV in der Stahlausführung hat eine Masse von 1'328 kg, während die Betonausführung desselben Typs nur eine Stahlbewehrung mit einer Masse von 204 kg enthält.

Zur Verpackung von Abfällen mit höheren Anforderungen an die Stabilität und den Strahlenschutz werden dickwandige (80-200 mm) Behälter aus Gusseisen eingesetzt. Diese weisen eine wesentlich größere Masse als Fässer und Container auf und tragen entsprechend mehr zur Gasmenge bei, wegen ihrer Kompaktheit (geringes Oberflächen/Massen-Verhältnis) aber nur mit sehr kleinen Gasbildungsraten. Der Ersatz dieser Gussbehälter ist ein wesentlicher Beitrag zur Verringerung der insgesamt gebildeten Gasmenge. Dabei müssen jedoch vor allem die Anforderungen des Strahlenschutzes berücksichtigt werden.

Bei den Behältern für die wärmeentwickelnden Abfälle tragen die Brennelementbehälter Castor und Pollux den größten Anteil zur Metallmasse bei. Wegen der hohen Anforderungen an Stabilität und Strahlenschutz sind die Möglichkeiten für eine Verringerung der großen Metallmassen begrenzt. Behältertypen mit einer Abschirmung aus Schwerbeton stellen eine mögliche Alternative dar. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von korrosionsresistenten Behältern bzw. Behäl-

terummantelungen. Die Entwicklung und Erprobung von geeigneten Materialien wie Chrom-Nickel-Stähle, Nickelbasislegierungen, Titan- und Kupferlegierungen sowie Kupfer ist zeitaufwändig und die Materialien sind kostspielig. Bisher ist nur im schwedischen Projekt SFL die Verwendung von mit Kupfer ummantelten Stahlcontainern vorgesehen.

Da sich die Funktion der dickwandigen Stahlbehälter auf den Strahlenschutz während der Zeit vor der Einlagerung ins Endlager beschränkt, ist es denkbar, für den Transport und die Zwischenlagerung zur Abschirmung wieder verwendbare Transportbehälter einzusetzen. Solche Behälter werden bereits für den Transport von abgebrannten Brennelementen vom Kernkraftwerk zur Wiederaufbereitungsanlage eingesetzt. Der eigentliche zur Endlagerung verwendete Abfallbehälter kann dann in seinen Abmessungen und Stahlmengen entsprechend den Anforderungen bezüglich Strahlenschutz und Langzeitsicherheit ausgelegt werden.

7.4 Zusammenfassende Schlussfolgerungen für eine Reduzierung der Gasbildung

In den Untersuchungen des Kapitels 5 [Colenco 2004a] wird gezeigt, dass die Auswirkungen der Gasbildung auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers nur mit Bezug auf die Eigenschaften des Wirtsgesteins abschließend beurteilt werden können. Aus diesem Grund kann auch erst durch eine Sicherheitsanalyse für ein Endlager an einem konkreten Standort entschieden werden, ob Maßnahmen zur Verringerung der Gasbildung notwendig sind. Die Analyse der generischen Endlager in den verschiedenen Geosystemen zeigt große Unterschiede in der Bedeutung der Gasbildung auf. Daraus lassen sich auch Schlussfolgerungen für mögliche Maßnahmen zur Konditionierung der Abfälle ziehen.

In einem Endlager im Salinar wird die Gasbildung durch das Wasserangebot begrenzt. Darum stehen Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserangebotes im Vordergrund. Der größte Teil des Wassers liegt als Porenwasser in den zementierten Abfällen vor. Durch eine Änderung der Zementrezeptur kann der Wassergehalt verringert werden. Der Einsatz eines wasserfreien Fixierungsmittels ermöglicht eine starke Reduzierung des Wasserangebotes und damit der Gasbildung.

Bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen wird das Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ ausgewertet. Das Wasserangebot ist nicht begrenzt, und langfristig wird das gesamte gasbildende Inventar zu Gas umgesetzt. Für ein Endlager im Tonstein zeigen mehrere Indikatoren für die Performance des Barrierensystems (Druckanstieg, Transportzeit gelöster Radionuklide) eine hohe Sensitivität gegenüber der Gasbildungsrate. Daher sind für dieses Wirtsgestein Maßnahmen, wie z.B. Verringerung der spezifischen Metalloberfläche bei der Konditionierung der Abfälle, angezeigt. Neben diesen abfallspezifischen Größen wird die zeitliche Entwicklung der Gasbildung wesentlich durch die Variabilität der Gasbildungsraten (anaerobe Korrosion und mikrobielle Prozesse) bestimmt. Diese können durch die Art der Konditionierung nicht wesentlich beeinflusst werden. In den höher permeablen Wirtsgesteinen Kristallin und sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung, in denen sich keine hohen Gasdrücke aufbauen können und wo ohnehin eine nennenswerte Grundwasserbewegung zu erwarten ist, hat die Gasbildung geringere Auswirkungen.

8 Formulierung von Anforderungen und Aufgaben hinsichtlich der Umsetzung der vorgeschlagenen Nachweiskonzepte

8.1 Empfehlungen für Standortauswahlverfahren

Als Ergebnis der Untersuchungen und Modellrechnungen (Kapitel 5 [Colenco 2004a], Kapitel 6 [Colenco 2004b]) wird empfohlen, die nachfolgenden Gesichtspunkte bei der Standortauswahl zu berücksichtigen.

8.1.1 Salinares Wirtsgestein

Eine wesentliche Voraussetzung für die Speicherung der entstehenden Gase im Einlagerungsbereich und im Wirtsgestein ist der Ausschluss von Wasserzutritten ins Endlager in zweifacher Hinsicht. Zum einen resultieren aus einer Begrenzung des Flüssigkeitsangebotes geringere Gas-mengen und zum anderen sind Zutrittspfade für Flüssigkeiten gleichzeitig auch als Austrittspfade für Fluide anzusetzen, so dass eine vollständige Speicherung von Gasen und ggf. von Flüssigkeiten nicht erreicht werden kann. Wie in den vorherigen Kapiteln dargelegt, sind bei einem Nachweis nach dem Konzept der Gasspeicherung dagegen wegen der Unversehrtheit der geologischen Barrieren auch keine radiologischen Konsequenzen zu erwarten.

Für das Konzept der Speicherung der Gase im Endlager und im Wirtsgestein sind bei der Standortauswahl darüber hinaus die folgenden Parameter von besonderer Bedeutung:

- Abstand Einlagerungsbereich – Deckgebirge/Mächtigkeit des Wirtsgesteines
- Porenvolumen/Grundfläche der Einlagerungsbereiche
- Teufe des Endlagers
- Konvergenzrate im Einlagerungsbereich

Bei den zu erwartenden Gasmengen und Drücken im Endlager kann im Endlager nur ein Teil der Gase gespeichert werden. Neue Untersuchungen auf dem Gebiet von Kavernen im Salinar, die zum Zweck der Speicherung von Gas gesolt wurden, lassen den Schluss zu, dass sich unter der Einwirkung eines erhöhten Fluiddrucks, der im Bereich des lithostatischen Drucks, aber noch unterhalb des Frac-Drucks liegt, im Wirtsgestein Bereiche mit erhöhter Permeabilität bilden. In diese kann das Gas eindringen und hier prinzipiell gespeichert werden, wenn die geologische Barriere zwischen dem Endlager und dem Deckgebirge mächtig genug ist. Unter der Annahme eines homogenen Gasaufstieges oberhalb der gesamten Grundfläche des Endlagers veranschaulicht Abbildung 8-1 die Eindringtiefen für verschiedene Anteile der Gasmenge aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der Grundfläche des Einlagerungsbereiches bei einer Sekundärporosität von 0,5 %.

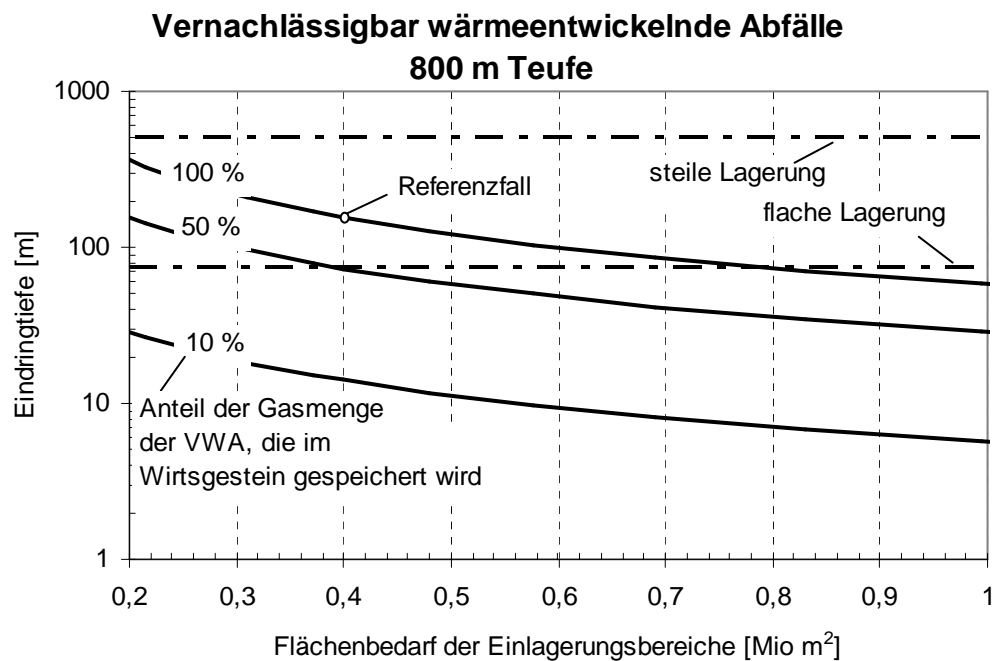


Abbildung 8-1 Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der zu speichernden Gasmenge und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche in 800 m Endlagerteufe im Salinar. Die gestrichelten horizontalen Linien zeigen die für die generischen Endlager im Salinar angenommenen Abstände zum Hangenden.

Wegen der Annahme des homogenen Gasanstieges und einer konstanten Gasmenge beeinflusst die Grundfläche der Einlagerungsbereiche die Eindringtiefe, d.h. mit einer größeren Grundfläche des Einlagerungsbereiches verringert sich bei sonst gleichen Randbedingungen die Eindringtiefe.

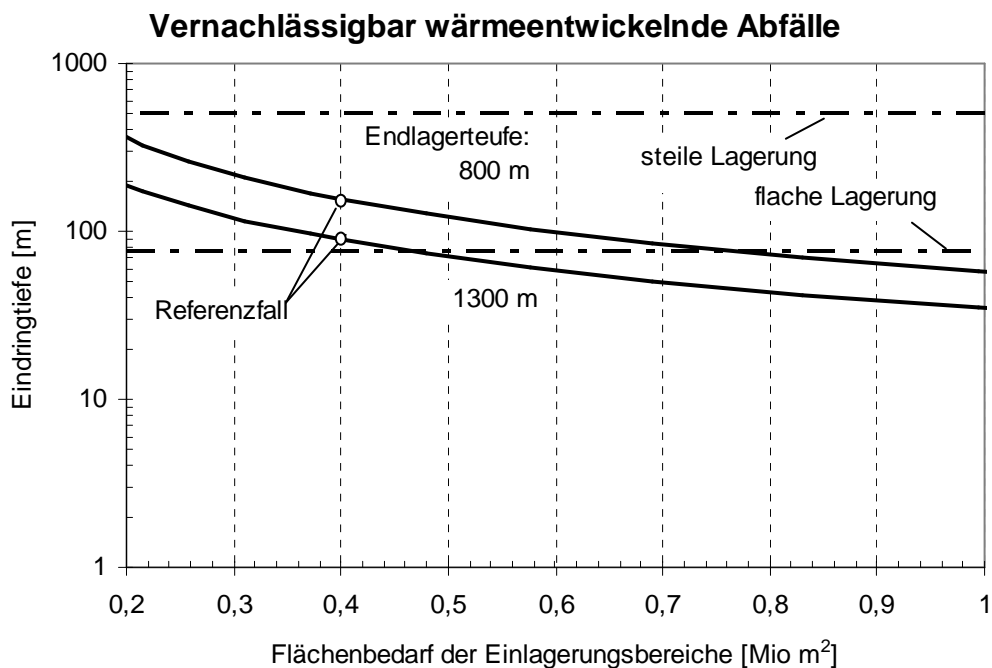


Abbildung 8-2 Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der Teufe und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche im Salinar

Bedingt durch die Kompressibilität von Gasen verringert sich mit zunehmender Teufe bzw. zunehmenden Druck das zu speichernde Gasvolumen und damit die Eindringtiefe des Gases ins Wirtsgestein nach dem Überschreiten des lithostatischen Druckes (vgl. Abbildungen 8-2 und 8-3). Um ein möglichst großes Speichervolumen auch ohne technische Maßnahmen über lange Zeiträume vorhalten zu können, ist eine geringe Konvergenzrate günstig.

Wenn der Nachweis nach dem Konzept der „Gasspeicherung“ für einen konkreten Standort nicht geführt werden kann, besteht die Möglichkeit der Nachweisführung nach dem Konzept „Entweichen von Gas“ (vgl. Abbildung 5-1).

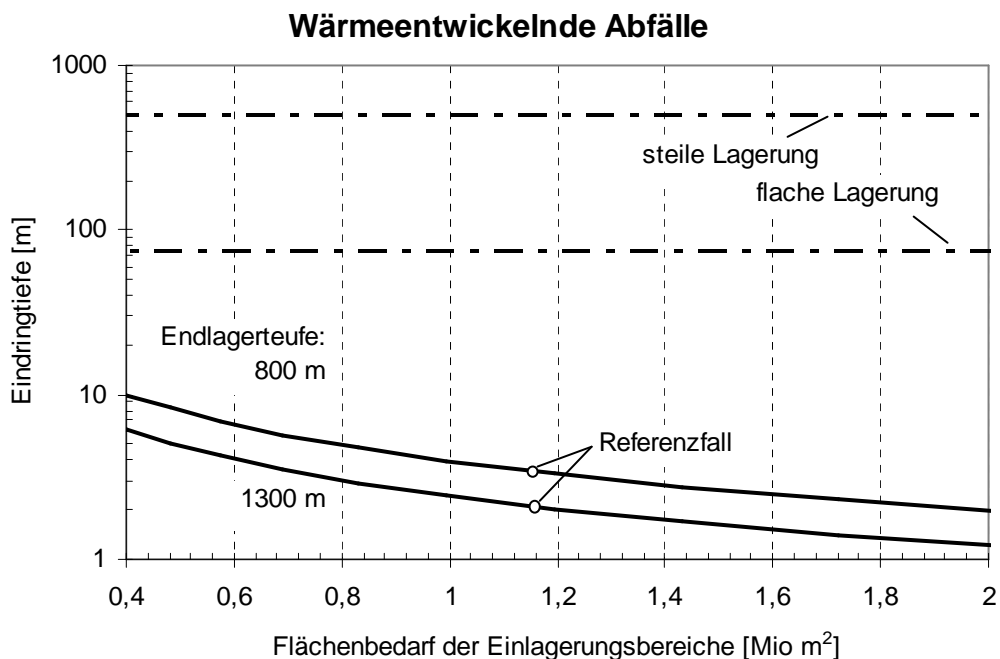


Abbildung 8-3 Eindringtiefe des gebildeten Gases aus den wärmeentwickelnden Abfällen in Abhängigkeit von der Teufe und der Grundfläche der Einlagerungsbereiche im Salinar

Fazit: Unabhängig von den radiologischen Konsequenzen sind unter dem Gesichtspunkt der Gasbildung beim Wirtsgestein Salinar entsprechend der Definition des Geosystems im Salinar nur solche Standorte zu bevorzugen, bei denen ein Wasserzutritt ausgeschlossen werden kann. Unter Berücksichtigung eines Bereiches mit einer sekundären Permeabilität/Porosität aufgrund des Überschreitens des lithostatischen Druckes im Endlager ergibt sich eine Eindringtiefe für das Gas, die durch die gebildete Gasmenge und die Grundfläche des Einlagerungsbereiches bestimmt wird. Eine große Mächtigkeit der Salzschiefer zwischen Einlagerungsbereich und Deckgebirge sowie eine große Grundfläche des Einlagerungsbereiches wirken sich günstig auf das Gasspeichervermögen und die Sicherheit der geologischen Barriere aus. Mit zunehmender Teufe und zunehmendem Druck reduzieren sich das Gasvolumen und damit die sich einstellende Eindringtiefe. Die dargestellten Abhängigkeiten der Parameter (Mächtigkeit der Barriere Endlager-Deckgebirge, Grundfläche des Einlagerungsbereiches, Teufendruck und Konvergenzrate) verdeutlichen, dass erst nach Kombination dieser geometrischen, geologischen und geomechanischen Größen Aussagen hinsichtlich der Eignung eines Standortes unter dem Aspekt der Gasspeicherung möglich werden.

8.1.2 Nicht-salinare Wirtsgesteine

Für Standorte mit nicht-salinaren Wirtsgesteinen ist eine Analyse der radiologischen Konsequenzen einer potenziellen Freisetzung radioaktiver Substanzen als Folge der Gasbildung in die Biosphäre unabdingbar. Dies gilt unabhängig von den zu erwartenden Gasmengen und –raten infolge der möglichen Gasbildungsprozesse, da die Wirtsgesteine eine verbundene, flüssigkeitsgesättigte

Porosität aufweisen und zumindest von einer diffusiven Schadstofffreisetzung, bei höherer Permeabilität des Wirtsgesteins auch von einer Durchströmung des Endlagers mit Wässern und somit von einem advektiven Austrag radioaktiver Substanzen ausgegangen werden muss. Als Indikator für die radiologischen Konsequenzen werden im Rahmen dieser Studie die Durchbruchzeiten für den Transport von Gas- und Flüssigkeitstracern vom Einlagerungsbereich bis in das Deckgebirge sowie der zu erwartende Druckanstieg herangezogen.

Beim Standortauswahlverfahren sollte zunächst die Suche nach einer günstigen geologischen Gesamtsituation am Standort im Vordergrund stehen, um die langfristig zu erwartenden radiologischen Konsequenzen durch den Transport gelöster radioaktiver Substanzen zu minimieren. Im Grundwasser transportierte Radionuklide bestimmen in der Regel die zu erwartenden radiologischen Konsequenzen, flüchtige Radionuklide spielen meist eine untergeordnete Rolle.

Im Falle von Tonstein kann die Gasbildung bald zur Überschreitung des lithostatischen Drucks führen, weil wegen der sehr geringen Permeabilität dieses Wirtsgesteins Gas und Flüssigkeit langsamer ausgepresst werden, als das Gas gebildet wird. Würde das Wirtsgestein auf diese hohen Drücke mit der Bildung eines großen Fracs reagieren, könnte die Barrierenwirksamkeit dadurch eingeschränkt werden. Untersuchungen in Felslabors deuten aber stark darauf hin, dass sich Tonstein erheblich „gutmütiger“ verhält und sich bei Innendrücken in der Nähe des lithostatischen Drucks statt großer Fracs viele Mikrorisse bilden. Diese können horizontal-parallel zu den Schichtebenen des Tons verlaufen und als „Sekundärporosität“ das Gas zunächst speichern, bevor es dann allmählich unter Zweiphasenverhältnissen, d.h. unter Verdrängung des Porenwassers weiter in das Wirtsgestein eindringt [Nagra 2002a, b]. In den hier durchgeführten Modellrechnungen wird vorausgesetzt, dass das Gas über vertikale Mikrorisse entweicht. Selbst dann hat es fast keine Auswirkung auf den Transport von flüssigen Tracern; dieser ist weitgehend diffusionskontrolliert. Für die Standortwahl ist nachzuweisen, dass sich das dortige Wirtsgestein entsprechend verhält.

Beim Wirtsgestein Kristallin ist davon auszugehen, dass es von Anfang an geklüftet ist. Daraus ergeben sich vergleichsweise hohe Permeabilitätswerte und große Abstandsgeschwindigkeiten für das Grundwasser, selbst bei kleinen hydraulischen Gradienten. Für ein Endlager im Kristallin muss daher entweder ein vermehrtes Gewicht auf die technischen Barrieren gelegt werden (z.B. Auslegung der Abfallbehälter für die wärmeentwickelnden Abfälle), oder das Wirtsgestein muss dennoch ein gutes Rückhaltevermögen aufweisen (z.B. durch Sorption und Matrixdiffusion, [Nagra 1994]). Die Gasbildung stellt eine zusätzliche treibende Kraft für den Transport gelöster Radionuklide durch die Klüfte in einem Endlager im Kristallin dar. Dies macht sich besonders bemerkbar, wenn der großräumige hydraulische Gradient gering ist. Im Referenzfall der hier durchgeführten Modellrechnungen wird die Durchbruchzeit auf ca. 30% des Wertes ohne Gasbildung verkürzt. Das Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins muss dann groß genug sein, um diesen Effekt auszugleichen. Auswirkungen der Gasbildung auf das Wirtsgestein selber sind aber wegen dessen hoher Permeabilität nicht zu erwarten.

Beim Geosystem „sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung“ hat die Gasbildung nur eine geringe Auswirkung auf den Schadstofftransport. Der Grund dafür ist das relativ hoch permeable Wirtsgestein, welches die gebildeten Gasmengen und parallel dazu ausgepresste Flüssigkeit aufnehmen

kann, ohne dass der Fluiddruck nennenswert ansteigt. Die Tonschicht oberhalb des Wirtsgesteins wird dadurch nicht beeinflusst und bleibt als wirksame Barriere erhalten. In vertikaler Richtung ist daher weiterhin nur diffusiver Schadstofftransport möglich. Für den advektiven Transport in horizontaler Richtung wäre eine gasinduzierte Beschleunigung denkbar. Die in dieser Studie durchgeführten Modellrechnungen ergeben aber sogar den umgekehrten Effekt, eine Erhöhung der Durchbruchzeit gegenüber dem entsprechenden Fall ohne Gasbildung, da das Gas im Endlager die Durchströmung mit Grundwasser und den damit verbundenen Austrag von radioaktiven Substanzen aus dem Endlager behindert. Aufgrund der Gasbildung sind also keine zusätzlichen Anforderungen für eine günstige geologische Gesamtsituation zu stellen. Vorteilhaft ist, was allgemein im Hinblick auf den Transport gelöster Radionuklide gilt: Eine ausreichende Mächtigkeit der – ungestörten – Tonschicht und eine genügend große Transportdauer in lateraler Richtung, d.h. kleine hydraulische Gradienten im Wirtsgestein und eine große Ausdehnung des Gesamtsystems. Alternativ würden strukturelle Fallen, z.B. antiklinale Strukturen der Tonüberdeckung, den horizontalen Schadstofftransport weitgehend unterbinden.

Ist aufgrund des Radionuklidinventars im geplanten Endlager mit signifikanten radiologischen Konsequenzen durch flüchtige Radionuklide zu rechnen, kommt dem Aspekt der Gasbildung bei der Standortauswahl eine erhöhte Bedeutung zu. Generell nimmt die Durchbruchzeit des Gastracers mit zunehmender Gasbildungsrate signifikant ab. Im Vergleich zur Durchbruchzeit des Flüssigkeitstracers kann diese beim Gastracer um mehr als eine Größenordnung niedriger sein. Günstig sind in solchen Fällen insbesondere Standorte mit Transportwegen vom Endlager zur Biosphäre, die sowohl lang sind und als auch ein großes Speichervolumen aufweisen. Als Beispiel sei hier der Referenzfall für sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung aufgeführt.

Fazit: Je besser sich ein Standort in den untersuchten durchlässigeren Wirtsgesteinen im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen ohne Berücksichtigung der Gasbildung darstellt, umso weniger nachteilig sind die Konsequenzen der Gasbildung. Derartige Standorte weisen z. B. lange Transportwege oder hohe Verdünnungsvolumina auf. Lediglich beim Tonstein ist zusätzlich zu untersuchen, in welcher Weise das Wirtsgestein auf Drücke im Bereich des lithostatischen Drucks reagiert.

8.1.3 Zusammenfassung der relevanten Kriterien für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung

In der Tabelle 8-1 sind die Kriterien aufgeteilt nach dem jeweiligen Wirtsgestein, die auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen als besonders relevant für die Standortauswahl ermittelt werden, aufgeführt und bewertet.

Tabelle 8-1 Kriterien für die Standortauswahl unter dem Aspekt der Gasbildung

| Wirtsgestein | Nachweiskonzept | Kriterium | Anforderung/Bewertung |
|---|--------------------|---|--|
| Salinar | Gasspeicherung | Wasserzutritt | Ist auszuschließen |
| | | Abstand Einlagerungsbereich – Deckgebirge | Große Mächtigkeit ist günstig |
| | | Grundfläche des Einlagerungsbereiches | Große Grundfläche ist günstig |
| | | Porenvolumen des Versatzmaterial | Große Porenvolumen ist günstig |
| | | Konvergenz | Geringe Konvergenzrate ist günstig |
| | | Teufe | Große Teufen sind - günstig bezüglich Gasvolumen, - ungünstig bezüglich Konvergenzraten. Insgesamt überwiegen die günstigen Effekte. |
| Tonstein | Entweichen von Gas | Mechanisches Verhalten des Wirtsgesteins bei hohem Gasdruck im Endlager | Bildung von vielen Mikrorissen statt weniger Klüfte ist günstig; Freisetzung gelöster Radionuklide ist dann diffusionskontrolliert, weitgehend unabhängig von Gasbildung |
| Sonstige Wirtsgesteine unter Tonüberdeckung | | günstige geologische Gesamtsituation | keine besonderen Anforderungen aufgrund Gasbildung Strukturelle Fallen, wie z.B. antiklinale Strukturen, sind günstig |
| Kristallin | | Rückhaltevermögen des geklüfteten Wirtsgesteins | Gasbildung beschleunigt die Flüssigkeitsbewegung im Wirtsgestein; daher gutes Rückhaltevermögen in den Klüften erforderlich (Sorptions, Matrixdiffusion) |

8.2 Empfehlungen für die Nachweisführung in Genehmigungsverfahren

In dem Kapitel 8.2.1 und 8.2.2 werden die wesentlichen Ergebnisse und relevanten Einflussfaktoren bei der Nachweisführung „Speicherung“ und „Entweichen von Gas“ in Hinblick auf Verwendung in Genehmigungsverfahren zusammengefasst..

8.2.1 Nachweisführung „Speicherung“

Die durchgeführten Untersuchungen belegen – unter Berücksichtigung der im folgenden Kapitel 8.3 dargestellten offenen Fragen und erforderlichen Untersuchungen –, dass mittels eines zweistufigen Verfahrens

- Speicherung im Endlager
- Speicherung im Wirtsgestein

die Nachweisführung zur Speicherung der gebildeten Gase im Salinar durchgeführt werden kann.

Neben den standortspezifischen Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 8.1) kann unter Berücksichtigung von technischen Maßnahmen, z.B. Bereitstellung von Speichervolumen oder Reduzierung des internen Wasserangebotes, die Erfolgshöufigkeit der Nachweisführung erhöht werden. Dementsprechend wird empfohlen technische Maßnahmen in die Planungen mit aufzunehmen und bei der Nachweisführung zu berücksichtigen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf das Restporenvolumen insbesondere auch nach Kompaktion durch Konvergenz der Versatzmaterialien zu richten.

Da die Gasbildung durch das Wasserangebot im Endlager begrenzt ist, führt eine Reduzierung des Porenwassers in den zementierten Abfällen zu einer geringeren Gasmenge. Dies kann durch eine Änderung der Zementrezeptur oder durch den Ersatz des Zements durch ein anderes Bindemittel erreicht werden (vgl. Kapitel 7 und [Colenco 2004c]).

8.2.2 Nachweisführung „Entweichen von Gas“

Bei der Frage der Auswirkungen der Gasbildung auf die Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung (Konzept „Entweichen von Gas“) stehen innerhalb der Langzeitsicheranalysen die jeweiligen Standorteigenschaften im Vordergrund.. Wie sich unter den zu Grunde gelegten Randbedingungen gezeigt hat, empfiehlt es sich, mit abnehmender Durchlässigkeit der Wirtsgesteine den Einfluss der Gasbildung auf die Radionuklidfreisetzung verstärkt mit zu betrachten, während bei zunehmender Durchlässigkeit des Wirtsgesteins die Radionuklid-ausbreitung maßgeblich von den geologischen und geometrischen Eingangsgrößen abhängt.

Falls die Gasspeicherung im Salinar unter den zu Grunde gelegten Randbedingungen nicht möglich ist, stellt dies jedoch nicht zwangsläufig ein Ausschlusskriterium für den betreffenden Standort dar. In diesem Falle ist das Wirtsgestein als „durchlässig“ zu betrachten und das Konzept „Entweichen von Gas“ anzuwenden (siehe Abbildung 5-1). Dabei ist dann allerdings auch die externe Gasbildung zu berücksichtigen. Dieser Fall wurde im Rahmen dieses Vorhaben jedoch nicht weiter verfolgt.

8.3 Themenschwerpunkte für weiterführende Untersuchungen

8.3.1 Generische Endlager

Auf der Basis ausgewerteter Endlagerprojekte, definierter Geosysteme und abgestimmter Modellinventare werden in TA 3 [Colenco 2003b] mögliche Konfigurationen der generischen Endlager für die unterschiedlichen Wirtsgesteine dargestellt, die die Grundlage für die Bearbeitung der weiteren Teilaufgaben dieses Vorhabens und des Projektes WS 1008 „Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit“ (vgl. z.B. [Colenco 2004e]) bilden. Diese Ausführungen dienen einer ersten Beschreibung und zur Illustration möglicher Endlagerkonzepte. Wie in TA 3 [Colenco 2003b] dargelegt, kann eine konkrete Planung der Endlager erst auf der Basis standortbezogener Daten (z.B. Geologie, Geometrie, usw.) erfolgen und ist nicht Untersuchungsziel der durchgeführten Arbeiten dieses Teilprojektes der sicherheitstechnischen Einzelfragen.

Vorlaufend und unabhängig von einer späteren Konkretisierung und notwendigen Überprüfung der in TA 3 [Colenco 2003b] festgelegten Randbedingungen und Eingangsdaten an Hand von standortbezogenen Daten sind die folgenden Annahmen - auch für die Auslegung von generischen Endlagern - zu überprüfen:

- Differenzierte Betrachtung der Castor (THTR und MTR)-Behälter bezüglich des Einlagerungsvolumens und der Wärmeleistung
- Wärmeleistung und Einlagerungsdichte der wärmeentwickelnden Abfälle in nicht-salinaren Geosystemen

Für die Endlagerauslegung wird in TA 3 [Colenco 2003b] unterstellt, dass das Einlagerungsvolumen zweier Castor- (THTR und MTR) Behälter vereinfacht dem Einlagerungsvolumen eines Pollux-Behälters entspricht. Das so ermittelte Einlagerungsvolumen wird dem Einlagerungsvolumen der Polluxbehälter zugeschlagen (vgl. Kapitel 4.3).

Die gewählte Dimensionierung der Einlagerungsstrecken für die wärmeentwickelnden Abfälle im Tonstein orientieren sich an den in [Nagra 2002a, b] dargestellten Planungen, während für generische Endlager im Kristallin und in sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung die in [Nagra 1994] beschriebene Streckenlagerung zu Grunde gelegt wird. Da die Endlagerung der BE in Pollux-Behältern erfolgt, sind Anpassungen gegenüber dem in [Nagra 1994] und [Nagra 2002a, b] geplanten Streckenprofil vorgenommen worden. Eine Überprüfung der gegenüber den Nagra-Planungen geänderten Abfallgebindegeometrien, der Behandlung und der Wärmeleistung der wärmeentwickelnden Abfälle erfordern detaillierte Untersuchungen des entstehenden Temperaturfeldes und dessen Auswirkungen.

8.3.2 Modelle und verwendete Parameter

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Gasbildung sind Modelle notwendig, wie sie in Kapitel 5 [Colenco 2004a] vorgestellt und angewandt werden. Im Rahmen eines Sicherheitsnachweises müssen die Ergebnisse der Modellrechnungen belegen, dass die radiologischen Konsequenzen mit den Strahlenschutzgrundsätzen und Grenzwerten [StrlSchV 2001] vereinbar sind.

Da für einen Sicherheitsnachweis belastbare Prognosen der maximalen radiologischen Konsequenzen für lange Zeiträume benötigt werden, sind Unsicherheiten in den Modellannahmen und verwendeten Parametern unbedingt zu betrachten. Hierzu werden in Kapitel 5 [Colenco 2004a] Sensitivitätsanalysen für die unterschiedlichen Rechenmodelle und Nachweiskonzepte durchgeführt.

Im Folgenden werden die Annahmen und Grenzen der in Kapitel 5 [Colenco 2004a] verwendeten Modelle und Parameter dargestellt und ggf. auf erforderliche vertiefende Untersuchungen hingewiesen. Zunächst wird auf die Gasbildung eingegangen, die als Eingangsgröße für alle weiteren Modellrechnungen der unterschiedlichen Nachweiskonzepte verwendet wird. Es folgen die in Kapitel 5 beschriebenen Rechenmodelle der unterschiedlichen Nachweiskonzepte zur Gasspeicherung und zum Entweichen von Gas.

8.3.2.1 Rechenmodell zur Gasbildung

Sämtliche Rechenmodelle der Nachweiskonzepte beruhen auf Annahmen über die Gasbildung. Hierzu wird gemäß Kapitel 5 [Colenco 2004a] basierend auf den Modellinventaren aus Kapitel 4 [Colenco 2003b] die Gasbildung infolge anaerober Korrosion von Eisen sowie infolge mikrobiellen Abbaus von Organika ermittelt. Während für die Nachweiskonzepte „Gasspeicherung im Endlager“ und „Entweichen von Gas“ die zeitliche Entwicklung der Gasbildung notwendig ist, wird für das Rechenmodell des Nachweiskonzeptes „Gasspeicherung im Wirtsgestein“ lediglich die gesamte gebildete Gasmenge benötigt. Eine Diskussion der Prozesse und der Annahmen sowie deren Bewertung sind in Tabelle 8-2 zusammengefasst.

Tabelle 8-2 Modellierung der Gasbildung, Prozesse, Annahmen und Bewertung

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlungen für das weitere Vorgehen |
|--------------------|--|---|
| Interne Gasbildung | Nur in salinaren Wirtsgesteinen Gesamtes internes Wasser in den Abfällen und im Versatz steht der Gasbildung zur Verfügung. | Basierend auf dem Modellinventar wird im Fall der internen Gasbildung die Gesamtmenge des Gases durch die Menge des internen Wassers bestimmt. Eine genauere Bestimmung der internen Wassermenge kann die Unsicherheiten bezüglich der Gasbildungsmenge und -rate vermindern. |

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlungen für das weitere Vorgehen |
|------------------------------|--|--|
| Externe Gasbildung | <p>Nur in nicht-salinaren Wirtsgesteinen</p> <p>Es steht ausreichend Wasser zur Verfügung, um das Gesamtinventar der gasbildenden Stoffe umzusetzen.</p> | <p>Bei der externen Gasbildung wird die gesamte Gasmenge durch die Metallmassen und Massen organischer Stoffe bestimmt, da Wasser immer in ausreichendem Maße vorhanden ist. Die gesamte entstehende Gasmenge ist größer als bei der internen Gasbildung, aber mit weniger Unsicherheit behaftet.</p> |
| Anaerobe Korrosion von Eisen | <p>Stahl wird wie Eisen behandelt</p> <p>Zeitlich konstante Korrosionsrate</p> <p>Oberflächenverteilung der Eisens</p> | <p>Die Korrosion des Eisens liefert den maßgeblichen Anteil der gesamten gebildeten Gasmenge. Während die maximale gebildete Gasmenge sich relativ genau bestimmen lässt, sind die Unsicherheiten bezüglich der Gasbildungsrate erheblich. Wenn die Ergebnisse der Modellrechnungen der Nachweis-konzepte stark von der Gasbildungsrate abhängen, kann eine vertiefte Betrachtung der zu erwartenden Korrosionsraten die Unsicherheiten der Modellergebnisse verringern.</p> |
| Mikrobieller Abbau | <p>Findet aufgrund des Inventars nur in VWA statt</p> <p>Reaktion erster Ordnung mit zeitlich konstanter Reaktionsgeschwindigkeit</p> | <p>Mikrobieller Abbau spielt im Vergleich zur Korrosion von Eisen eine untergeordnete Rolle. Eine vertiefte Betrachtung der Gasbildung infolge mikrobiellen Abbaus ist daher zunächst zweitrangig.</p> |
| Gasmindernde Prozesse | <p>Methanogenese</p> <p>Carbonatisierung</p> | <p>In nicht-salinaren Gesteinen wird bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen die Gesamtmenge an Gas um bis zu 20% reduziert.</p> |
| Radiolyse | <p>Nur WA</p> | <p>Wird hier nicht explizit betrachtet, da die Gasmengen im Vergleich zur anaeroben Korrosion von Eisen von untergeordneter Bedeutung sind.</p> |
| Andere gasbildende Prozesse | <p>Gasbildungsprozesse anderer Stoffe, die nur in geringen Mengen im Modellinventar vorkommen, werden vernachlässigt.</p> | <p>Eine vertiefte Untersuchung wird aufgrund der geringen zu erwartenden Gasmengen als nicht erforderlich angesehen.</p> |

8.3.2.2 Rechenmodell zum Nachweiskonzept „Gasspeicherung im Endlager“

Mit dem Nachweiskonzept der „Gasspeicherung im Endlager“ im Salinar wird das Ziel eines vollständigen Einschlusses der entstehenden Gase verfolgt, um radiologische Konsequenzen von vorneherein ausschließen zu können (Tabelle 8-3). Ein Expositionspfad gemäß [StrlSchV 2001] wird also ausgeschlossen.

Tabelle 8-3 Nachweisführung „Gasspeicherung im Endlager im Salinar“, Prozesse, Annahmen und Bewertung

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlungen für das weitere Vorgehen |
|----------------------------|---|---|
| Gasspeicherung im Endlager | Streckenabdichtungen sind undurchlässig Wirtsgestein ist undurchlässig | Dichtheit der Streckenabdichtungen und des Wirtsgesteins ist nachzuweisen. |
| Gasbildung | Nur interne Gasbildung, Wasserzutritt von außen ausgeschlossen (Weitere Annahmen siehe Tabelle 8-2) | Wenn ein Wasserzutritt nicht ausgeschlossen werden kann, dann kann auch ein Einschluss des Gases nicht gewährleistet werden, und es müsste das Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ angewandt werden. Als weitere Konsequenz wäre dann zusätzlich von externer Gasbildung auszugehen. |
| Konvergenz | PSE Ansatz als Modell der Konvergenz der Einlagerungsstrecken Gesamtinhalt der Einlagerungsstrecken besteht aus kompaktierbarem Versatz. Vernachlässigung von nicht kompaktierbaren Stoffen | PSE Ansatz ist semiempirisch, es stellt sich die Frage nach der Gültigkeit der Gesetzmäßigkeit und der Koeffizienten über lange Zeiträume. Das Modell berücksichtigt nicht die Geometrie der Einlagerungsbereiche, eine detailliertere geomechanische Modellierung der Konvergenz kann Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung des Porenraumes verringern. Eine Berücksichtigung der nicht kompaktierbaren Stoffe in den Einlagerungsbereichen würde zu einer geringeren Abnahme des Porenvolumens führen. Dadurch würde der Druck in den Einlagerungsstrecken geringer ansteigen. |

8.3.2.3 Rechenmodell zum Nachweiskonzept „Gasspeicherung im Wirtsgestein“

Analog zum Nachweiskonzept der Gasspeicherung im Endlager wird mit dem Nachweiskonzept der „Gasspeicherung im Wirtsgestein“ im Salinar ebenfalls das Ziel eines vollständigen Einschusses der entstehenden Gase verfolgt, um radiologische Konsequenzen von vorneherein ausschließen zu können (siehe Tabelle 8-4).

Tabelle 8-4 Nachweisführung „Gasspeicherung im Wirtsgestein (Salinar)“, Prozesse, Annahmen und Bewertung

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlungen für das weitere Vorgehen |
|--|--|---|
| Ausbildung einer Zone sekundärer Porosität und Permeabilität | <p>Durch die Bildung von Mikrorissen erhöhen sich Porosität / Permeabilität, und Gas kann in das Wirtsgestein eindringen.</p> <p>Es entstehen keine durchgehenden Risse durch das Wirtsgestein, die Gasbildungsrate ist so klein, dass Hydrofracking ausgeschlossen werden kann.</p> <p>Ausdehnung der Zone nur abhängig von der gesamten Gasmenge, dem resultierenden Druckaufbau und dem lithostatischen Druck</p> <p>Homogene Verteilung der Zone sekundärer Permeabilität/Porosität oberhalb des Endlagers</p> | <p>Die Ausbildung einer Zone sekundärer Porosität und Permeabilität ist Gegenstand neuester Untersuchungen und bedarf der Verifizierung für die Endlagerung.</p> <p>Der Wert der sekundären Porosität ist zu bestimmen, da er maßgeblich die zu erwartende Eindringtiefe für das Gas beeinflusst. Ebenfalls ist der Grundsatz der volumentreuen Verformung des Wirtsgesteins und der umgebenden Neben- und Deckgebirge zu überprüfen.</p> <p>Das in TA 4 vorgestellte Modell dient einer ersten Abschätzung der Eindringtiefe. Detailliertere Untersuchungen sind insbesondere dann notwendig, wenn keine anderen Maßnahmen (Vorhalten von Speichervolumen) vorgesehen sind.</p> <p>Durch Modellrechnungen mit hydraulisch-mechanischer Kopplung ist zu untersuchen, ob diese Zone nicht in einem schmalen Kamin nach oben wächst, weil der für ihre Bildung erforderliche Druck nach oben rasch abnimmt. Inhomogenitäten des Wirtsgesteins könnten diesen Effekt noch begünstigen. Solch ein „channeling“ würde das nutzbare Speichervolumen im Wirtsgestein erheblich verringern.</p> |

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlungen für das weitere Vorgehen |
|------------|--|---|
| Gasbildung | Nur interne Gasbildung, Wasserzutritt von außen ausgeschlossen (Weitere Annahmen siehe Tabelle 8-2) | Wenn ein Wasserzutritt nicht ausgeschlossen werden kann, kann auch ein Einschluss des Gases nicht gewährleistet werden, und es müsste das Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ angewendet werden. Als weitere Konsequenz wäre dann zusätzlich von externer Gasbildung auszugehen. |

8.3.2.4 Rechenmodell zum Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“

Im Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“ sind die radiologischen Konsequenzen der Gasbildung zu betrachten, da potenzielle Freisetzungspfade nicht ausgeschlossen werden können. Für einen Sicherheitsnachweis sind hierzu umfassende Betrachtungen insbesondere auch des Deck- und Nebengebirges notwendig, die hier nicht durchgeführt werden, da deren Eigenschaften stark standortabhängig sind. In Kapitel 5 [Colenco 2004a] werden als Indikator der potenziellen Ausbreitung von Radionukliden aus einem Endlager durch das Wirtsgestein hindurch in die Biosphäre der Transport von gelösten und gasförmigen, nicht sorbierbaren Stoffen unter verschiedenen Randbedingungen untersucht und charakteristische Transportzeiten bestimmt. Damit kann der Einfluss der Gasbildung auf die Transportzeiten ermittelt werden. Wenn sich die Transportzeiten für die unterschiedlichen Gasbildungsszenarien nicht wesentlich vom Fall ohne Gasbildung unterscheiden, dann sind die Konsequenzen der Gasbildung als gering einzustufen.

Das Nachweiskonzept wird hier für Endlager in „durchlässigen“ Wirtsgesteinen verwendet, in denen ein Wasserzutritt nicht ausgeschlossen werden kann. Dieses Nachweiskonzept kann auch angewandt werden für die „undurchlässigen Gesteine“, wenn ein Gaseinschluss nicht gewährleistet werden kann. Letzteres kann eintreten wenn:

- der Bereich der sekundären Permeabilität der Mächtigkeit der geologischen Barriere entspricht bzw. überschreitet, so dass Gas aus dem Wirtsgestein entweicht,
- sich makroskopische Fracs als denkbare Alternativszenarium anstelle von Bereichen sekundärer Porosität ausbilden,
- in einem Störfallszenarium ein Wasserzutritt nicht ausgeschlossen werden kann und sich dadurch Wegsamkeiten durch das Wirtsgestein (Salzgestein) bilden.

Tabelle 8-5 Nachweisführung „Entweichen von Gas“, Prozesse, Annahmen und Bewertung

| Prozess | Annahmen für die durchgeführten Modellrechnungen | Kommentare und Empfehlung für das weitere Vorgehen |
|--|--|---|
| Strömung von Gasen und Flüssigkeiten | <p>Gültigkeit von Darcys Gesetz und der Modelle zum 2-Phasen-Fluß</p> <p>Wirtsgestein ist ein äquivalent poröses Medium.</p> <p>Vereinfachte räumliche Diskretisierung</p> | <p>In sehr gering durchlässigen Gesteinen wie dem Tonstein ist die Anwendung von Darcys Gesetz und vom 2-Phasen Ansatz zur Beschreibung der Ausbreitung von Gasen und Flüssigkeiten nur bedingt möglich. Eine vertiefte Betrachtung ist daher erforderlich. Die „pathway dilatation“ (Sekundärporosität in Tonstein) ist weiter zu untersuchen.</p> <p>Die Strömung von Gasen und Wässern durch das Wirtsgestein hängt maßgeblich von den hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteines am Endlagerstandort ab.</p> <p>Eventuell vorhandene Inhomogenitäten sind zu berücksichtigen.</p> |
| Ausbreitung eines Tracers stellvertretend für radioaktive Stoffe | <p>Keine chemischen Wechselwirkungen</p> <p>Kein Zerfall</p> <p>keine Dispersion</p> | <p>Im verwendeten Modell werden Prozesse, welche die Ausbreitung radioaktiver Stoffe verzögern, konservativ vernachlässigt; in einem Sicherheitsnachweis sollten diese Prozesse berücksichtigt werden.</p> <p>Die Dispersion bewirkt kürzere Durchbruchzeiten. In Zusammenhang mit dem radioaktiven Zerfall kann dies von Bedeutung sein.</p> <p>Für einen Sicherheitsnachweis sind basierend auf dem Inventar Dosisberechnungen erforderlich</p> |
| Gasbildung | <p>Externe Gasbildung durch Wasserzutritt von außen</p> <p>(Weitere Annahmen siehe Tabelle 8-2)</p> | <p>Es wird unterstellt, dass die maximale Gasmenge entsteht.</p> |

9 Wirtsgesteine im Vergleich

Basierend auf den in TA 3 [Colenco 2003b] beschriebenen Einlagerungskonzepten ergeben sich in den verschiedenen Wirtsgesteinen (vgl. Tabelle 7-1) bei einer vollständigen Umsetzung geringfügig unterschiedliche Gesamtgasvolumina, die durch die unterschiedlichen Verpackungen begründet sind. Bei einer Endlagerung in salinarem Wirtsgestein beläuft sich das Gesamtgasvolumen auf $2,77 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, für nicht-salinare Wirtsgesteine auf $2,94 \cdot 10^8 \text{ m}^3$. Unabhängig vom Wirtsgestein stammt der größte Anteil der gebildeten Gasmenge ($2,1 \cdot 10^8 \text{ m}^3$) von den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen.

Bedeutender für die tatsächlich entstehende Gasmenge sind die unterschiedlichen Mengen verfügbarer Flüssigkeit, die im Salinar (Nachweiskonzept „Gasspeicherung“) gegenüber den nicht-salinaren Gesteinen (Nachweiskonzept „Entweichen von Gas“) zu geringeren Gasmengen führt.

Die generellen Möglichkeiten zur Führung eines Nachweises in den unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Speicherung, Entweichen von Gas und deren Kombination) sind in der Abbildung 5-1 dargestellt. Im Folgenden werden die Unterschiede bei den untersuchten Nachweisführungen für das Salinar (Speicherung) und die nicht-salinaren Wirtsgesteine (Entweichen von Gas) herausgestellt.

9.1 Salinare Wirtsgesteine

Unter den zu Grunde gelegten Randbedingungen ist in den Geosystemen Salinar die Gasspeicherung im Endlager selber ohne Vorhaltung eines zusätzlichen Gasspeichers nicht möglich, da der Gasdruck aufgrund der Gasbildung in den Einlagerungsstrecken und deren Konvergenz über den lithostatischen Druck ansteigen würde.

Zwei generelle Möglichkeiten der Einflussnahme werden identifiziert:

1. Berücksichtigung weiterer Speichermöglichkeiten
2. Reduzierung der gebildeten Gasvolumina

9.1.1 Speichermöglichkeiten

Die Auswertung durchgeführter Rechnungen ergibt, dass für die Gasspeicherung im Endlager durch die Modifikation verschiedener Parameter (in erster Linie des Versatzmaterials) Möglichkeiten zur Führung des Nachweises zur Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung bestehen. Hierbei ist es günstig, bzw. erforderlich

- ein Versatzmaterial mit einer definierten Restporosität einzubringen,
- ein größeres Hohlraumvolumen bereitzustellen (z.B. Zusatzstrecken oder -abbau mit dem Ziel der Gasspeicherung)
- die entstehende Gasmenge zu reduzieren,
- das Endlager in größeren Teufen anzulegen (Speicherdruck).

Durch solche Maßnahmen (vgl. TA 5 [Colenco 2004b]) wird gewährleistet, dass ein großer Teil der entstehenden Gase im Endlager gespeichert wird.

Einfache Abschätzungen gemäß Kapitel 5 unter Berücksichtigung der Gasspeicherung im Wirtsgestein – wenn der Druck im Endlager auf den lithostatischen Druck ansteigt und in der Folge das Gas in einen Bereich erhöhter Porosität ins Wirtsgestein eindringt, der sich unter diesen Bedingungen bilden kann – führen zu dem Ergebnis, dass eine Speicherung prinzipiell möglich ist, wenn die Salzbarriere zwischen dem Endlager und dem Deckgebirge mächtig genug ist. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass sich der Bereich erhöhter Porosität großflächig über dem gesamten Endlager ausbreitet. Die Gültigkeit dieser Annahme muss allerdings noch überprüft werden (Stichwort „fingering“).

9.1.2 Reduzierung der Gasmenge

Die in Kapitel 5 [vgl. Colenco 2004a] dargestellten Nachweiskonzepte für die Beherrschbarkeit der Gasbildung zeigen eine unterschiedliche Bedeutung der Gasbildung für die Langzeitsicherheit der einzelnen generischen Endlager. Dies spiegelt sich in den Anforderungen an die Konditionierung der radioaktiven Abfälle wieder.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass für das Wirtsgestein Salinar die Gasentwicklung in den Einlagerungsbereichen für die wärmeentwickelnden Abfälle beherrschbar ist, da der Anteil der hier erzeugten Gase nur einen geringeren Anteil an der Gesamtgasmenge besitzt und mit großer Wahrscheinlichkeit bei geringer Modifikation der Kompaktionseigenschaften des Versatzes in dem verbleibenden Porenraum gespeichert werden kann.

Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle ist eine entscheidende Größe die Gasmenge bzw. das Wasserangebot für die Gasbildung, die als Folge von Korrosion der Metalle und mikrobiellem Abbau der Organika, die in den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen enthalten sind, hervorgerufen wird.

Wie in Kapitel 7 (vgl. TA 7 [Colenco 2004c]) ausgeführt, liegt der größte Teil des Wassers als Porenwasser in den zementierten Abfällen vor. Durch eine Änderung der Zementrezeptur kann der Wassergehalt verringert werden. Der Einsatz eines wasserfreien Fixierungsmittels ermöglicht eine starke Reduzierung des Wasserangebotes und damit der Gasbildung.

Maßnahmen zur Reduzierung der gasbildenden Stoffe (Metalle und organische Stoffe) im Abfall führen erst dann zum Erfolg, wenn die Verringerung so groß ist, dass nicht mehr das Wasser der begrenzende Faktor bei der Gasbildung ist. Dies tritt erst bei einem massiv reduzierten Inventar der gasbildenden Stoffe ein und erscheint unter den zu Grunde gelegte Randbedingungen nicht als zielführend.

9.2 Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin und sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung

Für die Geosysteme Tonstein, Kristallin sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung (Konzept Entweichen von Gas) werden Durchbruchzeiten für einen gasförmigen und einen flüssigen Tracer

als Indikatoren für die Beherrschbarkeit der Gasbildung errechnet. Hierbei zeigt sich, dass der Einfluss der Gasbildung auf die Indikatoren mit zunehmender Durchlässigkeit des Wirtsgesteins abnimmt.

Die modellhaften Berechnungen in Kapitel 5 [Colenco 2004a] verdeutlichen, dass die Durchbruchzeit aufgrund der Gasbildung für die Geosysteme Tonstein, Kristallin sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Bedeutung ist. Zur Erhöhung der Durchbruchzeiten sollten also Standorte bevorzugt werden, deren geologischer Aufbau den Transport von Gasen und vor allem von Flüssigkeiten verhindert oder zumindest behindert. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 6.2 sollte eine antiklinale Struktur oder auch strukturelle Falle mit ausreichendem Speichervolumen ausgewählt werden, um den Einschluss der Gase sicherzustellen.

Die Gasbildung bei den nicht-salinaren Wirtsgesteinen ist durch das Wasserangebot nicht begrenzt, und langfristig wird das gesamte gasbildende Inventar zu Gas umgesetzt. Für ein Endlager im Tonstein zeigen mehrere Indikatoren für die Performance des Barrierensystems (Druckanstieg, Transportzeit gelöster Radionuklide) eine hohe Sensitivität gegenüber der Gasbildungsrate. Daher sind für dieses Wirtsgestein Maßnahmen, wie z.B. Verringerung der spezifischen Metalloberfläche bei der Konditionierung der Abfälle, angezeigt. Neben diesen abfallspezifischen Größen wird die zeitliche Entwicklung der Gasbildung wesentlich durch die Variabilität der Gasbildungsraten (anaerobe Korrosion und mikrobielle Prozesse) bestimmt. Diese können durch die Art der Konditionierung nicht wesentlich beeinflusst werden.

9.3 Zusammenfassende Bewertung

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass unter dem Aspekt der Beherrschung der Auswirkungen der Gasbildung die betrachteten potenziellen Wirtsgesteine Salinar, Tonstein, kristalline Gesteine sowie sonstige Gesteine unter Tonüberdeckung unter Zugrundelegung des „Endlager-Konzeptes“ sowie weiterer Annahmen und Randbedingungen als Erfolgshöflich einzustufen sind, d.h. es sind keine Ausschlussmerkmale für einzelne Wirtsgesteine ermittelt worden.

Bei der Durchführung eines Sicherheitsnachweises wird das Szenario „Gasbildung“ beim Wirtsgestein Salinar eine zentrale Rolle spielen. Neben der Mächtigkeit des Wirtsgesteins/Abstand Endlager-Deckgebirge und dem Umfang der Zone erhöhter Porosität (Sekundärpermeabilität/-porosität) bildet die Gesamtgasmenge eine weitere bedeutende Einflussgröße für die Standortauswahl und das Nachweisverfahren für das Wirtsgestein Salinar. Dies bedeutet, dass bei der Realisierung eines Endlagers nicht nur die Möglichkeiten der Gasspeicherung isoliert betrachtet werden sollten, sondern auch immer Kombinationen mit den Möglichkeiten der Begrenzung der Gasbildung.

Bei den Wirtsgesteinen Tonstein, Kristallin und den sonstigen Gesteinen unter Tonüberdeckung zeigt sich, dass Gasmenge und Gasbildungsrate einen Einfluss auf den zu erwartenden Druckaufbau im Endlager haben. Auch haben Gasmenge und Gasbildungsrate einen Einfluss auf die Freisetzung von radioaktiven Stoffen sowohl in der flüssigen als auch in der Gasphase. In Anbetracht der vielen anderen Einflussgrößen, wie z.B. hydraulische und geometrische Eigenschaften des

Wirtsgesteins, wird der Einfluss der Gasbildung auf die Nachweisführung jedoch als geringer eingestuft als im Salinar.

10 Literaturverzeichnis

- [AkEnd 2002] AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
- [Alder, McGinnes, 1994] Alder, J.C., McGinnes, D.F. (1994): Model Radioactive Waste Inventory for Swiss Waste Disposal Projects, NTB 93-21 (Vol. 2), Nagra, Wettingen Schweiz
- [Brennecke 2001] Brennecke, P. und Hollmann, A (2001): Anfall radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland - Abfallerhebung für das Jahr 1999 -, BfS-ET-35/01, Wirtschaftsverlag NW/Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Salzgitter
- [BfS 2005] BfS (2005): Modellinventar radioaktiver/nicht radioaktiver Abfallinhaltsstoffe in einem zukünftigen Endlager, Stand: Dezember 2003, SE-IB-05/05
- [Colenco 2004a] Mayer, G., Skrzypek, J., Wilhelm, St., Niemeyer, M. (2004): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 4: Entwicklung von Nachweiskonzepten zur Beherrschbarkeit der Gasbildung für potenzielle Wirtsgesteine. Colenco Bericht 3161/18, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Colenco 2004b] Mayer, G., Skrzypek, J., Niemeyer, M., Folle, St., Rolfs, O. & Suter, D. (2004): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 5: Bewertung der Realisierbarkeit der Nachweiskonzepte. Colenco Bericht 3161/22, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Colenco 2004c] Suter, D. (2004): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 7: Konkretisierung von Maßnahmen hinsichtlich der Abfallbehandlung und -konditionierung zur Reduzierung der Gasmenge im Endlager. Colenco Bericht 3161/20, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Colenco 2004e] Skrzypek, J., Wilhelm, St., Niemeyer, M., Folle, St., Rolfs, O., McCombie, Ch., Chapman, N. (2004): Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit, Abschlussbericht - Colenco Bericht 3184/11, Colenco Power Engineering AG, Baden/Schweiz

- [Colenco 2003a] Suter, D. (2003): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 1: Analyse der relevanten Gasbildungsmechanismen. Colenco Bericht 3161/03, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Colenco 2003b] Skrzyppek, J., Mayer, G., Wilhelm, St., Niemeyer, M., Folle, St., Rolfs, O. & Suter, D. (2003): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 3: Daten zur Bewertung der Gefährdung der Endlagersicherheit durch Gasbildung. Colenco Bericht 3161/12, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Colenco 2003c] Wilhelm, St., Mayer, G., Suter, D. (2003): Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit, Bericht zur TA 2: Analyse der für die Gasbildung maßgeblichen Szenarien. Colenco Bericht 3161/05, Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz
- [Corey 1994] Corey, A.T. Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media. Water Resources Publications, 1994
- [Davies 1991] Davies, P.B. (1991): Evaluation of the role of threshold pressure in controlling flow of waste-generated gas into bedded salt at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Sandia Rep. SAND 90-3246
- [DBE 1998] DBE (1998): Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ – Abschlussbericht. Dok.-Nr. 9G/211311/BB/BY/00300. Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine.
- [DOE 1996] USDOE (1996): Title 40 CFR Part 191 Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. US Department of Energy, Carlsbad Area Office, New Mexico.
- [IAEA 1999] IAEA, Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Guide, International Atomic Energy Agency, Wien, 1999
- [Lindblom 1997] Lindblom, U.E.(1997): Design Criteria for the Brooklyn Union Gas Storage Caverns at JFK Airport, New York. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34, No. 179, 1997.
- [Menzel 1995] Menzel, W.; Minkley, W. (1995): Geomechanisches Konzept für die Nutzung einer Salzgrube als Unterspeicher für Gas. aus: Kolloquium "Nutzung bergbaulicher Hohlräume als Speicher und Deponien sowie Verwertung von

Reststoffen/Abfällen im Bergbau unter besonderer Berücksichtigung gebirgsmechanischer Aspekte". pp 145-172, Clausthal-Zellerfeld.

- [Moreno et al., 2001] Moreno, L., Skagius, K., Södergren, S. Wiborg, M. (2001): Gas related processes in SFR, SKB R-01-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- [Nagra 1994] Nagra (1994): Technical Report 93-22; Kristallin-I, Safety Assessment Report.
- [Nagra 2002a] Nagra (2002): Project Opalinus Clay – Safety Report: demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). - Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Schweiz
- [Nagra 2002b] Nagra (2002): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse.- NTB 02-03.
- [NEA 1998] NEA, An International Database of Features, Events and Processes, Nuclear Energy Agency, 1998
- [NEA 1992] NEA, Safety Assessment of radioactive Waste Repositories, Systematic Approaches to Scenario Development, OECD Publications, Paris 1992
- [Noack 2000] Noack, W. (2000): Gasbildung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben, Interner ET-Bericht ET-IB-113, Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
- [Papp 1997] Papp (1997): GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, Projektträger des BMBF für Entsorgung, FZKA-PTE Nr. 3.
- [Plan Konrad 1990] Plan Konrad (1990): Plan Endlager für radioaktive Abfälle Schachtanlage Konrad, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Fassung 4/90
- [Pruess 1999] Pruess, K., Oldenburg, C. und Morodis, G. (1999): TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA
- [Rokahr 2003] Rokahr, R.; Staudtmeister, K.; Zander-Schiebenhöfer, D. (2003): High Pressure Cavern Analysis. SMRI Meeting 2003. Houston, Tx.
- [SKB 2001b] SKB (2001): PROJECT SAFE: Gas related processes in SFR. - Report R-01-11, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden
- [SKB 2001c] SKB (2001): PROJECT SAFE: Compilation of data for radionuclide transport analysis. - Report R-01-14, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden

- [SKB 2001d] SKB (2001): PROJECT JADE: Comparison of repository systems, Executive summary of results. - Technical Report TR-01-17, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden
- [Stormont 2001] Stormont, C. (2001): Evaluation of Salt Permeability Tests, Research Project Report No. 2001-2-SMRI, Solution Mining Research Institute, 3336 Lone Hill Lane Encinitas, California, USA
- [StrISchV 2001] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierenden Strahlen; StrISchV – Strahlenschutzverordnung. Vom 20. Juli 2001, BGBl. I Nr. 38 vom 26.07.2001