

# **RSK - STELLUNGNAHME**

## **Gase im Endlager**

vom 27.01.2005 (379. Sitzung)

*Vorbemerkung: Im folgenden Text werden unter „HAW“ die wärmeproduzierenden radioaktiven Abfälle und unter „MAW/LAW“ bzw. „LAW“ die vernachlässigbar gering wärmeproduzierenden radioaktiven Abfälle verstanden.*

### **1 Einleitung**

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle können durch die Korrosion von Metallteilen und die Zersetzung organischer Stoffe sowie durch Radiolyse Gase entstehen. Das Ausmaß der Gasbildung hängt von den vorhandenen Mengen an reagierenden Stoffen und insbesondere der Verfügbarkeit von Wasser ab. Die Gase können die Wirksamkeit von Barrieren beeinträchtigen, das chemische Milieu und damit die Mobilität von Radionukliden beeinflussen und als treibende Kraft für die Ausbreitung von Radionukliden wirken.

Wenn von der Entstehung größerer Gasmengen auszugehen ist, kann sich dies auch auf die Konzeption des Endlagers auswirken. Gegebenenfalls kann die Gasbildung auch die Realisierung eines Endlagers unter bestimmten Verhältnissen und in einem bestimmten Wirtsgestein deutlich erschweren. Die folgenden Ausführungen befassen sich sowohl mit Einzelfragen zur Gasbildung und deren Auswirkungen im Endlager als auch mit dem möglichen konzeptionellen Umgang bezüglich der Gasbildung für verschiedene Abfallarten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen.

### **2 Beratungsauftrag**

Mit dem Schreiben RS III 2 – 17015/8 vom 27.04.2004 [1] hat das BMU seinen Beratungsauftrag vom 18.01.2001 (RS III 4 (B) – 17015/8) aktualisiert.

Hinsichtlich der Auswirkungen der Gasbildung auf die Langzeitsicherheit bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen soll die RSK in der erbetenen Stellungnahme u. a. auf folgende Fragestellungen eingehen:

1. Ist vor dem Hintergrund der Auswertung der russischen unterirdischen Kernexplosionen davon auszugehen, dass bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen auch eine erhebliche Überschreitung des lithostatischen bzw. petrostatischen Drucks durch Gasbildung zulässig sein könnte, da die Integrität der Barriere Salz nicht beeinträchtigt wird? Welche Anforderungen müssten ggf. an eine derartige Salzformation gestellt werden?

2. Sind etwaige negative Auswirkungen der Gasbildung auf die Eignung von Salz als Wirtsgestein für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle (Ein-Endlager-Konzept) durch die von Firma Stoller in Kapitel 4.4 ihres Berichtes [2] beschriebenen Maßnahmen zu beherrschen? Kann die Langzeitsicherheit der Endlagerung im Salz durch Einbringung von Magnesiumversatz wie im Fall der WIPP wesentlich verbessert werden?
3. Sind aus heutiger Sicht weitergehende grundlegende Untersuchungen bezüglich der Gasbildung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen notwendig, um die Eignung von Salz als Wirtsgestein für ein Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle beurteilen zu können?

Das BMU bittet um Beantwortung der Fragestellungen möglichst bis September 2004. Ferner wurde vom BMU bis Mitte des Jahres 2004 die Zusendung des BfS-Abschlussberichtes zur Klärung der sicherheitstechnischen Einzelfrage „Gasbildung“ zwecks Berücksichtigung in der RSK-Stellungnahme zugesagt. Dieser Bericht konnte der RSK bis zur Verabschiedung dieser Stellungnahme nicht übergeben werden, da an der Fertigstellung noch gearbeitet wird.

### **3 Vorgehensweise**

Zur Erörterung der Problematik der Gase im Endlager hat der RSK-Ausschuss VER- UND ENTSORGUNG auf seiner 29. Sitzung am 16./17.07.2003 eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe eingesetzt, welche die Themenfelder und die zugehörigen Fragestellungen identifizieren und dokumentieren sollte. Diese dienten als Basis für drei Fachgespräche mit eingeladenen Experten. Das erste Fachgespräch wurde am 15.08.2003 mit den Herren Kienzler (FZK) [3], Rübel (GRS) [4], Schulze (BGR) [5] und Zuidema (NAGRA) [6] durchgeführt und war auf die Fragestellung der Druckentwicklung und die daraus resultierenden Auswirkungen ausgerichtet. Im zweiten Fachgespräch am 23.06.2004 mit den Herren Schneider (Fa. Stoller) und Kröhn (GRS) wurde die Übertragbarkeit der Folgen von Kernexplosionen im Salzgebirge zur Schaffung von Hohlräumen auf die möglichen Auswirkungen der Gasbildung in einem Endlager behandelt [7], [8], [9], [10], [11] und [12]. Im dritten Fachgespräch am 30.06.2004 mit den Herren Metz [13] und Kienzler (FZK), Spahiu (SKB) [14] und Suter (Science Solutions) [15] wurden die Auswirkungen der Gasbildung auf das chemische Milieu diskutiert. Die Auswertung der Fachgespräche und die weiteren Beratungen führten zu den hier dargestellten Ergebnissen. Der Ausschuss VER- UND ENTSORGUNG hat sich mit den Beratungsergebnissen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe auf mehreren Sitzungen zwischen September 2003 und September 2004 befasst. In der 38. Sitzung am 04.11.2004 und in der 39. Sitzung am 09.12.2004 wurde die Stellungnahme verabschiedet.

Der Ausschuss hat es aufgrund der aktuellen Diskussion über unterschiedliche Wirtsgesteine für sinnvoll erachtet, die Auseinandersetzung mit der im Beratungsauftrag angesprochenen Problematik der Gasbildung aus radioaktiven Abfällen bei einer Endlagerung in Salz auf andere Wirtsgesteine (Tonstein und durchlässiges Gestein, z. B. Granit) auszuweiten.

Die RSK hat diese Stellungnahme auf ihrer 379. Sitzung am 27.01.2005 beraten und verabschiedet.

#### 4 Entstehung der Gase

In einem Endlager können eine Reihe verschiedener Gase auftreten bzw. sich bilden. Von besonderer Bedeutung sind Wasserstoff und Kohlendioxid. Darüber hinaus können Kohlenwasserstoffe wie Methan, Schwefelwasserstoff und Spaltgase gebildet bzw. freigesetzt werden. Für bestimmte Prozesse können auch die im Endlager verbleibende Luft sowie das in der Gasphase befindliche Wasser relevant sein. Menge und Wirkung dieser Gase sind recht unterschiedlich. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Herkunft der Gase sowie über potenzielle Auswirkungen in einem Endlager.

**Tabelle: Überblick über die Herkunft der Gase sowie über potenzielle mechanische und chemische Auswirkungen in einem Endlager**

Gas	Herkunft	Mögliche Auswirkungen
H <sub>2</sub>	a) Korrosion metallischer Werkstoffe b) Radiolyse von H <sub>2</sub> O c) Mikrobielle Prozesse	-Druckaufbau -Beeinflussung des chemischen Milieus (Redox-Eigenschaften)
CO <sub>2</sub>	a) Mikrobielle Zersetzung org. Materialien b) aus der geologischen Formation	-Druckaufbau -Beeinflussung des chemischen Milieus (pH, Carbonatkomplexierung)
CH <sub>4</sub>	a) aus der geologischen Formation b) Mikrobielle Prozesse c) Radiolyse (MAW mit organischen Anteilen) d) Reaktion von Aluminiumcarbid	-Druckaufbau
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	a) aus der geologischen Formation b) Radiolyse (MAW mit organischen Anteilen)	-Druckaufbau
H <sub>2</sub> S	a) aus der geologischen Formation b) Mikrobielle Prozesse	-Beeinflussung des chemischen Milieus (Redox-Eigenschaften)
H <sub>2</sub> O	Gasphase im Gleichgewicht mit wässrigen Lösungen	- Umlöseprozesse in Salzformationen
He	Alpha – Zerfall	
Edelgase	Spaltgas, Radon	
O <sub>2</sub>	Grubenluft vor Verschluss des Endlagers	- Beeinflussung des chemischen Milieus (Redox-Eigenschaften)
Tritium	Abfallgebinde	
N <sub>2</sub>	a) Grubenluft vor Verschluss des Endlagers b) Mikrobielle Prozesse	

Von besonderer Bedeutung sind Druckaufbau und die Beeinflussung des chemischen Milieus und damit der Mobilität der Radionuklide in einem Endlager. Besonders wichtig im Hinblick auf den Druckaufbau ist Wasserstoff, von untergeordneter Bedeutung für den Druckaufbau sind Kohlendioxid und Methan. Das chemische Milieu wird vor allem durch Wasserstoff, Kohlendioxid und zu einem geringeren Maße durch Schwefelwasserstoff beeinflusst.

Unter der Voraussetzung, dass Art und Mengen reaktiver Stoffe in einem Endlager bekannt sind, lassen sich die zu erwartenden Mengen an Gasen abschätzen. Dabei sind die zu Grunde liegenden chemischen und mikrobiologischen Prozesse weitgehend verstanden. In weitaus geringerem Maße ist die Kinetik dieser Prozesse bekannt, so dass Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Gasbildung und damit über den zeitlichen Verlauf des Druckaufbaus sowie zur zeitlichen Änderung des chemischen Milieus nur mit Einschränkungen möglich sind. Dies betrifft insbesondere die mikrobiellen Prozesse, aber auch in abgeschwächter Form die Korrosion von metallischen Werkstoffen sowie die Radiolyse wässriger Lösungen.

Die Gasbildung kann durch ein unzureichendes Wasserangebot begrenzt sein. Das Wasserangebot wird durch den Wassergehalt der radioaktiven Abfälle und des Versatzes sowie durch die Menge eines möglichen Wasserzutritts aus dem umgebenden Gebirge bestimmt. Sofern kein Wasser für Reaktionen zur Verfügung steht, findet keine Gasbildung durch Korrosion und auch nicht durch mikrobielle Zersetzung statt.

Bei der mikrobiellen Zersetzung hängen Art und Menge der entstehenden Gase auch von der Verfügbarkeit anderer Stoffe wie etwa Nitrat und Sulfat ab. Darüber hinaus ist bereits gebildeter Korrosionswasserstoff in der Lage, die Aktivität von Mikroben zu beeinflussen. Das sich bildende Kohlendioxid kann durch die Bildung von Carbonaten, z. B. Calciumcarbonat, verbraucht werden. Die genannten Prozesse werden im Allgemeinen in den Ansätzen zur Gasbildung berücksichtigt. Die Verfügbarkeit anderer Stoffe ist formationsspezifisch und abfallspezifisch zu diskutieren.

Eine Begrenzung des Wasserangebots ist am ehesten im Salzgestein zu erwarten. Aufgrund des sehr geringen Wassergehalts des Gesteins (Lösungseinschlüsse, Kristallwasser) steht im ungestörten Fall nur eine äußerst geringe Wassermenge aus dem umgebenden Gebirge für entsprechende Reaktionen zur Verfügung. Bei der Endlagerung von HAW enthalten die Abfallgebinde kein Wasser und es kann davon ausgegangen werden, dass auch die Versatzmengen und deren Wassereintrag gering sind. Insoweit begrenzt das Wasserangebot das Ausmaß der Korrosion der Behälter und damit die entstehende Gasmenge.

Bei der Endlagerung von LAW im Salzgestein ist bei den Abfallgebänden von einem geringen Wassergehalt auszugehen, der aber im Hinblick auf die Gasbildung eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung hat. Auch das Wasserangebot des Versatzes trägt zur Gasbildung bei. Insoweit ist hier die Möglichkeit einer Begrenzung des Wasserangebots im Einzelfall und unter Berücksichtigung der einzulagernden Abfallarten und des technischen Einlagerungskonzeptes zu prüfen.

Bei anderen Formationen wie Tonstein und Granit ist im Allgemeinen die Verfügbarkeit ausreichender Wassermengen gegeben oder nicht auszuschließen.

## **5 Gasbildung und chemisches Milieu**

Die entstehenden Gase können das chemische Milieu im Endlager verändern und dadurch die ablaufenden Prozesse wie etwa die Korrosion der Behälter und der Abfallmatrix sowie gegebenenfalls der radioaktiven Abfälle selbst beeinflussen. Auch die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption und Ausfällung ist im Allgemeinen stark vom chemischen Milieu abhängig. Die Veränderungen des chemischen Milieus können die Prozesse sowohl verstärken als auch abschwächen. Der Einfluss von Gasen auf das geochemische Milieu und auf die Freisetzung bzw. Rückhaltung von Radionukliden wird anhand der hierfür wichtigsten Gase näher erläutert.

- Wasserstoff: Im Endlager wird Wasserstoff hauptsächlich durch die Korrosion metallischer Werkstoffe, mikrobielle Prozesse und Radiolyse gebildet. Mit steigendem  $H_2$ -Partialdruck wird das chemische Milieu zunehmend reduzierend. Unter diesen günstigen Redoxbedingungen werden Festphasen der vierwertigen Radionuklide (bspw. Tc, Th, Np, Pu und U) stabilisiert, die relativ niedrige Löslichkeiten aufweisen. Unter stark reduzierenden Bedingungen kann Plutonium in den dreiwertigen Redoxzustand übergeführt werden. Die dreiwertigen Actiniden weisen nur im alkalischen pH-Bereich niedrigere Löslichkeiten als die vierwertigen Actiniden auf, während im sauren pH-Bereich die dreiwertigen im Vergleich zu den vierwertigen Actiniden hohe Löslichkeiten erreichen.

Neben der günstigen Beeinflussung des Redoxpotenzials im Nahfeld der radioaktiven Abfälle, verursacht  $H_2$  im Fall von abgebranntem Kernbrennstoff einen weiteren positiven Effekt. Die oxidative Korrosion der  $UO_2$ -Matrix führt zur Freisetzung des Urans und der in der Matrix enthaltenen Actiniden und Spaltprodukte. Durch die Reaktion von korrosiv oder mikrobiell gebildetem Wasserstoff mit radiolytischen Oxidantien kann die  $UO_2$ -Korrosionsrate bei realistischen  $H_2$ -Partialdrücken im Endlager um mehrere Größenordnungen im Vergleich zur Rate bei oxidierenden Bedingungen verlangsamt werden.

Bei hohen  $H_2$ -Partialdrücken können in den metallischen Behältermaterialien Hydride gebildet werden. Infolgedessen kommt es zu einer Versprödung und damit zu einer geringeren mechanischen Stabilität der Behälter.

- Kohlendioxid und Methan: Durch mikrobiellen Abbau von organischen Abfallkomponenten werden langfristig vor allem  $CO_2$  und  $CH_4$  gebildet. Während Methan sich relativ inert verhält und das chemische Milieu nicht signifikant beeinflusst, reagiert  $CO_2$  mit der wässrigen Lösung und den Festphasen in Umgebung der radioaktiven Abfälle. In ungepufferten Lösungen kann es mit zunehmendem  $CO_2$ -Partialdruck zu einer Versauerung des chemischen Milieus kommen. Durch die pH-Erniedrigung werden die Auflösungsraten der technischen Barrieren erhöht, die Radionuklidlöslichkeiten steigen um mehrere Größenordnungen an, und die Sorption von Radionukliden an Feststoffen wird deutlich verringert bzw. vernachlässigbar. In alkalischen Lösungen wird mit zunehmendem  $CO_2$ -Partialdruck die  $CO_3^{2-}$ -Konzentration erhöht, was zu einer Carbonatkomplexierung und einer damit verbundenen Löslichkeitserhöhung von Actiniden um mehrere Größenordnungen führt. Durch die Carbonatkomplexierung wird außerdem die Sorption der Radionuklide beeinträchtigt. Andererseits bilden einige Radionuklide, wie Radium oder dreiwertiges Americium, bei erhöhter  $CO_3$ -Konzentration carbonathaltige Festphasen, deren Löslichkeit je nach pH unterhalb derjenigen der carbonatfreien Radionuklidfestphase liegt.
- Stickstoff, Schwefelwasserstoff, Sauerstoff und Edelgase: Neben der  $CO_2$ - und  $CH_4$ -Bildung werden durch mikrobielle Denitrifizierung und Sulfatreduktion  $N_2$  und  $H_2S$  bzw. Sulfide gebildet. Ähnlich wie Methan verhält sich Stickstoff chemisch inert. Sulfide sind schwache Komplexbildner, die als reduzierend wirkende Spezies einen günstigen Einfluss auf das chemische Milieu ausüben.

Nach Verschließen eines Endlagers wird der anfänglich in der Grubenluft enthaltene Sauerstoff durch Korrosions- und Degradationsprozesse verbraucht. Für das langfristige chemische Milieu im Nahfeld der radioaktiven Abfälle ist Luft- $O_2$  unbedeutend.

Die gebildeten Edelgase, wie Helium, Krypton und Xenon, sind chemisch inert.

### **Bewertung des Kenntnisstands zum Einfluss der Gasbildung auf das chemische Milieu**

Der Kenntnisstand über die thermodynamischen Grundlagen der Gasbildung und über den Einfluss der Gase auf das chemische Milieu sowie das Radionuklidverhalten ist in der Regel ausreichend und experimentell verifiziert. Die ablaufenden anorganischen Prozesse (Lösungsspeziation, Auflösung, Ausfällung und Sorption) sind konzeptionell verstanden und können radionuklidspezifisch für verschiedene Wirtsformationen quantitativ beschrieben werden. Eine wichtige Ausnahme ist die aquatische Chemie und Thermodynamik von Actiniden, insbesondere von Plutonium, für die das Prozessverständnis und somit auch die Quantifizierung unzureichend sind.

Ähnlich wie bei den anorganischen Prozessen ist die Thermodynamik der biochemischen Prozesse im Allgemeinen hinreichend verstanden, und deren Auswirkungen auf das chemische Milieu lassen sich zumindest qualitativ beschreiben. Die grundsätzlichen Stoffwechselprozesse bzw. mikrobiellen Gasbildungsprozesse sind unabhängig vom Wirtsgestein. Jedoch ist die Abhängigkeit der biochemischen Prozesse von den Umgebungsbedingungen für die Wirtsformationen Kristallin, Salz, Ton und andere Sedimentgesteine unterschiedlich gut quantifiziert. Hinsichtlich der Endlagerung von LAW/MAW mit einer im Vergleich zum HAW heterogenen Zusammensetzung sind für das Wirtsgestein Salz ausreichend detaillierte Kenntnisse darüber gegeben, wie das bei der Zersetzung der radioaktiven Abfälle hauptsächlich entstehende  $\text{CO}_2$  mit dem umgebenden Gestein reagiert.

Für die Bildung von Gasen sowie Reaktionen der Gase mit Festphasen, die unter Endlagerbedingungen kinetisch gesteuert werden, ist der Kenntnisstand zu gering für eine belastbare Quantifizierung. Dies gilt insbesondere für die Kinetik der mikrobiellen Gasbildung in Abhängigkeit von den geochemischen Umgebungsbedingungen. Die real ablaufenden Prozesse wurden in Sicherheitsnachweisen bisher nicht berücksichtigt, sondern über konservative Annahmen abgedeckt.

### **Maßnahmen zur günstigen Beeinflussung des chemischen Milieus**

Als Möglichkeiten zur günstigen Beeinflussung der Folgeprozesse der Gasbildung bieten sich technische Maßnahmen an, die das chemische Milieu bei einem reduzierenden Redoxpotential und neutral bis schwach alkalischen pH-Werten puffern. Unter diesen Bedingungen erreichen die Auflösungsraten der (geo)technischen Barrieren und die Löslichkeiten der Radionuklide minimale Werte sowie die Sorption der Radionuklide an Feststoffoberflächen optimale Werte. Diesbezüglich werden für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in der Wirtsformation Salz Versatzmaßnahmen mit  $\text{MgO}$ - und  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -haltigen Puffermaterialien durchgeführt bzw. geplant. Mehr noch als  $\text{MgO}$  sind die  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -haltigen Materialien dazu geeignet, den  $\text{CO}_2$ -Partialdruck durch Bildung von carbonatischen Festphasen zu begrenzen und den pH im neutral bis schwach alkalischen Bereich zu puffern. Außer Versatzmaßnahmen bietet sich an, die Mengen an mikrobiell-abbaubaren Abfallkomponenten, wie Organika in LAW/MAW oder CSD-C Abfällen, möglichst gering zu halten.

## **6 Druckaufbau und mögliche Auswirkungen auf die Barrierenintegrität**

### **6.1 Übertragbarkeit von Beobachtungen bei unterirdischen Kernexplosionen auf die Auswirkungen von Gasbildung in Endlagern**

Unterirdische Kernexplosionen in Steinsalz sind insbesondere in Russland und Kasachstan, vor allem zur Schaffung von Speicherhöhlräumen für Kohlenwasserstoffe, aber auch in den USA durchgeführt worden. Die Explosionen verursachen erhebliche Druckbelastungen des Salzgesteins und werden deshalb als mögliches technisches Analogon für den Druckaufbau in einem Endlager in dichtem bzw. gering durchlässigem Wirtsgestein durch Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen angesehen. Ob und wieweit die bei Kernexplosionen ablaufenden Vorgänge grundsätzlich mit denjenigen beim Druckaufbau durch Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen vergleichbar sind, wird nachfolgend überprüft. Dafür sind die Kernexplosionen in Salzstrukturen Kasachstans von besonderer Bedeutung, weil sie teilweise durch Untersuchungen zu den Auswirkungen der Explosionen begleitet wurden. Zu den Explosionen in Steinsalz im Testgebiet Asgir liegt umfangreiches, teilweise ausgewertetes Datenmaterial aus solchen Untersuchungen vor. Die Kernexplosionen hatten eine Sprengkraft von bis zu 103.000 Tonnen TNT; dadurch sind Hohlraumvolumina von bis zu 240.000 m<sup>3</sup> entstanden. Das Datenmaterial bildet eine wesentliche Grundlage für die nachfolgenden Ausführungen.

Insgesamt sind in Russland bzw. Kasachstan ab Mitte der 60er Jahre an 115 Standorten Kernexplosionen für technisch-wissenschaftliche und ökonomische Nutzungszwecke in verschiedenen Gesteinsformationen (u. a. Salz, Ton, Tuff, Granit) durchgeführt worden. Viele Hohlräume sind inzwischen geflutet. Informationen über die Dichtigkeit noch bestehender Speicherhöhlräume liegen nicht vor oder sind nicht ausgewertet worden. Nach den vorliegenden Untersuchungen ist es bei Kernexplosionen in nichtsalinaren Formationen offenbar zu Überschreitungen des Frac-Drucks und daraus resultierender Undichtigkeit des Systems gekommen; zum Teil sind tiefe Einsturztrichter an der Erdoberfläche entstanden.

Abgesehen von Explosionen in geringer Tiefe sind bei Kernexplosionen in Salzstrukturen vergleichbare Auswirkungen nicht beobachtet worden. Dies belegt eine gewisse Stabilität des Wirtsgesteins gegenüber den mit Kernexplosionen verbundenen Beanspruchungen. Ein zufriedenstellender Nachweis der Integrität des Systems nach einer Kernexplosion steht allerdings mangels gezielt erhobener bzw. aussagekräftiger Daten und deren Auswertung aus.

Bei den meisten Kernexplosionen in Salzstrukturen sind die Randbedingungen im Hinblick auf Teufe (ca. 600-1.000 m), Mächtigkeit der überlagernden Salzsicht (etwa 300-700 m) und Mächtigkeit des Deckgebirges (ca. 300 m) näherungsweise mit den Randbedingungen der Endlagerung in einem Salzstock zwar vergleichbar, hinsichtlich des Ablaufs und der Auswirkungen zwischen den Vorgängen bei Explosionen und bei Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen in einem Endlager bestehen aber deutliche Unterschiede:

**Tabelle 2: Vergleich wesentlicher Parameter bei Kernexplosionen und Endlagern bezüglich Druckaufbau**

	Kernexplosion	Endlager
Tiefe	160 m – 1500 m	800 m <sup>a)</sup>
Mächtigkeit des Deckgebirges	8 m – 300 m	300 m <sup>a)</sup>
Mächtigkeit der Salzüberdeckung	152 m – 1200 m	500 m <sup>a)</sup>
Dauer des Druckanstiegs	<1 ms	>500 Jahre <sup>b)</sup>
Maximaldruck	~100 TPa	~20 MPa <sup>c)</sup>
Lithostatischer Druck	~15 MPa	~15 MPa
Gasdruck ≥ lithostatischer Druck	wenige Sekunden	>1.000 Jahre
Verformung des Steinsalzes	instantan	langsam
Druckausbreitung	Schockwellen, hohe Geschwindigkeit, hohe Reichweite	langsam
Rissbildung	großräumig, ca. sechsfacher Kavernenradius	kleinräumig, ca. zweifacher Streckenradius
Dauer des Temperaturanstiegs	<1 ms	mehrere Jahre <sup>d)</sup>
Höhe der Maximaltemperatur	~10.000.000° C	200° C <sup>d)</sup>
<sup>a)</sup> Endlager in einem Salzstock <span style="float: right;"><sup>b)</sup> bei ausreichendem Wasserdargebot</span> <sup>c)</sup> Wert orientiert sich an den Modellrechnungen für die WIPP <sup>d)</sup> für HAW		

Theoretische Betrachtungen zeigen, dass bei Kernexplosionen die gesamte Explosionsenergie in einer Zeitspanne unter einer Mikrosekunde freigesetzt wird. Danach geht das Gestein durch die Druckwelle und die resultierende sehr starke Erwärmung in Plasma über. Das Plasma ist für den auf das Gestein einwirkenden Druck und die dadurch verursachte Rissbildung im Gestein entscheidend. Es werden Plasmadrücke von 1.200 MPa erreicht. Die Hohlrumbildung erfolgt innerhalb einiger 100 ms im Wesentlichen durch elasto-plastische Verschiebung des Steinsalzes. Das Plasma wandelt sich danach innerhalb weniger Sekunden infolge rascher Abkühlung in gasförmiges NaCl um, das nur einen erheblich geringeren Druck auf das Gestein ausübt. Signifikante Rissbildung und -ausbreitung finden dann nicht mehr statt.

Es bestehen zwischen Kernexplosionen und Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen in einem Endlager hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung von Druck und Temperatur sowie hinsichtlich der resultierenden Beanspruchung und deren Auswirkungen derart große Unterschiede, dass eine Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Insbesondere sind bei der Gasentwicklung in einem Endlager andere Rissbildungsmechanismen und geringere Rissausbreitungsgeschwindigkeiten zu erwarten.

Auch wenn derzeit nicht alle Details der bei Kernexplosionen und bei der Gasbildung in einem Endlager ablaufenden Prozesse geklärt sind, bestehen wegen der genannten großen Unterschiede (siehe Tabelle 2) erhebliche Zweifel an der Übertragbarkeit der Auswirkungen unterirdischer Kernexplosionen auf die Folgen der Gasentwicklung aus radioaktiven Abfällen in einem Endlager. Empirische Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Gasbildung in Endlagern in Steinsalz könnten aus den Kernexplosionen allenfalls dann gezogen werden, wenn die damit verbundene Druckbeanspruchung deutlich länger gedauert hätte, als nach den derzeitigen Vorstellungen über den zeitlichen Ablauf der Explosionen und auf Grund der beobachteten

Rissbilder um die Explosions Hohlräume anzunehmen ist. Die explizite Behandlung der mit der Gasentwicklung in einem Endlager verbundenen Auswirkungen ist daher unverzichtbar (s. Kap. 7).

Zukünftige Arbeiten zu den Auswirkungen der Gasentwicklung in einem Endlager sollten sich auf die unmittelbar damit verbundenen Fragen konzentrieren: Nach heutiger Einschätzung dürfte es in dichten bzw. gering permeablen Wirtsgesteinskörpern durch gasdruck-induzierte sekundäre Rissbildung eher zur Gebirgsauflockerung und - damit verbunden - zur Reduzierung des Gasdrucks als zur Entstehung von bis an den Rand des Salzgesteinskörpers reichenden wassergängigen Rissen kommen. Inwieweit es auf diese Weise zur Ausbreitung einer zwar gaspermeablen, nicht aber hydraulisch wirksamen Auflockerungszone aus dem Einlagerungsbereich bis an den Rand des Salzgesteinskörpers kommt, ist derzeit Gegenstand von Forschungsarbeiten.

## **6.2 Druckaufbau durch Gasbildung**

Die entstehenden Gase führen je nach verfügbarem Hohlraumvolumen für die Speicherung der Gase zu einem Druckaufbau. Bei einem undurchlässigen Wirtsgestein können die Gasdrücke bei entsprechender Gasbildung den Gebirgsdruck überschreiten. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtsgesteins führen. Eine signifikante Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtsgesteins ist gegebenenfalls durch die Konzeption des Endlagers zu verhindern.

## **6.3 Entweichen der Gase**

Bei einem ausreichend durchlässigen Wirtsgestein können die Gase aus der Wirtsf ormation entweichen. Dies führt im Allgemeinen nur zu geringen und vernachlässigbaren Druckerhöhungen. Die Ausbreitung der Gase in der Formation kann als treibende Kraft für die Ausbreitung kontaminierter Lösungen wirken und ist in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit entsprechend zu berücksichtigen.

Bei Wirtsgesteinen wie Steinsalz ist das Entweichen der Gase in ausreichender Menge nur möglich, wenn sich Wegsamkeiten bilden. Dies gilt auch für Tonsteine mit sehr geringen Durchlässigkeiten. Die Diffusion durch das feste Gestein und auch die Diffusion durch wassergefüllte Poren stellen keinen ausreichenden Transportmechanismus dar. Auch die Zweiphasenströmung reicht oftmals für einen ausreichenden Abtransport der Gase aus dem Wirtsgestein nicht aus. Daher ist bei gering durchlässigen Gesteinen die Bildung zusätzlicher Wegsamkeiten für das Entweichen der Gase erforderlich.

Im Salzgestein bilden sich Wegsamkeiten nach derzeitiger Einschätzung erst nach Überschreiten des Gebirgsdrucks oder genauer der minimalen Hauptspannung im Gebirge. Bei Gasdrücken oberhalb des Gebirgsdrucks könnte die Barrierenintegrität des Wirtsgesteins beeinträchtigt werden. Ein Nachweis für ein mögliches Entweichen der Gase aus der Wirtsf ormation bei Erhalt der Barrierenintegrität liegt derzeit nicht vor und ist Bestandteil von Forschungsarbeiten. Der gasdruckbedingte Verlauf der Mikrorissbildung in Salzgestein ist nicht bekannt. Hier sind noch grundlegende Untersuchungen erforderlich.

Bei einem Anstieg der Gasdrücke über den Gebirgsdruck ist die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Barrieren eines Endlagers zu belegen.

Im Tonstein werden sich bei Gasdrücken oberhalb des hydrostatischen Druckes aber noch unterhalb des Gebirgsdrucks Wegsamkeiten durch Aufweitung der vorhandenen Poren bilden. Dadurch wird die Permeabilität für die Gase erheblich erhöht und ein Abtransport der Gase aus dem Endlagerbereich ermöglicht. Gasdrücke oberhalb des Gebirgsdrucks sind im Tonstein dann nicht zu erwarten. Entsprechende Eigenschaften des Tonsteins sind standortspezifisch zu belegen.

Die sich im Tonstein bildenden Wegsamkeiten sind mikroskopischer Art und beeinträchtigen nicht die Barrierenintegrität. Der Gastransport wirkt daher auch nicht als treibende Kraft für die Ausbreitung kontaminierten Wassers im Wirtsgestein. Der Vorgang wird außerdem als reversibel betrachtet. In diesem Fall würden sich die gebildeten Wegsamkeiten beim Rückgang der Gasdrücke wieder schließen. Für einzelne Formationen bzw. Standorte wie etwa Benken liegen hierzu Kenntnisse insbesondere theoretischer Art vor. Weitergehende experimentelle Arbeiten zur Absicherung der Modellvorstellungen sind noch notwendig. Für andere Standorte sind entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

## **7 Konzeptionelle Ansätze zum Erhalt der Barrierenintegrität beim Druckaufbau**

Um eine Beeinträchtigung der geologischen Barriere zu vermeiden, ist die Gasbildung durch geeignete Maßnahmen soweit möglich und vertretbar zu begrenzen. Hinsichtlich der verbleibenden Gasbildung bestehen für ein Endlagersystem zwei grundlegende Möglichkeiten im konzeptionellen Umgang mit entstehenden Gasen. Diese sind das Entweichen der Gase aus der Wirtsformation sowie die Speicherung im Versatz und in der Wirtsformation.

Zur Bewertung dieser beiden grundlegenden Möglichkeiten werden Endlagerkonzepte mit verschiedenen Abfallarten in verschiedenen Wirtsgesteinen betrachtet. Es werden die Abfallarten LAW sowie HAW in Form von verglastem Abfall oder abgebranntem Brennstoff betrachtet. Als Wirtsgesteine werden die undurchlässigen bzw. gering durchlässigen Gesteine Salzgestein und Tonstein sowie der Fall eines durchlässigen Gesteins wie etwa geklüfteter Granit zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Beratungen sind nachfolgend separat für die jeweiligen Abfallarten und die betrachteten Wirtsgesteine dargestellt.

### **7.1 HAW in Tonstein**

Für HAW in Tonstein besteht die Möglichkeit des Entweichens der Gase, so dass sich die Betrachtungen in erster Linie auf diese Möglichkeit konzentrieren. Als Alternative ist auch die Speicherung der Gase im Porenraum von Versatzmaterial möglich. Das hierfür erforderliche Versatzvolumen ist deutlich größer als das ohnehin erforderliche Versatzvolumen, so dass zusätzlich Gassammelräume aufgefahren werden müssten. Daher wird eine solche Konzeption nicht für erstrebenswert gehalten. Von der NAGRA wird zur Reduzierung der Gasbildung durch Korrosion alternativ die Verwendung von Kupferbehältern angesehen.

Bezüglich der Endlagerung von HAW in Tonstein werden die Verhältnisse am Standort Benken in der Nordschweiz betrachtet [4] [6]. Aus diesen Unterlagen ist zu entnehmen:

- Auf Grund des Wassergehalts des Tonsteins können die Stahlbehälter vollständig korrodieren. Die dabei entstehenden Gase können durch Diffusion nicht in ausreichendem Maße entweichen. Daher

werden andere Transportmechanismen für das Entweichen der Gase betrachtet, die jedoch erst ab einem entsprechenden Gasdruck wirksam werden.

- Ein Zweiphasenfluss setzt ab einem Gasdruck von 11,5 MPa ein, der über dem hydrostatischen Druck von 6,5 MPa liegt. Hierbei wird Wasser aus einzelnen Poren des Tonsteins verdrängt und es bildet sich eine Wegsamkeit für die Gase. Ab einem Gasdruck von 13,0 MPa werden die bereits gasgefüllten Wegsamkeiten zusätzlich aufgeweitet und die Gaspermeabilität steigt beträchtlich an. Bei einem weiteren Anstieg des Gasdrucks über den Gebirgsdruck von 15,0 MPa hinaus kommt es zur Bildung größerer Wegsamkeiten in Form von Rissen und zu einer nochmaligen Erhöhung der Permeabilität.
- Kommt es nur zu einer Aufweitung der gasgefüllten Wegsamkeiten, so wird die Barrierenwirkung des Tonsteins nicht beeinträchtigt. Dieser Vorgang ist bei einem ausreichenden Wasserangebot zur Wiederaufsättigung des Gesteins reversibel.
- Die Bildung von Rissen führt zu einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Tonsteins.

Für die Verhältnisse am Standort Benken geht NAGRA davon aus, dass möglicherweise der Zweiphasenfluss und zumindest derjenige mit Aufweitung der Wegsamkeit für den Abtransport der Gase ausreicht. Somit werden sich Gasdrücke oberhalb des Gebirgsdrucks nicht einstellen. Somit kommt es auch nicht zu einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Tonsteins. Die durch den Gastransport verdrängte Wassermenge ist so gering, dass ein zusätzlicher Mechanismus für einen Radionuklidtransport nicht zu betrachten ist. Die Aufweitung der Wegsamkeiten erfolgt parallel zur Schichtung der Tonformation und damit im Fall Benken nahezu horizontal. Die Aufweitung der Wegsamkeiten ist auf die Bereiche zwischen den Einlagerungsstrecken beschränkt. Im weiteren Verlauf werden bei reduziertem Gasdruck die Gase durch Diffusion und Zweiphasenfluss in vertikaler Richtung aus dem Wirtsgestein entweichen. Bei einer Verringerung des Gasdrucks geht die Aufweitung der Wegsamkeiten wieder zurück.

## **7.2 LAW in Tonstein**

Für LAW in Tonstein besteht ebenfalls die Möglichkeit des Entweichens der Gase, so dass sich auch hier die Betrachtungen in erster Linie auf diese Möglichkeit konzentrieren. Als Alternative ist auch die Speicherung der Gase im Porenraum des Versatzmaterials möglich. Das hierfür erforderliche Versatzvolumen ist auf Grund der Abfallzusammensetzung und der daher zu erwartenden deutlich höheren Gasmenge im Vergleich zu HAW sehr viel größer als das geplante Versatzvolumen, so dass zusätzlich noch mehr Gassammelräume aufgeföhren werden müssten. Daher wird eine solche Konzeption noch weniger als beim HAW für erstrebenswert gehalten.

Bezüglich der Endlagerung von LAW im Tonstein werden ebenfalls die Verhältnisse am Standort Benken in der Nordschweiz betrachtet [4]. Auf Grund des Wassergehalts des Tonsteins ist wiederum nicht von einer Behinderung der Gasbildung durch Korrosion von Metallen und durch Zersetzung organischer Stoffe auszugehen. Die Mechanismen und die Schlussfolgerungen bezüglich des Entweichens der Gase aus dem Wirtsgestein sind mit denen bei der Endlagerung von HAW identisch.

Bevor es zu einem Transport der Gase durch das Wirtsgestein kommt, können bei dem betrachteten Schweizer Einlagerungskonzept Gase in den Einlagerungskammern gespeichert werden. Hierbei wird

kontaminiertes Wasser verdrängt, so dass ein zusätzlicher Mechanismus für den Radionuklidtransport beim Nachweis der Langzeitsicherheit zu betrachten ist. Dies ist bei den Schweizer Analysen erfolgt.

### **7.3 HAW im Salzgestein**

Für HAW im Salzgestein bietet sich auf Grund der geringen entstehenden Gasmengen die Speicherung der Gase an. Daher konzentrieren sich die Betrachtungen in erster Linie auf diese Möglichkeit. Auf die Möglichkeit des Entweichens der Gase wird bei der Diskussion von LAW im Salzgestein eingegangen.

Bei einer ungestörten Entwicklung eines Endlagers für HAW im Salzgestein wird es auf Grund der Konvergenz zu einem vollständigen Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Salzformation kommen. Durch die erhöhten Temperaturen wird der vollständige Einschluss nach einigen Jahrzehnten und spätestens nach wenigen Jahrhunderten erreicht. Bis zu diesem Zeitpunkt können Lösungen aus dem umgebenden Gebirge an die radioaktiven Abfälle gelangen und durch Korrosion der Behälter können Gase entstehen.

Aufgrund der Erfahrungen aus in-situ-Experimenten mit Erhitzern in Bohrlöchern und begleitenden Modellrechnungen ist bei einer ungestörten Entwicklung von einem Lösungszutritt aus dem Gebirge in das Bohrloch von nur etwa 5 kg pro Meter Bohrlochlänge auszugehen. Insoweit ist die Gasbildung durch Korrosion und auch durch Radiolyse durch die verfügbare Lösungsmenge sehr begrenzt. Auch bei einer Streckenlagerung ist von ähnlichen Lösungsmengen auszugehen.

Bei einer Bohrlochlagerung von HAW-Kokillen können die bei der Korrosion entstehenden Gase im Porenraum des Versatzes der darüber liegenden Strecke gespeichert werden. Bei Verwendung eines nicht kompaktierbaren Versatzes wird davon ausgegangen, dass der Porenraum des Versatzes im Wesentlichen dauerhaft erhalten bleibt, so dass der entstehende Gasdruck dauerhaft und deutlich unterhalb des Gebirgsdrucks liegt. Dies ist durch entsprechende Untersuchungen für den Einzelfall zu belegen. Entsprechende Überlegungen lassen sich auch für die Einlagerung von dickwandigen Behältern in Strecken anstellen, wobei hier ggf. der Wassereintrag des Versatzes zu berücksichtigen ist.

Bei Verwendung eines kompaktierbaren Versatzes wird sich der Gasdruck auf Grund der Konvergenz dem Gebirgsdruck annähern. Bei einer dann noch andauernden Gasbildung wird der Gebirgsdruck überschritten und es kommt zur Bildung von aufgelockerten Bereichen im umgebenden Gebirge. Für ein ausreichendes Verständnis dieses Prozesses sind weitere gebirgsmechanische Untersuchungen durchzuführen und im Hinblick auf die Integrität der geologischen Barriere zu bewerten.

Wenn an Abdichtungen (z. B. Damm-, Verschlussbauwerke) Gasdrücke oberhalb des Auslegungsdrucks anstehen, kann es zu einer Beeinträchtigung der Barrierewirkung von Abdichtungen kommen. Das Vermeiden unzulässiger Beanspruchungen für die Abdichtungen und der Erhalt der Barrierewirkung des Wirtsgesteins wären ebenfalls noch durch entsprechende gebirgsmechanische Untersuchungen zu zeigen.

Bei einem Zutritt größerer Mengen an Lösungen aus einem benachbarten Laugeneinschluss wird es zu einer stärkeren Gasbildung kommen. Hierbei ist sowohl die Lösungsmenge zu betrachten, die in ein gesamtes Einlagerungsfeld zutreten kann, als auch die Speicherwirkung des ganzen Einlagerungsfeldes zu berücksichtigen. Eine entsprechende Situation ist unter Berücksichtigung der Endlagerkonfiguration für einen konkreten Standort zu analysieren.

Auf die Möglichkeit des Entweichens der Gase wird bei der Diskussion von LAW im Salzgestein eingegangen.

#### **7.4 LAW im Salzgestein**

Für LAW im Salzgestein wird zunächst die Speicherung der Gase betrachtet. Wegen der größeren Gasmengen ist auch die Möglichkeit des Entweichens aus der Formation in Erwägung zu ziehen.

Beim LAW im Salzgestein ist auf Grund des Wassergehalts der radioaktiven Abfälle und des Versatzmaterials sowie aufgrund der Verfügbarkeit organischer Stoffe von der Bildung größerer Gasmengen als beim HAW auszugehen: In den radioaktiven Abfällen und im Versatzmaterial ist Wasser bereits enthalten; durch die Zersetzung organischer Stoffe kann je nach Verfügbarkeit sonstiger Materialien wie etwa Nitrat oder Sulfat weiteres Wasser gebildet werden. Je nach dem Wasserangebot und den örtlichen Verhältnissen kann es somit zu einer nur geringfügigen oder zu einer vollständigen Umsetzung der gasbildenden Stoffe kommen. Je nach Art der ablaufenden Reaktionen entstehen hierbei unterschiedliche Mengen an Gas. Insoweit ist bei der Endlagerung von LAW im Steinsalz von einer beträchtlichen Unsicherheit bezüglich der Gasbildung auszugehen.

Bezüglich der Option einer Gasspeicherung ist die Abfallzusammensetzung im Ostfeld des ERAM betrachtet worden. Unter der Annahme einer vollständigen Korrosion der Metallteile und Zersetzung der Organika ist von einem achtfachen Versatzvolumen, bezogen auf das Abfallvolumen, zur Speicherung der Gase auszugehen. Bei einer üblichen Einlagerungstechnik ist das Versatzvolumen etwa nur doppelt so groß wie das Abfallvolumen.

Die entstehende Gasmenge wird voraussichtlich durch das Wasserangebot begrenzt, so dass von einem geringeren Versatzvolumen ausgegangen werden kann. Dies ist unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse und der tatsächlichen Abfallzusammensetzung zu ermitteln. Die Verfügbarkeit des Hohlraumvolumens im Versatz ist bei einer solchen Konzeption über ausreichend lange Zeiten zu gewährleisten. Dem Beleg für ein begrenztes Wasserangebot und dem Erhalt des Speichervolumens für die Gase kommt in diesem Fall eine hohe Bedeutung zu.

Ein Entweichen der Gase aus der Wirtsfornation ist auch für Salzgestein vorstellbar. Hierbei würden sich bei Überschreiten des Gebirgsdrucks durch Mikrorissbildung und Auflockerung des Gesteins Wegsamkeiten möglicherweise bis in das Deckgebirge bilden. Über diese Wegsamkeiten würde das Gas entweichen. Bei der Unterstellung eines solchen Mechanismus ist dann nachzuweisen, dass die sich bildenden Wegsamkeiten nicht zu einer Beeinträchtigung der Barrierewirkung der geologischen und technischen Barrieren führen. Nach derzeitiger Einschätzung sind auf Grund geringer Druckaufbauzeiten weit in das Gebirge hinein sich erstreckende und spontan auftretende Makrorisse eher nicht zu erwarten. Vielmehr ist davon auszugehen, dass das unter Druck stehende Gas Mikrorisse im Gesteinsgefüge ausbildet, die im Lauf der Zeit in das Gebirge hinein ausgeweitet werden. Dieser druckgetriebene Gasinfiltrationsprozess endet dann, wenn der Gasdruck nicht mehr ausreicht, neue Wegsamkeiten gegen den an der Infiltrationsfront wirkenden Gebirgsdruck zu schaffen. Ob die so geschaffenen Wegsamkeiten poröse nichtsalinare Gesteine erreichen, ist standortbezogen zu untersuchen. Diese Hypothese ist noch zu belegen. Hierfür sind noch erhebliche F&E-

Arbeiten erforderlich. Vor deren Abschluss kann von einem solchen Mechanismus kein Kredit genommen werden.

## **7.5 Durchlässiges Gestein**

Bei einer Endlagerung von LAW oder HAW in einem durchlässigen Gestein ist auf Grund der mit der Durchlässigkeit verbundenen Verfügbarkeit von Wasser von der vollständigen Umsetzung der gasbildenden Stoffe auszugehen. Auf der anderen Seite können die Gase aber auch leicht entweichen, und es ist nicht von der Bildung hoher Gasdrücke auszugehen. Bei geringen Gasdrücken bleibt die Barrierenwirkung des Wirtsgesteins praktisch unverändert. Der sich aus der Gasbildung ergebende Transport von möglicherweise kontaminiertem Wasser ist jedoch im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

Das Entweichen der Gase wird von dem Gaseindringdruck bestimmt. Überschreitet der Gasdruck den Druck der Flüssigkeit um den Gaseindringdruck, dann beginnt die Ausbreitung der Gase. Für Klüfte und Scherzonen im Granit liegt der Gaseindringdruck unterhalb von 250 kPa und für den Korallenoolith am Standort Konrad wurden Gaseindringdrücke von bis zu 100 kPa betrachtet. Somit wird der Druck in einem Endlager in einer Tiefe von 800 m gegenüber dem hydrostatischen Druck nur um etwa 1 % erhöht. Hierdurch werden der Zustand des Gesteinskörpers und die hydraulische Barrierewirkung des Wirtsgesteins kaum verändert.

Ein durchlässiges Wirtsgestein ist somit hinsichtlich der Einlagerung gasproduzierender radioaktiver Abfälle in besonderem Maße als günstig anzusehen. Dem steht aber entgegen, dass ein durchlässiges Wirtsgestein zugleich die Ausbreitung kontaminierter Wässer begünstigt, wobei der erhöhte Gasdruck als treibende Kraft für den advektiven Transport wirksam ist. Insoweit stehen die günstigen Eigenschaften eines durchlässigen Gesteins hinsichtlich der Gasbildung im Widerspruch zu der geforderten geringen Durchlässigkeit der geologischen Barriere.

## **8 Schlussfolgerungen**

Bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle können durch Korrosion von Metall, bakterielle Zersetzung organischer Abfallinhaltsstoffe und Radiolyse Gase entstehen und zu Veränderungen des chemischen Milieus im Nahfeld um die eingelagerten radioaktiven Abfälle sowie zum Aufbau von für die Integrität des Wirtsgesteins als geologische Barriere problematischen Gasdrücken führen. Diese Auswirkungen müssen gegebenenfalls bei der Auslegung des Endlagers und beim Sicherheitsnachweis berücksichtigt und durch Gegenmaßnahmen vermieden oder gemildert werden.

### **Chemisches Milieu**

Die thermodynamischen Grundlagen der Gasbildung und der Einfluss der Gase auf das chemische Milieu sowie das Radionuklidverhalten sind - mit Ausnahme der aquatischen Chemie und Thermodynamik von Actiniden, insbesondere von Plutonium – sowohl konzeptionell verstanden als auch quantifiziert. Die Auswirkungen auf das chemische Milieu lassen sich daher zumindest qualitativ beschreiben. Ihre

Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen für die verschiedenen Wirtformationen ist hingegen noch unterschiedlich gut quantifiziert.

Zur Bildung von Gasen sowie zu Reaktionen der Gase mit Festphasen, die unter Endlagerbedingungen kinetisch gesteuert werden, ist der Kenntnisstand derzeit zu gering für eine belastbare Quantifizierung. Dies gilt insbesondere für die Kinetik der mikrobiellen Gasbildung in Abhängigkeit von den geochemischen Umgebungsbedingungen.

Der Einfluss von Wasserstoff auf den Quellterm abgebrannter Brennelemente ist derzeit Gegenstand ausführlicher Untersuchungen. Es deutet sich an, dass die Auflösungsrate von abgebrannten LWR Brennstoffen durch  $H_2$ -Partialdrucke von mehreren bar erheblich (um mehrere Größenordnungen) reduziert wird.

Zur günstigen Beeinflussung der Folgeprozesse der Gasbildung werden technische Maßnahmen umgesetzt bzw. vorgesehen, die das chemische Milieu bei einem reduzierenden Redoxpotenzial und neutral bis schwach alkalischen pH-Werten puffern. Die Auflösungsrate der (geo)technischen Barrieren und die Löslichkeiten der Radionuklide werden dadurch erheblich reduziert, die Sorption der Radionuklide an Feststoffoberflächen optimiert. Für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in der Wirtformation Salz werden zur Erreichung dieser Vorteile  $MgO$ - und  $Mg(OH)_2$ -haltige Puffermaterialien eingesetzt bzw. vorgesehen.

Mikrobiell-abbaubare Abfallkomponenten, wie Organika in LAW/MAW oder CSD-C Abfällen, sollten möglichst gering gehalten werden.

Grundsätzlich vermieden werden sollte die gemeinsame Einlagerung von organischen Komponenten und hochaktivem Abfall (insbesondere actinidenhaltigem hochaktiven Abfall).

## **Gasdrücke**

Für die Beurteilung der mit dem Aufbau von Gasdruck durch die Gasbildung aus radioaktiven Abfällen verbundenen Auswirkungen auf die Barrierewirkung des Wirtgesteins sind insbesondere die zeitliche Entwicklung und die Höhe der Gasdrücke sowie ihr Einfluss auf die Wirksamkeit technischer Barrieren und des Wirtgesteins bedeutsam. Das Ausmaß der Gasbildung sowie die Geschwindigkeit des Druckaufbaus werden maßgeblich durch das Wasserdargebot bestimmt. Es wird sowohl von den Eigenschaften der endgelagerten radioaktiven Abfälle als auch vom Wassergehalt des Versatzmaterials und des umgebenden Wirtgesteins sowie von dessen hydraulischen Eigenschaften beeinflusst. Die erwarteten Konsequenzen und etwa gebotene Gegenmaßnahmen sind also sowohl von der Abfallart als auch vom Wirtgesteinstyp (bzw. der Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers) abhängig:

Wirtgesteinstypen mit **deutlicher Wasserdurchlässigkeit**, wie etwa Granit, enthalten zwar das für die Gasbildung erforderliche Wasser, doch ist das Ausmaß des Wasserzutritts an den Abfall vom Vorhandensein und von den hydraulischen Eigenschaften des Versatzmaterials abhängig. Hier bestehen zwischen HAW (voraussichtlich gering durchlässiger Bentonit-Versatz) und MAW/LAW (kein gering durchlässiges Versatzmaterial) deutliche Unterschiede. Unabhängig davon können aber die entstehenden Gase aus dem Endlagerbereich bzw. sogar dem Wirtgesteinskörper entweichen, so dass es - unabhängig von der Abfallart - nicht zu hohen Gasdrücken im Gestein kommt. Durchlässige Gesteine weisen demnach für die Endlagerung

gasproduzierender radioaktiver Abfälle Vorteile auf. Allerdings besteht ein Zielkonflikt mit der Forderung nach guter Barrierewirkung gegenüber dem advektiven Radionuklidtransport mit dem Grundwasser. Daher müssen die technischen Barrieren, insbesondere Behälter, bei der Endlagerung in Gesteinskörpern mit deutlicher Wasserdurchlässigkeit den wesentlichen Beitrag zur Langzeitsicherheit leisten. Der Gasdruck kann zudem den advektiven Stofftransport mit dem Grundwasser beschleunigen und ist in diesem Sinne beim Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

Bei der Endlagerung in **gering durchlässigen bzw. dichten Wirtsgesteinskörpern** ist demgegenüber wegen des hohen Gaseindringdrucks in die Gesteinsmatrix der Aufbau von für die Barrierewirksamkeit des Gesteins problematischen Gasdrücken nicht auszuschließen. Dabei bestehen zwischen verschiedenen Gesteinstypen und den in sie eingelagerten Abfallarten folgende charakteristischen Unterschiede:

Bei **Tonstein** reicht nach den derzeit vorliegenden Sicherheitsbetrachtungen das Wasserdargebot zur vollständigen Korrosion der vorhandenen Metalle bzw. zum vollständigen Abbau der organischen Substanz aus. Bei der Korrosion der HAW-Gebinde leisten Gasdiffusion im Porenwasser und Zweiphasenfluss im Tonstein einen möglicherweise ausreichenden Beitrag zum Abtransport der gebildeten Gase. Das gilt nicht für LAW. Für LAW ist mit einer bedeutend größeren Gasbildungsrate und dem Aufbau eines erhöhten Gasdrucks zu rechnen. Allerdings entstehen bei Gasdrücken unterhalb des Gebirgsdrucks entlang der Schichtung (oder entsprechend wirksamer anderer Schwächezonen) größere Wegsamkeiten, über die Gase abgeführt werden. Sie sind nicht hydraulisch wirksam. Dieser druckreduzierende Vorgang bleibt auf das Endlager beschränkt und ist bei Druckabnahme reversibel. Er führt nach heutiger Einschätzung nicht zur Beeinträchtigung der hydraulischen Barrierewirkung des Tonsteins, zumal das Versatzmaterial in den Einlagerungsstrecken zur Speicherung von Gas zur Verfügung steht.

Bei LAW ist wegen des großen Volumens von Versatzmaterial in den Einlagerungskammern zu beachten, dass die entstehenden Gase kontaminiertes Porenwasser verdrängen. Dieser zusätzliche Transportmechanismus ist bei Sicherheitsbetrachtungen zu berücksichtigen.

**Steinsalz** weist wegen seiner sehr geringen Permeabilität besonders günstige hydraulische Barriereigenschaften auf. Kann die Gasbildung aus den radioaktiven Abfällen nicht ausgeschlossen werden, ist damit allerdings die Gefahr der Entstehung hoher Gasdrücke verbunden. Die Beeinträchtigung der Barrierewirkung des Gesteins ist dann nicht auszuschließen. Nach ersten Ergebnissen modellhafter Betrachtungen und Untersuchungen erscheint es jedoch möglich, dass es - ähnlich wie bei Tonstein - durch Mikrorissbildung und fortschreitende Gesteinsauflockerung mit Hohlraumvergrößerung zwar zum Abbau des Gasdrucks, nicht aber zur Entstehung von in das Deckgebirge reichenden Wasserwegsamkeiten kommt. Diese Frage ist derzeit noch Gegenstand von Forschungsarbeiten.

Nach der Einlagerung von HAW kommt es durch Konvergenz innerhalb von Jahrzehnten bis Jahrhunderten zum vollständigen Einschluss der radioaktiven Abfälle. Dann ist die für Korrosion verfügbare Wassermenge durch den geringen Wassergehalt des Gesteins begrenzt. Gasdrücke, die eine Gefahr für die Funktionstüchtigkeit der geologischen Barriere bedeuten könnten, sind daher auszuschließen, wenn der Zutritt von Lösungen an die radioaktiven Abfälle ausgeschlossen werden kann bzw. für die entstehenden Gase ein ausreichender Speicherraum zur Verfügung gestellt wird. Die Bereitstellung von Speicherraum ist bei den derzeit geplanten Versatzmengen in den Einlagerungsstrecken durchaus möglich.

Bei LAW in Salzgestein ist wegen der höheren Wassergehalte in den radioaktiven Abfällen und der größeren Wassermenge im Versatzmaterial sowie wegen der organischen Abfallbestandteile mit stärkerer Gasproduktion zu rechnen. Wird der Gebirgsdruck durch die resultierenden Gasdrücke überschritten kommt es zur Rissbildung mit Gesteinsauflockerung, die theoretisch bis ins Deckgebirge reichen kann. Aus den Rissen kann zwar das Gas entweichen, sie können aber andererseits potenzielle Zutrittswege für Laugen und somit eine Beeinträchtigung der Barrierefunktion des Salzgesteins darstellen. Daher muss der Entstehung kritischer Gasdrücke durch Bereitstellung von Speicherräumen mit erheblichem Volumen entgegen gewirkt werden. Die Bereitstellung entsprechender dauerhaft offener Hohlräume ist unter dem Gesichtspunkt der Langzeitsicherheit nicht erstrebenswert, der Nachweis der langfristigen Funktionstüchtigkeit der Speicherhohlräume durchaus problematisch.

Aus diesen Zusammenhängen folgt, dass die Entstehung von Gasen im Endlager gerade bei undurchlässigen Gesteinen bzw. solchen mit geringer Wasser- und Gasdurchlässigkeit und damit günstigen Barriereigenschaften gegenüber advektivem Schadstofftransport mit dem Grundwasser zum Aufbau von für die Barrierefunktion des Wirtsgesteins kritischen Drücken führen kann. Betroffen ist insbesondere die Endlagerung von LAW in Steinsalz. Als Gegenmaßnahme kommt nach derzeitigem Erkenntnisstand nur die Bereitstellung von Gasspeicherräumen in Frage. Zur Begrenzung solcher Maßnahmen, die selbst einen erheblichen Eingriff in die geologische Barriere bedeuten, ist die weitgehende Reduzierung des Wassergehalts, der organischen und korrodierbarer metallischer Bestandteile im LAW anzustreben.

## **9 Beantwortung der Fragen des Beratungsauftrags**

Die Auswertung der in der ersten Frage des Beratungsauftrages angesprochenen unterirdischen Kernexplosionen in Russland bzw. Kasachstan führt zu der Aussage, dass die Versuche und ihre Ergebnisse auf die Gasbildung aus radioaktiven Abfällen in einem Endlager nicht übertragbar sind (s. Kap. 6.1). Die in der Frage formulierte mögliche Schlussfolgerung, "dass bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen auch eine erhebliche Überschreitung des lithostatischen bzw. petrostatischen Drucks durch Gasbildung zulässig sein könnte, da die Integrität der Barriere Salz nicht beeinträchtigt wird", ist daher nicht zutreffend. Nach gegenwärtiger Einschätzung führt eine solche Gasbildung in einem Endlager in Salz aber auch nicht zwangsläufig zur Beeinträchtigung der Barrierefunktion des Salzes; denn es erscheint möglich, dass erhöhte Gasdrücke durch Mikrorissbildung und fortschreitende Gesteinsauflockerung abgebaut werden, ohne dass es zur Entstehung von in das Deckgebirge reichenden Wasserwegsamkeiten kommt (s. Kap. 7.4).

Die zweite Frage des Beratungsauftrags ist auf Maßnahmen gerichtet, durch die etwaige negative Auswirkungen der Gasbildung in Salz (Aufbau hoher Gasdrücke bzw. Veränderung des chemischen Milieus) beherrscht werden können. Explizit wird Bezug genommen auf einen Bericht der Firma STOLLER zur Einschätzung der Gasentwicklung in Salzformationen [2] sowie auf die Einbringung von Magnesiumversatz wie im Fall der WIPP. Im Bericht der Firma STOLLER werden Möglichkeiten sowohl zur Reduzierung des Gasbildungspotenzials als auch für den gezielten Abbau von hohen Gasdrücken genannt. Davon tragen die vorgeschlagene Begrenzung der Metallmenge und die Begrenzung biologisch abbaubarer Abfälle bzw. Abfallinhaltsstoffe zweifellos zur Reduzierung der bildbaren Gasmenge und Gasdrücke bei. Von den für den gezielten Abbau von Überdruck vorgeschlagenen Maßnahmen kommt nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand insbesondere die Speicherung von Gas in genügend großen Gasspeicherräumen in Frage.

Die Einbringung von MgO-haltigem (WIPP) oder Mg(OH)<sub>2</sub>-haltigem Puffermaterial führt zur Stabilisierung des chemischen Milieus bei neutral bis schwach alkalischen pH-Werten. Die Auflösungsraten der (geo)technischen Barrieren und die Löslichkeiten der Radionuklide werden dadurch erheblich reduziert, die Sorption der Radionuklide an Feststoffoberflächen optimiert (s. Kap. 5).

Die abschließende Frage des Beratungsauftrags nach der Notwendigkeit weitergehender grundlegender Untersuchungen bezüglich der Gasbildung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen ist wie folgt zu beantworten:

- Die in der Antwort auf die erste Frage angesprochenen Modellvorstellungen zum Abbau hoher Gasdrücke in Salz durch Entstehung von Mikrorissen und fortschreitende Gesteinsauflockerung haben für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salz erhebliche Bedeutung; denn die zur Verringerung hoher Gasdrücke alternativ durchzuführenden Maßnahmen sind mit gravierenden Eingriffen in die geologische Barriere verbunden. Die Modellvorstellungen bedürfen daher dringend der experimentellen und modellmäßigen Absicherung, um belastbare Aussagen über Ablauf und Ausmaß dieser druckreduzierenden Mechanismen treffen zu können. Dies gilt in ähnlicher, wenngleich weniger dringlicher Weise auch für Tonstein.
- Im Hinblick auf die chemischen Auswirkungen der Gasbildung (s. Kap. 5) besteht Bedarf nach weitergehenden grundlegenden Untersuchungen im Bereich der aquatischen Chemie und Thermodynamik der Actiniden, insbesondere von Plutonium, um das noch unzureichende Verständnis und die Quantifizierung der Prozesse zu verbessern. Diese Aspekte haben wegen der Bedeutung der Actiniden im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen zudem über die Frage der Gasentwicklung hinausgehende Bedeutung.

Ebenfalls unzureichend ist der Kenntnisstand im Hinblick auf die Quantifizierung der Gasbildung sowie der Reaktionen der Gase mit Festphasen, die unter Endlagerbedingungen kinetisch gesteuert werden. Dies gilt insbesondere für die Kinetik der mikrobiellen Gasbildung in Abhängigkeit von den geochemischen Umgebungsbedingungen (s. Kap. 5). Die real ablaufenden Prozesse wurden in Sicherheitsnachweisen daher bislang quantitativ nicht berücksichtigt, können aber durch konservative Annahmen abgedeckt werden. Hier besteht daher nicht die Notwendigkeit weitergehender grundlegender Untersuchungen, sondern der Bedarf an quantitativer Absicherung generell verstandener Prozesse.

## 10 Zitierte Schriften

- [1] BMU-Beratungsauftrag RS III 2 – 17015/8, vom 27.04.2004,  
betr.: Auswirkungen der Gasbildung auf die Langzeitsicherheit bei der  
Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen
  
- [2] Ingenieurtechnik GmbH Dresden, Abschlussbericht  
„Einschätzung der Gasentwicklung und deren Auswirkung auf die Endlagerung  
mittel- und hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen“, Dresden, 30.06.2000
  
- [3] Kopien der von Herrn Dr. B. Kienzler gezeigten Folien
  
- [4] Rübel, A.; Noseck, U.; Müller-Lyda, I.; Kröhn, K.-P.; Storck, R. (2004)  
Konzeptioneller Umgang mit Gasen  
GRS-205, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbh,  
Braunschweig. ISBN : 3-931995-72-0
  
- [5] BGR: Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger  
Barrieregesteine (Autor: Dr. O. Schulze)  
Hannover, November 2002
  
- [6] Kopien der von Herrn Dr. P. Zuidema gezeigten Folien
  
- [7] GRS-Bericht „Zur Behandlung der Gas-Problematik im  
Genehmigungsverfahren für WIPP“ vom August 2000
  
- [8] GRS-Bericht „Zur Problematik der unterirdischen Kernexplosionen im  
Steinsalz in Kasachstan“ vom 18.06.2004
  
- [9] GRS-Bericht (GRS-155) „Zusammenstellung und Auswertung geochemischer  
Untersuchungen zum  
Radionuklidverhalten aus ausgewählten Studien über Natürliche Analoga“ vom  
August 2000
  
- [10] Bericht der Fa. Stoller „Auswertung von russischen Experimenten zum  
Nachweis der Stabilität von Salzdomen nach der Freisetzung externer  
Energienmengen im Steinsalzmassiv“, Abschlussbericht

vom Dezember 1997

- [11] GRS-Vortragsfolien „Rückschlüsse aus unterirdischen Kernwaffenversuchen auf Auswirkungen von Gasbildung in Endlagern“, Beitrag Klaus-Peter Kröhn, GRS Braunschweig
- [12] Vortragsfolien der Fa. Stoller „Aspekte der Barrierestabilität bei Kernexplosionen im Steinsalz“ vom 23.06.2004
- [13] Volker Metz/FZK-INE  
Einfluss von CO<sub>2</sub> (g) auf das geochemische Milieu und die Radionuklidfreisetzung/- rückhaltung sowie Versatzmaßnahmen zur günstigen Beeinflussung des geochemischen Milieus in WIPP und FB Asse (Tischvorlage)
- [14] Kastriot Spahiu / SKB, Schweden  
The influence of near field hydrogen on spent fuel dissolution (Tischvorlage)
- [15] Daniel Suter / Science Solutions, Schweiz  
Gasbildung im LAW/MAW-Endlager am Beispiel ERAM (Tischvorlage)