

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-MAT 55

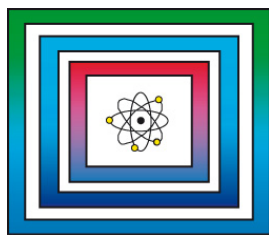


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Beratung der Endlagerkommission

9S2014010000

Antworten der Bundesanstalt
für Geowissenschaften
und Rohstoffe zum
Pflichtenheft „Literaturstudie
Wärmeentwicklung-
Gesteinsverträglichkeit“



Hannover, März 2016

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Beratung der Endlagerkommission

Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum
Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“

Autoren:

Dr. Volkmar Bräuer,
Dr. Reiner Dohrmann,
Gerhard Enste,
Dr. Sandra Fahland,
Dr. Werner Gräsle,
Dr. Jörg Hammer,
Dr. Jan-Martin Hertzsch,
Dr. Jürgen Hesser,
Prof. Dr. Stefan Heusermann,
Dr. Stephan Kaufhold,
Bettina Landsmann,
Dr. Jobst Maßmann,
Michael Mertineit,
Sabine Mrugalla,
Annika Schäfers,
Dr. Michael Schramm,
Dr. Kristof Schuster,
Jürgen Sönke,
Dr. Susanne Stadler,
Dr. Dieter Stührenberg,
Dr. Jan Richard Weber,
Axel Weitkamp

Auftragsnummer:
Geschäftszeichen:
Datum:

9S2014010000
B3/B50100-10/2014-0003/009
31.03.2016

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	3
1 Antworten zu „Einzelfrage“ (1) „Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes“	4
2 Antworten zu „Einzelfrage“ (2) „Aufzeichnung von Wissenslücken in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit der Wirtsgesteine und Benennung offener Fragen zur Schließung sicherheitsrelevanter Wissenslücken“	44
3 Literaturverzeichnis	52

Anlage 1: Pflichtenheft Literaturstudie „Wärmeentwicklung- Gesteinsverträglichkeit“

Vorbemerkung

Der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurde die Aufgabe übertragen, Fragen zur Temperaturverträglichkeit der für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe in Frage kommenden Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallin zu beantworten. Diese Fragen sind in einem vom Niedersächsischen Umweltministerium angefertigten Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“ zusammengestellt (Anlage 1).

Das Pflichtenheft umfasst zwei Fragenkomplexe, die als „Einzelfragen“ (1) und (2) bezeichnet und formuliert sind:

(1) Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes in Bezug auf die „Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit“ der Wirtsgesteine Salz, Ton, und Kristallin und der in diesem Zusammenhang in Rede stehenden geotechnischen Barrieren anhand einer umfänglichen Literaturstudie,

(2) Aufzeigen von Wissenslücken in Bezug auf thermisch induzierte Prozesse in den jeweiligen Wirtsgesteinen/geotechnischen Barrieren und Nennung des Forschungsbedarfes zur Schließung der Wissenslücken.

Jede „Einzelfrage“ umfasst verschiedene Detailfragen, die ggf. aus mehreren Teilfragen bestehen. Zur besseren Übersicht und Strukturierung sind die Fragen und Antworten im Folgenden nummeriert: Antworten zur „Einzelfrage“ (1) von 1.1 bis 1.10, Antworten zur „Einzelfrage“ (2) von 2.1 bis 2.2. Falls erforderlich, wurde die Nummerierung noch weiter aufgeschlüsselt, z. B. für die Fragen bzw. Antworten 1.6.1 bis 1.6.6. Eine detaillierte Liste mit wesentlichen Literaturquellen zu den Antworten wird im Kapitel 3 aufgeführt.

Ursprünglich war die vorliegende Ausarbeitung als Präsentation im Rahmen einer Anhörung vor der Arbeitsgruppe 3 der Endlagerkommission geplant. Daher sind die Präsentationsfolien in den folgenden Kapiteln dargestellt und zusätzlich mit einem Erläuterungstext versehen. Zudem wurde zum besseren Verständnis des Sachverhalts die ursprüngliche Präsentation in der vorliegenden Unterlage um einige Folien ergänzt.

1 Antworten zu „Einzelfrage“ (1) „Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes“**1.1 „Wie ist der heutige Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Ton/Tonstein, Salz, Kristallin und geotechnischen Barrieren?“****Antwort 1.1:**

Steinsalz & Salzgrus:	Gut - sehr gut
Tonstein & Bentonit:	Mäßig - gut
Kristallin & Bentonit:	Mäßig - gut

Der Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Salz, Tonstein, Kristallin und geotechnischen Barrieren wie Salzgrus und Bentonit wird folgendermaßen eingeschätzt:

- Salz (aus Salzstöcken) & Salzgrus: Überwiegend sehr guter Kenntnisstand,
- Salz (aus flacher Lagerung): Mäßiger bis guter Kenntnisstand,
- Tonstein: Mäßiger bis guter Kenntnisstand,
- Kristallin: Mäßiger bis guter Kenntnisstand,
- Bentonit: Mäßiger bis guter Kenntnisstand.

Im Detail wird der Stand der Wissenschaft in der Antwort zu Frage 2.1 dargelegt.

1.2 „Welche Parameter und (wärmeinduzierten) Prozesse sind relevant für die Festlegung einer maximalen Grenztemperatur in den jeweiligen Wirtsgesteinen und geotechnischen Barrieren?“

Antwort 1.2

- **Wirksamkeit einer Barriere**
 - **Permeabilität**
 - Zugspannungen makroskopisch und mikroskopisch
 - Fluidsprengung / Sieden
 - Porendruckerhöhung im verschlossenen Endlager
 - **Desintegration Bentonit durch Sieden nach Einbau**
 - Mineralumwandlungen
 - Quellfähigkeit Bentonit
 - **Kristallwasserabgabe Carnallit, Polyhalit und weitere Akzessorien**
 - Thermochemische Sulfatreduktion
 - Degradation von Verschlussmaterialien
 - **Sorptionsfähigkeit**
 - Mineralumwandlungen Bentonit
 - **Stabilität Glasmatrix**
- **Antrieb für einen Radionuklidaustrag**
 - Erhöhung Fluiddruck
- **Begünstigung des Austragsprozesses**
 - Viskosität
 - Löslichkeit
- **Betriebssicherheit / Arbeitssicherheit**
 - Temperaturbelastung bei Rückholung aus aufgeheizten Grubenbereichen
- **Regulatorische Vorgaben**
 - Temperaturerhöhung in wasserführendem Deckgebirge
 - Senkungen und Hebungen der Geländeoberfläche

Hinweis: Sicherheitsrelevante Prozesse sind rot markiert

Ein Endlager soll die eingelagerten Radionuklide dauerhaft von der Biosphäre abschirmen. Alle Umstände und Prozesse, die dazu führen können, dass der Abschluss der Radionuklide von der Biosphäre gefährdet wird, sind zu vermeiden. Daraus lässt sich für alle Zustandsgrößen, also auch für die Temperatur, die generelle Aussage ableiten, dass als ungünstig solche Zustandsgrößen, hier also Temperaturen, zu gelten haben, die dem sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ewG entgegenwirken. Dem sicheren Einschluss der Radionuklide im ewG wirken alle diejenigen Umstände und Prozesse entgegen, die (1) die Wirksamkeit einer Barriere vermindern, die (2) einen Antrieb für einen Radionuklidaustrag aus dem ewG vergrößern oder die (3) den Austrag durch Begünstigung des Austragsprozesses vergrößern. Neben diesen Umständen und Prozessen mit Bezug zum Einschluss der Radionuklide sind (4) Aspekte der Betriebssicherheit sowie (5) regulatorische Vorgaben als potenzielle Randbedingungen für die Festlegung von Grenztemperaturen zu beachten.

A1. Wirksamkeit einer Barriere

Die Barrierewirkung unterschiedlicher Barrieren in einem Endlager kann auf unterschiedlichen Eigenschaften beruhen. Zur Begrenzung hydraulischer Flüsse muss das Gebirge im ewG eine geringe Permeabilität aufweisen. Vorteilhaft für die Rückhaltung von Radionukliden ist außerdem ein hohes Sorptionsvermögen des Gesteins. Technische Barrieren wie Salzgrus oder Bentonit sollen ebenfalls eine geringe Permeabilität aufweisen, Bentonit außerdem ein großes Sorptionsvermögen.

A1.1. Permeabilität

Die Permeabilität ist ein Maß für die Durchlässigkeit eines Gesteins für strömende Fluide, also Flüssigkeiten und Gase. Eine geringe Permeabilität bedeutet eine geringe Durchlässigkeit und damit eine hohe Barrierewirkung.

A1.1.1. Zugspannungen

Permeabilitäts erhöhungen können auftreten, wenn bestehende Wegsamkeiten in einem Barrieregestein oder im Material einer technischen Barriere infolge thermischer Volumenänderungen aufgeweitet werden, oder wenn bei behinderter Volumenänderung Zugspannungen entstehen, die bei lokaler Festigkeitsüberschreitung neue vernetzte Wegsamkeiten bilden. Im Nahbereich um ein wärmeentwickelndes Einlagerungsgebäude kommt es infolge der Erwärmung zu einer Ausdehnung des Gebirges bzw. zu einem Anstieg der Druckspannungen und daher nicht zu einer Aufweitung oder Neubildung von Wegsamkeiten. Ob in weiter entfernten Gebirgsbereichen Zugspannungen auftreten können, hängt von der jeweiligen Konfiguration ab (→ Frage 1.6.1). Aus diesem Effekt kann daher keine wirtsgesteinsspezifische Grenztemperatur abgeleitet werden.

A1.1.2. Mikroskopische Spannungen

Neben makroskopischen Spannungen können in kristallinen Gesteinen mikroskopische Spannungen am Kontakt von Körnern aus Mineralen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auftreten. Solche Spannungen führen in kristallinen Gesteinen nicht zu Rissbildungen (→ Frage 1.6.1).

A1.1.3. Sieden

Im Porenraum eines Barrieregesteins vorhandenes bzw. dorthin vordringendes Wasser würde bei Erreichen der Siedetemperatur verdampfen und durch die damit verbundene Expansion den Porendruck erhöhen. Mit dieser Druckerhöhung geht auch eine Erhöhung der Siedetemperatur einher, und der Verdampfungsprozess kommt zum Erliegen, wenn der mit der vorliegenden Temperatur korrespondierende Dampfdruck erreicht ist. Eine Erhöhung der Permeabilität aufgrund

dieses Prozesses kann nicht stattfinden, wenn Wasser erst dann in den Porenraum vordringt, wenn Endlagergebilde und technische Barrieren nach Verschluss des Endlagers im Wirtsgestein eingespannt und dem Überlagerungsdruck ausgesetzt sind, weil die möglichen Dampfdrücke in relevanten Temperaturbereichen nur einen Bruchteil des Überlagerungsdruckes betragen, z.B. 1,5 MPa Dampfdruck bei 200 °C gegenüber 18 MPa Überlagerungsdruck in 800 m Teufe (→ Frage 1.6.5).

Anders ist die Auswirkung einer Erwärmung bis zur Siedetemperatur zu beurteilen, wenn Baustoffe bereits in feuchtem Zustand eingebracht werden oder Feuchtigkeit vor der Beaufschlagung des Baustoffs mit dem Gebirgsdruck in den Baustoff eindringen kann und im Porenraum vorhandenes Wasser vor der Einspannung im Gebirge siedet. In diesem Fall kann eine Desintegration des Baustoffs auftreten. Für einige Endlagerkonzepte mit Bentonitbuffern wurde daher eine Grenztemperatur unterhalb der Siedetemperatur festgelegt (→ Frage 1.3).

A1.1.4. Mineralumwandlungen

Mineralumwandlungen können Auswirkungen auf die Permeabilität haben, wenn für die Erreichung einer bestimmten hydraulischen Dichtigkeit das Quellen von Baustoffen notwendig ist und das Quellvermögen des Baustoffs nach thermisch bedingten Mineralumwandlungen eingeschränkt ist. Eine solche Auswirkung könnte beispielsweise eine durch höhere Temperaturen begünstigte Illitisierung von Smektit haben (→ Frage 1.5.2). Da das Ausmaß solcher Mineralumwandlungen einen stetigen Zusammenhang mit der Temperatur aufweist und nicht etwa erst bei einer bestimmten Grenztemperatur beginnt, kann daraus keine Grenztemperatur abgeleitet werden. Die in diesem Zusammenhang mitunter herangezogene Paläotemperatur stellt ebenfalls keine Grenztemperatur im Sinne der Fragestellung dar.

Mineralumwandlungen können außerdem Auswirkungen auf die Permeabilität haben, wenn dadurch das Feststoffvolumen verringert wird und sich dementsprechend der für Fluidbewegungen verfügbare Raum vergrößert. Das könnte bei einer Erwärmung von gemahlenem Carnallit über 80 °C unter atmosphärischen Bedingungen geschehen, da dieses Mineral dann Kristallwasser abgibt. Da in den bisher betrachteten Endlagerkonzepten im Salz die Einlagerungsgrubenbaue jedoch so positioniert werden, dass dem Carnallit keine Barrierewirkung zukommt, und außerdem die Temperatur in einem außerhalb des ewG vorhandenen Carnallitvorkommen durch das Endlagerdesign gesteuert werden kann, ist dieser Prozess für die Festlegung einer Grenztemperatur für das Wirtsgestein Salz nicht relevant. Ob die bei 230 °C einsetzende Kristallwasserabgabe von Polyhalit für die Ableitung einer Grenztemperatur relevant ist, hängt von den standortspezifischen Gegebenheiten ab, insbesondere dem Anteil und der Verteilung von Polyhalit im Wirtsgestein, gleiches gilt für eine temperaturbedingte Wasserabgabe anderer Akzessorien (→ Frage 1.5.1).

Auch eine Volumenzunahme in einem Gestein infolge einer Mineralumwandlung kann zu einer Permeabilitätssteigerung führen, wenn dadurch in einem benachbarten Gesteinsbereich Zugspannungen auftreten. Bei Vorkommen von Kohlenwasserstoffen im Wirtsgestein Salz könnte im Anhydrit eine Volumenzunahme auftreten. Der Effekt wurde im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) untersucht, er hat keine Auswirkung auf die Integrität des Wirtsgesteins (→ Frage 1.6.6).

A1.1.5. Thermische Degradation von Schacht- und Streckenverschlüssen

Die thermische Belastung von Schacht- und Streckenverschlüssen kann durch das Endlagerdesign gesteuert werden und kann daher keine wirtsgesteinsspezifische Grenztemperatur begründen.

A1.2. Sorptionsfähigkeit

In den Sicherheitskonzepten für Endlager in den Wirtsgesteinstypen Ton und Kristallin spielt das Sorptionsvermögen des eingebrachten Bentonits eine Rolle. Daher muss in diesen Konzepten sichergestellt werden, dass die notwendige Sorptionsfähigkeit nicht durch thermisch bedingte Mineralumwandlungen beeinträchtigt wird (→ Frage 1.5.2). Wie bereits oben beschrieben, kann aus dem Einfluss der Temperatur auf Mineralumwandlungen keine Grenztemperatur abgeleitet werden.

In den Konzepten für das Wirtsgestein Salz spielt Sorption keine Rolle.

A1.3. Stabilität der Glasmatrix

Die Transformationstemperatur der für die Herstellung von Glaskokillen verwendeten Gläser (500 bis 600 °C) soll entsprechend einer Empfehlung des Arbeitskreises HAW-Produkte (KIENZLER & LOIDA 2001) nicht überschritten werden. Abhängig von der Wärmeleistung der Kokillen und der Wärmeleitfähigkeit und –Kapazität des Wirtsgesteins sowie der übrigen beteiligten Materialien lässt sich aus der Transformationstemperatur eine maximale Temperatur an der Behälteroberfläche berechnen.

A2. Antrieb für einen Radionuklidaustrag

Als Antrieb für einen Radionuklidaustrag aus dem ewG kommen der zwischen Einlagerungsbereich und dem Bereich außerhalb des ewG wirksame Druckgradient für advektiven Radionuklidtransport sowie das Konzentrationsgefälle für diffusiven Transport infrage. Da das Konzentrationsgefälle bei Erreichung des angestrebten Einschlusses notwendigerweise maximal ist, kann eine Verringerung des Konzentrationsgradienten nicht zielführend sein, sodass nur der Druckgradient zu betrachten ist. Der Druckgradient kann unter Umständen durch den Wärmeeintrag vergrößert werden, nämlich dann, wenn der Fluiddruck, bei dem es zur Fluidmigration in das Wirtsgestein und dadurch

Begrenzung des maximalen Fluiddrucks auf diesen Wert kommt, ohne Temperaturanstieg nicht erreicht würde. Bei der wärmebedingten Druckerhöhung handelt es sich allerdings um eine Abhängigkeit ohne Unstetigkeiten, sodass daraus keine Grenztemperaturen abgeleitet werden können.

A3. Begünstigung des Austragungsprozesses

Der advective Transport von Stoffen wird durch eine niedrigere Viskosität begünstigt. Eine Temperaturerhöhung ist i.d.R. mit einer Erniedrigung der Viskosität verbunden. Da dieser Zusammenhang stetig verläuft, kann daraus keine Grenztemperatur abgeleitet werden.

In diesem Sinne bestehen auch für die Löslichkeit von Radionukliden in wässrigen Lösungen keine Grenztemperaturen.

A4. Betriebssicherheit

Bei einer notwendigen Rückholung aus einem aufgeheizten Endlagerbereich gemäß Nr. 8.6 der BMU-Sicherheitsanforderungen müssen durch Kühlung geeignete Arbeitsbedingungen gewährleistet werden. Eine maximal zulässige Gebirgstemperatur ist nicht vorgeschrieben.

A5. Regulatorische Vorgaben

Die Erhöhung der Temperatur am Salzspiegel und die maximale Schiefstellung von Gebäuden nach Hebung infolge der thermischen Volumenexpansion des Gebirges im Einlagerungsbereich können durch das Endlagerdesign gesteuert werden, sodass daraus keine Grenztemperaturen abgeleitet werden können.

Schlussfolgerung

Grenztemperaturen können nur aus solchen Umständen und Prozessen abgeleitet werden, die ausschließlich in bestimmten Temperaturbereichen stattfinden können. Aus Umständen und Prozessen, die einen stetigen Zusammenhang mit der Temperatur aufweisen, können keine Grenztemperaturen abgeleitet werden. Relevant für die Ableitung von Grenztemperaturen können in

bestimmten Endlagerkonzepten und in Abhängigkeit von den standortspezifischen Gegebenheiten das Sieden von Wasser in unkonsolidiertem bzw. klüftigem Bentonit sowie die Kristallwasserfreisetzung aus Salzmineralen sein. Außerdem kann die Stabilität der Abfallmatrix eine Grenztemperatur bedingen, bei Glaskokillen ist das hinsichtlich der Glastransformationstemperatur der Fall.

Andere Einflüsse der Temperatur auf potenziell sicherheitsrelevante Umstände und Prozesse können nicht durch die Festlegung von Grenztemperaturen adäquat berücksichtigt werden, sondern müssen im Wege der Optimierung bewertet und eingerechnet werden, beispielsweise indem der Nachteil einer geringeren Sorptionsfähigkeit infolge erhöhter Temperatur gegen den Vorteil eines geringeren Flächenbedarfs des Endlagers bei verringertem Gebindeabstand oder ein erhöhter Rückholungsaufwand bei höherer Temperatur gegen den schnelleren Einschluss der Abfälle infolge eines temperaturbedingt erhöhten Salzkriechens abgewogen wird.

1.3 „Welche Einlagerungstemperaturen werden für welche Wirtsgesteine/technische Barrieren in nationalen und internationalen Fachkreisen benannt und für welchen Bereich des Endlagers werden diese maximalen Temperaturen festgelegt (z.B. Abfallbehälteraußenseite, Übergang Verfüllung/Wirtsgestein, innerhalb des ewG, innerhalb der geotechnischen Barriere)?“

Antwort 1.3

Zulässige Temperaturen

Zul. Temp. (°C)		Behälter (außen)	Geotechnische Barriere	Gebirge
Steinsalz & Salzgrus	D	200	200	200
	USA	200	(k. A.)	200
Tonstein & Bentonit	CH	150	100	(k. A.)
	F	90	(k. A.)	(k. A.)
Kristallin & Bentonit	S	100	100	(k. A.)
	SF	100	100	(k. A.)

k. A. = keine Angabe

Steinsalz & Salzgrus

Nach den Endlagerkonzepten Deutschlands und der USA sind Temperaturen bis 200 °C an der Behälteraußenseite, in der geotechnischen Barriere (Salzgrus) und im Steinsalz zulässig.

Tonstein & Bentonit

Das Schweizer Endlagerkonzept sieht für die Behälteraußenseite eine maximale Temperatur von 150 °C vor. Die Temperatur in der geotechnischen Barriere soll bei einem Volumenanteil von mindestens 50% Bentonit eine Temperatur von 100 °C nicht übersteigen. In Frankreich sind Temperaturen bis 90 °C an der Behälteraußenseite zulässig.

Kristallin & Bentonit

Sowohl in Schweden wie auch in Finnland ist die zulässige Temperatur an der Behälteraußenseite auf maximal 100 °C begrenzt. Die zulässige Temperatur im Bentonit als geotechnische Barriere beträgt ebenfalls maximal 100 °C. Über einen zusätzlichen Pufferbereich von 10 °C, der die zulässige Temperatur auf 90 °C reduzieren würde, wird noch diskutiert.

1.4 „Welche national und international relevanten In-situ- und Laborversuche sind bekannt, die Ergebnisse zur Temperaturverträglichkeit von Wirtsgesteinen und geotechnischen Barrieren im Kontext der Festlegung einer Grenztemperatur liefern?“

Antwort 1.4

Salz

- Zahlreiche Labor- und In-situ-Versuche
- Steinsalz aus Salzstöcken (sehr geringer Wassergehalt) ist noch bei 400 °C stabil
- Desintegration von Steinsalz der flachen Lagerung ab etwa 250 °C
- Kristallwasserfreisetzung bei Polyhalit ab 230 °C, bei Carnallit ab 80 °C

Salzgrus

- Keine Versuche zur Temperaturverträglichkeit, Grenztemperatur s. Steinsalz
- zahlreiche Versuche zum Einfluss der Temperatur auf Materialkennwerte

Tonstein & Kristallin

- Keine Versuche zur Temperaturverträglichkeit
- zahlreiche Versuche zum Einfluss der Temperatur auf Materialkennwerte

Bentonit

- Grenztemperatur (Schweiz): Max. 50% des Bentonitvolumens oberhalb 100 °C

Salz

Die Mehrzahl der Laboruntersuchungen an Prüfkörpern des Wirtsgesteins Salz diente der Bestimmung des temperaturabhängigen Materialverhaltens. Eine Ermittlung von Grenztemperaturen erfolgte meist nicht. Einige Untersuchungen zu Grenztemperaturen beschäftigten sich mit einzelnen Salinar-Gesteinstypen. Nach KERN & FRANKE (1986) setzt Carnallit bei Atmosphärendruck ab 80 °C Kristallwasser frei. Der Schmelzpunkt von Carnallit wird von KERN & FRANKE (1986) mit 167,5 °C angegeben.

THIENEL (2012) gibt an, dass Anhydrit bis weit oberhalb der Grenztemperatur des Carnallits stabil ist. Steinsalz aus geschichteter Lagerung – ggf. mit einem Wassergehalt von einigen Prozent – zeigte nach BRADSHAW & MCCLAIN (1971) ab Temperaturen von etwa 250 °C z. T. eine an die

Bildung von Mikrorissen gebundene Desintegration („Dekrepitation“), die wahrscheinlich durch den Druckanstieg intrakristalliner Wasser- und Dampf einschlüsse hervorgerufen wurde.

Steinsalz aus Salzstöcken – mit einem sehr geringen Wassergehalt – war dagegen noch bei 400 °C stabil. Ähnliche Untersuchungen von MELLEGARD et al. (2013) zeigten für Steinsalz aus geschichteter Lagerung dagegen erst ab Temperaturen von 280 °C Dekrepitation, während Steinsalz aus Salzstöcken bei 300 °C stabil war.

Die Mehrzahl der In-situ-Experimente kann für die Bestimmung temperaturabhängiger Materialeigenschaften einschließlich der Ermittlung spezifischer Kennwerte herangezogen werden. Nur wenige Untersuchungen sind für die Ableitung einer Grenztemperatur im Sinne einer Verträglichkeit geeignet:

- Temperaturversuch 4 im Salzbergwerk Asse
- Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse
- Thermomechanischer Versuch 4 (TMV 4) im Salzbergwerk Asse
- Thermomechanischer Versuch 5 (TMV 5) im Salzbergwerk Asse
- Pre Salt Vault Experiment in der Hutchinson Carey Salt Mine (Kansas, USA)
- Brine Migration Tests in Avery Island (Louisiana, USA)

Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse wird mehrfach als relevant im Hinblick auf eine Grenztemperatur für das Wirtsgestein Salz angesehen (z. B. KUHLMANN, 2015 und BRASSER & DROSTE, 2008). Bei den genannten In-situ-Experimenten wurde das adsorptiv an den Korngrenzen des Steinsalzes gebundene Wasser freigesetzt (ROTHFUCHS 1986, MEISTER et al. 1985, EISENBURGER et al. 1985, HEUSERMANN et al. 1991, MEISTER et al. 1991, ROTHFUCHS & SCHWARZIANECK 1988, KUHLMANN & MALAMA, 2013). Die Freisetzung von Kristallwasser durch die thermische Zersetzung von Polyhalit wurde ausschließlich beim Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse beobachtet (ROTHFUCHS 1986).

Wasserzutritte bei geringeren Gebirgstemperaturen wurden nach KUHLMANN & MALAMA (2013) beobachtet, wenn die Untersuchungsbohrungen Tonschichten durchhörten, z. B. beim Salt Vault Experiment in der Carey Salt Company Mine in Lyons (Kansas, USA).

Salzgrus

Grundsätzlich wird für Salzgrus von den gleichen Grenztemperaturen wie für das Wirtsgestein Salz ausgegangen.

Laborexperimente an kompaktiertem WIPP-Salzgrus zur Bestimmung thermomechanischer Eigenschaften wurden bei Temperaturen von 100, 175 und 250 °C durchgeführt. Dampf- und

Soleaustritte während der Aufheizphase wurden bei den Experimenten bei 250 °C beobachtet. Dieser Befund stützt die These einer „Grenztemperatur“ von 230 °C, ab der kleine Mengen des Kristallwassers im Salz bzw. Polyhalit freigesetzt werden.

In-situ-Erhiterversuche mit Salzgrus als geotechnischer Barriere wurden in Deutschland (TSS bzw. BAMBUS sowie DEBORA-1 und DEBORA-2 im Salzbergwerk Asse) und in den USA (Overtest in der WIPP-Site) durchgeführt. Dabei wurden maximale Temperaturen zwischen 150 °C und 210 °C erreicht (BECHTHOLD et al. 1999 und MUNSON et al. 1990). Bei diesen Versuchen wurden keine negativen Auswirkungen auf das bestimmungsgemäße Verhalten des Versatzes festgestellt.

Tonstein

Befunde zur Temperaturbeständigkeit von Tonsteinen aus laborativen Untersuchungen gibt es nur wenige. Nach ZHANG et al. (2007) lieferten Laborexperimente mit erhöhten Temperaturen von 80 °C keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung der hydraulischen Eigenschaften von Prüfkörpern des Opalinustons (Mont Terri). Darüber hinaus wird nach ZHANG et al. (2010) die Quelfähigkeit des Callovo-Oxfordian Tonsteins (Bure) durch Erhitzen bis 120 °C nur graduell verringert, so dass kein negativer thermischer Einfluss auf die Integrität des Tonsteins festgestellt wurde.

Bei den In-situ-Experimenten in der Schweiz wird angenommen, dass die Paläotemperatur des Wirtsgesteins nicht überschritten wird (z. B. NAGRA 2010). Unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit der geotechnischen Barriere werden Temperaturen von 130 °C bis 150 °C an den Erhitzeroberflächen als unkritisch für das Wirtsgestein angesehen.

In Frankreich wird dagegen Bezug auf Ergebnisse numerischer Berechnungen genommen. Diese Berechnungen haben ergeben, dass eine Durchschnittstemperatur von 70 °C über einen Zeitraum von 10.000 Jahren keinen schädigenden Einfluss auf das Wirtsgestein hat, obwohl die Paläotemperatur des Callovo-Oxfordian nur bei 40 °C liegt (DELAY et al. 2010). Darüber hinaus soll eine kurzzeitige Temperatureinwirkung von 90 °C keine Schädigung des Tonsteins hervorrufen. Nach ANDRA (2005) soll eine Durchschnittstemperatur von 70 °C noch vor 1000 Jahren nach der Abfalleinlagerung erreicht sein. Darauf basierend wurde eine Grenztemperatur von 90 °C an der Behälteroberfläche im Kontakt mit dem Wirtsgestein Callovo-Oxfordian festgelegt, um eine temperaturbedingte Schädigung des Tonsteins zu vermeiden.

Die Bestimmung einer Grenztemperatur des Wirtsgesteins Tonstein ist demnach nicht Bestandteil der bereits durchgeführten, der aktuellen oder der geplanten In-situ-Experimente im Ton bzw. Tonstein.

Kristallin

Für das Wirtsgestein Kristallin sind keine Laborexperimente bekannt, die die Bestimmung einer Grenztemperatur zum Ziel hatten. Dies liegt einerseits daran, dass Granit bei Temperaturen oberhalb von 500 °C entstanden ist und andererseits daran, dass die Klüftigkeit dieses Gesteinstyps und damit seine geringe Barrierewirksamkeit bekannt sind.

Die In-situ-Befunde des Heated Failure Tests mit Temperaturen bis 85 °C im AECL's URL in Kanada zeigten keine Veränderung der Festigkeit des Wirtsgesteins und keine Vergrößerung der EDZ (excavation damage zone) durch die Temperaturerhöhung (OHATA & CHANDLER, 1997). Nach VALLI et al. (2014) wurde allerdings beim Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment (POSE) in Olkiluoto (Finnland) eine Vergrößerung der EDZ durch Temperaturerhöhung beobachtet.

Im Felslabor Grimsel wurde das FEBEX-Experiment «Full-Scale Engineered Barriers Experiment» durchgeführt, um die thermische Auswirkung auf das Verfüllmaterial, den Bentonit (speziell auf dessen natürliche Aufsättigung), und auf das umgebende Gestein zu untersuchen. Der Aus- bzw. Rückbau des Experiments sowie die Aus- und Bewertung dauern noch an. Momentan werden Untersuchungen am Bentonit durchgeführt.

Bentonit

In NDA (2010) wird geschlossen, dass es Bentonitreaktionen unterhalb (HICKS et al., 2009) und oberhalb 100°C gibt (WERSIN et al., 2007) und dass die Geschwindigkeit der meisten Reaktionen exponentiell aber kontinuierlich von der Temperatur abhängt.

Nach VILLAR & GÓMEZ-ESPINA (2009) sowie VILLAR et al. (2010) tritt eine geringe Abnahme der Quellfähigkeit von FEBEX-Bentoniten bei Temperaturen um 100 °C auf. Die Experimente von KAUFHOLD & DOHRMANN (2010) bei Temperaturen von 90 °C und 120 °C zeigten, dass der Quellverlust durch Trocknung nicht an 100 °C gebunden und ein limitierter Prozess ist.

Nach DUECK (2014) führt eine kurzzeitige Erhitzung auf 150 °C nur zu einer geringen Abnahme des Quelldruckes und der hydraulischen Konduktivität. Allerdings wurde eine signifikante Abnahme der Bruchdehnung nach kurzzeitiger Erhitzung auf 150 °C beobachtet.

Bei allen Versuchen und Darstellungen muss beachtet werden, ob die thermische Belastung im geschlossenen oder im offenen System betrachtet wird. Änderungen der physikalischen Eigenschaften im offenen System ergeben sich häufig durch Entwässerungsreaktionen.

Im vollskalierten SKB-Großexperiment „prototype repository“ wurden zwei unterschiedlich erhitzte Blöcke untersucht (max. Temp. = 85 °C). Bentonit, welcher der größeren Wärme ausgesetzt war,

verlor gegenüber dem etwas weniger warmen Material etwas an Kationenaustauschfähigkeit, was möglicherweise eine geringere Quellfähigkeit bedeuten könnte (DOHRMANN & KAUFHOLD, 2014).

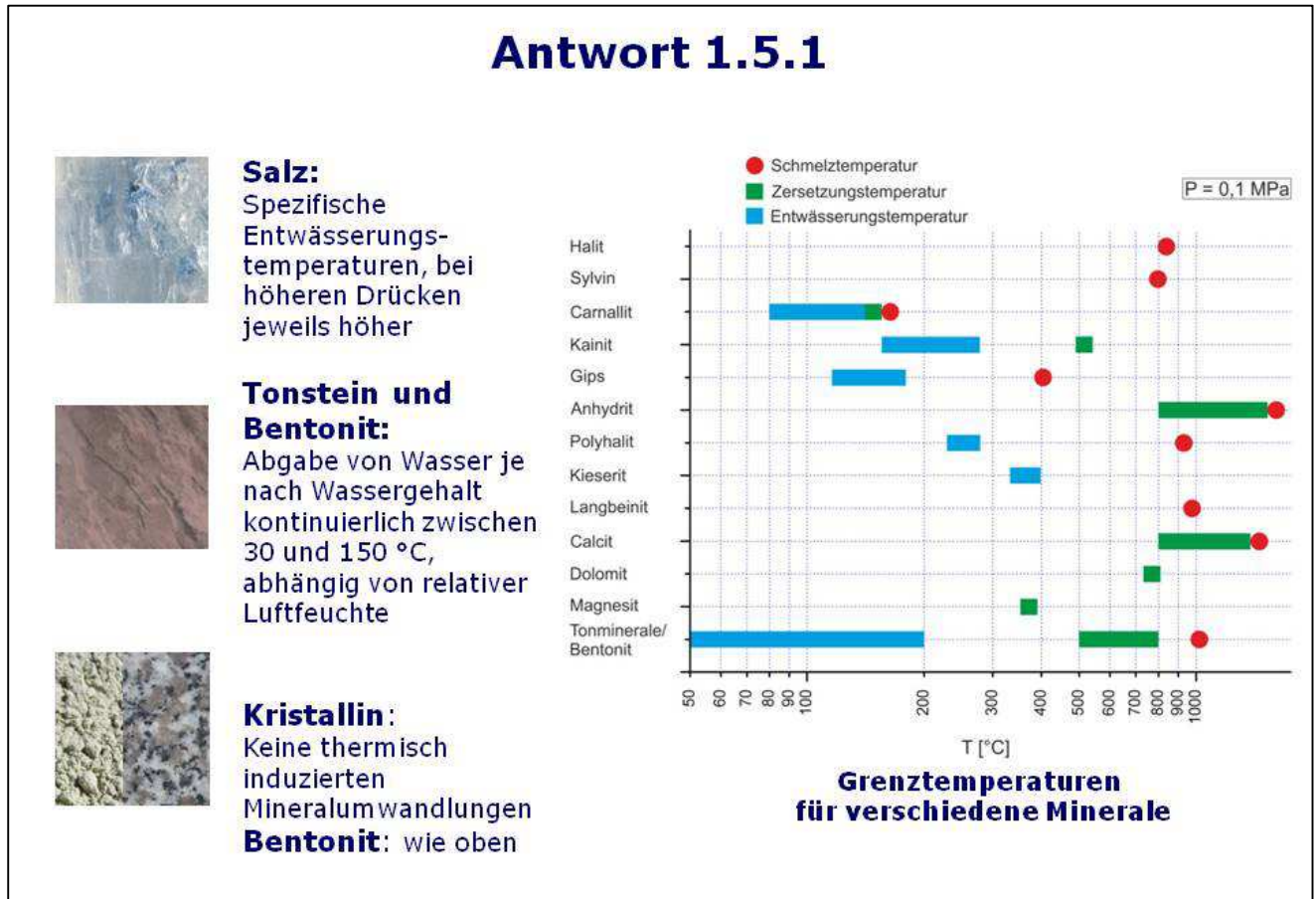
Beim Temperature buffer test (TBT) im Äspö HRL (Schweden) wurden Temperaturen bis 155°C erreicht. Nach ÅKESSON et al. (2012) waren keine signifikanten Änderungen in der Retentionskurve des Bentonits sowie eine geringe Abnahme des Quelldrucks zu beobachten. Es wurde tendenziell eine Zunahme der hydraulischen Konduktivität, der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des Bentonits durch die erhöhte Temperatur festgestellt. Die Bruchdehnung nahm dagegen ab.

In KARNLAND et al. (2009) sind die Ergebnisse des LOT-Experiments im Äspö HRL (Schweden) dokumentiert. Danach sind infolge der Wassersättigung des Bentonits und der Einwirkung erhöhter Temperaturen bis 130 °C nur geringe mineralogische Veränderungen festzustellen. Diese Veränderungen führten nicht zu Änderungen der Materialeigenschaften, die zu einer Gefährdung der Abdichtfunktion geführt hätten.

Der ABM-II-Versuch (Granit-Bentonit-Eisen auf 130 °C erhitzt) indiziert, dass Boiling stattgefunden hat, das die Barrierenintegrität zerstörte (SVENSSON, 2015). Basierend auf dem lange vermuteten Risiko des Boilings wird in Schweden eine Standardtemperatur von 90 °C bevorzugt. Auch im britischen *reference disposal concept* wird Boiling als Kriterium für eine Grenztemperatur verwendet (HICKS et al., 2009).

1.5 „Inwieweit ist das Temperaturverhalten verschiedener Wirtsgesteine/geotechnischer Barrieren aus mineralogischer Sicht, insbesondere im Hinblick auf die beiden folgenden Fragen geklärt?“

1.5.1 „Ab wann kommt es zur Freisetzung von (Kristall)wasser?“



Tonminerale und der im potentiellen Endlagerbereich im Wesentlichen vorkommende Halit, assoziiert mit geringen Anteilen von Anhydrit, besitzen per Definition kein Kristallwasser. Nur in Randbereichen kommen in sehr geringen Mengen Salzminerale (max. 0,6 Gew.-%) wie z. B. Polyhalit, Kieserit und Carnallit vor, die Kristallwasser enthalten. Tonminerale enthalten allerdings auf den Oberflächen und in Zwischenschichten adsorbiertes Wasser sowie Konstitutionswasser (OH-Gruppen). Die Frage wurde auf Wasserabgabe im Allgemeinen erweitert.

Generell gilt: Das offene System (Probe im Labor) ist gut untersucht, in geschlossenen Systemen (wie im Endlager jenseits der EDZ) verschiebt sich jegliche Wasserabgabe in Richtung höherer T (hier gibt es nicht immer konkrete Zahlen). Auch die Zunahme des Drucks verschiebt die Wasserabgabe in Richtung höherer Temperaturen (z.B. KERN & FRANKE 1986). Ist ein geschlossener Raum wassergesättigt, kommt es zu keiner Wasserabgabe. Die aus dem offenen System bekannten Daten können als Untergrenze verwendet werden.

1.5.2 „Ab wann kommt es zu thermisch induzierten Mineralumwandlungen?“**Antwort 1.5.2****Salz:**

Keine thermisch induzierten Mineralumwandlungen
(nur Zersetzungs- und Schmelztemperaturen bei
Wasserabwesenheit relevant)

**Tonstein / Bentonit:**

Kontinuierlicher Verlauf aller thermisch induzierten Reaktionen:

- abhängig von chemischen Bedingungen
- Beschleunigung durch höhere Temperaturen

**Kristallin:**

Keine thermisch induzierten Mineralumwandlungen

Bentonit: wie oben

Bei Salz finden Mineralumwandlungen bei Abwesenheit von Wasser nicht statt (HERRMANN 1981). Ist jedoch Wasser vorhanden, können bereits bei geringen Temperaturen entsprechend der chemisch/mineralogischen Zusammensetzung verschiedene Reaktionen stattfinden (s. Kap. 1.6.6).

Bei Tonstein und Bentonit gibt es eine Reihe von möglichen Mineralreaktionen, bei denen allerdings nur die Illitisierung das Hauptmineral betrifft und von der Temperatur abhängt. Alle möglicherweise stattfindenden thermisch induzierten Reaktionen (inkl. Illitisierung) sind kontinuierliche Reaktionen, die von den chemischen Bedingungen abhängen, und durch erhöhte Temperaturen beschleunigt werden. Grenztemperaturen gibt es nicht. Auch die Illitisierung hängt mit dem Kalium-Angebot zusammen und findet ober- und unterhalb 100 °C statt. Die Temperatur beschleunigt die Reaktionen entsprechend dem Arrheniusgesetz.

Bei Wasserabwesenheit beschränken sich die thermisch induzierten Mineralumwandlungen auf die Zersetzungs- und Schmelztemperaturen.

1.6 „Welche Erkenntnisse liegen zum Verhalten verschiedener Wirtsgesteine/geotechnischer Barrieren aus thermomechanischer Sicht vor?“

1.6.1 „Welche Erkenntnisse liegen über das Maß der Wärmeausdehnung vor? Ab wann kann mit einer thermisch induzierten Rissbildung gerechnet werden?“

Antwort 1.6.1a

Steinsalz

Wärmeausdehnung:

- Thermischer Ausdehnungskoeffizient
von $\alpha = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (0 °C) bis $\alpha = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (300 °C)

Thermisch induzierte Rissbildung:

- Bei Überschreitung der **minimalen** Hauptspannung:
 - Salz aus flacher Lagerung: Versagen ab ca. 250-280 °C
 - Steinsalz aus Salzstöcken noch bei 400 °C stabil
 - abhängig vom Wassergehalt
- Rissbildung vorrangig abhängig vom Temperaturgradienten (weniger von der absoluten Temperatur).

Salz

Der thermische Ausdehnungskoeffizient für Salz ist sehr gut bekannt und in verschiedenen, teilweise auch standortspezifischen Untersuchungen experimentell ermittelt worden.

Eine thermisch induzierte Rissbildung im Salz ist in hohem Maße vom Wassergehalt abhängig. Steinsalz aus Salzstöcken ist noch bei 400 °C stabil. Bei Salz aus flacher Lagerung ist eine thermisch induzierte Rissbildung ab ca. 250 bis 280 °C beobachtet worden. Grundsätzlich ist die Rissbildung vorrangig vom Temperaturgradienten abhängig, weniger von der absoluten Temperatur.

Antwort 1.6.1b

Salzgrus

Wärmeausdehnung:

- wie Steinsalz
- unschädlich, da der Versatz genügend Ausdehnungsraum aufweist

Thermisch induzierte Rissbildung:

- Rissbildung im Bereich des Versatzkörpers erst möglich nach Kompaktion

Salzgrus

Die thermische Ausdehnung von Salzgrus verläuft ähnlich wie bei kompaktem Steinsalz. Da der Salzgrusversatz insbesondere in der Anfangsphase der Kompaktion nach Versatzeinbringen einen deutlichen Porenraum und damit Raum für die Ausdehnung aufweist, ist die thermische Einwirkung unschädlich.

Eine thermisch induzierte Rissbildung wird theoretisch erst dann auftreten, wenn der Versatzkörper ausreichend kompaktiert ist und ein genügend großer Temperaturgradient vorliegt. Ein derartig großer Gradient ist aber nach Kompaktierung des Versatzes (also erst nach längerer Einwirkung der Wärmequelle) in der Praxis nicht zu erwarten.

Antwort 1.6.1c

Tonstein

Wärmeausdehnungskoeffizient

- **sehr variabel** bezüglich mineralischer Zusammensetzung, daher ist Ausdehnungskoeffizient **standortabhängig**
- Opalinus-Ton (Mt. Terri / CH):
 $\alpha = 0,8 \dots 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ bis 40 °C
- Mittel-Barremium / Mittel-Albium (Konrad / D):
 $\alpha = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (20-100 °C, getrocknete Proben)
- Callovo-Oxfordian (Bure / F):
 $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

Tonstein

Der Wärmeausdehnungskoeffizient für Tonstein ist extrem variabel und hängt stark von der jeweiligen mineralogischen Zusammensetzung des Tonsteins ab. Er ist daher in hohem Maße standortabhängig. Kennwerte für Opalinus-Ton (Mt. Terri, Schweiz), für das Mittel-Barremium und Mittel-Albium (Schachtanlage Konrad) sowie für Callovo-Oxfordian (Bure, Frankreich) liegen vor.

Antwort 1.6.1d

Tonstein

Thermisch induzierte Rissbildung:

- Wassersättigung:
 - Entweichen von Wasser(-dampf): Bei Erwärmung → Entsättigung → Schrumpfen → ggf. Rissbildung
 - Gesteinskörper wassergesättigt und undrainiert: Porenwasserdruck → ggf. Zug- oder Scherversagen
- Einspannung: Behinderung der Wärmeausdehnung → ggf. Rissbildung
- Zeitliche Entwicklung: Schnelle Temperaturerhöhung → höhere Temperaturgradienten → ggf. Rissbildung

Tonstein

Thermisch induzierte Rissbildung kann bei wassergesättigten Tonsteinen auftreten. Sofern Wasser bzw. Wasserdampf bei Erwärmung aus dem System entweichen kann, kommt es zur Entsättigung und in der Folge zu Schrumpfvorgängen und ggf. zur Bildung von Rissen.

Ist der Gesteinskörper wassergesättigt und undrainiert (Wasser kann nicht entweichen), kommt es bei thermischer Einwirkung zum Anstieg des Porenwasserdrucks und in der Folge ggf. zum Zug- oder Scherversagen in Verbindung mit entsprechenden Zug- oder Scherrissen.

Bezüglich der zeitlichen Entwicklung von Temperaturen im Tonstein gilt: Je schneller die Temperaturerhöhung ist, desto höhere Temperaturgradienten treten auf, die eine thermisch induzierte Rissbildung begünstigen.

Antwort 1.6.1e

Kristallin & Bentonit

Wärmeausdehnungskoeffizient:

- Für Kristallin bekannt
- Für Bentonit bekannt

Thermisch induzierte Rissbildung:

- Volumenänderung bei Bentoniten ist durch Quellen dominiert (thermische Expansion untergeordnet)
- Rissbildung bei Bentoniten schwer zu prognostizieren (abhängig von Umgebungsdruck, Austrocknung und Scherbeanspruchung)
- Bei Trennflächen im Kristallin → evtl. Kluftöffnung bzw. -schließung

Kristallin & Bentonit

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Kristallingesteinen und von Bentonit ist hinreichend bekannt.

Thermisch induzierte Rissbildung im Kristallin spielt aufgrund der hohen Gesteinszugfestigkeit eine untergeordnete Rolle. Thermische Einwirkungen werden bei einem Gebirge, das Trennflächen aufweist, eher zur Öffnung oder zum Schließen von Klüften führen.

Da bei Bentoniten die Volumenänderung durch das Quellen dominiert wird, ist die thermische Expansion von untergeordneter Bedeutung. Grundsätzlich ist die Rissbildung schwer zu prognostizieren, da sie von verschiedenen Randbedingungen wie z.B. Umgebungsdruck, Grad der Austrocknung und Höhe der Scherbeanspruchung abhängt.

1.6.2 „Gibt es Erkenntnisse über das Maß der Wärmeausdehnung der im Gestein vorhandenen Fluide und seine Auswirkung auf die Gesteinsintegrität?“

Antwort 1.6.2

Thermische Ausdehnung von Fluiden: Abhängig von Zusammensetzung und p-T-Bedingungen

Steinsalz

- Endlagerkonzept: Nahezu fluidfreies (< 0,1 Gew.-%) Hauptsalz
- sehr geringe Wärmeausdehnungskoeffizienten für salinare Lösungen
- Pyrolyse von Kohlenwasserstoffen führt bei Gehalten < 0,5 Gew.-% zu keiner Schädigung

Tonstein / Bentonit

- Keine Beeinträchtigung der Gesteinsintegrität bei angestrebter moderater Zunahme des Porenwasserdruckes

Kristallin

- Druckabbau über Klüfte
- Druckanstieg im Bentonit kann Desintegration zur Folge haben

Salz

Im Rahmen der VSG sind für den Salzstock Gorleben unter Zugrundelegung der Menge, Art und Zusammensetzung der im Salzstock nachgewiesenen KW die Auswirkungen der Pyrolyse auf die Gesteinsintegrität analysiert worden. Bei 80 °C ergab sich durch die thermische Zersetzung eine Versiebenfachung des KW-Volumens. Unter Berücksichtigung der geringen KW-Konzentrationen in den Proben wurde für das Einlagerungsniveau (180 bar) eine Volumenzunahme des Gebirges um 0,6 % abgeschätzt, was zu keinen sicherheitsrelevanten Schädigungen der geologischen Barriere führt (WEBER et al. 2011).

KW-Gehalte größer 1 Vol.-%: deutliche Druckzunahmen möglich, d.h. es kann bei Verletzungen des Minimalspannungskriteriums zu lokaler Permeation (lokal begrenzte Umverteilung von KW-Gasen auf Korngrenzen) kommen. Ist die Druckzunahme im Vergleich zur vorherrschenden Minimalspannung relativ gering (Delta p kleiner 2 MPa), wovon in den meisten Salzgesteinen mit i.d.R. relativ geringen KW-Gehalten auszugehen ist, ist ein Fracking der Gesteine unwahrscheinlich.

Derartige Frac-Prozesse werden lediglich aus Salzgesteinen beschrieben, die im Umfeld von karbonatischen KW-Muttergesteinen mit KW-Gehalten im Prozentbereich vorkommen und in ihrer geologischen Entwicklung in sehr tiefe Krustenbereiche (größer 3 km) versenkt wurden (z. B. SCHÖNHERR et al. 2007).

Wasser bzw. wässrige Lösungen ändern in Abhängigkeit von ihrem Salzgehalt und vom herrschenden Druck bei Temperaturerhöhung ihre Dichte und dehnen sich geringfügig aus. Der volumetrische Wärmeausdehnungskoeffizient schwankt zwischen $2,4 \times 10^{-4}$ und $7,2 \times 10^{-4}$ 1/K.

Tonstein

Die Fluidausdehnung führt im gering durchlässigen Tonstein zur Porenwasserdruckerhöhung. Die Größenordnung hängt im Wesentlichen von den Gesteinsparametern, dem Endlagerdesign und dem zeitlichen Verlauf der Temperaturerhöhung ab und kann zu einer Druckerhöhung von mehreren MPa führen (z.B. ANDRA Dossier 2005, NAGRA 2002). In-situ-Versuche in den Untertagelabors der Schweiz (HE-D) und Frankreichs (TER) haben gezeigt, dass bei Erhitzung auf 100 °C der Porenwasserdruck von 1 MPa auf 4 MPa ansteigt (MOHAJERANI et al. 2012).

Ist der Porenwasserdruck größer als die geringste Hauptspannung im Gebirge, können sich existierende Risse öffnen (HUBBERT & WILLIS 1957) und so die Integrität beeinflussen. In den Sicherheitskonzepten von ANDRA und Nagra wird nachgewiesen, dass die Porenwasserdrücke eine entsprechende Größe nicht erreichen.

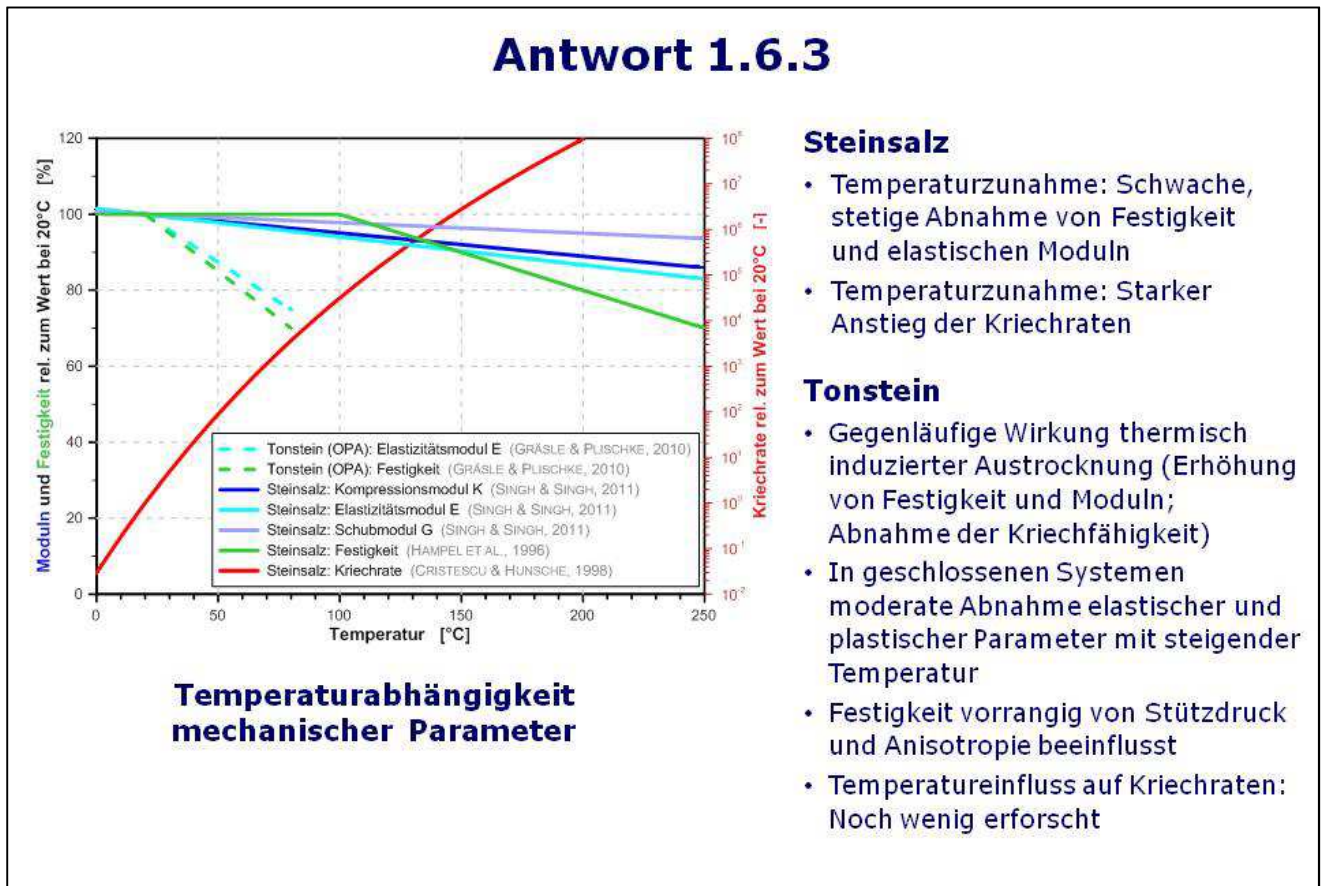
Kristallin

Im Granit befindet sich das Wasser auf Klüften und baut daher keinen Druck auf.

Bentonit

Im Bentonit ist das Wasser im Wesentlichen in den Tonmineral-Zwischenschichten und in Mikroporen gebunden (KAUFHOLD et al. 2010). Der ABM-II-Versuch zeigt, dass es zu einem Druckanstieg kommen kann, der Desintegration zur Folge haben kann (SVENSSON 2015).

1.6.3 „Ab welcher Temperatur kommt es zu einer signifikanten Veränderung der Mineralparameter (z.B. Plastizität, Viskosität)?“



Steinsalz

Die Gesteinsparameter wie Plastizität oder Viskosität ändern sich mit der Temperatur kontinuierlich und es finden keine sprunghaften Veränderungen statt. Mit steigender Temperatur erfolgt eine schwache, stetige Abnahme von elastischen Moduln und von Festigkeitskennwerten (SINGH & SINGH 2011, HAMPEL et al. 1996). Bei Temperaturerhöhung ist ein stark nichtlinearer Anstieg der Kriechraten zu erwarten (CRISTESCU & HUNSCHE 1998).

Tonstein

Thermische Einwirkungen können zu einer thermisch induzierten Austrocknung mit im Vergleich zum Salz gegenläufiger Wirkung führen (elastische Moduln und Festigkeitskennwerte erhöhen sich, während die Kriechfähigkeit abnimmt). In geschlossenen Systemen liegt mit steigender Temperatur eine moderate Abnahme elastischer und plastischer Parameter vor (GRÄSLE & PLISCHKE 2010, ZHANG 2011, ANDRA 2012). Die Festigkeit wird jedoch vorrangig vom Stützdruck und von der Anisotropie des Materials beeinflusst, weniger von der Temperatur (BOCK 2009). Der Einfluss der Temperatur auf das Kriechverhalten ist kaum erforscht (ZHANG et al. 2007).

1.6.4 „Gibt es Erkenntnisse zur thermisch induzierten Gasbildung im Endlager und ihre Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität?“

Antwort 1.6.4a

Gasbildung

Prozesse:

- chemische Reaktionen (v. a. bei Wasserzutritt) - Korrosion und Radiolyse
- Mobilisierung natürlich vorkommender Gase im Gestein
- mikrobielle Aktivität (in der Nähe von HAW ohne Bedeutung): T-Optimum

Prozesse der Gasbildung können sein:

- Chemische Reaktionen (vorrangig bei Wasserzutritt), z.B. als Korrosion oder Radiolyse, (hinsichtlich der Verdampfung von Fluiden wird auf die Fragen 1.2, 1.4, 1.5.1 und 1.6.5 verwiesen),
- Mobilisierung natürlich vorkommender Gase im Gestein, z.B. durch thermische Zersetzung von Gesteinsbestandteilen (s. dazu Fragen 1.5.1 und 1.5.2),
- Mikrobielle Aktivität.

Antwort 1.6.4b

Gasbildung

Steinsalz:

- Gasbildungsdaten für Radiolyse und Korrosion bekannt
- Temperaturabhängigkeiten wenig erforscht

Tonstein:

- Ungewissheiten in Quantifizierung der Gasbildungsdaten bei Korrosion und ihrer T-Abhängigkeit
- Gasfreisetzung bei Aufheizung ist langsam und ortsabhängig

Kristallin:

- Thermische Gasfreisetzung in Bohrloch nimmt mit Temperatur zu
- Korrosionsrate von Eisenmetallen nimmt mit Temperatur zu

Bentonit:

- Projekt FORGE – erste systematische Untersuchung der Wasserstoffbildung am Kontakt zu Eisenmetallen
- Abhängig von Temperatur, Zeit und dem Verhältnis von Metall zu Wasser



**Korrozierender Behälter
in einem Bergwerk**

Steinsalz

Im Steinsalz findet kaum thermische Gasfreisetzung statt. Die Gasbildungsdaten für Korrosion und Radiolyse sind weitgehend bekannt. Aufgrund der laut Endlagerkonzept geplanten Einlagerung in einem praktisch lösungsfreien Salzgestein wurden die Temperaturabhängigkeiten wenig untersucht.

Tonstein

In der Quantifizierung der Gasbildungsdaten bei Korrosion und ihrer Temperaturabhängigkeit bestehen noch erhebliche Ungewissheiten. Die Gasfreisetzung bei Aufheizung ist langsam und ortsabhängig. Die mikrobielle Umsetzung von Wasserstoff zu Methan (erst in einiger Entfernung von Behältern möglich), kann eventuell Gasmenge reduzieren.

Kristallin

Die thermische Gasbildungsrate nimmt bei der Bohrlochlagerung mit der Temperatur zu. Die Korrosionsrate von Eisenmetallen nimmt ebenfalls mit der Temperatur zu.

Bentonit

Im Projekt FORGE erfolgte eine erste systematische Untersuchung der Wasserstoffbildung am Kontakt zwischen Bentonit und Eisen. Die Wasserstoffbildung ist abhängig von der Temperatur, der Zeit und dem Verhältnis von Metall zu Wasser.

1.6.5 „Inwieweit hat das Sieden von Gesteinsfluiden Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität?“**Antwort 1.6.5****Allgemein**

- Siedetemperatur von wässrigen Lösungen abhängig vom Druck
- bei 100 bar liegt Siedetemperatur von Wasser oberhalb von 200 °C

Steinsalz

- Endlagerkonzept: praktisch fluidfreies (< 0,1 Gew.-%) Hauptsalz
- Siedetemperatur des Wassers abhängig von NaCl-Konzentration (Zunahme NaCl-Gehalt bewirkt Zunahme der Siedetemperatur)

Salzgrus

- Experimente: keine negativen Auswirkungen bei Temperaturen bis 200 °C

Tonstein

- keine Beeinflussung des Wirtsgesteins (T < 100 °C)

Kristallin

- Auswirkungen von Siedeprozessen aktuell Gegenstand von F+E

Der Prozess des Siedens ist für alle betrachteten Wirtsgesteinstypen nur im Nahfeld eines Endlagers und zu Beginn der Einlagerungsphase relevant, da sich später höhere Umgebungsdrücke einstellen, die eine Erhöhung des Siedepunktes zur Folge haben.

Nach dem Raoult'schen Gesetz haben auch die im Wasser gelösten Komponenten eine entscheidende Rolle für die Höhe der Siedetemperatur von Wasser bzw. wässrigen Lösungen. Danach steigt die Siedetemperatur in Abhängigkeit von ihrer NaCl-Konzentration von 100 °C (für destilliertes Wasser) auf bis zu 116 °C an (für 27,5 %-ige NaCl-Lösung).

Salzgrus

Auch bei bereits stark kompaktierten Proben wird im Salzgrus vorhandene Feuchte (adsorbiertes Wasser) schon bei mäßiger Erwärmung (z. B. 40-50 °C) in einem offenen System langsam aber stetig abgegeben. Bei Temperaturen oberhalb des Siedepunktes von Wasser (z. B. 105 °C) erfolgt die Abgabe des größten Feuchteanteils innerhalb weniger Stunden. Nach mehreren Tagen wird

unter stetiger Verringerung der Feuchteabgabe ein Gleichgewichtszustand erreicht (degressive Arbeitskurve). Negative Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität wurden bei Temperaturen bis 200 °C nicht beobachtet.

Tonstein

Die Endlagerkonzepte im Tonstein gehen aufgrund der im Vergleich zum Salzgestein geringeren Temperaturen an der Außenfläche der Endlagerbehälter und bei den im Einlagerungsniveau sich nach kurzer Zeit einstellenden Umgebungsdrücken von keiner Beeinflussung des Wirtsgesteins durch Sieden bzw. Verdampfen aus.

Bentonit

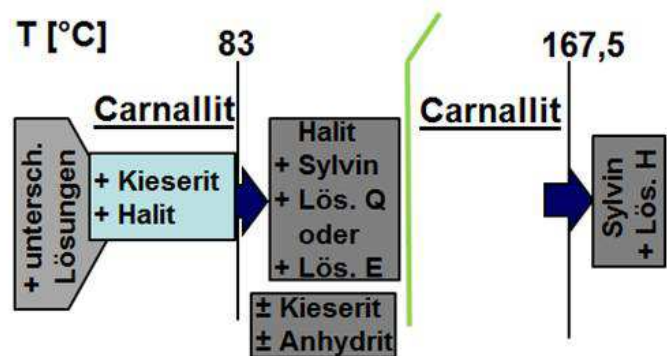
Die Auswirkungen von Siedeprozessen auf die Bentonitbarriere wurden im ABM-II-Versuch analysiert (SVENSSON 2015) und sind aktuell noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung.

1.6.6 „Ab wann kommt es zu thermisch induzierten hydro-chemischen Prozessen, die in Bezug auf die Gesteinsintegrität im Sinne einer Barrierefunktion beachtet werden müssen?“

Antwort 1.6.6a

- Alle relevanten hydrochemischen Reaktionen können durch Temperaturveränderungen beeinflusst werden.
- In trockenen Salzen: Keine hydrochemische Reaktion.
- Folgen von Reaktionen: z.B. Zementation/Rissheilung, Volumenänderung oder Spannungsumlagerungen.

- **Salz:**
Diese typischen (Salz-) Mineralreaktionen (z.B. mit Carnallit) wurden in Experimenten und thermodynamischen Modellierungen unter potentiellen Endlagerbedingungen bisher nicht beobachtet.



Hydrochemische Reaktionen sind temperaturabhängig. Die Reaktionen umfassen hierbei beispielsweise Lösungs- und Fällungsprozesse, Mineralumwandlungen (z. B. die Illitisierung), thermochemische Sulfatreduktion, Gasbildung, Grenzflächenprozesse an den technischen Barrieren (Behälter/Ton/Zement) und Entwässerung.

Salz

In trockenen Salzen finden keine hydrochemischen Reaktionen statt. Die Salzgesteine der in den Endlagerkonzepten für Salzstöcke vorgesehenen Einlagerungsbereiche enthalten nur sehr geringe Mengen von Wasser, daher finden im Allgemeinen keine signifikanten hydrochemischen Reaktionen statt. Typische Mineralreaktionen (z. B. mit Carnallit) wurden in Experimenten und thermodynamischen Modellierungen unter potentiellen Endlagerbedingungen nicht beobachtet. Beispielhaft ist ein Ausschnitt möglicher Mineralreaktionen ab 83 $^{\circ}\text{C}$ dargestellt: Unterschiedlich zusammengesetzte Lösungen, die mit Carnallit, Kieserit und Halit bei 83 $^{\circ}\text{C}$ reagieren, führen immer

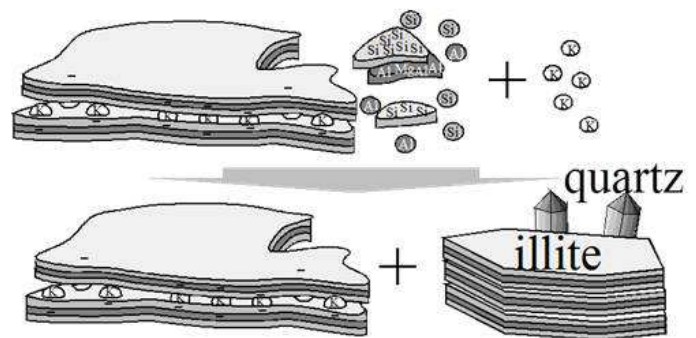
zur Bildung von Halit + Sylvin, und je nach Zusammensetzung der die Reaktion unterstützenden Lösung entsteht auch eine Lösung Q oder Lösung E, oder Kieserit oder Anhydrit (BRAITSCH 1962). Bei einer Temperatur von 167,5 °C wandelt sich Carnallit in Sylvin + Lösung H um (HERRMANN 1981).

Antwort 1.6.6b

- Alle relevanten hydrochemischen Reaktionen können durch Temperaturveränderungen beeinflusst werden,
- In trockenen Salzen: Keine hydrochemische Reaktion,
- Folgen von Reaktionen: z.B. Zementation/Rissheilung, Volumenänderung oder Spannungumlagerungen.

▪ Tonstein:

- Veränderungen der Hauptminerale (Smektite/Tonminerale) bislang nur an Grenzflächen beobachtet (z.B. Metall).
- Nebenbestandteile (Gips, Pyrit,..) sind generell reaktiver, aber von geringerer Bedeutung.



Tonstein

Im Ton bzw. Tonstein wurde eine Veränderung der Hauptminerale (Smektite/Tonminerale) bislang nur an Grenzflächen beobachtet (beispielsweise an Metall). Nebenbestandteile des Gesteins wie z.B. Gips und Pyrit sind generell reaktiver, aber von geringerer Bedeutung. Dargestellt ist beispielhaft der Prozess der Illitisierung. Der Mechanismus der Illitisierung wird noch kontrovers diskutiert. Eigene Studien (KAUFHOLD & DOHRMANN 2010) indizieren, dass die Illitisierung durch eine Lösungs-/Fällungsreaktion fortschreitet und eine Festkörperreaktion unwahrscheinlicher ist. Der Hauptfaktor bezüglich des Fortschreitens der Reaktion ist dabei die Verfügbarkeit des Kaliums. Geringe Mengen von strukturellen Kationen, die vom Smektit gelöst werden, bilden zusammen mit gelöstem Kalium frisch gefällten Illit, wobei etwas Kieselsäure übrig bleibt. Die Reaktion schreitet fort, solange Kalium in der Lösung zur Verfügung steht.

Jede der diversen, für die Einlagerung radioaktiver Abfälle relevanten hydrochemischen Reaktionen kann durch Temperaturveränderungen beeinflusst werden. Die Folgen von Reaktionen können positiv (z. B. Zementation/Rissheilung) oder negativ sein (z. B. Volumenänderung, Spannungsumlagerungen im Ton).

.

1.7 „Inwieweit wurden Gesteinsinhomogenitäten und ihre Auswirkungen auf die thermische Belastbarkeit untersucht (z.B. lithologische Variationen im Ton, Auswirkungen von Salztonlagen oder z.B. Anhydritvorkommen im Salz)?“

Antwort 1.7a

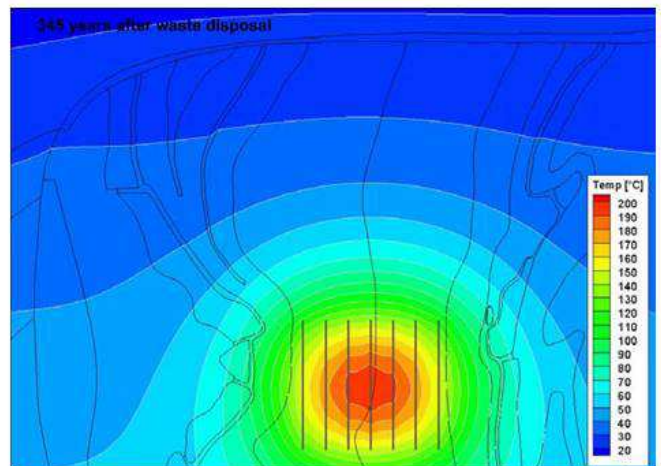
Gesteinsinhomogenitäten

Steinsalz (Mikro-Skala)

- Endlagerkonzept: halitische Gesteine mit geringen Anhydrit- und sehr geringen Polyhalit-, Kieserit- und/oder Carnallit-Gehalten (< 0,1 Gew.-%)
- thermisches Verhalten dieser geringen Gehalte nicht relevant für Endlagersicherheit
- Aufheizung tonmineralreicher (bis 80 Vol.-%) Salzgesteine: bis 140 °C geringe Masseverluste

Steinsalz (Makro-Skala)

- Thermische Beanspruchung z.B. des Hauptanhydrits wird in Modellberechnungen ermittelt



**Berechnetes Temperaturfeld
in einem Salzstock**

Steinsalz

Die Konzepte zur Errichtung eines HAW-Endlagers in einem Salzstock gehen von einer Einlagerung der Abfälle in halitischen Gesteinen mit nur geringen Anhydrit- und sehr geringen Polyhalit-, Kieserit- und/oder Carnallit-Gehalten aus, deren thermisches Verhalten z.B. im Rahmen der Beantwortung von Frage 1.5 analysiert und als nicht relevant für die Langzeitsicherheit eines Endlagers eingestuft wurde.

Aufgrund der Einlagerung der HAW in +/- monomineralischen Gesteinen liegen systematische Untersuchungen zu den Auswirkungen von Begleitkomponenten auf die thermische Belastbarkeit von Salzgesteinen nicht vor. Die bisher durchgeführten Untersuchungen zu den Auswirkungen von Gesteinsinhomogenitäten auf die Barriereigenschaften von Salzgesteinen konzentrierten sich auf Laboruntersuchungen zu den Auswirkungen erhöhter Anhydrit- bzw. Tongehalte auf die Festigkeits- und Kriecheigenschaften von halitischen Gesteinen (LANGER & HOFRICHTER 1971, HUNSCHE et al.

2003), auf die thermomechanischen Eigenschaften von tonreichen Salzgesteinen (LANKOF 2010) sowie auf Studien zum thermomechanischen Verhalten inhomogen zusammengesetzter Gesteine im Fernfeld eines geplanten Endlagers.

Im Makrobereich wird die thermische Beanspruchung z.B. von Anhydrit-Blöcken in einer Salzstruktur mittels numerischer Modellberechnungen ermittelt und bewertet.

Antwort 1.7b

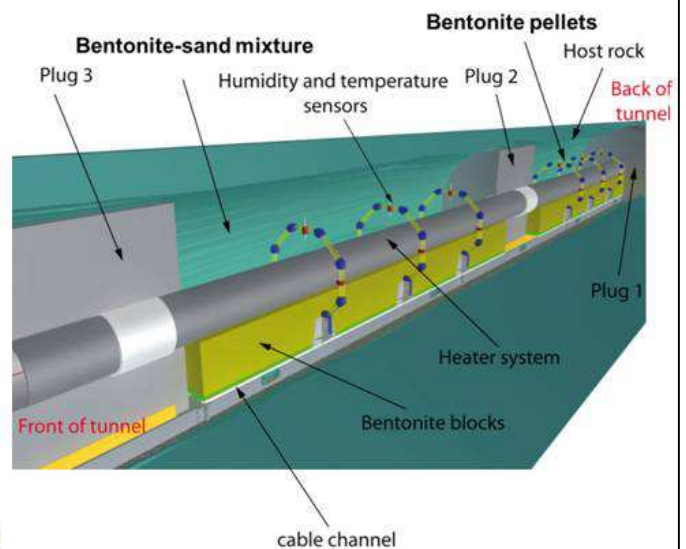
Gesteinsinhomogenitäten

Tonstein

- bisher nur Untersuchungen an homogenem Material (z.B. in Erhitzerversuchen in situ)
- bisher keine systematischen Untersuchungen zu den Auswirkungen von Inhomogenitäten

Kristallin

- nicht relevant, da Verwendung von industriell homogenisiertem Bentonit



Erhitzerversuch in Mont Terri (HE-E heater experiment)

Tonstein

Untersuchungen zu den Auswirkungen von Gesteinsinhomogenitäten auf die thermische Belastbarkeit von Tongesteinen sind nicht bekannt. Dies würde auf einen systematischen Vergleich von shaly- und sandy-Faziesbereichen hinauslaufen, der bisher nicht erfolgt ist.

Kristallin & Bentonit

Für die im Kristallin vorgesehene Bentonitbarriere sind derartige Analysen nicht relevant, da die im Endlager genutzten Bentonit-Formsteine aus industriell prozessiertem (u.a. gemahlenem und dabei +/- homogenisiertem) Material hergestellt werden.

1.8 „Inwieweit wurde die Abhängigkeit der thermischen Belastbarkeit der Wirtsgesteine und geotechnischen Barrieren vom Feuchtegehalt untersucht? Welche Auswirkungen hat erhöhter Feuchteeintrag durch z.B. Klüfte, Lösungseinschlüsse, Salzgrusversatz? Inwieweit kommt es zur thermisch induzierten Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) bei erhöhtem Feuchteeintrag?“

Antwort 1.8a

Feuchteeintrag und Thermomigration

Steinsalz und Salzgrus:

- Thermisch induzierte Mikrorissbildung: Nur bei höheren Wassergehalten (flache Lagerung) ab 250 °C, wasserarmes Salz (Salzstöcke) bis 400 °C stabil
- Aufgelockertes Steinsalz und Salzgrus: Feuchte erhöht Kriechraten und elastische Verformbarkeit
- Thermomigration wird langfristig vom Dampftransport dominiert, migrierende Fluidmengen sind sehr gering

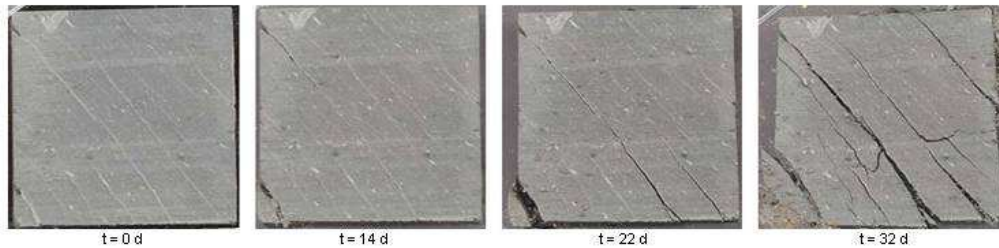
Steinsalz und Salzgrus

Eine thermisch induzierte Mikrorissbildung tritt nur bei höheren Wassergehalten (flache Lagerung) und bei Atmosphärendruck ab 250 °C auf, wasserarmes Salz (Salzstöcke) bleibt bis 400 °C stabil (BRADSHAW & McCLAIN 1971).

In aufgelockertem Steinsalz und Salzgrus erhöht Feuchte die Kriechraten und die elastische Verformbarkeit (vorteilhaft wegen schnellerer Kompaktion) (SCHULZE & GRÄSLE 2015, KRÖHN et al. 2009).

Die Thermomigration wird langfristig vom Dampftransport durch thermisch induzierte Dampfdruckgradienten dominiert. Die migrierenden Fluidmengen sind jedoch sehr gering (SCHLICH 1986, RÜBEL et al. 2013).

Antwort 1.8b



Thermisch induzierte Rissbildung an Opalinuston durch Feuchteverlust
(105 °C, offenes System) (aus: ZHANG ET AL., 2007)

Tonstein:

- Beste Barrierewirkung bei Wassersättigung
- Erwärmung (Porendruckerhöhung) kann bei Wassersättigung zur Überschreitung des Minimalspannungskriteriums führen
- Erwärmung (Austrocknung durch Thermomigration in offenen Systemen) kann zu Schrumpfrissen führen
- Thermomigration in situ bislang nicht ausreichend untersucht

Tonstein

Die beste Barrierewirkung liegt bei Wassersättigung (= natürlicher Wassergehalt) vor, für ungesättigte Gesteine besteht die Gefahr von Schrumpfrissbildung.

Direkte Wirkungen von Erwärmung (mit daraus folgender Porendruckerhöhung; MOHAJERANI et al. 2012) können nur bei Wassersättigung theoretisch zur Überschreitung des Minimalspannungskriteriums führen.

Indirekte Wirkungen von Erwärmung (Austrocknung durch Thermomigration in offenen Systemen) können zur Bildung von Schrumpfrissen führen.

Thermomigration ist in situ bislang nicht ausreichend untersucht worden; theoretisch sind jedoch Feuchteverluste in erwärmten Bereichen zu erwarten.

1.9 „Auf welcher räumlichen Skala sind die oben benannten thermisch induzierten Prozesse von Bedeutung (Beeinflussung des Nahfeldes / des ewG / bis zur Geländeoberfläche)?“

Antwort 1.9a

Steinsalz (Salzstock)

Prozess	Nahfeld	ewG	bis GOK
Mineralumwandlung	-	-	-
Wärmeausdehnung Gestein und Fluid	X	X	X
Änderung mechanischer Eigenschaften	X	X	-
Änderung hydraulischer Eigenschaften	-	-	-
Gasbildung	-	-	-
Sieden	-	-	-
Hydrochemie	-	-	-
Wärmetransport	X	X	X
Einfluss auf Wassersättigung	-	-	-
Hydrofrac	-	-	-

X = von Bedeutung

Definitionen

- Unter **Nahfeld** wird ein Gebiet mit einem Abstand zum Einlagerungsbehälter verstanden, der mindestens dem Behälterabstand entspricht, also ca. 20-30 m, abhängig vom Endlagerkonzept. Eine Zone dieser Größe erstreckt sich somit über die geotechnischen Barrieren, die EDZ, die temporär entsättigte Zone (im Tonstein) und einen Teil des gesättigten Wirtsgesteins (Tonstein).
- Als **ewG** wird hier das Wirtsgestein, abzüglich des Nahfeldes, betrachtet.
- Unter „**bis GOK**“ wird der Teil des Untergrunds verstanden, der kein Wirtsgestein darstellt.

Salz

Die obige Tabelle bezieht sich auf Salzstöcke. Die thermisch induzierten Prozesse sind bezüglich der Wärmeausdehnung von Gesteinen und Fluiden sowie des Wärmetransports auf allen räumlichen Skalen von Bedeutung. Hinsichtlich des Einflusses auf die Materialeigenschaften sind nur das Nahfeld und der ewG relevant.

Antwort 1.9b			
Tonstein / Bentonit			
Prozess	Nahfeld	ewG	bis GOK
Mineralumwandlung	X	-	-
Wärmeausdehnung Gestein und Fluid	X	X	X
Änderung mechanischer Eigenschaften	X	X	-
Änderung hydraulischer Eigenschaften	X	X	-
Gasbildung	X	-	-
Sieden	X	-	-
Hydrochemie	X	-	-
Wärmetransport	X	X	X
Einfluss auf Wassersättigung	X	-	-
Hydrofrac	X	X	-

X = von Bedeutung

Tonstein & Bentonit

Alle in der Tabelle genannten Prozesse sind für das Nahfeld von Bedeutung. Im ewG sind folgende Prozesse relevant: Wärmeausdehnung von Gesteinen und Fluiden, Änderung mechanischer und hydraulischer Eigenschaften, Wärmetransport und Hydrofrac. Bis zur GOK sind nur Wärmeausdehnung und Wärmetransport von Bedeutung.

1.10 „Gibt es Untersuchungen/Überlegungen zur technischen Machbarkeit der Rückholung in Bezug auf maximale Einlagerungstemperaturen und wenn ja, welche?“

Antwort 1.10

- Technische Machbarkeit der Rückholbarkeit von Endlagergebinden ist **für alle Wirtsgesteinstypen und Auslegungstemperaturen** theoretisch gezeigt oder praktisch demonstriert
- Rückholung bei 200 °C durchführbar bei ausreichender Bewetterung und Kühlung

→ **Untersuchungen zur Machbarkeit bei hohen Temperaturen liegen vor**

→ **maximale Einlagerungstemperaturen resultieren daraus nicht**

Salz

Die technische Machbarkeit der Rückholbarkeit von POLLUX-Behältern aus einem Endlager im Salzgestein wurde in mehreren Vorhaben demonstriert (u. a. DEAB in ENGELMANN et al. 1995, BAMBUS II in BECHTHOLD et al. 2004, VSG in FISCHER-APPELT et al. 2013, ASTERIX in BOLLINGERFEHR et al. 2014)

Tonstein

Die technische Machbarkeit der Rückholbarkeit aus einem Endlager im Tonstein wurde ebenfalls prinzipiell und planerisch gezeigt (u. a. ANDRA 2005, 2010, BOLLINGERFEHR et al. 2014)

Kristallin

Die Rückholung eines Kanisters wurde im Felslabor Äspö bereits demonstriert (u. a. KRISTENSSON & BÖRGESSON 2015). Auch beim kürzlich terminierten FEBEX-Versuch im Felslabor Grimsel wurde die Rückholung des Kanisters nach 18 Jahren gezeigt.

Allgemein

Maximale Einlagerungstemperaturen resultieren aus den Untersuchungen und Überlegungen zur Rückholbarkeit nicht.

Mögliche Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholung:

- Zwischenlagerzeit verlängern (ca. 80 Jahre)
- Abstände zwischen Einlagerungsstrecken erhöhen
- Behälterbeladung reduzieren (Konzept erst nachdem Standort feststeht)
- Kühl- und Wettertechnik
- Bohrlochlagerung: Stahlverrohrung (overpack)

2 Antworten zu „Einzelfrage“ (2) „Aufzeichnung von Wissenslücken in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit der Wirtsgesteine und Benennung offener Fragen zur Schließung sicherheitsrelevanter Wissenslücken“

2.1 „Welche Wissenslücken existieren für die einzelnen Wirtsgesteine?“

Antwort 2.1a / Kenntnisstand Salz			
Nr.	Frage	Salz in Salzstöcken	Kennnisstand
			flachlagende Salze
			offene Fragen
1.5.1	Schmelzen Freisetzung von Kristallwasser	Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen > 350°C	Heterogene Gesteinszusammensetzungen mit unterschiedlichen Mineralparagenesen sind möglich.
1.5.2	Mineralumwandlungen/-reaktionen	Wassergehalt im potentiellen Einlagerungsbereich sehr gering, daher vernachlässigbar.	Erhöhte Wassergehalte im potentiellen Einlagerungsbereich können Mineralumwandlungsreaktionen verursachen.
1.6.1 1.6.2	Wärmeausdehnung, Rissbildung	Wärmeausdehnung von Salzmineralen sehr gut bekannt; Rissbildung im intakten, homogenen und sehr wasserarmen Salz von Salzstöcken in bedeutend.	Wärmeausdehnung von Salzmineralen sehr gut bekannt; Rissbildung kann bei erhöhten Wassergehalten relevant sein; zahlreiche Schichtgrenzen, an denen Rissbildung erfolgen kann.
1.6.3	Veränderung der Mineralparameter	Temperatureinfluss für intaktes Stein Salz sehr genau bekannt; für Salzgrus prognostizierbar.	Temperatureinfluss für intaktes Stein Salz sehr genau bekannt; für Salzgrus prognostizierbar.
1.6.4	Gasbildung	in Hauptsalz mit sehr geringen Wasser- und Kohlenwasserstoffgehalten nicht relevant.	bei erhöhten Wasser- und Kohlenwasserstoffgehalten ggf. relevant.
1.6.5	Sieden von Gesteinsfluiden	Für unverritztes Gebirge nicht relevant.	Für unverritztes Gebirge nicht relevant.
1.6.6	hydrochemische Prozesse	Da Wassergehalt im potentiellen Einlagerungsbereich sehr gering, sind diese Prozesse irrelevant.	Wassergehalt im potentiellen Einlagerungsbereich möglicherweise erhöht; Prozesse evtl. relevant in der Gesamtbetrachtung.
1.7	Gesteinsinhomogenitäten	Für Steinsalz Hauptsalz nicht relevant; Fernfeld keine Auswirkungen; Fernfeld gut durch Modellberechnungen belegt.	ausgeprägte Heterogenitäten
1.8	"Thermomigration"	In der Praxis irrelevant, da Wassergehalt im Salzgestein zu gering.	In der Praxis evtl. relevant, da Wassergehalt signifikant; ab 250°C Dekrystallation der Fluid Inclusions; evtl. druckinduziertes Microfracturing.
1.10	Rückholung	Technische Machbarkeit prinzipiell gezeigt.	Bewertung bei Rückholung; Demonstrationsversuche

sehr guter Kenntnisstand
 guter Kenntnisstand
 mäßiger Kenntnisstand

Salz

Hinsichtlich der Beurteilung des Kenntnisstandes über die Temperaturverträglichkeit wird zwischen Salz aus Salzstöcken und Salz aus flacher Lagerung unterschieden. Es werden lediglich die hier relevanten Fragen 1.5 bis 1.10 aufgeführt.

Die Tabelle zeigt, dass der Kenntnisstand für Salz aus Salzstöcken als gut bis sehr gut beurteilt werden kann. Es liegen in Teilbereichen noch wenige offene Fragen vor, die aber nicht grundsätzlich als relevant für Sicherheitsbetrachtungen anzusehen sind.

Für Salz aus flacher Lagerung ist der Kenntnisstand deutlich reduzierter und wird lediglich als mäßig bis gut eingestuft. Hier bestehen noch offene Fragen, die auch als sicherheitsrelevant einzustufen sind.

Antw. 2.1b / Kenntn. Tonstein & Bentonit, Kristallin

Nr.	Frage	Tonstein & Bentonit (& Kristallin)	offene Fragen
	Frage Schmelzen	Erläuterung Kenntnisstand	
1.5.1	Freisetzung von Kristallwasser	Die Dehydratation ist im offenen System gut untersucht, im geschlossenen vernachlässigbar. Die Abgabe von OH-Gruppen (Dehydroxylierung) erfolgt erst > 500°C. Interessant ist die mögliche Kollabieren von Smektiten, bei deren Teil der Quellfähigkeit verloren gehen kann.	Mechanismus des irreversiblen Quellverlusts nach Trocknung
1.5.2	Mineralumwandlungen/-reaktionen	Besonders an Grenzflächen (z.B. Metal/Ton) sind Mineralreaktionen zu erwarten. Die Wesentlichkeit ist die Illitierung, da sie das Hauptmineral betrifft. Andere wie Pyritoxidation, oder Lösungfällung von Gips oder Carbonaten, wurden auch schon beobachtet.	Einige Reaktionen sind modellierbar, einige nicht. An Wichtigkeit ist zunächst das Verständnis der Auflösung des Hauptminerals in Tonen (Smektit).
1.6.1	Wärmeausdehnung, Rissbildung	Anstieg des Porenwasserdrucks beeinflusst die mechanischen Eigenschaften; Zusammenhänge sind nur sporadisch bekannt.	Phänomenologische Beschreibungen müssen mit physikalisch-basierten Erklärungsanteilen ergänzt werden
1.6.3	Veränderung der Mineralparameter	Es gibt einige Untersuchungen der Festigkeit und des Kriechens, aber systematische Studien in denen Temperatur und Wassergehalt (bzw. Umgebungswasser) variiert wurden, fehlen noch. Auch bezüglich K ₀ K und Quelldruck fehlen noch Studien, in denen alle relevanten Parameter variiert wurden.	Phänomenologische Beschreibungen müssen mit physikalisch-basierten Erklärungsanteilen ergänzt werden
1.6.4	Gasbildung	Gas entsteht durch Korrosion, Organiszersetzung, Carbonatzersetzung und Radiolyse. Die Prozesse und anfallenden Gasarten sind weitgehend modellierbar (verstanden). Das wichtigste Thema ist die Gasmigration.	Gasbildungsprozesse müssen nur noch vereinzelt untersucht werden (z.B. Carbonatzersetzung, Korrosionsmechanismus). Besonders relevant ist die Gasmigration durch das Gestein.
1.6.5	Sieden von Gesteinsfluiden	Boiling wurde schon ernst genommen, bevor es in einem Experiment (ABM-II) auch beobachtet wurde. Boiling spielt eine Rolle, wenn das Wirtsgestein nicht unbedingt dicht ist (Granit).	Boiling ist modellierbar, allerdings ist unklar, in wieweit es die Tonmikrostruktur zerstört. Boiling wird aber durch geringere T. verhindert.
1.6.6	hydrochemische Prozesse	Hydrochemische Prozesse entsprechen denen unter 5b erwähnten Mineralumwandlungen/Lösungs/Fällungsprozessen. Hier sei zusätzlich die TSR erwähnt, die mittlerweile ausreichend verstanden ist.	Lösungs-Fällungsmodellierungen müssen validiert werden.
1.7	Gesteins-homogenitäten	unterschiedliche lithologische Einheiten können unterschiedlich bezüglich Erhitzung reagieren. Untersuchungen dazu liegen nicht vor.	Untersuchungen fehlen (es ist allerdings auch kein direkter Effekt zu erwarten, Gesteinsstabilität und mechanisches Verhalten müssen miteinander untersucht werden)
1.8	"Thermomigration"	ABM und ABM II zeigen durch T. beschleunigte Kationenmobilität. Quantitativ ist das noch nicht verstanden.	κ(Kationenaustausch)=κ(T) bei hohen Drücken spielt der Typ des austauschbaren Kations keine Rolle mehr bezüglich Durchlässigkeit und Quelldruck.
1.10	Rückholung	Technische Machbarkeit zur Rückholung im Tonstein prinzipiell gezeigt.	Demonstrationsversuche

sehr guter Kenntnisstand
 guter Kenntnisstand
 mäßiger Kenntnisstand

Tonstein & Bentonit, Kristallin

Der Kenntnisstand bezüglich der Temperaturverträglichkeit von Tonstein und Bentonit wird für die in den Fragen 1.5 bis 1.10 behandelten Themen vorwiegend als mäßig, in wenigen Punkten aber auch als gut beurteilt. Es bestehen zahlreiche offene Fragen, die aus sicherheitsrelevanter Sicht noch zu klären sind.

2.2 „Inwieweit sind die unter Einzelfrage 1 aufgeführten Untersuchungen und wissenschaftlichen Abhandlungen aktuell und Stand von Wissenschaft und Technik?“

Antwort 2.2a

Zusammenfassende Bewertung des Kenntnisstandes

Salz / Salzgrus:

- Kenntnisstand Salzstöcke: **Gut bis sehr gut**
- Kenntnisstand „Flache Lagerung“: **Mäßig bis gut**
- ca. 40 Jahre intensive Endlagerforschung und >150 Jahre Salzbergbau in D, ca. 60 Jahre Salzkavernenbau in CAN, USA, D
- **komplexes** Materialverhalten ist sehr gut verstanden
- Material (Steinsalz aus Salzstöcken): Homogen, isotrop

Tonstein / Kristallin / Bentonit:

- Kenntnisstand: **Mäßig bis gut**
- ca. 20 Jahre Endlagerforschung im Tonstein/Bentonit mit zunehmender Intensität (D)
- ca. 20 Jahre Endlagerforschung im Kristallin mit geringerer Intensität (D)
- **extrem komplexes** Materialverhalten von Tonstein noch nicht ausreichend verstanden
- Material (Tonstein): Inhomogen, anisotrop

Salz & Salzgrus

Zusammenfassend kann der Kenntnisstand über die Temperaturverträglichkeit von Salz aus Salzstöcken als gut bis sehr gut klassifiziert werden. Das durch Isotropie und Homogenität geprägte Materialverhalten von Steinsalz, insbesondere auch hinsichtlich thermischer Eigenschaften, ist trotz des komplexen zeitabhängigen nichtlinearen Verhaltens sehr gut verstanden. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass inzwischen auf ca. 40 Jahre Endlagerforschung im Salz, auf ca. 60 Jahre Erfahrung im Salzkavernenbau und auf mehr als 150 Jahre Erfahrung im Salzbergbau zurückgeblickt werden kann.

Tonstein & Bentonit

Der Kenntnisstand über die Temperaturverträglichkeit von Tonstein und Bentonit ist in vielen Bereichen als mäßig, in einigen Fragestellungen als gut einzustufen. Die Endlagerforschung im Tonstein / Bentonit wird von der BGR seit ca. 20 Jahren betrieben, anfänglich mit geringerem Aufwand, inzwischen mit hoher Intensität. Tonstein, das als anisotropes und inhomogenes Material einzustufen ist, weist ein extrem komplexes Materialverhalten auf, das hinsichtlich vieler Fragestellungen noch nicht ausreichend verstanden ist.

Antwort 2.2b

Aktualität und Stand von W&T: Sehr gut

Forschungsaktivitäten im Salz, Tonstein und Kristallin sowie Bentonit

Starke nationale und internationale Vernetzung mit Endlagerorganisationen, Großforschungseinrichtungen und Gremien, z.B.:

- Andra, BfS, BGR, DBE, GFZ, GRS, IfG, KIT, LUH, Nagra, SKB, TUBS, TUC, TUF, UFZ ...
- Salt club
- Clay club
- US/FRG workshop on salt
- OECD/NEA
- ISRM Commission on RWD
- ISRM Commission on URL
- SANDIA NL (USA)

Mitwirkung in internationalen Untertagelabors, z.B.:

- Mt. Terri (CH)
- Grimsel (CH)
- Bure (F)
- Äspö (S)
- WIPP (USA)

Zahlreiche aktuelle Forschungsaktivitäten, z.B.:

- KOSINA
- BASAL
- ANSICHT
- BASTION
- DECOVALEX

Die Aktualität der Untersuchungen zur Temperaturverträglichkeit verschiedener Wirtsgesteine und der Stand von Wissenschaft und Technik können als sehr gut bewertet werden. Aufgrund der starken nationalen und internationalen Vernetzung von Institutionen sowie der aktiven und kooperativen Beteiligung an Projekten z.B. in Untertagelabors oder in gemeinsamen Forschungsvorhaben ist ein ständiger Wissensaustausch gewährleistet.

Beispiele für die Vernetzung der BGR:

- Mitarbeit im „Salt Club“ der OECD/NEA
- Mitarbeit im „Clay Club“ der OECD/NEA
- Mitarbeit in der "Integration Group for the Safety Case" (IGSC) der OECD/NEA
- Mitarbeit in den Kommissionen der "International Society for Rock Mechanics" (ISRM)
 - "Commission on Radioactive Waste Disposal"
 - "Commission on Underground Research Laboratory (URL) Networking"

- Mitarbeit in der "Task Force on Engineered Barrier Systems" der SKB Schweden
- Mitarbeit bei der Europäischen Endlagerplattform "Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform" (IGD-TP)
- Teilnahme am regelmäßig stattfindenden "US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation"
- Kooperation mit dem chinesischen Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG) zum fachlich-wissenschaftlichen Austausch zu Fragestellungen der Endlagerung
- Kooperation mit der ANDRA zum fachlich-wissenschaftlichen Austausch zu Fragestellungen der Endlagerung
- Fachlich-wissenschaftlicher Know-how-Austausch mit Sandia National Laboratories (SNL),
- Fachlich-wissenschaftlicher Know-how-Austausch mit dem Moskauer Institut für die Geologie von Erzlagerstätten, Petrographie, Mineralogie und Geochemie der Russischen Akademie der Wissenschaften (IGEM) und dem St. Petersburger Institut für Hydrogeoökologie der Russischen Akademie der Wissenschaften (IGE)
- Mitarbeit in der „Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager“ (ESchT) im Auftrag des BMUB im Schweizer Auswahlverfahren für ein Tiefenlager für radioaktive Abfälle
- Mitarbeit im internationalen Projekt „Decovalex 2015“

3 Literaturverzeichnis

ÅKESSON, M., OLSSON, S., DUECK, A., NILSSON, U., KARNLAND, O., KIVIRANTA, L., KUMPULAINEN, S., LINDÉN, J. & AKADEMI, Å. (2012): Temperature buffer test. Hydro-mechanical and chemical/mineralogical characterizations. SKB P-12-06. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.

ANDRA (2004): La charge thermique d'un stockage.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document Interne C.NT.ASIT.03.118: 69 S.; Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (2005): Dossier 2005 Argile – Synthesis - Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. Andra Report Series, 266 VA: 241 S.; Châtenay-Malabry.

ANDRA (2005): Dossier 2005 Argile. Tome - Phenomenological evolution of a deep geological repository.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Report Series: 525 S.; Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (2010): Stockage réversible profond - étape 2009 - Options de réversibilité du stockage en formation géologique profonde.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs 393: 99; Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (2012): Référentiel du comportement THM des formations sur le site de Meuse/Haute-Marne.-- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Document technique D.RP.AMFS.12.0024: 435 S.; Châtenay-Malabry, France.

BECHTHOLD, W., ROTHFUCHS, T., POLEY, A., GHOREYCHI, M., HEUSERMANN, S., GENS, A. & OLIVELLA, S. (1999): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project), EUR 19124 EN, CEC.

BECHTHOLD, W., SMAILOS, E., HEUSERMANN, S., BOLLINGERFEHR, W., BAZARGAN SABET, B., ROTHFUCHS, T., KAMLOT, P., GRUPA, J., OLIVELLA, S. & HANSEN, F.D. (2004): Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS II project), Final Report, Europ. Commission, nuclear science and technology. EUR 20621 EN.

BOCK, H. (2009): RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing. – Mont Terri Project, Technical Report, TR 2008-04: 66 S.; Wabern/Schweiz.

BOLLINGERFEHR, W., HEROLD, P., DÖRR, S. & FILBERT, W. (2014): Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte (ASteRix). Abschlussbericht. DBEtec.--, TEC-21-2013-AB: 140; Peine.

BRADSHAW, R. L. & MCCLAIN, W. C. (1971): Project Salt Vault: a demonstration of the disposal of high-activity solidified wastes in underground saltmines. Report ORNL-4555, UC-70 - Waste Disposal and Processing, Contract No. W-7405-eng-26, Oak Ridge National, Oak Ridge (Tennessee).

BRAITSCH, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. Berlin-Göttingen-Heidelberg (Springer), 232 pp.

BRASSER, T. & DROSTE, J. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland - Anhang Untertagelabore: Aufgabe und Zielsetzung von Untertagelaboren. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Kennzeichen 02E9783 und 02E9793, Anhang zu Bericht GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Braunschweig/Darmstadt.

BROOME, S.T., BAUER, S.J., HANSEN, F.D. & MILLS, M.M. (2015): Mechanical Response and Microprocesses of Reconsolidating Crushed Salt at Elevated Temperature. In Rock Mech. Rock Eng. DOI 10.1007/s00603-015-0840-9, Springer Verlag.

BRŮHA, P., DOBREV, D., POLÍVKA, P. & VOKÁL, A. (2010): Preliminary results of hydrogen evolution rate and transport properties in compacted bentonite. – FORGE Report D2.2, EURATOM

CAPORUSCIO, F. A., BOUKHALFA, H., CHESHIRE, M. C., JORDAN A. B. & DING M. (2013): Brine Migration Experimental Studies for Salt Repositories. Report for U.S. Department of Energy - Used Fuel Disposition Campaign, FCRD-UFD-2013-000204; Los Alamos National Laboratory.

CRISTESCU, N. & HUNSCHE, U. (1998): Time effects in rock mechanics. – Series: Materials, modelling and computation; 342 pp.; John Wiley & Sons, Chichester (UK).

DELAY, J., LEBON, P. & REBOURS, H. (2010): Meuse/Haute-Marne centre: next steps towards a deep disposal facility. - Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2 (1), 52–70.

DOBREV, D., STAMMOSE, D., PELLEGRINI, D. & VOKAL, A. (2013): FORGE Work Package 2 Final Report – Experimental Studies on Hydrogen Generation by Corrosion. – FORGE Report D2.5-R, EURATOM

DOHRMANN, R. & KAUFHOLD, S. (2014): Cation exchange and mineral reactions observed in MX 80 buffers samples of the prototype repository in situ experiment in Äspö, Sweden. *Clays and Clay Minerals*, 62, 357–373.

DUECK, A. (2014): Laboratory studies on stress-strain behavior. Report for the European Commission – European Research Area, European Atomic Energy Community's Seventh Framework Programme FP7/2007-2011, agreement n° FP7-249681, Deliverable D2.2-12.

EISENBURGER, D., KOß, G. & KOPIETZ, J. (1985): In-situ-Experiment zum Nachweis kritischer Spannungszustände (thermisch induzierte Rissbildung) – Teilprojekt Geophysik. Abschlussbericht BGR Hannover, Tgb.-Nr. 12532/85, Archiv-Nr. 98918, Hannover.

ENGELMANN, H.-J., LOMMERZHEIM, A., BIURRUN, E., HUBERT, R. & PÖHLER, M. (1995): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8371). Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers -- Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbh (DBE) DEAB T 57 Peine.

FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J. & MÖNIG, J. (2013): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.

FROMMEYER, G., GESSLER, K., GIES, H., LUTZE, W., MALOW, G. & WINSKE, P. (1982): Zulässige thermische Belastung in geologischen Formationen - Konsequenzen für die Methoden der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Band 3. Studie der Europäischen Atomgemeinschaft und der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms über „Bewirtschaftung und Lagerung radioaktiver Abfälle“, Veröffentlicht durch die Kommission der Europäischen Gemeinschaften - Generaldirektion wissenschaftliche und technische Information und Informationsmanagement, EUR 8179/3 DE, ISBN 92-825-3214-3, Luxemburg.

GARITTE, B., GENS, A., VAUNAT, J. & ARMAND, G. (2014): Thermal Conductivity of Argillaceous Rocks: Determination Methodology Using In Situ Heating Tests. – *Rock Mech. Rock Eng.*, 47: 111-129.

GAUS, I., GARITTE, B., SENGER, R., GENS, A., VASCONCELOS, R., GARCIA-SINERIZ, J.-L., TRICK, T., WIECZOREK, K., CZAIKOWSKI, O., SCHUSTER, K., MAYOR J.C., VELASCO M., KUHLMANN U. & VILLAR M.V. (2014): Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS - The HE-E Experiment: Lay-out, Interpretation and THM Modelling. Arbeitsbericht NAB 14-53, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

GAUS, I., WIECZOREK, K., SCHUSTER, K., GARITTE, B., SENGER, R., VASCONCELOS, R. & MAYOR, J.-C. (2014): EBS behaviour immediately after repository closure in a clay host rock: HE-E experiment B3/B50100-10/2014-0003/009

(Mont Terri URL). Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, 5th international meeting, Montpellier, October 22-25, 2012, Geological Society, London, Special Publications 400, first published March 7, 2014; doi 10.1144/SP400.11, 22

GRÄSLE, W., & PLISCHKE, I. (2010): LT Experiment: Mechanical Behavior of Opalinus Clay, Final report from Phases 6 – 14. – Technical Report TR 2009-07, 63 p + 19 p appendices, Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover.

GRUNDFELT, B. & CRAWFORD, J. (2014): The deep borehole concept. A conceptual model for gas generation and gas transport. – P-13-11, SKB, Stockholm

HAMPEL, A., HUNSCHE, U., PLISCHKE, I., & SCHULZE, O. (1996): Thermomechanisches Verhalten von Salzgesteinen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben BMBF-Förderkennzeichen 02 E 8542 0. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archiv-Nr. 0114805.

HANSEN, F. D. & LEIGH, C. D. (2011): Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste. Sandia report SAND2011-0161, Albuquerque, New Mexico.

HARRINGTON, J. F., VOLCKAERT, G., & NOY, D. J. (2014): Long-term impact of temperature on the hydraulic permeability of bentonite. Geological Society, London, Special Publications, 400(1), 589-601.

HEEMANN, U., KULL, H., LI, S., MIEHE, R. & MÜLLER, C. (2014): VIRTUS – Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz - Anhang B: Protokolle Literaturlauswertung der Daten zum thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialverhalten von Salzgesteinen und EBS-Materialien. Bericht GRS - 354 Anhang B, ISBN 978-3-944161-34-1.

HERBERT, H.-J., KASBOHM, J., VENZ, C., KULL, H., MOOG, H. & SPRENGER, H. (2002): Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen. Bericht GRS – 185, ISBN 3-931995-53-4, Braunschweig.

HERRMANN, A.G. (1981): Grundkenntnisse über die Entstehung mariner Salzlagerstätten. Der Aufschluss 32, 45-72.

HEUSERMANN, S., EISENBURGER, J., KOPIETZ, J. & MEISTER, D. (1991): Field measurements in a multiple heater test to study the thermal and thermomechanical response of rock salt. 3rd International symposium on field measurements in Geomechanics (FMGM-91), Oslo.

HICKS, T.W., WHITE, M.J. & HOOKER, P.J. (2009): Role of Bentonite in Determination of Thermal Limits on Geological Disposal Facility Design. Report 0883-1, Galson Sciences LTD, Version 2, 2009.

HUNSCHE, U., SCHULZE, O., WALTER, F. & PLISCHKE, I. (2003): Projekt Gorleben. Thermo-mechanisches Verhalten von Salzgestein. – Abschlussbericht: 157 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

IAEA (1987): In situ Experiments for disposal of radioactive wastes in deep geological formations. Report IAEA-TECDOC-446, International Atomic Energy Agency, Vienna.

JOCKWER, N. & WIECZOREK, K. (2002): Untersuchungen zur Gasfreisetzung und Wasserumverteilung im OPALINUS-Ton des Mont Terri - Beitrag zum Projekt: "Heater Experiment: Rock and Bentonite". Abschlussbericht GRS – 181, ISBN 3-931995-49-6, Braunschweig.

JOCKWER, N. & WIECZOREK, K. (2002): Measurements of gas generation, water content and change in the water distribution in a heater experiment in the underground laboratory Mont Terri. DisTec Conference on Radioactive Waste Disposal, April 26-28, 2004, Berlin.

JOCKWER, N., WIECZOREK, K. & FERNANDEZ, A. M. (2007): Measurements of gas generation, water content and change in the water distribution in a heater experiment in the underground laboratory Mont Terri. – Physics and Chemistry of the Earth **32**: 530–537

JOHNSON, L. H. (2006): Gas production and transport in the near field of SF and HLW repositories in clay and crystalline rocks: processes, uncertainties and performance assessment aspects. D-N° 5.1.6 of the NF-PRO project. – EU Contract N° F16W-CT-2003-02389

KARNLAND, O., OLSSON, S., DUECK, A., BIRGERSSON, M., NILSSON, U., HERNAN-HÅKANSSON, T., PEDERSEN, K., NILSSON, S., ERIKSEN, T.E. & ROSBORG, B. (2009): Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project, Final report on the A2 test parcel, TR-09-29, ISSN 1404-0344

KAUFHOLD, S. & DOHRMANN, R. (2010): Stability of bentonites in salt solutions II. Potassium chloride solution — Initial step of illitization? – Applied Clay Science, 49, 98 – 107.

KAUFHOLD, S. & DOHRMANN, R. (2010): Effect of extensive drying on the cation exchange capacity of bentonites. Clay Minerals, 45, 441-448.

KELM, M. & BOHNERT, E. (1997): Radiolysegasbildung durch γ -Strahlung in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle. – In: Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. Bericht über den GRS-Workshop vom 29. und 30. Mai 1996 in Braunschweig, zusammengestellt von I. Müller-Lyda.– GRS-129: A-43 - A-50; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.

- KERN, H. & FRANKE, J.-H. (1986): Carnallit – thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. – Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft 137, 1-27.
- KIENZLER, B. & LOIDA, A. (2001): Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651, 2001, ISSN 0947-8620, <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6651.pdf>
- KOBER, F. & GAUS, I. (2014): FEBEX- DP – Dismantling the “Full-scale Engineered Barrier Experiment” after 18 Years of Operation at the Grimsel Test Site, Switzerland. In: Fanghänel, S. (ed.): KIT Scientific Reports 7696, Key Topics in Deep Geological Disposal: Conference Report, Köln 2014. KIT, Karlsruhe.
- KRISTENSSON, O. & BÖRGESSON, L. (2015): Canister Retrieval Test - Final Report. – 79 S., Technical Report, Svensk Kärnbränslehantering AB; Stockholm.
- KRÖHN, K.-P., STÜHRENBERG, D., HERKLOTZ, M., HEEMANN, U., LERCH, C. & XIE, M. (2009): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz; Projekt REPOPERM - Phase 1. Bericht GRS-254, GRS Braunschweig, 2009. ISBN-Nr.: 978-3-939355-29-8.
- KUHLMANN, K. L. & MALAMA, B. (2013): Brine Flow in Heated Geological Salt. – Sandia Report SAND2013-1944: Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.
- KUHLMANN, K. L. (2014): Technical Basis for Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste in Salt. Presentation in U.S. Nuclear Waste Technical Review Board Meeting Albuquerque, New Mexico.
- KUHLMANN, K. L. (2015): Historic testing relevant to disposal of heat-generating waste in salt. Conference Paper April 2013. Repository Performance Department, Sandia National Laboratories, Carlsbad NM.
- LANGER, M. & HOFRICHTER, E. (1971): Gutachten über die Eignung von Salzstöcken des Rotliegenden zur Anlegung von Gas-Speicherkavernen. – Bericht, Tgb.Nr. 3050/70: 20 S., 1 Anl.; Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover.
- LANKOF, L. (2010): Analiza odkształcalności i utraty masy zębrow brunatnych w aspekcie składowania odpadów promieniotwórczych w środkowopolskich wysadach solnych. Studia rozprawy monografie 166, 69 pp., Polskiej Akademii nauk, Krakow.
- LANYON G.W. & GAUS I. (2013): Main outcomes and review of the FEBEX In Situ Test (GTS) and Mock-Up after 15 years of operation. Nagra Arbeitsbericht. NAB 13-096. Nagra, Wettingen.

MEISTER, D., HEUSERMANN, S., EISENBURGER, J. & KOPIETZ, J. (1991): Geotechnische und geophysikalische Untersuchungen zur thermomechanischen Reaktion des Gebirges bei der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 7. Internationaler Kongress über Felsmechanik, Kongressberichte Band 1, S. 121-126, Aachen.

MEISTER, D., JACOB, N., ANKE, G., HEIDRICH, D., SAMMER, K. & HEUSERMANN, S. (1985): Thermomechanische In-situ-Versuche zum Nachweis kritischer Spannungszustände (Rissbildung) – Teilprojekt Gebirgsmechanik. Abschlussbericht BGR Hannover, Tgb.-Nr. 12486, Archiv-Nr. 98873, Hannover.

MELLEGARD, K.D., CALLAHAN, G.D. & HANSEN, F.D. (2013): High-temperature characterization of bedded Permian salt. 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23-26 June 2013, San Francisco, California, American Rock Mechanics Association ARMA-2013-303.

MOHAJERANI, M., DELAGE, P., SULEM, J., MONFARED, M., TANG, A.M. & GATMIRI, B. (2012): A laboratory investigation of thermally induced pore pressures in the Callovo-Oxfordian Claystone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 52,112-121.

MUNSON, D. E., JONES, R. L., HOAG, D. L. & BALL, J. R. (1987): Heated Axisymmetric Pillar Test (Room H): In Situ Data Report (February 1985 - April 1987) - Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) - Thermal/Structural Interactions Program. Sandia Report SAND87-2488 – UC70, Albuquerque.

MUNSON, D. E. & TORRES, T. M. (1988): Results of a large, in situ, heated axisymmetric pillar test at the waste isolation pilot plant (WIPP). Key Questions in Rock Mechanics, Cundall et al. (eds.), ISBN 90-6191-835-9, Balkema, Rotterdam.

MUNSON, D.E., JONES, R.L., BALL, J.R., CLANCY, R.M., HOAG, D.L. & PETNEY, S.V. (1990): Overtest for Simulated Defense High-Level Waste (Room B): In Situ Data Report. WIPP, Thermal/Structural Interactions Program. SAND89-2671.

NAGRA (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 - Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. – NAGRA Technischer Bericht, NTB 10-01: 225 S. S.; Wettingen/Schweiz.

NDA (2010): Geological Disposal: Generic Disposal System Technical Specification, NDA Report. NDA/RWMD/044, 2010.

NIROND (2013): ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if

considered as waste. – State-of-the-art report, Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, NIROND-TR 2013-12 E.

NORRIS, S. (Hrsg.) (2010): FORGE Milestone M15. Summary of Gas Generation and Migration. Current State-of-the-Art. – EURATOM

OHATA, M.M. & CHANDLER, N.A. (1997): AECL'S Underground Research Laboratory: Technical Achievements and Lessons Learned. AECL-11760. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario.

ORTIZ, L., VOLCKAERT, G. & MALLANTS, D. (2002): Gas generation and migration in Boom Clay, a potential host rock formation for nuclear waste storage. – Engineering Geology, **64**: 287-296

RODWELL, W. R., HARRIS, A. W., HORSEMAN, S. T., LALIEUX, P., MÜLLER, W., ORTIZ AMAYA, L. & PRUESS, K. (1999): Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. – A Joint EC/NEA Status Report, European Commission Report EUR 19122 EN.

RODWELL, W. (2003): A Thematic Network on Gas Issues in Safety Assessment of Deep Repositories for Radioactive Waste (GASNET). – Contract No. FIKW-CT-2001-20165. Final Report. EURATOM

ROEDDER, E. & BELKIN, H.E. (1979): Application of studies of fluid inclusions in Permian Salado salt, New Mexico, to problems of siting the Waste Isolation Pilot Plant. In: G.J. McCarthy (Ed.), Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Vol. I, p. 313-321. Plenum Press, New York.

ROTHFUCHS, T., SCHWARZIANEK, P. & FEDDERSEN, H. (1984): Simulationsversuch im älteren Steinsalz Na₂ß im Salzbergwerk Asse - Temperaturversuchsfeld 4 (TVF4). Abschlussbericht zu den Teilvorhaben 1.1., 1.4. und 1.5, Vertrag Nr. 130-80-7 WASD, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH Institut für Tieflagerung, Braunschweig, Veröffentlicht durch Kommission der Europäischen Gemeinschaften Kernforschung und -technologie, Bericht EUR 9137 DE, ISBN 92-825-4289-0, EGKS-EWG-EAG, Brüssel.

ROTHFUCHS, T. (1986): Untersuchungen der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen - Temperaturversuchsfeld 5 im Salzbergwerk Asse. Vertrag Nr. 130-80-7 und 336-83-7 WASD, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH Institut für Tieflagerung, Braunschweig, Veröffentlicht durch Kommission der Europäischen Gemeinschaften Kernforschung und -technologie, Bericht EUR 10392 DE, EGKS-EWG-EAG, Brüssel.

ROTHFUCHS, T. & SCHWARZIANECK, P. (1988): Messung und Berechnung der Wasserfreisetzung beim Aufheizversuch TMV 5 auf der 850-m-Sohle im Salzbergwerk Asse. Abteilungsbericht des Instituts für Tief Lagerung 12/88, Auftragsnummer 2-705604, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, Braunschweig.

ROTHFUCHS, T., BUHMANN, D. & ZHANG C. L. (2010): Long-term safety analysis and model validation through URL research. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2 (1), p. 32-28.

RÜBEL, A., BUHMANN, D., MELESHYN, A., MÖNIG, J. & SPIESSL, S. (2013): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. GRS-303, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).

SCHÄFERS, A., GAUS, I., JOHNSON, L., LIU, Y., MAYOR, J. C., SELLIN, P. & WIECZOREK, K. (2014): PEBS - Final Scientific Report. Final Report for the European Commission – European Research Area, European Atomic Energy Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2011, agreement n° FP7-249681, Deliverable D5-16.

SCHLICH, M. (1986): Simulation der Bewegung von im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld. Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung München, GSF-Bericht 2/86, Neuherberg.

SCHULZE, O. (2002): Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. – Fachbericht. Auftragsnummer: 9Y3213030000. BGR

SCHULZE, O. & GRÄSLE, W. (2015): F+E Endlager: Ermittlung des thermomechanischen und hydraulischen Verhaltens von Salzgestein; Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das Deformationsverhalten – Ergebnisbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Archiv-Nr. 0133032.

SCHWARZKOPF, W., SMAILOS, E. & KÖSTER, R. (1988): In-Situ Corrosion Studies on Cast Steel for a High-Level Waste Packaging in a Rock Salt Repository. – In: *MRS Proceedings* (Vol. 127, p. 411). Cambridge University Press.

SIMPSON, J.P., SCHENK, R. & KNECHT, B. (1985): Corrosion rate of unalloyed steels and cast irons in reducing granitic groundwaters and chloride solutions, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management X*, Mat. Res. Soc. Sym. Proc. Vol. 50, L.O. Werme (Ed.), p. 429

SINGH, S.P., & SINGH, J. (2011): Temperature Dependence of Elastic Constants for Ionic Solids. *Journal of International Academy of Physical Sciences* 15, 369-377.

SMAILOS, E. & KÖSTER, R. (1987): Corrosion studies on selected packaging materials for disposal of high level wastes. – Materials Reliability in the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, 7-24.

SMAILOS, E., SCHWARZKOPF, W., KIENZLER, B. & KÖSTER, R. (1992): Corrosion of carbon-steel containers for heat-generating nuclear waste in brine environments relevant for a rock-salt repository. – Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 257, pp.399-406. Cambridge University Press

SMAILOS, E., GAGO, J. A., KURSTEN, B., MARX, G. & AZKARATE, I. (1997): Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers. – Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5889, Karlsruhe

SMAILOS, E., MARTINEZ-ESPARZA, A., KURSTEN, B., MARX, G. & AZKARATE, I. (1997): Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers. – Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6067, Karlsruhe

STAMMOSE, D. & VOKAL, A. (2002): FORGE WP2. Gas generation state of the art and WP2 experiment specifications. – FORGE Report D2.1, EURATOM

SVENSSON, D. (2015): Saponite formation in the ABM2 iron-bentonite field experiment at Äspö hard rock laboratory, Sweden. – Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, 6th International conference, Brussels, March 23-26.

THIENEL, K.-C.: Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens - Chemie und Eigenschaften mineralischer Baustoffe und Bindemittel. [HTML], Stand 2013, erreichbar unter: <https://www.unibw.de/werkstoffe/lehre/skripte/>.

VALLI, J., HAKALA, M., WANNE, T., KANTIA, P. & SIREN, T. (2014): ONKALO POSE Experiment – Phase 3: Execution and Monitoring. Working Report 2013-41. Posiva Oy, Olkiluoto.

VAN MARCKE, P. (2015): Preparation of the PRACLAY Heater Test switch-on: lessons learnt. Presentation LUCOEX Conference 2015.

VILLAR, M.V. & GÓMEZ-ESPINA, R. (2009): Report on thermo-hydro-mechanical laboratory tests performed by CIEMAT on FEBEX bentonite 2004-2008, Madrid, p. 67

VILLAR, M.V., GÓMEZ-ESPINA, R. & LLORET, A. (2010): Experimental investigation into temperature effect on hydro-mechanical behaviours of bentonite: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 2, p. 71-78.

VOLCKAERT, G. & MALLANTS, D. (1999): De gasproblematiek bij het bergen van radioactief afval in een diepe geologische berging in de klei van Boom. – SCK•CEN-R-3287.

WEBER, J. R., HAMMER, J. & SCHULZE, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), unveröffentl. Bericht, B3.2/B50123-09/2011-0001: 28 S.; Hannover.

WILEVEAU, Y. & SU, K. (2007): In situ thermal experiments carried out in opalinus clay and callovo-oxfordian claystones by ANDRA – Experiment set-up and measurement results. International Meeting Clays in Natural & Engineered Barriers for radioactive waste confinement, Lille.

WILEVEAU, Y. & ROTHFUCHS, T. (2007): THM behaviour of host rock (HE-D) Experiment: Study of Thermal effects on Opalinus Clay. Synthesis. - TR 2006-01, Mont Terri Project.

ZHANG, C.-L., ROTHFUCHS, T., JOCKWER, N., WIECZOREK, K., DITTRICH, J., MÜLLER, J., HARTWIG, L. & KOMISCHKE, M. (2007): Thermal Effects on the Opalinus Clay - A Joint Heating Experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terri URL (HE-D Project). Final Report GRS-224, ISBN 3-931995-98-4, Braunschweig.

ZHANG, C.L., ROTHFUCHS, T., SU, K. & HOTEIT, N. (2007): Experimental study of the thermo-hydro-mechanical behaviour of indurated clays. Physics and Chemistry of the Earth 32, 957–965.

ZHANG, C.-L., CZAIKOWSKI, O. & ROTHFUCHS, T. (2010): Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Clay Rock – GRS-266, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-42-7, 252 S.

ZHANG, F. (2011): Comportement mécanique des argilites de MHM – influences de la saturation, de la composition minéralogique et de la température. Thesis, Université Lille I, N° d'ordre 40687, 141 pp.

Anlage 1

**Beratungsunterlage zu TOP 1 des nichtöffentlichen Sitzungsteils
der 13. Sitzung am 21. Oktober 2015**

Pflichtenheft Literaturstudie „Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“

Verfasser: Min Wenzel, Niedersächsisches Umweltministerium
vom 14. Oktober 2015

14. Oktober 2015

Pflichtenheft Literaturstudie „Wärmeentwicklung- Gesteinsverträglichkeit“

I. Themenstellung allgemein

Ziel der Studie ist die umfassende Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes über die „Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit“ der Wirtsgesteine Salz, Ton/Tonstein und Kristallin, inklusive der in Rede stehenden geotechnischen Barrieren bei der Endlagerung von HAW-Abfällen und die daraus resultierende Festlegung einer Grenztemperatur für die thermische Beanspruchung. Unter „Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit“ wird dabei verstanden, wie sich Gesteine in ihrer Funktion als Barrieregestein bei Temperaturveränderung verhalten (z.B. durch Mineralumwandlungen, durch Thermomigration, bei Spannungs-/Verformungsänderungen usw.).

Der Fokus der Studie soll auf den o.g. Wirtsgesteinen liegen, wobei das Kristallin im Zusammenhang mit der in diesem Wirtsgestein zwingend notwendigen geotechnischen Barrieren abgehandelt werden soll. Vor allem durch die Arbeiten in der Schweiz und Schweden ist die Forschung für das Wirtsgestein Ton und für technische Bentonitbarrieren sehr weit fortgeschritten. Für das Wirtsgestein Salz hingegen sind grundsätzliche Fragen zu thermisch induzierten Prozessen gegenwärtig noch Gegenstand intensiver Diskussionen. Es sollen Wissenslücken in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit und die thermisch induzierten Prozesse aller Wirtsgesteine und der Forschungsbedarf zu ihrer Schließung benannt werden.

II. Einzelfragen / Pflichtenheft

Das Pflichtenheft ist aufgeteilt auf folgende Einzelfragen:

- (1) Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes in Bezug auf die „Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit“ der Wirtsgesteine Salz, Ton, und Kristallin und der in diesem Zusammenhang in Rede stehenden geotechnischen Barrieren anhand einer umfangreichen Literaturstudie
- (2) Aufzeigen von Wissenslücken in Bezug auf thermisch induzierte Prozesse in den jeweiligen Wirtsgesteinen/geotechnischen Barrieren und Nennung des Forschungsbedarfes zur Schließung der Wissenslücken

Bei allen Einzelfragen zu berücksichtigen

Insgesamt muss der Diskussionsstand in Deutschland und international behandelt werden. Insbesondere ist der

- Diskussionsstand in den USA, den Niederlanden und Deutschland in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Salz
- Diskussionsstand in der Schweiz, Belgien und Frankreich in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Tonformationen
- Diskussionsstand in der Schweiz, Schweden, Finnland, Belgien, Deutschland und Frankreich in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von geotechnischen Barrieren

zu betrachten. Sämtliche Ergebnisse müssen mit Quellen dokumentiert werden.

Einzelfrage 1: Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes

Darstellung des gegenwärtigen Kenntnisstandes in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Wirtsgesteinen und geotechnischen Barrieren an Hand einer ausführlichen Literaturstudie, insbesondere die Beantwortung folgender Fragen

- Wie ist der heutige Stand der Wissenschaft in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit von Ton/Tonstein, Salz, Kristallin und geotechnischen Barrieren?
- Welche Parameter und (wärmeinduzierten) Prozesse sind relevant für die Festlegung einer max. Grenztemperatur in den jeweiligen Wirtsgesteinen und geotechnischen Barrieren?
- Welche Einlagerungstemperaturen werden für welche Wirtsgesteine/technische Barrieren in nationalen und internationalen Fachkreisen benannt und für welchen Bereich des Endlagers werden diese maximalen Temperaturen festgelegt (z.B. Abfallbehälteraußenseite, Übergang Verfüllung/Wirtsgestein, innerhalb des ewG (einschlusswirksamen Gebirgsbereiches), innerhalb der geotechnischen Barriere)?
- Welche national und international relevanten in-situ/Laborversuche sind bekannt, welche Ergebnisse zur Temperaturverträglichkeit von Wirtsgesteinen/geotechnischen Barrieren im Kontext der Festlegung einer Grenztemperatur liefern?
- Inwieweit ist das Temperaturverhalten verschiedener Wirtsgesteine/geotechnischer Barrieren aus mineralogischer Sicht, insbesondere im Hinblick auf die beiden folgenden Fragen geklärt?
 - Ab wann kommt es zur Freisetzung von Kristallwasser?
 - Ab wann kommt es zu thermisch induzierten Mineralumwandlungen?
- Welche Erkenntnisse liegen zum Verhalten verschiedener Wirtsgesteine/geotechnischer Barrieren aus thermomechanischer Sicht vor?
 - Welche Erkenntnisse liegen über das Maß der Wärmeausdehnung vor? Ab wann kann mit einer thermisch induzierter Rissbildung gerechnet werden?
 - Gibt es Erkenntnisse über das Maß der Wärmeausdehnung der im Gestein vorhandenen Fluide und seine Auswirkung auf die Gesteinsintegrität?
 - Ab welcher Temperatur kommt es zu einer signifikanten Veränderung der Mineralparameter (z.B. Plastizität, Viskosität)?
 - Gibt es Erkenntnisse zur thermisch induzierten Gasbildung im Endlager und ihre Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität? Wenn ja, welche?
 - Inwieweit hat das Sieden von Gesteinsfluiden Auswirkungen auf die Gesteinsintegrität?
 - Ab wann kommt es zu thermisch induzierten hydrochemischen Prozessen, die in Bezug auf die Gesteinsintegrität im Sinne einer Barrierefunktion beachtet werden müssen?
- Inwieweit wurden Gesteinsinhomogenitäten und ihre Auswirkungen auf die thermische Belastbarkeit untersucht (z.B. lithologische Variationen im Ton, Auswirkungen von Salztonlagen oder z.B. Anhydritvorkommen im Salz)?
- In wieweit wurde die Abhängigkeit der thermischen Belastbarkeit der Wirtsgesteine/geotechnischen Barrieren vom Feuchtegehalt untersucht? Welche Auswirkungen hat erhöhter Feuchteeintrag durch z.B. Klüfte; Lösungseinschlüsse, Salzgrusversatz? Inwieweit kommt es zur thermisch induzierten Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) bei erhöhtem Feuchteeintrag?
- Auf welcher räumlichen Skala sind die oben benannten thermisch induzierten Prozesse von Bedeutung (Beeinflussung des Nahfeldes/des ewGs/bis zur Geländeoberfläche)?
- Gibt es Untersuchungen/Überlegungen zur technischen Machbarkeit der Rückholung in Bezug auf maximale Einlagerungstemperaturen und wenn ja, welche?

Einzelfrage 2: Aufzeichnung von Wissenslücken in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit der Wirtsgesteine und Benennung des Forschungsbedarfes zur Schließung der Wissenslücken

Darstellung der Wissenslücken und des Forschungsbedarfes in Bezug auf die unter Einzelfrage 1) aufgeworfenen Fragestellungen zur Temperaturverträglichkeit, insbesondere

- Welche Wissenslücken existieren für die einzelnen Wirtsgesteine?
- Inwieweit sind die unter Einzelfrage 1) aufgeführten Untersuchungen und wissenschaftlichen Abhandlungen aktuell und Stand von Wissenschaft und Technik?

Die Studie sollte eine abschließende Betrachtung enthalten, in der der bis dato benannte Forschungsbedarf in Bezug auf die Temperaturverträglichkeit aller drei Wirtsgesteine und der in Rede stehenden geotechnischen Barrieren dargestellt wird. Sollte aus der Bearbeitung der Einzelfragen unter 1) heraus neuer Forschungsbedarf identifiziert werden, sollte auch darauf hingewiesen werden.