

Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung

Untersuchungen zu den “maximalen physikalisch möglichen
Temperaturen” gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die
Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern –
Vorhaben 4717E03241

Auftragnehmer:
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

G. Bracke
E. Hartwig-Thurat
J. Larue
A. Meleshyn
T. Weyand



Bundesamt für
kerntechnische
Entsorgungssicherheit

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfE übereinstimmen.

BfE-RESFOR-003/19

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2019111520402

Salzgitter, November 2019

Untersuchungen zu den
“maximalen physikalisch
möglichen Temperaturen”
gemäß § 27 StandAG im
Hinblick auf die
Grenztemperatur an der
Außenfläche von Abfallbehältern

Guido Bracke
Eva Hartwig-Thurat
Jürgen Larue
Artur Meleshyn
Torben Weyand

Januar 2019

Auftrags-Nr.: 856505

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgung (BfE) unter den Kennzeichen 4717E03241 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Standortauswahlgesetz; Grenztemperatur; THMCB-Prozesse; Steinsalz; Tongestein; Kristallingestein; Rückholbarkeit; Bergung; Abfallbehälter

Kurzfassung

Der §27(4) des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG) sagt aus, dass *solange die „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen wird.* Diese „Grenztemperatur“ soll in vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen angewendet werden.

Diese Studie betrachtete thermohydraulische, mechanische, chemische und biologische Prozesse und Fragestellungen zur Rückholbarkeit und Bergung, ob daraus „Grenztemperaturen“ für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Ton- und Kristallingestein abgeleitet werden können.

Basierend auf FEP-Datenbanken wurden zahlreiche temperaturabhängige Prozesse identifiziert und im Hinblick auf die Ableitung einer „Grenztemperatur“ betrachtet. Die Wechselwirkung dieser Prozesse muss berücksichtigt werden, um eine „Grenztemperatur“ für die Außenfläche der Behälter zu bestimmen. „Grenztemperaturen“ bis in eine Größenordnung von 200 °C erscheinen machbar, aber eine konkrete Festlegung hängt stark vom gewählten Sicherheits- und Endlagerkonzept ab.

„Grenztemperaturen“ konnten nicht aus Fragestellungen zur Rückholbarkeit und Bergung abgeleitet werden, da technische Lösungen und Konzepte für eine Rückholung bis 200 °C mit unterschiedlichen Nachteilen machbar erscheinen. Jedoch müssen die technischen Lösungen und Konzepte für Behälter noch entwickelt werden und auf Anwendbarkeit geprüft werden.

Daher sollten „Grenztemperaturen“ für die Außenfläche von Abfallbehältern für das jeweilige Sicherheits-, Endlagerkonzept und Wirtsgestein abgeleitet werden. Eine generelle „Grenztemperatur“ könnte den Standortauswahlprozess wegen der eingeschränkten Möglichkeiten einer Optimierung des Endlagers erschweren.

Abstract

The §27(4) of the Act on the Search for and Selection of a Site for a Disposal Facility for High-Level Radioactive Waste (Site Selection Act - StandAG 2017) sets a draft temperature limit of 100°C on the outer surface of the containers with highly radioactive waste in a disposal facility. This draft limit shall be applied in preliminary safety analyses if the “maximum physically possible temperatures” in the respective host rocks have not yet been determined due to pending research work.

This study looked at thermohydraulic, mechanical, chemical and biological processes as well as at issues related to retrievability and recovery, and whether limiting temperatures can be deduced for disposal facilities in the host rocks rock salt, claystone and crystalline rock.

Based on FEP databases, several temperature-dependent processes have been identified and assessed for possible impacts to derive temperature limits from different components. The interactions of these processes must be considered to determine a temperature limit on the outer surface of the containers. Limiting temperatures to 200 °C could be feasible but a limiting temperature depends strongly on safety concept and design of the disposal facility.

No temperature limits could be deduced from issues of retrieval and recovery. Technical solutions for retrieval and design options for recovery seem to be viable up to 200 °C with different penalties. Technical solutions and design options for containers still must be developed and checked for their practicability.

Temperature limits on the outer surface of the containers should be derived for a specific safety concept for design of the disposal facility and the respective host rock. Any general temperature limits could hinder the site selection process due to the restricted possibilities of optimization of the disposal facility.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
	Abstract	II
	Inhaltsverzeichnis	II
1	Einleitung und Zielsetzung	8
2	Vorgehensweise	10
3	Grundlagen	12
3.1	Begriffe	12
3.1.1	„Grenztemperatur“	12
3.1.2	„Auslegungstemperatur“	13
3.1.3	Abwägungskriterien	13
3.1.4	Rückholbarkeit, Bergung/Handhabbarkeit.....	15
3.2	Komponenten eines Endlagers	17
3.3	Temperaturfeldberechnungen.....	19
4	Nationale Regelwerke mit Bezug zu Temperaturen und Rückholbarkeit/Bergung	24
4.1	Deutschland.....	24
4.2	Belgien	27
4.3	Finnland.....	27
4.4	Frankreich.....	29
4.5	Niederlande	31
4.6	Schweden.....	32
4.7	Schweiz	34
4.8	USA.....	36
4.9	Erkenntnisgewinn aus den nationalen Regelwerken	37

5	Endlagerkonzepte und Temperaturfestlegungen	39
5.1	Deutschland.....	39
5.2	Belgien	45
5.3	Finnland.....	49
5.4	Frankreich.....	50
5.5	Niederlande	52
5.6	Schweden.....	53
5.7	Schweiz	56
5.8	USA.....	58
5.9	Sonstige Länder	59
5.10	Erkenntnisgewinn aus nationalen Endlagerkonzepten	62
6	Temperaturabhängige THMCB-Prozesse und Eigenschaften	66
6.1	Wirtsgestein Steinsalz	67
6.1.1	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden (u. a. Perkolation).....	71
6.1.2	Kompaktion von Salzgrusversatz.....	75
6.1.3	Konvergenz (Salzkriechen).....	78
6.1.4	Mikrobielle Prozesse.....	80
6.1.5	Thermische Zersetzung von Mineralen	82
6.1.6	Thermische Expansion des Wirtsgesteins.....	87
6.1.7	Thermische Materialeigenschaften	89
6.1.8	Thermomigration.....	92
6.1.9	Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Steinsalz.....	92
6.2	Wirtsgestein Tongestein	96
6.2.1	Auflösung, Umwandlung und Neubildung von Tonmineralen	98
6.2.2	Auflösung, Umwandlung und Neubildung von sonstigen Mineralen	102
6.2.3	Chemische Alteration von Organika.....	105
6.2.4	Kolloidbildung und -filtration	106
6.2.5	Mikrobielle Prozesse.....	106
6.2.6	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	109
6.2.7	Sorption und Desorption	110
6.2.8	Thermische Expansion oder Kontraktion	111

6.2.9	Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Tongestein.....	114
6.3	Wirtsgestein Kristallingestein	117
6.3.1	Hydrothermale Alterationsprozesse in verfüllten Klüften (Wirtsgestein) .	118
6.3.2	Einzelprozesse in Endlagerkonzepten im Kristallingestein	121
6.3.3	Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Kristallingestein	123
6.4	Wirtsgesteinsübergreifende THMCB-Prozesse	125
6.4.1	Korrosionsprozesse	125
6.4.2	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	130
6.4.3	Thermochemische Sulfatreduktion.....	131
6.4.4	Verdampfen von Wasser	132
6.4.5	Erkenntnisgewinn: Wirtsgesteinsübergreifende Prozesse	133
7	Rückholbarkeit, Bergung/Handhabbarkeit.....	134
7.1	Bewetterung	135
7.2	Behälter	139
7.3	Rückholtechnik	141
7.4	Flächenbedarf.....	142
7.5	Erkenntnisgewinn	145
8	Auswertung von Einzelfragestellungen in Bezug auf die Festlegung einer Grenztemperatur.....	152
8.1	Wie kann eine maximale „Grenztemperatur“ an der Außenfläche der Abfallbehälter begründet werden?	152
8.2	Gibt es Temperaturen, unterhalb derer keine negativen Auswirkungen auf die Barrieren zu erwarten sind?	155
8.3	Gibt es Temperaturen in für Endlager relevanten Bereichen, bei deren Überschreitung mit nicht tolerierbaren Umwandlungen/Prozessen in den Barrieren zu rechnen ist?	157
8.4	Gibt es umgekehrt Temperaturen, bei deren Unterschreitung mit ungünstigen Auswirkungen durch biologische, chemische, physikalische Prozesse und mit negativen Auswirkungen auf die Endlagersicherheit zu rechnen ist?	158

8.5	Ist es sinnvoll, Grenztemperaturen für unterschiedliche Zeitabschnitte zu definieren, z. B. wie in Frankreich?	158
8.6	Welche Annahmen zu Grenztemperaturen werden in Endlagerprojekten anderer Staaten zu Grunde gelegt? Lassen sich diese auf Deutschland übertragen?	159
8.7	Gibt es regulatorische Festlegungen zu Grenztemperaturen in anderen Ländern? Lassen sich diese auf mögliche Standorte in Deutschland übertragen?	159
8.8	Welche Rolle spielt die Wärmeverträglichkeit von Versatzmaterial bei der Festlegung der Grenztemperatur? Inwiefern besteht die Möglichkeit zur Optimierung in der Zusammensetzung von Versatzmaterial?.....	160
8.9	Welche THMCB-Prozesse sind für Schlussfolgerungen in Bezug auf die wissenschaftliche Begründung von Grenztemperaturen für die jeweiligen potentiellen Wirtsgesteine hinreichend bekannt und wo besteht noch Forschungsbedarf?.....	161
8.10	Welche Konsequenzen können sich aus den betrachteten temperaturabhängigen Prozessen für die Endlagersicherheit ergeben?	162
8.11	Sind noch wesentliche offene Fragen hinsichtlich der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach StandAG in Bezug auf §27 (4) zum derzeitigen Stand von W&T erkennbar? Sind die Kenntnislücken für die Festlegung von Anforderungen an Grenztemperaturen relevant?	163
8.12	Wie wirken sich unterschiedliche „Grenztemperaturen“ auf die „Rückholbarkeit/Bergung“ der Abfallbehälter aus? (Dauer, Höhe, Lage, Endlagerauslegung, Abhängigkeiten)	164
8.13	Welche Probleme können bei welchen „Grenztemperaturen“ hinsichtlich der Handhabbarkeit bei einer möglichen Rückholung oder Bergung der Abfallbehälter entstehen? (Rechtliche und betriebliche Randbedingungen, Behälterintegrität, Korrosion, Stabilität)	166
8.14	Welche hinsichtlich der „Rückholbarkeit/Bergung“ relevanten Wechselwirkungen können bei den unterschiedlichen Versatzmaterialien an der Außenfläche der Abfallbehälter auftreten? (Gestein, Funktion, zeitliche Veränderungen, Einspannung, Endlagerkonzept).....	168

8.15	Gibt es offene sicherheitsrelevante Fragestellungen in Zusammenhang mit der Grenztemperatur, die eine Rückholbarkeit, Bergung und Handhabbarkeit der Abfallbehälter hochradioaktiver Abfälle nach Verschluss des Endlagers im Zeitraum von 500 Jahren gefährden könnten? (Szenarien, Brand- und Explosionsschutz, Veränderungen, Freisetzung von Radionukliden, Transportfähigkeit, Machbarkeitsnachweis)	169
9	Zusammenfassung	173
10	Summary	179
11	Abbildungsverzeichnis.....	185
12	Tabellenverzeichnis.....	189
13	Literaturverzeichnis.....	190
A	Detaillierte Beschreibung einiger THMCB-Prozesse im Tongestein	252
B	Beschreibung weiterer temperaturabhängiger FEP	287
C	Tabelle der THMCB-Prozesse	307
D	Temperaturen zur Endlagerauslegung im internationalen Vergleich	318
Anlage 1	Erstellung einer Literaturlistenbank zur Grenztemperatur und zur Rückholbarkeit (Bergbarkeit) und Handhabbarkeit der Abfallbehälter.....	321

1 Einleitung und Zielsetzung

Die derzeitige, vorläufige Vorgabe einer „Grenztemperatur“ von 100 °C an der Außenfläche der Abfallbehälter von hoch radioaktiven Abfällen im Standortauswahlgesetz (StandAG § 27 (4) /STA 17/) basiert auf einer entsprechenden Empfehlung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ /KOM 16/. Diese Empfehlung wurde ausdrücklich als vorläufige Vorgabe formuliert und war Gegenstand abweichender Meinungen /FIS 16/, /KUD 16/. Die vorläufige Vorgabe aus Vorsorgegründen wurde von Experten bei einer Anhörung im Umweltausschuss des Deutschen Bundestages als nicht zielführend kritisiert /REI 17/. Niedrigere Temperaturen unterhalb von 100 °C seien in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Endlagerkonzepten nicht ausschließlich sicherheitstechnisch vorteilhaft /RÖH 17/. Vielmehr sollten wirtsgesteins- und konzeptspezifisch Vor- und Nachteile transparent dargelegt werden, die bei der Umsetzung verschiedener Konzepte jeweils unterschiedliche begrenzende Temperaturen ergeben können. Dadurch soll sichergestellt werden, dass kein potentieller Standort vorab aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen wird /WAT 17/. Daher wurde auch von /REI 17/ und /RÖH 17/ empfohlen den Paragraphen § 27 (4) ersatzlos zu streichen.

Da die Vorgabe einer Temperatur an der Außenfläche der Behälter im StandAG starke Auswirkungen auf die Standortauswahl (Raumbedarf des Endlagerbergwerkes, Mächtigkeit des ewG), die zukünftigen Endlagerkonzepte und die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in allen Wirtsgesteinen haben kann, wurde in /RÖH 17/ eine Intensivierung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Thematik „Grenztemperaturen“ empfohlen, zusätzlich zu den Veröffentlichungen sowie Studien für die Wirtsgesteine Steinsalz, Ton- und Kristallingestein, die bereits eine Wärmeverträglichkeit potentieller Wirtsgesteine in Deutschland untersucht und analysiert haben /JEN 02/, /MEL 16/, /ESK 16/, /BRÄ 16/, /BUR 16/, /JOB 15a/.

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat zum Ziel auf Basis einer Literaturrecherche eine Grundlage für die Bewertung der gemäß § 27 StandAG “maximalen physikalisch möglichen Temperaturen” im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern zu liefern. Hierfür ist die Kenntnis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) hinsichtlich der Auswirkungen des Wärmeeintrags der Abfallgebinde im Endlagerbergwerk und der resultierenden Temperaturen für folgende Aspekte erforderlich:

- relevante temperaturabhängige und gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische-biologische Prozesse (THMCB-Prozesse) und
- Rückholbarkeit, Bergung¹/Handhabbarkeit der Abfallbehälter.

Es soll aufgezeigt werden, welche Prozesse im Hinblick auf die Wärmeverträglichkeit der Endlagerkomponenten (wie z. B. Behälter, geotechnische Barrieren, Wirtsgestein) besonders zu betrachten sind, und darüber hinaus deren Relevanz nach Stand von W&T für die Betriebs- und Langzeitsicherheit eines Endlagers bewertet werden.

Dabei sollen Erkenntnisse und Festlegungen anderer Länder berücksichtigt und bewertet werden, inwiefern deren Festlegungen und Anforderungen für potentielle Endlagerkonzepte in Wirtsgesteinen in Deutschland anwendbar sind.

Abschließend soll ein Ausblick auf die Auswirkungen der Vorgabe einer „*Grenztemperatur*“ für mögliche Endlagerkonzepte in Deutschland gegeben werden.

¹ Im Folgenden werden die Begriffe „Rückholbarkeit“ und „Bergung“ entsprechend /BMU 10/ statt „Rückholbarkeit/Bergbarkeit“ verwendet. Siehe auch Kap. 3.1.4.

2 Vorgehensweise

Das Forschungsvorhaben soll den aktuellen Stand von W&T zur Wärmeverträglichkeit der potentiellen Wirtsgesteine in Deutschland, hier Steinsalz, Ton- und Kristallingestein, und möglichen sicherheitsrelevanten temperaturabhängigen Prozessen dokumentieren. Hierfür soll vor allem Literatur recherchiert und ausgewertet werden, die einen Bezug zu den sicherheitsrelevanten Konsequenzen einer Temperaturerhöhung (bzw. Temperaturänderung) in den geotechnischen Barrieren sowie potentiellen Wirtsgesteinen für ein Endlager aufweist. Darüber werden Forschungsstudien erfasst, die sich mit den möglichen bestehenden bzw. durch Wärmeeinwirkungen entstehenden thermo-hydraulisch-mechanisch-chemisch-biologisch gekoppelten Prozessen (THMCB) befassen. Weitergehend wird ausgehend vom Stand von W&T auch die Temperaturbedingungen für die „Rückholbarkeit, Bergung/Handhabbarkeit“ der Abfallbehälter dargestellt. Mithilfe der Ergebnisse der Literaturlauswertung wird die Relevanz für die Betriebs- und Langzeitsicherheit bewertet bzw. dargestellt.

Die recherchierte Literatur wird in einer Literaturdatenbank mittels der Software Citavi /CIT 17/ erfasst und dokumentiert. Die Literaturstellen werden fachlich-wissenschaftlich gesichtet und nach aussagekräftigen Schlagwörtern sortiert. Die Methodik der Verschlagwortung und die Herleitung und Gruppierung der Schlagworte wird in Anlage 1 erläutert. Soweit vorhanden werden DOI- bzw. ISBN-Nummern der Literaturstellen bzw. die Internetquelle angegeben. Unveröffentlichte bzw. kostenpflichtige Literaturstellen sind in der Datenbank kenntlich gemacht. Die Literaturdatenbank enthält sowohl die Literatur, die für die Bearbeitung der Fragen nach der Festlegung einer wirtsgesteinsspezifischen Grenztemperatur der Abfallbehälter im Vorhaben herangezogen wurde, als auch ergänzende Literatur. Insbesondere wurden Literaturstellen aufgenommen, die im Zusammenhang mit temperaturabhängigen THMCB-Prozessen stehen und die für die Langzeitsicherheit eines Endlagers sowie Anforderungen an die Rückholbarkeit/Handhabbarkeit der Abfallbehälter als relevant angesehen wurden.

Kap. 3 erläutert die in dieser Studie und auch in der Literatur verwendeten Begrifflichkeiten (Kap. 3.1) sowie die zum Verständnis notwendigen Grundlageninformationen zum Aufbau eines Endlagers (Kap. 3.2) mit Temperaturfeldberechnungen (Kap. 3.3).

In Kap. 4 werden die nationalen Regelwerke anderer Länder hinsichtlich Temperaturfestlegungen ausgewertet und in Kap. 5 der aktuelle Stand von Endlagerkonzepten

hinsichtlich ihrer Temperaturlauslegung beschrieben. In beiden Kapiteln wird die Vorgehensweise der anderen Länder bzgl. Temperaturfestlegungen mit der Vorgehensweise im Standortauswahlverfahren in Deutschland verglichen und bewertet.

Kap. 6 stellt die aus der derzeitigen Sicht relevanten temperaturabhängigen THMCB-Prozesse und Eigenschaften auf Basis von FEP-Katalogen dar und bewertet diese hinsichtlich ihrer Temperaturabhängigkeit und Einfluss auf die Langzeitsicherheit. Diese werden wirtsgesteinsspezifisch sortiert beschrieben und für jedes Wirtsgestein der Erkenntnisgewinn zusammengefasst.

Kap. 7 stellt die Zusammenhänge zwischen Temperaturanforderungen und der Rückholbarkeit/Bergung dar. Die wesentlichen einzelnen temperaturbeeinflussten Aspekte werden genannt und hinsichtlich ihrer Wechselwirkung diskutiert.

In Kap. 8 werden die in der Leistungsbeschreibung formulierten Einzelfragen mit einer Bewertung beantwortet. Eine mögliche methodische Vorgehensweise zur Bestimmung einer „*Grenztemperatur*“ wird mit der ersten Einzelfrage (Kap. 8.1) skizziert.

Die Ausweisung des Forschungsbedarfes nach aktuellem Kenntnisstand von Wissenschaft und Technik erfolgt in den jeweiligen Kapiteln bzw. zusammenfassend mit der elften Einzelfrage (Kap. 8.11).

3 Grundlagen

3.1 Begriffe

3.1.1 „Grenztemperatur“

Das StandAG spezifiziert in § 27 (4), dass „aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen“ werden soll, „solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind“. Im besonderen Teil der Beschlussvorlage /BUND 17/ zum StandAG wird ausgeführt, dass § 27 (4) Vorgaben für die den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu Grunde zu legenden Annahmen über die bei der Einlagerung einzuhaltende enthält. Es handelt sich somit nicht um eine „maximale physikalische“ Temperatur², sondern um die Vorgabe einer Temperatur an der Außenfläche der Behälter zum Umgebungsmaterial, deren Überschreitung durch Berücksichtigung entsprechender technischer Maßnahmen (Behälterbeladung, Behältergröße, Behälterlagerung) in der Planung eines Sicherheitskonzepts und in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ausgeschlossen werden soll.

Die im StandAG genannte „Grenztemperatur“ von 100 °C stellt eine regulatorische Vorgabe dar. Die Vorgabe wird im § 27 (4) mit einer Vorsorge begründet. Die Art der Vorsorge mit Begründungen sind allerdings weder im StandAG noch im besonderen Teil der Beschlussvorlage näher ausgeführt worden. Auch im Abschlussbericht der Endlagerkommission werden die Vorsorge und die Gründe nicht näher erläutert. Aus der Formulierung kann jedoch geschlossen werden, dass für höhere Temperaturen allgemein ungünstige sicherheitstechnische Auswirkungen erwartet werden. Diese könnten z. B. den Nachweis der Langzeitsicherheit, der Betriebssicherheit, der Rückholbarkeit oder die Bergung betreffen.

² Der Begriff „maximale physikalische Temperatur“ ist allein genommen interpretierfähig, da die Temperatur wissenschaftlich gesehen theoretisch beliebig groß werden kann und es eine „physikalische“ Begrenzung der Temperatur nicht gibt. Daher ist vielmehr davon auszugehen, dass mit den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen“ bezogen auf die Außenfläche des Behälters Temperaturwerte gemeint sind, die bezogen auf ein Wirtsgestein und ein Endlagerkonzept aufgrund sicherheitstechnischer Untersuchungen festgelegt werden sollen.

Das StandAG sieht vor, dass die vorsorgliche Festlegung der „*Grenztemperatur*“ auf 100 °C für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die jeweiligen Wirtsgesteine aufgrund von Ergebnissen aus weiteren Forschungsarbeiten geändert werden kann. Die Vorgabe des StandAG lässt somit die Möglichkeit zu, dass zu einem späteren nicht näher bestimmten Zeitpunkt aufgrund von Forschungsarbeiten (bzw. deren Ergebnissen) eine geänderte „*maximale physikalische Temperatur*“ wirtsgesteinsspezifisch festgelegt werden kann.

In diesem Bericht wird der Begriff „*Grenztemperatur*“ aus dem StandAG nur in Bezug auf die Temperatur an der Außenfläche der Behälter in einem Endlager verwendet.

3.1.2 „Auslegungstemperatur“

Der Begriff „Auslegungstemperatur“ steht für eine (notwendige) Vorgabe von Temperaturen, die für die technische Planung und Optimierung zur Auslegung eines Endlagers (Endlagerauslegung) angenommen werden, um einerseits einen reibungslosen und sicheren Betrieb zu erreichen und andererseits Überlegungen zur Langzeitsicherheit einbeziehen zu können. Es kann sich um Temperaturen oder Temperaturbereiche handeln, die in bestimmten Anlagenbereichen oder -teilen und in bestimmten Zeiträumen nicht über- oder unterschritten werden sollten. Auslegungstemperaturen müssen nicht mit der „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche der Behälter übereinstimmen, die im StandAG allein aus Überlegungen zur Langzeitsicherheit (Vorsorgegründe) als Grundlage für vorläufige Sicherheitsanalysen gefordert ist.

3.1.3 Abwägungskriterien

Das StandAG nimmt im § 24 (5) Bezug auf sicherheitsrelevante Eigenschaften, die anhand verschiedener Kriterien beurteilt werden. Diese Kriterien werden in den Anlagen 7 bis 11 des StandAGs festgelegt. Zu diesen Kriterien gehört die Temperaturverträglichkeit. Die Anlage 8 führt dazu aus:

Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen.

Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.

Das Kriterium der Temperaturverträglichkeit gilt auch für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der in der Regel Teil des Wirtsgesteins ist, und somit auch für § 27 (4).

Dieses Kriterium wurde im besonderen Teil der Beschlussvorlage /BUND 17/ zum StandAG folgendermaßen erläutert.

Das Abwägungskriterium nach Anlage 8 zu § 24 (5) StandAG, erfasst das Verhalten des Gesteines im Endlagerbereich bei Temperaturänderungen.

Da durch die Temperaturänderungen in geotechnischen Barrieren und umgebendem Gebirge Prozesse mit unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit ausgelöst, beschleunigt oder verstärkt werden können, sind Festlegungen von wirtsgesteinsspezifischen oder gar allgemein gültigen Grenztemperaturen und ihre Anwendung zur zuverlässigen Vermeidung nachteiliger Konsequenzen für die Endlagersicherheit nur bedingt geeignet.

Aus den Erläuterungen der Beschlussvorlage zu § 27 (4), ergibt sich somit ein **Widerspruch** zu § 24 (5), der eine „Grenztemperatur“ - wenn auch nur vorläufig - festlegt. Die Beschlussvorlage erläutert weiterhin, wie die Auswirkungen des Wärmeeintrags ermittelt und bewertet werden können.

Ferner wird auf Regelungen zur Festlegung der „Grenztemperatur“ auf den § 26 (5) verwiesen. Dort werden die Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der Auslegung benannt, die sich auf eine zu verabschiedende Verordnung beziehen.

In der Praxis werden daher im Rahmen von im Verfahrensablauf standortspezifisch zu verfeinernden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen modellmäßige Betrachtungen beziehungsweise (gekoppelte) Modellrechnungen zu Intensität und Reichweite der thermischen, mechanischen und hydraulischen Auswirkungen des Wärmeeintrags durchzuführen sein, um auf der Basis der Ergebnisse den Wärmeeintrag mit den Abfällen steuern und seine Auswirkungen beherrschen zu können.

Bewertungsgrundlage ist der Funktionserhalt der Barrieren des Endlagersystems bei Temperaturänderungen in Folge des Einbringens von hochradioaktiven Abfällen, soweit dieser zuverlässig prognostiziert werden kann.

Hinsichtlich der für die Auslegung des Endlagers zugrunde zu legenden Grenztemperaturen gelten die Regelungen nach § 26 (3) (Sicherheitsanforderungen).

Diese Sicherheitsanforderungen sind noch nicht verabschiedet und befinden sich aktuell in Bearbeitung.

3.1.4 Rückholbarkeit, Bergung/Handhabbarkeit

Die Rückholbarkeit wird international als eine Option in der Endlagerung radioaktiver Abfälle behandelt, die eine geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der Abfälle aus dem Endlager beschreibt, die unterschiedlich begründet wird. Seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts haben viele Organisationen und Institutionen, die sich mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle befassen, intensiv die Frage der Rückholbarkeit (retrievability) und der Frage der Rücknahme von Entscheidungen bei der Errichtung eines Endlagers (reversibility) diskutiert /GRU 00/, /IAEA 00/, /IAEA 09/, /IAEA 07/, /NEA 01/, /NEA 10/, /NEA 11/ /OECD 12/, /OECD 15/. Auf nationaler Ebene hat die Rückholbarkeit Eingang in die länderspezifischen Regularien und Entsorgungsprogramme gefunden (s. Kap. 4 und Kap. 5). Die Gründe für die Rückholbarkeit können vielfältig sein. Sie basieren im Wesentlichen auf dem ethischen Prinzip, dass andere Generationen in naher oder ferner Zukunft die Möglichkeit haben sollten, die von der heutigen Generation getroffenen technischen Entscheidungen (Wahl der Abfallbehandlung, Art der Endlagerung) neu zu prüfen, zu bewerten und auch die Freiheit haben zu einer anderen Wahl zu kommen. Die Gewährleistung einer Rückholbarkeit kann die Akzeptanz eines Endlagerstandorts bei der Bevölkerung erleichtern.

Unter **Rückholbarkeit** (international: retrievability) ist nach § 2 StandAG /STA 17/ und BMU Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase zu verstehen. Rückholung (retrieval) bezeichnet den aktiven Vorgang der Entnahme von Abfallbehältern aus dem Endlager während der Betriebszeit.

Der Begriff **Bergbarkeit** wird weder in /STA 17/ noch in /BMU 10/ verwendet oder definiert. Als **Bergung** (recovery) wird nach § 2 StandAG /STA 17/ das ungeplante

Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager definiert. Nach /BMU 10/ bedeutet **Bergung**, das Herausholen der Abfälle nach Verschluss des Endlagers im Sinne einer Notfallmaßnahme und definiert als einzige Anforderung die Handhabbarkeit der Abfälle für diese Maßnahme:

„Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.“ /BMU 10/

D. h. die **Bergung** wird in /BMU 10/ als eine Planungsvoraussetzung auf die Handhabbarkeit der Behälter heruntergebrochen und muss in der Planung selbst lediglich hinsichtlich der Integrität des Behälterkonzepts berücksichtigt werden. Der Begriff Bergbarkeit bleibt weitgehend³ undefiniert und wird deshalb nicht weiterverwendet.

Für die Vergleichbarkeit für den in internationalen Studien verwendeten englischen Begriff „retrievability“ wird in dieser Studie der Begriff „Rückholbarkeit“ als übergeordneter gemeinsamer Begriff verwendet. Sachverhalte, die sich entsprechend des Verständnisses der deutschen Unterteilung auf Bergung beziehen, werden explizit hervorgehoben.

Die Zeiträume für eine Rückholoption sind international uneinheitlich. In Deutschland wird entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ und den Empfehlungen der Endlagerkommission zwischen Rückholung und Bergung der radioaktiven Abfälle unterschieden:

- Die **Rückholung** bezieht sich auf den Zeitraum der Betriebsphase und einer möglichen Offenhaltungsphase eines Endlagers.
- Die **Bergung** bezieht sich auf einen bestimmten Zeitraum in der Nachbetriebsphase nach vollständigem Verschluss des Endlagers. Bergung bezieht sich nach /BMU 10/ auf eine notwendige Intervention im Sinne einer Notfallmaßnahme.

Diese **Unterscheidung** nach Rückholbarkeit und Bergung auf Grund des zu betrachtenden Zeitraums für diese Option gibt es in dieser Form **ausschließlich** in Deutschland.

³ Der Vorschlag zur Definition in /KUD 15/ wurde im Kommissionsbericht nicht übernommen.

Die Zeiträume, für die eine Rückholung der radioaktiven Abfälle gewährleistet sein soll, unterscheiden sich international z. T. deutlich. Einige Konzepte sehen eine Rückholbarkeitsoption nur bis zum Verschluss des Endlagers vor, andere betrachten darüber hinaus deutlich längere Zeiträume einer Offenhaltungsphase des Endlagers /KOM 16/. Weiterhin bezieht sich die Rückholung auf eine Zurücknahme der Einlagerung von Abfällen aus verschiedenen Gründen (Rücknahme aufgrund von Fehlern während der Betriebszeit, bessere Entsorgungsmöglichkeit bzw. verändertes Systemverhalten zur Prognose).

In Abb. 3.1 sind die Zeiträume aufgezeigt, die in Deutschland für die Rückholbarkeit und Bergung der endgelagerten Abfälle vorzusehen sind. Zusätzlich sind die Meilensteine aus dem Standortauswahlgesetz /STA 17/ eingefügt:

- Festlegung des Endlagerstandorts 2031,
- Geplante Inbetriebnahme des Endlagers 2050,
- Offenhaltungsphase zur Beobachtung der Endlagerentwicklung.

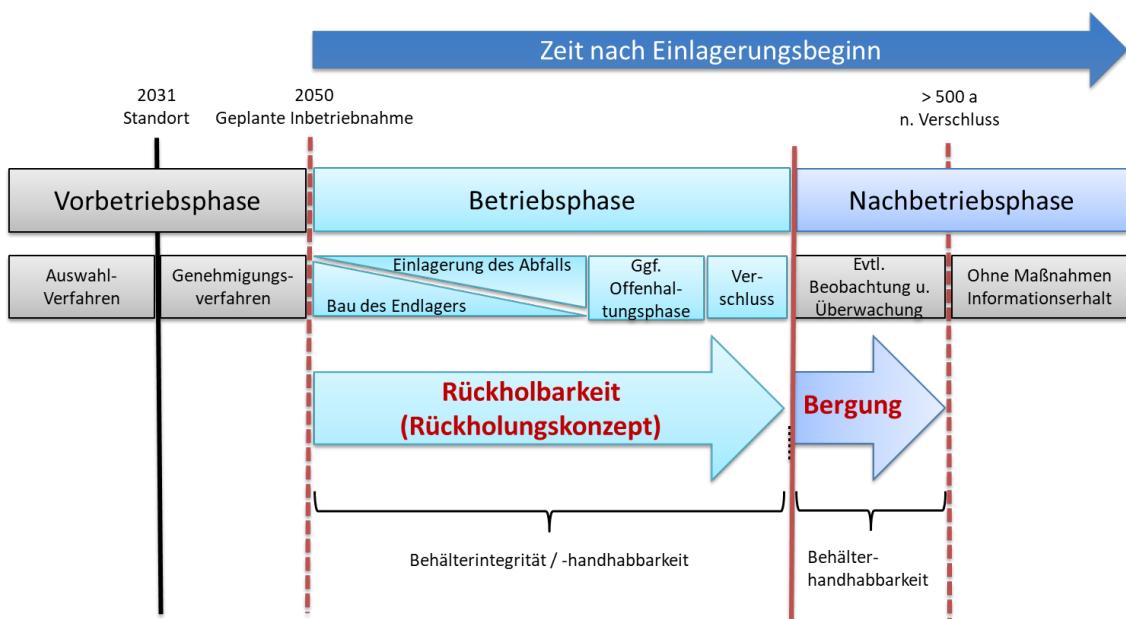


Abb. 3.1 Zeiteinordnung von Rückholbarkeit und Bergung

3.2 Komponenten eines Endlagers

Das StandAG bezieht sich in § 27 (4) auf eine Temperaturbegrenzung mit dem Bezugspunkt an der Außenfläche eines Behälters. Temperaturbegrenzungen können aus sicherheitstechnischer Sicht allerdings nicht nur an der Außenfläche der Behälter, sondern

auch an anderen Bezugspunkten begründet sein. Als Bezugspunkte werden häufig sog. **Endlagerkomponenten** (wie z. B. die Außenfläche eines Behälters) verwendet. Die Endlagerkomponenten können einem Temperatureinfluss durch den Wärmeeintrag der hoch radioaktiven Abfälle unterliegen. Zum Verständnis der temperaturabhängigen Prozesse und Eigenschaften (s. Kap. 6) bzw. deren Bezug werden im Folgenden wesentliche Endlagerkomponenten genannt, die sich an gängigen Begrifflichkeiten nach /FIS 10/, /FIS 17/ orientieren. Die Endlagerkomponenten dienen auch der Sortierung und Verschlagwortung der Literaturzitate in Citavi (s. Anlage 1). Entsprechend eines Schalenmodells werden zunächst die klein- und anschließend die großskaligen Endlagerkomponenten benannt.

Abfall bezeichnet die einzulagernden hoch radioaktiven Abfälle. Zu diesen gehören im Wesentlichen abgebrannte Brennelemente mit Brennstäben und verglaste hochradioaktive Abfälle. Der Abfall stellt infolge des radioaktiven Zerfalls die Wärmequelle in einem Endlager dar, wodurch es zu einem Wärmeeintrag in das Wirtsgestein kommt und somit die Gebirgstemperatur im Wirtsgestein ansteigt.

Die hoch radioaktiven Abfälle werden in **Behältern** im Endlagerbergwerk eingelagert, die in Abhängigkeit vom Konzept verschiedene Anforderungen z. B. hinsichtlich Stabilität gegen Korrosion, mechanische Einwirkungen und Temperatureinwirkungen, aber auch Dichtigkeit, Strahlenschutz bei der Einlagerung und Handhabbarkeit bei einer Rückholung oder Bergung erfüllen müssen (Details s. Kap. 7.2).

Der Begriff **Abfallgebände** umschreibt den Behälter mit Abfällen und ggfls. Fixierungsmittel innerhalb des Behälters.

Es ist davon auszugehen, dass bei der Einlagerung von Behältern ein Hohlraum zwischen Behälter und Wirtsgestein verbleibt, der aus technischen Gründen (Stabilität) mit dem sog. **Versatz** aufgefüllt wird. In Abhängigkeit des Wirtsgesteins und insbesondere des Endlagerkonzeptes (s. Kap. 5) sind unterschiedliche Materialien als Versatz möglich, dessen Eigenschaften häufig temperaturabhängig sind. In einigen Konzepten werden diesem Versatz sicherheitsrelevante Barriereigenschaften zugewiesen. Für einen Versatz aus Tonmineralen (Bentonit) wird häufig auch der englischsprachige Begriff **Buffer** verwendet.

Der Versatz und weitere Abdichtungen im Endlagerbergwerk sollen häufig den möglichen Zutritt von Lösungen über Strecken oder Bohrlöcher zu den Abfallbehältern

verhindern. Diese besitzen daher häufig sicherheitsrelevante Barriereigenschaften und werden **geotechnische Barriere** genannt. Hierzu gehören auch Materialien zur Verfüllung bzw. zum Verschluss der untertägigen Infrastruktur und der Zugangsbauwerke. Diese werden z. B. **Streckenverschluss** oder **Schachtverschluss** genannt, deren Eigenschaften ebenfalls temperaturabhängig sind.

Das **Wirtsgestein** ist der Gesteinskörper, in dem das Endlagerbergwerk errichtet und die hoch radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Dessen einschlusswirksame Eigenschaften sind häufig temperaturabhängig. Nach /STA 17/ sollen die Wirtsgesteinstypen **Steinsalz**, **Tongestein** und **Kristallingestein** im Rahmen des Standortauswahlverfahrens berücksichtigt werden.

Auch Gesteine außerhalb des eigentlichen Wirtsgesteins können eine Bedeutung für die Endlagersicherheit haben und einer Wärmeeinwirkung unterliegen. Diese werden meistens unter dem Begriff **geologische Umgebung** (oder auch **Nebengestein**) zusammengefasst.

3.3 Temperaturfeldberechnungen

Die Einlagerung von Behältern mit hoch radioaktiven Abfällen führt aufgrund des radioaktiven Zerfalls zu einem Wärmeeintrag in das Endlager und somit auch zu einer Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins und seiner geologischen Umgebung gegenüber der ursprünglichen Gebirgstemperatur. Die **Temperatur** an der **Außenfläche des Behälters** ist dabei abhängig von der Beladung der Behälter, der Wärmeleistung der Abfälle (nach Abbrand und Zwischenlagerung), der Lagerung, den thermischen Materialeigenschaften der geotechnischen Barrieren sowie des Wirtsgesteins und dem sich einstellenden Temperaturgradienten zur geologischen Umgebung. Zur Bestimmung der (maximalen) Temperaturen an der Außenfläche des Behälters erfolgen sog. **Temperaturfeldberechnungen** (numerische Modellrechnungen). Temperaturfeldberechnungen sind ein notwendiger Teil zur technischen Auslegung eines Endlagerkonzeptes und werden zu dessen Optimierung eingesetzt. Mittels Temperaturfeldberechnungen wird die sich zeitlich und räumlich ändernde Temperaturverteilung im Endlagerbergwerk sowie im Wirtsgestein bzw. der geologischen Umgebung infolge des Wärmeeintrages der Abfallbinde berechnet.

Abb. 3.2 zeigt ein **schematisches Temperaturprofil**, das sich nach der Einlagerung, ausgehend von der Außenfläche eines Behälters, in den technischen Komponenten sowie im Wirtsgestein einstellen kann. Für den hypothetischen und vereinfachten Fall der Einlagerung eines einzelnen Behälters/Abfallgebundes ist die höchste Temperatur an der Außenfläche des Behälters zu erwarten, die eine festzulegende Grenztemperatur nicht überschreiten soll. In Abhängigkeit der thermischen Materialeigenschaften der weiteren Endlagerkomponenten sinkt die Temperatur mit zunehmender Distanz zur Wärmequelle mehr oder weniger deutlich ab. Da sich die thermischen Eigenschaften innerhalb der einzelnen Endlagerkomponenten unterscheiden, ist der Temperaturgradient darin verschieden. Dies ist in Abb. 3.2 ohne konkrete Zahlenwerte schematisch dargestellt.

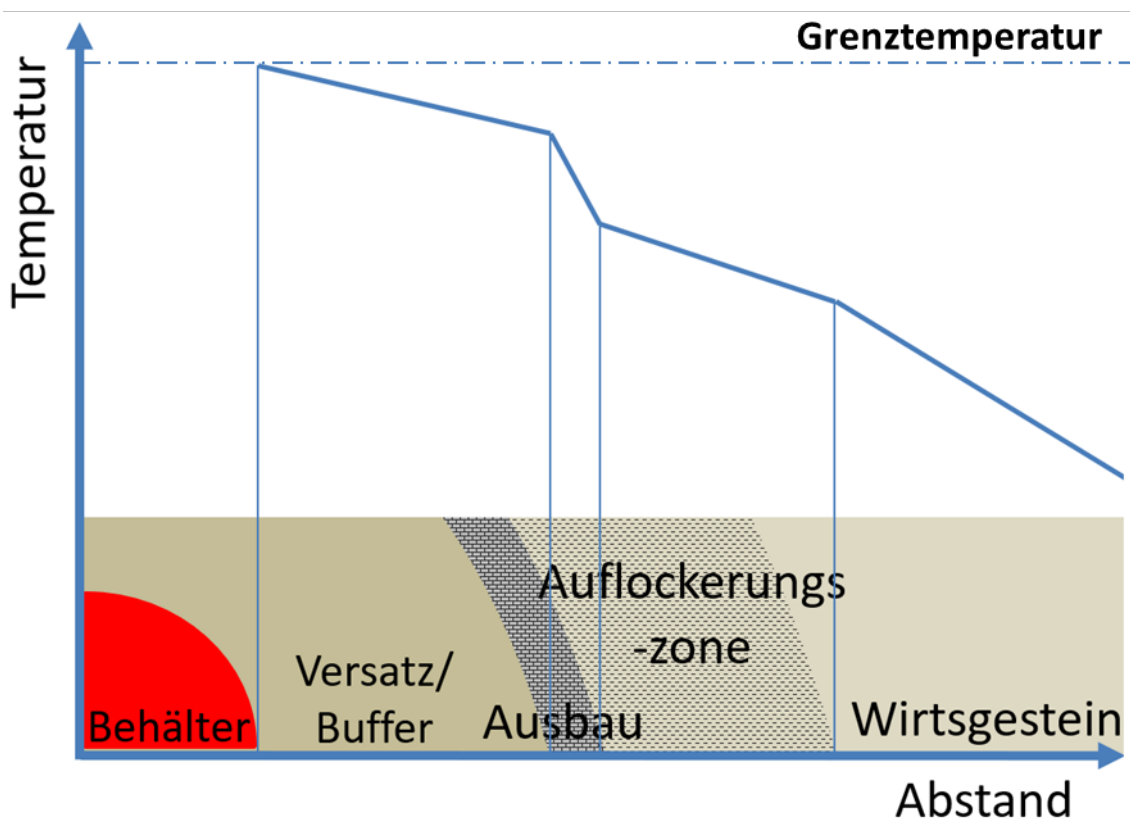


Abb. 3.2 Skizze des schematischen Temperaturprofils im Querschnitt einer exemplarischen Einlagerungsstrecke für einen eingelagerten Behälter

Die Einlagerung mehrerer Abfallgebände in einem Endlager überlagert die Wärmeabgabe der einzelnen Abfallgebände. Durch diese Überlagerung ergibt sich eine andere Temperaturverteilung. Hierdurch ist die sich einstellende Temperatur an der Außenfläche eines einzelnen Behälters in einem Einlagerungsfeld höher, als wenn nur ein Behälter betrachtet wird. Wesentliche Parameter für die sich einstellenden Temperaturen sind die Beladung bzw. das Design der Behälter als Wärmequelle, der Abstand der

Einlagerungstrecken und -kammern sowie der Abstand der Behälter je nach gewähltem Endlagerkonzept neben den Materialeigenschaften. Da die Wärmeleistung der radioaktiven Abfälle im Behälter durch den radioaktiven Zerfall mit der Zeit abnimmt, sinken nach der Aufheizung bis zu einer maximalen Temperatur langfristig die Temperaturen im Endlager.

Abb. 3.3 zeigt einen schematischen Temperaturverlauf abhängig von der Zeit an der Außenfläche eines **einzelnen** Behälters (blau). Die Temperatur erhöht sich nach der Einlagerung zunächst bis zu einem Maximum und sinkt dann wieder ab. Aufgrund der Überlagerung des Wärmeflusses **mehrerer** Behälter in einem Einlagerungsfeld (rot) steigt diese Temperatur an der Außenfläche eines Behälters darüber über die eines einzelnen Behälters an und das Maximum wird zu einem späteren Zeitpunkt erreicht.

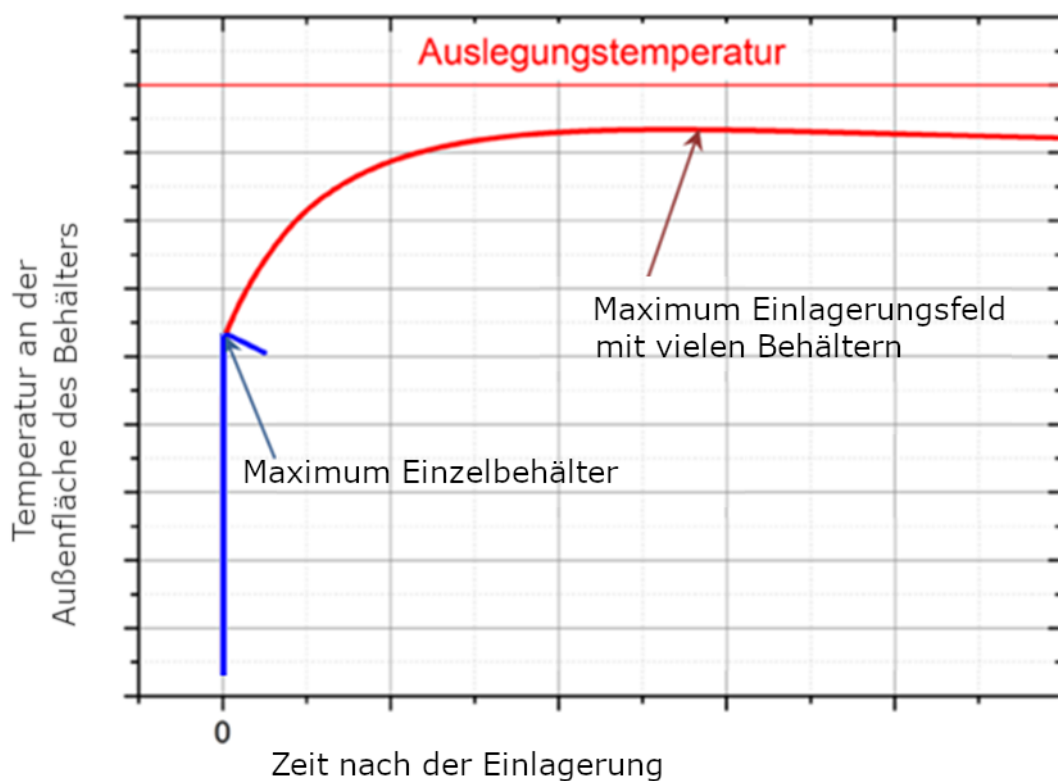


Abb. 3.3 Schematische Skizze der Temperatur an der Außenfläche eines Behälters abhängig von der Zeit /DBE 16a/

Auslegungstemperaturen, die aus Festlegungen zum jeweiligen Endlagerkonzept für unterschiedliche Stellen resultieren können, sind maximal zulässige Temperaturen im Endlager, die in der Regel mit einer Marge unterschritten werden sollten.

Weitere Temperaturfeldberechnungen für **Kristallingestein** erfolgten beispielsweise in der Schweiz /SAT 98/, Schweden /HÖK 03/, /HÖK 09/, Finnland /IKO 09/ und Litauen /JUS 14/. Die Wärmeleistung der Abfallbehälter, die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien und Gesteine, die Abstände und Dimensionierung der Behälter und Strecken gehen in diese Modellierungen ein.

Temperaturfeldberechnungen für die Endlagerung von abgebrannten Brennelementen im Kristallingestein in Litauen /JUS 14/ erfolgten beispielsweise für eine Temperaturvorgabe $< 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für den Buffer Bentonit. Die Modellierung zeigt, dass diese Bedingung bei geeigneter Wahl der Parameter auch bei Einlagerung mehrerer Behälter eingehalten werden kann.

4 Nationale Regelwerke mit Bezug zu Temperaturen und Rückholbarkeit/Bergung

Nachfolgend werden die nationalen Regelwerke beginnend mit Deutschland und anschließend - in alphabetischer Reihenfolge - weitere Länder mit ihren unterschiedlichen Endlagerprogrammen im Hinblick auf Temperaturfestlegungen und Rückholung/Bergung ausgewertet.

4.1 Deutschland

Das /ATG 17/ regelt u. a. die Zuständigkeiten für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Es werden keine konkreten Anforderungen getroffen und somit sind in /ATG 17/ auch keine Regelungen hinsichtlich Temperatur, Rückholbarkeit oder Bergung beschrieben. Konkrete Anforderungen an die Endlagerung finden sich im StandAG /STA 17/ und den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/⁴.

Temperatur

Das StandAG /STA 17/ spezifiziert im Standortauswahlverfahren in § 27 (4), dass in der Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen *„aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgegangen“* werden soll, *„solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind“* (Details s. Kap. 3.1.1).

Das StandAG sieht nach § 24 (5) ein Abwägungskriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit im Rahmen des Standortauswahlverfahrens vor, das in Anlage 8 genauer spezifiziert ist: *„Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur*

⁴ Diese befinden sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes in Überarbeitung und werden nach § 26 StandAG spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen fertiggestellt.

Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.“ (Details s. Kap. 3.1.3)

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ regeln in Abschnitt 7.2.1 „Langzeitaussage zur Integrität des ewG“ lediglich eine Prüfung für Steinsalz und Tongesteine, sodass die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflussen darf. Weitere Vorgaben erfolgen nicht.

Rückholbarkeit/Bergung

In Deutschland ist die Berücksichtigung von Rückholbarkeit/Bergung im Endlagerkonzept für ein HAW-Endlager Genehmigungsvoraussetzung. Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) /STA 17/ gibt den rechtlichen Rahmen vor. Anforderungen der wesentlichen Paragraphen sind:

- § 1 „Zweck des Gesetzes“, Absatz 4: *„Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.“*
- § 23 „Mindestanforderungen“, Absatz 5: *„Fläche des Endlagers – ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht; in den Flächenbedarf des Endlagers eingeschlossen sind Flächen, die für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks erforderlich sind und verfügbar gehalten werden müssen.“*
- § 26 „Sicherheitsanforderungen“, Absatz 2: *„Es ist zu gewährleisten, dass für die eingelagerten Abfälle die Möglichkeit der Rückholung während der Betriebsphase besteht und dass für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ausreichende Vorkehrungen für eine mögliche Bergung der Abfälle vorgesehen werden.“*
- § 26, Absatz 3: *„Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung auf Grundlage der Sicherheitsprinzipien nach Absatz 2 Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung festzulegen. Soweit erforderlich, sind wirtsgesteinsabhängige Anforderungen für jedes der nach § 23 Absatz 1 zu betrachtenden Wirtsgesteine festzulegen. Die festzulegenden*

Anforderungen umfassen insbesondere: Anforderungen an die Rückholbarkeit und zur Ermöglichung einer Bergung.“

Die Anforderung der Rückholbarkeit und Bergung wurden bereits in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ formuliert⁵. In Abschnitt 8.6 sind die Anforderungen zur Rückholbarkeit und Bergung weiter detailliert. Es wird gefordert, dass in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein muss. Für eine eventuelle Bergung der Abfallbehälter aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager muss für einen Zeitraum von 500 Jahren eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter gegeben sein. Zusätzlich ist gefordert, dass Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen.

Die Berücksichtigung der Option einer Rückholbarkeit der Abfälle bis zum Verschluss des Endlagers und die Möglichkeit der Handhabbarkeit der Abfallbehälter, bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers für eine eventuelle Bergung der Abfälle, sind somit Genehmigungsvoraussetzung und im Endlagerkonzept bzw. Behälterkonzept von Beginn an einzuplanen.

Im Folgenden werden nationale Regelwerke von Ländern gesichtet und ausgewertet, die ebenfalls eine Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen anstreben und sich teilweise in einer deutlich fortgeschrittenen Phase der Endlagersuche bzw. des Endlagerbaus befinden. Diese werden in Bezug auf die in den Regelwerken genannten Temperaturbegrenzungen und auf die Möglichkeit einer Rückholung der Abfälle hin ausgewertet. Hierdurch soll die Festlegung einer „*Grenztemperatur*“ nach § 27 (4) StandAG im internationalen Kontext eingeordnet werden und ermittelt werden, inwiefern andere Länder Temperaturbegrenzungen in gesetzlichen Regelwerken verwenden. Hieraus sollen anschließend Rückschlüsse für die Festlegung einer „*Grenztemperatur*“ im deutschen Standortauswahlverfahren abgeleitet werden.

⁵ Diese befinden sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes in Überarbeitung und werden nach § 26 StandAG spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen fertiggestellt.

4.2 Belgien

Der gesetzliche Rahmen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in **Belgien** werden im Royal Decree vom 20. July 2001 (Artikel 1 von GRR-2001) /FANC 01/ in der generellen Regulierung des Schutzes der Öffentlichkeit, der Arbeiter und der Umwelt gegen die Gefahren ionisierender Strahlung /FANC 01/ und im Royal Decree vom 30. November 2011 (Artikel 4 von SRNI-2011) /FANC 11/ in den Sicherheitsanforderungen für Nuklearanlagen festgelegt /FED 14/.

Temperatur

Die gesetzlichen Regelwerke in **Belgien** /FANC 11/, /FANC 01/ definieren bislang keine Temperaturkriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Inwiefern eine Temperaturbegrenzung in /FANC 11/ bei einer Überarbeitung eingeführt wird, ist zum derzeitigen Kenntnisstand offen.

Rückholbarkeit/Bergung

Die Umkehrbarkeit des Einlagerungsprozesses (reversibility) und die Rückholbarkeit (retrievability) von hoch radioaktiven Abfällen sind in **Belgien** gesetzlich gefordert /FED 14/. Seit 1993 ist dies eine generelle Anforderung an die Endlagerung /SCH 18/. Es sind Vorkehrungen für eine geplante Rückholung während der Betriebszeit (ca. 100 Jahre) in den Planungen für ein Endlager zu integrieren /DEP 16/. Alle in den bisherigen Planungen betrachteten Betriebsabläufe des Endlagers müssen reversibel sein. Das betrifft beispielsweise Transportprozesse unter Tage, im Schacht und über Tage sowie alle dazugehörigen Umladevorgänge der Endlagerbehälter /PIR 13/.

4.3 Finnland

Die Regulierungs- und Genehmigungsbehörde für Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (hier: ausgediente Brennelemente) ist Säteilyturvakeskus (STUK). Für die Genehmigung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Finnland hat STUK den Guide YVL 8.4

„*Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel*“ /STUK 01/ herausgegeben. Die Vorgaben betreffen die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase eines Endlagers.

Die Anforderungen an die Betriebsphase eines Endlagers für ausgediente Brennelemente enthält YVL 8.5 “*Operational safety of a disposal facility for spent nuclear fuel*” /STUK 02/.

Temperatur

Ähnlich wie in dem schwedischen Regelwerk werden durch STUK nur allgemeine Anforderungen an den Erhalt der sicherheitstechnischen Eigenschaften der technischen Barrieren und des Wirtsgesteins erhoben.

Generell wird gefordert, dass bei der Beurteilung der Funktionsfähigkeit der technischen und geologischen Barrieren (in /STUK 01/ wird das umgebende Kristallingestein als natürliche Barriere bezeichnet) Änderungen und Ereignisse berücksichtigt werden müssen, die in den verschiedenen Bewertungsperioden auftreten können.

Dabei soll die Anforderungen an die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Barrieren so angesetzt werden, dass es über den Nachweiszeitraum von einigen 1 000 Jahren zu keinerlei Freisetzung radioaktiver Substanzen in das Wirtsgestein kommt.

Weiterhin werden Anforderungen an den Integritätserhalt des Wirtsgesteins gestellt. Hiernach sollen die Maßnahmen für Einrichtung, Betrieb und Verschluss des Endlagers so gewählt werden, dass die Eigenschaften der natürlichen Barriereigenschaften des Wirtsgesteins erhalten bleiben.

Auch hier implizieren diese Anforderungen zwar die Vermeidung barriereschädigender Temperaturen, konkret wird allerdings auf die Vermeidung thermischer Einwirkungen nicht eingegangen. Es werden keine Temperaturen festgelegt.

Rückholbarkeit/Bergung

Im Gegensatz zu Schweden wird Rückholbarkeit in Finnland explizit nur für die Nachbetriebsphase gefordert /STUK 01/. Für die Betriebsphase werden keine Forderungen nach Rückholbarkeit erhoben /STUK 02/.

Laut /STUK 01/ muss Rückholbarkeit von Behältern mit ausgedienten Brennelementen in der Nachbetriebsphase so lange machbar sein, bis die technischen Barrieren den praktisch vollständigen Einschluss gewährleisten. Hierzu ist eine Technologie vorzusehen, die zum Zeitpunkt der Einlagerung verfügbar ist und mit angemessenem Aufwand erfolgen kann. Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholbarkeit oder eventuelle Überwachungsmaßnahmen dürfen die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

“In the post-closure phase, retrieval of the waste canisters from the repository shall be feasible during the period in which the engineered barriers are required to provide practically complete containment for the disposed radioactive substances. The disposal facility shall be designed so that retrieval of waste canisters, if needed, is feasible with the technology available at the time of disposal and with reasonable resources. Facilitation of retrievability or potential post-closure surveillance actions shall not impair the long-term safety.”

Der Guide /STUK 01/ enthält keinerlei Vorgaben zu Temperaturen, durch die eine Rückholung/Bergung von Behältern mit ausgedienten Brennelementen ermöglicht werden kann.

4.4 Frankreich

Das Gesetz von 1991 (Bataille-Gesetz) /FRA 91/ sieht eine Untersuchung der Partitionierung und Transmutation langlebiger Radionuklide, der Langzeitlagerung und der tiefen geologischen Endlagerung einschließlich eines Forschungslabors im Untergrund zur Entscheidungsfindung über den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen vor.

Im gleichen Jahr wurden die Sicherheitsregeln (RFS N°III.2.f) zur Standortauswahl der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen von der französischen Behörde für nukleare Sicherheit “Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)” veröffentlicht /AND 91/.

In der Folge wurde die “Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA)” mit der Forschung und Entwicklung für die Errichtung eines Endlagers in Frankreich beauftragt. Im Jahr 2005 publizierte ANDRA einen Bericht, der ein Endlager für mittel- und hochradioaktive Abfälle im tiefen geologischen Untergrund in der Callovo-Oxfordian Tonschicht als machbar bewertete /AND 05a/, /NEA 06a/.

Temperatur

Die Sicherheitsregeln /AND 91/ schreiben ein Kenntnis des Temperaturverhaltens der Behälter (Art. 4.2) und der geologischen Barriere (Art. 4.4.2) vor. Die zulässige Temperatur soll nach der Charakterisierung der Barrieren im Endlagerkonzept bestimmt werden. Laut Anhang 2, Art. 1.1 soll die Bedeutung des temperaturabhängigen Verhaltens von Tonmineralen bewertet werden.

Das Bataille-Gesetz /FRA 91/ wurde im Jahr 2006 überarbeitet /FRA 18/, /LOI 06/. ASN veröffentlichte nachfolgend eine Sicherheitsrichtlinie zur Endlagerung in tiefen geologischen Schichten /BOD 08/ unter Anpassung der Sicherheitsregeln zur Standortauswahl /AND 91/. In dieser Richtlinie wird lediglich ein Kenntnis des Temperaturverhaltens der Behälter gefordert und soll dem Temperaturverhalten der Barrieren im Endlagerkonzept eine besondere Aufmerksamkeit geben. Im Anhang 1 der Richtlinie werden für Untersuchungen zur Standortauswahl thermisch-hydraulisch-mechanische Untersuchungen und eine Charakterisierung der Gesteine inklusive der thermischen Eigenschaften, sowie ein späteres Monitoring der Temperatur gefordert. Für Tongestein wird eine Temperatur geringer als 100 °C an der Grenze Behälter/Lagerungsumgebung als günstig angesehen ohne diese Temperatur regulatorisch festzuschreiben. Mit Hilfe von Modellierungen sollen die zulässigen bzw. akzeptablen Werte für Temperaturen ermittelt werden (A1-2.1.3) und temperaturabhängige Phänomene in Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt und bewertet werden.

Rückholbarkeit/Bergung

Nach einer öffentlichen Debatte im Jahr 2005 zum Umgang mit dem hochradioaktiven Abfall, wurde das Programm Act on the sustainable Management of Radioactive Materials and Wastes /RÉP 06/ verabschiedet, in welchem die reversible Endlagerung in tiefen geologischen Formationen festgelegt wird. Somit ist seit 2006 in Frankreich die Rückholbarkeit für mindestens 100 Jahre als Option gesetzlich verankert.

2016 wurde ein weiteres Gesetz /LOI 16/ zur Reversibilität eines tiefengeologischen Endlagers mit einer Rückholbarkeit eingelagerter hoch- und mittelradioaktiver Abfälle verabschiedet /AND 16a/, /AND 16b/. Das Gesetz verweist darauf, dass mit fortschreitender Errichtung des Endlagers parallel auch das Design und der Betrieb sich am technischen Fortschritt orientieren müssen. Es soll möglich sein, bereits eingelagerte Abfälle in Vereinbarkeit mit dem Verschluss- und Stilllegungskonzept zurückzuholen. Der

Endlagerbetrieb soll mit einer Pilotphase beginnen, welche auch die Rückholbarkeit der Abfälle beinhaltet. Die Genehmigung für die Inbetriebnahme des Endlagers ist an den Nachweis der Rückholbarkeit geknüpft /LOI 16/. Im Vorfeld des Gesetzes wurden Prinzipien zur Reversibilität und Rückholbarkeit von der französischen Aufsichtsbehörde in /ASN 16/ festgelegt.

4.5 Niederlande

Die Basisgesetzgebung bezüglich nuklearer Aktivitäten sind im Gesetz zur Kernenergie ('Kernenergiewet' or Kew) festgehalten und die prinzipielle Entscheidung zur geologischen Endlagerung in der „Radioactive Waste Policy in the Netherlands, an Outline of the Government's Position“ /VROM 84/ dargelegt. Mit /VROM 93/ hat der Gesetzgeber ein Positionspapier zur geologischen Endlagerung von radioaktiven und anderen hochtoxischen Abfällen erlassen /MIE 17/.

Anforderungen an ein geologisches Endlager für hochradioaktive Abfälle in den Niederlanden wurden im Detail noch nicht festgeschrieben, da eine Langzeitzwischenlagerung der radioaktiven Abfälle bis zum Jahr 2130 im Oberflächenlager der COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval) vorgesehen ist /VROM 93/, /HAV 03/, /VER 17/, /MIE 17/. Nach /MIE 17/ wird ein geologisches Endlager bis zum Jahr 2130 anvisiert.

Temperatur

Eine regulatorische Festlegung zur Temperaturbegrenzung im Endlager konnte in den Regularien der Niederlande nicht gefunden werden; u. a. wird aber als Ziel der Langzeitzwischenlagerung in COVRA die Reduktion der Zerfallswärme von wärmentwickelnden Abfällen genannt /MIE 17/.

Rückholbarkeit/Bergung

In den **Niederlanden** wurde eine generelle Anforderung zur Rückholbarkeit während der Betriebsphase in der „Netherlands waste disposal policy“ eingeführt /VROM 93/⁶. In

⁶ Das Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) (deutsch: Ministerium für Wohnungswesen, Raumordnung und Umweltschutz) war das niederländische Umwelt-, Planungs- und Wohnbauministerium. 2010 wurde es mit dem Verkehrs- und Wasserwirtschaftsministerium Ministerie van Verkeer en Waterstaat zum Infrastrukturministerium Ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) fusioniert.

dieser werden insbesondere die Rückholung von hochtoxischen Abfällen und radioaktiven Abfällen als eine Option betrachtet. Heute werden aus politisch-gesellschaftlichen Gründen die Rückholbarkeit innerhalb der Betriebsphase gefordert /MIE 17/.

4.6 Schweden

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird in Schweden durch Strål Säkerhets Myndigheten (SSM, schwedische Strahlenschutzbehörde) reguliert. Für die Genehmigung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle sind in Schweden drei regulatorische Vorschriften (Regulatory Codes) der SSM einschlägig.

“The Swedish Radiation Safety Authority’s Regulations and General Advice concerning Safety in Nuclear Facilities” /SSM 08a/ betreffen sämtliche kerntechnische Anlagen in Schweden (Forschungs- und Leistungsreaktoren, Anlagen zur Behandlung von Nuklearmaterial und radioaktiven Abfällen) und Endlager für radioaktive Abfälle solange diese noch nicht endgültig verschlossen sind.

“The Swedish Radiation Safety Authority’s Regulations and General Advice concerning Safety in Connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear waste” /SSM 08b/ enthalten Anforderungen an die Barrieren eines Endlagersystems und ihre Funktion sowie an die Sicherheitsanalysen und ihre Dokumentation.

“The Swedish Radiation Safety Authority’s Regulations and General Advice concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste” /SSM 08c/ enthalten allgemeine Schutzziele der Endlagerung sowie Anforderungen an Optimierungsmaßnahmen, die Festlegung der Risikogrenzwerte und des Nachweiszeitraums sowie an eventuelle Maßnahmen zur Erschwerung oder Erleichterung des Zugangs zum Endlager.

Alle drei Vorschriften enthalten einen verfügenden Teil (z. T. mit Anhängen) und einen erläuternden Teil, in dem die Sicherheitsanforderungen im Sinne von allgemeinen Hinweisen und Empfehlungen (*general advices*) genauer erörtert werden.

Temperatur

Einzig /SSM 08b/ enthält Anforderungen an den Integritätserhalt von Barrieren eines Endlagersystems, die allerdings in einer sehr allgemeinen Form gehalten sind. Es wird

gefordert, dass das Barrierensystem in der Lage sein muss, solchen Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen zu widerstehen, die ihre Einschlusswirksamkeit in der Nachverschlussphase beeinträchtigen könnten.

Diese Anforderung impliziert zwar die Vermeidung barriereschädigender Temperaturen, jedoch wird nicht konkret auf thermische Einwirkungen eingegangen. Temperaturen werden nicht festgelegt.

Rückholbarkeit/Bergung

Das schwedische Regelwerk enthält keine expliziten Forderungen zur Rückholbarkeit/Bergung endgelagerter radioaktiver Abfälle.

In /SSM 08b/ wird lediglich gefordert, dass Maßnahmen, die dem Monitoring oder der Rückholbarkeit eingelagerter radioaktiver Abfälle dienen oder aber den Zugang zum Endlager erschweren, hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz zu analysieren und dem Regulator (SSM) mitzuteilen sind.

Im erläuternden Teil wird geschrieben, dass allenfalls vernachlässigbare Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers bzw. ein Sicherheitsgewinn durch die oben genannten optionalen Maßnahmen aufzuzeigen sind.

/SSM 08c/ enthält eine ähnlich lautende Anforderung. Demnach sind bei eventuellen Maßnahmen zur Erschwerung oder Erleichterung des Zugangs zum Endlager, die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die primäre Anforderung eines hohen Schutzpotenzials des Endlagersystems zu benennen

Dies macht deutlich, dass Rückholbarkeit lediglich als zulässige Option angesehen wird, welche im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit zu untersuchen ist. Anforderungen zu thermischen Randbedingungen, die die Rückholbarkeit betreffen, werden in keiner der beiden Regularien erhoben. Rückholbarkeit wird interpretiert als eine optionale Maßnahme, die der Antragsteller/Betreiber vorsehen kann, jedoch nicht muss /FAß 17a/.

4.7 Schweiz

Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird in der Schweiz durch das Kernenergiegesetz /KEG 03/ und die Kernenergieverordnung /KEV 04/ geregelt. Die Schweiz verfolgt wie Deutschland das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem Bergwerk mit der Möglichkeit einer Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zum Verschluss des Endlagers. Die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen wurden in einem sog. Sachplanverfahren (Standortauswahlverfahren) verbindlich festgelegt /BFE 08/. Für geologische Tiefenlager werden spezifische Auslegungsgrundsätze und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis in /ENSI 09a/ geregelt.

Temperatur

Es werden hinsichtlich der Temperatur oder des Wärmeflusses keine Regelungen im Gesetz /KEG 03/ oder in der Verordnung /KEV 04/ getroffen. Die Richtlinie /ENSI 09a/ trifft ebenfalls keine Aussagen zur Temperatur. Lediglich in dem Erläuterungsbericht zur Richtlinie /ENSI 09b/ erfolgen die Hinweise das eine hohe Temperatur eine Rückholung erschwert. Die Überwachung eines Temperaturverlaufs erfolgt während der Betriebszeit des Endlagers mittels eines Pilotlagers und kann der Optimierung der Betriebssicherheit und einer möglichen Optimierung des Endlagerdesigns zur Langzeitsicherheit dienen.

Nach dem Schweizer Sachplan gilt ein Standort im Standortauswahlverfahren nach dem Kriterium „Lagerbedingte Einflüsse“ u. a. als günstig, wenn das Wirtsgestein *„im Bereich der zu erwartenden Temperaturen wenig wärmeempfindlich bezüglich seiner hydraulischen, stofflichen und felsmechanischen Eigenschaften ist“* /BFE 08/. Eine konkrete Temperaturbegrenzung wird nicht gefordert, sondern es wird Bezug auf die zu erwartenden Temperaturen genommen, d. h. die sich im Endlager einstellenden Temperaturen. Laut der Gewässerschutzverordnung /GSV 98/, basierend auf dem Gewässerschutzgesetz /GSG 91/, ist eine Temperaturänderung im Grundwasser von maximal 3 °C zulässig.

Eine regulatorische Vorgabe einer *„Grenztemperatur an der Außenfläche eines Behälters“* in einem Endlager wurde darauf basierend nicht abgeleitet.

Rückholbarkeit/Bergung

In der Schweiz ist eine Rückholoption für hoch radioaktive Abfallstoffe aus einem tiefengeologischen Endlager im Kernenergiegesetz gesetzlich vorgeschrieben /KEG 03/. Im Art. 37 (1b) des /KEG 03/ wird für die Erteilung der Betriebsbewilligung neben weiteren Anforderungen gefordert, dass „*die Rückholung der radioaktiven Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss ohne großen Aufwand möglich ist*“.

Die Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004 /KEV 04/ beinhaltet weitere Anforderungen an die Rückholbarkeit. Ein geologisches Tiefenlager ist so auszulegen, dass Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen (Art. 11 (2c)). Die sicherheitsrelevanten Techniken müssen vor der Inbetriebnahme des geologischen Tiefenlagers im Testlager erprobt und ihre Funktionstüchtigkeit nachgewiesen werden (Art. 65). Die betrifft insbesondere das Entfernen des Verfüllmaterials bei Rückholung von Abfallbinden (2b) und die Technik zur Rückholung von Abfallbinden (2c). Die Verfüllung ist nach Art. 67 (2) so vorzunehmen, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet und eine Rückholung der Abfälle ohne großen Aufwand möglich ist.

Nach /ENSI 16/ stellt die Machbarkeit einer Rückholung im Sachplanverfahren kein Kriterium dar, anhand dessen Standortgebiete ungünstiger bewertet würden. Alle Standortgebiete müssen den gesetzlichen Anforderungen an eine mögliche Rückholung ohne großen Aufwand bis zum Verschluss entsprechen. Die Rückholbarkeit stützt sich auf die Machbarkeit stabiler Ausbauverhältnisse in den Einlagerungsstollen, die eine Umkehrung der Einlagerungsprozesse ermöglicht und die seitens ENSI geforderten bautechnischen Risikoanalysen berücksichtigt. Weiterhin muss die Rückholbarkeit auch schon bei den Endlagerlagerbehältern und dem Verfüllmaterial berücksichtigt werden. Ein Konzept zur Rückholung muss spätestens mit dem Baubewilligungsgesuch vorgelegt werden.

Das ENSI verfolgt zurzeit verschiedene Fragestellungen, welche die Basis für die Rückholung bilden. Für das ENSI ist die zeitliche Dimension in den Überlegungen wichtig. ENSI ist der Meinung, dass es bis zum Bau des Endlagers erfahrungsgemäß noch große technische Entwicklungen geben wird, welche im Endlagerkonzept zu berücksichtigen sein werden. Deshalb ist es nach Ansicht des ENSI nicht zielgerichtet, durch frühzeitige und detaillierte Vorgaben die Flexibilität bei der Konzeptausarbeitung einzuschränken /ENSI 13a/.

4.8 USA

In den USA regelt das Nuclear Waste Policy Act (NWPA) aus dem Jahre 1982 (Public Law No. 97-425) und das Waste Isolation Pilot Plant Land Withdrawal Act (WIPP Act) (Public Law No. 102-579) Fragen zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bzw. Transuranyl-Abfälle („TRU-Waste“) /NEA 16/. Spezifische Anforderungen werden im Titel 10 des Code of Federal Regulations Part 60 (10 CFR 60) der NRC geregelt /NRC 18a/. Weitere Anforderungen der NRC zur Endlagerung radioaktiver Abfälle finden sich in den Titeln 10 CFR 61 und 10 CFR 63 (Yucca Mountain spezifische Lizenzierungsregeln) /NEA 16/.

Temperatur

In dem oben benannten gesetzlichen Regelwerk wurden keine Vorgaben gefunden, die Temperaturen im Endlager selbst betreffen. Jedoch existieren mit /NRC 03/ erste Anforderungen zur Temperaturbegrenzung hinsichtlich der Behälterspezifikation.

Vorläufige Anforderungen zur maximalen Temperaturbegrenzung für standardisierte Behälter „*Standardized Transportation, Aging, and Disposal Canister Systems (STAD)*“ enthält /SAN 15/. Die thermische Spezifikation der Behälter in der Nachverschlussphase eines Endlagers ergibt sich aus Anforderungen an die maximale Temperatur von 400 °C für die Zircaloyhüllen der Brennstäbe im Innern des Behälters und der maximalen Temperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters („overpack“) von 200 °C. Die Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter erfolgte auf Basis von Temperaturrechnungen in der Endlagerumgebung und wird durch die Zulässigkeit von Tätigkeiten in der Betriebs- bzw. Vorverschlussphase (Handhabbarkeit/Lagerung/Transport und Einlagerung) begrenzt.

Rückholbarkeit/Bergung

In den Vereinigten Staaten fordert das Nuclear Policy Act aus dem Jahre 1982, dass

„any repository [...] shall be designed and constructed to permit the retrieval of any spent nuclear fuel placed in such repository, during an appropriate period of operation of the facility, for any reason pertaining to the public health and safety, or the environment, or for the purpose of permitting the recovery of the economically valuable contents of such spent fuel.“ /TRB 18/.

Nach /BOL 04/ wurden die gesetzlichen Anforderungen für eine Rückholbarkeit von abgebrannten Brennelementen und hochaktiven Abfällen zusammen mit möglichen Gründen für eine Rückholung im Abänderungsgesetz zum NWPA (Nuclear Waste Policy Amendments Act) von 1987 festgelegt. Nach § 122 muss jedes Endlager so geplant und errichtet werden, dass die Rückholbarkeit sämtlicher eingelagerter Abfälle gewährleistet ist und eine Rückholung zu einem angemessenen Zeitpunkt in der Betriebsphase stattfinden kann.

Monitoring- und Rückholbarkeits- Anforderungen der Nuclear Regulatory Commission (NRC) werden allgemein hinsichtlich der Sicherheitsfunktion des Wirtsgesteins in der 10 CFR Part 60 - Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories /NRC 18a/ und bezogen auf das Endlagerprojekt Yucca Mountain in 10 CFR Part 63 - Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada festgehalten /NRC 18b/. Nach /ESK 11/ berücksichtigt das US-Programm Belange der Reversibilität und Rückholbarkeit während zweier Phasen - Standortauswahl (1986-87) und Standortempfehlung (2002). Reversibilität und Rückholbarkeit wird gesetzlich aus Gründen der Sicherheit und der Ökonomie eine Rückholbarkeit gefordert /ESK 11/. Die Konzepte der Reversibilität und Rückholbarkeit sind grundsätzlich bedeutsam im Zusammenhang mit dem Erreichen einer öffentlichen Zustimmung zu einem Endlager in tiefen geologischen Formationen. /ESK 11/ stellt zusammenfassend fest, dass in keinem Rückholbarkeitskonzept der USA Zeiträume > 200 Jahre betrachtet werden.

Die Anforderungen der NRC enthalten keine Vorgaben zu Temperaturen, durch die eine Rückholung/Bergung von Behältern mit ausgedienten Brennelementen erleichtert werden kann.

4.9 Erkenntnisgewinn aus den nationalen Regelwerken

Regelwerke und Richtlinien verschiedener Länder mit unterschiedlichen Endlagerprogrammen wurden gesichtet und in Bezug auf Vorgaben zu Temperaturen im Endlager und der Rückholung sowie Bergung von Abfällen ausgewertet.

Lediglich in Frankreich wird im Leitfaden der Aufsichtsbehörde ASN eine Begrenzung der Temperatur auf 100 °C an der Grenze Behälter/Lagerungsumgebung als günstig angesehen /BOD 08/. Die Temperaturbeschränkung stellt allerdings keine regulatorische

Vorgabe dar, sondern ist als Orientierungswert für die weitere Endlageroptimierung zu verstehen. Diese Temperatur resultiert aus Überlegungen zum wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzept im Tongestein und ist nicht wirtsgesteins- oder konzeptübergreifend auf das deutsche Standortauswahlverfahren im Sinne einer „*Grenztemperatur*“ übertragbar.

Einige Standortauswahlverfahren (wie in der Schweiz, Kap. 4.3) berücksichtigen die Wärmeverträglichkeit von Wirtsgesteinen als Abwägungskriterium zur Auswahl eines Standortes, ähnlich zu Anlage 8 § 24 (59) StandAG /STA 17/ im deutschen Standortauswahlverfahren. Auch weitere Länder (Belgien, Niederlande, Finnland, Schweden) sehen eine Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Auswirkungen einer Temperaturerhöhung bzw. der Wärmeeinwirkung der einzulagernden wärmeentwickelnden Abfälle auf die Endlagerkomponenten vor. Dies erfolgt im Rahmen der Auslegung und Optimierung eines Endlagers allerdings ohne Nennung konkreter Temperaturwerte.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass in den ausgewerteten Ländern vor der Festlegung eines Standortes bzw. eines Wirtsgesteins keine gesetzliche Regelung bzgl. einer konkreten Temperatur im Sinne einer „*Grenztemperatur*“ erfolgt ist.

Deutschland besitzt insofern ein Alleinstellungsmerkmal, dass für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen eine vorläufige Temperaturbegrenzung an der Außenfläche der Behälter gesetzlich ohne Festlegung eines Wirtsgesteins, Konzepts oder Standorts vorgegeben worden ist. In allen weiteren ausgewerteten Regelwerken fehlt eine solche Vorfestlegung einer Temperatur. Mit Bezug auf Anforderungen zur Rückholbarkeit verfolgt das ENSI die Strategie, keine frühzeitigen und detaillierten regulatorischen Vorgaben zu definieren, um die Flexibilität bei der Konzeptausarbeitung nicht einzuschränken /ENSI 13a/.

5 Endlagerkonzepte und Temperaturfestlegungen

Im Folgenden werden die Endlagerkonzepte und Temperaturfestlegungen beginnend mit Deutschland und anschließend weitere Länder in alphabetischer Reihenfolge beschrieben. Die in der Literatur gegebenen Begründungen für Temperaturfestlegungen in den Endlagerprogrammen werden dargestellt, soweit diese recherchiert werden konnten.

Eine Übersichtstabelle mit Temperaturen zur Endlagerauslegung im internationalen Vergleich ist im Anhang D zu finden. Die dort aufgeführten Temperaturen beziehen sich entsprechend den jeweiligen länderspezifischen Endlagerkonzepten und Begründungen für die Temperaturfestlegungen auf Auslegungstemperaturen für die Außenfläche des Behälters („container surface“), für Buffer und/oder Verfüllmaterial oder für das Wirtsgestein.

5.1 Deutschland

In Deutschland erfolgten in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben (FuE) der letzten Jahre Untersuchungen zu Endlagerkonzepten für hoch radioaktive Abfälle für die Wirtsgesteine Steinsalz /FIS 13/, Tongestein /JOB 17a/ und Kristallingestein /JOB 16/. Temperaturen für eine Auslegung bezogen sich meist auf den Buffer Ton bzw. Bentonit für Konzepte in Ton- und Kristallingestein. Als Auslegungstemperatur wurden dazu max. 200 °C für Wirtsgestein Steinsalz und max. 100 °C für den Buffer im Wirtsgestein Ton- und Kristallingestein angenommen /BOL 14/.

In dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE) „KoBrA“ soll die BGE TECHNOLOGY GmbH im Auftrag des BMWi und PTKA Vorschläge zur technischen Umsetzung von Anforderungen an Behälter für generische Behälterkonzepte erarbeiten /BGE 18/. Die Auswirkungen entsprechender Designentscheidungen auf die Gestaltung der Endlagersysteme wird beschrieben. Dazu werden die Anforderungen für Behälter zur Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Ton- und Kristallingestein abgeleitet und Behälterkonzepte unter Berücksichtigung der Rückholbarkeit entwickelt. Dabei werden die heute geltenden gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerke ebenso berücksichtigt wie der internationale Stand zu bereits existierenden Anforderungen und Konzepten für Endlagerbehälter.

Steinsalz

Für ein Endlager in Steinsalz (in steiler Lagerung) wurden in Deutschland über mehrere Jahrzehnte Konzepte und technische Komponenten (u. a. Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) /FIS 13/, ISIBEL /BUH 08/, KOMTESSA /BOL 17/) entwickelt. Hierzu wurden drei verschiedene Einlagerungskonzepte (Streckenlagerung selbstabschirmender POLLUX®-Behälter, direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in kurzen horizontalen Bohrlöchern und Einlagerung von Kokillen (BSK, BSK-3 bzw. neu entwickelte rückholbare Bohrlochkokillen BSK-R) in tiefe vertikale Bohrlöcher) untersucht.

Intensive Untersuchungen zu Temperaturfeldentwicklungen erfolgten in Deutschland für Endlagerkonzepte im Steinsalz der VSG /FIS 13/, die nachfolgend kurz für die Streckenlagerung (POLLUX) und Bohrlochlagerung (Kokillen) erläutert werden.

Modellierungen für das **Endlagerkonzept im Steinsalz mit Streckenlagerung** ergaben, dass die Gebirgstemperaturen aufgrund der Wärmeabgabe der Abfälle lokal im Nahbereich der Einlagerungsfelder bis knapp unterhalb von 200 °C in den ersten 100 Jahren nach Verschluss des Endlagers ansteigen können (siehe Abb. 5.1). Die Temperaturen sinken jedoch mit dem Abstand zu den eingelagerten Behältern relativ schnell ab. Die maximal zu erwartenden Temperaturen liegen in den **Richtstrecken** bei diesem Konzept in den ersten 100 Jahren noch unter 100 °C /BOL 14/.

Im **Endlagerkonzept im Steinsalz mit Bohrlochlagerung** befinden sich die Behälter unterhalb der Einlagerungssohle. Dies bewirkt, dass im Bereich der **Zugangsstrecken** deutlich niedrigere Temperaturen als in Einlagerungstrecken zu erwarten sind, wenn eine Auslegungstemperatur für die Außenfläche der Verrohrung von 200 °C angenommen wird. Während der ersten Jahrzehnte nach der Einlagerung (potentieller Rückholungszeitraum bis 40 Jahre) steigt die Gebirgstemperatur in der Einlagerungssohle zwar an, bleibt aber noch unter 70 °C (Abb. 5.2). Innerhalb der **Überfahrungsstrecken** steigt die Temperatur im Zeitraum bis 500 Jahre auf rund 130 °C an (roter Balken in Abb. 5.2). Diese Temperaturen sind für den Fall einer Bergung zu berücksichtigen /BOL 14/.

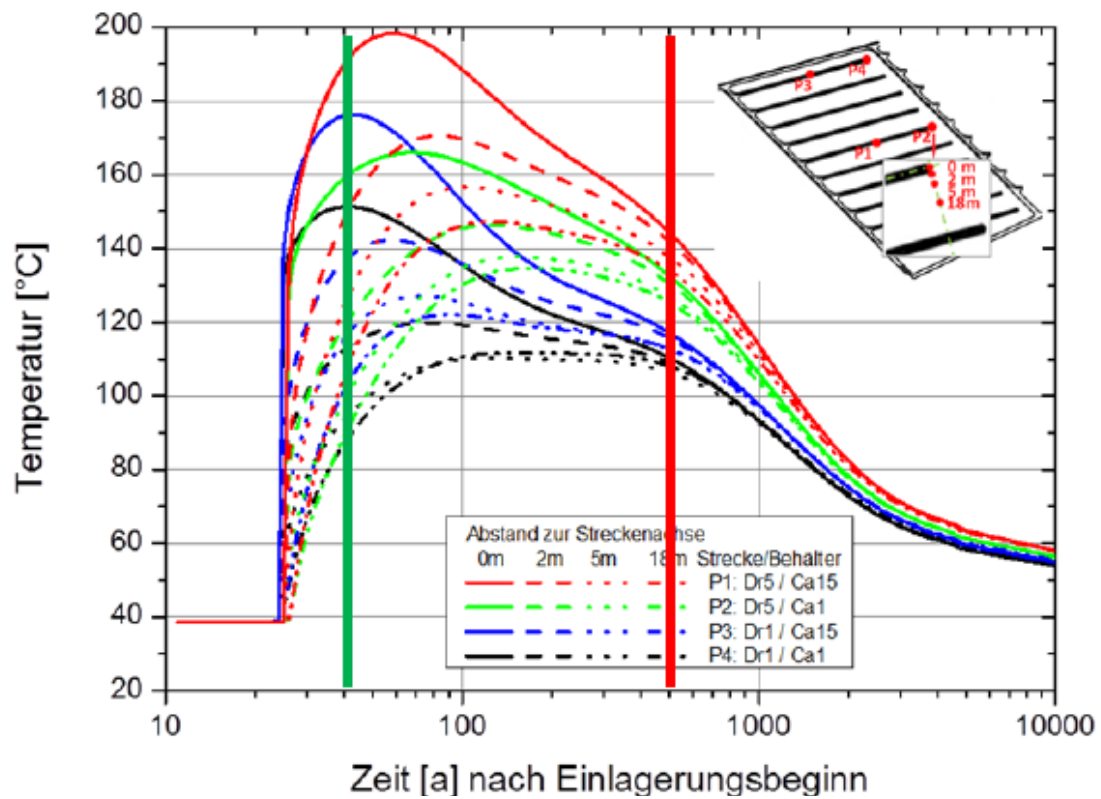


Abb. 5.1 Zeitverlauf der Temperaturen in einem Einlagerungsfeld mit Behältern (Lokationen s. kl. Bild oben), verändert nach /BOL 12⁷.

⁷ grüne Balken: 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn (Ende der Einlagerungsphase),
roter Balken: 500 Jahre nach Einlagerungsbeginn (Ende des potenziellen Bergungszeitraums)

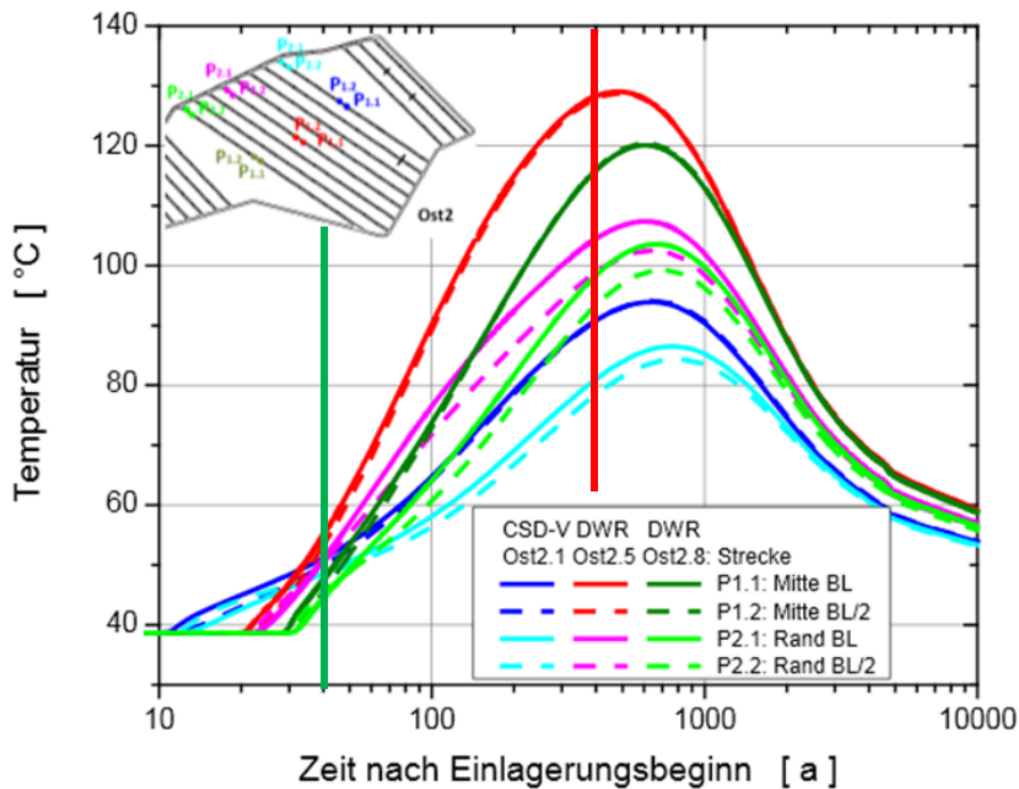


Abb. 5.2 Zeitverlauf der Temperaturen auf der Sohle im Einlagerungsfeld Ost 2 bei Bohrlochlagerung (Lokationen s. kl. Bild oben), verändert nach /BOL 12⁸

Die betriebliche Machbarkeit der Endlagerkonzepte und Rückholkonzepte für verschiedene Varianten der Endlagerkonzepte wurden im Rahmen der VSG in /PEI 12/ und in /BOL 12/ beschrieben. Diese führten zu weiteren Anpassungen des VSG-Konzeptes /BOL 14a/.

Die Beschränkung der Temperatur im Steinsalz auf 200 °C zur Auslegung des Endlagerkonzeptes ging auf Heizertests, die Anfang der 1980er Jahre im Salzbergwerk Asse (TSS-Versuch bzw. TSDE Thermal Simulation of Drift Emplacement /IAEA 93/) durchgeführt wurden, zurück (s. Kap. 6.1.4).

Das Forschungsvorhaben KOSINA /BER 15/, /KIN 18/ entwickelte erstmalig ein (standortunabhängiges) technisches Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde

⁸ grüne Balken: 40 Jahre nach Einlagerungsbeginn (Ende der Einlagerungsphase),
roter Balken: 500 Jahre nach Einlagerungsbeginn (Ende des potenziellen Bergungszeitraums)

radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzformationen und untersuchte dessen technische Machbarkeit und Sicherheit.

Kristallingestein

Das FuE-Vorhaben CHRISTA /JOB 16/ erstellte Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein und untersuchte inwiefern sich das in Schweden und Finnland bereits für konkrete Standorte bis zur Genehmigungsreife entwickelte Konzept (KBS-3-Konzept) zur Endlagerung, in skandinavischen Kristallingesteinen auf die deutschen Verhältnisse übertragen lässt. Das KBS-3-Konzept beruht vorrangig auf der Einschlusswirksamkeit von Behältern mit einem Kupfermantel und einem geotechnischen Barrierensystem aus Betonit- und tonhaltigen Buffer. Im FuE-Vorhaben CHRISTA wurde für das auf Basis des KBS-3V-Konzepts entwickelte Endlagerkonzept die in Finnland und Schweden zu Grunde gelegten Anforderungen zur Endlagerung verwendet. Die darüberhinausgehende deutsche Anforderung an die Rückholbarkeit und Bergung wurden nur am Rande mitbetrachtet.

Das FuE-Vorhaben KONEKD /BER 17/, in dem ein technisches Konzept für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland entwickelt wird, greift auf Ergebnisse des Projektes CHRISTA zurück. In dem Vorhaben wird vor allem der aktuelle Stand der Bergtechnik im Hartgestein allgemein und insbesondere der Stand von W&T des Endlagerbergbaus im Kristallingestein sowie Planungen der endlagerspezifischen Vortriebstechnik, der Einlagerungstechnik und des Grubengebäudes dargestellt.

Tongestein

Im Rahmen des FuE-Vorhabens ANSICHT wurde aufgezeigt auf welcher Basis und in welcher Form ein Nachweis des sicheren Einschlusses von radioaktiven Abfällen im Tongestein in Deutschland unter Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen geführt werden kann. Grundlegende Elemente im Rahmen des Sicherheitskonzeptes und der Nachweisstrategie sind neben der geologischen Situation auch das Endlagerkonzept für zwei Referenzstandorte (Nord und Süd), inklusive des Einlagerungskonzepts und des Verfüll- und Verschlusskonzepts. Das Endlagerkonzept basiert u. a. auf den Ergebnissen der FuE-Vorhaben GENESIS /AME 07/ und ERATO /PÖH 10/. Die in diesen FuE-Vorhaben diskutierten Endlagerkonzepte wurden aufgrund neuer Forschungsergebnisse zur Endlagerung im Tongestein sowie den im Jahr 2010 verabschiedeten

Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ überarbeitet. Das in der VSG bei der Planung zugrunde gelegte Abfallmengengerüst entspricht den Abfallmengen der Brennelemente aus Leistungsreaktoren und aus der Wiederaufarbeitung unter Berücksichtigung des Ausstiegsbeschlusses der Bundesregierung /PEI 11/. Das Endlagerkonzept für das Endlager in der Referenzregion NORD wurde für die Einlagerungsoption vertikale Bohrlochlagerung entwickelt. Das zugehörige Behälter- und Rückholungs-/ Bergungskonzept bestehend aus rückholbaren Kokillen und einem Bohrlochliner wurde aus der „vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) übernommen und an die Rahmenbedingungen und Anforderungen im tonigen Wirtsgestein angepasst. Dieses Endlagerkonzept im Tongestein geht von der Verwendung eines Bentonitbuffers als Barriere zwischen Endlagergebinden und Wirtsgestein aus.

Die Sohle des Endlagerbergwerks im Wirtsgestein der Referenzregion SÜD (Opalinus-Ton mit einer Mächtigkeit von ca. 100 m) befindet sich in ca. -670 m unter der Geländeoberkante (GOK). Für die Einlagerung von ausgedienten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen in POLLUX®-Behältern ist die Einbringung in horizontalen Einlagerungsstrecken mit Verwendung eines Bentonitbuffers vorgesehen.

Um Temperaturerhöhungen sowohl des Wirtsgesteins als auch des Buffers zu begrenzen, wurden für beide Endlagerkonzepte in Tongestein maximale Temperaturen von 100 °C für den Buffer als Auslegungstemperatur festgelegt. Nach /BOL 14/ ist die Definition einer konkreten Auslegungstemperatur noch Gegenstand der Forschung. Neuere Arbeiten im Projekt AnSichT führen nach /BOL 14/ zu dem Schluss, dass auch eine Auslegungstemperatur von bis zu 150 °C für ein Endlager in Tongestein umsetzbar erscheint.

Temperaturberechnungen zur Endlagerauslegung mit einer Festlegung einer Maximaltemperatur von 150 °C im Buffer für die beiden Referenzmodelle NORD (Bohrlochlagerung) und SÜD (Streckenlagerung) sind dokumentiert (s. S. 21 in /LOM 15/; S. 23 in /JOB 15b/).

Weitere umfangreiche Temperaturfeldberechnungen für vier vorgegebene Endlagervarianten erfolgten für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe /DBE 16a/. Die Endlagervarianten unterschieden sich in den Wirtsgesteinen und Auslegungstemperaturen (für Steinsalz 200 °C und 100 °C, Tongestein 100 °C, Kristallingestein 100 °C).

/BOL 14/ weist daraufhin, dass auch für die Endlagerkonzepte im Tongestein die möglichen Auslegungstemperaturen oberhalb der Maximaltemperatur von 85 °C für die Handhabbarkeit der Behälter bei einer Rückholung liegen /BOL 08/

5.2 Belgien

Belgien hat sich seit den 70er Jahren mit verschiedenen Endlagerkonzepten in geologischen Formationen beschäftigt. Anfangs wurde die Bohrlochlagerung (PAGIS-Studie) präferiert. Anfang 2000 wurde das Konzept der Streckenlagerung in einer Boom-Clay-Formation entwickelt. Der Standort Mol-Dessel diente als Referenzkonzept /GRU 00/, /OND 01/. Es wurde einerseits die Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (HAW) aus der Wiederaufarbeitung (Referenzoption) und andererseits die kombinierte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen und HAW untersucht. Die Konzepte sind in der SAFIR 2-Studie beschrieben und die technische Machbarkeit ist in der PRACLAY-Studie untersucht worden. Auf Basis der Studien wurden das Behälterkonzept und die Verfüllung der Einlagerungsstrecken weiterentwickelt „Supercontainer-Konzept“. Für alle Konzepte ist als Randbedingung eine Grenztemperatur von 100 °C an der Kontaktfläche zwischen dem Endlagerbehälter („overpack“⁹) und dem Puffermaterial (Außenfläche des Behälters), die von wärmeentwickelnden Abfällen nicht überschritten werden darf, festgelegt worden /OND 01/, /WEI 08/. Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle soll in einem Bergwerk in einem halb-verfestigtem Ton („Boom Clay“) stattfinden. Für das Referenzkonzept sind verschiedene Tiefen (200 m, 400 m und 600 m) für die Einlagerung der Abfälle der Kategorie B (langlebige mittelaktive Abfälle = B-Abfälle) und C (hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente = C-Abfälle) in separaten Bereichen in einem Endlager in horizontale Streckenlagerung in Supercontainern angedacht /ENG 17/. Das bislang verfolgte Konzept auf Basis der Überlegungen zur Langzeitsicherheit wurde überarbeitet und angepasst, um Gefährdungen und Anforderungen aus der Betriebsphase und Rückholbarkeit besser mit abzudecken. So wurde das in der Studie SAFIR-2 /OND 01/ verwendete Endlagerlayout hinsichtlich der Einlagerungsstreckenordnung (jetzt versetzt beidseitig zur Zugangsstrecke angeordnet) bzw. durch zwei mittig angeordnete Schächte zwischen den beiden Einlagerungsfeldern der B- und C-Abfälle verändert (s. Abb. 5.3).

⁹ Ein Endlagerbehälter (overpack) kann z. B. entweder zwei Abfallbehälter (Kokillen) mit verglasten Abfällen oder vier Uranoxid-Brennelemente bzw. ein Mischoxid-Brennelement enthalten.

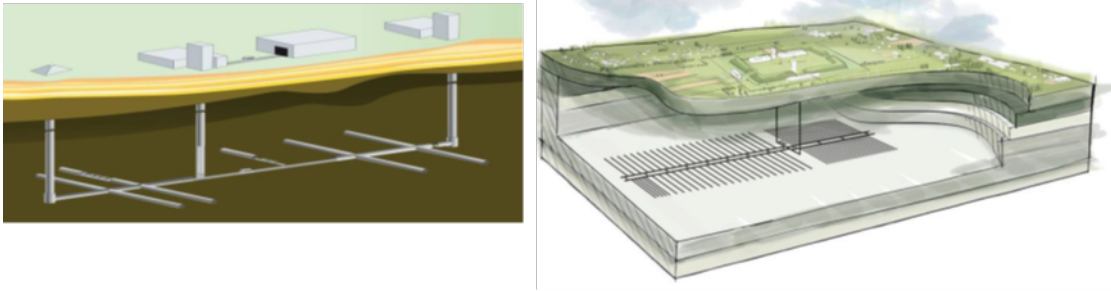


Abb. 5.3 Entwicklung von belgischen Endlagervarianten im Boom Clay
 links: Endlagerlayout für den Safety Case SFC-1C (2003-2015) /PIR 13/
 rechts: neues für Betriebssicherheit optimiertes Endlagerlayout für SFC-1
 (2015-2020) /IGSC 18/.

Der Supercontainer beinhaltet mehrere Barrieren (Abfallform, Abfallbehälter, Endlagerbehälter („overpack“), Betonitbuffer und als Außenhaut einen Stahlliner („envelope“) der in einer ausgebauten Strecke horizontal gelagert wird. Die Strecke wird mit einem weiteren Buffer aus Beton verfüllt /FAß 17b/. Für vorläufige Sicherheitsanalysen wurde ein Referenz-Layout ausgewählt, bei dem sowohl langzeitsicherheitliche Aspekte als auch die betriebliche Sicherheit sowie die Grubenstabilität berücksichtigt wurden. Das Referenzkonzept sieht neben zwei parallelen Zugangs- und Transportstrecken zwei Schächte im Zentrum des Layouts vor, die die beiden Endlagerbereiche trennen. Diese Änderungen des ursprünglichen Endlagerkonzepts, welches in Langzeitsicherheitsbetrachtungen (SAFIR 2) u. a. auf Basis thermischer Auswirkungen /OND 01/ entwickelt wurde, beruht auf Überlegungen der betrieblichen Sicherheit und der leichteren Zugänglichkeit im Falle einer Rückholung /FED 14/.

/OND 01/ definierte bereits im Jahre 2001 technische Kriterien für ein generelles Endlagerdesign und klare Anforderungen für maximal zulässige Temperaturerhöhungen für die unterschiedlichen Komponenten des Endlagers und seiner Umgebung bis zum oberflächennahen Aquifer als auch für eine Rückholbarkeit der Abfälle während eines definierten Zeitraums.

Die Eigenschaften der Materialien des Referenzkonzeptes wurden als Grundlage für die Definition von maximal zulässigen Temperaturen an verschiedenen Stellen des Endlagers und der Umgebung verwendet. Im Nahfeld kann die abgegebene Wärme die physikochemischen Eigenschaften des Abfalls, des Versatzes, der Strecken und die

Korrosion der Verpackungen beeinflussen. Nachfolgende Temperaturen werden im Nahfeld als zulässig angesehen:

- Verglaste Abfälle: 400 °C. Diese Temperatur liegt 100 °C niedriger als die Temperatur, bei der sich die mechanischen Eigenschaften des Glases ändern.
- Abgebrannte Brennelemente: 350 °C, um den Druckaufbau durch Helium in den Brennstäben zu begrenzen.
- Versatzmaterial: 100 °C, um physiko-chemische Prozesse im Versatz zu verhindern und
- um Störungen im hydraulischen System zu verhindern, die aufgrund des Ansteigens eines Porendrucks auftreten könnten. Diese Begrenzung wurde als die wichtigste angesehen.

Im Fernfeld kann die Wärme geochemische, geomechanische und hydrogeologische Bedingungen im Ton als auch in dessen Mineralogie beeinflussen. Die maximalen Temperaturerhöhungen im Fernfeld wurden zur Auslegung wie folgt begrenzt.

- Im Ton auf 85 °C, um nicht 100 °C zu überschreiten, wobei von einer Gebirgstemperatur von 16 °C ausgegangen wird,
- Im neogenen Grundwasserleiter auf 6 °C im Durchschnitt und
- In der Biosphäre auf 0,5 °C.

Die Primärbehälter mit hochaktiven Abfällen sowie die ausgedienten Brennelemente, verpackt in wasserdichte Endlagerbehälter, werden neben der Bentonitverfüllung der Einlagerungstrecken als die entscheidende technische Barriere betrachtet. So soll die Integrität der Behälter mindestens für die sogenannte „Heizperiode-Zeit“, in der die Aufwärmung des Nahfeldes mehr als 10 °K gegenüber der Temperatur der ungestörten Formation beträgt, erhalten bleiben. Die Zeitdauer dieser Periode wird für verglaste Abfälle mit ca. 300 Jahren und für ausgediente Brennelemente mit ca. 2000 Jahren angegeben /BOL 04/.

Für die wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfälle soll ein „Supercontainer“ zum Einsatz kommen, in dem die Endlagerbehälter („overpacks“), sie enthalten u. a. zur Begrenzung der Wärmeentwicklung entweder zwei Behälter mit verglasten Abfällen oder vier Uranoxid-Brennelemente bzw. ein Mischoxid-Brennelement, durch einen Bentonitbuffer

umgeben werden (s. Abb. 5.4 Supercontainer-Konzept für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle (Klasse C) in Belgien /VEH 16/). Der Supercontainer ist für eine Wärmeentwicklung durch den enthaltenen Abfall von ca. 250 W/m ausgelegt /BRE 07/.

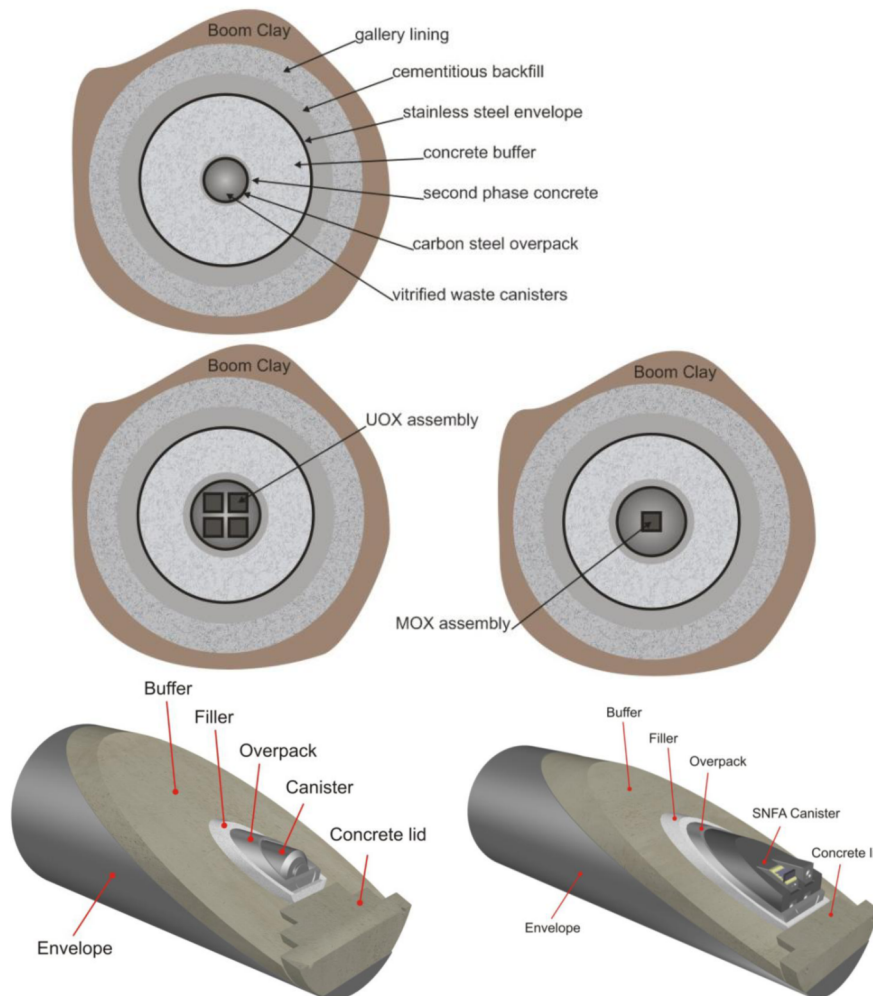


Abb. 5.4 Supercontainer-Konzept für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle (Klasse C) in Belgien /VEH 16/

Um alle Temperatur-Randbedingungen aus dem Referenzendlager für verglaste HLW zu erfüllen, ergibt sich nach /BOL 04/ eine einzuhaltende maximale Wärmeleistung von 400 W pro Behälter.

Das Endlagerkonzept Belgiens für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sieht u. a. vor, eine technische Barriere (Buffer, Verfüllmaterial) auf Tonbasis zu verwenden. Für den Buffer wurde festgelegt, Temperaturen im Buffer von 100 °C nicht zu überschreiten /AME 04/. Dies basiert auf Überlegungen der ersten Konzeptphase für ein Endlager im Boom-Ton. Eine wesentliche Rolle spielte dabei, dass die Temperatur

des Wirtsgesteins Boom-Ton 100 °C nicht überschreiten sollte, aufgrund von Überlegungen wie „keine Dampfentwicklung bei nichtgesättigten Bedingungen“ und „Reduzierung der Umwandlung von Mineralen, insbesondere der Illitisierung des Smectits“. Diese Temperaturfestlegung hatte aber zur Konsequenz, dass es an der Grenze zwischen Einlagerungsrohr und der Verfüllung zu höheren Temperaturen von bis zu 150 °C kommen könnte. Darum wurde dieses Temperaturkriterium für das Wirtsgestein als kritisch bewertet und im Ergebnis von Analysen wurde ein Temperaturkriterium von 100 °C für das Verfüllmaterial festgelegt /AME 04/. Die Temperaturfestlegung auf max. 100 °C im Verfüllmaterial auf Tonbasis, das als technische Barriere eingesetzt werden soll, erfolgte auch zur Verringerung der Korrosionsrate des Behälters /BOL 04/.

Unter der Annahme einer Maximaltemperatur von 100 °C an der Außenfläche eines Endlagerbehälters (Kontaktfläche zwischen dem Behälter und dem Buffermaterial) durch ONDRAF/NIRAS /WIC 08/, /WEI 08/ wurden Modellrechnungen durchgeführt. Als Randbedingung galt die Annahme von 60 Jahren Abkühlzeit für die Behälter und einer Ausgangstemperatur von 16 °C für das Wirtsgestein Boom-Clay. Diese Rechnungen ergaben zu erwartende Maximaltemperaturen von 58 °C, 74 °C und 68 °C etwa 10 bis 25 Jahren nach der Einlagerung /WEE 09/ an der Grenze Betonausbau/Wirtsgestein.

/WEE 09/ merkt an, dass die Anforderung der Unterschreitung von 100 °C im Buffer des Supercontainers eher willkürlich festgelegt sei und schlägt vor dieses Temperaturkriterium durch weitere Untersuchungen zu überprüfen um die argumentative Begründung zu verbessern. In /WEE 12/ wird diese Temperaturgrenze aus Sicht der Korrosion begründet. Sofern experimentelle Belege vorhanden sind, dass geringfügig höhere Temperaturen die Barrierenwirkung nicht beeinträchtigen oder Folgen für die Langzeitsicherheit bestehen, könnte dieser Wert angehoben oder das Temperaturkriterium auf den Boom-Clay bezogen werden.

5.3 Finnland

Das finnische Referenzendlagerkonzept der kurzen Bohrlochlagerung im **Kristallingestein** basiert auf dem KBS-3V-Konzept /POS 17a/ der Schweden, wobei auch die Alternative KBS-3H /POS 17b/ untersucht wurde (s. Kap. 5.6).

Der Sicherheitsnachweis für das Endlager Olkiluoto im Kristallingestein in Finnland geht von einer Maximaltemperatur von 100 °C für den Bentonitbuffer aus, um Mineral-

umwandlungen zu minimieren. Man erwartet an der Außenfläche der Behälter eine Maximaltemperatur von etwa 95 °C für einen trockenen Bentonitbuffer und von 75 °C für einen gesättigten Bentonitbuffer. An der Grenze Buffer/Wirtsgestein wird bei diesen Annahmen eine Maximaltemperatur von 65 °C innerhalb von 40 Jahren erreicht. Im Sicherheitsnachweis wurde der Einfluss von erhöhten Temperaturen bei der Betrachtung von Quellverhalten, Montmorillonitumwandlung und mikrobieller Aktivität im Bentonitbuffer berücksichtigt /POS 13/.

Zusätzlich gab es Überlegungen, dass sich bei höheren Temperaturen in der Umgebung des Behälters oder chemischer Wechselwirkungen zwischen Buffer und Stahl- oder Zementkomponenten Beeinträchtigungen des Buffers dahingehend ergeben könnten, dass der Behälter nicht ausreichend vor „Gesteinsbewegungen“ geschützt ist und Scherungen zu Verschiebungen der Behälterposition führen könnten. Dies hätte dann auch Auswirkungen hinsichtlich der Positionsbestimmung der Behälter bei optionaler Rückholbarkeit/Bergung /HIC 09/.

5.4 Frankreich

Tongestein

/AND 09/ sah für ein Endlagerkonzept bereits 2009 eine Temperatur am Kontakt zum Wirtsgestein von 90 °C vor, um auf diese Weise die Temperatur von 100 °C in Tongestein sicher unterschreiten zu können. Damit bliebe man in einem Temperaturbereich mit bekannten Phänomenen und verringere die Schädigung des Tongesteins. Eine höhere Temperatur könnte komplexe gekoppelte Reaktionen erzeugen und bei längerer Dauer zu mineralogischen Veränderungen im Tongestein führen. Entsprechend wird in /AND 14/ ausgeführt, dass zur Begrenzung thermischer Störungen die Temperatur am Kontakt zum Behälter niedriger als 100 °C sein sollte.

Für die Erteilung der Genehmigung muss ein Rückholkonzept vorliegen /AND 13/. Das Endlagerdesign ist dementsprechend angepasst. Die Einlagerungsstrecken sollen mit Stahlröhren versehen werden, um die Abfallkokillen ohne zusätzliche bergbautechnische Maßnahmen zu entnehmen /ESK 11/.

Das französische Konzept für die Endlagerung in Tongestein geht bei der Berücksichtigung der Abwärme des abgebrannten Brennstoffs davon aus, dass Stahlbehälter mit

abgebrannten Brennelementen (Primärbehälter) in Endlagerbehälter („overpacks“) verpackt und in horizontalen Stollen im Wirtsgestein platziert werden /AME 04/, umgeben von einem Bentonitbuffer zwischen den Stahlrohren.

2016 reichte ANDRA zwei Sicherheitsberichte /AND 16c/ (Betrieb) und /AND 16d/ (Schließung) ein. Diese nennen mehrere, unterschiedliche und materialspezifische Temperaturgrenzen für die Endlagerkonzeption im Tongestein, die nachfolgend dargestellt werden.

Es ist vorgesehen die Primärbehälter mit ausgedienten Brennelementen in Endlagerbehälter zu verpacken, deren Hauptfunktion es zunächst ist, einen Kontakt der Brennelemente mit Wasser für die Zeit auszuschließen, in der die Temperatur an der Außenfläche der Behälter über 80 °C liegt. Die Endlagerbehälter sollen aus nichtlegiertem Stahl der Spezifikation P235 hergestellt werden. Um die Behälter gegen Korrosion zu schützen und den sicheren Einschluss der Abfälle für 1.000 Jahre zu sichern wurde eine minimale Wandstärke von 55 mm bestimmt. Als Randbedingung sind maximale Temperaturen von 100 °C und ein Druck von 12 MPA angenommen worden. Um die Temperaturbegrenzung von max. 100 °C an der Außenfläche der Behälter einzuhalten, sind Zwischenlagerungszeiten zwischen 20 und 70 Jahren je nach Wärmeleistung der Gebinde festgelegt worden /BOL 04/.. Es soll auch für mehrere tausend Jahre verhindert werden, dass der primäre Edelstahlbehälter durch Wasserkontakt korrodiert, um die Option für ein Herausholen von Abfallbehältern nicht zu erschweren /AND 05b/. Diese Behälter sollen auch verhindern, dass während der thermischen Phase Wasser verglaste Abfälle erreicht, da sich bei Temperaturen > 50 °C Bestandteile des Glases dann mit der Zeit auflösen würden.

Thermische Kriterien sollen für das dargelegte Endlagerkonzept in Tongestein /AND 05b/ insbesondere die Anforderungen abdecken, die sich aus bekannten Verfahren und Experimenten für Systemverhalten ableiten. Dafür wurde eine maximale Temperatur von 100 °C für alle tonhaltigen Bestandteile (Wirtsgestein, Quellton) angenommen und nachfolgend die Temperaturkriterien für andere Komponenten abgeleitet. Unsicherheiten im thermischen Verhalten können dennoch zu Temperaturen bis zu 80 °C führen. Es konnte gezeigt werden, dass ein solcher Temperaturanstieg nicht zu signifikanten mineralogischen Umwandlungen toniger Materialien, insbesondere auch nicht im Wirtsgestein, führt. Andere Unsicherheiten (z. B. bei der Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins Ton) weisen auf eine maximale Temperatur von 90 °C an der

Stahlauskleidung hin, wenn die definierte maximale Temperatur von 100 °C in tonigen Materialien eingehalten wird. In Abwandlung der Temperaturbegrenzungen anderer Endlagerkonzepte für Ton wurde beim französischen Konzept für den Kontaktbereich Buffer/Tongestein eine maximal zulässige Temperatur von 90 °C festgelegt /WEI 08/.

Da die Temperatur die Löslichkeit von Radionukliden und toxischen Elementen beeinflusst, hat ANDRA entschieden jeden Kontakt zwischen Abfall und Wasser zu vermeiden, wenn die Temperatur im Abfall und in ihrer Umgebung höher als 70 °C ist. Die Lagerung wird somit in einem Bereich aufrechterhalten, in dem das Verhalten der Radionuklide und toxischen Chemikalien kontrolliert wird (Löslichkeit und Retention an der Fest-/Flüssig-Grenzfläche) /AND 16c/.

Kristallingestein

Alternativ zur Endlagerung in Ton wurde in Frankreich auch die Endlagerung in Kristallingestein (Granit) untersucht /WEI 08/. Das generische Endlagerkonzept für Granit basierte auf dem skandinavischen KBS-3-Konzept und wurde aber nicht weiterverfolgt. Für dieses Konzept wurden Temperaturen in den Einlagerungszellen von 90 °C diskutiert /AND 05c/.

5.5 Niederlande

Im niederländischen Forschungsprogramm der Kommission für Endlagerung radioaktiver Abfälle (CORA) wurde von 1995 bis 2001 die geologische Endlagerung von hochaktiven Abfällen mit Rückholbarkeitsoption insbesondere in den Wirtsgesteinen **Steinsalz** und **Tongestein** untersucht. Das generische Endlagerkonzept (METRO-1) wurde für die Lagerung von HLW in Steinsalz mit Rückholoption entwickelt /GRU 00/. Nach Einlagerung eines Containers in die Einlagerungszelle (Bohrlöcher für die Container zu beiden Seiten der Einlagerungstrecken) erfolgt bei diesem Konzept der unmittelbare Verschluss der Zelle unter Offenhaltung der Einlagerungstrecken. Berechnungen für das niederländische Konzept METRO-I haben gezeigt, dass die Temperaturen am Stoß der Einlagerungstrecken auf maximal 46 °C nach Verfüllung ansteigen /GRU 00/ in /BOL 04/.

Von 2011 bis 2017 wurde als Nachfolger von CORA im Forschungsvorhaben OPERA („Onderzoeks Programma Eindberging Radioactief Afval“) /VER 14/ eine Endlagerung

von radioaktiven Abfällen auf Basis des belgischen Endlagerkonzeptes (Endlagerdesign und Supercontainer) mit einer Auslegungstemperatur von 100 °C für das Wirtsgestein Boom Clay sicherheitstechnisch untersucht /VER 17/, /GRU 18/.

5.6 Schweden

Das Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle soll im **Kristallingestein** in einer Teufe von 457 bis 470 m mit einer Rampe und mehreren Transport- und Bewetterungsschächten aufgefahren werden. Zur Endlagerung von ausgedienten Brennelementen (BE) und von hoch radioaktiven Abfällen (HAW) ist in Schweden das KBS-3-Konzept mit den Varianten KBS-3H für horizontale Endlagertunnel und KBS-3V für vertikale Endlagerbohrungen entwickelt worden. Das Referenzkonzept der SKB sieht eine vertikale Einlagerung in Kurzbohrlöchern (Typ KBS-3V) in einem Endlagersystem in ca. 500 m Tiefe in granitischem Gestein vor. Die vertikale Bohrlochlagerung (Konzept KBS-3V) erfolgt in Bohrlochern (Durchmesser ca. 1,8 m) mit einer Tiefe von ca. 8 m; die mit einem Bentonitbuffer versehen sind. Die Einlagerungstunnel Zugangsstrecken in der Bohrlochlagerung besitzen Abstände von ca. 40 m, der horizontale Abstand der Einlagerungsbohrlöcher ca. 6 - 7 m. Die Auslegungsanforderung des KBS-3 Konzepts weist eine Temperatur < 100 °C an der Außenfläche der Behälter aus /SKB 11a/.

Im KBS-3 Konzept stellen technische Barrieren die Hauptbarrieren dar. Insbesondere den **Behältern** wird eine primäre Sicherheitsfunktion zugeordnet. Das KBS-3-Referenz Behälterdesign besteht aus einem Gusseisen Innenbehälter mit dichter Korrosionsbarriere aus Kupfer /FAß 17a/. In einen BE-Endlagerbehälter können entweder 4 Druckwasserreaktor-BE (DWR-BE) oder 12 Siedewasserreaktor-BE (SWR-BE) eingelagert werden. Die Zwischenlagerzeit der Brennelemente wird mit mindestens 30 Jahren abgeschätzt. Die Nachzerfallsleistung liegt dann für DWR-BE bei 300 bis 450 W je BE und für SWR-BE zwischen 100 und 150 W je BE. Nach der Zwischenlagerung soll die Temperatur an der Außenfläche der Behälter, die eine Wärmeleistung zwischen 1,2 KW bis 1,8 KW besitzen, nach der Einlagerung 100 °C unterschreiten /HER 08/.

In Schweden /SKB 99/ wurde angenommen, dass möglicherweise bei Temperaturen von mehr als 100 °C die Korrosion an der Außenfläche der Behälter zunimmt, wenn der Bentonit-Buffer gesättigt ist. Die Begründung dafür ist die potenzielle Anreicherung von ausgefallenen Mineralen (Salzen) auf der Außenfläche der Behälter (siehe auch Prozessbeschreibung in Kap. 6.3.2).

Weiterhin wird eine Temperatur von $< 125\text{ °C}$ nach /SKB 10a/ (s. S. 26) mit dem Ziel genannt zu verhindern, dass thermische Prozesse die mechanischen Materialeigenschaften des Behältermaterials, der Kupferummantelung und des Einsatzes beeinträchtigen. Für höhere Temperaturen müssen die Materialien neu bewertet werden. Die Annahmen zur Änderung der Materialeigenschaften des Behälters sind in Kap. 6.3.2 erläutert.

Nach /SKB 10a/ müssen die Abfallbehälter auch für niedrigere Temperaturen bis 0 °C ausgelegt werden, um den mechanischen Belastungen (z. B. Scherungen) standzuhalten, die im Endlager z. B. bei einer Eisüberföhrung auftreten können.

Bentonit umgibt die Behälter in den Einlagerungsbohrlöchern. Der Bentonit dort (im nachfolgenden „**Buffer**“ genannt) hat die Aufgabe den Endlagerbehälter vor Wasserzutritt zu schützen, ungünstige Bedingungen für sulfatreduzierende Bakterien zur Limitierung einer Sulfid-Korrosion der Behälter zu schaffen, den Endlagerbehälter in seiner Lage zu halten und (erdbebenbedingte) Scherbewegungen vom Behälter abzufedern. Der Bentonitversatz („Backfill“) in den Einlagerungsstrecken („deposition tunnels“), hat die Aufgabe, Wasserzuflüsse aus in den Einlagerungsstrecken angeschnittenen Klüften durch dessen geringe hydraulische Durchlässigkeit zu begrenzen.

Schweden und Finnland nehmen für den Buffer eine maximale zulässige Temperatur von 100 °C an. In Finnland wird ergänzend eine Sicherheitsmarge angenommen, die zu einer maximalen zulässigen Temperatur von 90 °C führt /SKB 11b/, /POS 12a/. Die Begründung ist nach /SKB 10b/, /POS 12a/ die Gewährleistung, dass der Buffer seine günstigen Eigenschaften über einen langen Zeitraum behält. Günstige Eigenschaften sind der notwendige Quelldruck und die damit verbundene geringe Permeabilität. Der Quelldruck und die geringe Permeabilität im Buffer entstehen, wenn dieser sich, wie im Endlagerkonzept geplant, mit Wasser aufsättigt. Es wird angenommen, dass bei Temperaturen über 100 °C im Buffer diese Eigenschaften nicht über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleiben, da eine fortschreitende Illitisierung im Bentonit des Buffers eintreten könnte (Prozessbeschreibung s. Kap. 6.3.2).

Anders als die Autoren des schwedischen SR-Site /SKB 11b/ sind einige Autoren (z. B. /CHO 16/ oder /WER 07/) der Meinung, dass auch Temperaturen bis 125 °C keine signifikante Auswirkung sowohl auf Behälter als auch Buffer haben. Sie argumentieren, dass Analysen ein Temperaturkriterium von mindestens 120 °C unterstützen. Weitere

Autoren, z. B. /VOM 15/, vermuten sogar, dass Temperaturen bis zu 150 °C und höher machbar wären, allerdings mit der Einschränkung, dass in den Sicherheitsanalysen dann die möglicherweise verminderte rückhaltende Funktion der Bentonit-Barriere berücksichtigt werden müsste. /SIM 94/, /JOH 94/ wiederum sind der Meinung, dass ein Limit (im Sinne einer „Grenztemperatur“) von 100 °C existieren sollte und stimmen in der Begründung (zunehmende Illitisierung) mit den schwedischen Autoren überein.

Für den Buffer ist auch im Rahmen des schwedischen Konzepts eine untere Temperatur festgelegt worden, die nicht unterschritten werden darf, damit der Buffer seine geplante Funktion entfaltet. Diese Temperatur liegt bei -4 °C und ist an der Grenzfläche Buffer/Wirtsgestein definiert und soll sicherstellen, dass der Buffer nicht gefriert. Für das schwedische Konzept wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung (Betrachtung von Eiszeiten) und in Anbetracht der relativ geringen Endlagertiefe das Verhalten des Buffers bei niedrigen Temperaturen untersucht. Im Gegensatz zu den Schweden, die eine Sicherheitsfunktion für den Buffer mit der o. g. Temperatur definieren, wird in Finnland weder eine Sicherheitsfunktion noch ein sog. „performance target“ mit einer Temperatur von > 4 °C angegeben und das obwohl das Endlager durch seine etwas geringere Teufe eher von einem klimatischen Permafrostereignis betroffen sein könnte /POS 12a/.

Zentrale Temperatur-Randbedingung für die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers im Kristallingestein in Schweden, ist somit die Festlegung einer Maximaltemperatur von 100 °C für den Bentonitbuffer, um Mineralumwandlungen auszuschließen. Das Ausmaß von Mineralumwandlungen steigt mit zunehmender Temperatur stetig an und es gibt keine scharfe Temperaturuntergrenze (s. Kap. 6), dennoch wird mit diesem 100 °C Kriterium für den Buffer die Mineralumwandlung aus Sicht der Langzeitsicherheit als vernachlässigbar betrachtet /SKB 06b/. Für die Außenfläche der Abfallbehälter gilt somit gleichfalls, dass die Temperatur dort 100 °C nicht überschreiten darf. Im Endlagerkonzept wird dies über entsprechende Planungen der Einlagerungsstrecken und der Abstände zwischen den Bohrlöchern erreicht /BOL 04/, /WEI 08/, /HIC 09/.

Die Begrenzung der Außenflächentemperatur von Abfallgebinden wurde festgelegt, damit die Auswirkungen von siedendem Wasser nicht in die thermische Modellierung einbezogen werden muss /HIC 09/. Diese Begrenzung soll einerseits eine übermäßige Austrocknung des Bentonitbuffers vermeiden, aber auch die Korrosionsrate des Kupferbehälters (die Korrosionsrate von Kupfer verdoppelt sich bei jeder

Temperaturerhöhung um 10 °C) geringhalten, sowie die Anreicherung von potenziell korrosionsbeschleunigenden Salzen auf der Außenfläche der Behälter vermeiden.

Die von /SKB 06b/ vorgelegte thermische Modellierung ergab, dass die Buffertemperatur voraussichtlich nicht über 80 °C liegen wird. Sensitivitätsanalysen, die Unsicherheiten in den thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten) des Bentonits und des umgebenden Gesteins berücksichtigen, zeigen dass die höchste Außenflächentemperatur für den Behälter 100 °C und die höchste Temperatur im Bentonit 90 °C wäre /HIC 09/.

/HÖK 03/ berechnete für das schwedische Konzept im Kristallingestein die Mindestabstände für Behälter in einem Endlager abhängig von der maximalen Temperatur und der Außenfläche der Behälter. Die Vorgabe war, dass die Außenflächentemperatur am Behälter und der Bentonit 100 °C im Konzept KBS-3V und KBS-3H nicht überschreiten sollte. Daraus wurde eine Strategie für die weitere Konzeptplanung abgeleitet /HÖK 09/. In gleicher Weise erfolgte eine Analyse für ein finnisches Endlagerkonzept im Kristallingestein /IKO 09/.

5.7 Schweiz

Aussagen über Auswirkungen der Wärmeentwicklung für ein schweizerisches Endlager sind in /HEI 17/ unter Bezug auf das Kernenergiegesetz, Kernenergieverordnung und weiterer Richtlinien zusammengefasst.

Tongestein

Das HAW-Endlagerkonzept der NAGRA basiert auf einer Einlagerung der Behälter in horizontale Strecken, 27 Lagerstollen mit einer Länge von 800 m und einem Durchmesser von 2,5 m. Die Streckenabstände betragen ca. 40 m zwischen den einzelnen Einlagerungsstollen (resultierend aus dem maximal zulässigen Temperaturfeld).

Die **Endlagerbehälter** für ausgediente Brennelemente sollen als zylindrische Stahlbehälter ausgebildet werden. In einen Endlagerbehälter ist beabsichtigt, entweder 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelemente zu verpacken. Nach dem gegenwärtigen Endlagerkonzept werden die Wiederaufarbeitungsabfälle in HAW-Kokillen konditioniert. Das Auslegungskonzept der Behälter für ein Endlager in der Schweiz soll die Einschlusswirksamkeit der

Behälter für mindestens 1.000 Jahre gewährleisten /ENSI 09a/. Eine Anforderung schreibt vor, dass Maßnahmen zum Lifting an einem Behälter angebracht werden müssen, sodass die Handbarkeit mit Rückholbarkeitsoption während der Betriebsphase gewährleistet ist. Auf Basis der Behälterbeladung zeigt die Behälterausslegung nach /PAT 12/, dass nach 10 Jahren eine maximale Temperatur an der Außenfläche der Behälter von 140 °C erreicht wird und nach 10.000 Jahren die Temperatur maximal 45 °C beträgt /LAN 09/.

Im Barrierenkonzept übernehmen das Verfüllmaterial (Bentonit) mit Bentonitauflager als technische Barrieren und das Wirtsgestein (Opalinuston) die einschlusswirksamen Eigenschaften. Der Entsorgungsnachweis für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Opalinuston im Zürcher Weinland in der Schweiz basiert u. a. auf den Temperaturannahmen zum Bentonitbuffer. Die Maximaltemperatur für die äußere Hälfte des Bentonitbuffers (0,725 m bzw. 0,78 m je nach Behältertyp) für Behälter, die verglaste Abfälle oder drei bis vier Uranoxid-Brennelemente und ggf. ein Mischoxid-Brennelement enthalten, wird mit ca. 125 °C angenommen. Bei einem erwarteten Wassergehalt von ca. 2 Gew. % im Bentonit errechnen sich daraus Maximaltemperaturen von 140 °C bis 160 °C für Bentonit an der Außenfläche der Behälter und von etwa 70 °C bis 95 °C an der Grenze Buffer/Wirtsgestein /JOH 02/. In /NEA 04/ wird darauf hingewiesen, dass entsprechend der Prüfung eines internationalen Gutachterteams angemerkt wurde, dass der Einfluss von hohen Temperaturen auf Quell- und Sorptionseigenschaften sowie Permeabilität im gesättigten Zustand des Bentonits und auf thermohydraulische und thermomechanische Prozesse im Maßstab einer Einlagerungsstrecke weiterer eingehender wissenschaftlicher Untersuchungen bedürfen.

Nach /HIC 09/ hatte die NAGRA zunächst keine feste Temperaturgrenze für den Buffer für das Opalinuston-Entsorgungskonzept vorgesehen. Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Buffers seien sein Quelldruck und seine hydraulische Leitfähigkeit für den Zeitraum nach Beendigung der Einlagerung. Die Spitztemperatur sowie andere Faktoren könnten diese Eigenschaften beeinflussen. Die Anforderungen an den Buffer seien für die Entsorgung in einem Tongestein nicht hoch und die Rolle, die der Buffer für die Sicherheit spiele, sei begrenzt. Diese Ansicht steht im Einklang mit zwei anderen Entsorgungskonzepten für Tongestein, die keinen Bentonitbuffer verwenden (Andra in Frankreich und ONDRAF/NIRAS in Belgien). Für das Schweizer Konzept besteht die Hauptaufgabe des Buffers in der Verhinderung einer horizontalen Strömung entlang eines Einlagerungstunnels (Langzeitsicherheit). Lokale Erhöhungen der hydraulischen

Leitfähigkeit in der Nähe von Behältern aufgrund erhöhter Temperaturen, seien nicht wesentlich, vorausgesetzt, dass die Bereiche zwischen den Behältern nur geringfügig beeinträchtigt würden. Daher sei der „Ort“ innerhalb des Endlagersystems wichtig, auf den die Temperaturanforderung angewendet wird /HIC 09/.

Kristallingestein

Vor der Festlegung einer Endlagerung im Tongestein wurde im Projekt GEWÄHR auch eine Endlagerung im Kristallin (Granit) untersucht /WEI 08/. Das generische Endlagerkonzept für Granit basierte auf der Einlagerung von massiven Stahlgussbehältern mit verglasten Abfällen und Brennelementen (HAW-Abfälle) umgeben von Bentonit in horizontalen Endlagerstollen und vertikalen Endlagersilos für alpha-haltige MAW-Abfälle in einer Teufe von 1.200 m. u. GOK /NAG 85/. In einem Bericht für das schweizerische Endlagerkonzept für Kristallingestein wurden Berechnungen der Temperaturentwicklung in einem Endlager für abgebrannte Brennelemente durchgeführt. Die Berechnungen basierten auf einer provisorischen Auslegung des Endlager-Nahfeldes, mit Verpackung der abgebrannten Brennelemente in Kupfer-Stahl-Behältern, die zentrisch von Bentonit umhüllt in der Horizontalachse der Endlagerstollen eingelagert werden. Im Ergebnis der Berechnungen zum Referenzfall betragen die maximalen Temperaturen bei einer Wärmeproduktion von 1.000 W pro Behälter (40 a nach Entnahme aus dem Reaktor) 98 °C am Streckenstoß, 103 °C in der Mitte des Bentonits und 126 °C an der Grenze Behälter/Bentonit. Zusätzlich zum Referenzfall wurden Parametervariationen untersucht, um die Sensitivität der Temperaturentwicklung auf alternative Wärmeproduktionswerte und Auslegungsspezifikationen sowie auf Ungewissheiten in den Materialeigenschaften zu prüfen /SAT 98/.

5.8 USA

Die Temperaturanforderungen während der Entwicklung der Endlagerkonzepte für die USA werden in /REC 14/ dargelegt. In einem Endlagerkonzept von 1982 im **Tuffgestein** sollte die Temperaturerhöhung durch das Endlager an der Erdoberfläche um höchstens 6 °C und die Temperatur innerhalb des Endlagers auf 200 °C begrenzt sein /REC 14/. Die letzte Anforderung wurde in allen nachfolgenden Endlagerkonzepten als maximale Temperatur am Stoß beibehalten, um chemische Veränderungen im Tuffgestein ausschließen zu können. In etwas neueren Konzepten sollte zudem die innere Temperatur eines Abfallbehälters 375 °C (bzw. 350 - 400 °C je nach Abfallmatrix) als Limit für die

Brennstabhüllen nicht überschreiten /REC 14/. Ein Genehmigungsantrag in 1999 berücksichtigte eine Temperaturanforderung $< 96\text{ °C}$ in den Pfeilern zwischen den Strecken, um eine Ableitung von verdampften Wasser in flüssiger Form zu ermöglichen /REC 14/. Entsprechend wurde der Streckenabstand erhöht. Weitere Konzeptentwicklungen sind aufgrund der politisch bedingten Einstellung der Arbeiten am Yucca Mountain Projekt nicht erfolgt.

Das für ein Endlager im Tuffgestein verfolgte Endlagerkonzept der USA beruhte auf einer „Austrocknungsstrategie“ /PAP 99/. Nach diesem Konzept werden die Brennelemente mit relativ hoher Anfangswärmeleistung eingelagert. Dies hat zur Folge, dass im Einlagerungsbereich über längere Zeiträume Temperaturen über der Siedetemperatur herrschen. Thermische Berechnungen zeigen, dass dadurch Temperaturen bis zu 230 °C erreicht werden. Mit der Aufheizung des umgebenden Wirtsgesteins sollte erreicht werden, dass das im Tuffgestein enthaltene Kapillarwasser verdampft, um Beschädigungen der Behälter durch Korrosionseffekte zu vermeiden und langfristig die Radionuklide einzuschließen /BOL 04/.

Vor Verschluss werden in den ersten 100 Jahre nach Einlagerung der Abfälle bei Bewitterung mit einer Ventilationsrate von $15\text{ m}^3/\text{s}$ maximale Temperaturen von 60 °C erwartet. Der Zeitraum der Offenhaltung (Vorverschlussphase) wird mit 10 bis zu 300 Jahren angegeben. Bei stärkerer Bewitterung sei es auch möglich die Temperatur zur Unterstützung von Überwachungs- und Rückholaktivitäten auf unter 50 °C zu senken /BOL 04/.

Die Außenflächentemperatur der Abfallbinde soll nach Verschluss unter 300 °C und in den nächsten 9.500 Jahren unter 200 °C sein /HIC 09/.

5.9 Sonstige Länder

Nachfolgend werden weitere Länder aufgelistet, insoweit Informationen zu Temperaturfestlegungen unter anderem aus Konzeptstudien ohne vertiefende Recherche vorliegen.

Großbritannien

Von der Nuclear Decommissioning Authority's Radioactive Waste Management Directorate (NDA RWMD) wurde ein Referenzkonzept für die Entsorgung hochaktiver Abfälle

und abgebrannter Brennelemente entwickelt. Danach ist vorgesehen die Abfälle in Kupferkanistern mit Gusseiseneinsätzen in vertikalen Bohrungen in einer Reihe von Tunneln einzubringen. Die Rückholbarkeit von radioaktiven Abfällen aus einem geologischen Endlager vor dessen Verschluss wird nicht ausgeschlossen. Aber grundsätzlich wird für einen frühestmöglichen Verschluss des Endlagers plädiert, da dies zu größerer Sicherheit führe /NDA 14/.

In /HIC 09/ wird eine thermische Beschränkung von 100 °C für die Außenfläche eines Kupferbehälters genannt. Diese Beschränkung soll vermeiden, dass Auswirkungen durch Sieden von Wasser bei den Temperaturmodellierungen zu berücksichtigen sind. Insbesondere soll eine übermäßige Austrocknung des Bentonits vermieden werden, ebenfalls die Anreicherung von möglicherweise korrosionsbeschleunigenden Salzen am Kupferbehälter um eine Korrosion zu begrenzen.

Japan

Das Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) stellte 2000 eine Analyse der Machbarkeit der HLW-Entsorgung in einem geologischen Endlager vor. Das Konzept sieht die Verwendung bentonithaltigen Buffers voraus, dessen Temperatur soll 100 °C nicht überschreiten, um die mineralische Umwandlung von Smektit in Illit zu vermeiden /HIC 09/.

Kanada

Das kanadische Endlagerkonzept sieht vor, dass die Abfallbehälter (Container), die in Anlehnung an das schwedische Konzept entwickelt werden, für den Zeitraum der Betriebsphase des Endlagers für Temperaturen von - 50 °C bis 100 °C ausgelegt sein sollen. Nach der Schließung des Endlagers (Nachbetriebsphase) soll die Temperatur an der Außenfläche des Containers 100 °C nicht überschreiten /BOL 04/.

In der Vergangenheit wurden für die Endlagerung radioaktiver Abfälle auch Behälter aus einer Titanlegierung in Betracht gezogen /JOH 94/. Auch für diese wurde ein Temperaturlimit von 100 °C angenommen, um eine Beständigkeit über die vorgesehene Lebensdauer von 500 Jahren bis zu einem Gebirgsdruck von 12,5 Pa zu erhalten. Die Begründung (Spaltkorrosion) ist in Kap. 6.3.2 näher beschrieben.

Russland

Für ein Endlagerkonzept (Bohrlochlagerung) wurden thermische Berechnungen erstellt. Diese nahmen als Randbedingung an, dass zu keiner Zeit an der Kontaktgrenze Container-Bentonit eine Temperatur von 100 °C erreicht werden sollte, damit die Barrierenfunktion des Bentonits gewährleistet ist und keine Dampfentwicklung erfolgt /BOL 04/.

Spanien

Spanien untersuchte die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in den Wirtsgesteinen Kristallingestein (Granit) und Steinsalz konzeptionell. Das Referenzkonzept im Granit sieht ein Endlagerbergwerk in 500 m Teufe vor und basiert auf einer horizontalen Streckenlagerung von Behältern in einem Buffermantel (kompaktierter Bentonit) /IAEA 93/.

Die Auslegung des Endlagers im Kristallingestein nahm eine maximale Temperatur von 100 °C für das Verfüllmaterial (Bentonit) an. Die Anforderung wurde durch die Wahl der Abstände der Einlagerungstrecken (35 m) und der Abstände zwischen den Containern (2 m) eingehalten /BOL 04/, /HIC 09/.

Südkorea

Das Endlagerkonzept für abgebrannte Brennelemente im Kristallingestein in Südkorea basiert auf der Verwendung eines Bentonitbuffer, der nicht über 100 °C erhitzt werden sollte, um ungünstige Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit durch Illitisierung oder andere Mineralumwandlungen zu vermeiden /LEE 07/. Es wird jedoch eine Anhebung der Maximaltemperatur im Bentonitbuffer von 100 °C auf 125 °C in Erwägung gezogen, um die benötigte Grundfläche des Endlagers zu reduzieren /CHO 16/.

/LEE 11/ berechnet unter der Annahme eines Temperaturkriteriums von 100 °C für den Integritätserhalt des Buffers die Auslegung eines Endlagers im Kristallingestein hinsichtlich der Strecken- und Behälterabstände sowie Abklingzeiten um die Größe des Endlagers zu optimieren. /CHO 16/ kommt zum Schluss, dass ein höheres Temperaturkriterium von 125 °C keinen signifikanten Einfluss auf die Integrität des Buffers zu haben scheint.

5.10 Erkenntnisgewinn aus nationalen Endlagerkonzepten

In Deutschland erfolgten über viele Jahre Untersuchungen und Entwicklungen von Konzepten für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen im Wirtsgestein **Steinsalz**. Für den Standort Gorleben wurde in einer vorläufigen Sicherheitsanalyse letztmalig ein Endlagerkonzept im Wirtsgestein Steinsalz auch unter Berücksichtigung einer Rückholbarkeit untersucht /FIS 13/. Die Auslegungstemperaturen eines Endlagers im Steinsalz orientierten sich an den Mineraleigenschaften der in der weiteren Umgebung vorkommenden kristallwasserhaltigen Mineralen (sog. Hydratsalze), um eine Freisetzung von Kristallwasser aus Hydratsalzvorkommen zu vermeiden. Aus den Mineraleigenschaften und den sich daraus ergebenden Temperaturbegrenzungen wurden mittels Temperaturfeldberechnungen die Temperaturen an der Außenfläche der Behälter ermittelt und als Auslegungstemperaturen angesetzt.

Im Jahr 2016 empfahl die **Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“** /KOM 16/ eine neue, ergebnisoffene Standortsuche für ein Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein. Erste Endlagerkonzepte für Tongestein in Deutschland sind entwickelt /JOB 17a/. Auch Konzeptüberlegungen für Kristallingestein sind in /JOB 16/ dokumentiert. Für Deutschland sind Sicherheits- und Endlagerkonzepte im Kristallingestein angedacht, die neben technischen Barrieren auch einen multiplen ewG oder einen überlagernden ewG vorsehen /JOB 16/.

Belgien, Frankreich und die Schweiz planen Endlager in den Wirtsgesteinen **Ton** (Boom Clay, Belgien /UHL 17/) bzw. **Tongestein** (Opalinuston, Schweiz /WEY 17/; Callovo-Oxfordian, Frankreich /KRI 17/) und entwickeln entsprechende Endlagerkonzepte. Belgien befindet sich in einem frühen Konzeptstadium, während die Schweiz und Frankreich in ihren Programmen weiter fortgeschritten sind. Buffer aus tonhaltigen Materialien und das Wirtsgestein Ton bzw. Tongestein bilden die Barrieren, um die Langzeitsicherheit gewährleisten zu können. Entsprechend wurden Anforderungen hinsichtlich der Begrenzung des Temperatureinflusses aus den Eigenschaften der Tonminerale im Buffer und Wirtsgestein abgeleitet.

Finnland und Schweden planen aufgrund der länderspezifischen geologischen Gegebenheiten Endlager im **Kristallingestein** /FAß 17a/. Die beiden skandinavischen Länder haben ein ähnliches Endlagerkonzept, das sog. KBS-3-Konzept, entwickelt, das den Schwerpunkt auf technische Barrieren setzt, um die Langzeitsicherheit gewährleisten zu können. Schweden ist weit fortgeschritten bei der Entwicklung des Endlagerkonzepts

/SKB 18/ und Finnland befindet sich bereits in der Errichtungsphase (Onkalo) /POS 16/. Für diese Endlagerkonzepte im Kristallingestein wurden Anforderungen hinsichtlich Temperaturen aufgrund der Eigenschaften der Tonminerale im Buffer abgeleitet.

Im Folgenden werden die Aussagen (Kap. 5.2 bis 5.8) zu den Auslegungstemperaturen, welche die Endlagerkonzepte verschiedener Länder bestimmt haben, hinsichtlich der resultierenden maximalen Temperatur an der Außenflächen der Abfallbehälter vergleichend zusammengefasst.

Die meisten Konzepte, in denen tonhaltige Materialien als Barrierenmaterial zum Einsatz kommen, wird eine maximale Temperatur bis zu 100 °C im tonhaltigen Material zur Auslegung vorgegeben (**Auslegungstemperatur**). In der Schweiz werden auch höhere Temperaturen im tonhaltigen Buffer konzeptionell als machbar angesehen. Dementsprechend werden modelltechnisch Temperaturen an Außenflächen der Behälter abgeleitet, die im Bereich zwischen 80 - 150 °C liegen.

Die Endlagerkonzepte in Belgien, Schweiz und Frankreich für **Tongestein** bzw. Spanien für **Kristallingestein** basierten zunächst auf dem Auslegungskriterium von max. 100 °C für das Verfüllmaterial Bentonit. Begründet wurde dies damit, dass das Buffermaterial bei höheren Temperaturen Dichteigenschaften verliert. Für das Konzept der Schweiz sind die **Auslegungstemperaturen** für die äußere Hälfte des Buffers von 100 °C auf 125 °C heraufgesetzt worden /JOH 02/. Dadurch ändern sich die möglichen Maximaltemperaturen für die Außenfläche der Behälter, die nach /JOH 02/ demzufolge 140 - 160 °C erreichen könnten. Dagegen wurde in Frankreich festgelegt, dass am **Kontakt Buffer/Tongestein** maximal 90 °C zulässig sind, um die maximale Temperatur von 100 °C im Buffer einzuhalten /WEI 08/.

Exemplarisch sind in Tab. 5.1 ausgewählte Aspekte der Auslegung der am weitesten entwickelten Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen **Tongestein** (Frankreich /KRI 17/ und Schweiz /WEY 17/) und **Kristallingestein** (Schweden /FAß 17a/) zusammengestellt. Die beiden Tongesteine der Schweiz und Frankreich unterscheiden sich in ihrer Genese und die Endlagerkonzepte in ihrem Endlagerdesign bzw. in Überlegungen zu einer Temperaturfestlegung (für die Schweiz < 100 °C, für Frankreich < 90 °C). Dagegen sind die Eigenschaften der skandinavischen Kristallingesteine ebenso wie die Endlagerkonzepte (Finnland und Schweden) sehr ähnlich, so dass hier nur das Referenzkonzept der Schweden dargestellt wird. Die Temperaturangaben in der Tab. 5.1 sind nicht nur

grobe Richtwerte für eine Endlagerauslegung, sondern wurden auch anhand von Temperaturfeldrechnungen abgeleitet.

Die Literaturrecherche ergab darüber hinaus z. T. deutliche Unterschiede hinsichtlich der aus den Endlagerkonzepten resultierenden maximalen Temperaturen an der Außenfläche der Behälter. Die **höchste Temperatur** beträgt bis zu 230 °C (innere Temperatur eines Abfallbehälters nach Verschluss 350 °C). Diese Temperatur wurde zur Auslegung im amerikanischen Endlagerkonzept in Tuff (Yucca Mountain) /PAP 99/, /REC 14/ für die Einlagerung der Abfallgebinde in offen gehaltenen Strecken berücksichtigt. Das Konzept wird derzeit nicht weiterverfolgt. Für Großbritannien, Japan, Russland, Spanien und Südkorea wurden **keine belastbaren bzw. konkreten Aussagen** zu Temperaturen an der Außenfläche der Behälter für eine Endlagerauslegung gefunden.

In den Ländern, deren Endlagerkonzepte auf der Verwendung von **Bentonit als Verfüllmaterial/Buffer** als Barriere beruhen, stehen die Eigenschaften des Buffers bei der Festlegung von maximalen Temperaturen (Auslegungstemperaturen der Endlager) im Vordergrund. Ausgehend von diesen Temperaturen zum Erhalt gewünschter Buffereigenschaften, werden maximale Außenflächentemperaturen für die Abfallbehälter (bzw. Behälterkonzepte und -beladungen) abgeleitet. Mit Ausnahme der Schweiz (teilweise Schweden) werden maximale Temperaturen von 100 °C für bentonithaltige Buffer angenommen. Hieraus ergeben sich mögliche Temperaturen ≤ 100 °C an der Außenfläche der Behälter. Wenn für das Endlagerkonzept die Eigenschaften tonhaltiger Buffer nicht im Vordergrund stehen, wie in der Schweiz, werden höhere Maximaltemperaturen an der Außenfläche der Behälter in Betracht gezogen.

Es wurden in der ausgewerteten Literatur keine Hinweise gefunden, die wegen der Eigenschaften der Behälter eine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche der Behälter erfordert und in der Endlagerauslegung zu berücksichtigen ist.

Tab. 5.1 Auslegung von Endlagerkonzepten

	Frankreich	Schweiz	Schweden
Wirtsgestein	Tongestein Calovo- Oxfordian	Tongestein Opalinuston 110 - 120 m mächtig	Kristallingestein Metagranit (svekokarelich)
Einlagerungs- konzept	Streckenlagerung Horizontale „Bohrlö- cher (disposal cells)	Streckenlagerung	Streckenlagerung horizontale Kurz- bohrlöcher (KBS-3)
Behälter	Behälter aus unlegiertem Stahl	Stahlbehälter	Behälter mit dichter Korrosionsbarriere aus Kupfer und In- nenbehälter aus Gusseisen
Rückholbar- keit	Gesetzlich gefordert	Gesetzlich gefordert	Möglich, aber kein regulatorisches Ge- bot
Teufe	525 m	500 m - 700 m	450 - 470 m
Geologische Barriere	Wirtsgestein (Tongestein)	Wirtsgestein (Tongestein)	Wirtsgestein (Kristallingestein)
Technische Barriere	Buffer (Bentonit)	Buffer (Bentonit)	Buffer (Bentonit)
Außenfläche der Behälter Max. Temp.	90 °C - 100 °C /AND 05d/	max. 140 - 160 °C /JOH 02/	< 100 °C /WEI 08/, /SKB 99/ < 1.700 W/Behälter
Verfüllmate- rial Max. Temp.	100 °C für Bentonit, /AME 04/	125 °C in der äuße- ren Hälfte des Ben- tonitbuffers /JOH 02/	< 100 °C /SKB 06a/, /SKB 06b/
Wirtsgestein Max. Temp.	90 °C (Einlagerungs- kammern) /AND 05b/, /AND 05d/	70 °C bis 95 °C Grenze Buffer/Wirts- gestein, /JOH 02/	< 100 °C /SKB 06a/, /SKB 06b/

6 Temperaturabhängige THMCB-Prozesse und Eigenschaften

Im Folgenden werden THMCB-Prozesse und Eigenschaften beschrieben, die für eine Festlegung einer „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche eines Behälters aus sicherheitstechnischen Gründen relevant sein können. Zunächst wird die Methodik und Erkenntnisgrundlage erläutert, mit der diese Prozesse und Eigenschaften (wirtsgesteinspezifisch) systematisch ermittelt wurden.

Es ist ein international übliches Vorgehen in Sicherheitsanalysen den Anfangszustand eines Endlagerstandortes zu beschreiben, soweit dieser bekannt ist. Mit einem Verständnis der Faktoren, die das Endlager beeinflussen können, können dann die zukünftig möglichen bzw. erwarteten Entwicklungen abgeleitet werden (Szenarientwicklung), die dann in Sicherheitsanalysen betrachtet werden. Diese Faktoren sind als „Features, Events and Processes“ (FEP, deutsch: Zustände, Eigenschaften und Prozesse) systematisch in Datenbanken dokumentiert, den sogenannten FEP-Katalogen. Mit Kenntnis der Abhängigkeiten erfolgt dann die Szenarientwicklung, die die Basis der (vorläufigen) ggfs. numerischen Sicherheitsanalysen bildet. Die Erstellung und Anwendung von FEP-Katalogen zur Szenarientwicklung für Sicherheitsanalysen gelten gegenwärtig als Stand von W&T.

Die bisherigen FEP-Kataloge streben eine vollständige Darstellung dieser Faktoren entweder auf generischer /NEA 00/, /NEA 06b/, /RWMC 14a/, /RWMC 14b/ oder auf standortspezifischer Basis an /FIS 13/, /JOB 17a/, /SKB 10c/. Im Idealfall werden alle Abhängigkeiten der FEP untereinander sowohl qualitativ als auch quantitativ erfasst. Diese FEP-Datenbanken sollten somit auch die temperaturabhängigen Prozesse und Eigenschaften enthalten.



Abb. 6.1 Bausteine einer Sicherheitsanalyse

FEP-Kataloge wurden in Deutschland für Steinsalz (Projekt VSG /FIS 13/, /WOL 12/, /BEU 12/) und Tongesteine (Projekt ANSICHT /JOB 17a/) entwickelt, beziehungsweise werden für Kristallingestein (Projekt /JOB 16/) erarbeitet. Die Differenzierung der FEP ist allerdings unterschiedlich erfolgt. So liegt dem FEP-Katalog aus Schweden für Kristallingesteine /SKB 10c/ eine deutlich abweichende Systematik im Vergleich zu den anderen genannten FEP-Katalogen zugrunde. Der schwedische FEP-Katalog verwendet einen **Top-Down-Ansatz** im Gegensatz des in Deutschland verwendeten **Bottom-Up-Ansatzes**. Als Top-Down-Ansatz wird die Ableitung von Szenarien ausgehend von Sicherheitsfunktionen bezeichnet, als Bottom-Up-Ansatz hingegen die Ableitung von Szenarien ausgehend von der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems bzw. der ablaufenden Prozesse /NEA 12/.

Es bleibt zu beachten, dass jede Temperaturänderung alle parallel ablaufenden Prozesse (Hydraulik, Mechanik, Chemie, Mineralogie, Biologie) beeinflusst, so dass ein gesamtes Systemverhalten nur als thermo-hydromechanisch-chemisch-biologisch gekoppelter Prozess verstanden werden kann.

Die Komplexität zeigt sich folgendermaßen: Eine Temperaturänderung wirkt sich nicht nur auf die thermischen Eigenschaften aus (Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität), sondern parallel auch auf:

- Mineralogie (z. B. Strukturänderungen durch Illitisierung),
- Hydraulik (z. B. Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung; relative Permeabilität der Wasserphase),
- Mechanik (z. B. Festigkeitseigenschaften; Rissbildung durch Austrocknung; Quellfähigkeit),
- Chemie (z. B. diffusiver Transport; Kationenaustausch; pH-Wert) ein,

die wiederum zusammen die thermischen Eigenschaften bestimmen.

6.1 Wirtsgestein Steinsalz

Zur systematischen Bestimmung der für die Fragestellung relevanten THMCB-Prozesse und Eigenschaften, wird der FEP-Katalog nach /WOL 12/ für ein Endlagerkonzept im Steinsalz verwendet (Tab. 6.1). Hierbei handelt es sich nach gegenwärtigem

Kenntnisstand um einen abdeckenden FEP-Katalog für das Wirtsgestein Steinsalz nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik.

Die FEP wurden in der Tab. 6.1 nach Prozessen (Spalte Komponente-Einwirkung) und Temperaturabhängigkeit (Spalte Temperaturabhängigkeit) indiziert, wenn der FEP durch die Wärmeabgabe der eingelagerten, radioaktiven Abfälle beeinflusst werden kann und gleichzeitig als **Prozess** oder **Eigenschaft** relevant für die Szenarienentwicklung und die Sicherheitsanalyse eines Endlagerkonzeptes im Wirtsgestein Steinsalz angesehen wird.

In der Tab. 6.1 ist der jeweilige FEP nicht indiziert, wenn praktisch von keiner Temperaturabhängigkeit oder -beeinflussung auszugehen ist. Die Indizierung mit „1“ in der Spalte „Temperaturabhängigkeit“ bedeutet, dass im FEP Katalog /WOL 12/ ein direkter Einfluss der Temperatur auf den Prozess oder die Eigenschaft angegeben wurde. Die Indizierung mit „0/1“ zeigt an, dass für diese Studie von einer Temperaturabhängigkeit von Eigenschaften oder Prozessen ausgegangen wird, die allerdings im FEP Katalog /WOL 12/ nur über indirekte Einwirkungen bzw. Abhängigkeiten abgebildet wurde. Geologische Prozesse werden in Bezug auf die betrachtete Zeitskala (Dauer der Wärmeabgabe der eingelagerten Abfälle) als temperaturunabhängig angesehen. Ein Kapitelverweis ist angegeben.

Tab. 6.1 FEP Katalog für Endlagerkonzepte im Steinsalz nach /WOL 12/

Lfd.Nr.	FEP-Bezeichnung	Komponente Einwirkung	Temperaturab- hängigkeit	Kapitel
1.	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase			
2.	Kokillensticking			
3.	Neotektonische Vorgänge			
4.	Orogenese			
5.	Senkung der Erdkruste			
6.	Hebung der Erdkruste			
7.	Krustendeformation			
8.	Grabenbildung			
9.	Erdbeben			
10.	Magmatismus			
11.	Gesteinsmetamorphose			
12.	Hydrothermale Aktivität			
13.	Erosion			
14.	Sedimentation			
15.	Diagenese			
16.	Diapirismus			
17.	Subrosion			
18.	Globale klimatische Veränderungen			
19.	Transgression oder Regression			
20.	Permafrost			
21.	Bildung kryogener Klüfte			
22.	Inlandvereisung in randlicher Lage			
23.	Vollständige Inlandvereisung			
24.	Glaziale Rinnenbildung			
25.	Meteoriteneinschlag			

Lfd.Nr.	FEP-Bezeichnung	Komponente Einwirkung	Temperaturab- hängigkeit	Kapitel
26.	Wegsamkeiten in Erkundungsboh- rungen			
27.	Inventar: Radionuklide			
28.	Inventar: Metalle			
29.	Inventar: Organika			
30.	Inventar: Sonstige Stoffe			
31.	Abfallmatrix			
32.	Brennelement-Behälter			
33.	Sonstige Endlagerbehälter			
34.	Versagen eines Brennelement-Be- hälters			
35.	Ausfall eines sonstigen Endlager- behälters			
36.	Versatz	1	1	6.1.7
37.	Verschlussmaterial	1	0/1	6.1.7
38.	Schachtverschlüsse	1	0/1	6.1.7
39.	Streckenverschlüsse	1	0/1	6.1.7
40.	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	1	0/1	6.1.7
41.	Sonstige Verschlussbauwerke	1	0/1	6.1.7
42.	Technische Einrichtungen und de- ren Eigenschaften			
43.	Bohrlochverrohrung	1	1	6.1.7
44.	Ausfall einer Bohrlochverrohrung			
45.	Konvergenz	1	0/1	6.1.3
46.	Fluiddruck	1	1	0
47.	Salzgruskompaktion	1	1	6.1.2
48.	Nicht thermisch induzierte Volu- menänderung von Materialien			
49.	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses			
50.	Vorzeitiges Versagen eines Stre- ckenverschlusses			
51.	Lageverschiebung des Schacht- verschlusses			
52.	Ausfall eines Dichtpfropfens			
53.	Porosität	1	0/1	B.5
54.	Permeabilität	1	0/1	0, 6.1.6
55.	Lösungen im Grubenbau	1	1	6.1.6
56.	Kanalisation im Salzgrus			
57.	Kanalisation in Dichtelementen			
58.	Lösungszutritt ins Grubengebäude			
59.	Strömungsvorgänge im Grubenge- bäude	1	1	B.9
60.	Quellen des Bentonits	1	0/1	6.1.7
61.	Geochemisches Milieu im Gruben- bau	1	1	B.2
62.	Auflösung und Ausfällung	1	1	B.1
63.	Metallkorrosion	1	1	6.4.1
64.	Korrosion der Brennstoffmatrix	1	1	6.4.1
65.	Korrosion von Glas	1	1	6.4.1
66.	Korrosion von Materialien mit Ze- ment- oder Sorelphasen	1	1	6.4.1
67.	Materialversprödung durch Was- serstoffaufnahme	1	0/1	6.4.2
68.	Verhalten von graphithaltigen Ma- terialien und Urantails	1	1	Keine Relevanz
69.	Zersetzung von Organika	1	1	6.1.4
70.	Mikrobielle Prozesse im Gruben- gebäude und im Salzstock	1	1	6.1.4
71.	Wärmeproduktion			
72.	Thermische Expansion oder Kon- traktion	1	1	6.1.6
73.	Verdampfen von Wasser		1	6.4.4
74.	Gasbildung	1	0/1	B.3
75.	Gasmenge im Grubenbau	1	1	B.3
76.	Gaseindringdruck	1	0/1	B.4
77.	Zündfähige Gasgemische			
78.	Strahlungsinduzierte Aktivierung			
79.	Materialversprödung durch Strah- lung			

Lfd.Nr.	FEP-Bezeichnung	Komponente Einwirkung	Temperaturab- hängigkeit	Kapitel
80.	Radiolyse	1	1	B.6
81.	Kritikalität			
82.	Auflockerungszone			
83.	Wirtsgestein	1	1	6.1.6, 6.1.7
84.	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	1	0/1	B.8
85.	Deck- und Nebengebirge			
86.	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge			
87.	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	1	0/1	B.7
88.	Selbstversatz			
89.	Fluidvorkommen im Wirtsgestein			
90.	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein			
91.	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge			
92.	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge			
93.	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge			
94.	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge			
95.	Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges	1	1	B.11
96.	Thermomigration	1	1	6.1.8
97.	Thermische Carnallitersetzung	1	0/1	6.1.4
98.	Schmelzen des Salzgesteins	1	0/1	Keine Relevanz
99.	Thermochemische Sulfatreduktion	1	1	6.4.3
100.	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	1	1	0
101.	Topografie			
102.	Oberflächengewässer			
103.	Radioaktiver Zerfall			
104.	Radionuklidmobilisierung	1	0/1	B.12
105.	Sorption und Desorption	1	0/1	B.12
106.	Kolloide		0/1	B.12
107.	Komplexbildung	1	1	B.12
108.	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	1	0/1	B.13
109.	Advektion	1	0/1	B.13
110.	Mechanische Dispersion			
111.	Diffusion	1	0/1	B.13
112.	Matrixdiffusion	1	0/1	B.13
113.	Sonstige Transportprozesse	1	0/1	B.13
114.	Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern	1	0/1	B.13
115.	Radionuklidtransport in der Gasphase	1	0/1	B.13

Insgesamt sind 49 FEP von 115 FEP des Katalogs als temperaturabhängig bzw. -beeinflusst eingestuft. Jedoch sind hiermit auch allgemeine physikalische Eigenschaften (wie z. B. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Duktilität) erfasst.

Die Korrosion (z. B. eines Behälters) ist ein wirtsgesteinsübergreifender Prozess bzw. setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelprozessen zusammen. Die Korrosion wird im FEP Katalog bereits in die FEP Metallkorrosion, Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas und Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen unterteilt. Diese FEP beinhalten wiederum unterschiedlichste physikalisch-chemische Prozesse, die

nicht nur mehr oder weniger stark temperaturabhängig sind, sondern auch weiteren Abhängigkeiten unterliegen.

Der FEP Metallkorrosion ist beispielsweise nicht nur von der Wahl des verwendeten Metalls oder Legierungen (Fe, Cu, Al), sondern auch vom (geo-)chemischen Milieu abhängig, sodass eine Temperaturabhängigkeit der Korrosion und deren Bedeutung nur im Zusammenhang mit einem Endlagerkonzept und Wirtsgestein eingeschätzt werden kann.

FEP, die zwar temperaturabhängig sind, aber sich nicht wesentlich auf die Festlegung einer Temperaturbegrenzung in einem Endlager auswirken bzw. für die Auswertungen in diesem Bericht nicht maßgeblich benötigt werden, sind in Anhang B beschrieben.

Die Tab. 6.1 listet den nummerierten FEP-Katalog mit Einwirkung (Prozess, Eigenschaft), der Indizierung nach Temperaturabhängigkeit und einem Verweis auf das Kapitel der Beschreibung auf.

6.1.1 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden (u. a. Perkolation)

Bei Fluiddrücken (Druck von Lösungen und/oder Gasen, FEP Nr. 46) mit Überschreitung der kleinsten Hauptspannung im Gebirge kann es zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins (sekundäre Permeabilität) durch eine lokale Aufweitung zwischen den Korngrenzen kommen und Fluide können in das Wirtsgestein infiltrieren (FEP Nr. 100). In der Nachverschlussphase eines Endlagers wird es im zeitlichen Verlauf durch Konvergenz und Gasbildung sowie durch einen möglichen Fluidzutritt aus dem Gebirge oder über technische Verschlüsse (Schacht/Strecke) zu einem Druckanstieg innerhalb des Endlagers kommen.

Das Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium besagt, dass die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des ewG nicht insofern überschritten werden dürfen, dass erhöht Grundwässer in den ewG zutreten /BMU 10/ kann. Dies bedeutet, dass durch fluiddruckgenerierte Beanspruchungen keine hydraulischen Fließwege entstehen dürfen und ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehenden Fluiden unter den gegebenen Spannungsbedingungen nicht möglich sein darf. Dieses Kriterium wurde für das Wirtsgestein Steinsalz angewendet und gilt als erfüllt, wenn die Summe aus der kleinsten Gebirgsdruckspannung zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit kleiner ist als der Fluiddruck anstehender Fluide /KOC 12/.

Da die Ausdehnung von Festkörpern und Fluiden temperaturabhängig ist und dies zu einer Änderung des Fluiddruckes führen kann, wird der Prozess der druckgetriebenen Infiltration von Fluiden als temperaturabhängig beschrieben.

Da die Fluiddrücke standort- und konzeptabhängig sind, kann eine Festlegung einer „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche eines Behälters nur mit Kenntnis von Konzept und Standort erfolgen. Allerdings wird dieser Prozess in /BMU 10/ bereits über das Fluiddruckkriterium reguliert.

Das Überschreiten des Gebirgsdrucks durch einen Fluiddruck kann auch zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität (Sekundärpermeabilität) des Salzgesteins durch die elastische Aufweitung zwischen den Korngrenzen mit Erhöhung der Permeabilität führen (Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung der Kristallstruktur, d. h. ohne Schädigung). Die Permeabilität erhöht sich so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess einstellt. Sinkt der Fluiddruck wieder unter den Gebirgsdruck bzw. die minimale Hauptspannung, so kann sich die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins wiederherstellen (Selbstverheilungsmechanismus).

Dieser Prozess wird auch **Perkolation** (von lat. „percolare“ – durchsickern) genannt und beschreibt die Migration von Lösungen durch einen Feststoff. Eine Grundlage zur Beschreibung der Perkolation ist die Perkolationstheorie, die in der statistischen Physik das Ausbilden von zusammenhängenden Gebieten (Clustern) bei zufallsbedingtem Besetzen von Strukturen (z .B. Gittern) nach Überschreiten einer sog. Perkolationsschwelle beschreibt /SAH 94/. /MIN 16/ verstehen unter einer Perkolation die zuvor beschriebene in polykristallinen Salzgesteinen eine fluiddruck-getriebene Öffnung und Benetzung von Kristallkorngrenzen (wenn der Fluiddruck größer als die minimale Hauptspannung ist) in einer vom Spannungsfeld vorgegebenen Vorzugsrichtung. Dieser Prozess ist druck- und auch **temperaturabhängig** und wird in /GHA 15/ aufgegriffen und in Bezug auf die Endlagersicherheit gesetzt.

Die in /GHA 15/ auf Basis von /LEW 96/ beschriebene temperatur- und druckabhängige Ausbildung eines zusammenhängenden Porennetzwerkes im Zweiphasensystem Salzlösung-Halit soll im Wesentlichen bei der Unterschreitung des sog. dihedralen Winkels (innerer, spitzer Benetzungswinkel zwischen zwei Flächen benachbarter Salzkristalle) von 60° auftreten, sodass Lösungen in die Grenzflächen zwischen den Körnern des

Steinsalzes gelangen und ein durchgehendes Netzwerk bilden können, das entlang der Korngrenzen einzelner Salzkristalle Wegsamkeiten besitzt. Dadurch kann sich die Permeabilität im Zweiphasensystem Salzlösung-Halit bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen erhöhen /HOL 97/.

/GHA 15/ verwenden in ihren Laborversuchen **synthetisch** im Labor hergestellte Steinsalzproben mit einem homogenen Gefüge und einem erhöhten Lösungsgehalt. /HOL 10/ weisen darauf hin, dass die Anwendbarkeit der Perkolationsstheorie stark von der realen Porenraumgeometrie abhängt und ein homogenes Gefüge von synthetisch hergestellten Steinsalzproben nicht dem heterogenen Gefüge einer natürlichen Steinsalzprobe entspricht. In heterogenen Salzgesteinen mit unterschiedlichen Korngrößen, einer geringen Porosität und verschiedenen Mineralphasen treten nach /DAEF 16/ vermutlich keine miteinander verbundenen Fluidkanäle auf, insbesondere nicht bei einem sehr geringen Lösungsgehalt des Gesteins. Natürliches Steinsalz besitzt ein sehr heterogenes Korngefüge mit Beimengungen anderer Minerale und ist mit den synthetischen im Labor hergestellten Steinsalzproben mit homogenem Gefüge und einem höheren Lösungsgehalt von /GHA 15/ nicht vergleichbar /DAEF 16/, /ZUL 16/, /MIN 16/. Im Folgenden werden die Druck- und Temperaturbedingungen von /LEW 96/ für die Ausbildung eines permeablen Netzwerkes dargestellt, auf die /GHA 15/ Bezug nimmt und für synthetische Steinsalzproben mit einem homogenen Gefüge erstellt wurden.

/LEW 96/ veranschaulichen anhand des dihedralen Winkels unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen sich ein permeables Netzwerk ausbilden kann (Abb. 6.2). Unter den in der VSG getroffenen endlagerelevanten Bedingungen (ca. 900 m Teufe, lithostatischer Druck 18,5 MPa /BOL 11/) kann die zuvor beschriebene Ausbildung eines Netzwerkes bei niedrigen Temperaturen (kleiner ca. 120 °C) nach /LEW 96/ ausgeschlossen werden. Abb. 6.2 zeigt eine hellgraue, abgeschätzte Übergangszone, die auf Basis experimenteller Daten mit einer Unsicherheit von 4° für den dihedralen Winkel von /LEW 96/ erstellt wurde. /LEW 96/ sehen diese Übergangszone als „highly approximate“ an und weisen darauf hin, dass der dihedrale Winkel von 60° keine scharfe Grenze darstellt. Die Unsicherheit des dihedralen Winkels sei für den dargestellten Übergangsbereich nicht bekannt, wird aber geringer als 10° vermutet /LEW 96/. Die in Abb. 6.2 dargestellten Bereiche wurden für synthetische im Labor hergestellte homogene Salzproben erstellt und können nach Ansicht von /MIN 16/, /DAEF 16/ nicht auf natürliches heterogenes Steinsalz übertragen werden.

Erste Laboruntersuchungen mit natürlichen heterogenen Steinsalzproben bestätigen die Druck- und Temperaturbedingungen für die Ausbildung eines permeablen Netzwerkes nach Abb. 6.2 nicht /MIN 16/.

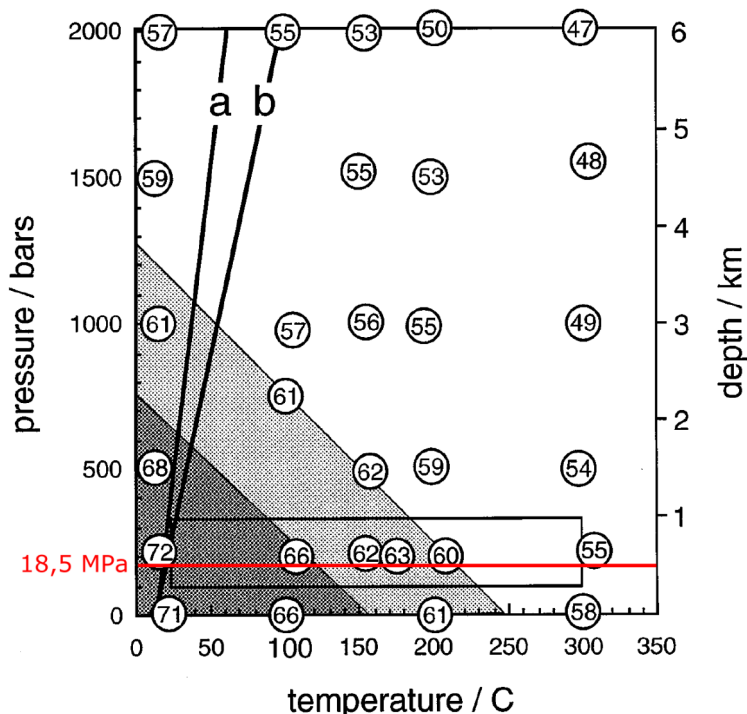


Abb. 6.2 Dihedraler Winkel (Kreise) mit Temperatur- und Druckbedingungen /LEW 96/, in rot ist der lithostatische Druck in ca. 900 m Tiefe markiert.

- dunkelgraue Fläche: nicht permeabel
- hellgraue Fläche: Übergangsbereich
- weiße Fläche: Temperatur-/Druckbereich mit permeablem Netzwerk

/GHA 15/ folgern aus dem Auftreten von Kohlenwasserstoffen in Salzstöcken, dass unter Deformationsbedingungen eine Perkolation auch bei hohen dihedralen Winkeln und geringen Porositäten auftreten kann. Dieses Phänomen resultiert wahrscheinlich aus der zuvor von /MIN 16/ beschriebenen fluiddruck-getriebenen Perkolation, die auch in /KOC 12/ untersucht wurde, d. h. der Ausbildung und Vernetzung diskreter Fließwege entlang der Korngrenzen der Salzkristalle bei Überwindung einer Perkolationsschwelle, d. h. des Fluiddruckkriteriums.

Sofern das Fluiddruckkriterium nach /KOC 12/ erfüllt ist, wird ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehenden Fluiden unter den gegebenen Einspannungsbedingungen als nicht möglich angesehen. Daher erübrigt es sich aus dem hier dargestellten Prozess eine „Grenztemperatur“ an der Außenfläche eines Behälters für ein

Endlager im Wirtsgestein Steinsalz abzuleiten, die zudem eine Druckabhängigkeit berücksichtigen müsste. Die Einhaltung des Fluiddruckkriteriums wird bereits in /BMU 10/ gefordert.

Auch wenn die Aussagen von /GHA 15/ aus den zuvor erläuternden Gründen nicht vollständig übertragbar erscheinen, sollte zur Absicherung Permeabilitätsuntersuchungen an natürlichen Steinsalzproben unter endlagerrelevanten Druck- und Temperaturbedingungen durchgeführt werden. Erste Laboruntersuchungen mit heterogenen, natürlichen Steinsalzproben konnten die Schlussfolgerungen von /GHA 15/ bei diesen Druck- und Temperaturbedingungen nicht bestätigen /MIN 16/. Daher empfehlen /MIN 16/ weitere Untersuchungen, um eine breite experimentelle Basis belastbarer und verifizierbarer Ergebnisse zu erhalten und die Schlussfolgerungen von /GHA 15/ zu überprüfen bzw. ggfls. zu falsifizieren. Diese Laborversuche werden nach derzeitigem Kenntnisstand im Rahmen des Vorhabens 4717E03250 „Überprüfung des perkulationsgetriebenen Transports von Fluiden im Wirtsgestein Steinsalz unter relevanten Bedingungen für ein Endlager (PeTroS)“ durchgeführt. Die Laborversuche zeigen nach derzeitigem Kenntnisstand keine Permeabilitätserhöhung der natürlichen Steinsalzproben unter den betrachteten Drücken und Temperaturen /MIN 18/.

6.1.2 Kompaktion von Salzgrusversatz

Konzepte für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle sehen Salzgrus als Versatz- und Verschlussmaterial (Salzbruchstücke, die bei der Auffahrung von Hohlräumen im Endlagerbergwerk anfallen /BOL 11/, FEP Nr. 36) z. B. von Einlagerungsstrecken vor (s. Kap. 5.1). Unmittelbar nach dem Einbringen in das Endlagerbergwerk besitzt Salzgrus eine Porosität von ca. 35 % /ROT 99/. Die Porosität (Porenvolumen, FEP Nr. 53) nimmt infolge der sog. **Salzgruskompaktion**¹⁰ (FEP Nr. 47) durch die Auflast des Deckgebirges ab mit dem Ziel die Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen vollständig einzuschließen. Die Geschwindigkeit des Kompaktionsprozesses wird **Kompaktionsrate** genannt und ist von den konkreten Bedingungen am Standort (wie z. B. Spannungsverhältnisse, Feuchte, Fluiddruck, Versatzwiderstand) abhängig. Hohe Temperaturen führen zu einem Anstieg der Kompaktionsrate und beschleunigen somit den Kompaktionsprozess. Die thermischen Eigenschaften von Salzgrus nähern sich mit zunehmender

¹⁰ Der Antriebsmechanismus der Kompaktion von Salzgrusversatz besteht, darin dass dieser durch sein Eigengewicht und den sich infolge Konvergenz zunehmenden Gebirgsdruck zusammenpresst und dadurch kompaktiert wird.

Kompaktion (also mit abnehmender Porosität) denen von unverritztem Steinsalz an. Dies bedeutet z. B. eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Salzgrusversatzes mit fortschreitender Kompaktion.

Der Zusammenhang zwischen dem Widerstand den die Salzkörner dem aufgeprägten Druck (Gebirgsdruck) entgegensetzen (Versatzwiderstand) und der Versatzporosität (bzw. der Porenzahl, dem Quotienten von Porenvolumen zu Feststoffvolumen) ist temperaturabhängig und wird zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens bis hin zu kleinen Restporositäten im Salzgrus verwendet. Mit sinkender Porenzahl (fortschreitende Kompaktion) nimmt der Druck, der aufgegeben werden muss, um eine Kompaktion zu erreichen, zu (Abb. 6.3). Hohe Temperaturen wirken sich günstig aus, d. h. bei gleichen Umgebungsdruck kann eine kleinere Porosität schneller erreicht werden.

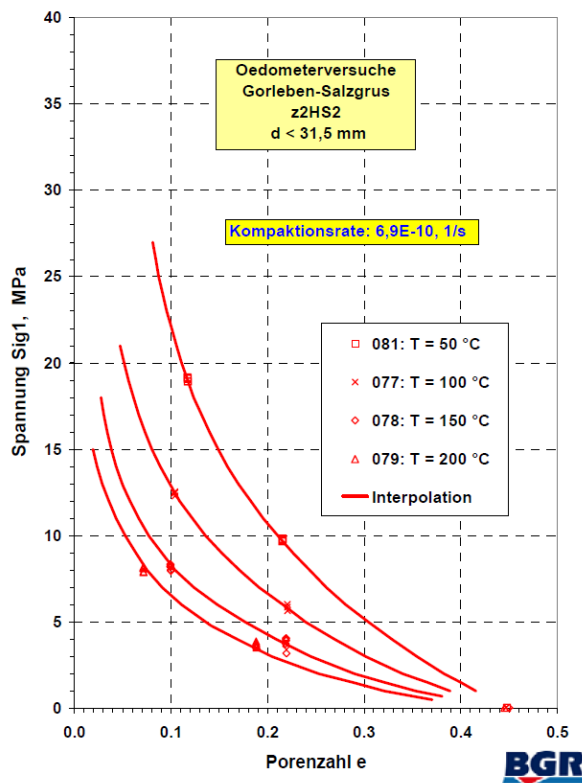


Abb. 6.3 Ergebnisse aus Kompaktionsversuchen mit konstanter Kompaktionsrate, Verringerung der Porenzahl von Salzgrus bei verschiedenen Versuchstemperaturen aus /KRÖ 09/ nach /STÜ 04/

Die **Wärmeleitfähigkeit** von Salzgrus ergibt sich als Mischung zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes und der in den Poren des Salzgrus enthaltenen Luft /KRÖ 09/. Da die in den Poren enthaltene Luft eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt als der

Feststoff Steinsalz, nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit abnehmender Porosität zu. Der in der Abb. 6.4 dargestellte Funktionsverlauf gibt die Wärmeleitfähigkeit des Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur wieder /KRÖ 09/. Bei einer theoretischen Porosität von 0 % wird die Wärmeleitfähigkeit des unverritzten Steinsalzes angenommen.

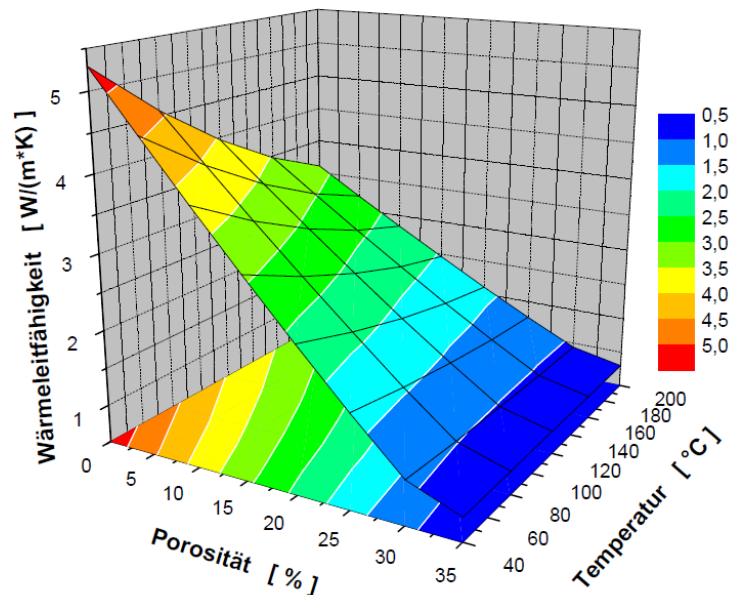


Abb. 6.4 Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur /KRÖ 09/

Ein erhöhter Wärmeeintrag wirkt sich auf die Kompaktion von Salzgrus positiv aus, da die Kompaktionsrate infolge der Verringerung des Versatzwiderstandes bei einer Temperaturzunahme ansteigt. Durch eine höhere Kompaktionsrate nimmt die Porosität des Salzgruses schneller ab und die thermischen Materialeigenschaften des Salzgruses wie die Wärmeleitfähigkeit nähern sich denen von Steinsalz an.

Da sich der **Wärmeeintrag** (im Sinne einer sicherheitstechnischen Betrachtung) **positiv** auf die Salzgruskompaktionsrate auswirkt, ist aufgrund dieses Prozesses keine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters erforderlich. Umgekehrt könnte aus diesem Prozess allerdings eine minimale gewünschte Temperatur abgeleitet werden, damit die (im Sicherheitskonzept vorgesehene) einschlusswirksame Funktion in einem vorgegebenen Zeitrahmen erreicht wird. Auch eine solche Festlegung erscheint nur mit Kenntnissen zu den konkreten Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept möglich.

6.1.3 Konvergenz (Salzkriechen)

Mit dem **Salzkriechen** wird eine Eigenschaft von Salzgestein bezeichnet, sich unter Belastung zeitabhängig plastisch zu verformen ohne dass bruchhafte Verformungen oder eine Volumenänderungen eintreten /BRA 08a/. Dieser Prozess ist stark temperaturabhängig /GÜN 09/. Eine zunehmende Temperatur begünstigt diesen Prozess und beschleunigt das Schließen von Hohlräumen /RÜB 10/.

Salzgesteine besitzen keine eindeutig bestimmbare konkrete Fließgrenze, ab der das plastische Verhalten einsetzt /GÜN 09/. Der Kriechprozess wird im Allgemeinen beim Kriechversuch in drei verschiedene **Kriechphasen** unterteilt: das Versetzungskriechen (transientes (bzw. instationäres) Übergangskriechen), dem stationären Kriechen und dem Kriechbruch mit beschleunigter Kriechrate. Durch die innerkristallinen Verformungsprozesse gehen diese Bereiche ineinander über.

Eine Temperaturerhöhung bewirkt eine höhere Beweglichkeit von Versetzungen und beschleunigt das **Versetzungskriechen** /NAV 13/. Hierbei handelt es sich um Versetzungen innerhalb der Kristallgitterstruktur infolge zunehmender Spannungen. So bewirkt eine Temperaturerhöhung von 10 °C im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 50 °C bei einer Differenzspannung von 10 MPa eine Erhöhung der stationären Kriechrate um den Faktor 4 bis 5.

Wenn Feuchtigkeit im Porenraum vorhanden ist, treten zusätzlich zum Versetzungskriechen lösungsinduzierte Kriechprozesse auf (**Feuchtekreichen**). Diese finden einerseits durch Umlösung am Kornkontakt („*pressure solution creep*“) statt, wobei aufgrund des Druckes an dem Kontaktbereich zwischen Körnern NaCl gelöst und im Druckschatten, d. h. in kleinen Porenräumen, wieder ausgefällt wird. Auch die Lösungs-induzierten Kriechprozesse sind temperaturabhängig, da bei steigender Temperatur die Löslichkeit von Steinsalz (bei konstantem Druck) leicht zunimmt.

Durch die bei der Deformation neu entstandenen Versetzungen im Gitter wachsende Versetzungsdichte wird ein Widerstand gegen diese Verformung aufgebaut (**Verfestigungsprozess**). Dieser wachsenden Materialverfestigung wirkt die Versetzungserholung entgegen, welche die Auflösung vorhandener Versetzungen beschreibt. Die Versetzungserholung ist ein thermisch aktivierter Prozess, der bei höheren Temperaturen schneller abläuft, d. h. die Erholungszeit wird mit zunehmender Temperatur kleiner /GÜN 09/.

Für das Kriechen von Steinsalz sind in einem Temperaturbereich von 15 °C bis 200 °C bei einer Spannung von 1 MPa und 50 MPa demnach vor allem das Versetzungsgleiten ($T < 50\text{ °C}$, $\sigma > 15\text{ MPa}$), das Versetzungsklettern ($T > 50\text{ °C}$, $\sigma < 15\text{ MPa}$) und weiter „nicht definierte“ Mechanismen ($T < 50\text{ °C}$, $\sigma < 15\text{ MPa}$) maßgebend (Abb. 6.5).

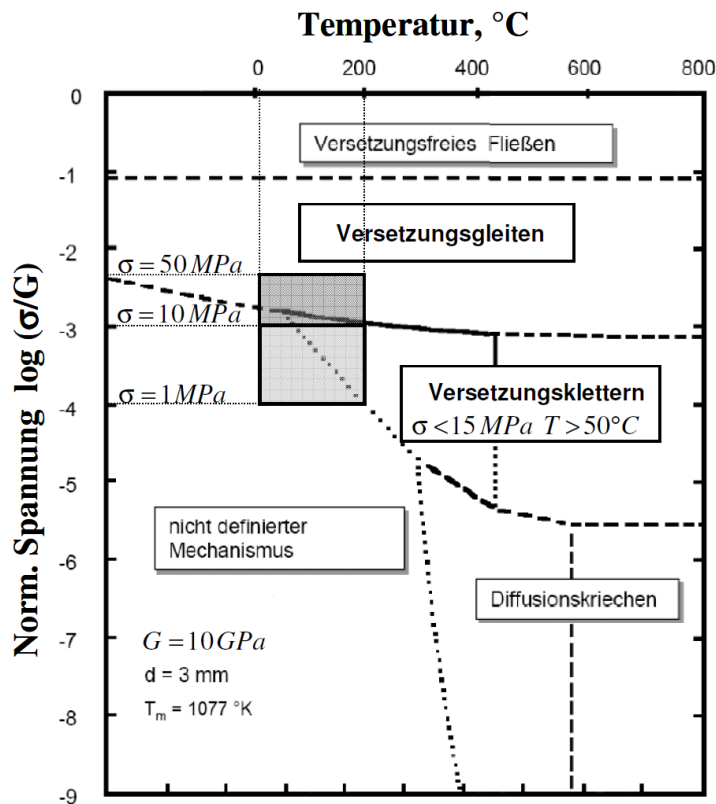


Abb. 6.5 Verformungsmechanismen des Salzkriechens aus /GÜN 09/ nach /ROK 07/

Auch in den USA wurde in Laboruntersuchungen im Untertagelabor der WIPP die Kriechrate von Steinsalz bei hohen Temperaturen bis zu 200 °C untersucht /DOE 11/. Es wurde gezeigt, dass die Kriechrate von natürlich vorkommendem Steinsalz stark temperaturabhängig ist und bei Temperaturen ab 70 °C stark ansteigt.

Unter dem Einfluss hoher Temperaturen wird die Kriechfähigkeit des Steinsalzes durch die höhere Geschwindigkeit des Versetzungskletterns um bis zu drei Größenordnungen beschleunigt /HUN 94/.

Da die Kriechfähigkeit von Steinsalz mit zunehmender Temperatur ansteigt und dies für einen schnellen Einschluss der Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen erwünscht ist, kann aufgrund dieses Prozesses keine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters vorgenommen werden. Umgekehrt könnte aus diesem

Prozess allerdings eine minimale mindestens gewünschte Temperatur abgeleitet werden, damit die (im Sicherheitskonzept vorgesehene) einschlusswirksame Funktion in einem vorgegebenen Zeitrahmen erreicht wird. Dies ist nur mit Kenntnissen zu den konkreten Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept möglich.

6.1.4 Mikrobielle Prozesse

Mikrobielle Prozesse (FEP Nr. 70) können zur Zersetzung von Organika (FEP Nr. 69, z. B. Zersetzung von Polyethylen /WOL 12/), Gasbildung (FEP Nr. 74), Korrosion (FEP Nr. 64-66) und zur Mineralumwandlung beitragen. /NEA 18/ gibt eine detaillierte Beschreibung möglicher mikrobiell induzierter und sicherheitsrelevanter Prozesse. Daher wird angestrebt die Bildung und Population von Mikroorganismen soweit wie möglich und sicherheitstechnisch nötig einzuschränken bzw. zu verhindern. Mikroorganismen sind nur in einem spezifischen Temperaturbereich überlebensfähig bzw. aktiv. Daher könnten Temperaturen außerhalb des spezifischen Temperaturbereichs bzgl. diesem FEP sicherheitstechnisch vorteilhaft in einem Endlager sein.

Welche **Mikroorganismen** in einem Endlager vorkommen und welche Auswirkungen die mikrobiellen Aktivitäten auf die Sicherheit eines Endlagers haben hängt sowohl von der Zusammensetzung der eingelagerten Abfälle als auch von den jeweiligen chemischen und physikalischen Randbedingungen des Endlagers ab. Im Folgenden wird daher auf die Randbedingungen eines Endlagers im Wirtsgestein Steinsalz eingegangen und Literatur ausgewertet, die sich auf **thermo- und halophile** Mikroorganismen bezieht. Es kann angenommen werden, dass innerhalb weniger Monate oder Jahren nach Verschluss eines Endlagers der atmosphärische Sauerstoff im Endlager durch mikrobielle oder auch andere Prozesse verbraucht sein wird (siehe z. B. /PUI 01/). Daher sind insbesondere **anaerobe** Mikroorganismen zu betrachten.

Die Vielzahl an Mikroorganismen wird anhand ihrer unterschiedlichsten Lebensbedingungen unterschieden, insbesondere in Bezug auf Steinsalz auf ihre Temperatur- und Salinitätsverträglichkeit /SPA 00/, /ORE 11/. Sogenannte **thermotolerante** Mikroorganismen besitzen eine optimale Wachstumsrate für Temperaturen von bis zu 50 °C, **thermophile** Mikroorganismen für über 50 °C. Das Wachstum von **hyperthermophilen** Mikroorganismen wird bis zu 90 °C begünstigt.

Nach /BOW 11/ werden Mikroorganismen als **halophil** bezeichnet, wenn ihre optimale Wachstumsrate in über 1,7 M NaCl-Lösungen (> 10 % Gewichtsprozent, > 350 g/l)

auftritt. Nachfolgend sind beispielhaft einige Mikroorganismen genannt. Eine vollständige Übersicht aller existierenden, halophilen Mikroorganismen ist nicht möglich, da diese Aufzählung einerseits bereits jetzt sehr umfangreich wäre und andererseits davon auszugehen, dass ein Großteil der Mikroorganismen noch unbekannt ist /NTV 17/.

Insgesamt sind derzeit 110 unterschiedliche Taxa identifiziert, die auf der Studie /BOW 09/ mit 61 identifizierten halophilen Taxa basieren (Abb. 6.6). /BOW 11/ detektierten vier halophile Taxa, deren **optimale Wachstumsrate** bei Temperaturen zwischen 50 °C und 55 °C lag (*Haloferax mediterranei*, *Haloarcula quadrata*, *Haloferax elongans*, *Natronolimnobius ,aegyptiacus*).

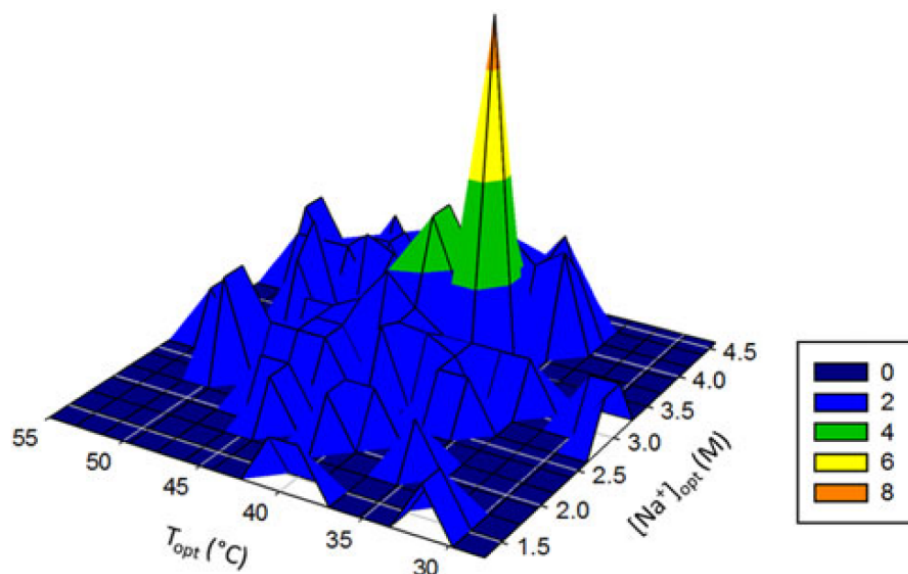


Abb. 6.6 Anzahl an bekannten Mikroorganismen /BOW 11/ mit optimalen Wachstumsraten für verschiedene Temperatur- und Salinitätsbedingungen

Unter den in /BOW 11/ genannten 110 Mikroorganismen existieren insgesamt fünf Mikroorganismen, die unter **anaeroben Bedingungen** überlebensfähig sind: *Methanohalophilus mahii* ($T_{opt.} = 35$ °C, $T_{max.} = 45$ °C), *Halorhabdus tiamatea* ($T_{opt.} = 45$ °C, $T_{max.} = 55$ °C), *Methanohalobium evestigatum* ($T_{opt.} = 48$ °C, $T_{max.} = 60$ °C) und *Haloarcula quadrata* ($T_{opt.} = 52$ °C, $T_{max.} = 55$ °C).

Nur wenige bekannte halophile Mikroorganismen besitzen eine **optimale Wachstumsrate bei höheren Temperaturen**. Diese liegt meist bei maximal 60 °C /BOW 11/. Eine Ausnahme bildet *Methanopyrus kandleri* ($T_{opt.} = 98-110$ °C, $T_{max.} = 121-122$ °C)

/KUR 91/, /TAK 08a/. Dieser Mikroorganismus existiert an sog. Black Smokern in der Tiefsee und hat sich an die dortigen Salinitäts- und Temperaturbedingungen angepasst.

Anhand der Literaturlauswertung lässt sich feststellen, dass mikrobielle Prozesse im Endlager mit niedrigen Temperaturen generell begünstigt werden können. Eine optimale Wachstumsrate für Mikroorganismen setzt unabhängig von der Temperatur voraus, dass ein entsprechendes Nährstoffangebot vorliegt.

Es sind hyperthermo- und halophile Mikroorganismen bekannt, die bis ca. 122 °C existieren können. Oberhalb dieser Temperatur können die Existenz und Vermehrung von Mikroorganismen nach derzeitigem Kenntnisstand grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Der Einfluss von Mikroorganismen auf Prozesse wie Gasbildung, Korrosion, Abbau organischer Materialien usw. sollte in einem Endlager- und Sicherheitskonzept nach dem jeweiligen Kenntnisstand berücksichtigt werden, wenn Temperaturen von ca. 122 °C unterschritten werden.

Die Erstellung von Tabellen mit möglichen bzw. denkbaren Mikroorganismen wäre extrem umfangreich und wird derzeit als nicht zielführend angesehen. Eine abschließende Darstellung unter vollständiger Nennung aller konkreten bzw. derzeit bekannten Mikroorganismen nicht mit überschaubarem Aufwand und auch abschließend nicht möglich ist, da noch unbekannte Mikroorganismen zu erwarten sind. Die prinzipielle Aussage über die temperaturabhängige (Über-)Lebensfähigkeit von Mikroorganismen ist davon unabhängig. Eine sehr hohe (oder sehr niedrige) Temperatur kann als sicherheitsorientiert angesehen werden, da dann mikrobielle Prozesse entweder verlangsamt, verhindert oder ausgeschlossen werden können.

Nach /BRA 14a/ sind zur mikrobiellen Aktivität in Bezug auf die Langzeitsicherheitsanalyse noch wenig standort- oder wirtsgesteinsspezifische Daten erhoben worden.

6.1.5 Thermische Zersetzung von Mineralen

Eine im Wirtsgestein Steinsalz stark von der Temperatur beeinflusste und als wichtig angesehene **Mineralumwandlung** ist die Kristallwasserfreisetzung von Hydratsalzen, die als FEP „Thermische Carnallitzersetzung“ (97) erfasst ist. Weitere Mineralumwandlungen, die z. B. bei Phasenübergängen (eutektische Schmelzen, FEP „Schmelzen des Salzgesteins“ (98)) stattfinden, sind in der Regel außerhalb der Temperaturbereiche, die derzeit für Endlagerkonzepte in Betracht gezogen werden.

Ein Wärmeeintrag kann bei Erreichen der mineralspezifischen und u. a. insbesondere druckabhängigen Temperatur zur Zersetzung eines Hydratsalzes (d. h. ein wasserhaltiges Salzmineral wie z. B. Polyhalit) im Wirtsgestein führen und das Kristallwasser freisetzen /KER 86/. Das freigesetzte Kristallwasser kann ein potentielles Transportmedium für Radionuklide sein und - wegen der Abnahme des Feststoffvolumens - zu neuen Wegsamkeiten für Fluide führen. Daher sollten in Endlager- und Sicherheitskonzepten im Wirtsgestein Steinsalz ausreichende Abstände zu hydratsalzhaltigen Formationen eingehalten werden, die den Wärmeeintrag und die Temperatureinwirkung auf Hydratsalze so begrenzen, dass temperaturbedingte Zersetzungen bzw. Umwandlungen ausgeschlossen werden können. Die temperaturbedingte Zersetzung von Hydratsalzen war in bisherigen Sicherheitskonzepten für Salzgestein ein wichtiges Kriterium für die Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche der Behälter als Bezugspunkt. Durch Temperaturfeldberechnungen (s. auch Kap. 3.3) wird die maximal resultierende Temperatur am Ort der Hydratsalze bestimmt. Diese berechnete Temperatur am Ort der Hydratsalze muss kleiner sein als die Temperatur, die unter Berücksichtigung der geologischen Situation und mineralogischen Zusammensetzung zu einer Wasserfreisetzung führen kann.

Reines Steinsalz ist praktisch kristallwasserfrei, sodass eine thermische Zersetzung oder Mineralumwandlung nicht erwartet wird (ausgenommen wäre das FEP „Schmelzen des Salzgesteins“ (98) bei über ca. 800 °C /BRO 50/).

Die Temperatur an der Außenfläche der Behälter wurde in bisherigen Endlagerkonzepten und in Sicherheitsuntersuchungen im Steinsalz u. a. zur Verhinderung der Kristallwasserfreisetzung von Hydratsalzen auf 200 °C begrenzt (siehe z. B. /FIS 13/) und ein ausreichender Abstand zwischen den wärmeentwickelnden Abfällen und den hydratsalzführenden Formationen vorausgesetzt. Diese Festlegung der Temperatur auf 200 °C an der Außenfläche der Behälter resultiert demnach aus standort- und endlagerkonzeptspezifischen Überlegungen. Für andere Standorte im Steinsalz könnte diese Festlegung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter in Abhängigkeit der Teufenlage, geologischen Situation, Endlagerdesign und mineralogischen Zusammensetzung des Wirts- und Nebengesteins variieren.

Im Folgenden wird eine Übersicht von Hydratsalzen gegeben, die in potentiellen Gesteinsformationen angetroffen werden könnten. Abb. 6.7 zeigt Schmelz-, Zersetzungs- bzw. Entwässerungstemperaturen für einen Druck von 0,1 MPa. Dies entspricht dem

Atmosphärendruck an der Erdoberfläche bzw. in einem offenen bewetterten Endlagerbergwerk. Die angegebenen Temperaturbereiche sind also nur bis zum Verschluss des Endlagerbergwerkes gültig, da nach Verschluss des Endlagerbergwerkes der Druck durch die überlagernden geologischen Formationen stark ansteigt. Die Bewetterung des offenen Endlagerbergwerkes führt die abgegebene Wärme der eingelagerten Abfälle zunächst weitestgehend ab und das Wirtsgestein bzw. die anstehenden Hydratsalze werden erst nach Verschluss einer Einlagerungskammer nennenswert temperaturbeeinflusst.

Die in der Literatur dokumentierte Schmelz-, Zersetzung- und Entwässerungstemperaturen von Hydratsalzen für 0,1 MPa (Abb. 6.7) sind demzufolge nur dann für die Fragestellung relevant, falls keine starke Druckabhängigkeit existiert.

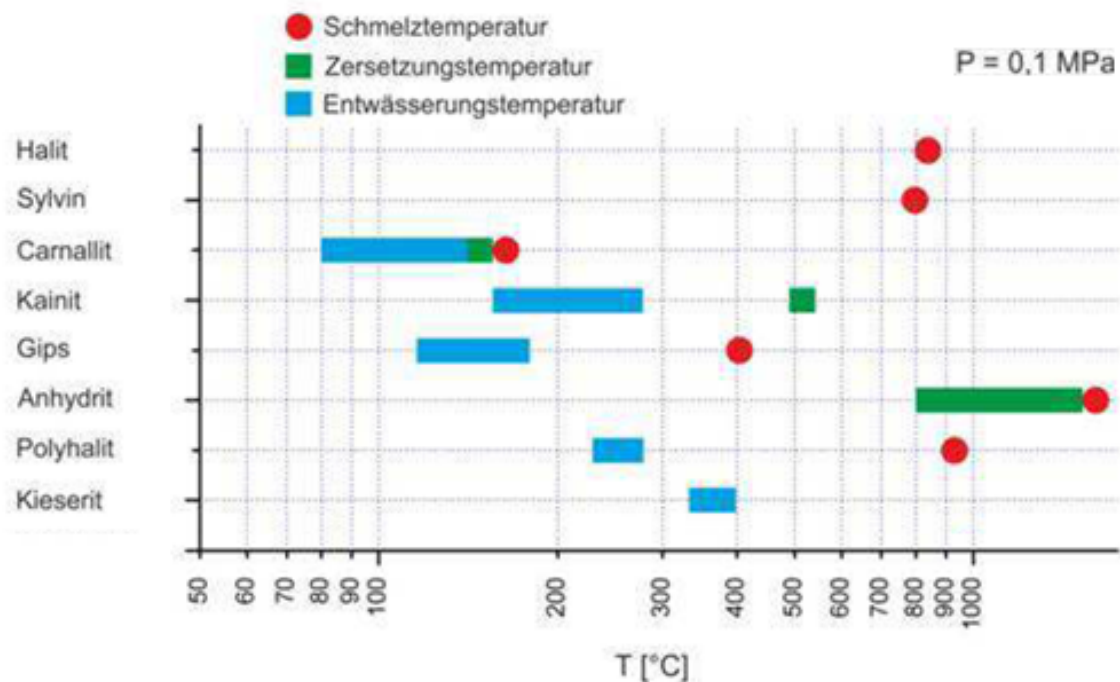


Abb. 6.7 Schmelz-, Zersetzung- und Entwässerungstemperaturen u. a. für Salzminerale verändert nach /BRÄ 16/

/JOC 81a/ nennt für das Wirtsgestein Steinsalz drei unterschiedliche Arten von **Wassereinschlüssen**, die sich bei einer Temperaturerhöhung ausdehnen und freigesetzt werden können:

- Laugeneinschlüsse
- Intergranulares auf den Korngrenzflächen adsorptiv gebundenes Wasser

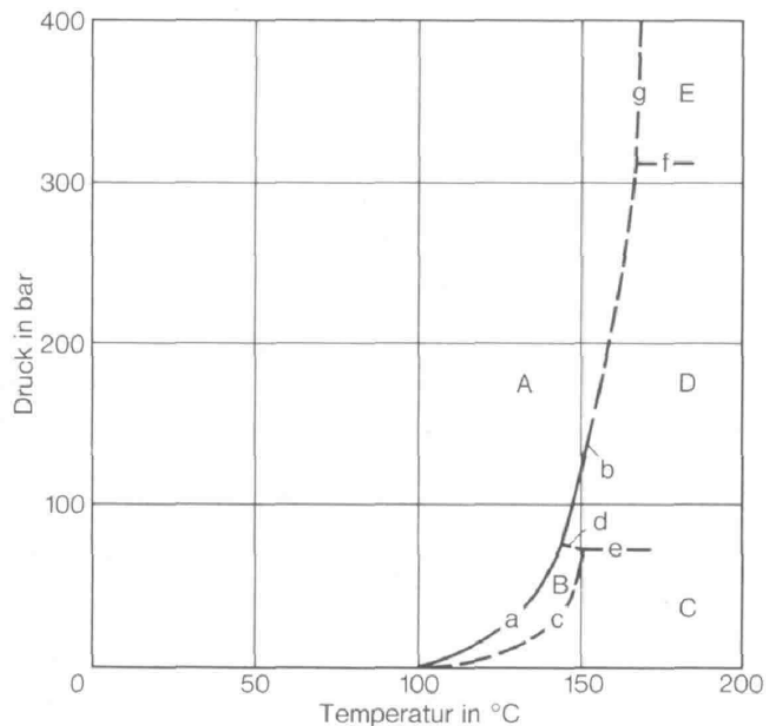
- Kristallwasser in Hydratsalzen

Während seiner Genese ist Steinsalz deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt als die heutige vorliegende Gebirgstemperatur. So haben sich **Laugeneinschlüsse** nach /JOC 81a/ bei 48 °C bis 111 °C gebildet. /JOC 81a/ fasste hier ähnlich wie /ROE 81/ ältere Untersuchungen (1936 – 1979) zum Freisetungsverhalten von Hydratsalzen zusammen, die allerdings weitestgehend lediglich für 0,1 MPa gültig sind und teils größere Ungewissheiten besitzen.

/KOP 95/ stellen fest, dass die Kristallwasserabgabe von **Carnallit** ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) stark vom Wasserdampfpartialdruck abhängig ist. Grundsätzlich existieren für Carnallit zwei unterschiedliche Reaktionsabläufe: Das inkongruente Schmelzen (Dehydratation in Verbindung mit Schmelzvorgängen) sowie die reine Dehydratation. /KER 80/ führten hierzu Versuche bis 150 bar und /WIL 83/ bis 400 bar durch. /KOP 95/ ergänzten Messungen bis 100 bar. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Schmelzpunkt von Carnallit relativ druckunabhängig ist und eine **thermische Stabilität** bis zu **167,5 °C** gegeben ist (gemessen auch in 1000 m Teufe, d.h. bei 24 MPa /KER 86/, /KER 90/ aus /KOP 95/). /FRE 06/ bestätigen in ihren Untersuchungen das inkongruente Schmelzen von Carnallit ab 167 °C für hohe Drücke. In einem geschlossenen System bis 10 MPa wird ab 153 °C eine Kristallwasserfreisetzung beobachtet /KOP 95/.

Eine **reine Dehydratation** findet nur bei sehr niedrigen Wasserdampfpartialdrücken statt, die in einem verschlossenen Endlagerbergwerk nicht vorliegen. Bereits eine geringfügige Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes von 1 mbar lässt die Dehydratation auf über 100 °C ansteigen. In bewetterten Strecken wurden Hydratverbindungen von /KOP 95/ in bis dahin bekannten Bohrungen und Auffahrungen nicht angetroffen, sondern ausschließlich unzersetztes hydratisiertes Carnallit.

/KER 80/ führten Laboruntersuchungen bis 150 bar durch und erstellten in Ergänzung mit Daten aus /GEL 30/ für höhere Drücke ein **Phasendiagramm** für **Carnallit** (Abb. 6.8). Dieses zeigt ein rasches Zunehmen der Schmelztemperatur von Carnallit mit steigendem Druck. Bei ca. 40 Bar wird ab 139 °C und bei 100 bar ab 145 °C der Carnallit aufgeschmolzen und Kristallwasser freigesetzt. Für höhere Drücke strebt die Schmelztemperatur asymptotisch gegen ca. 167 °C /KER 86/. Die Ergebnisse dieser Untersuchung decken sich mit den zuvor getroffenen Aussagen.



- A Carnallit
- B Übergangsphase \pm H₂O
- C Dihydrat + H₂O
- D Dihydrat + Sylvin + Schmelze \pm H₂O
- E Sylvin + Schmelze

Abb. 6.8 Phasendiagramm für Carnallit /KER 80/

Häufige **Nebenbestandteile** in natürlichem Steinsalz sind die wasserhaltigen Minerale **Polyhalit** ($K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$) und **Kieserit** ($Mg[SO_4] \cdot H_2O$) /JOC 81b/. Diese Minerale sind als Beimengungen in natürlichem Steinsalz anzutreffen und können druck- und temperaturabhängig Kristallwasser freisetzen. Der Beginn der Kristallwasserfreisetzung wurde von /JOC 81b/ bei Normaldruck (1 bar) für Polyhalit ab 235 °C und für Kieserit ab 335 °C gemessen. Diese Werte sind nicht direkt auf Endlagerverhältnisse übertragbar, da die realen Druckbedingungen im Endlager deutlich höher sind und entsprechend der Wasserdampfdruckkurve von Wasser höhere Freisetzungstemperaturen zu erwarten sind. Entsprechend werden Wiederholungen der Laborversuche unter in-situ Bedingungen empfohlen /JOC 81b/.

Die Freisetzung von Kristallwasser aus dem Mineral **Polyhalit** wurde insbesondere im Temperaturversuch TV 5 im Untertagelabor Asse untersucht /ROT 86/. Über eine Aufheizdauer von 301 Tagen in fünf Stufen von 100 °C bis 270 °C wurde gezeigt, dass bis 230 °C nur das Haftwasser auf den Korngrenzen freigesetzt wurde. Erst oberhalb von

230 °C kam es aufgrund der thermischen Zersetzung von Polyhalit zur tatsächlichen Freisetzung des Kristallwassers.

Kainit tritt bei Salzstöcken im Hutbereich auf und besitzt somit einen sehr großen Abstand zur Wärmequelle (eingelagerte hoch radioaktive Abfälle) /JOC 81a/, sodaß eine Kainit-Umwandlung bei 72 bzw. 83 °C /BRA 62/ unter Wärmeeinfluss oder eine Entwässerung nicht erwartet wird.

Die Auswertung zeigt, dass die Zersetzungs- und Entwässerungstemperaturen von Hydratsalzen stark druck- bzw. wasserdampfpartialdruckabhängig sein können und oft nur für einen Druck von 0,1 MPa bzw. 1 bar oder 1 atm angegeben werden. Lediglich Schmelztemperaturen (z. B. inkongruentes Schmelzen von Carnallit) können unter Endlagerbedingungen weitestgehend als druckunabhängig angesehen werden.

Aus der Auswertung der Literatur bzgl. Zersetzungs-, Entwässerungs- und Schmelztemperaturen von Hydratsalzen kann jedoch kein grundsätzlicher Forschungsbedarf zur Festlegung einer maximalen „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche der Behälter vor der Erkundung eines konkreten Standortes abgeleitet werden. Eine Begrenzung der Temperatur auf Basis dieses FEP kann nur mit Kenntnissen einerseits zur mineralogischen Zusammensetzung und Druckverhältnissen am konkreten Standort und andererseits einem Endlagerkonzept abgeleitet werden. Die Eigenschaften des Steinsalzes sollten mittels Laborversuche bestätigt werden.

Die thermische Zersetzung von Hydratsalzen ist in den bisherigen Sicherheitskonzepten ein Kriterium für die Festlegung der maximalen Temperatur am Ort der Hydratsalze. Mit Temperatúrauslegungsrechnungen kann darauf basierend eine maximale Temperatur an der Außenfläche eines Behälters für einen Standort mit konkretem Konzept abgeleitet werden. Der konkrete Wert sollte allerdings im Rahmen der Standorterkundung, Endlagerkonzeptentwicklung und Endlageroptimierung angepasst werden.

6.1.6 Thermische Expansion des Wirtsgesteins

Eine **thermisch induzierte Volumenexpansion** (FEP Nr. 72) des Gesteins kann potentiell zu einer Verletzung des Fluiddruckkriteriums /BMU 10/ führen und somit die Integrität (das Einschlussvermögen) des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers im Steinsalz gefährden. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch Fluideinschlüsse (wie z. B. FEP Nr. 55 „Lösungen im Grubenbau“ oder Reliktlaugen im Wirtsgestein) im

Steinsalz, da diese höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten als das Wirtsgestein besitzen (Abb. 6.9).

Um die Wärmeausdehnung des Wirtsgesteins Steinsalz zu quantifizieren, müssen die thermischen Materialeigenschaften sowie deren Temperaturabhängigkeiten bekannt sein und in den Materialgesetzen, d. h. vor Berechnung des Temperaturfeldes, berücksichtigt werden /HOT 10/. Eine Zusammenfassung der thermischen Materialeigenschaften und dessen Temperaturabhängigkeiten für das Wirtsgestein Steinsalz befindet sich in /MEL 16/.

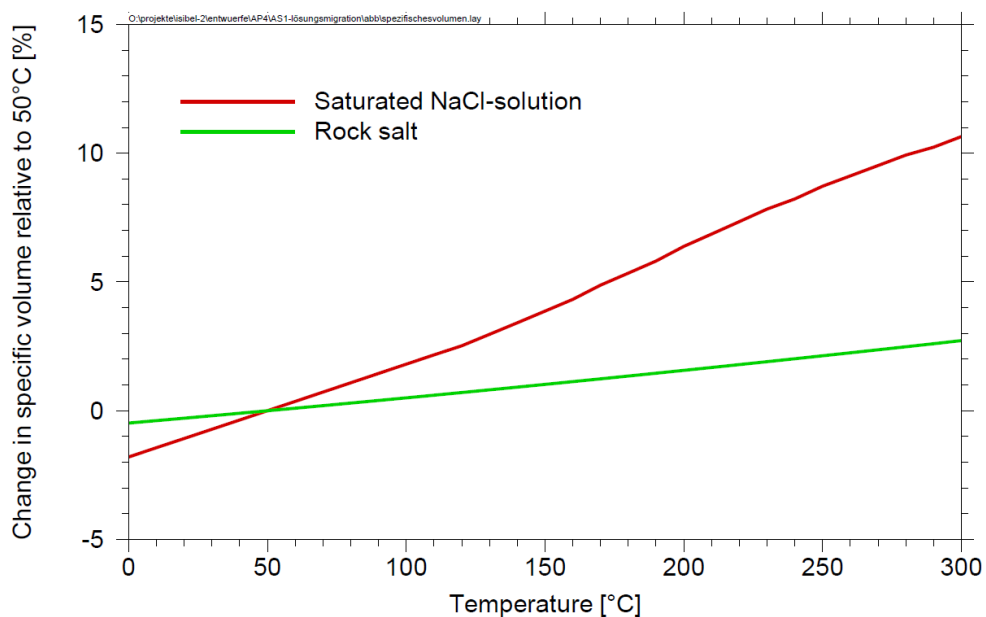


Abb. 6.9 Änderung des Volumens (hier bezogen auf 50 °C) von gesättigter NaCl-Lösung im Vergleich zu Steinsalz bei Temperaturzunahme /RÜB 11/

Bisherige Untersuchungen (am Beispiel des Salzstockes Gorleben) zeigten allerdings keine Integritätsgefährdung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auf /KOC 12/. Die Auswirkung einer thermisch induzierten Volumenexpansion aufgrund des Wärmeintrags muss und kann nur standortspezifisch beurteilt werden, um eine Integritätsgefährdung auszuschließen.

Eine Integritätsgefährdung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wurde beispielsweise für eine Temperaturbegrenzung an der Außenfläche der Behälter von 200 °C in die für Endlagersicherheit relevanten Bereiche standortspezifisch ausgeschlossen /KOC 12/. Aus diesem FEP ergibt sich keine standortunspezifische Festlegung einer

Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter. Im Rahmen von Temperaturlausrechnungen und thermisch-mechanisch gekoppelten numerischen Modellrechnungen kann standortspezifisch eine maximal zulässige Temperatur im Wirtsgestein bestimmt werden, sodass die Einschlusswirksamkeit nach /BMU 10/ nicht gefährdet ist.

6.1.7 Thermische Materialeigenschaften

Zur Berechnung der Temperaturverteilung in einem Endlager (Temperaturfeldberechnungen, s. Kap. 3.3) sind Kenntnisse zu den thermischen Materialeigenschaften des Wirtsgesteins und der geotechnischen Barrieren mit Temperaturabhängigkeiten notwendig. Hierzu gehören insbesondere die **Wärmeleitfähigkeit** und **spezifische Wärmekapazität**.

Die **Wärmeleitfähigkeit** beschreibt die Wärmemenge (angegeben in Watt), die in einer Sekunde durch einen Querschnitt von 1 m² einer 1 m dicken Platte bei einer Temperaturdifferenz von 1 °C bzw. 1 K an beiden Enden übertragen werden kann und wird somit in der Einheit W/(m•K) angegeben /HEE 14/. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit begünstigt eine Ableitung des Wärmeeintrages durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und reduziert dadurch eine Gebirgsaufheizung. Daher wird eine hohe Wärmeleitfähigkeit als Materialeigenschaft für das Wirtsgestein als günstig eingestuft /AKE 02/.

Die **spezifische Wärmekapazität** beschreibt die Wärmemenge, die benötigt wird um 1 kg eines Stoffes um 1 °C bzw. Kelvin zu erhöhen /HEE 14/. Die spezifische Wärmekapazität quantifiziert demnach die Wärmemenge, die das Wirtsgestein aufnehmen kann. Eine hohe spezifische Wärmekapazität des Wirtsgesteins wird als günstig angesehen /AKE 02/, da das Gestein eine größere Wärmemenge bei Temperaturerhöhung aufnehmen kann.

Die **Wärmeleitfähigkeit** von Steinsalz nimmt mit ansteigender Temperatur im Bereich von 0 °C bis 200 °C von ca. 6 auf 2 W/(m•K) ab. Belegt sind die Funktionen zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 400 °C (Abb. 6.10). Grundsätzlich ist die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz im Vergleich zu anderen Gesteinsarten hoch und Wärmeeinträge können deshalb besser aus dem Endlagerbereich heraus abgeführt werden. Ein zusätzlicher Wärmeeintrag, d. h. eine Temperaturerhöhung im Steinsalz, wirkt sich allerdings negativ auf die Wärmeleitfähigkeit aus, da diese mit zunehmender Temperatur absinkt und der

Wärmeeintrag somit weniger schnell abgeführt werden kann. Trotzdem bleibt die Wärmeleitfähigkeit selbst bei endlageruntypischen Bedingungen (400 °C) weitgehend über der Wärmeleitfähigkeit anderer Festgesteine /MEL 16/.

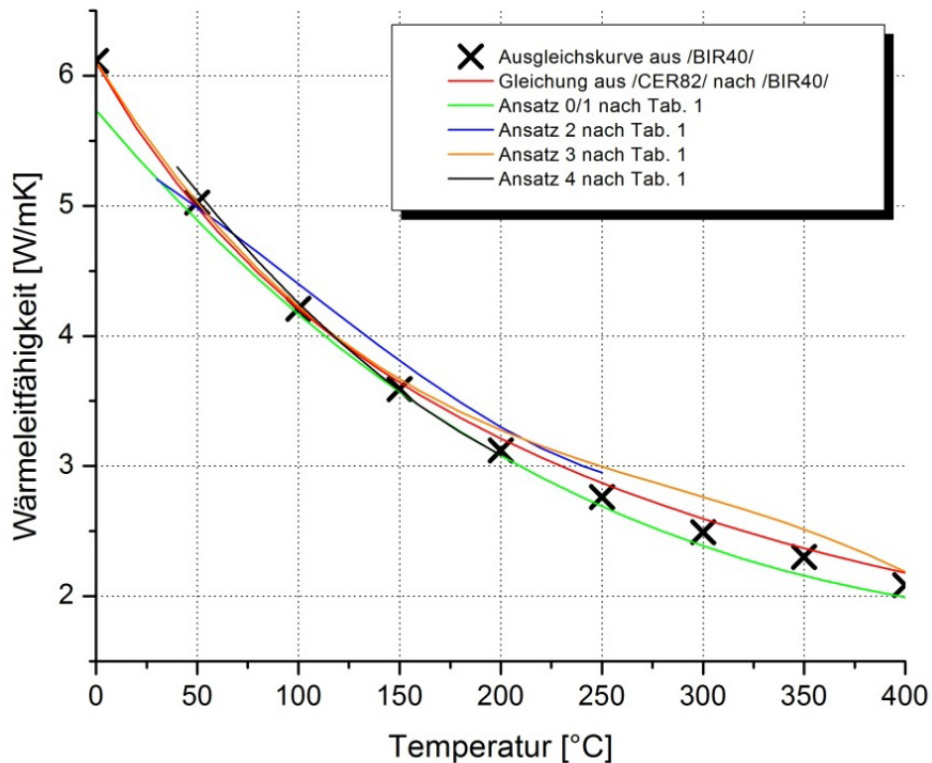


Abb. 6.10 Darstellung von Polynomansätzen im Vergleich zu den Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /ČER 82/ aus /HEE 14/

Die **spezifische Wärmekapazität** wird in der Literatur häufig als konstanter materialspezifischer Wert angegeben, ist allerdings wie die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig /HEE 14/. Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität ist für Steinsalz im Vergleich zu der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eher gering /HEE 14/. Um den Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur abzubilden, werden lineare Funktionen verwendet (Abb. 6.11), die entweder auf Eigenmessungen /KOP 94/, /EIS 03/, /GEV 81/ oder Tabellenwerken /PLO 79/, /SPI 93/, /SCH 71/, /SCH 84/ beruhen.

Da die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz mit der Temperatur ansteigt, kann eine etwas größere Wärmemenge im Wirtsgestein bei Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins aufgenommen werden. Dies ist grundsätzlich als positiv zu bewerten. Nach /HEE 14/ existieren Unsicherheiten bei Angaben zur Temperaturabhängigkeit der

spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz bei hohen Temperaturen (über 100 °C). Diese Angaben können durch weitere Forschungen abgesichert werden, um die Streubreite zu reduzieren (Abb. 6.11)

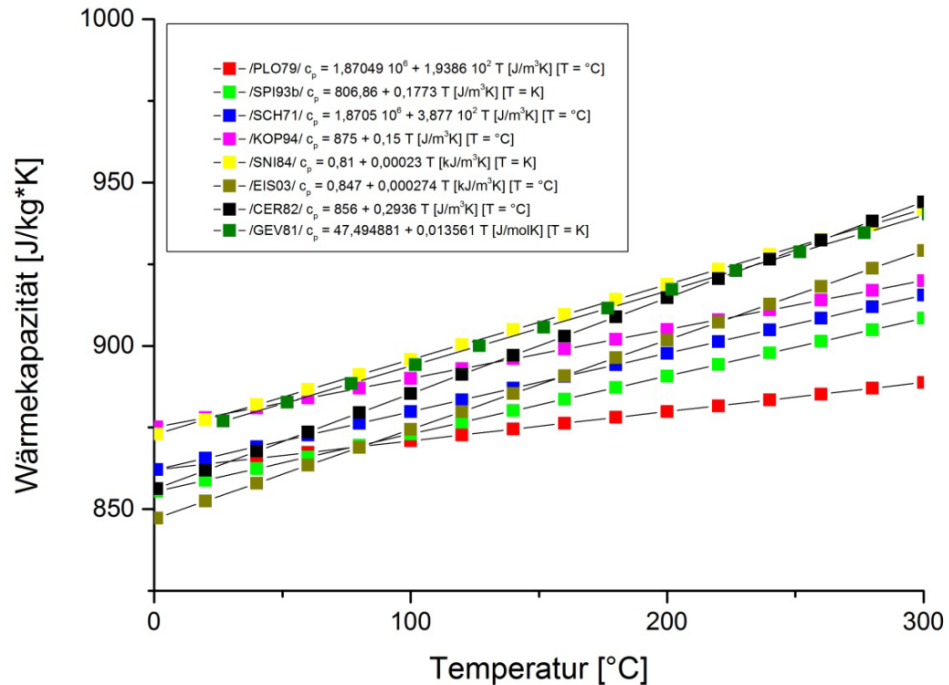


Abb. 6.11 Lineare Beziehung zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur /HEE 14/

Thermische Materialeigenschaften sind zur Berechnung der Temperaturverteilung in einem Endlager relevant und ausreichende Kenntnisse zu diesen Eigenschaften des Wirtsgesteines Steinsalz, den geotechnischen Barrieren und anderen Materialien zwingend notwendig.

Die genannten Eigenschaften machen zunächst keine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters erforderlich, sondern stellen in einem gewissen Umfang wählbare Parameter dar, die einen Wärmeabfluss vom Behälter begünstigen oder behindern können. Daher kann aus diesen Eigenschaften auch keine minimale mindestens gewünschte Temperatur abgeleitet werden. Temperaturfestlegungen sind nur mit Kenntnissen zu den konkreten Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept möglich.

6.1.8 Thermomigration

Die **Thermomigration** beschreibt eine **Mobilisierung** von Fluiden ohne mechanische Einwirkungen, und ist induziert durch einen **Temperaturgradienten**, der zu lokalen Lösungs- und Fällungsreaktionen im Salzgebirge infolge thermischer Konvektion innerhalb eines Lösungseinschlusses führt /BRA 12/. Wässrige Fluide in einem Salzkristall sind im Temperaturfeld mobilisierbar, wenn die Fluideinschlüsse auf eine Korngrenze treffen /ROE 84/. Dadurch migrieren wässrige Fluideinschlüsse in Richtung der Wärmequelle, wohingegen gasphasige Fluide in Abhängigkeit von der Einschlussgröße und dem Temperaturgradienten innerhalb des Einschlusses von der Wärmequelle weg wandern /BRA 12/. In /RÜB 11/ wird eingeschätzt, dass dieser Effekt im Salzgestein nur im konturnahen Bereich zu den Einlagerungsfeldern bei hohen Temperaturgradienten lokal stark eingeschränkt vorliegt.

Die Laugenmigration im Steinsalz, erzeugt durch Temperaturgradienten, wurde im „Brine Migration Test“ im Untertagelabor Asse untersucht, indem ein elektrischer Erhitzer eine Kobalt-60-Quelle simulierte /ROT 88/. Dieser bestätigte diese Migration von Fluiden, zeigte aber auch, dass diese im Steinsalz **vernachlässigbar klein** ist /BRA 08b/.

Ein weiterer möglicher Lösungstransport erfolgt durch die sogenannte **freie Konvektion**, d. h. durch Lösungszirkulation in Folge von **Dichteunterschieden**. Eine dauerhafte Lösungszirkulation tritt auf, wenn eine Wärmequelle tiefer als eine Wärmesenke liegt, da das erwärmte Fluid eine geringere Dichte besitzt und daher im Gravitationsfeld einen statischen Auftrieb erfährt. Die Konzentration von gelösten Radionukliden sind allerdings im Allgemeinen **vernachlässigbar klein** /RÜB 10/, um einen Einfluss auf die Dichte zu haben.

Aus der Thermomigration (und auch freier Konvektion) lässt sich keine Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter ableiten, da der Lösungstransport nur in geringem Maße und räumlich stark eingeschränkt stattfindet.

6.1.9 Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Steinsalz

Die **thermischen Materialeigenschaften** von Steinsalz wie eine hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität werden als günstige Eigenschaften bewertet. Die durch radioaktive Abfälle erzeugte Zerfallswärme kann gut aufgenommen und in das Gebirge abgeleitet werden.

Ein **Temperaturanstieg** beschleunigt das Salzkriechen und demzufolge die Schließung von Hohlräumen durch Konvergenz. Durch das Schließen der Hohlräume werden Spannungsunterschiede zwischen dem Endlagerbauwerk und dem umgebenden Gestein abgebaut. Der **Selbsteilungseffekt** (z. B. Rissverheilung) des Salzes wird durch hohe Temperaturen unterstützt.

Eine **thermisch induzierte Volumenexpansion** des Gesteins kann potentiell zu einer Verletzung des Fluiddruckkriteriums führen und somit die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers im Steinsalz gefährden. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch größere Fluideinschlüsse im Steinsalz, da diese höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten als das Wirtsgestein besitzen. Bisherige Untersuchungen (am Beispiel des Salzstockes Gorleben) zeigten an einem konkreten Konzept mit einer Auslegungstemperatur von 200 °C allerdings keine Integritätsgefährdung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auf. Die Auswirkung einer thermisch induzierten Volumenexpansion sollte standortspezifisch beurteilt werden, um eine Integritätsgefährdung auszuschließen. Eine pauschale Festlegung einer Temperatur an der Außenfläche eines Behälters auf 100 °C für das Wirtsgestein Steinsalz erscheint daher unter diesem Aspekt nicht erforderlich.

Bei Temperaturen über 121-122 °C wird nach aktuellem Kenntnisstand eine **mikrobielle Aktivität** auch von halotoleranten und halophilen Mikroorganismen grundsätzlich verhindert. In Bereichen mit geringeren Temperaturen ist grundsätzlich eine Überlebensfähigkeit von Mikroorganismen möglich und eine mikrobielle Aktivität und die damit verbundene Gasbildung und mögliche Korrosionsbeschleunigung kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Nach aktuellem Kenntnisstand liegt die optimale Wachstumsrate von halotoleranten und halophilen Mikroorganismen (unter den zu erwartenden anaeroben Bedingungen) in einem Endlager zwischen ca. 35 °C bis 55 °C. Daher sollte die mikrobielle Aktivität insbesondere in den Bereichen eines Endlagers im Steinsalz mit niedrigen Temperaturen näher betrachtet werden. Eine Vorfestlegung einer niedrigen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters begünstigt daher die mikrobielle Aktivität, die über die Festlegung einer hohen Temperatur grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Umgekehrt könnte eine minimale mindestens notwendige Temperatur in einem Endlagerkonzept definiert werden, um eine Gasbildung und Korrosionsbeschleunigung infolge mikrobieller Aktivität zu vermeiden.

Ein Wärmeeintrag in das Wirtsgestein Steinsalz bei Anwesenheit von Hydratsalzen (z. B. Polyhalit) im Wirtsgestein führt bei Erreichen einer mineralspezifischen und u. a. druckabhängigen Temperatur zur Zersetzung bzw. Umwandlung des Hydratsalzes und somit zur **Kristallwasserfreisetzung**. Freigesetztes Kristallwasser kann ein potentielles Transportmedium für Radionuklide sein und die Abnahme des Feststoffvolumens kann zu Fluidwegsamkeiten führen. Daher sollten in Sicherheitskonzepten ausreichende Abstände zu hydratsalzhaltigen Formationen gefordert werden, um die Temperatureinwirkung auf Hydratsalze so zu begrenzen, dass Zersetzungen bzw. Umwandlungen ausgeschlossen werden können. Die thermische Zersetzung von Hydratsalzen ist in den Sicherheitskonzepten ein Kriterium für die Festlegung der maximalen Temperatur am Ort der Hydratsalze. Mit Auslegungsrechnungen kann eine Temperatur an der Außenfläche eines Behälters für einen Standort mit konkretem Konzept berechnet und begründet werden. Nur mit Kenntnissen zum Standort, Konzept und Wirtsgestein ist die Festlegung einer Temperatur der Außenfläche eines Behälters in dieser Hinsicht sinnvoll. Auf Basis von Erkenntnissen aus bestehenden Endlagerkonzepten kann diese Temperaturbegrenzung deutlich mehr als 100 °C (z. B. 200 °C) betragen.

Zusammenfassend erscheint die Festlegung einer Temperaturbegrenzung an der Außenfläche des Behälters im Wirtsgestein Steinsalz nur mit Kenntnissen zum Standort, Konzept und Wirtsgestein sinnvoll. Die Temperaturabhängigkeit eines Einzelprozesses ohne konkretes Konzept ist hierfür nicht ausreichend (Abb. 6.12).

Die Vor- und Nachteile einer Temperaturfestlegung, die sich auf die Sicherheit in der Langzeitphase einer Endlagerentwicklung ergeben, sollten im Rahmen der Optimierung eines Endlagerkonzeptes berücksichtigt werden. Die Festlegung einer Temperaturbegrenzung – vor der Entwicklung eines Endlagerkonzeptes - würde diese sicherheitstechnischen Optimierungsmöglichkeiten beschränken. Detailspekte bzgl. der Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins sind im Rahmen der (untertägigen) Standorterkundung zu berücksichtigen.

Weiterhin kann eine minimal erforderliche Temperatur zur Herstellung der einschlusswirksamen Eigenschaften von Steinsalzgrus in Bezug auf Konvergenz und Rissverheilung ebenfalls nur bei einem bekannten Konzept und Standort festgelegt werden.

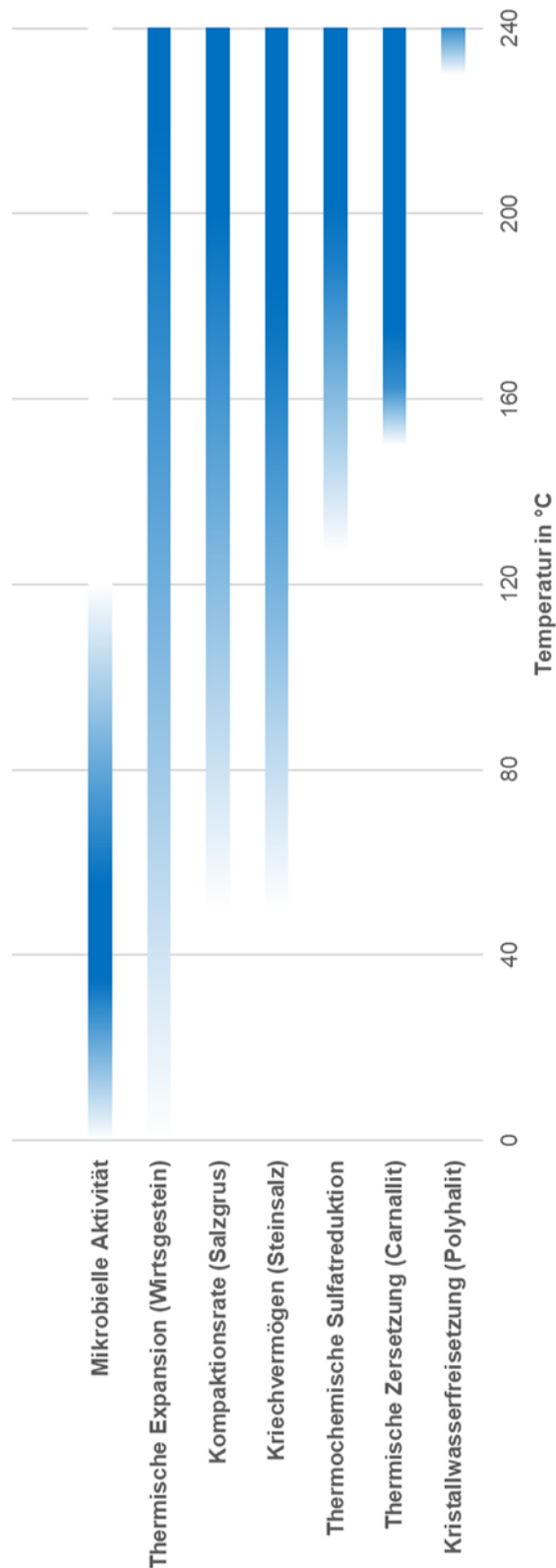


Abb. 6.12 Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Steinsalz

Die Farbabstufung beschreibt die Relevanz des ablaufenden Prozesses zu der jeweiligen Temperatur, d. h. in dunklen Farbbereichen verläuft der Prozess verstärkt ab.

6.2 Wirtsgestein Tongestein

Die nachfolgende Tab. 6.2 listet die **Prozess-FEP** nach /JOB 17a/ für das Endlagerstandortmodell SÜD im Tongestein auf. Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit oder Wärmekapazität werden damit nicht mehr erfasst. Die Gesamtmenge der Prozess-FEP beschreibt alle im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems wesentlichen Prozesse /JOB 17a/ unabhängig von den Eigenschaften der Komponenten.

In der Spalte „Komponente-Einwirkung“ werden mit „1“ die Prozess-FEP gekennzeichnet, die laut /STA 16/ direkt auf tonhaltige Komponenten im Nahfeld des Endlagers – Buffer, Versatz, Migrationssperren, Streckenverschluss, Auflockerungszone und ungesättigte Zone, Wirtsgestein, einwirken. In der Spalte „Temperaturabhängigkeit“ wird mit „1“ für diese Prozess-FEP entsprechend /STA 16/ angegeben, ob sie durch die Eigenschaft „Temperatur“ der oben genannten tonhaltigen Komponenten im Nahfeld des Endlagers beeinflusst werden. Wenn beide Spalten eine „1“ aufweisen, ist der Prozess-FEP hervorgehoben. In der Spalte „Kapitel“ wird entweder das/die Unterkapitel angegeben, in dem die für dieses Prozess-FEP relevanten Prozesse behandelt werden oder eine kurze Erklärung, warum dieses Prozess-FEP in diesem Bericht nicht weiter behandelt wird. Im Kapitel A finden sich detailliertere Beschreibungen einiger Prozesse zur vertiefenden Information.

Tab. 6.2 FEP-Liste für Tongestein nach /JOB 17a/

Lfd.Nr.	Prozess-FEP	Komponente-Einwirkung	Temperaturabhängigkeit	Kapitel
1.	Vertikale Bewegungen der Erdkruste	0		
2.	Orogenese	0		
3.	Krustendeformation	0		
4.	Grabenbildung	0		
5.	Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten	0		
6.	Gesteinsmetamorphose	0		
7.	Erosion	0		
8.	Sedimentation	0		
9.	Klimatisch bedingter Wärmestrom	0		
10.	Niederschlagseintrag	0		
11.	Transgression oder Regression	0		
12.	Vorlandvereisung	0		
13.	Glaziale Rinnenbildung	0		
14.	Meteoriteneinschlag	0		
15.	Korrosion der Brennstoffmatrix	0	1	6.4.1
16.	Alteration von Glas	0	1	6.4.1
17.	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	0	1	6.4.1
18.	Metallkorrosion	0	1	6.4.1
19.	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	0	1	6.4.2
20.	Metallversprödung durch Strahlung	0		
21.	Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen	1	1	6.2.1, A.1
22.	Auflösung, Transformation und Neubildung von sonstigen Mineralen	1	1	6.2.2, A.2
23.	Chemische Alteration von Organika	1	1	6.2.3, A.3
24.	Mikrobielle Prozesse	1	1	6.2.4, A.4
25.	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	1	1	6.2.6, A.5
26.	Quellen und Schrumpfen von Beton	0		
27.	Konvergenz	1	1	
28.	Wärmestrom	1	1	1)
29.	Thermische Expansion oder Kontraktion	1	1	6.2.8, A.6
30.	Phasenübergänge	1	1	1)
31.	Spannungsförtpflanzung	1	1	6.2.8, A.6
32.	Strömungsvorgänge	0		
33.	Dispersion	0		
34.	Diffusion	1	1	1)
35.	Lösen und Ausgasen	1	1	1)
36.	Migration von Bitumen	0	1	
37.	Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung	1		
38.	Radiolyse	1		
39.	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1		
40.	Zündung von Gasgemischen	0		
41.	Sorption und Desorption	1	1	6.2.7, A.7
42.	Komplexbildung	1	1	1)
43.	Thermochemische Sulfatreduktion	1	1	6.4.3, A.8
44.	Kolloidbildung und -filtration	1	1	6.2.4

1) betrifft nur das Haft- und Zwischenschichtwasser der Tonminerale und wird hier nicht behandelt.

6.2.1 Auflösung, Umwandlung und Neubildung von Tonmineralen

Im Tongestein finden viele temperaturabhängige Mineralumwandlungen statt, welche die einschlusswirksamen Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. der tonhaltigen geotechnischen Barrieren wie z. B. Quellfähigkeit (Abdichtungseigenschaft von Ton), Sorptionsvermögen und Kationenaustauschkapazität (Rückhalt von Radionukliden innerhalb der Barriere). Diese Mineralumwandlungen werden im Folgenden beschrieben und hinsichtlich ihrer Temperaturabhängigkeit ausgewertet.

Smektit-Illit-Reaktion

Bei Smektiten und Illiten handelt es sich um zwei Tonmineralgruppen. Die **Kationenaustauschkapazität** von Smektiten ist sehr viel höher als die von Illiten. Außerdem besitzen Smektite eine hohe **Quellfähigkeit**, die ihnen auch eine hohe Plastizität verleihen kann, während Illite weniger quellfähig sind. Die Umwandlung von Smektit zu Illit in einer sog. Smektit-Illit-Reaktion in einer geotechnischen Barriere (Bentonit) bzw. im Wirtsgestein (Tongestein) kann daher deren günstige endlagerrelevante Eigenschaften negativ beeinflussen.

Die Smektit-Illit-Reaktion läuft unter geologischen Bedingungen bei Temperaturen über ca. 60 °C ab /THY 11/, /GOU 16/. Bis ein Tongestein während seiner diagenetischen Versenkungsgeschichte die Temperatur von ca. 100 - 120 °C erreicht hat, geht seine Smektit-haltige Phase verloren und der Anteil der Smektit-Schichten in der Illit-Smektit-Wechselagerung reduziert sich auf ca. 35 - 50 % /POL 93/, /ŠUC 93/, /SCH 96/, /COL 11/, /VÁZ 14/ (s. Abb. 6.13).

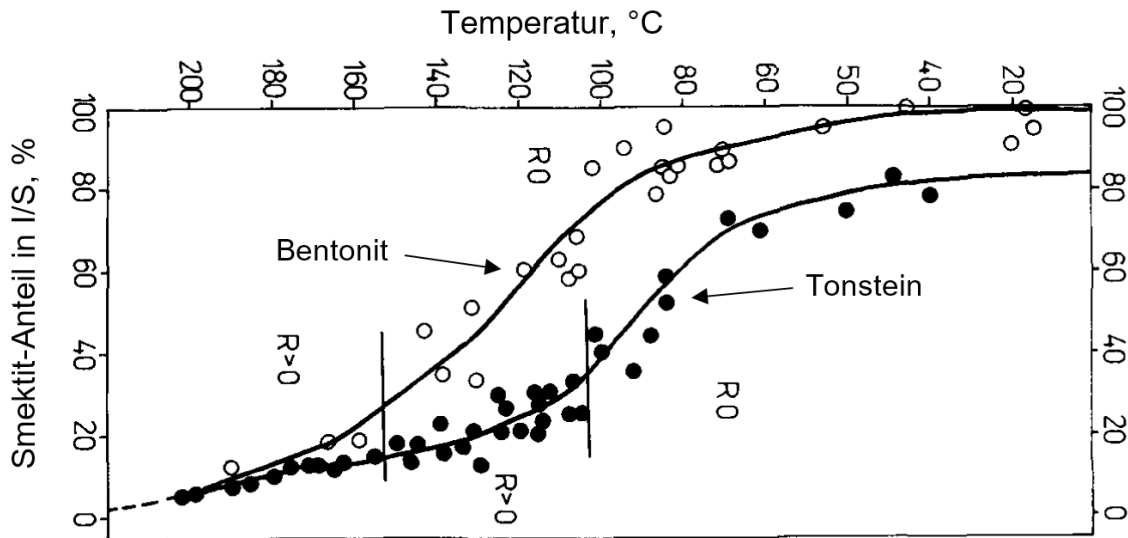


Abb. 6.13: Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechsellagerung (I/S) einer Bentonit-Formation bzw. eines Tongesteins in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur als Maß für den Fortschritt der Illit-Smektit-Reaktion unter geologischen Bedingungen /ŠUC 93/.

Die Smektit-Illit-Reaktion in Bentonit-Formationen schreitet deutlich langsamer als in Tongesteinen voran /ŠUC 93/, /MAS 01/. Daher verschiebt sich die Temperaturgrenze für Bentonite von 120 °C auf die Temperatur von ca. 150 °C, bei welcher der Unterschied in der Temperaturabhängigkeit der Quellfähigkeit zwischen Bentoniten und Tongesteinen vernachlässigbar wird /ŠUC 93/. Der Übergang bei einem Smektit-Anteil von unter 15 % findet laut Literatur zur Diagenese erst bei 150 - 90 °C statt /POL 93/, /VÁZ 14/. Beim unzureichenden Kaliumangebot verschiebt sich diese Temperaturgrenze auf 240 °C /ARO 06/. Eine vollständige Umwandlung der Smektit-Schichten zu Illit-Schichten wurde bei einem unzureichenden Kaliumangebot erst bei ca. 270 °C nachgewiesen /ARO 06/.

Erhöhte Salinität im Zusammenspiel mit einer Temperatur über 80 °C wurde als ein beschleunigender Einflussfaktor auf die Smektit-Illit-Reaktion in der Untersuchung einer Bentonit-Formation erkannt /HON 04/. Bei hohen pH-Werten, wie z. B. 13,4, wird die Smektit-Illit-Reaktion im Labor bereits bei 50 °C innerhalb von 30 Tagen bei einer Kalium-Konzentration von 1 M beobachtet /DRI 02/.

Der Einsatz der Smektit-Illit-Reaktion erfolgt somit ab ca. 50 - 60 °C.

Smektit-Umwandlungen aufgrund von Eisen-Ton-Wechselwirkungen

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen metallischem Eisen und einem pulverisierten Tongestein können sich bei Temperaturen um 90 °C unter anoxischen Bedingungen aus quellfähigen Smektit-Illit-Wechselagerungen nicht-quellfähige Schichtsilikate wie Bertierin, Cronstedtit oder Greenalith der Fe-Serpentin-Gruppe bzw. Odinit der Kaolinit-Gruppe bilden /PIG 14/, /RIV 15/, /BOU 14/, /BOU 17/. Allerdings zeigen Labor- und In-situ-Versuche für kompaktierte Bentonite in Kontakt mit Eisen bei 80 °C nach 10 Jahren /UEN 11/, bei 130 °C nach einem Jahr /KAU 13/, /SAS 17/ und bei 130 - 141 °C nach bis zu vier Jahren /KAU 17/ unter anoxischen Bedingungen sowie bei 150 °C nach 7 Jahren unter oxidierenden Bedingungen /SVE 13/ keine nennenswerten Mineralumwandlungen.

Die spezifische Oberfläche und die Kationenaustauschkapazität von Smektiten sind sehr viel höher, als die von Fe-Serpentinen, Kaoliniten und Chloriten. Außerdem besitzen Smektite eine hohe Quellfähigkeit, die ihnen auch eine hohe Plastizität verleihen kann, während Kaolinite, Fe-Serpentine und Chlorite nicht quellfähig sind. Die Umwandlung von Smektiten zu Fe-Serpentinen, Kaoliniten bzw. Chloriten aufgrund von Eisen-Ton-Wechselwirkungen in einer geotechnischen Barriere (Bentonit) bzw. im Wirtsgestein (Tongestein) kann daher deren günstige endlagerrelevanten Eigenschaften negativ beeinflussen. Der Einsatz der Smektit-Umwandlungen aufgrund der Wechselwirkungen mit Eisen kann ab ca. 55 - 90 °C angenommen werden.

Wechselwirkung von Wasserdampf mit Bentonit

Die Reaktion von Bentoniten mit flüssigem Wasser und Wasserdampf bei Temperaturen von > 150 °C kann zu einer erheblichen und irreversiblen Abnahme des Sedimentationsvolumens – eines indirekten Maßes für osmotische Quellfähigkeit im ungespannten Zustand – resultieren /COU 85a/, /OSC 89/, /CUE 01/, /HEU 14/. Auch für einen kompaktierten Bentonit wurde eine Abnahme des Quelldruckes um 35 - 45 % nach Behandlung mit Wasserdampf bei 150 °C beobachtet /MAD 98/. Die innerkristalline Quellenfähigkeit der Bentonite wird dabei nicht beeinträchtigt /COU 85a/, /COU 85b/.

Der Einsatz der Wasserdampf-Bentonit-Wechselwirkung erfolgt ab ca. 110 °C.

Offene Fragen

Die nachstehend genannten offenen Fragen beziehen sich im Wesentlichen auf die Klärung experimenteller Ergebnisse und deren Anwendung für Endlagerkonzepte im Tongestein. Eine Ableitung von Temperaturen an einer Außenfläche der Behälter aufgrund der betrachteten Reaktionen und deren Zusammenspiel ist mit einem Sicherheits- und Endlagerkonzept möglich.

Der Grund für die Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten und in hydrothermalen Systemen im Vergleich zu Tongesteinen ist unbekannt. Auch die Anwendbarkeit der Ergebnisse aus Studien an Natürliche-Analoga zur Smektit-Illit-Reaktion für ein Endlagersystem ist noch nicht geklärt.

Der kombinierte Einfluss einer erhöhten Chlorid-Konzentration ($> 0,1 \text{ M}$) und der Temperatur ($> 80 \text{ °C}$) auf die Beschleunigung der Smektit-Illit-Reaktion, der bisher nur in einer Bentonit-Formation nachgewiesen wurde, sollte im Labor und nach Möglichkeit in-situ bzw. durch Untersuchungen an weiteren geologischen Formationen überprüft werden.

Der pH-Bereich der beschleunigten Smektit-Illit-Reaktion sollte nach unten eingegrenzt werden (bisher nur die Beobachtung einer starken Beschleunigung bei pH von 13,4).

Es bleibt ebenfalls offen, inwieweit die mit Hilfe von kinetischer Modellierung abgeschätzten Reaktionszeiten für eine zuverlässige Aussage zum Ablauf der Smektit-Illit-Reaktion eingesetzt werden können (s. die Diskussion zu Smektit-Illit-Reaktion im Anhang A.1).

Das Vorhandensein der Smektit-Schichten in der R3-Ordnung, die zwar mit Hilfe von Röntgendiffraktometrie und den dazugehörigen Auswertemodellen nachgewiesen sind, wird als ein Artefakt der für diesen Nachweis notwendigen Probenvorbereitung erklärt /WIL 16/. Dieser Umstand bedarf ggf. einer Klärung.

Die Übertragbarkeit der Beobachtungen von Eisen-Ton-Wechselwirkungen, die bisher überwiegend für Tonsuspensionen mit einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von $< 0,1$ gemacht wurden, auf kompaktierte Tone mit einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von > 2 ist noch ungeklärt.

Die Übertragbarkeit der Studie an Natürlichen-Analoga /PEL 11/, die eine Smektit-Umwandlung bei 55 - 95 °C innerhalb von bis zu 10–11 Mio. Jahre aufgrund der Einwirkung von hydrothermalen Wässern nachwies, zur Einschätzung des Ausmaßes der Umwandlung in einem Endlagersystem bleibt noch fraglich. Die Umwandlungsrate bei den endlagerrelevanten Temperaturen ist unbekannt.

Die Relevanz der Wasserdampf-Bentonit-Wechselwirkung für kompaktierte Bentonite wurde bisher nicht gezeigt. Laut /OSC 89/ kann die beobachtete Abnahme des Sedimentationsvolumens des Bentonitpulvers im ungesättigten Zustand durch eine physikalische Aggregation der Tonmineralteilchen nur teilweise erklärt werden. Der Mechanismus dieser Abnahme bleibt somit offen. Es ist ferner zu überprüfen, ob nicht dieselben Effekte wie in Versuchen mit vermutlicher oder nachgewiesener Wasserdampferzeugung auch bei einer Wechselwirkung zwischen Bentonit und Lösung, wie möglicherweise in /CUE 01/ beobachtet, zustande kommen können.

6.2.2 Auflösung, Umwandlung und Neubildung von sonstigen Mineralen

Quarz-Zementation

Die **Zementation von Quarz** (Siliziumdioxid) an den Kontaktflächen der Tonkörner kann die sicherheitsrelevanten Eigenschaften **Plastizität** und **Quellfähigkeit** des Bentonits/Tongesteins verringern. Daher sollte dieser Prozess aus Aspekten der Langzeitsicherheit möglichst vermieden werden.

Tonmineralumwandlungen (wie z. B. Smektit-Illit- und Kaolinit-Illit) laufen unter geologischen Bedingungen bei Temperaturen von jeweils 60 - 110/120 °C und 120 - 140 °C /THY 11/, /GOU 16/ ab (s. vorhergehendes Kap. 6.2.1). Es sind die Tonmineralreaktionen, die erhebliche Mengen an Siliziumdioxid – bis zu 30 % der Tonmineralmasse – freisetzen können /PEL 09/, /THY 11/.

Im Temperaturbereich 60 - 80 °C kann das durch die Smektit-Illit-Reaktion freigesetzte Siliziumdioxid – vermutlich lokal – zu mikrokristallinem Quarz kristallisieren /PEL 09/, /THY 11/. Ab einer Temperatur von ca. 85 °C wird die Quarz-Zementation (Bildung von verbundenen Netzwerken aus mikrokristallinem Quarz an den Kontaktflächen der Tonkörner) begünstigt /PEL 09/, /THY 11/. Bis ca. 130 °C überwiegen noch die Tonmineral-Tonmineral-Kornkontakte im Tongestein /GOU 16/. Ab einer Temperatur von ca. 150 °C

können im Tongestein horizontale, nahezu durchgehende Schichten von Quarz gebildet werden /THY 11/.

Die Quarz-Zementation beginnt im Wesentlichen ab ca. 80 - 90 °C.

H₂-induzierte Pyrit-Reduktion

Die Produktion von abiotischem Hydrogensulfid in einem Ton bzw. tonhaltigen Material unter reduzierenden Bedingungen kann durch die sog. **H₂-induzierte Pyrit-Reduktion** zu einer erhöhten Metallkorrosion und weiteren Mineralumwandlungen im Endlager führen. Bei **Temperaturen über 150 °C** und H₂-Partialdrucken über 3 MPa wird Pyrit (FeS₂) innerhalb kürzester Zeit vollständig in Pyrrhotite (FeS_{1+x}) mit gleichzeitiger Freisetzung von Hydrogensulfid umgesetzt /TRU 13/.

Vorausgesetzt, dass die Temperatur im Pyrit-haltigen Buffer vor dem Anstieg des H₂-Partialdruckes auf 3 MPa unter 150 °C zurückgeht, können die Auswirkungen dieses Prozesses vernachlässigt werden. Der Prozess bedarf weiterhin keiner Betrachtung, wenn z. B. durch die Pyrit-Oxidation sichergestellt werden kann, dass im Buffer keine nennenswerten Mengen an Pyrit vorliegen.

Zersetzung von Karbonatmineralen

Die **Karbonatminerale** stellen die Pufferkapazität der Bentonite/Tongesteine dar, dank welcher der pH-Wert der Tonporenlösung im nahe neutral bzw. leicht alkalisch bis alkalischen Bereich liegt.

Eine temperaturabhängige Reaktion zwischen Karbonat und Tonmineralen in einem Tongestein führt zu einer Zersetzung von Karbonatmineralen (entsprechend der Reaktion $\text{CaCO}_{3(s)} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}$) und in der Folge zu einer CO₂-Freisetzung /HUT 90a/, /HUT 90b/, /CER 17/. Die Reaktion gewinnt an Bedeutung bei höheren Temperaturen und dominiert über eine mögliche Karbonatfällung ab etwa 100 °C /SMI 89/, /CER 17/. Diese Reaktion kann bei Temperaturen unterhalb 50 °C vernachlässigt werden.

Ein Anstieg des CO₂-Partialdrucks kann allerdings die Calcit-Zersetzung behindern und somit die Pufferkapazität der Bentonite/Tongesteine verringern, wie in-situ bei 85 °C und einem CO₂-Partialdruck von ca. 1 bar beobachtet /NEC 16/. So verringerte sich der pH-

Wert innerhalb von 200 Tagen auf ca. 4,5 in der Studie. Da bei solchen pH-Werten die Korrosionsrate der metallischen Abfallbehälter erheblich ansteigt, wurde das französische Endlagerkonzept durch Zugabe eines alkalischen Zement-Bentonit-Mörtels zwischen den Behältern und dem Tongestein modifiziert, um die Verringerung der Pufferkapazität des Tons zu kompensieren /NEC 16/.

Die Zersetzung von Karbonatmineralen beginnt im Wesentlichen ab ca. 50 °C.

Offene Fragen

Die vermutete ursächliche Wirkung der Pyrit-Oxidation im Ton auf einen starken Rückgang des pH in Kontaktlösung /NEC 16/ sowie ihre Relevanz bei geringen vorhandenen Hohlräumen sollte in einem Versuch überprüft werden.

Die Zugabe eines alkalischen Zement-Bentonit-Mörtels zwischen den Abfallbehältern und dem Tongestein im Französischen Endlagerkonzept /NEC 16/ zeigt die Notwendigkeit auf, die Wechselwirkungen zwischen Behältermaterial, Zement und Bentonit/Tongestein auch bei höheren Temperaturen zu untersuchen.

Die Quantifizierung und Kinetik der CO₂-Freisetzung aufgrund der Auflösung von Karbonatmineralen im Ton im Temperaturbereich 50 - 200 °C in Abhängigkeit von der Zusammensetzung von Silikatmineralen ist erforderlich, um einen spezifischen Tongestein als Wirtsgestein zu qualifizieren. Erste Ansätze zur Beantwortung dieser Frage sind bereits in den Arbeiten /COU 98/ und /CER 17/ entwickelt.

Die Abhängigkeit der Pufferkapazität der Bentonit/Tongesteine von der Temperatur und der CO₂-Freisetzung sollte geklärt werden.

Die Zersetzung von Karbonatmineralen – und somit der CO₂-Freisetzung – und deren Behinderung bei Zugabe metallischen Eisens im Unterschied zur Nichtbehinderung der CO₂-Freisetzung in Kontakt mit niedriglegiertem Stahl und ihre evtl. Temperaturabhängigkeiten ist ebenfalls eine offene Frage.

Abhängig vom gewählten Endlagerkonzept sind diese Reaktionen relevant für die Festlegung einer Temperatur an der Außenwand der Behälter.

6.2.3 Chemische Alteration von Organika

Eine ansteigende Temperatur im Tongestein kann zu einer **erhöhten CO₂- und H₂S-Freisetzung** aus Organika führen. Dies wiederum kann die chemischen Eigenschaften (pH, Eh, Ionenstärke) der Porenlösungen in der geologischen /LOR 08/, /BRU 12/ und in den geotechnischen Barrieren erheblich beeinflussen und weiterhin den Fluiddruck erhöhen. Bei Überschreitung einer Temperatur von 150 °C kann ein weiterer Prozess zu einer Bildung und Freisetzung von Kohlenwasserstoffen führen.

Dieser Prozess ist von der Kerogenmasse bzw. dessen Gasgehalt (1 - 15 % der Kerogenmasse) abhängig /BRU 12/. Die thermolabile CO₂-Fraktion beträgt z. B. bei Boom Clay ca. 50 - 55 mg pro g Kerogen /LOR 08/, /BRU 12/ und kann bereits ab 80 °C freigesetzt werden /BRU 12/. Die **Pyrolyse des Kerogens**, die ebenfalls zur CO₂-Freisetzung und zusätzlich aufgrund der Spaltung der C=C-Bindungen zur Kohlenwasserstoff-Freisetzung führt, startet hingegen erst bei 150 °C.

Der advective und diffusive Transport von Fluiden kann durch die CO₂- und Kohlenwasserstoff-Freisetzung und die infolgedessen entstehenden Fluiddruck- bzw. Kohlenstoffkonzentrationsgradienten begünstigt werden. Die H₂S-Freisetzung kann zu erhöhter Metallkorrosion und Mineralumwandlung im Endlager führen.

Offene Fragen

Die Versuche, die in /LOR 08/, /BRU 12/ diskutiert werden, wurden mit reinem, aus dem Boom Clay extrahierten Kerogen durchgeführt. Der Einfluss des Wassers und der Tonminerale auf die CO₂-Freisetzung insbesondere bei Temperaturen unterhalb 80 °C wurde in /LOR 08/, /BRU 12/ als offene Frage identifiziert.

Der Grund für die Unterschiede in der CO₂-Freisetzung aus Tonproben und aus Kerogenproben ist noch unbekannt.

Weiterhin sollte das Ausmaß bestimmt werden, in welchem sich die Sorption- und Diffusionseigenschaften von Radionukliden in der Tonbarriere aufgrund der CO₂-Freisetzung ändern /LOR 08/.

6.2.4 Kolloidbildung und -filtration

Die **Bildung von Kolloiden** (durch den Abtrag von Partikeln) kann zum Masseverlust (der Tonfraktion) der Endlagerbarrieren und zu einem beschleunigten Transport von Radionukliden mit Kolloiden führen. Die Bildung von Kolloiden unterliegt einer Temperaturabhängigkeit, die wiederum von weiteren im Folgenden beschriebenen Faktoren abhängt.

Der Einfluss eines Temperaturanstiegs von 4 °C bzw. 22 °C auf 70 °C auf die Stabilität der Montmorillonit-Kolloide hängt stark vom pH-Wert und – im naheneutralen pH-Bereich – von der Ionenstärke der Lösung ab: bei pH von 3 bis 8,3 wird die Stabilität erheblich reduziert (im naheneutralen pH-Bereich bei einer Ionenstärke von ca. > 0,007 M), während sie bei pH von 10 bis 11 erhöht wird /GAR 09/. Diese differenzierte Abhängigkeit vom pH-Wert und von der Ionenstärke der Lösung hängt damit zusammen, dass die Kolloid-Aggregation zwar durch die sich mit der Temperatur erhöhende Zusammenstoßhäufigkeit der Montmorillonit-Kolloide begünstigt wird, sie aber durch die sich mit der Temperatur ebenfalls erhöhenden Kolloidabstoßung unterdrückt wird.

Kolloidbildung kann bei allen endlagerrelevanten Temperaturen stattfinden. Der Einfluss einer Temperaturänderung auf die Kolloidbildung hängt stark von der Lösungszusammensetzung ab.

Die Temperaturabhängigkeit einer Kolloidfiltration für ein Endlager im Tongestein relevanten Kolloid- und Oberflächenarten lässt sich nicht anhand der verfügbaren Literatur beurteilen und ist unbekannt.

Auch erscheint die Kenntnis eines Standorts und Endlagerkonzepts erforderlich, um diese Temperaturabhängigkeit der Kolloidbildung und -filtration bei der Festlegung einer zulässigen Temperatur an der Außenfläche der Behälter zu berücksichtigen.

6.2.5 Mikrobielle Prozesse

Mikrobielle Prozesse können im Primärzustand des Tongesteins – aufgrund seiner hohen Konsolidierung während der post-sedimentären Entwicklung – oder eines limitierten Angebots an Elektronendonatoren extrem langsam sein. Diese Einschränkungen werden jedoch durch die Auffahrung der Hohlräume des Grubengebäudes zwangsläufig – wenngleich auch nur teil- und zeitweise – aufgehoben. Die Einbringung des Buffers,

sowie die Bildung der Auflockerungszone können außerdem zu einer verzögerten Wiederherstellung des Primärzustandes führen und werden Mikroumgebungen hinterlassen, z. B. Grenzflächen zwischen dem Buffer und dem Wirtsgestein sowie zwischen einzelnen Formsteinen bzw. Pellets des Buffers usw., die die Aktivität von Mikroorganismen fördern könnten.

Des Weiteren beträgt das **Hohlraumvolumen** in einer CSD-V Kokille mit verglasten Abfällen 20 Liter oder ca. 12 % des Kokillenvolumens /MEL 12/ und in einem Behälter mit abgebrannten Brennelementen potentiell etwa 22 - 46 % des Volumens der Brennelemente /GMA 04/. Diese Volumina können für die **mikrobielle Besiedlung** bei einem Verlust der Behälterintegrität zugänglich werden. Mikroorganismen sind sowohl im Tongestein als auch in einzubringenden Tonmaterialien autochthon vorhanden. Sie können auch mit weiteren Materialien, durch Menschen und durch die Bewetterung ins Endlager eingeschleppt und bei günstigen Bedingungen aktiv werden /MEL 11/, /MEL 14/.

Die bisherigen Beobachtungen zeigen, dass jedes Habitat eine massive Anzahl an mikrobiellen Unterpopulationen enthält, von denen möglicherweise nur ein geringer Anteil unter den Umgebungsbedingungen des Habitats metabolisch aktiv ist. Die restlichen, inaktiven Unterpopulationen sterben aber nicht aus, was die Mikroben diskontinuierlich von den größeren Organismen unterscheidet /PAT 09/. So sind z. B. hyperthermophile Mikroben, die optimales Wachstum im Temperaturbereich von 80 - 121 °C zeigen, in derzeit eher kalten Umgebungen wie Tonformationen anwesend und können – sobald die Temperaturen ansteigen – wieder aktiv werden /MEL 11/, /MEL 14/.

Es kann angenommen werden, dass innerhalb weniger Wochen nach Verschluss des Endlagers der Sauerstoff im Endlager z. B. durch mikrobielle Prozesse verbraucht wird (siehe z. B. /PUI 01/). Daraufhin werden mangels relevanter Quellen des Nitrats und Mangans im Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vor Allem Eisen(III)-reduzierende, Sulfat-reduzierende, Methan-produzierende und fermentative Mikroben die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität im Endlager und im angrenzenden Wirtsgestein bestimmen /MEL 11/, /MEL 14/. Diese mikrobiellen Prozesse können durch den Prozess der Biofilmbildung in ihrer Wirkung verstärkt werden /MEL 11/. Außerdem erhöht die Endsporenbildung die Widerstandsfähigkeit einiger Bakterienarten gegenüber ungünstigen Umgebungsbedingungen.

Die Verfügbarkeit des Porenraums ist für diese mikrobiellen Prozesse maßgeblich. Um diese in einem geplanten Endlager zu verringern, wurde beispielsweise von der für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in Kanada verantwortlichen Organisation (Nuclear Waste Management Organisation, NWMO) der Einsatz eines Bentonit-Sand-Gemisches als Referenz-Nahfeldbarriere zugunsten eines reinen Bentonits verworfen, da der Porenraum so deutlich reduziert werden kann /NUC 05/. Weil die Anforderungen der Rückholbarkeit und Bergung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen mit spezifischen Endlagerkonzeptmerkmalen einhergehen, wie z. B. der Verwendung der Sandverfüllung (innerhalb eines Innenliners mit rückholbaren Kokillen) mit einer im Vergleich zum Bentonitbuffer oder Tongestein deutlich erhöhten Porosität /LOM 15/, kann eine Erwärmung der Nahfeldbarrieren und des Tongesteins über etwa 120 - 122 °C hinaus zu einer bedeutenden Verringerung der Mikrobenpopulation bzw. der mikrobiellen Aktivität im Nahfeld eines Endlagers führen.

Psychrophile, mesophile, thermophile und hyperthermophile Mikroben sind durch optimales Wachstum um jeweils < 15, 25 - 45, 45 - 80 und > 80 °C gekennzeichnet /WEB 06/. Fe(III)-reduzierende, Sulfat-reduzierende, Methan-produzierende und fermentative Mikroben lassen sich in diese vier temperaturbezogenen Kategorien einteilen. Aktivität einer mikrobiellen Spezies hängt somit nicht kontinuierlich von der Temperaturänderung ab, sondern läuft bevorzugt in einem für das Wachstum optimalen Temperaturbereich ab. Spätestens bei Temperaturen um ca. 122 °C hört jegliche mikrobielle Aktivität nach derzeitigem Kenntnisstand auf.

Offene Fragen

Obwohl mit einem Temperaturanstieg auf bis zu 95 °C oder ggf. sogar 106 °C für einige Sulfat-reduzierende Mikroben eine Bedingung für ein optimales Wachstum vorliegen kann, wird in einigen Experimenten und Sedimentformationen eine Aktivität nur bei Temperaturen < 70 - 80 °C beobachtet /PAR 11/. Eine experimentell gestützte Erklärung für diese Beobachtung existiert bisher nicht, wäre aber für die Vermeidung der Bildung von korrosionsfördernden Sulfiden im Nahfeld eines Endlagers ggf. vorteilhaft.

Eine temperaturabhängige Biofilmbildung an Stahloberflächen und ihre Auswirkungen auf die Korrosion von Stahl bleibt ebenfalls eine offene Frage. Generell wäre für die Abschätzung der Handhabbarkeit der Behälter im Fall einer Bergung notwendig, den (evtl. positiven) Einfluss von höheren Temperaturen auf die mikrobiell beeinflusste Korrosion gegenüber chemischer oder galvanischer Korrosion der Metalle zu untersuchen.

Der Mechanismus der mikrobiell beschleunigten Bildung von H₂ in Sedimenten, die mit Mineralen oder Gesteinen vermischt und auf 40 - 100 °C erhitzt werden, und der abiotischen Gasbildung bei einer anschließenden Temperaturerhöhung auf 125 - 155 °C ist nicht bekannt, könnte aber für die Entwicklung von Endlagerkonzepten ggf. relevant sein /PAR 11/. Dies gilt insbesondere, wenn artfremde Materialien in einem Endlager in Kontakt mit mikrobiell besiedeltem Tongestein gebracht werden und dadurch ggf. eine zusätzliche Quelle für Gasbildung darstellen.

Da erhöhter Fluidruck den Bereich optimalen Wachstums der methanogenen Spezies *Methanopyrus kandleri* nachweislich zu höheren Temperaturen verschieben kann, wäre es sinnvoll, den Einfluss eines endlagerrelevanten Fluiddrucks auf die sonst bei Umgebungsdrücken bestimmten Temperaturbereiche der Aktivität anderer hyperthermophilen Mikroben zu untersuchen.

Die Frage der Zusammensetzung, der Wachstumsfähigkeit und potentieller Auswirkungen der Aktivität von mikrobiellen Populationen, die entweder in ein Endlager mit solchen Materialien wie Bentonit oder Beton eingebracht oder dort im Tongestein bereits vorhanden sein werden, in Abhängigkeit von der Temperatur bleibt generell eine offene Frage, die für die erwarteten Endlagerbedingungen experimentell bisher nur unzureichend untersucht wurde.

6.2.6 Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen

Tonminerale sind mikroskopisch kleine, plättchenförmige Schichtkristalle. An ihrer Oberfläche kann, gegebenenfalls unter Aufweitung der aneinanderhaftenden Plättchen, reversibel Wasser gebunden werden, d.h., sie können quellen (Quellung) und schrumpfen. Ebenso wie Wasser werden positiv geladene Ionen (Kation) der Bodenlösung sorbiert (Sorption). Die wichtigsten quellfähigen Tonminerale sind die Dreischichtminerale Montmorillonit, Illit und Vermiculit. Die Plättchen sind aufgrund der Ladungsdifferenz nach außen hin negativ geladen. Zwischen den Plättchen wirken eher Abstoßungskräfte; sie können Wasser und Ionen sorbieren, sind also quellfähig und haben hohe Austauschkapazität. Smektite bestehen hauptsächlich aus Montmorillonit, enthalten aber auch Quarz- und Calcitstaub.

In Schichtzwischenräumen gespeichertes Wasser kann unter bestimmten Bedingungen bei einer Erwärmung in freies Porenwasser übergehen und somit freigesetzt werden.

Die Porosität wird sich dadurch erhöhen, während sich der Anteil der Zwischenschichträume zur Gesamtporosität entsprechend verringert.

/HUA 94/ zeigt beispielsweise, dass ein ungesättigter Montmorillonit mit zwei Wasserschichten in 80 % der Zwischenschichten bei einer Temperatur von 88 °C vollständig in einen Zustand mit einer Wasserschicht überführt werden kann.

Durch das **Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen** sind keine negativen Auswirkungen zu erwarten, solange die diesen Prozess begleitende Wasserfreisetzung aufgrund eines Wasserabflusses aus dem erhitzten Endlagerbereich zu keinem erheblichen Porendruckanstieg führt. Mit der Temperaturänderung korreliert das Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen mit einem Verlust mindestens einer Wasserlage, die schon bei 88 °C einsetzt.

6.2.7 Sorption und Desorption

Die **Sorption** ist ein Prozess, der im Endlager zur Rückhaltung freigesetzter Radionuklide und zu einer Verzögerung ihrer weiteren Freisetzung in die Biosphäre führen soll. Sorption wird u. A. anhand von sog. Verteilungskoeffizienten für chemische Elemente bzw. Radionuklide quantitativ charakterisiert. Allerdings sind die verfügbaren experimentellen Daten zur Sorptionsfähigkeit verschiedener Tonminerale bei erhöhten Temperaturen (> 60 - 70 °C) auf wenige Radionuklide bzw. Schwermetalle begrenzt /JOB 15a/.

Sorption kann bei allen endlagerrelevanten Temperaturen stattfinden und zeigt keine einheitliche Abhängigkeit von der Temperaturänderung (Abb. 6.14). Auf die Gesamtanzahl an Elementen in Abb. 6.14 betrachtet, steigt die Sorptionsfähigkeit im Tongestein mit zunehmender Temperatur.

Die Sorptionsfähigkeit der Bentonite und Tongesteine bei erhöhten Temperaturen wurde bisher nur für wenige endlagerrelevante Radionuklide quantifiziert /JOB 15a/. Hierbei ist die Smectit-Illit-Umwandlung zu beachten.

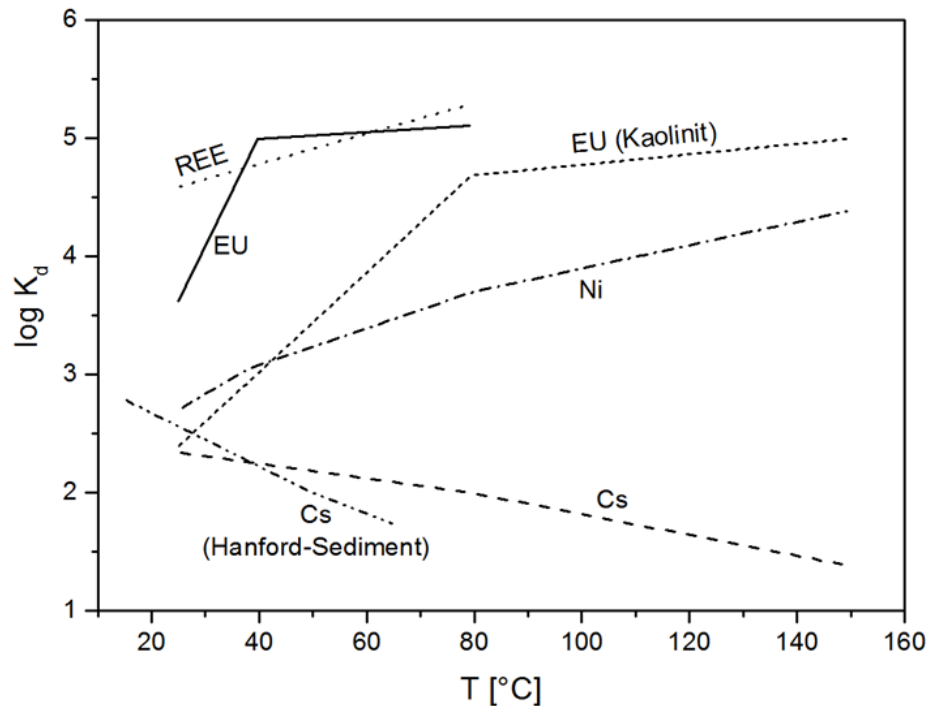


Abb. 6.14 Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (K_d) zur Beschreibung der Sorption (REE und Eu sind Lanthanoide) /JOB 15a/

CO₂-Desorption aus Tonen

In Tongestein kann aufgrund seiner Genese CO₂ adsorbiert sein und mit Zunahme der Temperatur verstärkt freigesetzt werden. Dieses CO₂ kann aus den Zwischenschichten von quellfähigen Mineralen /BUS 16/, /YUA 17/ bzw. Illiten und Glimmern /WAN 18/ desorbieren. **CO₂-Desorption** aus Tonen setzt bei einer Aufheizung auf **ca. 50 °C** ein, erreicht ein Maximum bei ca. 130 °C und wird erst bei über 200 °C abgeschlossen /YES 17/.

Es bleibt offen, ob eine vollständige CO₂-Desorption aus Tonen bei Temperaturen deutlich unter ca. 200 °C bei abweichenden Versuchsbedingungen, insbesondere bei längerer Versuchsdauer als in /YES 17/, stattfinden kann.

6.2.8 Thermische Expansion oder Kontraktion

Laut /STA 16/ werden in Behälternähe durch **thermische Expansion oder Kontraktion** Spannungsänderungen in Behälter, Buffer, Streckenausbau, Auflockerungszone, Wirtsgestein oder in nahe gelegene Abdichtbauwerke eingetragen, die sich auf die Integrität

sowohl der geologischen Barriere (Tongestein) als auch der geotechnischen Barrieren auswirken können. Erwärmungen im Tongestein unterhalb des im Folgenden erklärten **Expansions-Kontraktions-Übergangs** wirken sich nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften des Tongesteins aus. Eine Erhitzung auf Temperaturen oberhalb des Expansion-Kontraktion-Übergangs (bis etwa 150 °C) wirken sich hingegen positiv auf die Wärmeleitfähigkeit, die Festigkeit, die Steifigkeit und die Permeabilität des Tongesteins aus.

Die thermisch induzierte Volumenänderung des Tongesteins wird dem Zusammenwirken von **drei Mechanismen** zugeschrieben /COC 16/. Der **erste Mechanismus** wird durch die elastische (d. h. reversible) zeit- und temperaturabhängige Expansion von Feststoffen und Porenwasser des Tongesteins bestimmt. Der zeitabhängige Abfluss des Wassers aus dem betroffenen Tongesteinsbereich kann dabei in dessen Kontraktion, die als sog. **thermische Primärkonsolidierung** bezeichnet wird /COC 16/, resultieren (s. auch Kap. 6.2.6).

Der **zweite Mechanismus** wird durch die Schwächung der intergranularen Reibung aufgrund eines Anstiegs der thermischen Energie und des damit verbundenen Kollapses des Tongesteinsgerüsts bestimmt und wird als **thermische Sekundärkompression** bezeichnet /COC 16/. Dieser Mechanismus greift solange ein, bis sich eine für das Tragen der thermo-mechanisch induzierten Spannung ausreichende Anzahl an intergranularen Neubindungen im Tongesteinsgerüst bildet.

Die **Viskositätsabnahme** des Porenwassers mit der ansteigenden Temperatur wird als **dritter Mechanismus**, der zur thermisch induzierten Volumenänderung des Tongesteins beiträgt, angesehen /COC 16/. Hierdurch erhöht sich die Rate der Volumenänderung bei Erhitzung, da das Porenwasser beim Abfließen aus dem betroffenen Tongesteinsbereich einen geringeren Widerstand erfährt.

Laborversuche und Beobachtungen für Tongesteine zeigen, dass die Erwärmung eines kompaktierten Tonkörpers bei niedrigen Werten (≤ 1) des Konsolidierungsverhältnisses (ein Verhältnis der senkrechten effektiven Vorkonsolidierungsspannung und der derzeitigen effektiven Spannung) zu seiner Kontraktion führt /BAL 91/, /SUL 02/, /TAN 08/. Bei hohen Konsolidierungsverhältnissen geht eine thermische Expansion des Tonkörpers ab einer bestimmten Temperatur in eine Kontraktion über.

Da eine hohe Saugspannung im ungesättigten Tongestein die intergranulare Reibung erhöht, verschiebt sich die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs zu höheren Werten mit zunehmender Konsolidierung (Abb. 6.15) /TAN 08/. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs mit steigender effektiver Spannung abnimmt /FAU 03/.

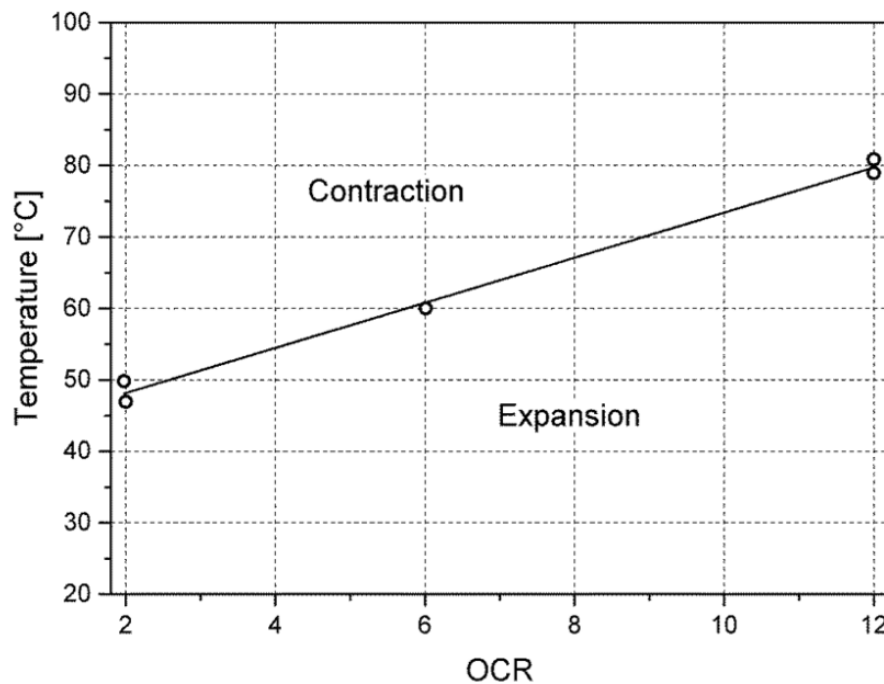


Abb. 6.15 Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91, /SUL 02/).

Eine Expansion setzt im Ton bereits bei geringen Temperaturerhöhungen ein. Sie findet bis zur Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs statt, bei der dann eine irreversible, kontinuierliche Kontraktion erfolgt. Bei einer Abkühlung unterhalb einer Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs kann die aufgrund der Expansion erreichte Volumenänderung des Tons auf eine kontinuierliche Weise mit der Temperaturniedrigung vollständig oder – nach einem noch nicht geklärten Mechanismus – teilweise abgebaut werden.

Offene Fragen

Ein etwaiger Einfluss der Probenvorbereitung (intakt oder rekompaktiert /NG 17/, belastet oder entlastet /COC 16/) auf das Expansion/Kontraktion-Verhalten des Tons ist noch zu klären.

Der Mechanismus der in /ROM 05/ und /FAV 16/ beobachteten irreversiblen Expansion des Tons bedarf einer phänomenologischen Erklärung.

6.2.9 Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Tongestein

Ein **Temperaturanstieg** beschleunigt **Umwandlungen** der Tonminerale, der sonstigen Minerale und der organischen Bestandteile eines Tongesteins bzw. eines Bentonits. Feste und flüssige Bestandteile eines Tongesteins bzw. eines Bentonits erfahren aufgrund eines Temperaturanstiegs eine **Expansion**, die unter bestimmten Bedingungen in einer **Kontraktion** des erhitzten Bereichs (z. B. bei Wasserabgabe) resultieren kann. Mit einem Temperaturanstieg ändert sich die Zusammensetzung und Aktivität einer mikrobiellen Population. Ab ca. 123 °C kommt jegliche **mikrobielle Aktivität** zum Erliegen. **Sorption** und **Kolloidbildung** werden durch einen Temperaturanstieg in ihrer Ausprägung ebenfalls beeinflusst, wobei die Wechselwirkung mit der Lösungszusammensetzung wichtig ist.

Ein Temperaturanstieg über eine bestimmte Temperatur im Tongestein und Bentonit hinaus kann zu einer irreversiblen Beeinträchtigung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des umgebenden Tongesteins bzw. der Bentonit-basierten Barrieren führen, die im Endlagerkonzept vorgesehen sind. Im Hinblick auf das Wirtsgestein Tongestein können hierfür zunächst irreversible Umwandlungen der Tonminerale, der sonstigen Minerale und der Organika, die Expansion und Kontraktion sowie mikrobielle Prozesse als relevant angesehen werden (s. Abb. 6.16). Diese Prozesse laufen bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen ab und können nur durch die Wahl des Wirtsgesteins und Materialien vollständig ausgeschlossen werden. Daraus können mögliche Begründungen für Festlegungen von Temperaturen zur Auslegung eines Endlagers und an der Außenfläche von Behältern für ein Endlagerkonzept abgeleitet werden.

Weitere temperaturabhängige Prozesse, z. B. Sorption und Kolloidbildung, werden durch eine Temperaturänderung in der Regel reversibel beeinflusst und sind für Festlegungen von Temperaturen nur untergeordnet von Bedeutung.

Da jedoch das Zusammenspiel und der Ablauf dieser temperaturabhängigen Prozesse von einer Vielzahl von Wechselwirkungen beeinflusst ist, erscheint eine Festlegung einer pauschalen Temperaturbegrenzung auf der Basis der Temperaturabhängigkeit einzelner Prozesse (Abb. 6.16), ohne die Berücksichtigung eines Endlagerkonzepts und die aus einer Charakterisierung des Wirtsgesteins und eingesetzten Materialien abzuleitenden Einflussgrößen, sicherheitstechnisch unzureichend begründbar. Vielmehr ist bei der Planung des Endlagerkonzepts das Einschussverhalten eines Endlagersystems unter Würdigung aller genannten Aspekte zu optimieren.

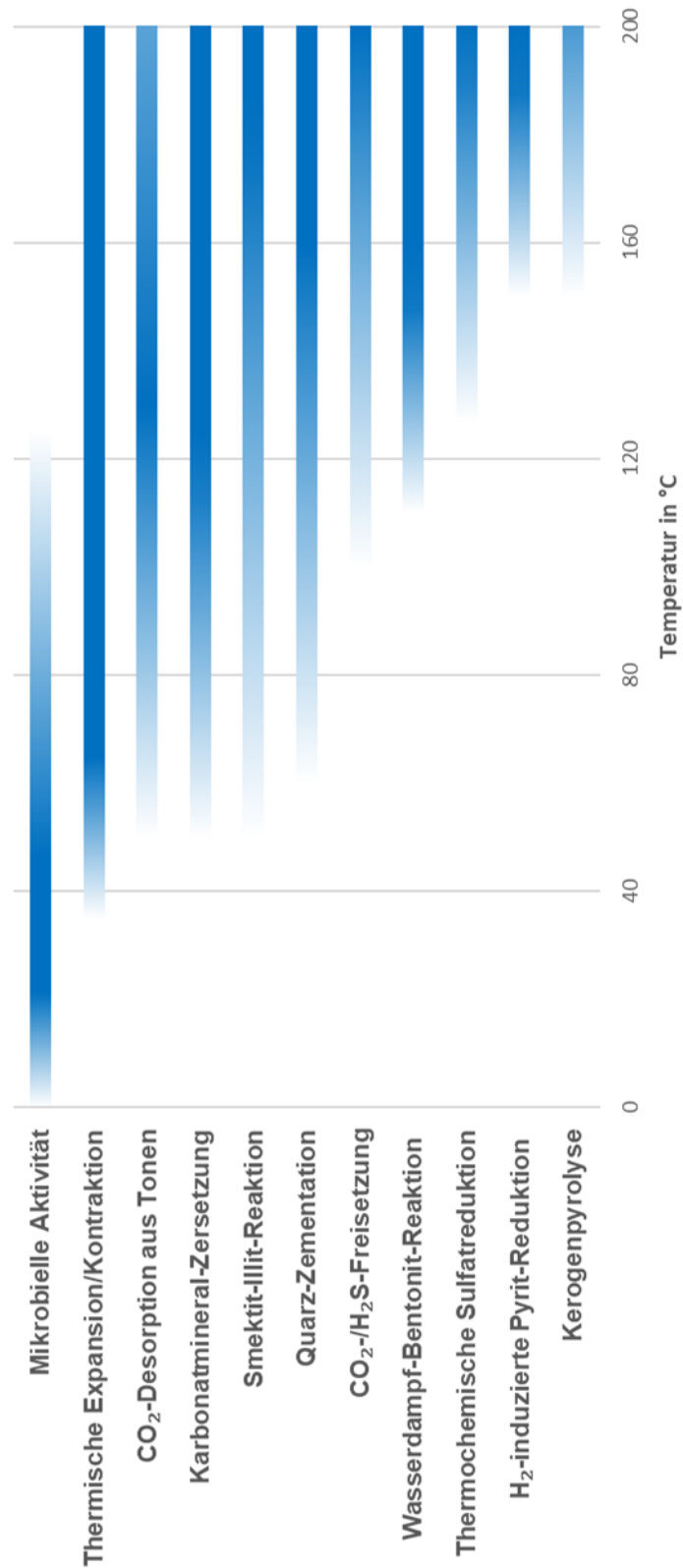


Abb. 6.16 Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Tongestein

Die Farbabstufung beschreibt die Relevanz des ablaufenden Prozesses zu der jeweiligen Temperatur, d. h. in dunklen Farbbereichen verläuft der Prozess verstärkt ab.

6.3 Wirtsgestein Kristallingestein

Die Tab. 6.3 zeigt die Prozess-FEP für ein generisches Endlagerkonzept im Kristallingestein mit der Option „multipler ewG“ nach aktuellem Diskussionstand /GRS 18/. Diese Liste wird nach gegenwärtigem Kenntnisstand als abdeckend angesehen - eine Vollständigkeit kann aus prinzipiellen Gründen nicht erreicht werden.

Die Spalte „Komponente-Einwirkung“ der Tab. 6.3 kennzeichnet die Prozess-FEP mit „1“, wenn diese direkt auf tonige oder kristalline Komponenten im ewG des Endlagers im Wirtsgestein Kristallingestein einwirken können (Bohrlochverschluss, Versatz, Streckenverschluss, Auflockerungszone, Wirtsgestein, Störungen und Klüfte). Die in dieser Spalte mit „0“ gekennzeichneten Prozess-FEP werden nicht weiter behandelt, da diese schon wirtsgesteinsunabhängig im Kap. 6.4 beschrieben werden (siehe auch Tab. 6.1 und Tab. 6.2).

Die Indizierung mit „1“ in der Spalte „Temperaturabhängigkeit“ bedeutet, dass eine direkte Temperaturabhängigkeit des Prozesses angenommen wird. Die Indizierung mit „0“ wird verwendet, wenn praktisch von keiner Temperaturabhängigkeit des Prozesses auszugehen ist. Die FEP wurden als temperaturabhängig indiziert, wenn diese durch die Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle beeinflusst und als relevant für die Sicherheitsanalyse eines Endlagerkonzeptes angesehen werden. Die geologischen Prozesse können als temperaturunabhängig angesehen werden und sind deshalb nicht in der Tab. 6.3 aufgeführt.

Die Prozesse, die im Kap. 6.2 zum Wirtsgestein Tongestein beschrieben wurden, können hier analog übernommen werden, soweit dies den Bentonit in Dichteelementen der Bohrloch- und Streckenverschlüsse, des Versatzes sowie der Tonminerale als Belag in Störungen und Klüften im Kristallin betrifft.

Die temperaturabhängige Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen in Klüften sind als relevant für eine Langzeitsicherheit im Wirtsgestein Kristallingestein gesondert im Kap. 6.3.1 dargestellt.

Tab. 6.3 FEP-Liste für Endlagersysteme im Kristallingestein (Option „multipler ewG“) /GRS 18/

Lfd.Nr.	Prozess-FEP-Name	Komponente- Einwirkung	Temperatur- abhängigkeit	Kapitel
1.	Korrosion der Brennstoffmatrix	0		
2.	Alteration der Glasmatrix	0		
3.	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	0		
4.	Metallkorrosion	0		
5.	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	0		
6.	Metallversprödung durch Strahlung	0		
7.	Alteration von Bentonit	1	1	6.2.1
8.	Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen	1	1	6.3.1
9.	Chemische Alteration von Organika	1	1	
10.	Mikrobielle Prozesse	1	1	
11.	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	1	1	6.2.6
12.	Quellen und Schrumpfen von Beton	0		
13.	Konvergenz	0		
14.	Endlagerinduzierter Wärmestrom	1		
15.	Thermische Expansion oder Kontraktion	1	1	
16.	Phasenübergänge	0		
17.	Übertragung von Spannungen	1	1	
18.	Bildung von Fließwegen in Dichtelementen	1	0	
19.	Bildung von Fließwegen im Versatz	1	0	
20.	Abschalungen	1	0	
21.	Strömungsvorgänge in der Geosphäre	0		
22.	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	0		
23.	Bitumen-Migration	0		
24.	Dispersion	1	0	
25.	Diffusion	1	0	
26.	Lösen und Ausgasen	0		
27.	Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung	1	0	
28.	Radiolyse	1	0	
29.	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1	0	
30.	Zündung von Gasgemischen	0		
31.	Sorption und Desorption	1	1	
32.	Komplexbildung	0		
33.	Kolloidbildung und -filtration	1	1	
34.	Kritikalität	0		
35.	Helium-Produktion	0		
36.	Thermochemische Sulfatreduktion	1	1	

Die weiter nachfolgend beschriebenen Einzelprozesse im Kap. 6.3.2 sind Komponenten des Wirtsgesteins Kristallingestein zugeordnet und ergänzen Informationen zu den Prozessen, soweit diese in Kap. 6.1 und 6.2 gegeben wurden, über den FEP-Katalog hinaus aus bestehenden Endlagerkonzepten im Kristallingestein. Die beispielhaft genannten Temperaturen sind aus aktuellen Konzepten sowie Forschungsergebnissen übernommen. Dies sind die Konzepte (sog. KBS-3) aus Schweden /SKB 11c/, /SKB 11d/, /SKB 11b/ und Finnland /POS 12b/, /POS 12a/, /POS 13/.

6.3.1 Hydrothermale Alterationsprozesse in verfüllten Klüften (Wirtsgestein)

Im Folgenden werden **hydrothermale Alterationsprozesse** für Granit-, Diorit- und Gneis-bildende Minerale (Na,Ca)-Feldspat (Plagioklase mit Endgliedern Albit und

Anorthit), (K,Na)-Feldspat (Alkalifeldspäte mit Endgliedern Orthoklas/Mikroclin und Albit), Biotit, Quarz und Amphibole (z. B. Hornblende) beschrieben.

Albitisierung von Plagioklasen und Alkalifeldspäten ist eine der häufigsten und charakteristischen hydrothermalen Alterationsreaktion der oberen Erdkruste und ist ausreichend schnell, um sogar im Labor untersucht zu werden /PLÜ 09/. In granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar in Schweden wurde in der letzten Studie eine progressive Alteration von Mikroclin zu Oligoklas und dann Oligoklas zu Albit nachgewiesen. Da Molarvolumen von Oligoklas um 8 % geringer ist als das von Mikroclin, wird bei der ersteren Reaktion Porosität generiert. In den so entstandenen Mikron-großen Poren bildet sich bei der letzteren Reaktion feinkörniger Muskovit (Serizit). Bildung von Serizit wird als eines der häufigsten Produkte der hydrothermalen Alteration von Graniten betrachtet /PLÜ 09/. Die Transformation von Oligoklas zu Albit fand in granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar entlang von intragranularen Mikrorissen statt und verdeutlicht die Bedeutung dieses Fluid-Infiltrationspfades für den Ablauf der Alteration. Die Albitisierung wurde durch eine Transformation von Biotit zu Chlorit und eine Zersetzung von Hornblende mit einer vermutlichen Fe-Freisetzung begleitet. Zu einem späteren Zeitpunkt führte eine Klüftbildung in den so alterierten granitischen Gesteinen zu einem Abfall vom lithostatischen zum hydrostatischen Druck, der eine Kalifeldspat-Bildung aus Serizit und Quarz sowie eine Hämatit-Präzipitation begünstigte /PLÜ 09/.

Auf sehr ähnliche Weise infiltrierte das 320-350 °C heiße hydrothermale Fluid aus Klüften im Naegi–Agematsu Granit in Japan durch Mikrorisse in die Gesteinsmatrix, was zu einer teilweisen Auflösung von Plagioklasen und einer teilweisen Transformation von Biotit zu Chlorit führte /NIS 10/. In den dadurch entstandenen Poren wurde Biotit aufgelöst und Fe-Phyllosilikate (Chlorit, Corrensit und Smektit) präzipitierten unter reduzierenden Bedingungen. Anschließend lösten sich Kalifeldspat und Fe-Phyllosilikate auf und es erfolgte eine Präzipitation von Illit und Quarz, die zu einer weiteren Mikroriss-Bildung führte. Weder eine Bildung von Kaolinit, die auf saure Bedingungen im hydrothermalen Fluid hinweisen würde, noch eine Bildung von Calcit, die unter alkalischen Bedingungen stattfindet, wurden beobachtet. Die mit auf diese Weise entstandenen mit Illit verfüllten Klüfte blieben bei Temperaturen von unter 200 °C seit etwa 60 Millionen Jahre stabil /NIS 10/.

Ein Illit mit einer Symmetrie von 2M1 bildet sich in Granit in der Regel bei > 280 °C aus der hydrothermalen Alteration von Feldspat und Biotit, wohingegen ein 1 Md Illit bei 60

bis 180 °C aus der durch eine Scherdeformation begleiteten hydrothermalen Alteration von Kalifeldspat oder aus einer Transformation von 2M1 Illit gebildet werden kann /NIW 16/. Smektite können sich in Granit bei einer oberflächennahen hydrothermalen Alteration unter etwa 135 °C bilden, während Kaolinite bei < 120 °C, hohen Fluid/Gestein-Verhältnissen und für meteorische Wässer charakteristischen sauren Bedingungen gebildet werden /NIW 16/.

Anorthit, das Ca-Endglied der Plagioklase, ist bei einem Kontakt mit hydrothermalen Wässern bei Temperaturen unter 250 °C instabil und kann in einer Reaktion unter Quarz-Verbrauch zu einem Ca-Zeolith Laumontit bei 150 - 250 °C und einem Ca-Zeolith Stilbit bei < 120 °C alterieren, so dass eine Albitisierung der Plagioklase zustande kommt /STO 15/. Solche Albitisierung und Ca-Zeolith-Bildung konnte bis zu 15 Vol. % an Porosität in geklüfteten Graniten in den Alpen generieren /STO 15/. Die hydrothermale Albitisierung wird in der Regel durch eine teilweise Auflösung von Quarz begleitet /KAU 12/. Jedoch beschreibt die letzte Studie mit Graniten in Rajasthan, Indien, ein Beispiel, bei dem sowohl die Oligoklas-Albit- als auch die etwas langsamere Mikroklin-Albit-Transformation aufgrund eines Kontaktes mit meteorischen Wässern bei 350 - 400 °C in einer Quarz-Bildung resultierte.

Die hydrothermale Transformation von Biotit zu Chlorit findet in einem breiten Temperaturbereich unter etwa 400 °C /YUG 15/. Die letzte Studie unterscheidet dabei zwischen zwei Mechanismen für Toki Granit in Japan. Bei der Transformation von Biotit zu Chlorit reduziert sich nach dem ersten Mechanismus das Feststoffvolumen um 6 bis 20 % und große Mengen an Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} und Mg^{2+} werden aus dem hydrothermalen Fluid für die Bildung des Chlorits verbraucht. Nach diesem Mechanismus wurden mehr als 85 % der Chlorite im Toki Granit gebildet. Nach dem zweiten Mechanismus reduziert sich das Feststoffvolumen um 27 bis 63 % und keine oder sehr geringe Mengen an Metallionen werden aus dem hydrothermalen Fluid verbraucht. Für die Dominanz eines der beiden Mechanismen ist nach /YUG 15/ die Verfügbarkeit von Metallionen im hydrothermalen Fluid entscheidend. Die entstandene Porosität wird im Toki Granit durch Titanit, Ilmenite, K-Feldspat und Fluorit gefüllt. Bei Temperaturen von 350 bis 290 °C wurde dort Biotit vollständig durch Chlorit ersetzt, während bei Temperaturen von 350 bis 180 °C nur eine teilweise Transformation von Biotit zu Chlorit erfolgte.

Eine hydrothermale Reaktion mit meteorischen Wässern bei Fluid/Gestein-Verhältnissen > 0,8 führte bei einer Abkühlung der Granite im südlichen Schwarzwald von 500 °C

auf 200 °C (bei Drucken von 1 bis 2 kbar) zu einer Biotit-Alteration zu Chlorit im höheren Temperaturbereich und zu Muskovit im niedrigeren Temperaturbereich, während Feldspäte im gesamten Temperaturbereich alteriert wurden /SIM 90/.

Im kristallinen Gestein in Forsmark führte die hydrothermale Alteration in Klüften zur Bildung von

- Epidot, Chlorit und Quarz bei > 150 - 200 °C im ältesten dokumentierten Alterationsergebnis,
- Kalifeldspat, Albit, Prehnit, Laumontit, Calcit und Chlorit bei etwa 200 °C, unter oxidierenden (Anwesenheit von Hämatit) und gleichzeitig alkalischen Bedingungen sowie einer niedrigen Salinität,
- Quarz und Pyrit bei 60 bis 190 °C sowie Calcite bei 60 bis 100 °C und einer Salinität von 15 bis 20 %, (iv) Tonmineralen, Calcit sowie in geringfügigen Mengen Pyrit und Goethit bei < 50 °C /SAN 09a/.

Calcit ist mit Gehalten von 0,028 bis 18,8 g Calcit/kg Gestein und einem Mittelwert von 2,52 g/kg allgegenwärtig im granitischen Gestein und kommt in Form von isolierten xenomorphen Kristallen, Kluft- und Hohlraumfüllungen sowie serizitierten Kerne der Plagioklase vor /WHI 05/. Die im Kap. A.2 diskutierte Zersetzung von Karbonatmineralen kann daher auch für granitische Gesteine relevant sein. Calcit-Auflösungsraten sind laut /WHI 05/ um sechs Größenordnungen höher als die von Silikatmineralen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Alteration von Granit, Diorit und Gneis zusätzlich zu deren bildenden Mineralen am häufigsten noch folgende Minerale entstehen können: Epidot, Muskovit/Serizit, Chlorit, Illit, Smektit, Kaolinit (saure Bedingungen), Calcit (alkalische Bedingungen), Stilbit, Laumontit, Prehnit, Titanit, Hämatit (oxidierende Bedingungen) und Pyrit (reduzierende Bedingungen). Von diesen Mineralen werden in /NIS 10/ Calcit, Laumontit, Chlorite, Epidot und Prehnite zusammen mit Quarz als die häufigsten Kluftfüllungsminerale angegeben.

6.3.2 Einzelprozesse in Endlagerkonzepten im Kristallingestein

Sicherheitstechnische Überlegungen im Rahmen der Entwicklung des Endlagerkonzeptes im Kristallgestein (dem KBS3-Konzept) in Schweden und Finnland haben auf Einzelprozesse Bezug genommen. Es sind überwiegend temperaturabhängige Prozesse, die

sich auf das verwendete Behältermaterial (Kupfer), den tonhaltigen Buffer (Bentonit) oder standortspezifische Aspekte beziehen.

Änderungen in der Struktur des Behältermaterials

Das KBS-3-Konzept geht bei einer maximalen Temperatur an der Außenfläche der Behälter von 100 °C davon aus, dass keine Änderungen in der Struktur des Behältermaterials zu erwarten sind. Daher sind mögliche Prozesse für höhere Temperaturen nicht näher untersucht worden. Falls höhere Temperaturen als 125 °C auftreten, werden ungünstige Änderungen in der Struktur des Behältermaterials nicht ausgeschlossen und dieser Prozess müsste weiter bewertet werden /SKB 10a/.

Illitisierung des Montmorillonits bzw. der Smektite im Bentonit-Buffer

Das Buffermaterial Bentonit besteht zu einem großen Teil aus dem Tonmineral Montmorillonit aus der sog. Smektit-Gruppe /OLA 06/, /KAR 09/. Bentonit wurde aufgrund seiner Quelleigenschaften als Material ausgewählt, da der Bestandteil an Montmorillonit bei Kontakt mit Wasser oder einer Lösung zu quellen beginnt, also sein Volumen sich vergrößert. Der Bentonit wird im KBS3-Konzept zwischen Behälter und Wirtsgestein eingebracht /SKB 11c/, /SKB 11d/, /SKB 11b/. Bei Zutritt einer wässrigen Lösung quillt der Bentonit auf. Die Volumenvergrößerung ist durch die Streckenbegrenzungen des Wirtsgesteins begrenzt und führt somit zu einem Druckaufbau innerhalb des Bentonits, so dass der Buffer eine hohe Dichte und eine geringe Permeabilität entwickelt. Diese Abdichtung ist die gewünschte Barriereeigenschaft des Bentonits.

Gefrieren des Buffers

Das Gefrieren eines Buffers wurde im KBS-3-Konzept betrachtet. Die Vorgaben zur Teufenlage im Standortauswahlverfahren lassen eine Unterschreitung der Gebirgstemperatur in großen Teufen aufgrund von Frosteffekten nicht erwarten. Dieser Prozess ist deshalb nicht im FEP-Katalog aufgenommen worden. Im FEP-Katalog für das KBS-3-Konzept in Schweden ist das Gefrieren aufgeführt und wird hier beispielhaft erläutert.

Der Gefrierpunkt einer wässrigen Lösung im Buffer und am Behälter hängt von zahlreichen Faktoren wie Mineralgehalt und Druck ab. Nach /SKB 10b/ liegt der Gefrierpunkt im Buffer unterhalb von 0 °C und auch deutlich unterhalb von - 4 °C. Es wird davon ausgegangen, dass das Quellverhalten des Buffers auch bei Temperaturen oberhalb dieses

Gefrierpunktes beeinflusst wird. Labortests an verschiedenen Bentonitproben /SKB 10b/, /BIR 08/ zeigen, dass unterhalb von -4 °C für gesättigten Bentonit ein starkes Absinken des Quelldrucks von 1 MPa/ °C bzw. 1.2 MPa/ °C /BIR 10/ beobachtet wird. In Schweden wird davon ausgegangen, dass dieser Prozess möglicherweise relevant sein könnte. Deshalb wird die potenzielle Quelldruckentwicklung bei sehr niedrigen Temperaturen, die als ungünstig angesehen wird, im Zusammenhang mit der klimatischen Entwicklung betrachtet /SKB 10d/.

Sulfatreduzierende mikrobielle Aktivität

Die Reduktion von Sulfaten in Tonmineralen (im Bentonit-Buffer) durch eine mikrobielle Aktivität (Details s. Kap. 6.2.5) unter Bildung von Kupfersulfiden ist ein möglicher Prozess, der laut /PAR 12/ zu einer Korrosion von Kupferbehältern beitragen kann. Als Temperaturbegrenzung für Sulfat-reduzierende Bakterien wird 110 °C angenommen, allerdings könnte die vorübergehende Aufheizung des Buffers auch unterhalb dieser Temperatur eine spätere Entwicklung dieser Bakterien begünstigen.

Verstärkung der Korrosion an der Behälteroberfläche

Initial herrscht in der Nachverschlussphase noch nahezu Atmosphärendruck, so dass eine wässrige Lösung bei 100 °C verdampfen könnte (s. Kap. 6.4.4). Nach /WER 98/ könnte es deshalb an der Außenfläche der Behälter zur verstärkten Ausfällung von Salzmineralen kommen, welche wiederum die Korrosion an der Behälteraußenfläche verstärken könnte. Aus dieser grundsätzlichen Annahme lässt sich allerdings keine feste Temperaturbegrenzung an der Außenfläche der Behälter begründen, da eine Wasserdampfphase bei allen Temperaturen vorhanden ist und auch weitere Teilprozesse einer Korrosion temperaturabhängig sind.

6.3.3 Erkenntnisgewinn: Wirtsgestein Kristallingestein

Kristallingestein war während seiner Genese sehr hohen Temperatureinwirkungen über sehr lange Zeiträume ausgesetzt. So sind zum Beispiel die Gesteinseinheiten im Bereich der Kontinentalen Tiefbohrung durch eine sogenannte Mitteldruck-Metamorphose bei ca. $600 - 800\text{ MPa}$ und $650 - 700\text{ °C}$ geprägt /ROH 11/. Daher sind für das eigentliche Wirtsgestein im Bereich der diskutierten Auslegungstemperaturen in Endlagerkonzepten keine wesentlichen sicherheitsrelevanten THMCB-Prozesse zu erwarten, während jedoch die Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (wie z. B. in /KNU 83/,

/SKB 10b/ beschrieben) für die Endlagerauslegung und der Durchführung von Temperaturauslegungsrechnungen zu berücksichtigen sind. Mögliche Begründungen aus temperaturabhängigen Prozessen für Temperaturfestlegungen ergeben sich eher aus den **verwendeten Materialien im Endlager und der (geotechnischen) Barrieren** (z. B. Bentonit, Behälter), **Fluiden** (geochemisches Milieu) und **Kluftverfüllungen**, insofern letzteren eine sicherheitsrelevante Barrierefunktion im Endlagerkonzept zugewiesen wird.

In bekannten Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Kristallingestein wird Bentonit als Buffer eingesetzt und diesem eine wesentliche Barrierefunktion zugewiesen. Grundsätzlich gelten die für Tongestein genannten Temperaturabhängigkeiten und -begrenzungen auch für Endlagerkonzepte im Kristallingestein insofern diese Konzepte tonhaltige Buffer als Barrieren berücksichtigen. Ablaufende temperaturabhängige Prozesse tonhaltiger Barrieren sind bereits in Kap. 6.2 beschrieben (Mikrobielle Aktivität, Aufsättigungs- und Quellverhalten, Strömungsvorgänge, Diffusion) und werden daher hier nicht wiederholt. Da Konzepte im Wirtsgestein Kristallingestein (Schweden, Finnland) für die Langzeitsicherheit die tonhaltigen Buffer und Behälter als wesentliche geotechnische Barrieren berücksichtigen, wird die Festlegung von Temperaturen zur Auslegung eines Endlagers im Vergleich zu Wirtsgestein Tongestein (Schweiz) restriktiver gesehen.

Für **Kluftverfüllungen** sind zunächst die in Kap. 6.3.1 beschriebenen hydrothermalen Alterationsprozesse von Interesse. Falls die Eigenschaften der Kluftverfüllungen eine sicherheitsrelevante Barrierefunktion (z. B. Sorption) in einem Endlagerkonzept besitzen, könnte mittels Ausbreitungsrechnungen und Temperaturfeldberechnungen daraus eine Grundlage zur Festlegung von Temperaturen zur Auslegung eines Endlagers abgeleitet werden, um z. B. unerwünschte Mineralumwandlungen zu vermeiden.

6.4 Wirtsgesteinsübergreifende THMCB-Prozesse

Im Folgenden werden wesentliche THMCB-Prozesse beschrieben, die wirtsgesteinsübergreifend gelten. Weitere temperaturabhängige FEP, die für die weitere Auswertung weniger relevant sind, sind in Anhang B beschrieben.

6.4.1 Korrosionsprozesse

Korrosion ist aus technischer Sicht zunächst die Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines Bauteils oder Systems führen kann. Bei Metallen ist vor allem chemische Korrosion (sog. **Metallkorrosion**) von Bedeutung. Die wohl bekannteste Art von chemischer Korrosion bei Metallen ist das Rosten, also die Oxidation von Eisen.

Die Korrosion setzt sich aus einer Vielzahl an Einzelprozessen zusammen bzw. wird durch temperaturabhängige THMCB-Prozesse maßgeblich beeinflusst. Zu den korrosionsunterstützenden Prozessen gehören z. B. die thermochemische Sulfatreduktion (Kap. 6.4.3), die H₂-induzierte Pyritreduktion, Kerogenpyrolyse und Zersetzung von Karbonatmineralen (Kap. 6.2.2) sowie die mikrobielle Aktivität (Kap. 6.1.4 und Kap. 6.2.5). Der Ablauf und die Umsatzrate dieser Prozesse sind als chemische Reaktionen grundsätzlich temperaturabhängig.

Metallkorrosion

Umfang und Geschwindigkeit der Metallkorrosion und die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte sind im Wesentlichen von den Eigenschaften des Metalls (aktiv korrodierend z. B. unlegierter Stahl oder passivschichtbildend wie Edelstähle), der Temperatur und vom vorliegenden **geochemischen Milieu** (Details s. Kap. B.2) abhängig.

In der Technik werden unterschiedliche Arten der Korrosion anhand ihres Auftretens oder ihrer Ausprägung unterschieden:

- Kontaktkorrosion
- Lochfraßkorrosion
- Muldenkorrosion

- Flächenkorrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Spaltkorrosion
- Interkristalline Korrosion
- Unterwanderungskorrosion

Vom chemischen Standpunkt bezeichnet Korrosion die chemische oder eine elektrochemische Reaktion eines Metalls mit Stoffen aus seiner Umgebung. Im Falle der Stahlkorrosion werden die Korrosionsreaktionen vom pH und der Verfügbarkeit von Sauerstoff (aerobe Korrosion/Säure oder Wasserstoffkorrosion) kontrolliert. Unter Sauerstoffmangel führt die Korrosion von Stahl zur Bildung von Wasserstoff. Die bei der Metallkorrosion entstehende Gasphase besteht überwiegend aus $H_2(g)$, wodurch reduzierende Bedingungen stabilisiert werden. Die entstehenden Korrosionsprodukte hängen von der Zusammensetzung des Metalls, dem vorherrschenden geochemischen Milieu und der Temperatur ab. Die Korrosionsgeschwindigkeit hängt von der Art und der Vorbehandlung des Metalls, der Verfügbarkeit von Sauerstoff und der **Temperatur** ab. Im Falle von niedrig legierten Stählen ist die aerobe Korrosionsrate um Größenordnungen schneller als die anaerobe Korrosionsrate.

Der Ablauf der Metallkorrosion ist daher abhängig vom Endlagerkonzept (insbesondere der Behältermaterialien und -auslegung) sowie den geochemischen Bedingungen im Wirtsgestein.

Korrosion der Brennstoffmatrix

Die Korrosion der Brennstoffmatrix beschreibt die **chemische Umsetzung** der Matrices ausgedienter Brennelemente (z. B. UO_x , MOX, HTR-Brennelemente) durch Lösungen.

Die Kernbrennstoffe von UO_2 und MOX-Brennelementen sowie der BISO-, TRISO-, U_3Si_2 -/UAIX-Al-Brennstoffe von Prototyp- und Forschungsreaktoren korrodieren bei Anwesenheit von wässrigen Lösungen. Eine nennenswerte Korrosion der Brennstoffe und die damit verbundene Radionuklidmobilisierung können erst beginnen, wenn Lösungen an die Brennstoffe gelangen.

Bei Kontakt wässriger Lösung mit Kernbrennstoff finden in der Lösung radiolytische Prozesse statt, die zur Bildung oxidierender und reduzierender Radiolyseprodukte führen. Aus UO_2 - und MOX-Kernbrennstoff wird zunächst die sogenannte instant release fraction, IRF, freigesetzt, d. h. ein leicht löslicher Spaltproduktanteil (z. B. Spaltgase, Cs-137, Cs-135 und I-129) im Ringspalt und Plenum des Brennstabs, auf Bruchflächen und auf Korngrenzen. Im Unterschied zu den Radionuklidanteilen der IRF, sind die Aktiniden in der UO_2 -Matrix der Brennstoffkörner eingebunden. Das Ausmaß der Brennstoffkorrosion und Radiolyse werden erheblich durch die Dosisleistung der Brennelemente und das **geochemische Milieu** bestimmt. Mit zunehmendem Alter des bestrahlten Kernbrennstoffs und der damit abnehmenden Dosisleistung verringert sich signifikant die Korrosionsrate gegenüber frisch bestrahltem Kernbrennstoff. Unter reduzierenden Bedingungen (charakterisiert durch sehr niedrige O_2 -Konzentrationen und/oder hohe H_2 -Konzentrationen in Lösung) korrodiert Kernbrennstoff langsamer /KIE 13/.

Korrosion von Glas

Die Auflösung oder Umwandlung der strukturellen Glasmatrix der Borosilikatmatrix durch Wechselwirkungen mit Lösungen wird als „Korrosion von Glas“ bezeichnet und ist eine chemische Zersetzung.

Bei der Korrosion von Glas treten unterschiedliche Prozesse sowohl parallel als auch konsekutiv auf. Zunächst erfolgt die Benetzung der Oberflächen und Diffusionsprozesse von Wasser in die Matrix bzw. von leichtlöslichen Elementen (z. B. Li, Na) aus der Matrix in die Lösung (Ionenaustausch). In bestimmte Kanäle, die im CSD-V-Glas/HAW-Glas durch den hohen Gehalt an Netzwerk-Modifier Elementen (insbesondere Spaltprodukte) gebildet werden, können z. B. Mg-Ionen in die Glasmatrix eindringen. SiO_2 reichert sich an der Oberfläche des Glases an und bildet mit den Komponenten der anstehenden Lösung neue feste Phasen mit tonartigen Eigenschaften (Gelschicht). Innerhalb der Gelschicht können schwerlösliche Radionuklidphasen ausfallen sowie Sorptionsprozesse auftreten. Die Korrosion von Glas ist maßgeblich vom geochemischen Milieu, sowie der **Temperatur** abhängig. Ein Modell zur Beschreibung der Korrosion von Glas wurde entwickelt (z. B. /GRA 98/, /KIE 12/).

Die Reaktion zwischen Borosilikatgläsern mit wässrigen Lösungen wird im Allgemeinen als Kombination zweier scheinbar unabhängiger Prozesse angesehen: die anfängliche, als Ionenaustauschprozess beschreibbare, diffusionskontrollierte Freisetzung von Alka-

liionen aus der Glasmatrix und die Auflösung der Glasmatrix selbst. Wegen des hohen Gehalts an schwerlöslichen Metallionen wird korrodiertes HAW-Glas nicht wie die Alkalisilikatgläser vollständig aufgelöst, sondern der korrodierte Teil des Glases wandelt sich in sekundäre Mineralphasen um, die den Raum ausfüllen, an dem sich vorher die Glasphase befand. Durch Reaktionen des gelösten Silikats mit Lösungsbestandteilen bilden sich Korrosionsschichten auf der Glasoberfläche aus, welche tonartige Mineralphasen enthalten.

Über die Korrosion von Glas kann auch ein **Schmelzen** bei sehr hohen Temperaturen in Betracht gezogen werden. Glas als amorphes Material schmilzt nicht spontan bei einer bestimmten Temperatur, vielmehr ändert sich die Viskosität allmählich in einem weiteren Temperaturbereich. Dieser Temperaturbereich, in dem sich das mechanische Verhalten von Gläsern signifikant ändert, wird als Transformationsbereich, der Beginn dieses Bereiches als Transformationspunkt oder Glasübergangstemperatur bezeichnet (s. Abb. 6.17).

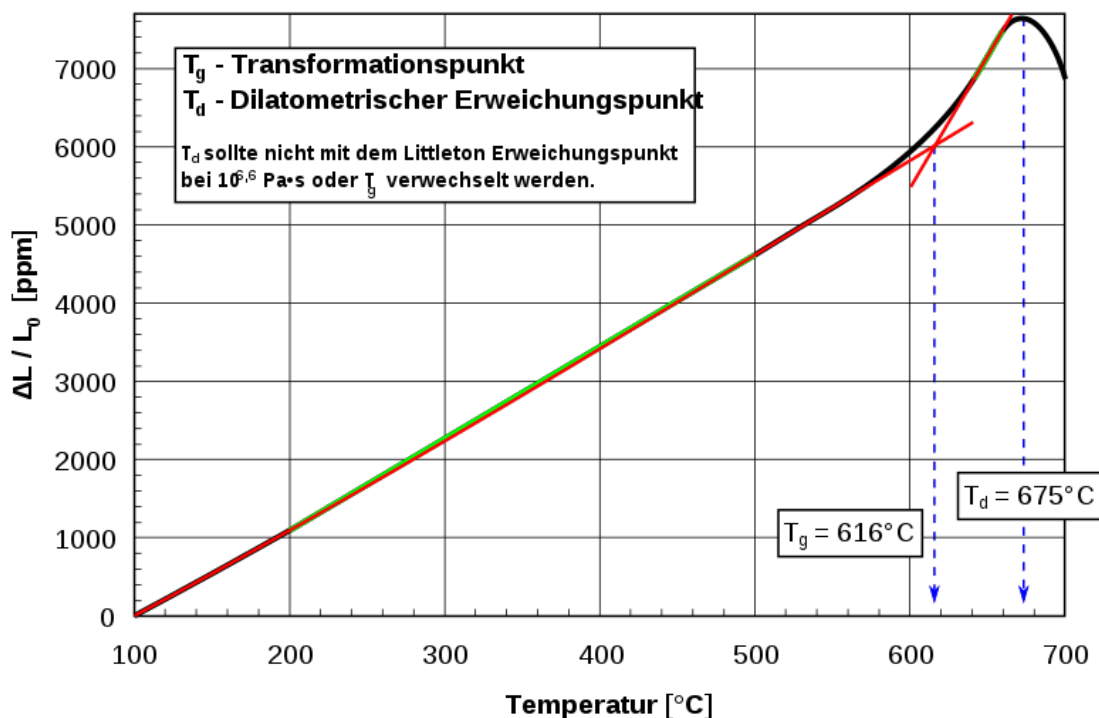


Abb. 6.17 Relative Längenausdehnung gegen die Temperatur

Beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur T_g geht festes Glas in einen zähflüssigen Zustand über. Diese Temperatur stellt die theoretische Maximaltemperatur für die Verwendung von Gläsern dar. In der Praxis liegt diese Temperatur immer 50 - 100 °C unterhalb von T_g . Bei den für die Verglasung von Wiederaufarbeitungsrückständen

verwendeten Borosilikatgläsern liegt T_g um 500 °C , d. h. in der Praxis sollte die Innentemperatur von endgelagerten HAW-Kokillen mit Borosilikatglasmatrices nicht über 450 °C liegen.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Die chemische Zersetzung von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen durch Lösungen wird als Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen bezeichnet.

Baustoffe, die auf Grundlage von (Portland-) Zement hergestellt wurden, werden im FEP-Katalog als Materialien mit Zementphasen bezeichnet. Materialien mit Sorelphasen werden auf Grundlage von $\text{Mg(OH)}_2\text{-MgCl}_2$ bzw. auf Grundlage von $\text{MgO-H}_2\text{O-MgCl}_2$ hergestellt.

Vorwiegend werden diese Materialien mit Zuschlägen als Beton verwendet. Betone mit Sorelphasen werden aufgrund der abdichtenden Eigenschaften bevorzugt in Dichtbauwerken im Salzbergbau eingesetzt; Beton aus Portland-Zement und Salzgrus wird in Strukturelementen im Grubenbau, z. B. für Fahrbahnbeläge, verwendet; für Abschirmbehälter und -deckel wird Beton und Schwerbeton aus Portland-Zement und silikatischen/Fe-oxid reichen Zuschlägen verwendet; zur Kontrolle der Herstellung von zementierten Abfallprodukten werden Portland-Zemente mit gewissen Zuschlagstoffen (z. B. Kiessand, Hämatit) je nach gewünschter Dichte eingesetzt.

Unter der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen werden eine Reihe von **chemischen Wechselwirkungen** mit anstehenden **Lösungen** und deren Komponenten zusammengefasst, die zur Veränderung der mechanischen und chemischen Eigenschaften der Materialien mit Zement- bzw. Sorelphasen führen. Für die **Korrosion** von Zementphasen sind folgende Reaktionen von wesentlicher Bedeutung:

- Karbonat- und Sulfat-Korrosion
- Ionenaustauschprozesse, insbesondere Calcium-Magnesium Austausch bei Korrosion von Portland-Zement-haltigen Materialien in Mg-reichen Salzlösungen

Die Reaktionen der Zement- oder Sorelphasen mit den Lösungen verändern die Zusammensetzung, infolgedessen auch das **geochemische Milieu** und insbesondere den pH-Wert in Abhängigkeit vom Umsatz (z. B. pH plume).

Materialien mit Zement- oder Sorelphasen weisen eine offene Porenstruktur auf. Die Porosität und die Größe der Poren hängen von der Herstellung des Zementes (besonders dem Mengenverhältnis von Anmachwasser zu Zement) ab. Unterschiede in der Korrosionsgeschwindigkeit hängen in der Regel von der Porosität ab. Qualitativ hochwertige zementhaltige Materialien und Beton weisen eine geringe Porosität auf. "Sorelzement"-haltige Materialien (3-1-8 Phase) sind in $MgCl_2$ -reichen Salzlösungen stabil. In gesättigten NaCl-Lösungen kommt es im geringen Umfang zur Reaktion des Sorel-Zements zu $Mg(OH)_2$, bis sich eine an $MgCl_2$ angereicherte Salzlösung gebildet hat (Oestreich 2009).

Der Korrosionsfortschritt von Materialien mit Zement- und Sorelphasen hängt auch von der Masse des Zements zur Masse der wechselwirkenden Lösung, deren Zusammensetzung und wie fast jede chemische Reaktion von der Temperatur ab.

Spaltkorrosion einer Titanlegierung

In Kanada wurden Behälter aus einer Titanlegierung auf ihre Eignung für eine Endlagerung betrachtet und als potentiell geeignet eingestuft. Nach /JOH 94/ hat dieses Material bei Temperaturen von mehr als 100 °C hohe Spaltkorrosionsraten. Spaltkorrosion tritt beispielsweise an Überlappungen oder nicht durchgängig gesetzten Schweißnähten auf. Die Korrosionsrate kann dort höher sein als auf großen Flächen, da es innerhalb und außerhalb der Spalte zu Konzentrationsunterschieden reaktiver Stoffe kommen kann, die eine Korrosion begünstigen. Bei der Verfolgung alternativer Behälterkonzepte wären solche Forschungsarbeiten weiterzuverfolgen.

6.4.2 Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Durch das Eindringen von Wasserstoff in das Gefüge bestimmter Materialien (Metalle) wird eine Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften verursacht. Das Phänomen spielt vor allem bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften von Metallen bzw. Legierungen eine Rolle. Stähle oder auch Zircaloy (Brennstabhülle) sind besonders von Wasserstoffversprödung betroffen. In chemischen Prozessen (z. B. Metallkorrosion) gebildeter atomarer Wasserstoff dringt in das Gefüge von metallischen Werkstoffen ein, wo er sich an Gitterstörstellen wieder zu molekularem Wasserstoff verbindet und dort verbleibt. Dabei kann der Wasserstoff schon während des Herstellungsprozesses aufgenommen werden oder aber auch später von außen in die Metallstruktur eindringen.

Durch die Einlagerung des Wasserstoffs in das Metallgitter wird dieses geweitet. Das führt zu inneren Spannungen und zu einer Versprödung des Metalls. Auch wenn der Wasserstoff wieder aus dem Metall ausgetreten ist, ist der Fehler im Gitter vorhanden und sorgt so für eine dauerhafte Schwächung der Struktur.

Bei höheren Temperaturen kann eine Metallversprödung grundsätzlich wieder ausheilen.

6.4.3 Thermochemische Sulfatreduktion

Durch die sog. **thermochemische Sulfatreduktion** (TSR) kann H_2S produziert werden, das korrosiv ist und die Stabilität der Tonmineralstruktur durch die Reduktion von Fe(III) zu Fe(II) destabilisieren. Damit kann die TSR einerseits zum Verlust der Integrität der Behälter und andererseits zur Verringerung der Quellfähigkeit, Sorptionsfähigkeit und Plastizität der Bentonit-Barriere führen. Dafür muss die TSR nicht unbedingt in unmittelbarer Nähe zum Behälter oder in Bentonit-Barriere selbst, sondern auch in einer gewissen Entfernung, die durch die Diffusion von H_2S /PED 10/ überwunden werden kann, stattfinden.

Die TSR setzt voraus, dass Sulfat in gelöster Form vorliegt /MAC 01/. Die niedrigste abgesicherte Temperatur für das Einsetzen der TSR wird in /MAC 01/ mit 127 °C angegeben. Unter bestimmten Bedingungen sind für das Einsetzen von der TSR Temperaturen von 160 bis 180 °C notwendig /MAC 01/. TSR setzt je nach geochemischen Bedingungen bei $100 - 180\text{ °C}$ ein und korreliert so mit der Temperatur.

Die TSR kann exotherm oder endotherm ablaufen. Eine Temperaturerhöhung um bis zu 20 °C am Reaktionsort ist je nach Reaktionsrate möglich /MAC 01/. Das Volumen der gasförmigen Produkte (H_2S , falls nicht gelöst, und ggf. CO_2) der TSR übersteigt deutlich das Volumen des während der Reaktion zersetzten $CaSO_4$ und $CaCO_3$, so dass der Fluiddruck am Reaktionsort deutlich ansteigen kann /MAC 01/.

Der Zusammenhang zwischen geochemischen Bedingungen (Lösungszusammensetzung und Gesteinsmineralogie), der Temperatur des Einsetzens und die Umsatzrate der TSR ist am jeweiligen Standort zu klären, um den TSR-Einflusses auf die Endlagerentwicklung auch innerhalb der für die Bergung (zur Gewährleistung der Handbarkeit) vorgesehenen Zeit abzuschätzen /BRA 12/.

6.4.4 Verdampfen von Wasser

Ab einer druckspezifischen Temperatur (Siedepunkt) beginnt das **Verdampfen von Wasser** bzw. der anstehenden Lösungen im Endlager. Diesen Prozess gilt es zu vermeiden, da Wasserdampf volatil ist, die Barriereeigenschaften der geotechnischen Barrieren einschränkt und als Transportmedium für Radionuklide dienen kann. Der Siedepunkt beträgt unter Normalbedingungen (1 bar) 100 °C und ist vom Salzgehalt abhängig. Für eine konzentrierte Salzlauge beträgt der Siedepunkt 110 °C /JOC 81a/.

Relevant ist der sog. **Wasserdampfpartialdruck**, der mit den vorliegenden Druckverhältnissen unter Endlagerbedingungen in der Nachbetriebsphase korreliert. Der Siedepunkt bzw. Phasenübergang zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase ist sehr stark druckabhängig (s. Abb. 6.18). Bereits eine Druckerhöhung von wenigen MPa führt zu einem Siedepunkt von deutlich mehr als 200 °C.

Durch die überlagernden Gesteinsschichten oberhalb eines Endlagers in einer Tiefe von 300 m („*Mindestteufe der Oberfläche eines ewG*“ /STA 17/) mit einer exemplarischen mittleren Gebirgsdichte von 2.500 kg/m³ beträgt der Druck im verschlossenen Endlager **beispielsweise** ca. 7,4 MPa (s. Abb. 6.18). Unter solchen Druckbedingungen beträgt der Siedepunkt ca. 290 °C. Bei einem Endlager in größerer Teufe wie beispielsweise 500 m (Mindestteufe in der Wertungsgruppe „günstig“ des Abwägungskriteriums „*Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper*“ /STA 17/) beträgt der Druck bereits ca. 12,3 MPa und der Siedepunkt somit über 320 °C (Abb. 6.18).

Selbst unter der Annahme einer minimalen hypothetisch gedachten durchgängigen Wassersäule zwischen Endlager und Geländeoberfläche von 300 m (mit einer Dichte von 1.000 kg/m³) beträgt der Druck ca. 2,9 MPa und der Siedepunkt somit über 230 °C. Selbst diese Temperatur liegt oberhalb der in den Endlagerkonzepten (s. Kap. 4.9) diskutierten Temperaturbegrenzungen.

Bei 374 °C wird die kritische Temperatur von Wasser erreicht /LID 04/, d. h. eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Phasen ist nicht mehr möglich. Diese Temperatur liegt allerdings deutlich oberhalb der in den Endlagerkonzepten (s. Kap. 4.9) diskutierten Temperaturen.

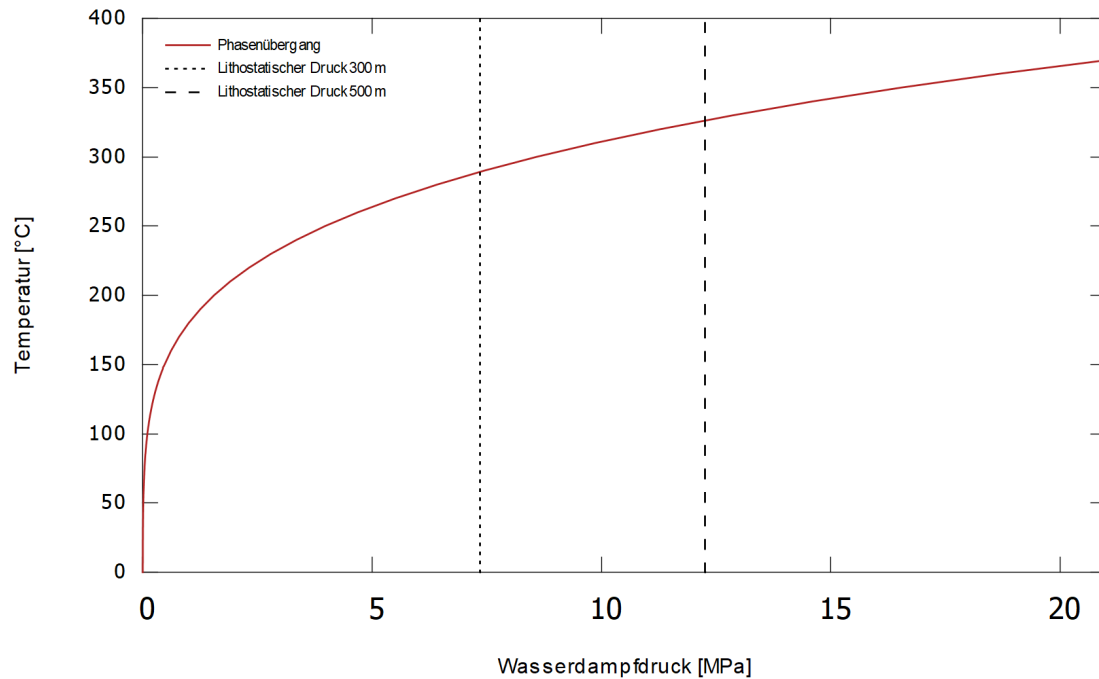


Abb. 6.18 Temperatur- und druckabhängiger Siedepunkt (Phasenübergang) für Wasser /LID 04/.

6.4.5 Erkenntnisgewinn: Wirtsgesteinsübergreifende Prozesse

Die wirtsgesteinsübergreifenden Prozesse sind in allen Endlagerkonzepten zu berücksichtigen und können für die Festlegungen von Temperaturen zur Endlagerauslegung wichtig sein. Dies sind insbesondere Korrosionsprozesse bei der Anwesenheit von Feuchtigkeit, Versprödung, Thermochemische Sulfatreduktion und Verdampfung von Lösungen. Da diese Prozesse komplex zusammenwirken sind entsprechende Analysen und eine Bewertung im Hinblick auf einen Nachweis einer langzeitigen Sicherheit eines Endlagers und dessen Optimierung wichtig.

7 Rückholbarkeit, Bergung/Handhabbarkeit

Die in den Kapiteln 4, 5 und 6 recherchierten Regelwerke, Informationen zu den nationalen Endlagerkonzepten und temperaturabhängigen Prozessen werden im Kap. 7 hinsichtlich der Temperaturen im Wirtsgestein, im Buffer und an der Außenfläche der Behälter auf eine Rückholbarkeit und Bergung von eingelagerten Abfällen berücksichtigt. Zunächst erfolgt eine Darstellung relevanter Wechselwirkungen und nachfolgend eine Betrachtung der Vor- und Nachteile, die sich daraus für die Rückholbarkeit und Bergung ergeben. Die sich daraus ergebenden möglichen Anforderungen an die Temperatur für das Behälter- und Endlagerkonzept werden aufgezeigt. Soweit möglich werden wirtsgesteinsspezifische Unterschiede dargestellt.

Wie im Kap. 3.3 dargelegt, führt die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen im Endlager gegenüber der ursprünglichen Gebirgstemperatur zu Temperaturerhöhungen. Die Überlagerung der Wärmeabgabe mehrerer Behälter muss für die Temperaturen im Einlagerungsfeld und auch an der Außenfläche jedes einzelnen Behälters berücksichtigt werden. Zu Beginn einer möglichen Rückholung sind die zu diesem Zeitpunkt herrschenden thermischen Bedingungen zu ermitteln und schon in die Planung des Endlagers einzubeziehen. Die Entwicklung der Temperaturen im Endlager kann im Vorfeld mittels Modellrechnungen abgeschätzt oder berechnet werden, so dass Prognosen zu den wahrscheinlich vorherrschenden Temperaturen zum Zeitpunkt der Rückholung gegeben werden können.

Die technischen Herausforderungen einer Rückholung bestehen insbesondere in der Beherrschung der Temperaturen, die sich im Endlager aufgrund der Wärmeabgabe der Abfälle entwickeln, da die Bewetterung in Teilen des Endlagers mit fortschreitendem Versatz und Verschluss von Einlagerungskammern und -strecken entfällt. Eine **Rückholbarkeit** erfordert insbesondere Anpassungen von Behälter-, Einlagerungs- und Bewetterungskonzepten bei gleichzeitigem Erhalt des Sicherheitsniveaus des Endlagers, wie es ohne Rückholoption gegeben wäre.

Für die Umsetzung der Rückholung von Abfallgebinden aus einem Endlager ist es wesentlich, dass die Abfälle in den Behältern aus Gründen der Handhabbarkeit und der Arbeitssicherheit (u. a. Strahlenschutz) sicher eingeschlossen sind (Integrität). Weiterhin muss der Zugang zu den Abfallgebinden gewährleistet sein, bzw. einfach hergestellt werden können (siehe beispielsweise Schweiz: Antwort zur Frage d in /ENSI 16/ und

Richtlinie /ENSI 09a/). Eine entsprechende Rückholtechnik muss an die zu diesem Zeitpunkt herrschenden Bedingungen (Behältertemperatur, Wirtsgesteinstemperatur, Grubenklima) angepasst und verfügbar sein /GRU 00/, /BOL 04/.

Anforderungen an erleichterte Rückholung endgelagerter Abfallgebinde und den zu diesem Zeitpunkt herrschenden Temperaturen bestimmen somit von Beginn an die thermische Konzeption eines Endlagers. Dies umfasst die Planung des Ausbaus von Strecken und Einlagerungsfeldern (Streckenabstände und -ausbau, Größe des Endlagers, Anzahl der Einlagerungsstrecken/Bohrlöcher etc.) und auch die Konzeption der Endlagerbehälter (Lebensdauer/Korrosion, Handhabbarkeit, Beladung etc.).

Im Folgenden werden Informationen zusammengestellt, die die Beherrschung der Temperaturen im Endlager hinsichtlich einer technischen Umsetzbarkeit einer Rückholung ermöglichen und welche Rückwirkungen höhere bzw. niedrigere Temperaturen auf die Planung eines Endlagers (z. B. Flächenbedarf) und damit auf die Standortsuche haben.

7.1 Bewetterung

Die Temperaturen in einem Bergwerk beeinflussen den Aufwand der für Bewetterungs- und ggf. Kühlkonzepte notwendig ist, um zulässige **Arbeitsbedingungen für Bergarbeiter und Maschinen** herzustellen. In Deutschland sind die klimatischen Anforderungen im Regelwerk des Bergbaus /BMJV 83/ zu erfüllen (s. Tab. 7.1). Auch die Schweiz begrenzt die Temperaturen bei Arbeiten im Untertagebau aus Gründen des Gesundheitsschutzes im feucht-warmen Klima (klimatische Verhältnisse am Arbeitsplatz) /SUV 03/. Je nach Tätigkeit und Feuchtigkeit soll die Trockentemperatur ≤ 28 °C betragen /ENSI 13b/.

Im konventionellen Bergbau gibt es Erfahrungen mit aufwändigen Bewetterungs- und Kühlsystemen in großen Tiefen. Südwestlich von Johannesburg beispielsweise wird die „MponengGold Mine“ in 4000 m Tiefe bei Gebirgstemperaturen von ca. 60 °C und Umgebungstemperaturen von 55 °C betrieben. Dort wird die Wassertemperatur mittels aufwändiger Kühlmaßnahmen auf knapp unter 30 °C abgesenkt /MIN 13/.

Tab. 7.1 Thermische Anforderung (Grubenklimabedingungen für Bergleute untertage) nach Klimaberg-Verordnung /BMJV 83/

Wirtsgestein/ Komponente	Lufttemperatur Ein-/Auslagerungsstrecke
Salzstein	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Trockentemperatur von 52 °C oder • Max. Feuchttemperatur von 27 °C
Tongestein	<ul style="list-style-type: none"> • Max. 30 °C Effektivtemperatur • Sonderfälle 32 °C
Kristallingestein	<ul style="list-style-type: none"> • Max. 30 °C Effektivtemperatur • Sonderfälle 32 °C

In Deutschland sind die allgemeinen Vorgaben der Klimabergverordnung einzuhalten. Es wird zwischen Salzbergbau und Bergbau in anderen Gesteinen unterschieden.

Aus Gesundheits- und Sicherheitsgründen sind die Umgebungstemperaturen für das Personal und die Ausrüstungen begrenzt. Bezogen auf die Zeiträume, in denen sich höhere Temperaturen in den Einlagerungsfeldern einstellen und in denen **Rückholung der Abfallgebände** im Rahmen der **Rückholbarkeit** einzuplanen ist, ist zur Herstellung zulässiger „Arbeitstemperaturen“ eine funktionsfähige und ausreichende Wettertechnik während des Rückholbetriebs vorzusehen. Unter Umständen wird zusätzlich zur Bewetterung die Nutzung einer gezielten technischen **Kühlung** notwendig. Weiterhin ist die Einplanung von **Kühlpausen/Kühlphasen** für Behälter und Maschinen (Vortriebsmaschinen zur Wiederauffahrung verfüllter Grubenbereiche bzw. Bergungsmaschinen) möglich. Dies hat Auswirkungen auf die einzuplanenden Zeiträume für die Wiederauffahrung verschlossener Grubenabschnitte und Rückholung der Abfallgebände und damit die Rückholung/Bergung insgesamt.

Ein möglichst großer Wetterstrom stellt eine technisch einfach umzusetzende und gleichzeitig relativ ökonomische Maßnahme zur Kühlung des Grubengebäudes dar. Deutlich aufwendiger ist eine Installation von Wetterkühlern. Darüber hinaus ist die Tatsache zu berücksichtigen, dass sich Frischwetter auf dem Weg von der Tagesoberfläche durch den einziehenden Wetterschacht und die Grubenstrecken bis zum Rückholungsbereich erwärmen. Die Herstellung der erforderlichen klimatischen Verhältnisse in den Strecken kann durch den Einsatz von zentralen übertägigen Kälteanlagen, die über ein Kältemittel zusätzliche Kühlleistung in das Grubengebäude bringen, oder dezentrale Kühlsysteme (z. B. klimatisierten Fahrerkabinen) erreicht werden /BOL 14/.

Nach /ENG 95/ sollen sonderbewetterte Rückholungsstrecken, die in Bereichen mit Gebirgstemperaturen bis max. 100 °C aufgefahren werden, vor Ort Wettertemperaturen von max. 70 °C erreichen, um die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen zu Arbeitsbedingungen unter Tage gewährleisten zu können. Bis zu dieser Temperatur kann noch zulässig mit Maschinen mit Klimaschutzkabinen oder mit ferngesteuerten Maschinen gearbeitet werden /ENG 95/, /BRÄ 16/. Da sowohl die sich einstellende Gebirgstemperatur als auch die Anforderungen an die klimatischen Arbeitsbedingungen wirtsge- steins- bzw. konzeptspezifisch sind, werden diese nachfolgend dargestellt.

Für **Steinsalz** wird als „günstiges“ Grubenklima für die Freilegung der Behälter im Falle der Rückholung in /BOL 14/ eine Temperatur < 52 °C im Rahmen der Untersuchungen zu möglichen Rückholkonzepten nach VSG (Endlagerkonzept s. Kap. 5.1) angesehen. Ab einer Trockentemperatur von 52 °C bzw. einer Feuchttemperatur von 27 °C erfolgt ein Beschäftigungsverbot /BOL 14/, /BMJV 83/ in den Strecken untertage außerhalb möglicher Schutzeinrichtungen (z. B. Klimaschutzkabinen).

Nach dem **VSG Konzept “Streckenlagerung“** im Steinsalz wird erwartet, dass die höchsten Temperaturen in den Einlagerungsstrecken (knapp unter 200 °C) in den ersten Jahrzehnten nach Einlagerung (**Rückholungszeitraum**) auftreten und dann in den weiteren 500 Jahren (**Bergungszeitraum**) auf 100 - 150 °C absinken (s. Kap. 5.1). Für dieses Konzept wurde, unter den Randbedingungen eines Streckenquerschnitts von 24 m², Gebirgstemperaturen von 150 °C und 200 °C und einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s bei „niedrigen“ Eintrittstemperaturen der Wetter, eine mögliche Dauer einer Rückholung (ca. 40 Jahre) berechnet. /BOL 14/ weist darauf hin, dass für dieses Konzept das zu erwartende Grubenklima bei reiner Bewetterung nur knapp unterhalb der gesetzlichen Vorgaben liegen würde. Thermische Limitierungen ergeben sich aus der Begrenzung der Gesamtwettermenge bei den oben aufgeführten Randbedingungen¹¹. Insbesondere für den Vortrieb der Strecken durch die begrenzten Volumenströme der Sonderbewetterung und den zusätzlichen Wärmeeintrag der Maschinen können Bedingungen entstehen, die ohne weitere, zusätzliche Kühlmaßnahmen nicht beherrscht werden können. Nach dem Stand der Technik sind im Steinsalz Wettertemperaturen bis 70 °C beherrschbar, wobei die Gebirgstemperatur 100 °C nicht überschreiten sollte, um keine unzulässigen Spannungen durch zu hohe Temperaturgradienten zwischen den

¹¹ Aktuellere Angaben werden aus dem Forschungsvorhaben ERNESTA erwartet /DBE 16b/.

Wänden der Grubenbaue und den Wettern hervorzurufen. Die technische Möglichkeit einer ausreichenden Bewetterung und Kühlung ist noch nachzuweisen /BOL 04/.

Hinsichtlich einer Bewetterung zur Durchführung einer Rückholung wird das **VSG Konzept „Bohrlochlagerung“** in /BOL 14/ als günstiger bewertet, da in dem relevanten Zeitraum nach Einlagerung der Abfälle für eine Rückholung günstigere thermische Bedingungen in den Zugangsstrecken herrschen als bei den Einlagerungstrecken im Streckenlagerungskonzept für POLLUX®-Behälter. Auch wird begründet, dass die heißen Endlagerkokillen während des gesamten Rückholungsvorgangs zunächst im Bohrloch und während der Umlagerung und des Transports in einem Transferbehälter von der Umgebung und dem Personal abgeschirmt wären (Anmerkung der Autoren: auch zunächst hinsichtlich der Wärmestrahlung und -abgabe). Die Einhaltung der gesetzlichen Klimavorgaben bei einer herrschenden Gebirgstemperatur zwischen 40 und 70 °C wird als technisch möglich und durch Beispiele aus dem konventionellen Bergbau belegbar angesehen. Auch hier seien entsprechende Nachweise noch zu erbringen /BOL 14/.

Ton- und Kristallingesteine unterliegen aufgrund der vorhandenen Gebirgsfeuchtigkeit denselben Anforderungen der KlimaBergVerordnung /BMJV 83/. Endlagerkonzepte in beiden Wirtsgesteinen basieren auf der Verwendung von tonhaltigem Buffermaterial. Aufgrund dieser Aspekte werden beide Wirtsgesteine gemeinsam betrachtet. Für Endlagerkonzepte in Ton- und Kristallingestein stellt sich die thermische Bewetterungssituation für eine Rückholung zunächst günstiger dar als für Salzstandorte, da die maximalen Temperaturen an der **Kontaktgrenze Behälter/Bentonitbuffer** meist auf 100 °C begrenzt wurden, ist der Temperaturgradient deutlich geringer /ZIE 05/.

/BOL 14/ weist darauf hin, dass aufgrund des Wassergehalts im **Tongestein** (Anmerkung der Autoren: und damit ebenso im Kristallingestein) für das Bewetterungssystem andere Bedingungen und Anforderungen gelten, da außerhalb des Salzbergbaus die Effektivtemperaturen (resultierend aus Wettergeschwindigkeit, Feucht- und Trockentemperatur) und nicht die maximalen Trockentemperaturen maßgeblich sind. Hier gilt ab einer Effektivtemperatur von 30 °C ein Beschäftigungsverbot /BMJV 83/, da ein feuchtwarmes Klima als weniger erträglich empfunden wird als ein trockenwarmes Klima. In einem feuchtwarmen Klima kann vom menschlichen Körper weniger Wärme mittels Verdunstung an die Umgebungsluft abgegeben werden.

Die grubenklimatischen Bedingungen für Beschäftigte unter Tage sind gesetzlich geregelt. Da dies in den meisten Fällen durch eine entsprechende Bewetterung und/oder Kühlung der Strecken als technisch machbar gesehen wird, ist eine Vorfestlegung auf eine „*Grenztemperatur*“ diesbezüglich aus Sicht der Rückholbarkeit/Bergung zur Zeit nicht zielführend /RÖH 17/.

7.2 Behälter

Die Endlagerlagerbehälter müssen die Anforderungen für die Rückholbarkeit erfüllen. In der Auslegung bzgl. Rückholbarkeit (Anmerkung Autoren: dies gilt auch für die Handhabbarkeit während der Bergung) erfordert dies eine Gewährleistung der erforderlichen Integrität (Behälterintegrität) bis zum Zeitpunkt der Rückholung sowie eine genügende Festigkeit zur Aufnahme der Kräfte bei der Rückholung /ENSI 16/.

Die Anforderungen an die Integrität und Handhabbarkeit des Behälters, werden bereits durch die Erfüllung der Anforderungen, die sich insbesondere aus der Sicherheitsanalyse für die Langzeitsicherheit ergeben, erfüllt. International werden in Endlagerkonzepten, insbesondere die den geotechnischen Barrieren eine hohe Sicherheitsfunktion zuweisen (z. B. skandinavische Endlagerkonzepte im Kristallingestein), Behälterintegritäten über erheblich längere Zeiträume als für **die Rückholbarkeit und Bergung** einzuplanen sind, gefordert. Die Schweizer Behörde ENSI verlangt eine Einschlusszeit von mindestens 1000 Jahren für die verbrauchten Brennelemente bzw. die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in den Lagerbehältern bei der Endlagerung im Tongestein /ENSI 09a/.

Die **Temperatur** an der **Außenfläche des Behälters** ist abhängig von der Beladung der Behälter, der Wärmeleistung der Abfälle (nach Abbrand und Zwischenlagerung), dem herrschenden Temperaturgradienten zur geologischen Umgebung und von den thermischen Materialeigenschaften der geotechnischen Barrieren sowie des Wirtsgesteins. Höhere Beladungen führen zu höheren Temperaturen an der Außenfläche eines Behälters und damit letztendlich zu höheren Temperaturen im Einlagerungsfeld in Abhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit des Behältermaterials sowie dem die Behälter umgebenden Versatz oder Buffer und das Wirtsgestein. Die Wechselwirkungen, die sich aus der Beladung der Behälter aufgrund der Wärmeabgabe der Abfälle ergeben, sind Teil der technischen Auslegung eines Endlagerkonzeptes und werden zu dessen Optimierung eingesetzt (s. auch Kap. 3.3, 6.4 und 7.1).

Nach /BOL 04/ wird nicht erwartet, dass es temperaturbedingt bzgl. der Behälterintegrität Einschränkungen einer Rückholbarkeit oder Bergung gibt. Die Behälterkonzepte sind dennoch für die jeweiligen konkreten Endlagerkonzepte zu prüfen. Angaben zu Behälterauslegungen und Zeiträumen, in denen die Handhabbarkeit und der sichere Einschluss der Abfälle gegeben sind, finden sich im Kap. 5 bei den Endlagerkonzepten der dargestellten Länder.

Die grundlegende Anforderung der **Bergung**, dass die im Endlager eingelagerten Behälter bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers handhabbar sein müssen /BMU 10/ (zum Begriff Bergung s. Kap. 3.1.4 in diesem Bericht), bedeutet, dass entsprechende Auslegungen für die **Handhabbarkeit** und **Integrität der Behälter** für diesen Zeitraum vorzusehen sind. In /BOL 14/ wird hinsichtlich der Integrität der Behälter die Teilanforderung der Vermeidung von Aerosol- Freisetzungen (/BMU 10/) dahingehend diskutiert, dass es sich hier nicht um eine Forderung einer Gas- und Aerosoldichtheit der Behälter über den gesamten Bergungszeitraum handeln kann, sondern, dass diese Anforderung darauf zielt, dass weitere Freisetzungen durch den Bergungsvorgang zu unterbinden sind. Hierzu sind geeignete technische und planerische Maßnahmen bei der Auslegung des Endlagerbehälters vorzusehen. /BOL 14/ sieht noch Prüfbedarf, inwieweit eine „hinreichende Unversehrtheit“ der Endlagerbehälter hinsichtlich einer Gas- und Aerosoldichtheit gewährleistet werden kann.

Die Behälterintegrität wird durch die **Korrosion** der Behältermaterialien beeinflusst. Die maßgeblichen **Prozesse** sind im Kap. 6.4.1 genannt. Der Korrosionsfortschritt ist nicht nur temperaturabhängig, sondern kann auch durch mikrobielle Aktivitäten und weitere Prozesse, wie z. B. der thermochemischen Sulfatreduktion oder Metallversprödung durch Wasserstoff beeinflusst werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass in einem Endlagerkonzept diesen Bedingungen durch Auslegung der Behälter Rechnung getragen wird und eine „hinreichende Unversehrtheit“ der Endlagerbehälter für Rückholbarkeit und Bergung für alle Temperaturen gewährleistet werden kann.

Weitere thermische Randbedingungen zum Behälter ergeben sich aus der Anforderung, dass die Außenflächentemperatur eines Behälters bei der Handhabung aus Gründen des Arbeitsschutzes und der Betriebssicherheit den Wert von 85 °C nicht überschreiten darf (**Handhabungstemperatur heißer Oberflächen**) /BOL 14/. Entsprechende Temperaturen müssen bei einer Rückholung z. B. durch Kühlzeiten der Behälter nach deren Freilegung hergestellt werden.

7.3 Rückholtechnik

Untersuchungen nationaler Endlagerkonzepte zeigen, dass sich der technische Aufwand, der für eine Rückholung der Abfallgebinde vorzusehen ist, mit Fortschreiten des Einlagerungsprozesses erhöht. Individuelle Konzepte erlauben bis zu bestimmten Etappen des Endlagerprozesses eine Rückholung unter Umkehrung der Einlagerungstechnik. Mit weiterem Fortschreiten des Einlagerungsprozesses könnte der Einsatz spezieller Technik notwendig werden /BOL 04/. Somit ermöglicht der **Stand der Technik** bereits heute eine Rückholung von Abfallgebänden aus einem Endlager zu jedem Zeitpunkt sowohl während des Betriebes eines Endlagers als auch als Bergung nach dessen Verschluss. Voraussetzungen zur Anwendung einer Rückholtechnik sind die erforderliche Integrität der Endlagerbehälter (s. Kap. 7.2) und die Herstellung entsprechender Arbeitsbedingungen für die Maschinen (u. a. geeignete Temperaturbedingungen, s. a. Kap. 7.1).

Nachfolgend werden einige in der Literatur verfügbaren Aussagen zur Rückholtechnik in nationalen Endlagerprogrammen zusammengefasst.

Frankreich sieht für die Rückholung der Abfallgebinde die Verwendung der Einlagerungstechnik vor. Falls es zu Verformungen der Einlagerungsrohre gekommen sein sollte, seien zusätzliche Rückholtechniken zu entwickeln. Ein Nachweis, dass die Rückholungskonzepte dem Stand der Technik entsprechen ist nicht vorgeschrieben /BOL 04/.

In **Deutschland** ist im Genehmigungsverfahren auch die technische Machbarkeit nachzuweisen.

In **Finnland** kann mit der vorhandenen Einlagerungstechnik eine Rückholung erfolgen, solange die Bentonitverfüllung in den Bohrlöchern nicht gequollen ist. Für Zeiträume einer potentiellen Rückholung zwischen 10 bis 500 Jahre nach Einlagerung und Verschluss des Endlagers werden Temperaturen im Wirtsgestein prognostiziert, die eine gesonderte nicht näher spezifizierte Technik erfordern. Grund hierfür ist die Beherrschung der dann bestehenden Temperaturen im Wirtsgestein und Versatz. Insbesondere betrifft dies die Maschinen für den Rückbau des Versatzes und die effektive Bewetterung /BOL 04/.

In **Schweden** wurde eine generelle technische Machbarkeit der Rückholung eines KBS-3 Behälters aus einem vertikalen Bohrloch mit vollständiger Wassersättigung des

umgebenden Bentonit-Buffers in einem in-situ Versuch im Äspö Felslabor demonstriert /SKB 15/, /IAEA 09/. Aufgrund der im KBS-3-Konzept sicherheitskonzeptionell bedingten hohen Anforderungen an die Behälterstandzeit (Behälterintegrität) und der Tatsache, dass die Endlagerung in standfestem Kristallingestein vorgesehen ist, wird davon ausgegangen, dass eine Möglichkeit der Bergung über mehrere Jahrhunderte konzeptbedingt gegeben ist /FAß 17a/. Nach /BOL 04/ erklärte die SKB, dass erst für den Fall, dass eine Rückholung als notwendig erachtet wird, die dafür erforderlichen Technologien und Methoden verfügbar sein müssen.

Auch in der **Schweiz** ist der Nachweis, dass die Rückholungskonzepte (und damit eine Rückholtechnik) dem Stand der Technik entsprechen, nicht vorgeschrieben. Eine evtl. geforderte Rückholung muss nur prinzipiell geprüft werden /BOL 14/, der Nachweis einer technischen Machbarkeit ist nicht gefordert.

In den **USA** wird von DOE gefordert, dass die Machbarkeit der Rückholbarkeit für einen angemessenen Zeitraum zu belegen ist. Als Genehmigungsanforderung ist durch eine Bewertung der technischen Machbarkeit zu zeigen, dass ein abgedichtetes Endlager-system mit der zum Zeitpunkt des Genehmigungsantrags verfügbaren Technik erneut aufgeföhren werden kann /BOL 04/.

7.4 Flächenbedarf

Der Gesamtflächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Für seine Berechnung sind wirtsgesteinsabhängig neben den thermisch bedingten und berechneten Behälter-, Strecken und Bohrlochabständen auch bergbaulich, transport-, einlagerungs- und rückholtechnisch notwendige Mindestabstände zu berücksichtigen. Weiterhin sind die für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss des Endlagers notwendigen Flächen für Infrastrukturräume zu ermitteln und erforderliche Sicherheitsabstände zu thermisch empfindlichen geologischen Einheiten oder zu klüftigen und potenziell lösungsföhrenden Gesteinen und Nebengesteinen miteinzubeziehen.

Der Endlagerflächenbedarf wurde für drei verschiedene Wirtsgesteine in vier vorgegebenen Varianten für konkrete Randbedingungen ermittelt. Dies erfolge auf Basis des Abfallinventars des Nationalen Entsorgungsprogramms /BMUB 15/ und für verschiedene Temperaturen an der Außenfläche der Behälter (für Steinsalz 200 °C und 100 °C,

für Tongestein 100 °C und für Kristallingestein 100 °C) /DBE 16a/. Die Arbeiten beinhalten das Erstellen von Berechnungsmodellen, die Durchführung von Temperaturrechnungen, die Planung des Grubengebäudes und die Berechnung der Flächen für vier Endlagerkonzeptvarianten mit Einlagerungs- und Infrastrukturbereichen. Der geringste Flächenbedarf ergab sich für Endlager im Steinsalz (steile Lagerung) bei einer Auslegungstemperatur von 200 °C. Der Vergleich der Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein (hier Granit), für eine einheitliche Auslegungstemperatur von jeweils 100 °C ergab für ein Endlager im Steinsalz den geringsten Flächenbedarf. Der unterschiedliche Flächenbedarf beruht insbesondere auf der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Wirtsgesteins sowie dem gewählten Versatzmaterial. Je nach Wirtsgestein unterscheiden sich zudem die notwendigen Pfeilerbreiten, die für die Grubenstabilität benötigt werden /DBE 16a/.

Tab. 7.2 zeigt den von der DBETec (seit 2018 BGETec) für das Standortauswahlverfahren als Planungsgröße auf Basis des in Deutschland erwarteten Gesamtinventars an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen ermittelten Flächenbedarf.

Tab. 7.2 Endlagerflächenbedarf nach /DBE 16a/

Endlagervariante	Salz 200°C	Salz 100°C	Tonstein 100°C	Granit 100°C
Flächenermittlung				
Erforderliche Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken	2,0 x Breite der Strecke	2,0 x Breite der Strecke	5,0 x Breite der Strecke	2,5 x Höhe der Strecke
Erforderliche Endlagerfläche für Gebinde (m ²)	800.800	1.632.600	4.871.000	2.212.700
Erforderlicher Sicherheitsabstand (m)	50	50	40	100
Erforderliche Endlagerfläche aus Sicherheitsabstand (m ²)	228.000	401.200	1.082.000	1.026.000
Erforderliche Fläche für Infrastrukturbereich (m ²)	250.000	250.000	630.000	320.000
Gesamtendlagerfläche (m²)	1.278.800	2.283.800	6.583.000	3.558.700

Die Flächenangaben nach /DBE 16a/ berücksichtigten die **Rückholbarkeit** nicht explizit. Die Angaben beruhen auf Endlagerkonzepten und ihren Auslegungstemperaturen, wie

sie in den Forschungsvorhaben (VSG, ISIBEL, ANSICHT, CHRISTA) aufgrund langzeit-sicherheitlicher und gebirgsmechanischer Aspekte auf Basis der Sicherheitsanforderungen des BMU entwickelt wurden. Eine Ermittlung des Gesamtflächenbedarfs unter besonderer Berücksichtigung der Rückholbarkeit und Bergung liegt auch für andere Länder nicht vor.

Die notwendige Grubenstabilität bei einer Rückholung, die sich insbesondere hinsichtlich der Temperaturgradienten zwischen Gebirge und den bewetterten Strecken bei Rückholung wichtig ist, kann den Gesamtflächenbedarf des Endlagers erhöhen. Unabhängig von der Auslegungstemperatur führt eine größere Teufe zu einem bergbaulich erhöhten Aufwand zur Sicherung der Gebirgsstabilität /DBE 16a/. Für die Auslegung des Grubengebäudes ist darauf zu achten, dass zwischen möglicherweise entfestigten Bereichen alter Grubenbaue und den neuen Rückholungsstrecken ausreichende Festen zur Gewährleistung der gebirgsmechanischen Stabilität vorhanden sind. Wie bei den thermisch bedingten Anforderungen (vergrößerte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern) bedingt dies eine Vergrößerung des Flächenbedarfs des Grubengebäudes.

Derzeit wird im Rahmen eines Forschungsvorhabens des BMWI („ERNESTA“ - Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen) anhand von Vergleichsrechnungen unter Einhaltung des vorläufigen 100 °C Temperaturkriteriums nach StandAG untersucht, wie die Temperaturbedingungen für die Behälterrückholung optimiert werden können. Hierzu wird eine möglichst geringe Temperatur in der Rückholungsstrecke bei einer gleichzeitig möglichst guten Ausnutzung der Auslegungstemperatur angestrebt /KIT 18/. Im Rahmen des Vorhabens untersucht die BGE TECHNOLOGY GmbH die zu erwartenden Umgebungsbedingungen während einer Rückholung mit Hilfe thermo-mechanischer Simulationen bzw. Wetternetzrechnungen und beschreibt die notwendigen Arbeitsabläufe zur Rückholung, sowie die dafür notwendigen Geräte. Weiterhin beinhaltet die Untersuchung auch eine Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung der Vorrichtungen für Einlagerung und Rückholung. Im Vorhaben ERNESTA werden für alle betrachteten Einlagerungsvarianten Rückholungskonzepte erarbeitet, die flexibel je nach Einlagerungsfortschritt während der gesamten Betriebszeit bis zum Verschluss der Schächte umgesetzt werden können /DBE 16b/.

Für die **Bergung** wird von der DBE (jetzt BGE) die sogenannte „Re-Mining“-Strategie /DBE 16b/ als geeignetes Vorgehen zur Umsetzung vorgesehen, wobei davon ausgegangen wird, dass alle Abfälle geborgen werden und Aspekte der Langzeitsicherheit keine Rolle mehr spielen (siehe auch diskutierte Rückholungsoptionen der ASSE /DMT 13/). Zur Bergung wird ein neues Grubengebäude aufgeföhren und neue Zugänge zu den Behältern geschaffen und diese mit geeigneter Technik wieder entnommen /BOL 14/. Aus der Auswertung der internationalen Literatur ist nicht ersichtlich /DMT 13/, /ENG 95/, ob es Überlegungen oder Aussagen dazu gibt, dass ein Rückholungsbergwerk auch im gleichen Wirtsgestein vollständig errichtet werden kann, wie das eigentliche Endlagerbergwerk oder ob aufgrund der Aufgabe als Endlager (inklusive Langzeitsicherheit) auch das Nebengebirge in die Planung eines Bergwerks zur Rückholung einbezogen werden muss. Entsprechend erhöht sich der Flächenbedarf für ein Endlager mit Rückholbarkeit, der in einem Standortauswahlverfahren zu berücksichtigen ist.

7.5 Erkenntnisgewinn

Die Anforderung der Rückholbarkeit, die als Endlagergenehmigungsvoraussetzung in Deutschland für alle Wirtsgesteine festgeschrieben ist, ändert die Randbedingungen für die bisherige Endlagerauslegung in Deutschland. Dabei dürfen die Maßnahmen zur Rückholbarkeit nicht im Widerspruch zum Sicherheitskonzept eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle (Betriebssicherheit, Langzeitsicherheit) stehen. Der Wärmeeintrag in das Endlager durch die wärmeentwickelnden Abfälle beeinflusst die Rückholungstätigkeit. Beide sind in ihrer Wechselwirkung bei der Endlagerauslegung zu beachten.

In Deutschland wurden die Rückholbarkeit von Endlagerbehältern hinsichtlich der betrieblichen thermischen Randbedingungen und die betrieblichen Aspekte der Rückholung bisher nur generisch betrachtet. Neue Erkenntnisse für die betrieblichen Aspekte bei der Rückholung sind insbesondere aus dem Vorhaben ERNESTA zu erwarten. Der Nachweis der technischen Machbarkeit und Überführung in den Stand der Technik steht für alle Rückholungskonzepte insbesondere auch hinsichtlich betrieblicher Störfallanalysen (Rückholphase) bisher noch aus.

Der Einsatz von tonigen/tonhaltigen Materialien in Endlagerkonzepten für Kristallin- und Tongesteine zur Streckenverfüllung/Buffer und in geo-technischen Verschlussbauwerken bestimmt die Auslegungstemperaturen der Endlager. Die Auslegungstemperaturen u. a. an der Außenfläche der Behälter werden so gewählt, dass unzulässige

Beeinflussungen der Barrierewirkung im Dichtungsmaterial ausgeschlossen werden /BOL 14/. Dies hat letztlich auch Auswirkungen auf den Gesamtflächenbedarf des Endlagers und auch, wie in Kap. 7.2 und 7.4 dargestellt, auf das Behälterkonzept.

Über die Behälterbeladung lässt sich die Wärmeabgabe der einzelnen Abfallgebinde variieren. Geringere Behälterbeladungen erfordern bei konstantem Abfallinventar eine größere Anzahl an Behältern, für die entsprechend mehr Einlagerungsstrecken und größere Einlagerungsfelder benötigt werden. Entsprechend der erhöhten Behälterzahl ergibt sich ein höherer Flächenbedarf des Endlagerbergwerks /BOL 14/, der auch durch eine Reduzierung der Behälter-, Strecken- und Bohrlochabstände nicht vollständig kompensiert werden kann, da gebirgsmechanische Restriktionen einer beliebigen Verringerung dieser Abstände entgegenstehen. Je nach verfolgtem Endlagerkonzept werden zur Realisierung handhabbarer Temperaturen für die Rückholbarkeit sowohl vergrößerte Abstände zwischen Endlagerbehältern, Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern als auch ausreichende Aus- und Abkühlzeiten und erforderliche Konzepte zur Bewetterung und Kühlung diskutiert¹² (s. auch /HAR 17/).

Die Tab. 7.3 zeigt als Gegenüberstellung mögliche Auswirkungen höherer oder niedrigerer Temperaturen der Auslegung¹³ im Vergleich für verschiedene Parameter auf, die wiederum direkt oder indirekt Auswirkungen auf die Durchführung einer Rückholung haben und bei der Endlageroptimierung (inklusive Rückholkonzept) berücksichtigt werden.

¹² Dies gilt auch für den zusätzlichen Flächenbedarf aus rückholungstechnischen Überlegungen.

¹³ Auslegungstemperaturen für Endlager werden aufgrund einer Abwägung verschiedener Effekte festgelegt und müssen auch die Rückholung berücksichtigen, sofern diese Option im Endlagerkonzept vorzusehen ist (s. auch Kap. 4).

Tab. 7.3 Beispiele für mögliche Auswirkungen höher gewählter Auslegungstemperaturen für ein Endlagerkonzept und ihre Auswirkungen im Hinblick auf die Durchführung der Rückholung oder Bergung von Abfallbehältern.

Wirkung höher gewählter Auslegungstemperaturen	Relevante Auswirkungen im Hinblick auf Rückholung und Bergung
Erhöhung der Behälterbeladung	Je höher die Auslegungstemperatur, desto höhere Wärmeentwicklung pro Behälter ist zu berücksichtigen.
Verringerung der Anzahl der Behälter	Je höher die Behälterbeladung, desto geringer kann die Anzahl erforderlicher Behälter werden.
Ggf. Verringerung der Einlagerungsfläche	Je weniger Behälter, desto kleiner kann die erforderliche Fläche zur Einlagerung werden, wobei ggf. vergrößerte Streckenabstände zu beachten sind.
Erhöhung der Streckenabstände	Je höher die Temperatur in der Umgebung der Wärmequelle (Behälter) wird, desto größer können die Streckenabstände werden.
Verringerung des Flächenbedarfs Rückholungs- oder Bergungsbergwerk	Je weniger Behälter eingelagert werden, desto kleiner kann das Rückholungs- oder Bergungsbergwerk gewählt werden.
Erhöhung der Kühlphasen für eingesetzte Technik (Vortriebsmaschinen)	Je höher die Temperaturen zu Beginn einer Rückholung sind, desto längere oder aufwendigere Kühlphasen können erforderlich werden.
Ggf. Verringerung der Einlagerungsdauer	Je geringer die Einlagerungsdauer, desto rascher erfolgt eine Aufheizung, die zu einer längeren Abkühlzeit und zu einer zunehmenden Vortriebsdauer durch längere Kühlphasen führt ¹⁴ .
Erhöhung des Aufwands für Bewetterung und ggf. Kühlung	Je höher die Temperaturen im Bergwerk, desto höher wird der Aufwand für Kühlung und ggf. Bewetterung

Die Angaben sind als allgemeine Auswirkungen bei der Wahl einer höheren oder niedrigeren Temperaturvorgabe für ein Endlager zu verstehen. Eine Optimierung des Endlagerkonzepts auf Basis von Temperaturrechnungen kann den Unterschied der Parameter bezüglich der Temperaturen ändern.

¹⁴ Dies kann unter Berücksichtigung der mit der Temperatur steigenden Konvergenz des Gebirges (insbesondere im Steinsalz) und dem notwendigen Nachschnitt der Streckenkonturen während der Kühlphase zu einer sehr geringen Vortriebsgeschwindigkeit führen.

Einfluss der Temperaturen auf Rückholbarkeit, insbesondere Bewetterung und Zeitbedarf des Rückholprozesses

Die thermischen Bedingungen zum Zeitpunkt einer Rückholung haben Einfluss auf die notwendige Bewetterungstechnik, die Rückholungstechnik und den einzuplanenden Zeitbedarf. Sie sind standort- und endlagerkonzeptabhängig. Niedrigere Auslegungstemperaturen können die Rückholbarkeit erleichtern. Die Behälterbeladung bestimmt in Verbindung mit der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins/Buffers u. a. die Temperaturentwicklung im Endlager. Je höher die Temperaturen im Endlager zu Beginn einer Rückholung sind, desto mehr Aufwand und Zeit ist für die Bewetterung und ggf. auch Kühlung notwendig, um die regulatorisch festgelegten thermischen Arbeitsbedingungen für Menschen und Maschinen vor Ort herzustellen (s. Kap. 7.1).

Die Wettermengen, die in ein Bergwerk eingebracht werden können, unterliegen technischen Erfordernissen. Die Wettermenge ist entsprechend der Bergwerksgröße und den vorherrschenden Temperaturen auszulegen, da eine größere Fläche und ggf. höhere Temperaturen auch einer entsprechend größeren Wettermenge bedürfen.

Die Parameter, die in Tab. 7.3 dargestellt sind, beeinflussen sich gegenseitig in unterschiedlichem Maß und können nicht einzeln und unabhängig voneinander betrachtet werden, da dies eine eingeschränkte und verzerrte Sichtweise ergäbe. Beispielsweise ist die Dauer einer Rückholung, ausgehend von der Rückholung aller Abfallgebinde, abhängig von der Anzahl der zu bergenden Abfallgebinde. Die Anzahl der Abfallgebinde ist im Falle niedriger Temperaturen an der Außenfläche der Behälter voraussichtlich höher als bei höheren Temperaturen, da das wärmeentwickelnde Gesamtabfallinventar für beide Fälle gleich ist. Gleichzeitig vergrößert sich die aufzufahrende Fläche, die sich aus dem größeren Flächenbedarf einer höheren Anzahl von Behältern ergibt. Dies kann nicht vollständig dadurch kompensiert werden, dass bei geringeren Temperaturen der Außenflächen der Behälter u. U. geringere Strecken- und Behälterabstände benötigt werden (s. o. und Tab. 7.2 zum Beispiel Steinsalz). Andererseits wird während der Rückholung der Abfallgebinde bei höheren Temperaturen an der Außenfläche der Behälter und damit in den Einlagerungsstrecken zur Einhaltung der thermischen Arbeitsbedingungen eine längere Abkühlungsphase evtl. mit Sonderbewetterung notwendig, die den Zeitbedarf für eine Rückholung verlängert. Die höheren Gebirgstemperaturen bewirken gleichzeitig eine höhere Konvergenz. Die längeren Kühlphasen zur Herstellung entsprechender Arbeitsbedingungen für die Maschinen und der notwendige Nachschnitt der Streckenkonturen begrenzt eine mögliche Auffahrungsgeschwindigkeit erheblich. Dieser

möglicherweise, zusätzlicher Zeitbedarf wurde im Rahmen der Endlageroptimierung hinsichtlich der Rückholbarkeit noch nicht bewertet. Aussagen hierzu werden u. a. im Forschungsvorhaben ERNESTA erwartet.

Zusammenhänge temperaturabhängiger Prozesse im Buffer, Versatz, Gebirge und Behälterhandhabbarkeit und Rückholung/Bergung

In den meisten Endlagerprojekten wird ein Buffer- bzw. Versatzmaterial (z. T. als geotechnische Barriere) um die Behälter in den Einlagerungsstrecken vorgesehen. Im Sinne der Langzeitsicherheit können sie als einschlusswirksame Barriere um den Behälter und zur Herstellung eines günstigen hydraulischen und geochemischen Milieus vorgesehen sein, um z. B. Korrosion am Behälter zu minimieren.

In einem Endlager im Steinsalz bildet der Salzgrus nach seiner temperaturabhängigen **Kompaktion** (Kap. 6.1.2) die geotechnische Barriere, im Kristallin- und Tongestein der tonhaltige Buffer bzw. der Bentonit nach einer temperaturabhängigen Wasseraufsättigung (Kap. 6.2.6). In beiden Fällen ist das schnelle Erreichen des Endzustandes aus Sicht der Langzeitsicherheit vorteilhaft. Aus der Sicht der Rückholbarkeit kann das Abfallgebilde aus einem nicht vollgesättigten Tonbuffer leichter geborgen werden (s. Kap. 7.3 Finnland bzw. Kap. 4.7 Anforderung in der Schweiz). Ähnlich verhält es sich mit dem noch nicht vollständig kompaktierten Salzgrus.

Diese beiden Prozesse sind auch hinsichtlich der **Handhabbarkeit** bedeutsam, da durch den Quelldruck des Tons bzw. Kompaktionsdruck im Salzgrus die Behälter deformiert werden können und dagegen ausgelegt sein sollten. Durch stark deformierte Behälter wird das Bergen (z. B. das Greifen) der Behälter behindert. Rückholbarkeit und Bergung werden maßgeblich dadurch beeinflusst, dass der sichere Einschluss von Abfällen in den Abfallgebilden erhalten bleibt. Bei der Bergung muss nach /BMU 10/ die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole betrachtet werden (Kap. 7.2). Inwieweit diese Freisetzung durch die Bergungstechnik vermieden werden kann ist noch zu untersuchen.

Ein weiterer Prozess ist die temperaturabhängige **Korrosion** unterschiedlicher Behältermaterialien, die die **Stabilität** und damit die Handhabbarkeit der Behälter während einer Rückholung oder Bergung bestimmt. Die maßgeblichen Prozesse sind im Kap. 6.4.1 (siehe **Metallkorrosion**) beschrieben. Für die Stabilität des Behälters während des Rückholprozesses ist die Dicke (Stärke) der Metallwandung und die

Resttragkraft bestimmter Vorrichtungen am Behälter maßgeblich, die durch Korrosionsprozesse das Bergen der Abfallgebinde (u. a. sollen die Tragzapfen eines rückholbaren Polluxbehälters verstärkt werden, Kap. 5.1, Salz) behindert bzw. erschwert. Entsprechend den unterschiedlichen Endlagerkonzepten bzw. Behälterkonzepten, die vom Wirtsgestein und den geotechnischen Barrieren abhängig sind, müssen die Behälter nicht nur Anforderungen u. a. aus der Langzeitsicherheit entsprechen, sondern auch für eine Rückholbarkeit und Bergung ausgelegt sein. Insgesamt werden die Metallkorrosion und die sie unterstützenden temperaturabhängigen Prozesse hinsichtlich der in einem Endlager zu erwartenden Temperaturen nicht so maßgeblich beeinflusst, dass eine feste Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter notwendig ist.

Für die **Handhabbarkeit** in der Rückholungsphase ist ebenso die Temperatur an der Außenfläche der Behälter (s. Handhabungstemperatur heißer Oberflächen /BOL 14/) von Bedeutung (Kap. 7.2).

Generischer Wirtsgesteinsvergleich von Steinsalz und Tongestein bzgl. einer Rückholung/Bergung

Aus betrieblicher Sicht (Arbeits- und Maschinenschutz) sind niedrige Temperaturen im Endlager während der Rückholungs- bzw. Bergungsphase der Behälter günstiger. Wie diese günstigen Temperaturbedingungen durch eine Bewetterung gewährleistet werden können (s. Kap. 7.1), ist technisch im Detail noch nicht geklärt. Nach /BOL 14/ ist bei einer rein generischen Betrachtung der Rahmenbedingungen der Endlagerung im Salz- und Tongestein kein Vergleich hinsichtlich einer einfacher zu realisierenden **Bewetterung** möglich. Beispielsweise ausgehend von den Auslegungstemperaturen von 200 °C im Steinsalz und bis zu 150 °C im Tongestein, scheint die im Steinsalz notwendige Kühlung hin zu maximal 52 °C Trockentemperatur (oder maximal 27 °C Feuchttemperatur) zunächst deutlich aufwendiger als die Einhaltung der 30 °C Effektivtemperaturgrenze im Tongestein. Neben der Auslegungstemperatur seien aber weitere klimatische Bedingungen wie z. B. der Feuchtegehalt der Luft wesentlich, die dazu führen können, dass es einfacher sein könnte eine Kühlung in einer vergleichsweise trockenen Grube im Steinsalz umzusetzen als in „vermeintlich“ kälteren aber deutlich feuchteren Grubenbauen wie in Tongestein /BOL 14/ oder Kristallingestein.

Hinsichtlich der **Handhabbarkeit und Integrität der Behälter** sind die wirtsgesteinsspezifischen Unterschiede einer Rückholbarkeit eher gering und i. d. R. nicht

temperaturabhängig. Maßgeblich sind hier das Behälterkonzept und die entsprechenden Rückholungstechniken.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass niedrigere Temperaturen an der Außenfläche der Behälter die Rückholung oder Bergung von Abfallgebinden erleichtern können. Höhere Temperaturen an den Außenflächen der Behälter stellen hinsichtlich der Rückholbarkeit kein Ausschlusskriterium dar, sondern können im Rahmen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzeption und im Rahmen der Konzeptoptimierung vom Antragsteller vorgeschlagen werden. Das entspricht auch dem Verständnis der Genehmigungsbehörde in der Schweiz, damit nicht durch frühzeitige und detaillierte Vorgaben die Flexibilität bei der Konzeptausarbeitung eingeschränkt wird /ENSI 13a/.

8 Auswertung von Einzelfragestellungen in Bezug auf die Festlegung einer Grenztemperatur

Nachfolgend wird auf diejenigen konkreten Einzelfragen eingegangen, die bei der Auftragsvergabe gestellt wurden und die typischen Fragestellungen zum Thema „*Grenztemperatur*“ behandeln.

8.1 Wie kann eine maximale „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche der Abfallbehälter begründet werden?

Die Begründung zur Festlegung eines begrenzenden konkreten Temperaturwertes an der Außenfläche der Behälter (wie der „*Grenztemperatur*“ im StandAG) kann bzgl. Aspekten der Betriebssicherheit (z. B. Handhabbarkeit) und/oder Langzeitsicherheit (z. B. Erhalt der Barrierewirkung einzelner Endlagerkomponenten) erfolgen. Diese steht zwingend in engem Zusammenhang mit dem Endlager- bzw. Sicherheitskonzept, da **wirtsgesteins-, konzept- und standortspezifische Aspekte** berücksichtigt werden müssen, um das Endlagersystem bzw. dessen Auslegung optimieren zu können.

Hierzu sind die folgenden wirtsgesteinsübergreifenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Die **geomechanischen Integritätskriterien** nach /BMU 10/ dürfen durch den Wärmeeintrag infolge der Zerfallswärme der eingelagerten Abfälle nicht verletzt werden. Eine mögliche Integritätsverletzung kann mittels thermisch-mechanisch gekoppelter Simulationen am konkreten Standort ermittelt werden. Hierbei sind standortspezifische Daten des Wirtsgesteins und Kenntnisse zum natürlichen geomechanischen Spannungsfeld zu Grunde zu legen. Standort- und konzeptspezifisch kann an der Außenfläche der Abfallbehälter eine Temperatur bestimmt werden, bis zu welcher die geltenden Integritätskriterien eingehalten werden.
- Die Behälter und der eingelagerte Abfall dürfen für den Zeitraum einer möglichen Bergung nicht durch eine innere Wärmeeinwirkung so stark beeinträchtigt werden, dass eine Freisetzung von Aerosolen bei der **Handhabung** zu erwarten ist. Weiterhin dürfen die Behälter, sofern diese eine wesentliche Barriere im Sicherheitskonzept (bzgl. der Langzeitsicherheit bei Sicherheitskonzepten für Endlagersystemen im Tongestein oder Kristallin) durch die Temperaturentwicklungen in ihrer Einschlusswirkung nicht erheblich beeinträchtigt werden.

- In Abhängigkeit der Auflast des Deckgebirges, der geochemischen Zusammensetzung der Lösung und der Teufe des Endlagers ist mittels der **Wasserdampfdruckkurve** die Temperatur für ein verschlossenes Endlager bestimmbar, unterhalb der ein Sieden von Lösungen z. B. an der Außenfläche der Behälter nicht stattfindet (s. Kap. 6.4.4). Im Einzelfall sollte berücksichtigt werden, ob – bis sich die natürlichen Druckbedingungen im Endlager nach Verschluss wiedereingestellt haben – die vorübergehende Bildung von Wasserdampf nachteilig ist.

Für die einzelnen Wirtsgesteine wurden die folgenden Aspekte zur Festlegung einer begrenzenden Temperatur in einem Endlager identifiziert:

Wirtsgestein Steinsalz

- An der Lokation von Hydratsalzen (wie z. B. Carnallit, Polyhalit) sollte die druckabhängige, mineralspezifische Temperatur zur Vermeidung einer **Kristallwasserfreisetzung** unterschritten werden (s. Kap. 6.1.5). Für ein konkretes Endlagerkonzept (inkl. Behälterbeladung und -abstand und Kenntnisse zum Wirtsgestein) im Steinsalz kann mittels einer Temperaturfeldberechnung die maximale Temperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern unter Berücksichtigung des Abstandes zu den Hydratsalzen durch Modellrechnungen bestimmt werden.
- **Thermisch induzierte Rissbildungen**, die zu einer deutlichen Erhöhung der Permeabilität des Wirtsgesteins (Perkolation) führen, sind zu vermeiden. Anhand von Laborversuchen kann für die vorliegenden Temperatur- und Druckbedingungen im Wirtsgestein die Permeabilität unter in-situ-Bedingungen bestimmt werden. Falls ab einer spezifischen Temperatur eine deutliche Erhöhung der Permeabilität festgestellt wird, kann diese zur Festlegung der maximalen Temperatur an der Außenfläche der Abfallbehälter herangezogen werden.

Wirtsgestein Tongestein

- Mineralumwandlungen, insbesondere die **Smektit-Illit-Umwandlung**, und thermochemische Sulfatreduktion werden bei höheren Temperaturen begünstigt und können zur Verschlechterung der einschlusswirksamen Eigenschaften (Sorptionsvermögen, Quellfähigkeit, Plastizität) von Barrieren (Buffer, Behälter) führen (s. Kap. 6.2.1, 6.2.2). Für die Endlagerkomponenten, welche die wesentlichen Barrieren für die Langzeitsicherheit darstellen, kann der Einfluss dieser Prozesse durch eine Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter minimiert werden.

- **Gasbildung** entsteht u. a. durch die Zersetzung von organischer Substanz, die CO₂-Desorption und die Zersetzung von Karbonaten (s. Kap. 6.2.3). Diese Prozesse werden bei höheren Temperaturen grundsätzlich begünstigt. Während der erste Prozess durch eine H₂S-Freisetzung die Korrosion von Abfallbehältern beschleunigen kann, können alle drei Prozesse zur Erhöhung des Fluiddruckes (Gasdruckaufbau) und zum beschleunigten Transport von gasförmigen Radionukliden aus dem Endlager beitragen. Diese Prozesse können in geotechnischen Barrieren durch eine geeignete Wahl des Bentonit-Typs mit einem geringen Organik-, CO₂- und Karbonat-Gehalt vermieden werden. Ansonsten kann der Einfluss dieser Prozesse temperaturabhängig minimiert werden und eine Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter begründen.

Wirtsgestein Kristallingestein

- Kristallines Wirtsgestein (Plutonite bzw. metamorph überprägte Plutonite) war während seiner **Genese** deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt als die in Rede stehenden Temperaturen von Endlagerkonzepten. Hieraus wird keine Begrenzung einer Temperatur an der Außenfläche der Behälter erwartet.
- Die Verwendung eines **tonhaltigen Buffers** (wie z. B. Bentonit) kann eine Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter begründen, da dieser in den bisher entwickelten Sicherheitskonzepten rückhaltende Eigenschaften besitzt. Es gelten z. B. bzgl. Mineralumwandlungen analog die beschriebenen temperaturabhängigen Prozesse im Tongestein (s. Kap. 6.2).
- **Verfüllte Klüfte** im Kristallingestein können eine Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften des Kluftmaterials aufweisen, die zu einer Beschränkung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter führen könnte, sofern rückhaltende Eigenschaften der Kluftmaterialien im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden (s. Kap. 6.3.1). Für ein konkretes Endlagerkonzept im Kristallingestein kann mittels einer „Temperaturfeldberechnung“ die maximale Temperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern unter Berücksichtigung des Abstandes zu den verfüllten Klüften durch Modellrechnungen bestimmt werden.

Darüber hinaus ergibt sich in Anlehnung aus den Anforderungen zur Temperaturbegrenzung im Inneren der Abfallbehälter für die Zwischenlagerung der hoch radioaktiven Abfälle die im Folgenden dargestellte Überlegung.

Die derzeitigen Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente sind in Deutschland für eine maximale Innentemperatur von 370 °C genehmigt /SPY 18/. Bis zu dieser Temperatur wird für die Zwischenlagerung eine Stabilität der Zircaloyhüllrohre unter Berücksichtigung der Spaltgasbildung für den sich einstellenden Druck und die sich einstellende Temperatur angenommen. Auch in anderen Ländern werden maximale Temperaturen für die Brennstäbe (Zircaloyhülle) im Innern der Behälter durch Richtlinien vorgegeben. Diese reichen von ca. 350 bis 410 °C /KIM 10/, /RIG 10/.

Die Temperatur an der Außenfläche der Behälter, die sich aufgrund der veränderten Wärmeabfuhr im Endlager gegenüber einer Luftkühlung bei der Zwischenlagerung einstellt, wäre daher in Analogie so festzulegen, dass eine maximale Innentemperatur von 370 °C bei einer untertägigen Endlagerung für eine spätere Handhabbarkeit im Bergungszeitraum nicht überschritten wird.

Eine Dokumentation zu der sich im Inneren eines Behälters einstellenden Temperatur bei einer Endlagerung konnte trotz Recherche nicht gefunden werden.

8.2 Gibt es Temperaturen, unterhalb derer keine negativen Auswirkungen auf die Barrieren zu erwarten sind?

Die Art und damit auch die Temperaturabhängigkeit der Barrieren sind wirtsgesteins- und konzeptabhängig. Für jede Temperatur bzw. Temperaturbereich gibt es für die Langzeitsicherheit günstige und ungünstige THMCB-Prozesse. Eine Temperatur unterhalb derer grundsätzlich negative Auswirkungen wirtsgesteins- und konzeptübergreifend sicher ausgeschlossen werden können, ist nicht belegbar. Im Folgenden werden wirtsgesteinsspezifische Prozesse genannt, die bei niedrigen Temperaturen sicherheitstechnisch als ungünstig (bzgl. der Langzeitsicherheit) angesehen werden.

Wirtsgestein Steinsalz

- Das Kriechvermögen des Steinsalzes stellt eine wesentliche einschlusswirksame Eigenschaft dar. **Salzkriechen** (s. Kap. 6.1.3) verstärkt sich mit zunehmender Temperatur und ist langsamer bei niedrigen Temperaturen. Daher sollte standortspezifisch im Konzept gezeigt werden, welche Temperatur und welcher Zeitraum mindestens erforderlich sind, um einen schnellen Einschluss der Abfälle durch das Kriechvermögen des Steinsalzes zu gewährleisten. Hierzu gehört im Falle der Berücksichtigung

von Salzgrus als Versatzmaterial auch die Temperaturabhängigkeit der **Kompaktionsrate** (s. Kap. 6.1.2).

- Niedrige Temperaturen begünstigen das Wachstum von Mikroorganismen, d. h. die **mikrobielle Aktivität** (s. Kap. 6.1.4). Somit kann die Korrosion des Abfallbehälters oder der geotechnischen Barriere zunehmen und ein Druckaufbau durch Gasbildung stattfinden. Ab Temperaturen über 122 °C sind keine lebensfähigen Mikroorganismen bekannt. Für niedrigere Temperaturen ist zu zeigen, dass durch eine mikrobielle Aktivität die einschlusswirksamen Eigenschaften des Abfallbehälters und der geotechnischen Barrieren in Wechselwirkung mit seiner Umgebung nicht unzulässig eingeschränkt werden. Der begrenzende Temperaturwert ist von den vorkommenden Spezies, den vorliegenden Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept abhängig.

Wirtsgestein Tongestein

- Die **Expansion von Feststoffen** und Fluiden setzt bereits bei geringen Temperaturerhöhungen ein und führt zum Aufbau von Spannungen im Endlagersystem. Zu berücksichtigen ist hierbei beispielsweise der Kompaktions-Kontraktions-Übergang (s. Kap. 6.2.8).
- Außerdem können sich wie im Steinsalz **mikrobielle Prozesse** ungünstig auf die Barriereigenschaften (z. B. des Behälters oder Bentonitbuffers) auswirken (s. Kap. 6.2.5).
- **Frostprozesse** besitzen nur dann einen Einfluss auf die Funktion geotechnischer Barrieren mit z. B. Bentonit, wenn durch die in Deutschland geforderte Teufe eines Endlagers Frostprozesse nicht ausreichend sicher ausgeschlossen werden könnte (s. Kap. 6.3.2).

Wirtsgestein Kristallingestein

- Für das Wirtsgestein Kristallingestein gelten die für Tongestein genannten Aspekte, die sich auf den tonhaltigen Buffer und den Behälter beziehen, entsprechend.

8.3 Gibt es Temperaturen in für Endlager relevanten Bereichen, bei deren Überschreitung mit nicht tolerierbaren Umwandlungen/Prozessen in den Barrieren zu rechnen ist?

Das **Aufschmelzen** der Abfallgebinde, der Gesteine oder anderer Materialien, kann als „nicht tolerierbare“ Umwandlung/Prozess verstanden werden, da eine belastbare Prognose des langfristigen sicherheitstechnischen Verhaltens in physikalischer und chemischer Hinsicht deutlich erschwert bzw. als unmöglich angesehen wird.

Wirtsgesteinsübergreifend sollte für die natürlich vorliegenden Druckbedingungen an einem Endlagerstandort das **Verdampfen von Wasser** (s. Kap. 6.4.4) ausgeschlossen werden.

Beide Prozesse laufen allerdings erst deutlich über den in den, bei den derzeit projektierten Endlagerkonzepten zu erwartenden Temperaturen ab. Für die weiteren Umwandlungen/Prozesse sind die Temperaturen in Abhängigkeit vom konkreten Endlagerkonzept standortspezifisch festzulegen.

Wirtsgestein Steinsalz

- Die Kristallwasserfreisetzung von Hydratsalzen ist zu vermeiden (z. B. Carnallit), s. Kap. 6.1.5.
- Thermisch induzierte Rissbildung ist zu vermeiden (s. Kap. 6.1.6).

Wirtsgestein Tongestein

- Hier sind Temperaturen zu vermeiden, bei denen Mineralumwandlungen, Expansion/Kontraktion, Korrosion von Behältern durch z. B. thermochemische Sulfatreduktion und ggf. Gasbildung im Tongestein oder Bentonit verstärkt stattfinden (s. Kap. 6.2).

Wirtsgestein Kristallingestein

- Für das Wirtsgestein Kristallingestein gelten die für das Wirtsgestein Tongestein genannten Aspekte, die sich auf den tonhaltigen Buffer und den Behälter beziehen, analog.

8.4 Gibt es umgekehrt Temperaturen, bei deren Unterschreitung mit ungünstigen Auswirkungen durch biologische, chemische, physikalische Prozesse und mit negativen Auswirkungen auf die Endlagersicherheit zu rechnen ist?

Die Gebirgstemperatur in der in Deutschland vorgesehenen Endlagerteufe ist durch den jeweils vorherrschenden geothermischen Temperaturgradienten bestimmt. Hierdurch sind Behälter-/Barrierenschädigung durch Frostprozesse, wie im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt, auszuschließen. Mikrobielle Prozesse werden als ungünstig für die Barrierenintegrität angesehen, da diese die Korrosion verstärken und zur Gasbildung beitragen können. Bei Temperaturen über 122 °C können nach derzeitigem Kenntnissstand mikrobielle Prozesse ausgeschlossen werden. THMCB-Prozesse, die bei niedriger Temperatur sicherheitstechnisch als ungünstig (bzgl. der Langzeitsicherheit) angesehen werden, sind bereits in der Einzelfrage in Kap. 8.2 genannt.

8.5 Ist es sinnvoll, Grenztemperaturen für unterschiedliche Zeitabschnitte zu definieren, z. B. wie in Frankreich?

Mit Beginn der Nachverschlussphase erscheint eine zeitliche Staffelung nicht sinnvoll, da die Langzeitsicherheitsanalysen und -betrachtungen für den Zeitraum von einer Million Jahre geführt werden. Nach Einstellung einer anfänglich maximalen Temperatur (Peak) wird eine Abnahme der Temperatur aufgrund der abnehmenden Wärmeabgabe der Abfallgebinde infolge der sinkenden Aktivität erwartet. Zeitabhängige und insbesondere pauschale, konzeptübergreifende Anforderungen erscheinen daher nicht sinnvoll. Wichtig ist, dass es durch die anfänglich höheren Temperaturen aufgrund der zerfallsbedingten Wärmeproduktion der Abfallgebinde nicht zu einer inakzeptablen Schädigung der sicherheitskonzeptionell erforderlichen Einschusswirkung von Barrieren kommen kann. Da nach dem Verschluss des Endlagers keine aktiven Einflussmöglichkeiten auf die Temperaturentwicklung im Endlager bestehen, sind Temperaturen für den Nachweiszeitraum im Vorfeld abzuschätzen.

Die ANDRA hat im Sicherheitskonzept festgelegt, dass ein Kontakt von Lösung und Abfall(gebunden) zur Vermeidung von Mineralumwandlungen und der Einschränkung von Korrosion (z. B. infolge mikrobieller Aktivität) erst unterhalb einer Temperatur von 70 °C stattfinden soll (s. Kap. 4.4). Ein solcher Zeitpunkt kann lediglich rechnerisch über eine geochemische Modellierung der Aufsättigungsprozesse im Tongestein und der Barrieren

sowie der in diesem Zeitraum stattfindenden Temperaturabnahme ermittelt werden. Eine exakte und sichere Festlegung des Zeitpunkts ist nicht möglich.

8.6 Welche Annahmen zu Grenztemperaturen werden in Endlagerprojekten anderer Staaten zu Grunde gelegt? Lassen sich diese auf Deutschland übertragen?

Die Annahmen zu Festlegungen von begrenzenden Temperaturen in Endlagerkonzepten sind in Kap. 5 beschrieben. Im Anhang D sind diese Temperaturfestlegungen tabellarisch gegenübergestellt.

Eine Einstufung der Übertragbarkeit der konkreten Temperaturbegrenzungen auf Deutschland ist nur mit Kenntnissen zu Wirtsgestein, Standort und Endlagerkonzept möglich. Wenn die Ausprägungen des Wirtsgesteins, die Sicherheitsanforderungen, das hierauf fußende Sicherheitskonzept und das Endlagerkonzept eines anderen Landes mit den sich im Rahmen des Standortauswahlverfahrens konkretisierenden Gegebenheiten vergleichbar sind, ist eine Übertragbarkeit von Temperaturbegrenzungen denkbar.

8.7 Gibt es regulatorische Festlegungen zu Grenztemperaturen in anderen Ländern? Lassen sich diese auf mögliche Standorte in Deutschland übertragen?

Die Auswertung der nationalen Regelwerke anderer Länder (s. Kap. 4) ergibt die folgenden Schlussfolgerungen:

- In den gesichteten nationalen Regelwerken anderer Länder existieren keine regulatorischen Festlegungen bzgl. einer äquivalenten maximalen „Grenztemperatur“ an der Außenfläche der Behälter (s. Kap. 4.9). Nach Festlegung eines Wirtsgesteins, des Konzeptes und möglicher Standorte wurden begrenzende Temperaturen für Endlagerkomponenten (wie des Behälters) durch den Antragsteller abgeleitet, die dann teilweise zur Vorgabe einer Temperatur an der Außenfläche der Behälter führen.
- In Frankreich wird im Leitfaden der Aufsichtsbehörde ASN eine Begrenzung der Temperatur auf 100 °C an der Grenze Behälter/Lagerungsumgebung als günstig angesehen (s. Kap. 4.4). Die Temperaturbeschränkung stellt allerdings keine regulatorische Vorgabe dar, sondern ist ein Orientierungswert als Basis zur weiteren

Endlageroptimierung. Diese Temperatur resultiert aus Überlegungen zum wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzept im Tongestein und ist nicht wirtsgesteins- oder konzeptübergreifend auf das deutsche Standortauswahlverfahren im Sinne einer „*Grenztemperatur*“ übertragbar.

- Eine Übertragung regulatorischer Festlegungen auf Deutschland ist nicht möglich, da die gesichteten nationalen Regelwerke anderer Länder **keine** Temperaturbegrenzungen fordern. Eine Übertragung der antragstellerseitig festgelegten Temperaturbegrenzungen aus Endlagerkonzepten anderer Länder könnte unter den in der Beantwortung der Einzelfrage in Kap. 8.6 genannten Aspekten erfolgen.

8.8 Welche Rolle spielt die Wärmeverträglichkeit von Versatzmaterial bei der Festlegung der Grenztemperatur? Inwiefern besteht die Möglichkeit zur Optimierung in der Zusammensetzung von Versatzmaterial?

Die Anforderungen an den Versatz sind in einem Verschlusskonzept (als Teil eines Endlagerkonzeptes) festzulegen. Da dem Versatz auch sicherheitskonzeptionell einschlusswirksame Eigenschaften zugeschrieben werden könnten, muss die Wärmeverträglichkeit gegeben sein. Auf Basis einer solchen Festlegung kann für ein Endlagerkonzept mittels Temperaturfeldberechnungen eine Temperatur für die Außenfläche der Behälter abgeleitet werden. Die Zusammensetzung des **Versatzes** kann in Bezug auf seine Wärmeverträglichkeit - unabhängig von anderen sicherheitstechnisch zu berücksichtigenden Anforderungen - optimiert werden.

Beispielsweise wird in Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Steinsalz Salzgrusversatz verwendet, der mit zunehmender Kompaktion seine Permeabilität verringert und seine thermischen Materialeigenschaften sich dem von natürlichem Steinsalz angleichen. Hierfür ist das initiale **Hohlraumvolumen** im Salzgrusversatz entscheidend, da die in den Poren enthaltene Luft durchflusswirksam ist und eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt als der Feststoff Steinsalz. Daher ist bei einem geringen initialen Hohlraumvolumen (s. Kap. 6.1.2) die Permeabilität kleiner und die Wärmeleitfähigkeit größer. Auch bestimmt die **mineralogische Zusammensetzung** des Versatzmaterials die thermischen Materialeigenschaften sowie mögliche ablaufende Prozesse.

In einem tonhaltigen Buffer kann weiter die Zusammensetzung optimiert werden, um (für die Langzeitsicherheit) ungünstige THMCB-Prozesse zu vermeiden. Hierzu gehören der **Kerogengehalt** (Vermeidung der chemischen Alteration von Organika, s. Kap. 6.2.3),

der **adsorbierte CO₂-Gehalt** (Vermeidung der CO₂-Desorption, s. Kap. 6.2.7), der **Karbonatgehalt** (Vermeidung der Zersetzung von Karbonatmineralen, s. Kap. 6.2.2) und der **Pyritgehalt** (Vermeidung der H₂-induzierten Pyritreduktion, s. Kap. 6.2.2).

8.9 Welche THMCB-Prozesse sind für Schlussfolgerungen in Bezug auf die wissenschaftliche Begründung von Grenztemperaturen für die jeweiligen potentiellen Wirtsgesteine hinreichend bekannt und wo besteht noch Forschungsbedarf?

Die für Sicherheitsanalysen nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik wesentlichen THMCB-Prozesse sind in sog. FEP-Katalogen wirtsgesteinsspezifisch erfasst (s. Kap. 6). Die THMCB-Prozesse sind zur wissenschaftlichen Begründung eine Szenarienentwicklung im Wesentlichen bekannt. Es besteht vielmehr Bedarf an notwendigen Informationen zum Sicherheits- und Endlagerkonzept, Wirtsgestein sowie Standort, die erst im Rahmen des Standortauswahlverfahrens erarbeitet werden. Nur so können wissenschaftlich nachvollziehbar begründete Temperaturbegrenzungen definiert werden.

Für die konkrete Bestimmung einer „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche der Behälter als Bezugspunkt sind Temperaturfeldberechnungen für standortspezifische Endlagerkonzepte notwendig. Temperaturabhängige Prozesse werden dann im Rahmen einer Sicherheitsanalyse mittels Modellierungen in ihrer Auswirkung des Einschlussvermögens eines Endlagersystems untersucht und bewertet.

Im Folgenden wird der in Kap. 6 genannte notwendige Forschungsbedarf bzw. erforderliche Kenntnisstand wirtsgesteinsspezifisch zusammengefasst:

Wirtsgestein Steinsalz

- Die Schlussfolgerungen von /GHA 15/ zur Perkolation gilt es unter endlagerspezifischen Bedingungen mit Hilfe von Laboruntersuchungen zu überprüfen (Temperatur- und druckabhängige Permeabilitätsversuche an natürlichem Steinsalz unter endlagerspezifischen Druck- und Temperaturbedingungen).
- Das Freisetzungverhalten von Kristallwasser aus Hydratsalzen ist am konkreten Standort im Rahmen der Erkundung zu analysieren (Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung des Wirts- und ggfls. Nebengesteins sowie z. B. Erhitzeversuche).

- Der Einfluss mikrobieller Aktivität ist konzeptspezifisch (insbesondere bezüglich des Korrosionsverhaltens von Behältermaterialien und der Gasbildung) unter den zu erwartenden thermischen Bedingungen zu quantifizieren.
- Die für einen möglichst schnellen Ablauf des Salzkriechens und der Salzgruskomaktion mindestens erforderliche (zeitlich veränderliche) Temperatur ist im Rahmen der Erkundung standortspezifisch zu bestimmen, so dass die Einschlusswirksamkeit möglich rasch gewährleistet ist.
- Die Kenntnisse zur Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz bei höheren Temperaturen (Datengrundlage heterogen) sind experimentell abzusichern, allerdings nicht prioritär (ggf. Untersuchungen an Wirtsgesteinsproben im Rahmen der übertägigen Erkundungen, Phase 2 des Standortauswahlverfahrens).

Wirtsgestein Tongestein

- Für alle in diesem Bericht betrachteten THMCB-Prozesse für das Wirtsgestein Tongestein wurden offene Fragen identifiziert, die nicht nur für eine Temperaturabhängigkeit relevant sind. Diese sind für jeden Prozess im entsprechenden Unterkapitel „Offene Fragen“ beschrieben. Dies sind z. B. Reaktionsparameter zur Smektit-Illit-Reaktion und Pyrit-Oxidation, Übertragbarkeit von Eisen-Ton-Wechselwirkungen und Natürliche Analoga auf Endlagersysteme, Wechselwirkungen von Behältermaterial, Zement und Bentonit/Tongestein sowie zur CO₂-Freisetzung.

Wirtsgestein Kristallin

- Für das Wirtsgestein Kristallin wird über die offenen Fragen für tonhaltigen Buffer im Wirtsgestein Tongestein hinaus, abgesehen von Forschungsbedarf, der sich aus der Entwicklung von Endlagerkonzepten ergeben könnte, derzeit kein weiterer Forschungsbedarf zur Festlegung einer „Grenztemperatur“ an der Außenfläche der Behälter gesehen.

8.10 Welche Konsequenzen können sich aus den betrachteten temperaturabhängigen Prozessen für die Endlagersicherheit ergeben?

Die sicherheitstechnischen Konsequenzen bzgl. der Endlagersicherheit im Sinne der Langzeitsicherheit sind prozessspezifisch und entsprechend in Kap. 6 erläutert sowie tabellarisch im Anhang C zusammengefasst. Im Wesentlichen können die dargestellten

THMCB-Prozesse (s. Kap. 6) zur Beeinträchtigung von einschlussrelevanten Eigenschaften (wie z. B. Sorptionsvermögen, Quellfähigkeit, Plastizität, Kationenaustauschkapazität) führen, wenn unzulässige Temperaturen in den jeweiligen Endlagerkomponenten (wie z. B. an der Außenfläche des Behälters) erreicht oder unterschritten werden. Weiterhin können ablaufende sicherheitskonzeptionell unerwünschte Prozesse (Korrosion, Gasbildung z. B. infolge mikrobieller Aktivität) verstärkt oder erwünschte Prozesse (Kriechen, Kompaktion) verlangsamt werden.

Infolge einer Bewertung von sicherheitstechnischen Konsequenzen können sich Änderungen im Endlagerkonzept ergeben. Zum Beispiel müsste sich die Behälterbeladung verändern, Behälterabstände und Streckenabstände geändert werden oder andere grundsätzliche Änderungen des Einlagerungskonzepts vorgenommen werden, die zu anderen Temperaturmaxima führen. Die Konsequenzen wären dabei in der Regel ein geänderter Flächen- bzw. Raumbedarf des Endlagers.

8.11 Sind noch wesentliche offene Fragen hinsichtlich der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach StandAG in Bezug auf §27 (4) zum derzeitigen Stand von W&T erkennbar? Sind die Kenntnislücken für die Festlegung von Anforderungen an Grenztemperaturen relevant?

Wie in der Antwort zur Frage in Kap. 8.9 ausgeführt, sind die wesentlichen THMCB-Prozesse für die jeweiligen Wirtsgesteine bekannt, jedoch sind vorläufige Endlagerkonzepte zu entwickeln und anschließend standortspezifisch im Rahmen der Erkundung Daten zu erheben, um eine Optimierung des Endlagers mit der Vorgabe einer „*Grenztemperatur*“ vornehmen zu können.

Für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sollte vom Vorhabenträger gefordert werden, dass im Endlagerkonzept die gewählte maximal zulässige und minimal erforderliche Temperatur für eine langzeitige Einschlusswirksamkeit gezeigt werden kann und eine Rückholbarkeit machbar ist. Diese Temperaturbegrenzung ist mit fortschreitender Konkretisierung im Standortauswahlverfahren hinsichtlich der Langzeit- und Betriebssicherheit (z. B. bzgl. des Flächenbedarfs (s. Kap. 7.4)) zu optimieren.

Aufgrund der bisher - auch international - geführten Diskussionen erscheint es sinnvoll, eine Anforderung zu stellen, dass **sicherheitstechnische Nachweise** für unterschiedliche Temperaturen an der Außenfläche von Behältern (insbesondere für die, die deutlich über 100 °C liegen könnten) **konzept- und standortspezifisch** zu führen sind.

Weiterhin sollten die Vor- und Nachteile verschiedener Temperaturen einander gegenübergestellt werden, um daraus eine Begründung für die Wahl des Endlagerkonzepts abzuleiten. Eine konzept- und standortunabhängige **Vorabfestlegung** einer maximalen Temperatur würde die Optimierung von Endlagerkonzepten einschränken.

Die Festlegung einer maximalen „*Grenztemperatur*“ an der Außenfläche der Abfallbehälter ist nur mit Kenntnis des Wirtsgesteins, des Standortes und des Endlagerkonzeptes sicherheitstechnisch belastbar begründbar. Jedoch erscheint es möglich, Endlagerkonzepte und Informationen zu Wirtsgesteinsformationen generisch anzunehmen, die zwingend für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erforderlich sind. Dann wären begrenzende Temperaturen abschätzbar, für welche die sicherheitsrelevanten Auswirkungen zu betrachten sind.

Die Kenntnislücken sind für die Festlegung einer konkreten „*Grenztemperatur*“ relevant, aber nicht für die Festlegung von Anforderungen zur Ableitung einer oder mehrerer „*Grenztemperaturen*“. Mit der Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für generische bzw. standortspezifische Sicherheits- und Endlagerkonzepte können die Kenntnislücken geschlossen und die Unsicherheiten in der Ableitung von Grenztemperaturen verringert werden.

8.12 Wie wirken sich unterschiedliche „Grenztemperaturen“ auf die „Rückholbarkeit/Bergung“ der Abfallbehälter aus? (Dauer, Höhe, Lage, Endlagerauslegung, Abhängigkeiten)

Die Forderung nach Rückholbarkeit der Abfallbehälter ist bei der Auslegung eines Endlagers zu berücksichtigen (Kap. 4). Die Kombination aus dem Wirtsgestein, des Endlagerkonzepts, der benötigten Bergwerkstechnologie und den verwendeten Behältern muss die Rückholbarkeit gewährleisten. Die sich an der Außenfläche der Behälter einstellenden Temperaturen sind in Sicherheitsanalysen sowohl für die Betriebsphase (Einlagerung, Offenhaltung, Rückholung) als auch für die Nachbetriebsphase (Bergung, Langzeitsicherheit) berücksichtigt.

Die vielfältigen Aspekte und Prozesse müssen schrittweise bei der Entwicklung eines Endlagerkonzepts berücksichtigt und konkret an den gewählten Standort angepasst werden (Kap. 5). Zur Umsetzung einer Rückholungsoption können auch Abwägungen hinsichtlich der sich einstellenden Temperaturen an den Endlagerkomponenten (Behälter,

Buffer, Versatz, Wirtsgestein) zur Optimierung vorgenommen werden. Für die Bergung muss als Planungsvoraussetzung lediglich die Handhabbarkeit des Behälters über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sein und während der Bergung die Freisetzung von radioaktiven Aerosolen vermieden werden.

Endlagerbehälter haben verschiedene Funktionen zu erfüllen. Sie können für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle eine wesentliche technische Barriere zur Rückhaltung von Radionukliden darstellen (passive Sicherheit). In der Betriebsphase (Einlagerungsbetrieb, ggf. Rückholungsbetrieb) müssen Anforderungen der Arbeitssicherheit und des Strahlenschutzes eingehalten werden. Die Wärme aus dem Zerfall der Radionuklide wird über die Behälter an die Umgebung abgegeben. Hierbei darf sich das Behältermaterial und die gebirgsmechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins nicht ungünstig verändern (Kap. 7.2).

Die Optionen Rückholbarkeit bzw. Bergung sind bisher als Begründung für Temperaturfestlegungen und Endlagerauslegungen in nationalen Endlagerkonzepten nicht ausschlaggebend gewesen. Wie in Kap. 3 bis 4 dargelegt, existieren zwar Restriktionen zu Temperaturen von Prozessen, die sich in den Auslegungstemperaturen des wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzeptes widerspiegeln, jedoch wurde i. d. R. die Betriebsphase der Endlager und mögliche Rückholungen der Abfälle nur generisch und nicht im Detail betrachtet. Zumeist wird rückwirkend argumentiert und geprüft, ob unter den festgelegten Randbedingungen und den daraus resultierenden Temperaturen im Endlager ein Rückholungskonzept technisch umsetzbar ist und untersucht, ob ggf. noch Optimierungen zur Erleichterung einer Rückholung vorgenommen werden können ohne andere Schutzziele zu gefährden.

Nationale (u. a. ERNESTA) wie internationale Forschungsvorhaben (/NGU 18/, /IGSC 18/) versuchen diese Lücke zu schließen und die sicherheitstechnischen Aspekte der Betriebsphase wie Rückholphase näher zu beleuchten und in die Endlagerkonzepte zu integrieren (u. a. Belgien, Deutschland, s. Kap. 5). Nach den heutigen Erkenntnissen sind bisher nur die grubenklimatischen Bedingungen für Beschäftigte unter Tage gesetzlich geregelt (Kap. 7.1). Da dies in den meisten Fällen durch eine entsprechende Bewetterung und/oder Kühlung der Strecken als technisch machbar gesehen wird, ist eine Vorfestlegung auf eine „Grenztemperatur“ aus Sicht der Rückholbarkeit/Bergung zur Zeit nicht zielführend /RÖH 17/.

Die Auswirkungen einer spezifischen „Grenztemperatur“ auf ein Endlagerkonzept mit Rückholbarkeit/Bergung kann nur für ein konkretes Konzept bestimmt werden. Hierzu ist die Durchführung von numerischen Temperaturfeldberechnungen für (ggfls. generische) Endlagerkonzepte notwendig, um die Wirkung und Sensitivität einzelner Parameter (z. B. Beladung, Abstände, Materialien) auf die Einhaltung der „Grenztemperatur“ an der Außenfläche eines Abfallbehälters zu ermitteln. Derartige Arbeiten sollten im Rahmen von zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben für Endlagerkonzepte generisch und standortspezifisch erfolgen. Dabei können Aspekte zur Rückholbarkeit (wie z. B. Dauer der Rückholbarkeit, Flächenbedarf, Design oder Streckenabstände vs. Höhe der Grenztemperatur, s. Kap. 7.5) näher betrachtet werden.

8.13 Welche Probleme können bei welchen „Grenztemperaturen“ hinsichtlich der Handhabbarkeit bei einer möglichen Rückholung oder Bergung der Abfallbehälter entstehen? (Rechtliche und betriebliche Randbedingungen, Behälterintegrität, Korrosion, Stabilität)

Die temperaturabhängigen Prozesse beeinflussen neben der Langzeitsicherheit auch Aspekte der Betriebssicherheit (wie z. B. Grubenstabilität, Behälterintegrität inklusive der Behälterkorrosion). Da in allen nationalen wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepten (konzeptspezifisch), aus langzeitsicherheitlichen Aspekten eine Behälterintegrität über Zeiträume gefordert ist, die die Betriebs- bzw. Rückholphase und die Bergungsphase umfassen, wenn nicht sogar weit darüber hinausgehen, ist eine Handhabbarkeit bei einer möglichen Rückholung oder Bergung bei den diskutierten Temperaturen ($< 200\text{ °C}$) zu erwarten (Kap. 7.2).

Rechtliche und betriebliche Aspekte einer Temperaturbegrenzung aufgrund des Arbeitsschutzes (u. a. Bewetterung), die bei der Rückholung der Gebinde zu beachten sind, wurden aufgezeigt (s. Kap. 7.1). Hierzu gibt es gesetzliche Regelungen (s. Kap. 4), die durch entsprechende technische Maßnahmen (Bewetterung, Wetterkühlung, klimatisierte Fahrgastzellen, Berührungsschutz) einzuhalten sind. Die größte technische Herausforderung für die Durchführung einer Rückholung besteht darin, ein adäquates Bewetterungs- und Kühlsystem im Umfeld stark erhöhter Gebirgstemperaturen aufzubauen. Nach Meinung der Experten sind Rückholprozesse bei Temperaturen um 100 °C einfacher zu handhaben, wobei eine solche Temperaturbegrenzung aber nicht zwingend notwendig ist.

Eine Notwendigkeit zur konkreten, grundsätzlichen Begrenzung einer „*Grenztemperatur*“ auf 100 °C/150 °C bzw. 200 °C (Endlager im Steinsalz) aufgrund der Optionen Rückholbarkeit bzw. Bergung hat die Literaturrecherche und Auswertung in diesem Vorhaben nicht aufgezeigt. Dennoch sind aufgrund der Temperatur technische Grenzen insbesondere hinsichtlich der Bewetterung und der Rückholtechnik zu beachten, es sind z. T. noch technische Konzepte für die sich aus dem Endlagerkonzept ergebenden Temperaturen zu entwickeln oder der Nachweis der Umsetzbarkeit für den Einsatz der bestehenden Technik zu erbringen.

Herausforderungen ergeben sich für die Einhaltung vorgeschriebener Temperaturen der Klima-Berg-Verordnung (s. Kap. 7.1) bei einer Rückholung, der Ausgestaltung des Endlagerkonzepts hinsichtlich der Temperaturfeldentwicklungen nach Einlagerung der Abfälle, der Behälterhandhabbarkeit (Einhaltung der Vorgaben zum Umgang mit heißen Oberflächen, Vermeidung der Freisetzung von Aerosolen bei einer Bergung (s. Kap. 7.2) und maximaler Arbeitstemperaturen für Maschinen und Technik).

Die beiden Prozesse **Quelldruck** des Tons bzw. **Kompaktionsdruck** im Salzgrus (Kap. 6.1.2) sind hinsichtlich der **Handhabbarkeit** bedeutsam (Kap. 7.2), da durch sie die Behälter deformiert werden können und dagegen ausgelegt sein sollten. Durch stark deformierte Behälter wird das Bergen (z. B. das Greifen) der Behälter behindert. Rückholbarkeit wird maßgeblich dadurch beeinflusst, dass der sichere Einschluss von Abfällen in den Abfallgebinden erhalten bleibt. Bei der Bergung muss die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole betrachtet werden.

Ein weiterer Prozess ist die temperaturabhängige **Metallkorrosion** (Kap. 6.4.1) unterschiedlicher Behältermaterialien, die die **Stabilität** und damit die Handhabbarkeit der Behälter während einer Rückholung oder Bergung beeinträchtigen könnte. Für die Stabilität des Behälters während des Rückholprozesses ist die Dicke (Stärke) der Metallwandung und die Resttragkraft bestimmter Vorrichtungen am Behälter maßgeblich, die durch Korrosionsprozesse verringert wird. Entsprechend den unterschiedlichen Endlagerkonzepten bzw. Behälterkonzepten, die vom Wirtsgestein und den geotechnischen Barrieren abhängig sind, müssen die Behälter nicht nur Anforderungen u. a. aus der Langzeitsicherheit (**Behälterintegrität**) entsprechen, sondern auch für eine Rückholbarkeit und Bergung ausgelegt sein. Insgesamt werden die Metallkorrosion und die sie unterstützenden temperaturabhängigen Prozesse hinsichtlich der in einem Endlager zu erwartenden Temperaturen durch Auslegung so kompensiert werden können, dass eine

festen Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter aus diesem Grund nicht erforderlich werden wird. Die durch die temperaturabhängigen Prozesse (u. a. mikrobielle Aktivität (Kap. 6.1.4, Kap. 6.2.5) und thermochemische Sulfatreduktion (Kap. 6.4.3) erhöhte Korrosionsrate in dem Zeitraum einer Rückholung/Bergung (bis 500 Jahre) gefährdet i. d. R. nicht die Behälterintegrität und kann durch zusätzliche Maßnahmen (u. a. gegen Korrosion schützende Anstriche, größere Wandstärken und andere Materialien) verringert werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass niedrigere Temperaturen an der Außenfläche der Behälter die Rückholung oder Bergung von Abfallbinden erleichtern. Höhere Temperaturen an den Außenflächen der Behälter stellen hinsichtlich der Rückholbarkeit kein Ausschlusskriterium dar, sondern könnten im Rahmen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzeption und im Rahmen der Konzeptoptimierung vom Antragsteller auch für eine Rückholbarkeit und Bergung geplant werden. Das entspricht auch dem Verständnis der Genehmigungsbehörde in der Schweiz, damit nicht durch frühzeitige und detaillierte Vorgaben die Flexibilität bei der Konzeptausarbeitung eingeschränkt wird (Kap.7.5).

8.14 Welche hinsichtlich der „Rückholbarkeit/Bergung“ relevanten Wechselwirkungen können bei den unterschiedlichen Versatzmaterialien an der Außenfläche der Abfallbehälter auftreten? (Gestein, Funktion, zeitliche Veränderungen, Einspannung, Endlagerkonzept)

Die temperaturabhängigen Wechselwirkungen der Prozesse im Buffer, Wirtsgestein etc. hinsichtlich ihrer Funktionalität als Barriere sind in Kap. 6 beschrieben.

In der Regel (Ausnahme: Endlager Yucca Mountain, USA) ist eine **Einspannung** der Behälter durch den Versatz und die **zeitliche Veränderung** als eine **Funktion** des Versatzmaterials (Aufquellen des Buffers in Tongestein bzw. Granit und Kompaktion des Salzgrusversatzes im Steinsalz) sicherheitstechnisch erforderlich und damit Teil des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes eines Endlagers (Kap.7.5).

In einem Endlager im Steinsalz bildet der Salzgrus mit der Zeit durch seine temperaturabhängige **Kompaktion** eine geotechnische Barriere, im Kristallin- und Tongestein der tonhaltige Buffer bzw. der Bentonit durch die zeit- und temperaturabhängige Wasserauf-sättigung. In beiden Fällen ist das schnelle Erreichen des Endzustandes aus Sicht der Langzeitsicherheit vorteilhaft. Aus der Sicht der Rückholbarkeit kann das Abfallgebilde

aus einem nicht vollgesättigten Tonbuffer leichter geborgen werden. Ähnlich verhält es sich mit dem noch nicht vollständig kompaktierten Salzgrus.

Schon innerhalb der Betriebsphase sorgt der **Quelldruck** des Tons (im Tonbuffer) (Kap. 6.2.6) bzw. der **Kompaktionsdruck** im Salzgrus (Kap. 6.1.2) für eine Verfestigung des Versatz-/Buffermaterials und deformiert evtl. nicht entsprechend ausgelegte Behälter. Trotz der erschwerten Bedingungen ist bergungstechnisch diese zeitliche Veränderung des Versatzmaterials nicht maßgeblich, da die technischen Möglichkeiten dazu bereitstehen oder zur Kompensation entwickelt werden können.

Wechselwirkungen des Versatzes mit der Außenfläche der Behälter (z. B. im Hinblick auf eine Korrosion und Gewährleistung der Handhabbarkeit der Behälter für Rückholbarkeit/Bergung) sind im Endlagerkonzept durch Auslegung zu berücksichtigen und im Sicherheitsnachweis aufzuzeigen. Insgesamt werden diese Prozesse und die sie unterstützenden temperaturabhängigen Prozesse hinsichtlich der in einem Endlager zu erwartenden Temperaturen nicht als so maßgeblich eingeschätzt, dass eine feste Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter notwendig wird (Kap. 7.5).

8.15 Gibt es offene sicherheitsrelevante Fragestellungen in Zusammenhang mit der Grenztemperatur, die eine Rückholbarkeit, Bergung und Handhabbarkeit der Abfallbehälter hochradioaktiver Abfälle nach Verschluss des Endlagers im Zeitraum von 500 Jahren gefährden könnten? (Szenarien, Brand- und Explosionsschutz, Veränderungen, Freisetzung von Radionukliden, Transportfähigkeit, Machbarkeitsnachweis)

In Deutschland wurden im Rahmen der „Untersuchung eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle in Salz“ sicherheitstechnische Konsequenzen für die Option der Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager untersucht /BOL 04/. Einbezogen in diese Untersuchung wurden Ergebnisse von Literaturrecherchen zu insgesamt 13 Ländern Europas, Nordamerikas und Asiens sowie zu internationalen Organisationen wie Europäische Kommission, OECD/NEA und IAEA. Diese wurden hinsichtlich nationaler und internationaler Empfehlungen und gesetzlicher Bestimmungen zu Rückholoptionen, ggf. erleichternde Maßnahmen für Rückholbarkeit, sowie konzeptioneller und technischer Vorkehrungen konkreter Endlagerplanungen ausgewertet (Kap. 4, Kap. 5). Betrachtet wurden die potentiellen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin. Die Aussagen sind in die Tabelle „Auslegungstemperaturen international - Überblick“ im Anhang D eingearbeitet.

Von den möglichen Maßnahmen zur Erleichterung von Rückholbarkeit hat die Offenhaltung von Endlagerteilen Einfluss auf die Betriebs- und Langzeitsicherheit /BOL 04/. Insbesondere sind folgende Effekte zu berücksichtigen und hinsichtlich ihres Einflusses zu untersuchen:

- Effekte aufgrund verlängerter Bewetterung und Drainage der Geosphäre,
- Effekte für die Langzeitstabilität des Wirtsgesteins und die Standfestigkeit des Grubenbaus /BOL 04/.

Für die Betriebssicherheit ist nach IAEA insbesondere die Umgebungstemperatur zu beachten /BOL 04/. Im Endlager sind die Temperaturen für das Personal und die Ausrüstung entsprechend der Anforderungen auf einem bestimmten Niveau zu halten. Dies macht ggf. zusätzliche Bewetterung und Kühlung erforderlich (Kap 7.1, Kap. 7.5).

Für das **Wirtsgestein Steinsalz** ist nach /BOL 14/ eine offene Fragestellung beim Rückholkonzept für Steinsalz, inwiefern sich unter den Rahmenbedingungen eines hohen thermischen Gradienten zwischen heißem Gebirge (bis zu 200 °C Gebirgstemperatur) und kühlen Wettern das Gebirge verhält (Spannungen im konturnahen Gebirgsbereich) und inwieweit diese hohen thermischen Gradienten u. a. in Bezug auf die Grubenstabilität beherrschbar sind. Dies gilt grundsätzlich wirtsgesteinsübergreifend, allerdings sind in bisherigen (vorläufigen bzw. generischen) Endlagerkonzepten die vergleichsweise höchsten thermischen Gradienten zu erwarten. Bisher gibt es diesbezüglich keine Erfahrungen aus dem konventionellen Bergbau, sondern nur Hinweise auf das zu erwartende Gebirgsverhalten. Es wird ein Bedarf für detaillierte geomechanische Untersuchungen gesehen, auch wenn die Zustände grundsätzlich als beherrschbar eingeschätzt werden. Es wird vorgeschlagen, genaue Klimavorausberechnungen in Verknüpfung mit Gebirgsmechanik vorzunehmen und das Bewetterungskonzept vertieft auszuarbeiten. Nach dem Stand der Technik sind im Steinsalz Wettertemperaturen bis 70 °C beherrschbar, wobei die Gebirgstemperatur 100 °C nicht überschritten werden sollte, um keine unzulässigen Spannungen durch zu hohe Temperaturgradienten zwischen den Wänden der Grubenbaue und den Wettern hervorzurufen. Die technische Möglichkeit einer ausreichenden Bewetterung und Kühlung ist noch nachzuweisen.

Für eine Rückholung aus dem **Wirtsgestein Tongestein** gibt es ebenfalls noch offene Fragestellungen bzgl. der Umsetzung eines geeigneten Bewetterungskonzeptes. Die Auslegungstemperatur für das Endlager zwischen 100 °C und 150 °C liegen deutlich

über den bisher im Bergbau beherrschten Klimabedingungen /BOL 14/. Neben der Auslegungstemperatur sind aber auch die weiteren klimatischen Bedingungen entscheidend, z. B. wie der Feuchtegehalt der Luft. Dadurch kann die Kühlung trockener Gruben (z. B. im Steinsalz) einfacher erreicht werden als die Kühlung vermeintlich kälterer aber deutlich feuchterer Grubenbaue (z. B. Tongestein). Zum Nachweis der technischen Machbarkeit einer ausreichenden Bewetterung des gesamten Grubengebäudes müssen die konkreten Auslegungsbedingungen des Endlagers bekannt sein. Die Machbarkeit einer ausreichenden Bewetterung unter den skizzierten Bedingungen ist noch nachzuweisen /BOL 14/.

Mögliche Szenarien, die den **Brand- und Explosionsschutz** in der Rückholung betreffen könnten, werden durch die Sicherheitsanalysen zum Betrieb abgedeckt. Die Störfallanalysen als Teil der Sicherheitsanalysen, die auch den Rückholungsbetrieb eines Endlagers beinhalten, sollten alle möglichen Szenarien umfassen, die während der Einlagerungs- und Verschlussphase auftreten können. Die Beherrschung bzw. Vermeidung dieser Störfälle in Störfallanalysen sind nachzuweisen. Da die Rückholung der Abfallgebinde als erweiterter Teil der Betriebsphase anzusehen ist, fallen die sicherheitstechnischen Aspekte zusammen.

Mögliche Störfälle bei der Rückholung (z. B. das Verkeilen von Abfallgebinden in einem Bohrloch bzw. der Gebindeabsturz) sind auch in der Einlagerungsphase (Betriebsphase) zu betrachten und damit durch die entsprechenden Störfallanalysen abgedeckt. Die Machbarkeitsnachweise zur Rückholung von Abfallgebinden sind durch in situ-Versuche, wie z. B. in /SKB 15/, aufzuzeigen. Der Nachweis der technischen Machbarkeit und Überführung in den Stand der Technik steht für alle Rückholungskonzepte insbesondere auch hinsichtlich betrieblicher Störfallanalysen (Rückholphase) bisher noch aus.

Hinsichtlich einer Bergung der Abfallgebinde im Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers wird nach /BMU 10/ die Handhabbarkeit der Abfallbehälter und die Vermeidung von Freisetzungen von radioaktiven Aerosolen gefordert (Kap. 4.1, Kap. 7.2). Entsprechend sind Auslegungen für die Handhabbarkeit der Behälter vorzusehen. Hierzu sind u. U. Behälterkonzepte für zu erwartende Temperaturen zu entwickeln, um Freisetzungen (z. B. Aerosole) durch den Bergungsvorgang zu unterbinden. International werden insbesondere für Endlagerkonzepte, die den geotechnischen Barrieren eine hohe Sicherheitsfunktion zuweisen (z. B. Endlagerkonzepte im Kristallgestein), Behälterintegritäten über erheblich längere Zeiträume gefordert. Für die

Endlagerung im Tongestein verlangt die schweizerische Behörde (ENSI) /ENSI 09a/ für die verbrauchten Brennelemente bzw. die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung eine Einschlusszeit in den Lagerbehältern von mindestens 1.000 Jahren und damit länger als der in Deutschland geforderte Zeitraum über den eine Bergung möglich sein muss. Die insbesondere bisher für Steinsalz konzipierten Behälter unterliegen in Tongestein und Kristallingesteinen anderen chemischen Bedingungen, wurden aber schon in generischen Studien auf diese Wirtsgesteine adaptiert. Die Entwicklung neuer Behälterkonzepte, insbesondere aufgrund von Anforderungen aus der Rückholbarkeit/Bergung sind im Rahmen von FuE-Arbeiten zu prüfen.

9 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zu den “maximalen physikalisch möglichen Temperaturen” gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern erfolgten im Auftrag des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) mit dem Ziel, eine Grundlage zur Bewertung von wirtsgesteinsspezifischen „*Grenztemperaturen*“ im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zu liefern.

Zur Bearbeitung erfolgte zunächst eine systematische Vorgehensweise auf Basis einer **Literaturrecherche**. Diese umfasst den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu wirtsgesteinsspezifischen „*Grenztemperaturen*“ und zu den für die Fragestellung relevanten temperaturabhängigen THMCB-Prozessen sowie zur Rückholbarkeit/Bergung. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Literaturverwaltungsprogramm Citavi /CIT 19/ zur Erfassung, Auswertung und Zitation der Literatur verwendet, in dem ein aussagekräftiger Schlagwortkatalog aufgebaut wurde (s. Anlage 1).

Für die Erstellung der Literaturlatenbank mit Verschlagwortung wurde eine **systematische Vorgehensweise** auf Basis von FEP-Katalogen gewählt, um temperaturabhängige Prozesse möglichst vollständig bzw. abdeckend zu erfassen. Die Verwendung von FEP-Katalogen bei der Szenarientwicklung ist als Stand von Wissenschaft und Technik anzusehen, um alle denkbaren wahrscheinlichen bis unwahrscheinlichen Entwicklungen von Endlagersystemen zu erfassen. Dazu gehören auch temperaturabhängige Prozesse und Eigenschaften von Endlagerkomponenten (wie z. B. der Abfallbehälter).

Die Grundlagen im Hinblick auf übliche Begrifflichkeiten im Kontext der Festlegung einer Temperaturbegrenzung für ein Endlager sind im Kap. 3 dargestellt. Hierzu gehört auch die Beschreibung wie Temperaturänderungen bzw. -verteilungen in einem Endlager durch numerische Modellierungen (**Temperaturfeldberechnungen**) ermittelt werden (s. Kap. 3.3).

Die nationalen Regelwerke anderer Länder wurden gesichtet und im Hinblick auf Festlegungen zu Temperaturen und Rückholbarkeit/Bergung ausgewertet (s. Kap. 4). Festlegungen von konkreten Temperaturen in einem Endlager als regulatorische Vorgabe (ohne Bezug zu Endlagerkonzept bzw. Wirtsgestein) wurden nicht gefunden (s. Kap. 4.9). Regelungen zur Rückholbarkeit/Bergung sind vorhanden, stehen regulatorisch jedoch nicht in einem Zusammenhang mit Temperaturen im Endlager.

Das Kapitel 5 beschreibt kurz aktuelle „**Endlagerkonzepte und Temperaturfestlegungen**“ einiger Länder und gibt eine Übersicht über derzeitige Überlegungen zur Auslegung.

Für die meisten Konzepte, die **tonhaltige Materialien** als Barrieren einsetzen, wird eine maximale Temperatur bis zu 100 °C mit Bezugspunkt im tonhaltigen Material (wie im Buffer) zur **Auslegung** vorgegeben und begründet. Lediglich in der Schweiz werden auch höhere Temperaturen im tonhaltigen Buffer konzeptionell als sicherheitstechnisch akzeptabel angesehen. Aus der Temperaturbegrenzung in tonhaltigen Materialien verschiedener Konzepte können modelltechnisch die Temperaturen an der Außenfläche der Behälter bestimmt werden, die im Bereich zwischen 80 - 150 °C liegen.

Die **Auslegungstemperaturen** eines Endlagers im **Steinsalz** orientierten sich an den Mineraleigenschaften der in der weiteren Umgebung vorkommenden kristallwasserhaltigen Minerale (sog. Hydratsalze), damit keine Freisetzung von Kristallwasser aus den Hydratsalzen stattfindet. Hierfür wurde die maximal zulässige Temperatur an der Lokation der Hydratsalze bestimmt und anschließend mittels einer Temperaturfeldberechnung die sich maximal einstellende Temperatur an der Außenfläche der Abfallbehälter (wie z. B. 200 °C) unter Berücksichtigung des Abstandes zu den Hydratsalzen bestimmt.

Die Literaturrecherche ergab darüber hinaus z. T. deutliche Unterschiede hinsichtlich der aus den **Endlagerkonzepten** resultierender **maximaler Temperaturen** an der Außenfläche der Behälter. Die höchste Temperatur betrug 230 °C (innere Temperatur eines Abfallbehälters nach Verschluss 350 °C) nach dem amerikanischen Endlagerkonzept im Tuffgestein (Yucca Mountain) /PAP 99/, /REC 14/, wobei zu beachten ist, dass es sich hier um keine verfüllten, sondern um Jahrzehnte bis Jahrhunderte offen gehaltene Einlagerungsstrecken handelt. Für Großbritannien, Japan, Russland, Spanien und Südkorea wurden keine konkreten Aussagen zu Temperaturen an der Außenfläche der Behälter gefunden.

Es wurden in der Literatur keine Hinweise gefunden, die eine Endlagerauslegung ausschließlich mit einer maximalen Temperatur an der Außenfläche der Behälter oder den Eigenschaften der Behälter begründete.

Die Literaturrecherche und -auswertung zu **THMCB-Prozessen** für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein (s. Kap. 6) ergab Einzelprozesse, die zur Festlegung von Temperaturen dienen können und in den nachfolgenden Abbildungen

für Steinsalz und Tongestein dargestellt sind (s. Abb. 9.1, Abb. 9.2). Mit Ausnahme eines noch im Detail zu bewertenden Temperaturverhaltens von Kluffüllungen (falls diesen in Sicherheitskonzepten für Endlagersysteme im Kristallingestein wesentliche rückhaltende Eigenschaften zugeschrieben werden) stimmen die wesentlichen temperaturabhängigen Prozesse für Kristallingestein mit dem für Tongestein überein.

Jedoch ist das Zusammenspiel der zahlreichen temperaturabhängigen Prozesse und auch Eigenschaften aufgrund der Wechselwirkungen im Zeitverlauf komplex. Nur auf Basis eines Sicherheits- und Endlagerkonzepts kann eine belastbare Bewertung erfolgen. Damit kann eine nachvollziehbar begründbare „**Grenztemperatur**“ an der Außenfläche der Behälter abgeleitet werden, die standortspezifisch überprüft werden sollte.

Die Festlegung einer pauschalen „**Grenztemperatur**“ auf der Basis der Temperaturabhängigkeit einzelner Prozesse, ohne die Berücksichtigung eines Sicherheits- und Endlagerkonzepts und die aus einer Charakterisierung des Wirtsgesteins und eingesetzten Materialien abzuleitenden Einflussgrößen sowie von ihrer Wechselwirkungen, erscheint somit nur unzureichend begründbar.

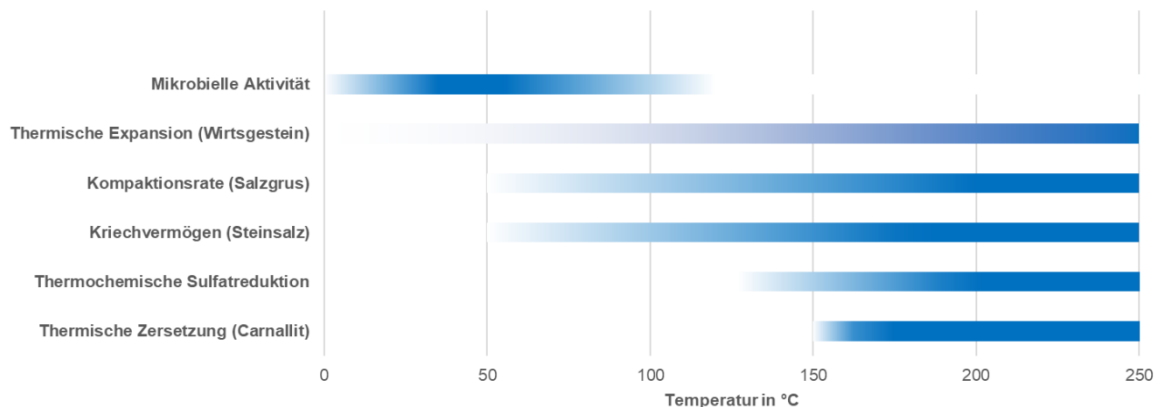


Abb. 9.1 Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Steinsalz¹⁵

¹⁵ Die Farbabstufung beschreibt näherungsweise den Verlauf der Intensität des ablaufenden Prozesses zu der jeweiligen Temperatur

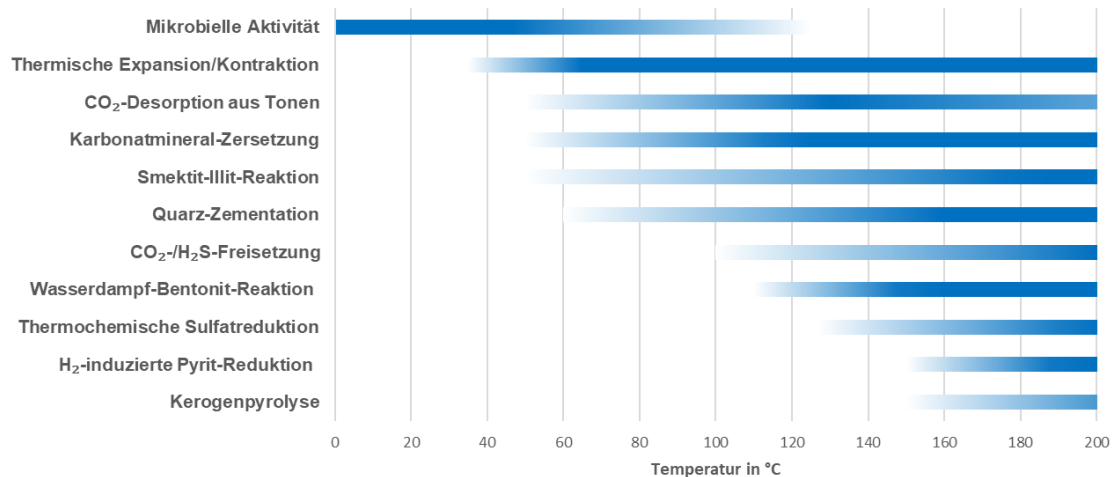


Abb. 9.2 Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Tongestein¹⁶

Auch die Fragestellung zum Zusammenhang zwischen **Rückholbarkeit/Bergung** und einer möglichen Festlegung von Temperaturen wurde betrachtet (s. Kap. 7). Aus betrieblicher Sicht (Arbeits- und Maschinenschutz) sind niedrige Temperaturen im Endlager während der Rückholungs- bzw. Bergungsphase der Behälter günstig. Wie diese günstigen Temperaturbedingungen durch eine Bewetterung gewährleistet werden können, ist technisch im Detail noch nicht geklärt. Nach /BOL 14/ ist bei einer rein generischen Betrachtung der Rahmenbedingungen der Endlagerung im Salz- und Tongestein kein Vergleich hinsichtlich einer technisch leichter zu realisierenden **Bewetterung** möglich. Die Entscheidung hierüber erscheint jedoch für eine Festlegung einer Temperatur nicht relevant.

Auch hinsichtlich der **Handhabbarkeit und Stabilität der Behälter** sind die wirtsgesteinsspezifischen Unterschiede für eine Rückholbarkeit eher gering und i. d. R. nicht wesentlich temperaturabhängig. Maßgeblich sind hier das Behälterkonzept und die entsprechenden Rückholungstechniken.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass niedrigere Temperaturen an der Außenfläche der Behälter die Rückholung oder Bergung von Abfallbinden erleichtern können. Höhere Temperaturen stellen hinsichtlich der Rückholbarkeit kein Ausschlusskriterium dar,

¹⁶ Die Farbabstufung beschreibt näherungsweise den Verlauf der Intensität des ablaufenden Prozesses zu der jeweiligen Temperatur

müssen allerdings im Rahmen der Erstellung der wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte und im Rahmen der Konzeptoptimierung technisch eingeplant werden.

Erkenntnisgewinn und Empfehlung

Auf Basis der betrachteten temperaturabhängigen Eigenschaften und Einzelprozesse für denkbare Endlagerkonzepte in verschiedenen Wirtsgesteinen lässt sich keine eindeutige, einheitliche, sicherheitstechnisch begründbare und konkrete Temperaturbegrenzung für die Außenfläche der Behälter ableiten. Die bisher **diskutierten Temperaturen** - bezogen auf die Außenfläche der Behälter und zur Endlagerauslegung angewendet - liegen im Bereich von ca. **80 bis 230 °C**. Insgesamt erscheint dieser Temperaturbereich sicherheitstechnisch plausibel ohne eine weitere Einengung nach aktuellem Kenntnisstand zu empfehlen.

Sicherheitstechnisch belastbar begründbare Temperaturbegrenzungen an der Außenfläche der Behälter lassen sich nur auf der Grundlage eines (ggfs. vorläufigen) Sicherheits- und Endlagerkonzepts ableiten, das dann die verschiedenen temperaturabhängigen Eigenschaften und Prozesse an Barrieren sowie zur Rückholbarkeit/Bergung berücksichtigt. Die regulatorische Vorfestlegung einer konkreten konzept- und wirtsgesteinsübergreifenden „*Grenztemperatur*“ oder auch mehrerer „*Grenztemperaturen*“ könnte die Entwicklung von Sicherheits- und Endlagerkonzepten behindern, da einerseits die mögliche Optimierbarkeit der Einschlusswirkung von Endlagersystemen eingeschränkt wird und andererseits Endlagerkonzepte mit anderen als der festgelegten „*Grenztemperatur*“ gar nicht erst detaillierter untersucht würden.

Daher wird derzeit keine Festlegung einer „*Grenztemperatur*“ für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein empfohlen, um nicht nur Gestaltungsspielraum bei der Entwicklung von Sicherheits- und Endlagerkonzepten zu erhalten, sondern auch eine Optimierung im Verlauf des Standortauswahlverfahrens zu ermöglichen (siehe zu letzterem auch /ALT 16/).

Erst nach Festlegung eines Sicherheitskonzepts und eines vorläufigen Endlagerkonzepts können „*Grenztemperaturen*“ auf der Basis wissenschaftlich nachvollziehbarer Annahmen auf dem Stand von Wissenschaft und Technik für das jeweilige Sicherheits- und Endlagerkonzept abgeleitet werden, die für Wirtsgesteine und Konzepte gleichermaßen nachvollziehbar und sicherheitstechnisch belastbar begründbar sind.

Die Ausweisung eines spezifischen **FuE-Bedarfs** einzelner Prozesse erfolgte in den einzelnen Kapiteln. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die vertiefende Klärung experimenteller Ergebnisse und deren Übertragbarkeit auf Endlagerkonzepte und der Herstellung eines Zusammenhangs mit Temperaturen an einer Außenfläche der Behälter über ein Endlagerkonzept.

Eine künftige **Störfallanalyse** eines Endlagerkonzepts sollte unter Berücksichtigung einer **Rückholbarkeit** erfolgen, da betriebliche Störfallanalysen sonst nur einen Teil der sicherheitsrelevanten Fragestellungen der Rückholbarkeit abdecken. Gegebenenfalls sollte dies für verschiedene Auslegungstemperaturen erfolgen, um unterschiedliche Risiken einer Rückholung in Abhängigkeit von der Temperatur aufzuzeigen. Bisher ist keine Störfallanalyse für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle in Deutschland erfolgt.

Das Temperaturverhalten innerhalb der Abfallbinde nach der Einlagerung in einem Endlager ist nicht untersucht. Diesbezügliche Kenntnisse sind jedoch erforderlich, um eine Behälterbeständigkeit für den Fall einer Bergung prüfen zu können. Nachweise einer hinreichenden **Behälterbeschaffenheit** für eine Handhabbarkeit bei den infrage kommenden Temperaturen an der Außenfläche bei einer Bergung sind in der bisher verfügbaren Literatur nicht aufgefunden worden. Entsprechende Materialforschung und Konzeptarbeiten sind erforderlich.

10 Summary

The study on “maximum physically possible temperatures” according to § 27 StandAG regarding the limit on the temperature at the outer surface of waste containers was performed by contract with the Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BfE). The objective of this study was to provide a basis for the assessment of specific temperature limits for host rocks to be applied within the process of site selection.

A systematic review of literature was done on temperature limits for specific host rocks, temperature dependent THMCB-processes and on retrieval/recovery in order to obtain the current state of science and technology. The reference management was done using Citavi /CIT 19/ for compilation, evaluation and citation of references and for setting up a catalogue with keywords (Anlage 1).

For setting up the reference database, a systematic procedure using FEP catalogues was selected to cover the relevant temperature-dependent processes. The use of FEP-catalogues is state-of-the-art to derive all possible likely to unlikely scenarios. This also includes temperature-dependent processes and features of components of final repository systems (e. g. waste containers).

The basis terminology related to the setup of a temperature limit for a final repository is given in chapter 3. This chapter includes a general description of how temperature changes and profiles (**temperature field**), using numerical modelling, are obtained.

National regulations from some other countries were examined and evaluated to see if and which requirements on temperature limits and/or on retrievability/recovery have been established (chapter 4). No regulatory requirements regarding a specific temperature limit for a final repository without relation to a specific concept of host rock was found (chapter 4.9). Requirements prescribing retrievability/recovery exist but are not related to temperature limits in a repository.

Chapter 5 describes the current “repository concepts and temperature settings” of some countries and provides an overview of considerations on the design of repositories.

For most concepts, when using clay-based materials as barriers in its design, a maximum temperature of 100 °C is applied to the clay-based material (buffer). Only Switzerland is considering clay-based buffer as acceptable in its design of the repository system

for higher temperatures from a safety point of view. When using the temperature limit in the clay-based materials, the temperature on the outer surface of the waste container ranges between 80 to 150 °C.

The temperatures used for the design of a repository in salt rock are based on the features of the hydrate minerals containing water in the crystalline structure. The release of this water due to temperature change must be avoided. A maximum permissible temperature at the location of these hydrate minerals can be determined and used to calculate the temperature limit at the outer surface of the waste container considering the distance to their locations.

The review of the literature showed significant differences within the repository concepts concerning the maximum temperature at the outer surface of the waste containers. The highest temperature was 230 °C (based on the inner temperature limit of the waste containers of 350 - 370 °C) for the US repository design at Yucca Mountain /PAP 99/, /REC 14/. This concept is different to most other concepts since it considers open drifts for several centuries over thousands of years.

No indication was found in the references that the repository design was exclusively based on a temperature limit on the outer surface of the container or the feature of the containers.

The review and evaluation of the literature on THMCB-processes in chapter 6, for the host rock salt, clay and crystalline, yielded several processes, which can be the basis upon which to set temperature limits. These are depicted in figures Fig. 10.1 and Fig. 10.2. Most temperature-dependent processes are similar for clay and crystalline rock since they refer to the clay-based material. The exception is the temperature-dependent behaviour of gap-filling materials when these are considered in the safety concept for repository systems in crystalline rock.

The interaction of the temperature-dependent processes and features is very complex over time. A sound assessment is possible only with a safety and repository concept. This can lead to a temperature limit for the outer surface of a waste container, which must be reviewed for a specific site.

The provision of a general temperature limit based on the temperature dependence of individual processes without considering safety and repository concepts as well as the

characteristics of the host rock, impacts of deployed materials, and their interactions is not reasonable.

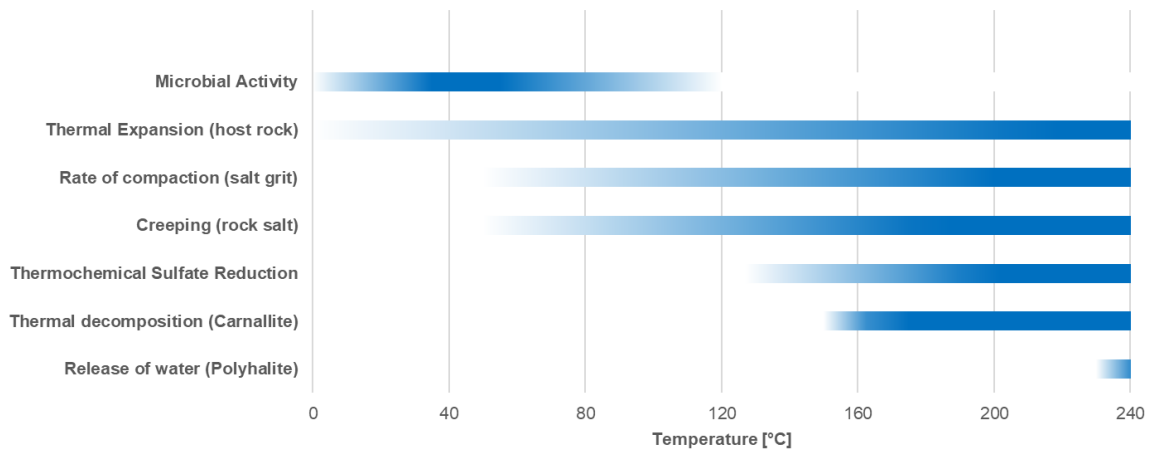


Fig. 10.1 Temperature dependence of relevant THMCB-Processes in rock salt¹⁷

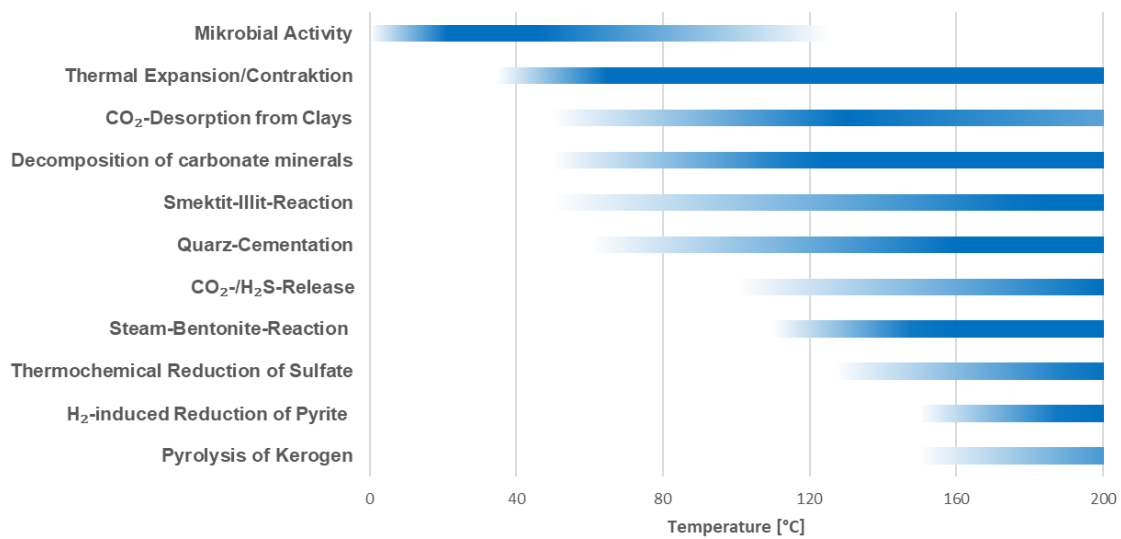


Fig. 10.2 Temperature dependence of relevant THMCB-Processes in clay rock¹⁸

The link between retrievability/recovery and temperature was evaluated (chapter 7). Low temperatures in the repository are favourable from the viewpoint of operational safety and technological appliances for retrieval or recovery. The attainment of favourable temperatures during retrieval/recovery by mine ventilation is yet not clarified in detail. According

¹⁷ The color gradient depicts schematically the intensity of the process at that temperature

¹⁸ The color gradient depicts schematically the intensity of the process at that temperature

to /BOL 14/ it is not possible to figure out if the technological implementation of ventilation is easier for salt or clay rock. This issue is not considered to be relevant for setting up a temperature limit.

The manageability and stability of containers does not depend significantly on differences in host rocks and are not temperature dependent. The concept for containers and technology for retrieval is decisive.

It can be stated that lower temperatures at the outer surface of waste containers will facilitate the retrieval/recovery of waste containers. Higher temperatures do not exclude the retrieval/recovery but must be included in the specific design of the repository and its optimization.

Gain in knowledge and recommendation

It is not possible to justify a unique, consistent, safety related and concrete temperature limit for the outer surface of waste containers based on the temperature dependent feature and individual processes for supposable repository concepts in different host rock. The currently discussed range of temperature limits – for the outer surface of waste containers – are within 80 to 230 °C. The range seem plausible based on the current knowledge without any recommendation of narrowing it down further.

The temperature limit on the outer surface of waste container can be derived by using only a (preliminary) safety and repository concept that considers the different temperature dependent features and processes on barriers and retrieval/recovery. A premature decision by the regulatory body of a concrete temperature limit for all concepts and host rocks or several temperature limits could hinder the development of safety and repository concepts since the possible optimisation of containment of repository systems would be limited and repository system with deviating temperature limits have not been investigated in detail.

Therefore, it is not recommended to decide on a temperature limit for the host rocks salt, clay and crystalline in order to not only maintain flexibility in the development of safety and repository concepts but also allow for the optimization in the course of the site selection process (see also /ALT 16/).

Not until a decision on a safety concept and preliminary repository concept temperature limits (based on comprehensible assumptions) is made, can these temperature limits be comprehensible and be justified for the safety and repository concept.

The specific R+D needs of individual processes are shown in the individual chapters. Mostly, experimental results must be clarified and transferred to repository concepts and their relationship with temperatures at the outer surface of waste containers must be established based on a repository concept.

A future analysis of incidents of a repository should consider retrievability, since the analysis of operational incidents covers only parts of safety relevant aspects of retrievability. This analysis should cover different temperatures for design to detect operational risks of retrieval associated with temperature. So far, no analysis of incidents has been performed for a repository for highly radioactive waste in Germany.

The temperature behaviour inside a waste container after disposal in a repository has not been investigated. This knowledge is required to assess the stability of the container in case of a recovery. Proofs have not been found in the references, that the status of containers is suitable for manageability at currently discussed temperatures. Appropriate research in material science and work on concepts is needed.

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Zeiteinordnung von Rückholbarkeit und Bergung.....	17
Abb. 3.2	Skizze des schematischen Temperaturprofils im Querschnitt einer exemplarischen Einlagerungsstrecke für einen eingelagerten Behälter	20
Abb. 3.3	Schematische Skizze der Temperatur an der Außenfläche eines Behälters abhängig von der Zeit /DBE 16a/	21
Abb. 3.4	Darstellung der Temperaturen (rot = hohe Temperatur, blau = niedrige Temperatur) in einem Endlager, die einige Jahrzehnte nach Einlagerung auftreten können (verändert nach /HER 16/).	22
Abb. 5.1	Zeitverlauf der Temperaturen in einem Einlagerungsfeld mit Behältern (Lokationen s. kl. Bild oben), verändert nach /BOL 12/	41
Abb. 5.2	Zeitverlauf der Temperaturen auf der Sohle im Einlagerungsfeld Ost 2 bei Bohrlochlagerung (Lokationen s. kl. Bild oben), verändert nach /BOL 12/	42
Abb. 5.3	Entwicklung von belgischen Endlagervarianten im Boom Clay links: Endlagerlayout für den Safety Case SFC-1C (2003-2015) /PIR 13/ rechts: neues für Betriebssicherheit optimiertes Endlagerlayout für SFC-1 (2015-2020) /IGSC 18/	46
Abb. 5.4	Supercontainer-Konzept für wärmeentwickelnde, radioaktive Abfälle (Klasse C) in Belgien /VEH 16/	48
Abb. 6.1	Bausteine einer Sicherheitsanalyse	66
Abb. 6.2	Dihedraler Winkel (Kreise) mit Temperatur- und Druckbedingungen /LEW 96/, in rot ist der lithostatische Druck in ca. 900 m Tiefe markiert.	74
Abb. 6.3	Ergebnisse aus Kompaktionsversuchen mit konstanter Kompaktionsrate, Verringerung der Porenzahl von Salzgrus bei verschiedenen Versuchstemperaturen aus /KRÖ 09/ nach /STÜ 04/	76
Abb. 6.4	Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz und Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur /KRÖ 09/.....	77
Abb. 6.5	Verformungsmechanismen des Salzkriechens aus /GÜN 09/ nach /ROK 07/.....	79

Abb. 6.6	Anzahl an bekannten Mikroorganismen /BOW 11/ mit optimalen Wachstumsraten für verschiedene Temperatur- und Salinitätsbedingungen	81
Abb. 6.7	Schmelz-, Zersetzung- und Entwässerungstemperaturen u. a. für Salzminerale verändert nach /BRÄ 16/	84
Abb. 6.8	Phasendiagramm für Carnallit /KER 80/	86
Abb. 6.9	Änderung des Volumens (hier bezogen auf 50 °C) von gesättigter NaCl-Lösung im Vergleich zu Steinsalz bei Temperaturzunahme /RÜB 11/.....	88
Abb. 6.10	Darstellung von Polynomansätzen im Vergleich zu den Ausgleichskurven von /BIR 40/ und /ČER 82/ aus /HEE 14/	90
Abb. 6.11	Lineare Beziehung zwischen der spezifischen Wärmekapazität von Steinsalz und der Temperatur /HEE 14/.....	91
Abb. 6.12	Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Steinsalz.....	95
Abb. 6.13:	Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechselagerung (I/S) einer Bentonit-Formation bzw. eines Tongesteins in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur als Maß für den Fortschritt der Illit-Smektit-Reaktion unter geologischen Bedingungen /ŠUC 93/	99
Abb. 6.14	Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (Kd) zur Beschreibung der Sorption (REE und Eu sind Lanthanoide) /JOB 15a/	111
Abb. 6.15	Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91/, /SUL 02/.....	113
Abb. 6.16	Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Tongestein.....	116
Abb. 6.17	Relative Längenausdehnung gegen die Temperatur.....	128
Abb. 6.18	Temperatur- und druckabhängiger Siedepunkt (Phasenübergang) für Wasser /LID 04/	133
Abb. 9.1	Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Steinsalz.....	175
Abb. 9.2	Temperaturabhängigkeit wichtiger THMCB-Prozesse im Tongestein.....	176
Fig. 10.1	Temperature dependence of relevant THMCB-Processes in rock salt ...	181
Fig. 10.2	Temperature dependence of relevant THMCB-Processes in clay rock ..	181

Abb. A 1	Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechselagerung (I/S) einer Bentonit-Formation bzw. eines Tongesteins in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur als Maß für den Fortschritt der Illit-Smektit-Reaktion unter geologischen Bedingungen /ŠUC 93/.....	253
Abb. A 2	Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechselagerung (I/S) einer Bentonit-Formation in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur und Zeit bei einer Kalium-Konzentration von 0.01 mM und einer Aktivierungsenergie von 25 kcal/mol.....	256
Abb. A 3	Sedimentationsvolumina eines unbehandelten („unsteamed“) und eines für 11 Tage auf unterschiedliche Temperaturen erhitzten Bentonits /OSC 89/.....	259
Abb. A 4	Partieller CO ₂ -Druck (bar) in Abhängigkeit von den Umgebungstemperaturen in Sedimentformationen /COU 98/.....	263
Abb. A 5	Gleichgewichtsänderungen infolge der Karbonat-Ton-Reaktion: (a) im Gleichgewicht ist eine separate CO ₂ -Gasphase nicht vorhanden; (b) ein neues Gleichgewicht mit einem Partialdruck der Gasphase über dem Fluidruck der wässrigen Phase stellt sich ein; (c) eine separate CO ₂ -Gasphase bildet sich and migriert nach oben aufgrund des hydrostatischen Auftriebs /CER 17/.....	264
Abb. A 6	links: Freisetzung der thermolabilen CO ₂ -Fraktion /LOR 08/ rechts: CO ₂ -Freisetzung bei Pyrolyse /BRU 12/.....	265
Abb. A 7	Prognostizierte Änderung der CO ₂ -Freisetzung im Boom Clay mit Temperatur /LOR 08/.....	266
Abb. A 8	CO ₂ -Freisetzung (mg pro g des organischen Kohlenstoffes) aus einer Boom Clay Probe /BRU 12/.....	266
Abb. A 9	Dauer einer trockenen bzw. feuchten thermischen Behandlung (min), die zu einer zehnfachen Abnahme der Anzahl der Endosporen des <i>Bacillus subtilis</i> führt, in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur /NIC 00/.....	273
Abb. A 10	Expansion, Kontraktion und Wasserfreisetzung im Opalinuston als eine Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/)......	276
Abb. A 11	Thermisch induzierte Porenwasserdruckänderungen im in-situ Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.....	277
Abb. A 12	Deformation des Opalinustons während der Erhitzung und Abkühlung im in-situ Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.....	277

Abb. A 13	Expansion und Kontraktion des Callovo-Oxfordian-Tongesteins als eine Funktion der Temperatur in drainierten (links) und annähernd undrainierten (rechts) triaxialen Deformationsversuchen (d=days, positive Werte auf der x-Achse entsprechen einer Kontraktion) /ZHA 10/.....	279
Abb. A 14	Wasserpermeabilität der aus einer Störungslette entnommenen Tongesteinsprobe in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Fluiddruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/ (die gestrichelte Linie zeigt den Trend für Argon unter gleichen Versuchsbedingungen).....	280
Abb. A 15	Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91/, /SUL 02/.....	281
Abb. A 16	Volumetrisches Verhalten des aus einer Störungslette entnommenen Tons über Temperatur in Abhängigkeit vom Fluiddruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/.....	282
Abb. A 17	Experimentell bestimmte Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (K_d) des Cs, Eu, Ni und der REE (Lanthanide, die als chemische Analoga von dreiwertigen Actiniden dienen) für Montmorillonit und Kaolinit /TER 05/, /TER 06/ sowie des Cs für Hanford-Site-Sediment, USA /LIU 03/ aus /JOB 15a/.....	284
Abb. A 18	Aufeinander folgende Zyklen der CO ₂ -Desorption nach jeweiliger CO ₂ -Sorptions bei 35 °C für 1 Stunde /YES 17/.....	285

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Auslegung von Endlagerkonzepten	65
Tab. 6.1	FEP Katalog für Endlagerkonzepte im Steinsalz nach /WOL 12/	68
Tab. 6.2	FEP-Liste für Tongestein nach /JOB 17a/	97
Tab. 6.3	FEP-Liste für Endlagersysteme im Kristallingestein (Option „multipler ewG“) /GRS 18/	118
Tab. 7.1	Thermische Anforderung (Grubenklimabedingungen für Bergleute untertage) nach Klimaberg-Verordnung /BMJV 83/	136
Tab. 7.2	Endlagerflächenbedarf nach /DBE 16a/	143
Tab. 7.3	Beispiele für mögliche Auswirkungen höher gewählter Auslegungstemperaturen für ein Endlagerkonzept und ihre Auswirkungen im Hinblick auf die Durchführung der Rückholung oder Bergung von Abfallbehältern.....	147

13 Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Abschlussbericht. 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /ALT 04a/ Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, D., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V., Richter, A.: Sicherheitstechnische Einzelfragen, Geochemische Prozesse bei der Ausbreitung von Schadstoffen aus einem Endlager für radioaktive Abfälle, Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), Forschungszentrum Rossendorf - Institut für Radiochemie (IfR), FZK-INE 002/04, 520 S., 20. September 2004.
- /ALT 04b/ Altmaier, M., Neck, V., Fanghänel, T.: Solubility and colloid formation of Th(IV) in concentrated NaCl and MgCl₂ solution. Radiochimica Acta, Bd. 92, 9-11, S. 537–543, DOI 10.1524/ract.92.9.537.54983, 2004.
- /ALT 16/ Alt, S., Kallenbach-Herbert, B., Ustohalova, V.: Bewertung der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur unter Vorsorgeaspekten, Rev. 02, BMUB-Vorhaben UM16E03210. Öko-Institut e.V., 69 S.: Darmstadt, 31. Oktober 2016.
- /AME 04/ Amelung, P., Biurrun, E., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Müller-Hoeppe, N., Ziegenhagen, J.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein (02 E 9511), Abschlussbericht Hauptband. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Stephan Schmidt KG, 235 S.: Peine, Dezember 2004.
- /AME 07/ Amelung, P., Jobmann, M., Uhlig, L.: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland, - GENESIS -, Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 67 S., März 2007.

- /AND 91/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA):
RÈGLE N° III.2.f. 11 S., 20. Juni 1991.
- /AND 05a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dos-
sier 2005 Argile, Les recherches de l' Andra sur le stockage géologique des
déchets radioactifs a haute activité et á vie longue, Résultats et perspec-
tives. Collection les Rapports, 36 S., ISBN 2-9510108-7-7: Châtenay-Mala-
bry Cedex, France, Juni 2005.
- /AND 05b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dos-
sier 2005 Argile, Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological re-
pository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site. Collection
les Rapports, Bd. 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry,
France, 2005.
- /AND 05c/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dos-
sier 2005 Granite, Tome: Phenomenological evolution of a geological repo-
sitory. Report Series, 198 S., December 2005.
- /AND 05d/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dos-
siet 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological re-
pository. Report Series, C.RP.ADP.04.0001, 495 S., ISBN 2-9510108-7-
70108-8-5: Châtenay-Malabry, France, Dezember 2005.
- /AND 05e/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dos-
sier 2005 Granite, Synthesis, Assets of granite formations for deep geologi-
cal disposal. 161 S., June 2005.
- /AND 09/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA):
JALON 2009 HA-MAVL - Options de conception du stockage en formation
géologique profonde. C.NSY.ASTE.08.0429.A, 115 S., 2009.
- /AND 13/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): The
Cigeo Project, Meuse/Haute-Marne reversible geological disposal facility
for radioactive waste. 104 S., Juli 2013.

- /AND 14/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): ÉVALUATION DES COÛTS AFFÉRENTS A LA MISE EN OEUVRE DES SOLUTIONS DE GESTION A LONG TERME DES DÉCHETS RADIOACTIFS DE HAUTE ET DE MOYENNE ACTIVITÉ A VIE LONGUE, Proposition de l'Andra Tome 1. 306 S., Octobre 2014.
- /AND 16a/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Position Paper on Reversibility. 32 S., Januar 2016.
- /AND 16b/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Cigéo Project, Deep geological disposal facility for radioactive waste in Meuse / Haute-Marne departments. 22 S., September 2016.
- /AND 16c/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier d'option de sûreté – Partie après fermeture (DOS-AF). CG-TE-D-NTE-AMOA-SR2-0000-15-0062/A, 468 S., 8. April 2016.
- /AND 16d/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier d'options de sûreté – Partie exploitation (DOS-Expl). CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060/A, 520 S., 8. April 2016.
- /ARO 06/ Arostegui, J., SanGüesa, F. J., Nieto, F., Uriarte, J. A.: Thermal models and clay diagenesis in the Tertiary-Cretaceous sediments of the Alava block (Basque-Cantabrian basin, Spain). Clay Minerals, Bd. 41, Nr. 4, S. 791–809, DOI 10.1180/0009855064140219, 2006.
- /ARO 14/ Arora, P., Ranade, D. R., Dhakephalkar, P. K.: Development of a microbial process for the recovery of petroleum oil from depleted reservoirs at 91–96°C. Bioresource technology, Bd. 165, S. 274–278, DOI 10.1016/j.biortech.2014.03.109, 2014.
- /ASN 16/ Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN): Retrievability_ASN opinion 2016-AV-0267 of 31st May 2016 on the reversibility of deep geological disposal of radioactive waste. 3 S., 31. Mai 2016.

- /ATG 17/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I 1985, Nr. 41, S. 1565-1583), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, S. 2808).
- /BAL 91/ Baldi, G., Hueckel, T., Peano, A., Pellegrini, R.: Developments in modelling of thermo-hydro-geomechanical behaviour of Boom clay and clay-based buffer materials. European Commission (EC), Nuclear Science and Technology, 142 S., ISBN 92-826-0582-2: Luxemburg, 1991.
- /BAR 17/ Barré, G., Truche, L., Bazarkina, E. F., Michels, R., Dubessy, J.: First evidence of the trisulfur radical ion S₃⁻ and other sulfur polymers in natural fluid inclusions. *Chemical Geology*, Bd. 462, S. 1–14, DOI 10.1016/j.chemgeo.2017.03.027, 2017.
- /BEL 01/ Bel, J., Bernier, F.: Temperature Criterion Related to Clay Based Backfill Materials in the Framework of a Geological Repository of Heat Producing Radioactive Waste (HLW). In: ASME (Hrsg.): Proceedings 8th International Conference on Radioactive Waste Management & Environmental Remediation: Bruges, S. 1327–1331, 2001.
- /BER 15/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Simo, E., Fahland, S., Hammer, J., Heusermann, S., Kühnlenz, T., Mrugalla, S., Reinhold, K., Buhmann, D., Kindlein, J., Mönig, J., et al.: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA, Zwischenbericht Dezember 2015, FKZ 02E11395/02E11405. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-37-2015-Z, 105 S.: Peine, Dezember 2015.
- /BER 17/ Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Kuate, E. S.: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD). DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2017-AB, 240 S.: Peine, September 2017.

- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung für die Endlagervariante AB1, Kammerlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Südwestflügel und Streckenlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle im Nordostflügel des Salzstockes Gorleben, Zwischenbericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFE 08/ Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil, Revision vom 30. November 2011. 92 S.: Bern, 2. April 2008.
- /BGE 18/ BGE TEC: Geschäftsbericht BGETEC 2017. 36 S.: Peine, 25. April 2018.
- /BIR 40/ Birch, F., Clark, H.: The Thermal Conductivity of Rocks and its Dependence upon Temperature and Composition. American Journal of Science, Bd. 238, S. 529–558, DOI 10.2475/ajs.238.8.529, August 1940.
- /BIR 08/ Birgersson, M., Karnland, O., Nilsson, U.: Freezing in saturated bentonite, A thermodynamic approach. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 33, S. 527, DOI 10.1016/j.pce.2008.10.025, 14. Oktober 2008.
- /BIR 10/ Birgersson, M., Karnland, O., Nilsson, E.: Freezing of bentonite, Experimental studies and theoretical considerations. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-10-40: Stockholm, 1. Januar 2010.
- /BMJV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), zuletzt geändert 9. Juni 1983 (BGBl. I 1983, S. 685).
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

- /BMUB 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, Nationales Entsorgungsprogramm. 26 S., August 2015.
- /BOD 08/ Bodenez, P., Rieu, J., Niel, J. C.: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Hrsg.: Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), 32 S., 12. Februar 2008.
- /BOL 04/ Bollingerfehr, W., Ziegenhagen, J., Skrzypek, J., Schlickerrieder, L., Chapman, N., Sjöblom, R., Svemar, C., Nirvin, B.: Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager, - Fachbericht Literaturrecherche -. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 241 S., 30. September 2004.
- /BOL 08/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M., Wehrmann, J.: Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, Arbeitspaket AP 1.2, Projekt ISIBEL. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 176 S.: Peine, 1. April 2008.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte, Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), GRS-272, 187 S., ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 6. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-281, 285 S.: Köln, 2012.

- /BOL 14/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11112. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-21-2013-AB, 140 S.: Peine, Februar 2014.
- /BOL 17/ Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Dörr, S., Filbert, W., Gehrke, A., Heemann, U., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Rübel, A., Weber, J. R., Wolf, J.: Evaluation of methods and tools to develop safety concepts and to demonstrate safety for an HLW repository in salt (KOMTESSA), Final Report, FKZ 02E10719 & 02E10729. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-03-2017-AB, 256 S.: Peine, März 2017.
- /BOU 14/ Bourdelle, F., Truche, L., Pignatelli, I., Mosser-Ruck, R., Lorgeoux, C., Roszypal, C., Michau, N.: Iron–clay interactions under hydrothermal conditions, Impact of specific surface area of metallic iron on reaction pathway. *Chemical Geology*, Bd. 381, S. 194–205, DOI 10.1016/j.chemgeo.2014.05.013, 2014.
- /BOU 17/ Bourdelle, F., Mosser-Ruck, R., Truche, L., Lorgeoux, C., Pignatelli, I., Michau, N.: A new view on iron-claystone interactions under hydrothermal conditions (90 °C) by monitoring in situ pH evolution and H₂ generation. *Chemical Geology*, Bd. 466, S. 600–607, DOI 10.1016/j.chemgeo.2017.07.009, 2017.
- /BOW 09/ Bowers, K. J., Mesbah, N. M., Wiegel, J.: Biodiversity of Polyextremophilic Bacteria, Does combining the Extremes of High Salt, alkaline pH and elevated Temperature Approach a Physicochemical Boundary for Life? *Saline Systems*, Bd. 5, Nr. 9, 2009.
- /BOW 11/ Bowers, K. J., Wiegel, J.: Temperature and pH optima of extremely halophilic archaea, A mini-review. *Extremophiles*, Bd. 15, Nr. 2, S. 119–128, DOI 10.1007/s00792-010-0347-y, 2011.

- /BRA 62/ Braitsch, O.: Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen, Bd. 3, 232 S., Springer Verlag: Berlin, 1962.
- /BRA 08a/ Brassler, T., Fein, E., Herbert, H.-J., Miehe, R., Müller-Lyda, I., Noseck, U., Schmidt, U., Rübcl, A.: Anhang Parameter, Messmethoden und Bedeutung. In: Müller-Lyda, I., Sailer, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.
- /BRA 08b/ Brassler, T., Herbert, H.-J., Miehe, R., Schmidt, G.: Anhang Wirtsgesteine, Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften. In: Müller-Lyda, I., Sailer, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.
- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H. C.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben, Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-285, 99 S., ISBN 978-3-939355-61-8: Köln, 2012.
- /BRA 14a/ Brassler, T., Fahrenholz, C., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, H., Noseck, U., Schönwiese, D., Wolf, J.: Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz, Teil 1: Generelle Studie (2011) und Teil 2: Detailstudien (2012 - 2013), BMWi-Vorhaben FKZ 02E10719. GRS-365, 243 S., ISBN 9783944161464, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig, Dezember 2014.
- /BRA 14b/ Bradbury, M. H., Berner, U., Curti, E., Hummel, W., Kosakowski, G., Thoenen, T.: The long term geochemical evolution of the nearfield of the HLW repository. NAGRA, Nagra Technischer Bericht, 12-01, 134 S.: Wcttingen, November 2014.

- /BRÄ 16/ Bräuer, V., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., et al.: Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit, Beratung der Endlagerkommission, 9S2014010000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Material für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 55, 62 S.: Hannover, März 2016.
- /BRE 07/ Brennecke, P., Rothfuchs, T. (Hrsg.): Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Proceedings. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, 06. - 09. November 2007, GRS-S-49, ISBN 978-3-939355-19-9, 2007.
- /BRO 50/ Broughton, J. G.: Observations on the intrusion of rock salt by peridotite. Transactions, American Geophysical Union, Bd. 31, Nr. 2, S. 229, DOI 10.1029/TR031i002p00229, 1950.
- /BRU 12/ Bruggeman, C., Craen, M. de: Boom Clay natural organic matter. Studiecentrum voor Kernenergie Centre D'Etude De L'Energie Nucleaire (SCK-CEN): Mol, Juni 2012.
- /BUH 08/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J. R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M.: Zusammenfassender Abschlussbericht, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-09-2008-AB: Braunschweig, April 2008.
- /BUND 17/ Deutscher Bundestag (BT): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Beschlussvorlage, Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Drucksache des deutschen Bundestages, 18/11398, 80 S.: Berlin, 7. März 2017.

- /BUR 16/ Burlaka, V., Jobmann, M., Meleshyn, A., Rübeler, A.: Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Arbeitsbericht, TEC-13-2016-B, 85 S.: Peine, 4. Juli 2016.
- /BUS 08/ Busch, A., Alles, S., Gensterblum, Y., Prinz, D., Dewhurst, D. N., Raven, M. D., Stanjek, H., Krooss, B. M.: Carbon dioxide storage potential of shales. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Bd. 2, Nr. 3, S. 297–308, DOI 10.1016/j.ijggc.2008.03.003, 2008.
- /BUS 16/ Busch, A., Bertier, P., Gensterblum, Y., Rother, G., Spiers, C. J., Zhang, M., Wentinck, H. M.: On sorption and swelling of CO₂ in clays. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, Bd. 2, Nr. 2, S. 111–130, DOI 10.1007/s40948-016-0024-4, 2016.
- /CER 17/ Ceriotti, G., Porta, G. M., Geloni, C., Dalla Rosa, M., Guadagnini, A.: Quantification of CO₂ generation in sedimentary basins through carbonate/clays reactions with uncertain thermodynamic parameters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 213, S. 198–215, DOI 10.1016/j.gca.2017.06.015, 2017.
- /ČER 82/ Čermák, V., Rybach, L.: Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. In: Angenheister, G. (Hrsg.): *Physikalische Eigenschaften der Gesteine. Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Bd. 1, S. 305–343, Springer Verlag: Berlin, 1982.
- /CHA 10/ Chastain, B. K., Kral, T. A.: Zero-valent iron on Mars: an alternative energy source for methanogens. *Icarus*, Bd. 208, S. 198–201, DOI 10.1016/j.icarus.2010.02.024, 2010.
- /CHI 08/ Chi Fru, E., Athar, R.: In situ bacterial colonization of compacted bentonite under deep geological high-level radioactive waste repository conditions. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Bd. 79, S. 499–510, 2008.
- /CHO 99/ Cho, W. J., Lee, J. O., Chun, K. S.: The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite. *Applied Clay Science*, Bd. 14, 1-3, S. 47–58, DOI 10.1016/S0169-1317(98)00047-7, 1999.

- /CHO 16/ Cho, W.-J., Kim, G. Y.: Reconsideration of thermal criteria for Korean spent fuel repository. *Annals of Nuclear Energy*, Bd. 88, 73-82, DOI 10.1016/j.anucene.2015.09.012, 2016.
- /CIT 19/ ohne Autor: Citavi. erreichbar unter <https://www.citavi.com/de>, abgerufen am 23. Januar 2019.
- /CIT 17/ Swiss Academic Software GmbH: Citavi 5 Handbuch. Stand vom 3. Mai 2017, erreichbar unter <https://www.citavi.com/sub/manual5/de/index.html>, abgerufen am 17. August 2017.
- /CLA 14/ Clauer, N., Honty, M., Fallick, A. E., Šucha, V., Aubert, A.: Regional illitization in bentonite beds from the east slovak basin based on isotopic characteristics (k-ar, $\delta^{18}\text{o}$ and δd) of illite-type nanoparticles. *Clay Minerals*, Bd. 49, Nr. 02, S. 247–275, DOI 10.1180/claymin.2014.049.2.07, 2014.
- /CNS 06/ Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC-CCSN): Regulatory Guide G-320: Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management. 48 S.: Ottawa, Kanada, Dezember 2006.
- /COC 16/ Coccia, C. J. R., McCartney, J. S.: Thermal volume change of poorly draining soils I, Critical assessment of volume change mechanisms. *Computers and Geotechnics*, Bd. 80, DOI 10.1016/j.compgeo.2016.06.009, 2016.
- /COL 97/ Colwell, F. S., Onstott, T. C., Delwiche, M. E., Chandler, D., Fredrickson, J. K., Yao, Q. J., McKinley, J. P., Bone, D. R., Griffiths, R., Phelps, T. J., Ringelberg, D., White, D. C., LaFreniere, L., Balkwill, D., et al.: Microorganisms from deep, high temperature sandstones: constraints on microbial colonization. *FEMS Microbiology Reviews*, Bd. 20, S. 425–435, DOI 10.1016/S0168-6445(97)00024-7, 1997.
- /COL 11/ Collo, G., Dávila, F. M., Nóbile, J., Astini, R. A., Gehrels, G.: Clay mineralogy and thermal history of the Neogene Vinchina Basin, central Andes of Argentina, Analysis of factors controlling the heating conditions. *Tectonics*, Bd. 30, Nr. 4, S. n/a-n/a, DOI 10.1029/2010TC002841, 2011.

- /COU 85a/ Couture, R. A.: Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. *Nature*, Bd. 318, S. 50–52, DOI 10.1038/318050a0, 1985.
- /COU 85b/ Couture, R. A.: Rapid increases in permeability and porosity of bentonite-sand mixtures due to alteration by water vapor. In: Jantzen, C. M., Stone, J. A., Ewing, R. C., Stone, J. A. (Hrsg.): *Scientific basis for nuclear waste management VIII*, Symposium held November 26-29, 1984, Boston, Massachusetts, U.S.A. *International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, Boston, Massachusetts, U.S.A., 26.-29.11.1984, Materials Research Society symposia proceedings, Nr. 44, ISBN 9780931837098, Materials Research Society: Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.
- /COU 98/ Coudrain-Ribstein, A., Gouze, P., Marsily, G. de: Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. *Chemical Geology*, Bd. 145, 1-2, S. 73–89, DOI 10.1016/S0009-2541(97)00161-7, 1998.
- /CRO 04/ Cross, M. M., Manning, D. A., Bottrel, S. H., Worden, R. H.: Thermochemical sulphate reduction (TSR): experimental determination of reaction kinetics and implications of the observed reaction rates for petroleum reservoirs. *Organic Geochemistry*, Bd. 35, S. 393–404, DOI 10.1016/j.orggeochem.2004.01.005, 2004.
- /CUA 06/ Cuadros, J.: Modeling of smectite illitization in burial diagenesis environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 70, Nr. 16, S. 4181–4195, DOI 10.1016/j.gca.2006.06.1372, 2006.
- /CUE 01/ Cuevas, J., Garralón, A., Ramírez, S., Leguey, S.: Hydrothermal alteration of a saponitic bentonite, Mineral reactivity and evolution of surface properties. *Clay Minerals*, Bd. 36, Nr. 01, S. 61–74, DOI 10.1180/000985501547358, 2001.
- /CUI 11/ Cui, Y.-J., Tang, A.-M., Li-Xin, Q., Wei-Min, Y., Chen, B.: Thermal-Mechanical Behaviour of Compacted GMZ Bentonite. *Soils and Foundations*, Bd. 51, Nr. 6, S. 1065–1074, DOI 10.3208/sandf.51.1065, 2011.

- /CZY 94/ Czycinski, K., Danker, W.: The United States program for the geological disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. *Kerntechnik* (1987), Bd. 59, 1-2, S. 56–63, 1994.
- /DAEF 16/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF): DAEF-Kurzstellungnahme zur Veröffentlichung, "Deformation-assisted fluid percolation in rock salt", (erschienen in *Science* am 30.11.2015). 12 S., April 2016.
- /DBE 16a/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Material für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.
- /DBE 16b/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Geschäftsbericht 2016. 20 S., 2016.
- /DEP 16/ Depaus, C., Wacquir, W., Raymaekers, D.: Evolution of the lay-out of the Belgian geological repository to improve the operational safety, Joint NEA / IAEA Workshop Operational Safety of Geological Repositories Session 5.1.d. Präsentation, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), International Atomic Energy Agency (IAEA): Paris, 1. Juli 2016.
- /DER 12/ Derkowski, A., Drits, V. A., McCarty, D. K.: Rehydration of dehydrated-dehydroxylated smectite in a low water vapor environment. *American Mineralogist*, Bd. 97, S. 110–127, DOI 10.2138/am.2012.3872, 2012.
- /DIN 04/ Dinh, H. T., Kuever, J., Mußmann, M., Hassel, A. W., Stratmann, M., Widdel, F.: Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature*, Bd. 427, S. 829–832, 2004.
- /DMT 13/ Deutsche Montan Technologie (DMT): Konkretisierung der Machbarkeitsstudie zum optionalen Vorgehen bei der Rückholung der LAW-Gebinde, Zwischenbericht zu den Arbeitspaketen AP 3 und AP 4 Variantenvergleich. 45 S., 2. Dezember 2013.

- /DOE 11/ U.S. Department of Energy (DOE): A Management Proposal for Salt Disposal Investigations with a Field Scale Heater Test at WIPP. DOE/CBFO-11-3470, 69 S., Juni 2011.
- /DRI 02/ Drief, A., Martinez-Ruiz, F., Nieto, F., Sanchez, N. V.: Transmission Electron Microscopy evidence for experimental Illitization of Smectite in K-enriched seawater solution at 50°C and basic pH. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 50, Nr. 6, S. 746–756, DOI 10.1346/000986002762090146, 2002.
- /DUA 06/ Duan, J., Hou, B., Yu, Z.: Characteristics of sulfide corrosion products on 316L stainless steel surfaces in the presence of sulfate-reducing bacteria. *Materials Science and Engineering: C*, Bd. 26, Nr. 4, S. 624–629, DOI 10.1016/j.msec.2005.09.108, 2006.
- /EIS 03/ Eisenburger, D., Grisseemann, C.: Projekt Gorleben - Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermophysikalischen und elektrischen Gesteinsparameter. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 2003.
- /ELH 10/ El Hajj, H., Abdelouas, A., Grambow, B., Martin, C., Dion, M.: Microbial corrosion of P235GH steel under geological conditions. *Physics and Chemistry of the Earth*, Bd. 35, S. 248–253, DOI 10.1016/j.pce.2010.04.007, 2010.
- /ENG 95/ Engelmann, H.-J., Biurrun, E., Hubert, R., Pohler, M.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8371), Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), DEAB T 57, 76 S.: Peine, Februar 1995.
- /ENG 17/ Engelhardt, H. J., Haverkamp, B., Gasull, R., Raymaekers, D.: Logistic simulation of Underground Operation of Future Belgian Geological Repository. In: American Nuclear Society (ANS) (Hrsg.): 16th International High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM 2017). *International High-Level Radioactive Waste Management*, Charlotte, April 9-13, 2017, ISBN 978-0-89448-742-2, 2017.

- /ENSI 09a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis., Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 21 S.: Brugg, April 2009.
- /ENSI 09b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis., Erläuterungsbericht zur Richtlinie. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 22 S.: Brugg, April 2009.
- /ENSI 13a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Technisches Forum Sicherheit diskutiert Rückholbarkeit aus Tiefenlager. 13. September 2013.
- /ENSI 13b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Klimatische Verhältnisse (Gesundheitsschutz), Frage 105: Machbarkeit langer Zugangsbauwerke. 1 S., Stand vom 18. Juni 2013, erreichbar unter www.ensi.ch/de/technisches-forum/machbarkeit-langer-zugangsbauwerke/, abgerufen am 24. August 2018.
- /ENSI 16/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Evaluation des Einflusses bestehender Abfallbehälter SMA auf Lagerkonzept und Langzeitsicherheit. Technisches Forum Sicherheit, Frage 110, 4 S.: Brugg, erreichbar unter <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/evaluation-des-einflusses-bestehender-abfallbehaelter-sma-auf-lagerkonzept-und-langzeitsicherheit/>, abgerufen am 23. Oktober 2018.
- /ESK 11/ Entsorgungskommission (ESK) - Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL): Rückholung/Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. 45 S., 2. September 2011.
- /ESK 16/ Entsorgungskommission (ESK): Stellungnahme der ESK - Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung. 61 S., 12. Mai 2016.

- /FANC 01/ General Regulation for the protection of the public, workers and the environment against the hazards of ionizing radiation, as amended, zuletzt geändert 20. Juli 2001.
- /FANC 11/ Safety requirements for nuclear installations (SRNI), zuletzt geändert 30. November 2011.
- /FAß 17a/ Faß, T.: Endlagerkonzept im Kristallin (Schweden), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 44 S.: Köln, August 2017.
- /FAß 17b/ Faß, T., Hartwig-Thurat, E., Krischer, A., Lambers, L., Larue, P.-J., Uhlmann, S., Weyand, T.: Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Abschlussbericht zum Vorhaben 3616E03200. GRS-471, 74 S., ISBN 978-3-946607-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, August 2017.
- /FAU 03/ Faulkner, D., Rutter, E., Faulkner, D. R.: The effect of temperature, the nature of the pore fluid, and subyield differential stress on the permeability of phyllosilicate-rich fault gouge. *Journal of Geophysical Research*, Bd. 108, B5, DOI 10.1029/2001JB001581, 2003.
- /FAV 16/ Favero, V., Ferrari, A., Laloui, L.: Thermo-mechanical volume change behaviour of Opalinus Clay. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Bd. 90, S. 15–25, DOI 10.1016/j.ijrmms.2016.09.013, 2016.
- /FED 14/ Federal Agency for Nuclear Control on behalf of Belgium: Fifth meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, NATIONAL REPORT. 142 S., Oktober 2014.
- /FIL 17/ Filipská, P., Zeman, J., Všianský, D., Honty, M., Škoda, R.: Key processes of long-term bentonite-water interaction at 90 °C, Mineralogical and chemical transformations. *Applied Clay Science*, Bd. 150, S. 234–243, DOI 10.1016/j.clay.2017.09.036, 2017.

- /FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3536: Köln, 1. Dezember 2010.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /FIS 16/ Fischer, B., Jäger, G.: Sondervotum zu dem Abwägungskriterium "Gute Temperaturverträglichkeit". In: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, S. 506: Berlin, August 2016.
- /FIS 17/ Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Faß, T., Larue, P.-J., Mayer, K.-M., Seher, H., Hartwig-Thurat, E.: Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-478, ISBN 978-3-946607-61-8: Köln, Oktober 2017.
- /FRA 91/ Law no 91-1381 of 12/30/1991 concerning researches on radioactive waste management (Waste Act "Loi Bataille"), zuletzt geändert 30. Dezember 1991.
- /FRA 09/ François, B., Laloui, L., Laurent, C.: Thermo-hydro-mechanical simulation of ATLAS in situ large scale test in Boom Clay. Computers and Geotechnics, Bd. 36, Nr. 4, S. 626–640, DOI 10.1016/j.compgeo.2008.09.004, 2009.

- /FRA 18/ Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (1), NOR: DEVX0100081L, Version consolidée au 18 juillet 2018 in der Fassung vom 16. Juni 2006, zuletzt geändert 18. Juli 2018.
- /FRE 06/ Freyer, D., Voigt, W., Böttge, V.: Zur thermischen Stabilität von Tachhydrit und Carnallit. In: Verband der Kali- und Salzindustrie e.V. (VKS): Kali und Steinsalz. Nr. 1, S. 29–36, 2006.
- /FRÖ 15/ Fröhlich, D. R.: Sorption of Neptunium on Clays and Clay Minerals – A Review. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 63, Nr. 4, S. 262–276, DOI 10.1346/CCMN.2015.0630402, 2015.
- /GAR 09/ García-García, S., Wold, S., Jonsson, M.: Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. *Applied Clay Science* 43, Nr. 1, S. 21–26, DOI 10.1016/j.clay.2008.07.011, 2009.
- /GEL 30/ Geller, A.: Das Schmelzen von Salzen hohen Drücken in seiner Bedeutung für den Vorgang der Salzmetamorphose. *Fortschritte der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie*, Bd. 14, S. 143, 1930.
- /GEV 81/ Gevantman, L. H., Lorenz, J., Haas, J. L., Clynne, M. A., Potter, R. W., Schafer, C. M., Tomkins, R. P. T., Shakoor, A., Hume, H. R., Yang, J. M., Li, H. H., Matula, R. A.: *Physical Properties Data for Rock Salt*. Natural Bureau of Standards (NBS), NBS Monograph, Nr. 167, 282 S.: Washington, Januar 1981.
- /GHA 15/ Ghanbarzadeh, S., Hesse, M. A., Prodanović, M., Gardner, J. E.: Deformation-assisted fluid percolation in rock salt. *Science*, Bd. 350, Nr. 6264, S. 1069–1072, DOI 10.1126/science.aac8747, 2015.
- /GMA 04/ Gmal, B., Hesse, U., Hummelsheim, K., Kilger, R., Krzykacz-Hausmann, B., Moser, E. F.: Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3240: München, 1. Dezember 2004.

- /GOU 16/ Goult, N. R., Sargent, C., Andras, P., Aplin, A. C.: Compaction of diagenetically altered mudstones – Part 1, Mechanical and chemical contributions. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 77, S. 703–713, DOI 10.1016/j.marpetgeo.2016.07.015, 2016.
- /GRA 98/ Grambow, B.: Vorläufiger Quellterm Glas, Beschreibung der kinetischen Barrierenwirkung von HAW-Glas im integrierten Nahfeldmodell, PSP Element: 213 532 100: Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement. Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe, FZK-INE 015/97: Karlsruhe, 11. November 1998.
- /GRS 18/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Projekt CHRISTA-II, Entwurf zur FEP-Liste Stand Juli 2018, Nicht veröffentlicht. 2 S.: Braunschweig, 12. April 2018.
- /GRU 00/ Grupa, J. B., Dodd, D. H., Hoorelbeke, J.-M., Mouroux, B., Potier, J. M., Ziegenhagen, J., Santiago, J. L., Alonso, J., Fernández, J. J., Zuidema, P., Crossland, I. G., McKirdy, B., Vrijen, J., Vira, J., et al.: Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories, Final report. *Nuclear Science and Technology*, EUR 19145, ISBN 92-828-9466-6, European Commission (EC): Brüssel, Juni 2000.
- /GRU 18/ Grupa, J. B., Schröder, T.: Research Planning: The Dutch OPERA safety case for disposal in clay. In: OECD/NEA: Integration Group for the Safety Case (IGSC), Safety Case Symposium, Book of Abstracts. IGSC Safety Case Symposium 2018, Rotterdam, 10.-11.10., S. 33, 2018.
- /GSG 91/ Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) in der Fassung vom 24. Januar 1991, zuletzt geändert 1. Januar 2017.
- /GSV 98/ Gewässerschutzverordnung (GSchV) in der Fassung vom 28. Oktober 1998, zuletzt geändert 1. Juni 2018.

- /GUI 04/ Guillaume, D., Neaman, A., Athelineau, M., Mosser-Ruck, R., Peiffert, C., Abdelmoula, M., Dubessy, J., Villiéras, F., Michau, N.: Experimental study of the transformation of smectite at 80 and 300°C in the presence of Fe oxides. *Clay Minerals*, Bd. 39, Nr. 1, S. 17–34, DOI 10.1180/0009855043910117, 2004.
- /GÜN 09/ Günther, R.-M.: Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz, Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens. Dissertation, 201 S., Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie: Freiberg, 1. Januar 2009.
- /HAR 17/ Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 8, 75 S.: Köln, August 2017.
- /HAV 03/ Haverkate B. R. W.: Waste Management Policy in The Netherlands, Part 4: Policy and Decision-making on (Geological) Disposal. Nuclear Research & Consultancy Group (NRG), 21018/03.55948/P, 30 S.: Petten, 17. Dezember 2003.
- /HEE 14/ Heemann, U., Kull, H., Li, S., Mieke, R., Müller, C.: VIRTUS, Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz, Anhang B Protokolle Literaturlauswertung der Daten zum thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialverhalten von Salzgesteinen und EBS-Materialien, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10890. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-354 Anhang B, 249 S., ISBN 3944161343: Braunschweig, Dezember 2014.
- /HEI 16/ Heierli, J.: A comparative study of engineering options for the disposal of high-level radioactive waste with regard to thermal effects and chemical degradation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Bd. 53, Nr. 9, S. 1276–1295, DOI 10.1080/00223131.2015.1105163, 2016.

- /HEI 17/ Heierli, J., Genoni, O.: The Role of Temperature in the Safety Case for High-Level Radioactive Waste Disposal, A Comparison of Design Concepts. *Geosciences*, Bd. 7, Nr. 4, S. 42, DOI 10.3390/geosciences7020042, 2017.
- /HER 08/ Herzog, C.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen - EUGENIA -, AP 1+2 - Zusammenstellung internationaler Konzepte zur Endlagerung in tiefen Gesteinsformationen und zugehöriger Sicherheitskonzepte. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-26-2008-AP, 72 S.: Peine, 2008.
- /HER 16/ Herold, P., Dörr, S., Kuate, E. S., Bollingerfehr, W., Filbert, W.: Technical Approach for Retrieving Heat-Generating Waste from Repositories in Salt Formations. In: *Waste Management Symposia: WM2016 Conference*. Phoenix, Arizona, USA, März 2016.
- /HEU 14/ Heuser, M., Weber, C., Stanjek, H., Chen, H., Jordan, G., Schmahl, W. W., Natzeck, C.: The interaction between bentonite and water vapor. I, Examination of physical and chemical properties. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 62, Nr. 3, S. 188–202, DOI 10.1346/CCMN.2014.0620303, 2014.
- /HIC 09/ Hicks, T.W., White, M.J., Hooker, P.J.: Role of Bentonite in Determination of Thermal Limits on Geological Disposal Facility Design. September 2009.
- /HÖK 03/ Hökmark, H., Fälth, B.: Thermal dimensioning of the deep repository, Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and near-field design on the maximum canister surface temperature. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-03-09, 79 S.: Stockholm, Schweden, 2003.
- /HÖK 09/ Hökmark, H., Lönnqvist, M., Kristensson, O., Sundberg, J., Hellström, G.: Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-09-04, 147 S.: Stockholm, Schweden, 2009.

- /HOL 97/ Holness, M. B., Lewis, S.: The structure of the halite-brine interface inferred from pressure and temperature variations of equilibrium dihedral angles in the halite-H₂O-CO₂-system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 61, Nr. 4, S. 795–804, DOI 10.1016/S0016-7037(96)00370-5, 1997.
- /HOL 10/ Holness, M. B.: Decoding dihedral angles in melt-bearing and solidified rocks. In: Forster, M. A., Gerald, J. F. (Hrsg.): *The Science of Microstructure, Part I*. Bd. 35, Nr. 35, DOI 10.3809/jvirtex.2011.00265, Research School of Earth Science, The Australian National University: Canberra, Australia, 2010.
- /HON 04/ Honty, M., Uhlík, P., Sucha, V., Caplovicova, M., Franců, J., Biron, A.: Smectite-to-illite alteration in salt-bearing bentonites (the East Slovak Basin). *clays and clay minerals*, Bd. 52, Nr. 5, S. 533–551, DOI 10.1346/CCMN.2004.0520502, 2004.
- /HOT 10/ Hotzel, S.: Behandlung der Integrität im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Salinar, 3605R02548: Verfolgung und Bewertung der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3447, 50 S.: Köln, Mai 2010.
- /HOU 85/ Houston, S. L., Houston, W. N., Williams, N. D.: Thermo-Mechanical Behavior of Seafloor Sediments. *Journal of Geotechnical Engineering*, Bd. 111, Nr. 11, S. 1249–1263, DOI 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:11(1249), 1985.
- /HUA 93/ Huang, W., Longo, J., Pevear, D.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 41, S. 162–177, DOI 10.1346/CCMN, 1993.
- /HUA 94/ Huang, W.-L., Bassett, W. A., Wu, T.-C.: Dehydration and hydration of montmorillonite at elevated temperatures and pressures monitored using synchrotron radiation. *American Mineralogist*, Bd. 79, S. 683–691, 1994.

- /HUE 02/ Hueckel, T., Pellegrini, R.: Reactive plasticity for clays: application to a natural analog of longterm geomechanical effects of nuclear waste disposal. *Engineering Geology*, Bd. 64, 195-215, 2002.
- /HUE 09/ Hueckel, T., François, B., Laloui, L.: Explaining thermal failure in saturated clays. *Géotechnique*, Bd. 59, 197-212, 2009.
- /HUN 94/ Hunsche, U., Schulze, O.: Das Kriechverhalten von Steinsalz. *Kali und Steinsalz*, Bd. 11, 8/9, 1994.
- /HUR 97/ Hurst, V. J., Pickering, S. M.: Origin and classification of Coastal Plain kaolins, southeastern USA, and the role of groundwater and microbial action. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 45, 274-285, 1997.
- /HUT 90a/ Hutcheon, I., Abercrombie, H. J., Krouse, H.R.: Inorganic origin of carbon dioxide during low temperature thermal recovery of bitumen, Chemical and isotopic evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 54, Nr. 1, S. 165–171, DOI 10.1016/0016-7037(90)90204-X, 1990.
- /HUT 90b/ Hutcheon, I., Abercrombie, H.: Carbon dioxide in clastic rocks and silicate hydrolysis. *Geology*, Bd. 18, Nr. 6, S. 541, DOI 10.1130/0091-7613(1990)018<0541:CDICRA>2.3.CO;2, 1990.
- /IAEA 93/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Spent Fuel and High Level and Alpha Bearing Wastes, Proceedings of an International Symposium on Geologic Disposal of Spent Fuel, High Level and Alpha Bearing Wastes Jointly Organized by the International Atomic Energy Agency, The Commission of the European Communities and the OECD Nuclear Energy Agency. Antwerp, 19-23 October 1992, Proceedings Series, IAEA-SM-326/54: Vienna, Austria, 1993.
- /IAEA 00/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Retrievability of high level waste and spent nuclear fuel, Proceedings of an international seminar - organized by the Swedish National Council for Nuclear Waste in co-operation with the International Atomic Energy Agency and held in Saltsjöbaden. Retrievability of high level waste, Saltsjöbaden, 24-27 October 1999, IAEA TECDOC Series, Bd. 1187, 300 S.: Vienna, Dezember 2000.

- /IAEA 07/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Retrieval, Restoration and Maintenance of Old Radioactive Waste Inventory Records. IAEA TECDOC Series, Bd. 1548, 31 S., ISBN 92-0-103407-5: Wien, 2007.
- /IAEA 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. IAEA Nuclear Energy Series, NW-T-1.19, 74 S.: Vienna, 2009.
- /IGSC 18/ OECD/NEA: Integration Group for the Safety Case (IGSC), Safety Case Symposium, Book of Abstracts. IGSC Safety Case Symposium 2018, Rotterdam, 10.-11.10., 2018.
- /IKO 09/ Ikonen, K.: Thermal Dimensioning of the repository for spent fuel, Working Report 2009-69. POSIVA Oy, 64 S., September 2009.
- /INO 05/ Inoue, A., Lanson, B., Marques-Fernandes, M., Sakharov, B. A., Murakami, T., Meunier, A., Beaufort, D.: Illite-smectite mixed-layer minerals in the hydrothermal alteration of volcanic rocks, I. One-dimensional XRD structure analysis and characterization of component layers. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 53, Nr. 5, S. 423–439, DOI 10.1346/CCMN.2005.0530501, 2005.
- /JAC 09/ Jacinto, A. C., Villar, M. V., Gómez-Espina, R., Ledesma, A.: Adaptation of the van Genuchten expression to the effects of temperature and density for compacted bentonites. *Applied Clay Science*, Bd. 42, S. 575–582, DOI 10.1016/j.clay.2008.04.001, 2009.
- /JAI 08/ Jaisi, D. P., Dong, H., Morton, J. P.: Partitioning of Fe(II) in reduced nontronite (NAu-2) to reactive sites, Reactivity in terms of Tc(VII) reduction. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 56, Nr. 2, S. 175–189, DOI 10.1346/CCMN.2008.0560204, 2008.
- /JEN 02/ Jentzsch, G.: Temperaturverträglichkeit der Gesteine, Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten. Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 28 S.: Jena, 14. Juni 2002.

- /JOB 07a/ Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M.: Investigation on thermal expansion effects in clay formations -TEE- Final Report. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technical Report, 136 S., 2007.
- /JOB 07b/ Jobmann, M., Polster, M.: The response of Opalinus clay due to heating, A combined analysis of in situ measurements, laboratory investigations and numerical calculations. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 929–936, DOI 10.1016/j.pce.2006.03.014, 2007.
- /JOB 15a/ Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Polster, M.: Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, 38 S.: Peine, 15. Dezember 2015.
- /JOB 15b/ Jobmann, M., Lommerzheim, A.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-26-2015-TB, 63 S.: Peine, 3. August 2015.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB: Peine, 20. Oktober 2016.
- /JOB 17a/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 30. März 2017.

- /JOB 17b/ Jobmann, M., Burlaka, V., Herold, P., Kuate Simo, E., Maßmann, J., Meles-hyn, A., Rübel, A., Ziefle, G.: Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle, Methode und exemplarische Berechnungen zum Sicherheitsnachweis, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-29-2016-AB, 214 S.: Peine, Februar 2017.
- /JOC 81a/ Jockwer, N.: Untersuchungen zu Art und Menge des im Steinsalz des Zechsteins enthaltenen Wassers sowie dessen Freisetzung und Migration im Temperaturfeld endgelagerter radioaktiver Abfälle. Disseratation, 134 S., Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Technische Universität Clausthal: Clausthal, 15. Juni 1981.
- /JOC 81b/ Jockwer, N.: Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Polyhalits und Kieserits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. Kali und Steinsalz, Bd. 4, S. 126–128, 1981.
- /JOD 12/ Jodin-Caumon, M.-C., Mosser-Ruck, R., Randi, A., Pierron, O., Catherineau, M., Michau, N.: Mineralogical Evolution of a Claystone After Reaction with Iron Under Thermal Gradient. Clays and Clay Minerals, Bd. 60, Nr. 5, S. 443–455, DOI 10.1346/CCMN.2012.0600501, 2012.
- /JOH 94/ Johnson, L. H., Tait, J. C., Shoesmith, D. W., Crosthwaite, J. L., Gray, M. N.: The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Engineered barriers alternatives. Hrsg.: Atomic Energy of Canada Limited, Whiteshell Laboratories, AECL-10718, COG-93-8, 422 S.: Pinawa, Manitoba, 1994.
- /JOH 02/ Johnson, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wetingen, 1. Dezember 2002.
- /JOH 05/ Johnson, L., Ferry, C., Poinssot, C., Lovera, P.: Spent fuel radionuclide source-term model for assessing spent fuel performance in geological disposal. Part I, Assessment of the instant release fraction. Journal of Nuclear Materials, Bd. 346, S. 10, 2005.

- /JØR 92/ Jørgensen, B. B., Isaksen, M. F., Jannasch, H. W.: Bacterial Sulfate Reduction Above 100°C in Deep-Sea Hydrothermal Vent Sediments. *Science*, Bd. 258, Nr. 5089, S. 1756–1757, DOI 10.1126/science.258.5089.1756, 1992.
- /JUS 14/ Justinavicius, D., Sirvydas, A., Poskas, P.: Thermal analysis of reference repository for RBMK-1500 spent nuclear fuel in crystalline rocks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Bd. 118, Nr. 2, S. 767–773, DOI 10.1007/s10973-014-3919-8, 2014.
- /KAR 09/ Karnland, O., Olsson, S., Dueck, A., Birgersson, M., Nilsson, U., Hernan-Håkansson, T., Pedersen, K., Nilsson, S., Eriksen, T. E., Rosborg, B.: Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project, Final report on the A2 test parcel. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-09-29, 296 S.: Stockholm, Sweden, 2009.
- /KAS 03/ Kashefi, K., Lovley, D. R.: Extending the Upper Temperature Limit for Life. *Science*, Bd. 301, Nr. 5635, S. 934, DOI 10.1126/science.1086823, 2003.
- /KAU 12/ Kaur, P., Chaudhri, N., Hofmann, A. W., Raczek, I., Okrusch, M., Skora, S., Baumgartner, L. P.: Two-Stage, Extreme Albitization of A-type Granites from Rajasthan, NW India. *Journal of Petrology*, Nr. 5, S. 919–948, DOI 10.1093/petrology/egs003, Mai 2012.
- /KAU 13/ Kaufhold, S., Dohrmann, R., Sandén, T., Sellin, P., Svensson, D.: Mineralogical investigations of the first package of the alternative buffer material test, I. Alteration of bentonites. *Clay Minerals*, Bd. 48, Nr. 2, S. 199–213, DOI 10.1180/claymin.2013.048.2.04, 2013.
- /KAU 17/ Kaufhold, S., Dohrmann, R., Götze, N., Svensson, D.: Characterization of the second parcel of the alternative buffer material (ABM) Experiment – I mineralogical reactions. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 65, Nr. 1, S. 27–41, DOI 10.1346/CCMN.2016.064047, 2017.
- /KEG 03/ Kernenergiegesetz (KEG) in der Fassung von 21.03.2003 (SR 732.1), zuletzt geändert am 1. Juli 2016.

- /KER 80/ Kern, H., Franke, J.-H.: Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. Glückauf Forschungshefte, Bd. 41, Nr. 6, S. 252–255, 1980.
- /KER 86/ Kern, H., Franke, J. H.: Carnallit, Thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 137, S. 1–27, 1986.
- /KER 90/ Kern, H.: Laboruntersuchungen zum thermischen und thermomechanischen Verhalten von Salzgesteinen mit H₂O-haltigen Mineralphasen des Salzstockes Gorleben, Studie im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Kiel, 1990.
- /KEV 04/ Kernenergieverordnung (KEV) in der Fassung vom 10. Dezember 2004.
- /KIE 01/ Kienzler, B., Loida, A.: Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukte - charakterisierung und Bewertung - Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte. Forschungszentrum Karlsruhe - Institut für Nukleare Entsorgung (FZK-INE), FZKA 6651, 114 S., 2001.
- /KIE 12/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste). KIT Scientific Reports, KIT-SR 7624, 92 S., ISBN 978-3-86644-907-7, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE): Karlsruhe, 2012.
- /KIE 13/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, Research and Education Reactors, for Waste Forms with Negligible Heat Producing Waste Forms and for Uranium Tails. Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE), KIT Scientific Reports, KIT-SR 7635, ISBN 978-3-86644-964-0: Karlsruhe, 2013.
- /KIM 04/ Kim, J., Dong, H., Seabaugh, J., Newell, S. W., Eberl, D. D.: Role of microbes in the smectite-to-illite reaction. Science (New York, N.Y.), Bd. 303, Nr. 5659, S. 830–832, DOI 10.1126/science.1093245, 2004.

- /KIM 10/ Kim, H.-G., Jeong, Y.-H., Kim, K.-T.: The Effects of Creep and Hydride on Spent Fuel Integrity During Interim Dry Storage. *Nuclear Engineering and Technology*, Bd. 42, Nr. 3, S. 249–258, DOI 10.5516/NET.2010.42.3.249, 2010.
- /KIN 18/ Kindlein, J., Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J.: Sicherheits- und Nachweis-konzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen, Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-Bericht, GRS-495, 75 S., ISBN 978-3-946607-80-9, April 2018.
- /KIT 18/ Karlsruher Institut für Technologie Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft (Hrsg.): PTE Berichte BMWi geförderte FuE-Vorhaben zur „Entsorgung radioaktiver Abfälle“, Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2017. 199 S., April 2018.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseman, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1, Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. *Geologisches Jahrbuch*, 147 S., ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KNO 99/ Knoblauch, C., Sahm, K., Jørgensen, B. B.: Psychrophilic sulfate-reducing bacteria isolated from permanently cold arctic marine sediments, Description of *Desulfofrigus oceanense* gen. nov., sp. nov., *Desulfofrigus fragile* sp. nov., *Desulfobaba gelida* gen. nov., sp. nov., *Desulfotalea psychrophila* gen. nov., sp. nov. and *Desulfotalea arctica* sp. nov. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 49 Pt 4, S. 1631–1643, DOI 10.1099/00207713-49-4-1631, 1999.
- /KNU 83/ Knutsson, S.: On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKBF/KBS Technical Report, TR 83-72, 55 S., 1983.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-286, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. K-Drs., Nr. 268, 684 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KOP 94/ Kopietz, J.: Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen, 2. Zwischenbericht zum BFT-Forschungsvorhaben 02 E 8421 5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Technischer Bericht, 1994.
- /KOP 95/ Kopietz, J., Greinwald, S., Bochem, M., Mors, K., Czora, C., Koß, G.: Untersuchungen thermophysikalischer und elektrischer Eigenschaften von Salzgesteinen, Abschlussbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 02E84215. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr. 114283, Tgb.-Nr. 10544/96, 69 S.: Hannover, Dezember 1995.
- /KOS 99/ Kostka, J. E., Wu, J., Nealson, K. H., Stucki, J. W.: The impact of structural Fe(III) reduction by bacteria on the surface chemistry of smectite clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 63, Nr. 22, S. 3705–3713, DOI 10.1016/S0016-7037(99)00199-4, 1999.
- /KRI 17/ Krischer, A.: Endlagerkonzept im Tonstein (Frankreich), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 2, 37 S.: Köln, Juli 2017.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K. P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager - Phase 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-254, 266 S., ISBN 978-3-939355-29-8, 2009.

- /KRU 97/ Krumholz, L. R., McKinley, J. P., Ulrich, G. A., Suflita, J. M.: Confined subsurface microbial communities in Cretaceous rock. *Nature*, Bd. 386, Nr. 6620, S. 64–66, DOI 10.1038/386064a0, 1997.
- /KUD 15/ Kudla, W.: Zur Definition der Begriffe Reversibilität / Rückholbarkeit / Bergbarkeit. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Mat 24 a, 6 S.: Berlin, April 2015.
- /KUD 16/ Kudla, W.: Sondervotum zum "Temperaturkriterium". In: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, S. 506–508: Berlin, August 2016.
- /KUL 07/ Kull, H., Jockwer, N., Zhang, C.-L., Wileveau, Y., Pepa, S.: Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Bd. 32, 8-14, S. 937–946, DOI 10.1016/j.pce.2006.04.036, 2007.
- /KUR 91/ Kurr, M., Huber, R., König, H., Jannasch, H. W.: *Methanopyrus kandleri*, gen. and sp. nov. represents a novel group of hyperthermophilic methanogens, growing at 110°C. *Arch. Microbiol.*, Nr. 156, S. 239–247, 1991.
- /KUR 04/ Kursten, B.: Results from corrosion studies on metallic components and instrumentation installed in the OPHÉLIE mock-up. Präsentation, Präsentation on EIG EURIDICE' OPHÉLIE Day, 10. Juni 2004.
- /LAN 09/ Landolt, D., Davenport, A., Payer, J., Shoesmith, D. W.: A Review of Materials and Corrosion Issues Regarding Canisters for Disposal of Spent Fuel and High-level Waste in Opalinus Clay. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 09-02, 57 S.: Wetztingen, Januar 2009.
- /LAP 97/ Lapaglia, C., Hartzell, P. L.: Stress-Induced Production of Biofilm in the Hyperthermophile *Archaeoglobus fulgidus*. *Applied and Environmental Microbiology*, Bd. 63, Nr. 8, S. 3158–3163, 1997.

- /LEE 06/ Lee, A. K., Buehler, M. G., Newman, D. K.: Influence of a dual-species bio-film on the corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, Bd. 48, Nr. 1, S. 165–178, DOI 10.1016/j.corsci.2004.11.013, 2006.
- /LEE 07/ Lee, J., Cho, D., Choi, H., Choi, J.: Concept of a Korean reference disposal system for spent fuels. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Bd. 44, 1565-1573, 2007.
- /LEE 11/ Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J., Choi, J. W., Wang, L. M.: Analyses of disposal efficiency based on nuclear spent fuel cooling time and disposal tunnel/pit spacing for the design of a geological repository. *Progress in Nuclear Energy*, Bd. 53, Nr. 4, S. 361–367, DOI 10.1016/j.pnucene.2011.01.005, 2011.
- /LEO 86/ Leoni, L., Polizzano, C., Sartori, F.: Nuclear waste repositories in clays: the Orciatice metamorphic aureole analogy. *Applied Clay Science*, Bd. 1, S. 385–408, DOI 10.1016/0169-1317(86)90013-X, 1986.
- /LER 11/ Lerouge, C., Grangeon, S., Gaucher, E. C., Tournassat, C., Agrinier, P., Guerrot, C., Widory, D., Fléhoc, C., Wille, G., Ramboz, C., Vinsot, A., Buschaert, S.: Mineralogical and isotopic record of biotic and abiotic diagenesis of the Callovian–Oxfordian clayey formation of Bure (France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 75, Nr. 10, S. 2633–2663, DOI 10.1016/j.gca.2011.02.025, 2011.
- /LEW 96/ Lewis, S., Holness, M.: Equilibrium halite-H₂O dihedral angles, High rock-salt permeability in the shallow crust? *Geology*, Bd. 24, Nr. 5, S. 431, 1996.
- /LID 04/ Lide, D. R. (Hrsg.): *CRC handbook of chemistry and physics, A ready-reference book of chemical and physical data*. 85. Aufl., 2712 S., ISBN 0849304857, CRC Press: Boca Raton, 2004.
- /LIU 03/ Liu, C., Zachara, J. M., Qafoku, O., Smith, S. C.: Effect of temperature on Cs sorption and desorption in subsurface sediments at the Hanford Site, USA. *Environmental Science & Technology*, Bd. 37, S. 2640–2645, DOI 10.1021/es026221h, 2003.

- /LIU 11/ Liu, D., Dong, H., Bishop, M. E., Wang, H., Agrawal, A., Tritschler, S., Eberl, D. D., Xie, S.: Reduction of structural Fe(III) in nontronite by methanogen *Methanosarcina barkeri*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 75, Nr. 4, S. 1057–1071, DOI 10.1016/j.gca.2010.11.009, 2011.
- /LOI 06/ Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (1), zuletzt geändert 28. Juni 2006.
- /LOI 16/ LOI no 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (1), zuletzt geändert 26. Juli 2016 (*Journal officiel de la République française* 2016, Nr. 172).
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Jobmann, M.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB, 40 S.: Peine, 28. Mai 2015.
- /LOR 08/ Lorant, F., Largeau, C., Behar, F., Cannière, P. de: Improved kinetic modeling of the early generation of CO₂ from the Boom Clay kerogen. Implications for simulation of CO₂ production upon disposal of high activity nuclear waste. *Organic Geochemistry*, Bd. 39, Nr. 9, S. 1294–1301, DOI 10.1016/j.orggeochem.2008.05.008, 2008.
- /LOV 04/ Lovley, D. R., Holmes, D. E., Nevin, K. P.: Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) Reduction. *ADVANCES IN MICROBIAL PHYSIOLOGY*, Bd. 49, S. 219–286, DOI 10.1016/S0065-2911(04)49005-5, 2004.
- /MAC 01/ Machel, H. G.: Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings, Old and new insights. *Sedimentary Geology*, Bd. 140, 1-2, S. 143–175, DOI 10.1016/s0037-0738(00)00176-7, 2001.
- /MAD 98/ Madsen, F. T.: Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. *Clay Minerals*, Bd. 33, Nr. 01, S. 109–129, DOI 10.1180/000985598545318, 1998.

- /MAR 86/ Marsily, G. de: Quantitative hydrogeology, groundwater hydrology for engineers. ISBN 0-12-208916-2, Academic Press, 1986.
- /MAS 01/ Masuda, H., Peacor, D. R., Dong, H.: Transmission electron microscopy study of conversion of smectite to illite in mudstones of the Nankai Trough: contrast with coeval bentonites. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 49, S. 109–118, 2001.
- /MAS 10/ Masurat, P., Eriksson, S., Pedersen, K.: Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste. *Applied Clay Science*, Bd. 47, 1-2, S. 58–64, DOI 10.1016/j.clay.2009.01.004, 2010.
- /MCM 92/ McMahon Peter B., Chapelle Francis H., Falls W. F., Bradley P. M.: Role of Microbial Processes in Linking Sandstone Diagenesis with Organic-rich Clays. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 62, DOI 10.1306/D4267870-2B26-11D7-8648000102C1865D, 1992.
- /MEL 11/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for longterm performance of radioactive waste repositories in clays, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10548. GRS-291, 117 S., ISBN 978-3-939355-67-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2011.
- /MEL 12/ Meleshyn, A., Noseck, U.: Radionuclide Inventory of Vitrified Waste after Spent Nuclear Fuel Reprocessing at La Hague. *Basic Issues and Current State in Germany*. GRS-Bericht, GRS-294, 149 S., ISBN 978-3-939355-71-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2012.
- /MEL 14/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for the long-term performance of high-level radioactive waste repositories in clays. In: Norris, S., Bruno, J., Cathelineau, M., Delage, P., Fairhurst, C., Gaucher, E. C., Höhn, E. H., Kalinichev, A., Lalieux, P., Sellin, P. (Hrsg.): *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Geological Society, London, Special Publications, Nr. 400, S. 179–194, ISBN 9781862396760, DOI 10.1144/SP400.6, 2014.

- /MEL 16/ Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H., Wieczorek, K.: Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, K-MAT 64, 172 S., DOI 10.13140/RG.2.1.1882.8406, Mai 2016.
- /MER 16/ Mercurio, M., Bish, D. L., Cappelletti, P., Gennaro, B. de, Gennaro, M. de, Grifa, C., Izzo, F., Mercurio, V., Morra, V., Langella, A.: The combined use of steam-treated bentonites and natural zeolites in the oenological refining process. *Mineralogical Magazine*, Bd. 80, Nr. 02, S. 347–362, DOI 10.1180/minmag.2016.080.004, 2016.
- /MIE 17/ Ministry of Infrastructure and the Environment: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, National Report of the Kingdom of the Netherlands for the Sixth Review Meeting, 6th National Report of the Netherlands. 130 S.: The Hague, October 2017.
- /MIN 10/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, Hauptband, BMBF-Vorhaben FKZ 02C1264. Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, 214 S.: Leipzig, 1. Januar 2010.
- /MIN 13/ Miningscout: Die zehn tiefsten Bergwerke der Welt - Miningscout. erreichbar unter <https://www.miningscout.de/blog/2013/10/10/die-zehn-tiefsten-bergwerke-der-welt/>, abgerufen am 23. August 2018.
- /MIN 16/ Minkley, W., Brückner, D.: Dichtheit von Salzgesteinen und Fluidperkolation. Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, 16 S., 2016.
- /MIN 18/ Minkley, W., Brückner, D., Naumann, D., Lüdeling, C.: Druckgetriebene Perkolation im Steinsalz. Präsentation, Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, 1. Statuskonferenz Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE): Berlin, 8. November 2018.

- /MOS 10/ Mosser-Ruck, R., Cathelineau, M., Guillaume, D., Charpentier, D., Rousset, D., Barres, O., Michau, N.: Effects of Temperature, pH, and Iron/Clay and Liquid/Clay Ratios on Experimental Conversion of Dioctahedral Smectite to Berthierine, Chlorite, Vermiculite, or Saponite. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 58, Nr. 2, S. 280–291, DOI 10.1346/CCMN.2010.0580212, 2010.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, 169 S., ISBN 978-3-939355-51-9: Köln, 2011.
- /NAG 85/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Projekt GEWÄHR 1985, Endlager für hochaktive Abfälle, Das System der Sicherheitsbarrieren. Projektberichte GEWÄHR, NGB 85-04, 345 S.: Baden, Januar 1985.
- /NAV 13/ Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Fischer, H., Hotzel, S., Kock, I., Seher, H.: Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern, Abschlussbericht zum Vorhaben 3609R03210. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3705: Köln, 1. Januar 2013.
- /NDA 14/ Nuclear Decommissioning Authority (NDA): Geological Disposal: Feasibility studies exploring options for storage, transport and disposal of spent fuel from potential new nuclear power stations. NDA Report, NDA/RWMD/060 Rev1, 40 S., Januar 2014.
- /NEA 00/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database. *Radioactive Waste Management*, 92 S., ISBN 92-64-18514-3, DOI 10.1787/9789264187511-en, OECD Publications: Paris, France, 2000.
- /NEA 01/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Reversibility and Retrievability in Geological Disposal of Radioactive Waste - Reflections at the International Level. Paris, 2001.

- /NEA 03/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Engineered barrier systems and the safety of deep geological repositories, State-of-the-art report. Radioactive Waste Management, EUR 19964 EN, 70 S., OECD Publishing: Paris, France, 2003.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Safety of disposal of spent fuel, HLW and long-lived ILW in Switzerland, An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Zurcher Weinland. Radioactive Waste Management, Bd. 5568, 124 S., ISBN 92-64-02063-2: Paris, France, 2004.
- /NEA 06a/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Safety of geological disposal of high-level and long-lived radioactive waste in France, An international peer review of the "Dossier 2005 Argile" concerning disposal in the Callovo-Oxfordian formation. Radioactive Waste Management, 76 S., ISBN 92-64-02299-6: Paris, 2006.
- /NEA 06b/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): NEA International FEP Database, User Notes. Version Version 2.1, PC and MAC, 2006.
- /NEA 10/ Nuclear Energy Agency Radioactive Waste Management Committee (Hrsg.): Summarised responses to Retrievability and Reversibility (R&R) questionnaire issued to NEA member countries in May 2008. 23 S., 23. September 2010.
- /NEA 11/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011). Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2011)4, 76 S.: Paris, 2011.

- /NEA 12/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Radioactive Waste Management, Bd. 6923, 238 S., ISBN 978-92-64-99190-3: Issy-les-Moulineaux, 2012.
- /NEA 16/ OECD Nuclear Energy Agency: Nuclear Legislation in OECD Countries - Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities - USA, Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 49 S., 2016.
- /NEA 18/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Microbial Influence on the Performance of Sub-surface, Salt-Based Radioactive Waste Repositories, An Evaluation Based on Microbial Ecology, Bioenergetics and Projected Repository Conditions. NEA No. 7387, 67 S., DOI 10.1787/9789264303133-en: Paris, 2018.
- /NEC 16/ Necib, S., Linard, Y., Crusset, D., Michau, N., Daumas, S., Burger, E., Romaine, A., Schlegel, M. L.: Corrosion at the carbon steel-clay borehole water and gas interfaces at 85 °C under anoxic and transient acidic conditions. Corrosion Science, Bd. 111, S. 242–258, DOI 10.1016/j.corsci.2016.04.039, 2016.
- /NEV 05/ Nevin, K. P., Holmes, D. E., Woodard, T. L., Hinlein, E. S., Ostendorf, D. W., Lovley, D. R.: *Geobacter bemidjiensis* sp. nov. and *Geobacter psychrophilus* sp. nov., two novel Fe(III)-reducing subsurface isolates. International journal of systematic and evolutionary microbiology, Bd. 55, Pt 4, S. 1667–1674, DOI 10.1099/ijs.0.63417-0, 2005.
- /NG 17/ Ng, C.W.W., Mu, Q. Y., Zhou, C.: Effects of soil structure on the shear behaviour of an unsaturated loess at different suctions and temperatures. Canadian Geotechnical Journal, Bd. 54, Nr. 2, S. 270–279, DOI 10.1139/cgj-2016-0272, 2017.

- /NGU 18/ Nguyen T.S., Luukkonen, A., Guskov, A., Depaus, C., Espivent, C., Hedberg, B., Tichauer, M., Wollrath, J.: Demonstration of operational and long-term safety of geological disposal: the IAEA's GEOSAF project. In: OECD/NEA: Integration Group for the Safety Case (IGSC), Safety Case Symposium, Book of Abstracts. IGSC Safety Case Symposium 2018, Rotterdam, 10.-11.10., 2018.
- /NIC 00/ Nicholson, W. L., Munakata, N., Horneck, G., Melosh, H. J., Setlow, P.: Resistance of Bacillus endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Bd. 64, S. 548–572, DOI 10.1128/MMBR.64.3.548-572.2000, 2000.
- /NIP 00/ Nipp, H. K., Heusermann, S.: Erkundungsbergwerk Gorleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3), Ergebnisbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Nr. 0120209, 45 S.: Hannover, 1. Januar 2000.
- /NIR 03/ Nirex Limited: Generic Repository Studies, Generic Repository Design Volume 1 - Overview of Reference Case Design, Description of Variant Case and Upper Bound Design. Nirex Report, N/077, 79 S.: Oxfordshire, OX11 0RH, UK, 2003.
- /NIS 10/ Nishimoto, S., Yoshida, H.: Hydrothermal alteration of deep fractured granite, Effects of dissolution and precipitation. *Lithos*, 1-4, S. 153–162, DOI 10.1016/j.lithos.2009.11.015, 2010.
- /NIW 16/ Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K.-i., Ishimaru, T., Umeda, K.: Thermal Constraints on Clay Growth in Fault Gouge and Their Relationship with Fault-zone Evolution and Hydrothermal Alteration, Case Study of Gouges in the Kojaku Granite, Central Japan. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 64, Nr. 2, S. 86–107, DOI 10.1346/CCMN.2016.0640202, 2016.
- /NRC 03/ Nuclear Regulatory Commission (NRC): Interim Staff Guidance – 11, Rev. 3, Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel. Hrsg.: NRC Spent Fuel Project Office, 11 S., 2003.

- /NRC 18a/ PART 60—DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN GEOLOGIC REPOSITORIES, zuletzt geändert 24. August 2018.
- /NRC 18b/ PART 63—DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA, zuletzt geändert 24. August 2018.
- /NTV 17/ NTV: Im Innern uralter Kristalle - Nasa entdeckt unbekannte Mikroben. Stand vom 20. Februar 2017, erreichbar unter <https://www.n-tv.de/wissen/Nasa-entdeckt-unbekannte-Mikroben-article19710536.html>, abgerufen am 27. Juli 2018.
- /NUC 05/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Choosing a Way Forward The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel. Toronto, Ontario, Kanada, 2005.
- /OECD 12/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste, Considerations für National Geological Disposal Programmes. NEA No. 7085, 29 S.: Paris, France, 2012.
- /OECD 15/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste: An Overview of Regulatory Positions and Issues. NEA/RWM/R(2015)1, 20 S., 2015.
- /OH 03/ Oh, S.-E., van Ginkel, S., Logan, B. E.: The Relative Effectiveness of pH Control and Heat Treatment for Enhancing Biohydrogen Gas Production. Environmental Science & Technology, Bd. 37, Nr. 22, S. 5186–5190, DOI 10.1021/es034291y, 2003.
- /OLA 06/ Ola Karnland, Martin Birgersson: Montmorillonite stability With special respect to KBS-3 conditions. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-06-11, 38 S., 2006.

- /OND 01/ Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS): Technical overview of the SAFIR 2 report, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. NIROND-TR, 2001-05E, 268 S.: Brüssel, Dezember 2001.
- /ORE 11/ Oren, A.: Thermodynamic limits to microbial life at high salt concentrations. *Environmental Microbiology*, Bd. 13, Nr. 8, S. 1908–1923, DOI 10.1111/j.1462-2920.2010.02365.x, 2011.
- /OSC 89/ Oscarson, D. W., Dixon, D. A.: The effect of steam on montmorillonite. *Applied Clay Science*, Bd. 4, Nr. 3, S. 279–292, DOI 10.1016/0169-1317(89)90035-5, 1989.
- /OSC 96/ Oscarson, D. W., Dixon, D. A., Hume, H. B.: Mass transport through defected bentonite plugs. *Applied Clay Science*, Bd. 11, 2-4, S. 127–142, DOI 10.1016/S0169-1317(96)00021-X, 1996.
- /OSU 15/ O'Sullivan, L. A., Roussel, E. G., Weightman, A. J., Webster, G., Hubert, C. R. J., Bell, E., Head, I., Sass, H., Parkes, R. J.: Survival of *Desulfotomaculum* spores from estuarine sediments after serial autoclaving and high-temperature exposure. *The ISME journal*, Bd. 9, Nr. 4, S. 922–933, DOI 10.1038/ismej.2014.190, 2015.
- /OUH 10/ Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Goodarzi, A. R., Safari-Zanjani, M.: Effect of temperature on the re-structuring of the microstructure and geo-environmental behaviour of smectite. *Applied Clay Science*, Bd. 47, S. 2–9, DOI 10.1016/j.clay.2008.08.008, 2010.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Hrsg.: Projektträgerschaft des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 3, 200 S.: Karlsruhe, Mai 1999.

- /PAR 07/ Parkes, R. J., Wellsbury, P., Mather, I. D., Cobb, S. J., Cragg, B. A., Hornibrook, E. R.C., Horsfield, B.: Temperature activation of organic matter and minerals during burial has the potential to sustain the deep biosphere over geological timescales. *Organic Geochemistry*, Bd. 38, Nr. 6, S. 845–852, DOI 10.1016/j.orggeochem.2006.12.011, 2007.
- /PAR 11/ Parkes, R. J., Linnane, C. D., Webster, G., Sass, H., Weightman, A. J., Hornibrook, E. R.C., Horsfield, B.: Prokaryotes stimulate mineral H₂ formation for the deep biosphere and subsequent thermogenic activity. *Geology*, Bd. 39, Nr. 3, S. 219–222, DOI 10.1130/G31598.1, 2011.
- /PAR 12/ Parkes, R. J.: Review of the Geomicrobiological Aspects of SKB's Licence Application for a Spent Nuclear Fuel Repository in Forsmark, Sweden. Hrsg.: Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), Technical Note no., Nr. 1, 18 S., Oktober 2012.
- /PAT 09/ Patterson, D. J.: Ecology. Seeing the big picture on microbe distribution. *Science (New York, N.Y.)*, Bd. 325, Nr. 5947, S. 1506–1507, DOI 10.1126/science.1179690, 2009.
- /PAT 12/ Patel, R., Punshon, C., Nicholas, J., Bastid, P., Zhou, R., Schneider, C., Bagshaw, N., Howse, D., Hutchinson, E., Asano, R., King, F.: Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 12-06, 157 S.: Wetingen, 1. Januar 2012.
- /PED 10/ Pedersen, K.: Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. *Journal of applied microbiology*, Bd. 108, Nr. 3, S. 1094–1104, DOI 10.1111/j.1365-2672.2009.04629.x, 2010.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011), Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-278, 89 S., ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.

- /PEL 09/ Peltonen, C., Marcussen, Ø., Bjørlykke, K., Jahren, J.: Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones, The effects of smectite to illite reaction on rock properties. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 26, Nr. 6, S. 887–898, DOI 10.1016/j.marpetgeo.2008.01.021, 2009.
- /PEL 11/ Pelayo, M., García-Romero, E., Labajo, M. A., Pérez del Villar, L.: Occurrence of Fe–Mg-rich smectites and corrensite in the Morrón de Mateo bentonite deposit (Cabo de Gata region, Spain), A natural analogue of the bentonite barrier in a radwaste repository. *Applied Geochemistry*, Bd. 26, Nr. 7, S. 1153–1168, DOI 10.1016/j.apgeochem.2011.04.005, 2011.
- /PIG 14/ Pignatelli, I., Bourdelle, F., Bartier, D., Mosser-Ruck, R., Truche, L., Mugnaioli, E., Michau, N.: Iron–clay interactions, Detailed study of the mineralogical transformation of claystone with emphasis on the formation of iron-rich T–O phyllosilicates in a step-by-step cooling experiment from 90 °C to 40 °C. *Chemical Geology*, Bd. 387, S. 1–11, DOI 10.1016/j.chemgeo.2014.08.010, 2014.
- /PIR 13/ Pirot, V.: 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 as of December 2012. Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR 2013-12 E, 411 S., 2013.
- /PLE 91/ Pley, U., Schipka, J., Gambacorta, A., Jannasch, H. W., Fricke, H., Rachel, R., Stetter, K. O.: *Pyrodictium abyssi* sp. nov. Represents a Novel Heterotrophic Marine Archaeal Hyperthermophile Growing at 110 °C. *Systematic and applied microbiology*, Bd. 14, Nr. 3, S. 245–253, DOI 10.1016/S0723-2020(11)80376-0, 1991.
- /PLO 79/ Ploumen, P., Strickmann, G., Winske, P.: Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Teil I: Berechnung der zeit- und ortsabhängigen Temperaturfelder. *Atomwirtschaft*, Bd. 2, S. 85–91, 1979.

- /PLÜ 09/ Plümper, O., Putnis, A.: The Complex Hydrothermal History of Granitic Rocks, Multiple Feldspar Replacement Reactions under Subsolidus Conditions. *Journal of Petrology*, Nr. 5, S. 967–987, DOI 10.1093/petrology/egp028, 2009.
- /PÖH 10/ Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H. J., Filbert, W., Tholen, M.: Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein, ERATO, Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-28-2008-AB, 320 S.: Peine, Juni 2010.
- /POL 93/ Pollastro, R. M.: Considerations and Applications of the Illite/Smectite Geothermometer in Hydrocarbon-Bearing Rocks of Miocene to Mississippian Age. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 41, Nr. 2, S. 119–133, DOI 10.1346/CCMN.1993.0410202, 1993.
- /POS 12a/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Synthesis 2012. POSIVA, 2012-12, 277 S., ISBN 978-951-652-193-3, Posiva Oy: Olkiluoto, Dezember 2012.
- /POS 12b/ POSIVA Oy: Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Description of the Disposal System 2012. POSIVA, 2012-05, 166 S., ISBN 978-951-652-186-5, Posiva Oy: Eurajoki, Finland, Dezember 2012.
- /POS 13/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Performance Assessment 2012. POSIVA, 2012-04, 520 S., ISBN 978-951-652-185-8, Eurajoki, Finland: Olkiluoto, Februar 2013.
- /POS 16/ POSIVA Oy: Geologic Disposal of Spent Nuclear Fuel in Olkiluoto. POSIVA Brochures, 13 S.: Eurajoki, 29. Dezember 2016.
- /POS 17a/ POSIVA Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository group, Conclusions and recommendations from a joint SKB and Posiva working. Posiva SKB Report 01, 116 S.: Eurajoki / Stockholm, Januar 2017.

- /POS 17b/ POSIVA Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): KBS-3H System Design Phase, 2011–2016: Final Report. Posiva SKB Report 06, 159 S.: Eurajoki / Stockholm, Juli 2017.
- /PUI 01/ Puigdomenech, I., Ambrosi, J. P., Eisenlohr, L., Lartigue, J. E., Banwart, S. A., Bateman, K., Milodowski, A. E., West, J. M., Griffault, M., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H., Kotelnikova, S., Pedersen, K., et al.: O₂ depletion in granitic media, The REX project. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-01-05, 86 S., Februar 2001.
- /PUS 95/ Pusch, R.: Aspects on the Illitization of the Kinnekulle Bentonites. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 43, Nr. 3, S. 261–270, DOI 10.1346/CCMN.1995.0430301, 1995.
- /PYT 89/ Pytte, A., Reeynolds, R.: The thermal transformation of smectite to Illite, Chapter 8. In: Naer, M. C., McCulloh, T. H. (Hrsg.): *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories*. S. 133–140, ISBN 978-1-4612-3492-0, Springer: New York, USA, 1989.
- /RAI 96/ Raiswell, R., Canfield, D. E.: Rates of reaction between silicate iron and dissolved sulfide in Peru Margin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 60, S. 2777–2787, DOI 10.1016/0016-7037(96)00141-X, 1996.
- /REC 14/ Rechard, R. P., Voegele, M. D.: Evolution of repository and waste package designs for Yucca Mountain disposal system for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste. *Reliability Engineering & System Safety*, Bd. 122, S. 53–73, DOI 10.1016/j.ress.2013.06.018, 2014.
- /REI 17/ Reichert, B.: Stellungnahme aus Sicht des ESK-Ausschusses "Endlagerung radioaktiver Abfälle" zur öffentlichen Anhörung des Umweltausschusses am 08.03.2017 zur Fortentwicklung des StandAG. Universität Bonn, Entsorgungskommission (ESK) - Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL), Ausschussdrucksache, 18(16)526-L, 3 S.: Berlin, 6. März 2017.
- /RÉP 06/ The 2006 Programme Act on the Sustainable Management of Radioactive Materials and Wastes.

- /RIG 10/ Rigby, D. B.: Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel. Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB), 145 S., 2010.
- /RIV 15/ Rivard, C., Pelletier, M., Michau, N., Razafitianamaharavo, A., Abdelmoula, M., Ghanbaja, J., Villieras, F.: Reactivity of Callovo-Oxfordian Claystone and its Clay Fraction With Metallic Iron, Role of Non-Clay Minerals in the Interaction Mechanism. Clays and Clay Minerals, Bd. 63, Nr. 4, S. 290–310, DOI 10.1346/CCMN.2015.0630404, 2015.
- /ROD 99/ Rodwell, W. R.: 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 (EC), Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), Nuclear Science and Technology, EUR 19122 EN, ISBN 92-828-8132-6: Brüssel, 1999.
- /ROE 81/ Roedder, E., Bassett, R. L.: Problems in determination of the water content of rock-salt samples and its significance in nuclear waste storage siting. Geology, Bd. 9, S. 525–530, 1981.
- /ROE 84/ Roedder, E.: The fluids in salt. American Mineralogist, Bd. 69, S. 413–439, 1984.
- /ROH 11/ Rohrmüller, J., Mielke, H.-G., Gebauer, D.: Tektonik. Bayrisches Geologisches Landesamt, Kapitel 7, 8 S., 2011.
- /RÖH 17/ Röhlig, K.-J.: Stellungnahme anlässlich der öffentlichen Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Hrsg.: Deutscher Bundestag (BT), Technische Universität Clausthal-Zellerfeld, Ausschussdrucksache, 18(16)526-H, 8 S.: Berlin, 1. März 2017.

- /ROK 07/ Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Zapf, D.: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen, Ergebnisbericht zu Teilvorhaben 5, Stoffgesetz IUB-MDCF. BMBF-Verbundvorhaben, FKZ 02C1004, 41 S., DOI 10.2314/GBV:591485338, 2007.
- /ROM 05/ Romero, E., Villar, M. V., Lloret, A.: Thermo-hydro-mechanical behaviour of two heavily overconsolidated clays. *Engineering Geology*, Bd. 81, Nr. 3, S. 255–268, DOI 10.1016/j.enggeo.2005.06.011, 2005.
- /ROS 91/ Rosnes, J. T., Torsvik, T., Lien, T.: Spore-forming thermophilic sulfate-reducing bacteria isolated from north sea oil field waters. *Applied and Environmental Microbiology*, Bd. 57, Nr. 8, S. 2302–2307, 1991.
- /ROT 86/ Rothfuchs, T.: Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter in situ Bedingungen, Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG), Kernforschung und -technologie, EUR 10392 DE, 85 S.: Luxemburg, 1986.
- /ROT 88/ Rothfuchs, T., Wieczorek, K., Feddersen, H.-K., Staupendahl, G., Coyle, A. J., Kalia, H., Eckert, J.: Brine Migration Test - A joint project of Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI) and Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), Final Report. Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF), GSF-Bericht, 6/88, 318 S.: Neuherberg, März 1988.
- /ROT 99/ Rothfuchs, T., Feddersen, H.-K., Kröhn, K.-P., Miehe, R., Wieczorek, K.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste, Final Report, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E8715. 124 S.: Braunschweig, Dezember 1999.
- /RÜB 10/ Rübel, A., Mönig, J.: Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3521, 142 S.: Braunschweig, September 2010.

/RÜB 11/ Rübel, A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Mönig, J., Spiessl, S.: Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. Preliminary results from the ISIBEL-2 project, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10719. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3592, 73 S., 1. Januar 2011.

/RWMC 14a/Radioactive Waste Management Committee (RWMC): Updating the NEA International FEP List, An Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note Technical Note 1: Identification and Review of Recent Project-specific FEP Lists 25 September 2012. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), NEA/RWM/R(2013)7, 29. Januar 2014.

/RWMC 14b/Radioactive Waste Management Committee (RWMC): Updating the NEA International FEP List, An Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note Technical Note 2: Proposed Revisions to the NEA International FEP List. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), NEA/RWM/R(2013)8, 57 S., 16. Juni 2014.

/SAH 94/ Sahimi, M.: Applications of percolation theory. 258 S., ISBN 0-7484-0076-1, Taylor & Francis: London, 1994.

/SAN 09a/ Sandström, B., Tullborg, E.-L.: Episodic fluid migration in the Fennoscandian Shield recorded by stable isotopes, rare earth elements and fluid inclusions in fracture minerals at Forsmark, Sweden. *Chemical Geology*, Bd. 266, 3-4, S. 126–142, DOI 10.1016/j.chemgeo.2009.04.019, 2009.

/SAN 09b/ Sanz-Montero, M. E., Rodríguez-Aranda, J. P., Pérez-Soba, C.: Microbial weathering of Fe-rich phyllosilicates and formation of pyrite in the dolomite precipitating environment of a Miocene lacustrine system. *European Journal of Mineralogy*, Bd. 21, Nr. 1, S. 163–175, DOI 10.1127/0935-1221/2009/0021-1877, 2009.

- /SAN 15/ Ilgen, A. G., Bryan, C. R., Hardin, E.: Draft Geologic Disposal Requirements Basis for STAD Specification, Fuel Cycle Research & Development. SANDIA Report, SAD2015-2175R, 54 S., DOI 10.2172/1183202, 25. März 2015.
- /SAS 17/ Sasamoto, H., Isogai, T., Kikuchi, H., Satoh, H., Svensson, D.: Mineralogical, physical and chemical investigation of compacted Kunigel V1 bentonite in contact with a steel heater in the ABM test package 1 experiment, Äspö laboratory, Sweden. Clay Minerals, Bd. 52, Nr. 1, S. 127–141, DOI 10.1180/claymin.2017.052.1.09, 2017.
- /SAT 98/ Sato, R., Sasaki, T., Ando, K., Smith, P. A., Schneider, J. W.: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel in Crystalline and Sedimentary Rocks. NAGRA, Technical Report, 97-02, 79 S.: Wetztingen / Schweiz, 1998.
- /SAT 07/ Sattley, W. M., Madigan, M. T.: Cold-active acetogenic bacteria from surficial sediments of perennially ice-covered Lake Fryxell, Antarctica. FEMS microbiology letters, Bd. 272, Nr. 1, S. 48–54, DOI 10.1111/j.1574-6968.2007.00737.x, 2007.
- /SCH 71/ Schmidt, H.: Numerische Langzeitberechnung instationärer Temperaturfelder mit diskreter Quellenverteilung unter Berücksichtigung temperatur- und ortsabhängiger Stoffwerte, Ph.D. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), 218 S.: Aachen, 1971.
- /SCH 84/ Schnier, H.: Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II), BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2, Zusammenstellung geothermischer Parameter für geomechanische Berechnungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Technischer Bericht, Nr. 97602: Hannover, 1984.
- /SCH 96/ Schegg, R.: Clay Mineral Diagenesis and Thermal History of the Thonex Well, Western Swiss Molasse Basin. Clays and Clay Minerals, Bd. 44, Nr. 5, S. 693–705, DOI 10.1346/CCMN.1996.0440513, 1996.

- /SCH 18/ Schröder, T. J., Hart, J., Rosca-Bocancea, E.: Retrieval and Surveillance of Radioactive Waste Disposals. In: OECD/NEA: Integration Group for the Safety Case (IGSC), Safety Case Symposium, Book of Abstracts. IGSC Safety Case Symposium 2018, Rotterdam, 10.-11.10., S. 44, 2018.
- /SHE 11/ Sherar, B. W. A., Power, I. M., Keech, P. G., Mitlin, S., Southam, G., Shoosmith, D. W.: Characterizing the effect of carbon steel exposure in sulfide containing solutions to microbially induced corrosion. *Corrosion Science*, Bd. 53, S. 955–960, DOI 10.1016/j.corsci.2010.11.027, 2011.
- /SIM 90/ Simon, K.: Hydrothermal alteration of Variscan granites, southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Bd. 105, Nr. 2, S. 177–196, DOI 10.1007/BF00678985, 1990.
- /SIM 94/ Simmons, G. R., Baumgartner, P.: The disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineering for a Disposal Facility. Whiteshell Laboratories, AECL-10715, COG-93-5, 437 S.: Pinawa, Manitoba, 1994.
- /SIM 01/ Simankova, M. V., Parshina, S. N., Tourova, T. P., Kolganova, T. V., Zehnder, A. J., Nozhevnikova, A. N.: *Methanosarcina lacustris* sp. nov., a new psychrotolerant methanogenic archaeon from anoxic lake sediments. *Systematic and applied microbiology*, Bd. 24, Nr. 3, S. 362–367, DOI 10.1078/0723-2020-00058, 2001.
- /SKB 06a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, Technical Report TR-06-18. September 2006.
- /SKB 99/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 - Post-closure safety. SKB Technical Report, TR-99-06: Stockholm, 1999.
- /SKB 06b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxemar - a first evaluation, Main report of the SR-Can project. SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S.: Stockholm, Schweden, 2006.

- /SKB 10a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design, production and initial state of the canister. SKB Technical Report, TR-10-14, 111 S., 2010.
- /SKB 10b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. SKB Technical Report, TR-10-47, 361 S., 2010.
- /SKB 10c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB Technical Report, TR-10-45, 270 S., ISBN 1404-0344: Stockholm, Schweden, 2010.
- /SKB 10d/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. TR-10-49, 323 S., 2010.
- /SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 893 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume I. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 1–276: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume III. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 555–893: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11d/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume II. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 279–552: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 15/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Canister Retrieval Test – Final report. SKB Technical Report, TR-14-19, 73 S., 2015.

- /SKB 18/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Fact sheet Spent Fuel Repository. 2 S., März 2018.
- /SLO 99/ Slobodkin, A. I., Tourova, T. P., Kuznetsov, B. B., Kostrikina, N. A., Chernyh, N. A., Bonch-Osmolovskaya, E. A.: *Thermoanaerobacter siderophilus* sp. nov., a novel dissimilatory Fe(III)-reducing, anaerobic, thermophilic bacterium. *International Journal of Systematic Bacteriology*, Bd. 49, 1471-1478, 1999.
- /SMA 94/ Small, J. S.: Fluid Composition, Mineralogy and Morphological Changes Associated with the Smectite-to-Illite Reaction, An Experimental Investigation of the Effect of Organic Acid Anions. *Clay Minerals*, Bd. 29, Nr. 4, S. 539–554, DOI 10.1180/claymin.1994.029.4.11, 1994.
- /SMI 89/ Smith, J. T., Ehrenberg, S. N.: Correlation of carbon dioxide abundance with temperature in clastic hydrocarbon reservoirs, Relationship to inorganic chemical equilibrium. *Marine and Petroleum Geology*, Bd. 6, Nr. 2, S. 129–135, DOI 10.1016/0264-8172(89)90016-0, 1989.
- /SOL 99/ Soler, J. M.: Coupled Transport Phenomena in the Opalinus Clay, Implications for Radionuclide Transport. Paul Scherrer Institut (PSI), 1019-0643, 76 S.: Villigen, Switzerland, 1999.
- /SPA 00/ Spark, I., Patey, I., Duncan, B., Hamilton, A., Devine, C., McGovern-Traa, C.: The effects of indigenous and introduced microbes on deeply buried hydrocarbon reservoirs, North Sea. *Clay Minerals*, Bd. 35, Nr. 1, S. 5, DOI 10.1180/000985500546693, 2000.
- /SPI 93/ Spies, T., van den Horn, B., Prij, J., Rothfuchs, T., Müller, K.: Sealing of Haw-Boreholes in Salt Formations (Debora-Project), 3. Progress Meeting, PEGASUS, Cologne, June 3-4. 1993.
- /SPY 18/ Spykman, G.: Dry storage of spent nuclear fuel and high active waste in Germany—Current situation and technical aspects on inventories integrity for a prolonged storage time. *Nuclear Engineering and Technology*, Bd. 50, Nr. 2, S. 313–317, DOI 10.1016/j.net.2018.01.009, 2018.

- /ŚRO 99/ Środoń, J.: Use of clay minerals in reconstructing geological processes: recent advances and some perspectives. *Clay Minerals*, Bd. 34, S. 27–37, DOI 10.1180/000985599546046, 1999.
- /SSM 08a/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities, The Swedish Radiation Safety Authority's general advice on the application of the regulations (SSMFS 2008:1) concerning safety in nuclear facilities. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:1, 34 S., 3. Oktober 2008.
- /SSM 08b/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:21, 8 S.: Stockholm, Sweden, 19. Dezember 2008.
- /SSM 08c/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:37, 18 S., 19. Dezember 2008.
- /STA 16/ Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mru-galla, S., Reinhold, K., Rübél, A.: FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD, Dokumentation Teil 2 (Prozess-FEP), Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-16-2016-AP, 521 S.: Peine, 30. März 2016.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).

- /STO 15/ Stober, I., Bucher, K.: Hydraulic conductivity of fractured upper crust, Insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. *Geofluids*, 1-2, S. 161–178, DOI 10.1111/gfl.12104, 2015.
- /STR 11/ Stroes-Gascoyne, S., Sergeant, C., Schippers, A., Hamon, C. J., Nèble, S., Vesvres, M.-H., Barsotti, V., Poulain, S., Le Marrec, C.: Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment, Part D – Microbial analyses – Synthesis of results. *Applied Geochemistry*, Bd. 26, Nr. 6, S. 980–989, DOI 10.1016/j.apgeochem.2011.03.007, 2011.
- /STU 96/ Stumm, W., Morgan, J. J.: *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Environmental Science and Technology, 3. Aufl., 1022 S., ISBN 0-471-51185-4, Jon Wiley & Sons: New York, 1996.
- /STUK 01/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Guide YVL 8.4, Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel. YVL, Nr. 8.4, 9 S.: Helsinki, 2001.
- /STUK 02/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Guide YVL 8.5, Operational Safety of a Disposal Facility for spent Nuclear Fuel. YVL, Nr. 8.5, 9 S.: Helsinki, 2002.
- /ŠUC 93/ Šucha, V.: Smectite to Illite Conversion in Bentonites and Shales of the East Slovak Basin. *Clay Minerals*, Bd. 28, Nr. 2, S. 243–253, DOI 10.1180/claymin.1993.028.2.06, 1993.
- /SUL 02/ Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.: Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology*, Bd. 64, S. 135–145, DOI 10.1016/S0013-7952(01)00143-0, 2002.
- /SUV 03/ Arbeitsmedizinische Prophylaxe bei Arbeiten im Untertagbau im feucht-warmen Klima (Merkblatt 2869/26.d) in der Fassung von 4. Auflage März 2003.

- /SVE 13/ Svensson, P. D., Hansen, S.: Redox Chemistry in Two Iron-Bentonite Field Experiments at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden, An XRD and Fe K-Edge XANES Study. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 61, Nr. 6, S. 566–579, DOI 10.1346/CCMN.2013.0610609, 2013.
- /TAK 08a/ Takei, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., Miyazaki, J., Hirayama, H., Nakagawa, S., Nunoura, T., Horikoshi, K.: Cell proliferation at 122°C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 105, S. 10949–10954, 2008.
- /TAK 08b/ Takai, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., Miyazaki, J., Hirayama, H., Nakagawa, S., Nunoura, T., Horikoshi, K.: Cell proliferation at 122 °C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Bd. 105, Nr. 31, S. 10949–10954, DOI 10.1073/pnas.0712334105, 2008.
- /TAN 08/ Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Barnel, N.: Thermo-mechanical behaviour of a compacted swelling clay. *Géotechnique*, Bd. 58, S. 45–54, DOI 10.1680/geot.2008.58.1.45, 2008.
- /TEC 06/ Techer, I., Rousset, D., Clauer, N., Lancelot, J., Boisson, J.-Y.: Chemical and isotopic characterization of water–rock interactions in shales induced by the intrusion of a basaltic dike, A natural analogue for radioactive waste disposal. *Applied Geochemistry*, Bd. 21, Nr. 2, S. 203–222, DOI 10.1016/j.apgeochem.2005.09.017, 2006.
- /TER 05/ Tertre, E., Berger, G., Castet, S., Loubet, M., Giffaut, E.: Experimental sorption of Ni, Cs and Ln onto a montmorillonite up to 150 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 69, Nr. 21, S. 4937–4948, 2005.
- /TER 06/ Tertre, E., Berger, G., Simoni, E., Castet, S., Giffaut, E., Loubet, M., Catalette, H.: Europium retention onto clay minerals from 25 to 150°C, Experimental measurements, spectroscopic features and sorption modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 70, Nr. 18, S. 4563–4578, DOI 10.1016/j.gca.2006.06.1568, 2006.

- /THY 11/ Thyberg, B., Jahren, J.: Quartz cementation in mudstones, Sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial. *Petroleum Geoscience*, Bd. 17, Nr. 1, S. 53–63, DOI 10.1144/1354-079310-028, 2011.
- /TOW 93/ Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I., Ohishi, K.: Volume Change of Clays Induced by Heating as Observed in Consolidation Tests. *Soils and Foundations*, Bd. 33, Nr. 4, S. 170–183, DOI 10.3208/sandf1972.33.4_170, 1993.
- /TRB 18/ U.S. Nuclear Waste Technical Review Board: *Geologic Repositories: Performance Monitoring and Retrievability of Emplaced High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel*, A Report to the U.S. Congress and the Secretary of Energy. Washington, 28. Mai 2018.
- /TRU 09/ Truche, L., Berger, G., Destrigneville, C., Pages, A., Guillaume, D., Giffaut, E., Jacquot, E.: Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions, Implication for nuclear waste storage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Bd. 73, S. 4824–4835, DOI 10.1016/j.gca.2009.05.043, 2009.
- /TRU 13/ Truche, L., Jodin-Caumon, M.-C., Lerouge, C., Berger, G., Mosser-Ruck, R., Giffaut, E., Michau, N.: Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 bar. *Chemical Geology*, Bd. 351, S. 217–228, DOI 10.1016/j.chemgeo.2013.05.025, 2013.
- /TRU 14/ Truche, L., Bazarkina, E. F., Barré, G., Thomassot, E., Berger, G., Dubessy, J., Robert, P.: The role of S⁻³ ion in thermochemical sulphate reduction, Geological and geochemical implications. *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 396, S. 190–200, DOI 10.1016/j.epsl.2014.04.018, 2014.
- /UEN 11/ Ueno, K., Suyama, T., Ishidera, T., Sato, T.: Ten-Year interaction of carbon steel coupon and compacted bentonites. *Clay Science*, Bd. 15, Nr. 2, S. 89–102, 2011.

- /UHL 17/ Uhlmann, S.: Endlagerkonzept im Tonstein (Belgien), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 3, 28 S.: Köln, August 2017.
- /VÁZ 14/ Vázquez, M., Nieto, F., Morata, D., Droguett, B., Carrillo-Rosua, F. J., Morales, S.: Evolution of clay mineral assemblages in the Tinguiririca geothermal field, Andean Cordillera of central Chile, An XRD and HRTEM-AEM study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Bd. 282, S. 43–59, DOI 10.1016/j.jvolgeores.2014.05.022, 2014.
- /VEH 16/ Vehmas, T., Holt, E.: CEBAMA, WP1 Experimental studies – State of the art literature review. European Commission (EC), HORIZON 2020, 237 S., 22. März 2016.
- /VER 14/ Verhoef, E., Neeft, E.: Towards a safety strategy, Developing a long-term Dutch research programme into geological disposal of radioactive waste. OPERA-PG-COV014, 18 S., 26. März 2014.
- /VER 17/ Verhoef, E., Neeft, E., Chapman, N., McCombie, C.: Opera Safety Case. Centrale organisatie voor radioactief afval (COVRA), 147 S.: Vlissingen, 20. Dezember 2017.
- /VOM 15/ Vomvoris, S., Birkholzer, J., Zheng, L., Gaus, I., Blechschmidt, I.: THMC behavior of clay-based barriers under high temperature – from laboratory to URL scale. In: American Nuclear Society (Hrsg.): 15th International High-Level Radioactive Waste Management Conference 2015, Charleston, South Carolina, USA, 12 - 16 April 2015. International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Charleston, NC, S. 1–22, ISBN 9781510808102, DOI 10.1002/9781119197249.ch1, Curran: Red Hook, NY, 2015.
- /VOR 09/ Vorhies, J. S., Gaines, R. R.: Microbial dissolution of clay minerals as a source of iron and silica in marine sediments. *Nature Geoscience*, Bd. 2, Nr. 3, S. 221–225, DOI 10.1038/NGEO441, 2009.

- /VROM 84/ Radioactief Afval. in der Fassung von Kamerstukken II, 1983-1984, 18343, nrs 1-2, 1-21, zuletzt geändert 1984.
- /VROM 93/ Opbergen van afval in de diepe ondergrond (Ova) in der Fassung von Kamerstukken II, 1992-1993, 23163, nr. 1, 1-9,, zuletzt geändert 14. Mai 1993.
- /WAN 18/ Wan, J., Tokunaga, T. K., Ashby, P. D., Kim, Y., Voltolini, M., Gilbert, B., DePaolo, D. J.: Supercritical CO₂uptake by nonswelling phyllosilicates. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Bd. 115, Nr. 5, S. 873–878, DOI 10.1073/pnas.1710853114, 2018.
- /WAT 17/ Watzel, R.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Umweltausschusses am 08.03.2017 zur Fortentwicklung des StandAG. Hrsg.: Deutscher Bundestag (BT), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ausschussdrucksache, 18(16)526-G, 2 S.: Berlin, 1. März 2017.
- /WEB 02/ Weber, A., Jørgensen, B. B., Weber, A., Jørgensen, B. B.: Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of the Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico. Deep-Sea Research, Bd. 49, Nr. 5, S. 827–841, DOI 10.1016/S0967-0637(01)00079-6, 2002.
- /WEB 06/ Weber, K. A., Achenbach, L. A., Coates, J. D.: Microorganisms pumping iron, Anaerobic microbial iron oxidation and reduction. Nature reviews. Microbiology, Bd. 4, Nr. 10, S. 752–764, DOI 10.1038/nrmicro1490, 2006.
- /WEE 09/ Weetjens, E.: Update of the near field temperature evolution calculations for disposal of UNE-55, MOX-50 and vitrified HLW in a supercontainer-based geological repository, ONDRAF/NIRAS contract CCHO-2004-2470/00/00. Studiecentrum voor Kernenergie Centre D'Etude De L'Energie Nucleaire (SCK-CEN), External Report, SCK-CEN-ER-86, 15 S.: Mol, Belgium, Februar 2009.

- /WEE 12/ Weetjens, E., Marivoet, J., Govaerts, J.: Preparatory Safety Assessment, Conceptual model description of the reference case. Hrsg.: Leterme, B., Studiecentrum voor Kernenergie Centre D'Etude De L'Energie Nucleaire (SCK-CEN), External Report of the Belgian Nuclear Research Centre, SCK•CEN-ER-215, 95 S., September 2012.
- /WEI 08/ Weiß, E., Lommerzheim, A.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen - EUGENIA, AP 6 – Bau und Betrieb von Endlagerbergwerken. Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-26-2008-AP, 186 S.: Peine, September 2008.
- /WER 98/ Werme, L.: Design premises for canister for spent nuclear fuel. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-98-08, 217 S., 1998.
- /WER 07/ Wersin, P., Johnson, L. H., McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, A critical review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Bd. 32, 8-14, S. 780–788, DOI 10.13140/RG.2.1.1248.2325, 2007.
- /WER 11/ Wersin, P., Leupin, O. X., Mettler, S., Gaucher, E. C., Mäder, U., Cannière, P. de, Vinsot, A., Gäbler, H. E., Kunimaro, T., Kiho, K., Eichinger, L.: Biogeochemical processes in a clay formation in situ experiment, Part A – Overview, experimental design and water data of an experiment in the Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. *Applied Geochemistry*, Bd. 26, Nr. 6, S. 931–953, DOI 10.1016/j.apgeochem.2011.03.004, 2011.
- /WEY 17/ Weyand, T.: Endlagerkonzept im Tonstein (Schweiz), Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 1. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 1, 79 S.: Köln, August 2017.
- /WHI 05/ White, A. F., Schulz, M. S., Lowenstern, J. B., Vivit, D. V., Bullen, T. D.: The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks, Implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Nr. 6, S. 1455–1471, DOI 10.1016/j.gca.2004.09.012, 2005.

- /WIC 08/ Wickham, S.: Evolution of the Near-Field of the ONDRAF/NIRAS Repository Concept for category B and C wastes, First full draft report. Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR report, 2007-07E, 140 S.: Brussels, Belgium, April 2008.
- /WIL 83/ Will, G., Hinze, E.: Entwässerungsverhalten von hydratisierten Salzphasen als Funktion des Druckes, In Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse. Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF), GSF-Halbjahresbericht, Nr. 1: Braunschweig, 1983.
- /WIL 01/ Wilhelms, A., Larter, S. R., Head, I., Farrimond, P., di-Primio, R., Zwach, C.: Biodegradation of oil in uplifted basins prevented by deep-burial sterilization. *Nature*, Bd. 411, Nr. 6841, S. 1034–1037, DOI 10.1038/35082535, 2001.
- /WIL 16/ Wilson, M. J., Shaldybin, M. V., Wilson, L.: Clay mineralogy and unconventional hydrocarbon shale reservoirs in the USA. I. Occurrence and interpretation of mixed-layer R3 ordered illite/smectite. *Earth-Science Reviews*, Bd. 158, S. 31–50, DOI 10.1016/j.earscirev.2016.04.004, 2016.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., et al.: FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 864 S., 2012.
- /XIA 18/ Xiao, Q., Amrani, A., Sun, Y., He, S., Cai, C., Liu, J., Said-Ahmad, W., Zhu, C., Chen, Z.: The effects of selected minerals on laboratory simulated thermochemical sulfate reduction. *Organic Geochemistry*, Bd. 122, S. 41–51, DOI 10.1016/j.orggeochem.2018.04.004, 2018.
- /YAM 11/ Yamane, K., Hattori, Y., Ohtagaki, H., Fujiwara, K.: Microbial diversity with dominance of 16S rRNA gene sequences with high GC contents at 74 and 98 °C subsurface crude oil deposits in Japan. *FEMS microbiology ecology*, Bd. 76, Nr. 2, S. 220–235, DOI 10.1111/j.1574-6941.2011.01044.x, 2011.

- /YAU 87/ Yau, Y.-C., Peacor, D. R., Essene, E. J., Lee, J. H., Kuo, L.-C., Cosca, M. A.: Hydrothermal treatment of smectite, illite, and basalt to 460 degrees C; comparison of natural with hydrothermally formed clay minerals. *Clays and Clay Minerals*, Bd. 35, Nr. 4, S. 241–250, 1987.
- /YES 17/ Yeste, M. P., Gatica, J. M., Ahrouch, M., Vidal, H.: Clay honeycomb monoliths as low cost CO₂ adsorbents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Bd. 80, S. 415–423, DOI 10.1016/j.jtice.2017.07.031, 2017.
- /YUA 17/ Yuan, H., Agostini, F., Skoczylas, F., Talandier, J.: Investigation on gas-adsorption-induced swelling and permeability evolutions of CO_x arg. Hrsg.: AFM, Association Française de Mécanique, 2017.
- /YUG 15/ Yuguchi, T., Sasao, E., Ishibashi, M., Nishiyama, T.: Hydrothermal chloritization processes from biotite in the Toki granite, Central Japan, Temporal variations of of the compositions of hydrothermal fluids associated with chloritization. *American Mineralogist*, Bd. 100, 5-6, S. 1134–1152, DOI 10.2138/am-2015-5126, 2015.
- /ZHA 07/ Zhang, C.-L., Rothfuchs, T., Jockwer, N., Wieczorek, K., Dittrich, J., Müller, J., Hartwig, L., Komischke, M.: Thermal effects on the opalinus clay, A joint heating experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terry URL (HE-D project). Final report, BMWA-Vorhaben, FKZ 02E9773. GRS-224, 196 S., ISBN 978-3-931995-98-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2007.
- /ZHA 10/ Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Rothfuchs, T.: Thermo-hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian clay rock within the Framework of GRS/ANDRA Cooperation Programme and the EC TIMODAZ Project, Final report, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10045. GRS-266, 252 S., ISBN 978-3-939355-42-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2010.

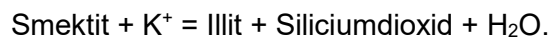
- /ZHA 12/ Zhang, S. H., Kuang, F., Zhang, J. Z., Zhou, X., Lan, G. H., Zou, C. J.: Influences of Thermophilic Sulfate-Reducing Bacteria on the Corrosion of Carbon Steel at Different Temperature. *Advanced Materials Research*, 396-398, S. 1963–1968, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.396-398.1963, 2012.
- /ZHA 13/ Zhang, C.-L.: Sealing of fractures in claystone. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Bd. 5, Nr. 3, S. 214–220, DOI 10.1016/j.jrmge.2013.04.001, 2013.
- /ZHA 14/ Zhang, C.-L., Czaikowski, O., Komischke, M., Wieczorek, K.: Thermo-hydro-mechanical processes in the nearfield around a HLW repository in argillaceous formations, Volume II In-situ-Investigations and Interpretative Modelling, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10377. GRS-313, 126 S., ISBN 978-3-939355-92-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2014.
- /ZHA 17/ Zhang, C.-L., Conil, N., Armand, G.: Thermal effects on clay rocks for deep disposal of high-level radioactive waste. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Bd. 9, Nr. 3, S. 463–478, DOI 10.1016/j.jrmge.2016.08.006, 2017.
- /ZIE 05/ Ziegenhagen, J., Bollingerfehr, W.: Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager, Abschlussbericht zu Z2.2.7/WS 1006/8489-2, Sicherheitstechnische Einzelfragen - Rückholbarkeit DBE TEC - Colenco - NAGRA - SKB - Tekedo. 104 S., Mai 2005.
- /ZUL 16/ Zulauf, G., Hammer, J.: Ist Steinsalz durchlässig für Gase und Flüssigkeiten? In: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.): Übersicht der Vorträge der Open Sessions. Fachtagung "Kriterien für die Standortauswahl", Berlin, 29./30.01.2016, 2016.

A Detaillierte Beschreibung einiger THMCB-Prozesse im Tongestein

A.1 Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen

Smektit-Illit-Reaktion

Smektit-Illit-Reaktion läuft unter geologischen Bedingungen bei Temperaturen über ca. 60 °C /THY 11/, /GOU 16/ ab und kann in vereinfachter Form wie folgt zusammengefasst werden /PEL 09/, /THY 11/:



Bis ein Tongestein während seiner diagenetischen Versenkungsgeschichte die Temperatur von ca. 100–120 °C erreicht hat, geht seine Smektit-reiche Phase (mit der so genannten R0-Ordnung) verloren und der Anteil der Smektit-Schichten in der Illit-Smektit-Wechselagerung (mit den dann entstandenen R1- und ggf. R>1-Ordnungen) reduziert sich auf ca. 35–50 % /POL 93/, /ŠUC 93/, /SCH 96/, /COL 11/, /VÁZ 14/. Allerdings gilt diese Temperaturgrenze uneingeschränkt nur für Tongesteine, die älter als 3–5 Mio. Jahre sind. In jüngeren Tongesteinen, die eine entsprechend schnellere Erhitzung erfahren haben, liegt diese nicht unter 120–140 °C /POL 93/. Mit Hilfe kinetischer Modellierung wird abgeschätzt, dass dieser Reaktionsschritt in Tongesteinen bei 120 °C etwa 10.000 Jahre in Anspruch nehmen würde /COL 11/.

Die Smektit-Illit-Reaktion in Bentonit-Formationen schreitet deutlich langsamer als in Tongesteinen voran (Abb. A 1) /ŠUC 93/, /MAS 01/. Daher verschiebt sich die Temperaturgrenze für R0→R1-Übergang für Bentonite von 120 °C auf die Temperatur von ca. 150 °C, bei welcher der Unterschied in der Temperaturabhängigkeit der Quellfähigkeit zwischen Bentoniten und Tongesteinen vernachlässigbar wird /ŠUC 93/. Unter hydrothermalen Bedingungen wurde dieser Übergang bei 154 °C beobachtet /INO 05/.

Der Grund für die Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten im Vergleich zu Tongesteinen ist unbekannt. Es wird einerseits argumentiert, dass das für den Fortschritt der Reaktion notwendige Kaliumangebot in Bentoniten nicht ausreichend ist, so dass die Smektit-Illit-Reaktion durch die langsame Kaliumdiffusion von außerhalb der Formation gehemmt wird /ŠRO 99/. Dafür spricht auch, dass der Fortschritt der Smektit-Illit-Reaktion in einem Tongestein im Allgemeinen mit der langsamen Freisetzung und Diffusion des Kaliums aus der Zersetzung von kaliumhaltigen Mineralen wie K-Feldspat

zusammenhängt /THY 11/. Beim unzureichenden Kaliumangebot (wie z. B. in Mergeln bis mergeligen Kalksteinen) verschiebt sich die Temperaturgrenze für R0→R1-Übergang ähnlich wie für Bentonite auf ca. 160 °C /ARO 06/. Unter hydrothermalen Bedingungen wurde dieser Übergang bei 158 °C beobachtet /INO 05/.

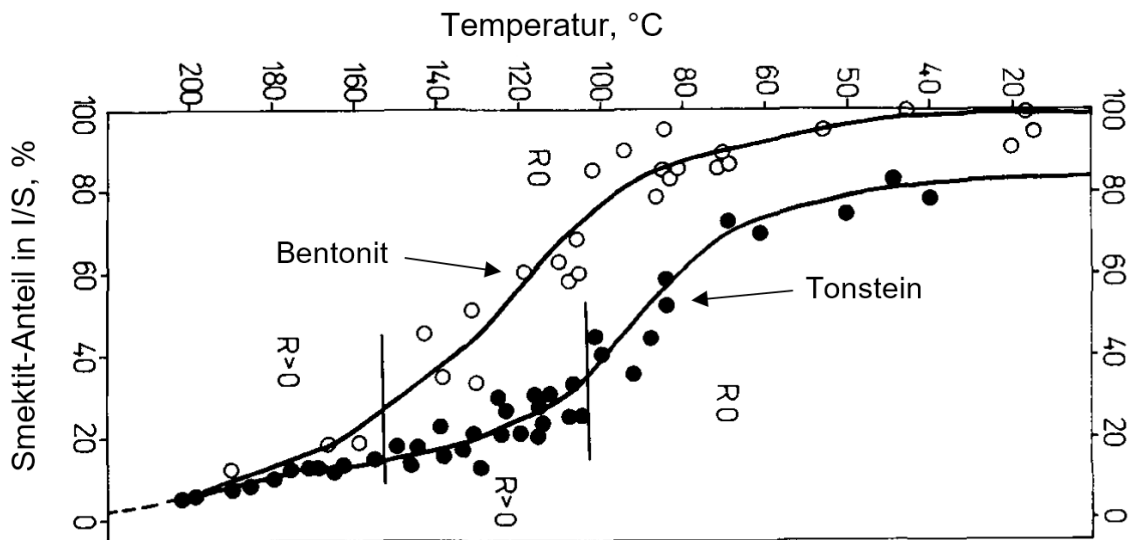


Abb. A 1 Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechselagerung (I/S) einer Bentonit-Formation bzw. eines Tongesteins in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur als Maß für den Fortschritt der Illit-Smektit-Reaktion unter geologischen Bedingungen /ŠUC 93/.

Andererseits wird am Beispiel des Nankai-Grabens (vor der japanischen Ostküste), in dem sich Bentonite und Tongesteine unter gleichen geologischen Bedingungen diagenetisch entwickelt haben, argumentiert, dass das Vorhandensein der Organik in Tongesteinen im Unterschied zu Organik-armen Bentoniten der Hauptgrund für Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten sein kann /MAS 01/. Der beschleunigende Einfluss der organischen Verbindungen auf die Smektit-Illit-Reaktion wurde in Laborexperimenten belegt /SMA 94/.

Erhöhte Salinität im Zusammenspiel mit der erhöhten Temperatur wurde als ein weiterer beschleunigender Einflussfaktor auf die Smektit-Illit-Reaktion in der Untersuchung einer Bentonit-Formation in der Slowakei erkannt /HON 04/. In einer Tiefe von 2 100–2 500 m (entspricht gegenwärtig einer Temperatur von ca. 100–130 °C) betrug der Smektit-Anteil der salzhaltigen (Chlorid-Gehalt von 0,1 bis 0,16 M) Bentonite lediglich 10–25 % (mit der R1- und R3-Ordnung der I/S-Wechselagerung), während der Smektit-Anteil der salzfreien (Chlorid-Gehalt von 0,015 bis 0,04 M) Bentonite mit 35–68 % (mit der R0-

Ordnung) deutlich höher ausfiel. Diese Unterschiede traten nur in Bentoniten mit den während der Diagenese über etwa 80 °C erhöhten Temperaturen auf. Dabei zeigten die oberflächennahen Proben ähnliche Smektit-Anteile in salzhaltigen und salzfreien Bentoniten, was auf einen kombinierten Einfluss der Salinität und der Temperatur hinweist /HON 04/. Diese Schlussfolgerung wird auch durch eine neuere Studie bestätigt /CLA 14/.

Der R1→R3-Übergang mit einem Smektit-Anteil von unter 15 % der I/S-Wechselagerung findet laut diagenetischer Literatur bei 150–190 °C unabhängig vom Alter des Tongesteins /POL 93/, /VÁZ 14/. Unter hydrothermalen Bedingungen wurde dieser Übergang in Übereinstimmung mit dem letzteren Temperaturbereich in einer in-situ Untersuchung /INO 05/ bei 175 °C beobachtet. Beim unzureichenden Kaliumangebot verschiebt sich diese Temperaturgrenze auf 240 °C /ARO 06/. Es sei hier allerdings angemerkt, dass das Vorhandensein der Smektit-Schichten in der R3-Ordnung, das mit Hilfe von Röntgendiffraktometrie und den dazugehörigen Auswertemodellen nachgewiesen wird, infrage gestellt und als ein Artefakt der für diesen Nachweis notwendigen Probenvorbereitung erklärt wird /WIL 16/.

Eine vollständige Umwandlung der Smektit-Schichten in der I/S-Wechselagerung zu Illit-Schichten wurde bei einem unzureichenden Kaliumangebot erst bei ca. 270 °C nachgewiesen /ARO 06/. Unter hydrothermalen Bedingungen eines Geothermalfeldes findet sie bei einer Temperatur von 280 °C statt /CUA 06/.

Im Labor wird die Smektit-Illit-Reaktion bereits bei 50 °C innerhalb von 30 Tagen bei einer Kalium-Konzentration von 1 M und einem pH-Anfangswert von 13,4 beobachtet /DRI 02/. Die Begünstigung der Smektit-Illit-Reaktion durch alkalische pH-Bedingungen wurde in der Arbeit /SMA 94/ unterstrichen: Die gelösten Karbonat- sowie Oxalat- und Azetat-Anionen puffern das Kaliumion/Wasserstoffion-Aktivitätsverhältnis im für die Illitierung günstigen Muskovit-Stabilitätsfeld, so dass die Kinetik der Smektit-Illit-Reaktion um einige Größenordnungen ansteigen kann.

In Laboruntersuchungen von /HUA 93/ wurde der Kalium-Umsatz bei steigender Temperatur über die Zeit experimentell bestimmt und auf diese Weise ein Maß für die Reaktionskinetik der Smektit-Illit-Reaktion erhalten. Die darauf basierenden Berechnungen ergaben, dass bei einer Kalium-Konzentration von 200 ppm – die für die Tonporenlösungen charakteristisch ist – eine Illitierung von 80 % der Smektit-Schichten bei 150 °C

nach etwa 100.000 Jahren eintritt. Diese Arbeit kam zum Schluss, dass die Beobachtung /PYT 89/ einer beschleunigten Umwandlung von 50 % von Smektiten innerhalb von ca. 3.500 Jahren bei 150 °C durch eine Kalium-Konzentration oberhalb von 2.000 ppm – die für hydrothermale Lösungen charakteristisch ist – bedingt ist.

Die Berechnungen in /HUA 93/ wurden mit Hilfe der folgenden Gleichung, die den Umsatz des Smektit-Anteils s in der I/S-Wechselagerung mit der Zeit t in Abhängigkeit von der Temperatur T und Kalium-Konzentration $[K^+]$ beschreibt, durchgeführt:

$$\frac{ds}{dt} = -s^2 [K^+] A e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

in der die Parameter A und E_a aus den Messdaten abgeleitet wurden und R die Gaskonstante ist. Allerdings stellte /HEI 16/ fest, dass in /HUA 93/ bei der Ableitung des Parameters A (mit einem Wert von 80800 s⁻¹) fälschlicherweise von einer Normalverteilung der Messdaten ausgegangen wurde, während sie log-normal verteilt sind. Dementsprechend leitete /HEI 16/ aus den Daten von /HUA 93/ einen um eine Größenordnung höheren A -Wert (712000 s⁻¹) ab. Da die Geschwindigkeit der Smektit-Illit-Reaktion linear vom A -Wert abhängt, sind die in /HUA 93/ abgeschätzten Illitisierungszeiten demzufolge um etwa eine Größenordnung überhöht. Dabei wurden die Parameter von /HUA 93/ allein in der Studie /HUA 93/ erfolgreich für die prädiktive Modellierung von fünf unterschiedlichen Tonformationen verwendet. Es bleibt somit offen, inwieweit die mit Hilfe von kinetischer Modellierung abgeschätzten Reaktionszeiten für eine zuverlässige Aussage zum Ablauf der Smektit-Illit-Reaktion eingesetzt werden können.

/WER 07/ kommt aufgrund der Daten in /PUS 95/ für Illitisierung von natürlichen Bentonit-Ablagerungen mit einer Mächtigkeit von 2 m in Kinnekulle (Schweden), die vermutlich etwa 1.000 Jahre Temperaturen im Bereich von 140–160 °C durch eine Basaltintrusion ausgesetzt waren, zu einem Ergebnis für Bentonit, dass eine Erwärmung des gesättigten Bentonits für 200 Jahre bei 150 °C, einem unbegrenzten Kalium-Angebot mit einer Konzentration von 10 mM nur zu einer maximal fünfprozentigen Illitisierung führt. Dieser Abschätzung lagen ein A -Wert von 80800 s⁻¹, wie in der im vorangehenden Absatz diskutierten Studie /HUA 93/, sowie eine Aktivierungsenergie E_a von 27 kcal/mol zugrunde. Allerdings zeigt die originelle Arbeit /PUS 95/, dass bei gleichen anderen Bedingungen eine Aktivierungsenergie E_a von 25 kcal/mol zu einer Illitisierung von etwa 30 % Smektite führt (Abb. A 2). Die in Kinnekulle-Bentoniten tatsächlich beobachtete

Umwandlung von 50–70 % der Smektitite wurde in /PUS 95/ durch den Einsatz einer Aktivierungsenergie von 27 kcal/mol und einer Kalium-Konzentration von 50 mM bei einer Maximaltemperatur von 150 °C für 300 Jahre gefolgt durch weitere 300 Jahre bei 130 °C und 400 Jahre bei 100–130 °C erklärt. Dieses Beispiel zeigt, dass eine vergleichsweise geringe Änderung der Parameter eine erhebliche Änderung des prognostizierten Ausmaßes der Smektit-Illit-Reaktion zu Folge haben kann.

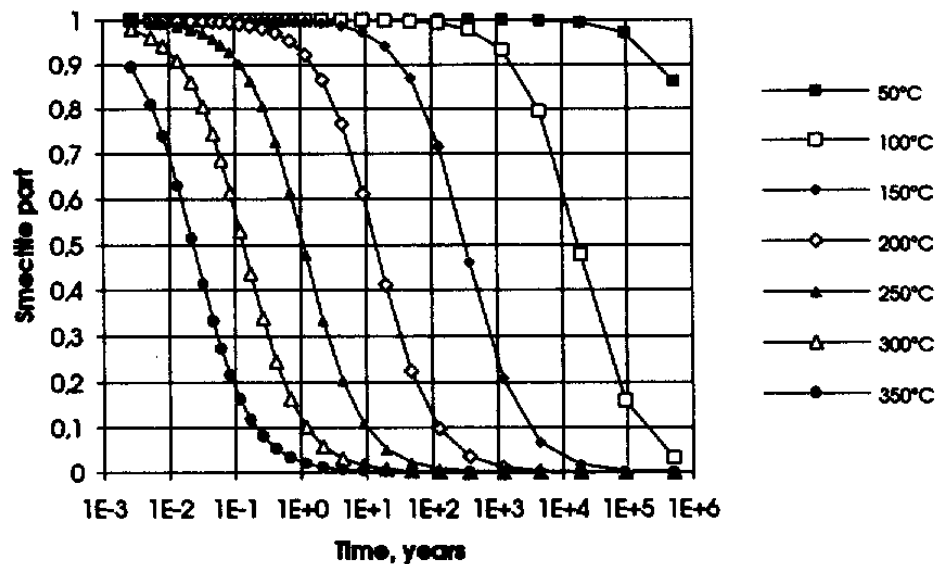


Abb. A 2 Smektit-Anteil der Illit-Smektit-Wechsellagerung (I/S) einer Bentonit-Formation in Abhängigkeit von der in-situ Temperatur und Zeit bei einer Kalium-Konzentration von 0.01 mM und einer Aktivierungsenergie von 25 kcal/mol.

Die Beobachtungen für Kinnekulle-Bentonite liegen in einem deutlichen Unterschied zur Beobachtung für eine ca. 3 Mio. Jahre alte Basaltintrusion im Toarcium-Tongestein in Herault (Frankreich), die den Tongestein lokal auf bis zu 300 °C für vermutlich bis zu einigen 100 Jahren erhitzt hatte /TEC 06/. Im Tongesteinsbereich, der unter 150 °C erhitzt wurde, fanden demnach keine bis vernachlässigbare Änderungen im Gehalt der Illite und Smektitite statt, so dass auch die Mineralphase mit einem Smektit-Anteil von über 50 % in der I/S-Wechsellagerung erhalten blieb. Aufgrund der Reaktion mit der hydrothermalen Lösung in dem unmittelbar an die Basaltintrusion und ihre Ummantelung angrenzenden Tongesteinsbereich wurde sogar eine Smektit-Neubildung festgestellt /TEC 06/.

Diese beiden Beobachtungen stellen allerdings Beispiele lokaler hydrothermalen Bedingungen mit erhöhtem Eintrag der flüssigen Phase dar, was nur eine eingeschränkte

Übertragbarkeit auf ein Endlagersystem bedingt. Gegen die Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse für hydrothermale Systeme auf Endlagersysteme spricht zudem die am Anfang dieses Kapitels diskutierte Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in solchen Systemen im Vergleich zu diagenetischen Veränderungen in Tongesteinen. Die Frage der Anwendbarkeit der Ergebnisse der Natürliche-Analoga-Studien auf das Ausmaß der Smektit-Illit-Reaktion im Endlagersystem kann daher als eine offene Frage identifiziert werden.

Die Diskussion zu Arbeiten /PUS 95/ und /WER 07/ und Abb. A 2 bekräftigt außerdem in der vorangehenden Diskussion zu Arbeiten /HUA 93/ und /HEI 16/ identifizierten Forschungsbedarf, die Zuverlässigkeit der Anwendung der kinetischen Modellierung der Smektit-Illit-Reaktion für Langzeitsicherheitsanalysen der Endlagersysteme kritisch zu überprüfen.

Mineralumwandlungen aufgrund von Eisen-Ton-Wechselwirkungen

Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen metallischem Eisen und CO_x-Ton bei 90 °C unter anoxischen Bedingungen und bei einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von 0,05 bis 0,1 zeigten, dass sich nicht-quellfähige Schichtsilikate wie Berthierin, Cronstedtit oder Greenalith der Fe-Serpentin-Gruppe bzw. Odinit der Kaolinit-Gruppe durch den Umsatz von Illit-Smektit-Wechselagerungen bilden /PIG 14/, /BOU 17/, /RIV 15/, /BOU 14/, /BOU 17/. Diese mineralogischen Umwandlungen sind ausreichend schnell, um den pH-Anstieg durch die Eisen-Oxidation abzuschwächen bzw. sogar zu neutralisieren /BOU 14/, /BOU 17/. Diese hohe Reaktionsfreudigkeit könnte allerdings eine Eigenart des CO_x-Tons sein, der viel höhere Reaktionsraten als Bentonite oder synthetische Gemische aus Silikaten, Tonmineralen, Karbonaten und Oxiden zeigt /RIV 15/.

Bei ähnlichen Ton/Lösung-Massenverhältnissen und einer Temperatur von 150 °C führt die Reaktion des CO_x-Tons mit dem Eisen in Pulverform ebenfalls zur Bildung von Mineralen der Fe-Serpentin-Gruppe, während bei 300 °C nicht-quellfähige Fe- bzw. Fe-Mg-Chlorite entstanden sind /MOS 10/, /JOD 12/. Bei einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von 0,1 und einer Temperatur von 300 °C wurde durch die Zugabe von Eisenoxiden unter anoxischen Bedingungen nach 9 Monaten eine teilweise Umwandlung der Smekтите in einem Bentonit in quellfähige Fe-Saponite beobachtet /GUI 04/.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit CO_x-Ton wurden als kompatibel mit den Stabilitätsfeldern der Fe-Serpentine (Cronstedtit bis 120 °C /PIG 14/, Berthierin bis 130 °C)

und Chlorite (110–420 °C) befunden /MOS 10/. Allerdings sollten neben dem in der letzten Arbeit angegebenen Stabilitätsfeld der Chlorite noch die Ergebnisse einer Naturanalogie-Studie der infolge vulkanischer Intrusion auf 55–95 °C erhitzten Bentonite berücksichtigt werden /PEL 11/. Sie zeigen, dass Fe- und Mg-reiche hydrothermale Porenwässer Montmorillonite in nicht-quellfähige Chlorite bei solchen relativ niedrigen Temperaturen innerhalb von geologischen Zeiträumen (<10–11 Mio. Jahre) alterieren können.

Im Unterschied zu den Versuchen mit Suspensionen des CO_x-Tons haben Versuche mit Eisen in Kontakt mit einem auf eine Trockendichte von 1,8 g/cm³ kompaktierten Kunipia-Bentonit bei einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von 2 und einer Temperatur von 80 °C unter anoxischen Bedingungen innerhalb von 10 Jahren keine nennenswerten Mineralumwandlungen gezeigt /UEN 11/. In in-situ Versuchen mit den auf eine Trockendichte von bis zu 2 g/cm³ kompaktierten Bentoniten in Kontakt mit einem beheizten Stahlrohr wurden nach einem Jahr bei 130 °C /KAU 13/, /SAS 17/ und nach bis zu vier Jahren bei 130–141 °C /KAU 17/ unter zumindest teilweisen anoxischen Bedingungen sowie nach sieben Jahren bei 150 °C unter oxidierenden Bedingungen /SVE 13/ ebenfalls keine nennenswerten Mineralumwandlungen festgestellt.

Illit-Smektitisierung

Ein weiterer relevanter Prozess wurde im Pliozän-Tongestein in Orciatico (Italien), das aufgrund einer magmatischen Intrusion schätzungsweise auf 400–800 °C erhitzt wurde, beobachtet /LEO 86/, /HUE 02/. Die resultierende Destabilisierung des Illits im Tongestein führte zu Smektit- und Kaliumfeldspat-Neubildung mit einem lokalen Anstieg des Smektit-Gehaltes von 0 auf bis zu 25 % und einer entsprechenden Illit-Gehalt-Abnahme von ca. 35 % auf 10–20 %.

Wechselwirkung von Wasserdampf mit Bentonit

Eine Untersuchung von 4 Bentoniten nach einer 5–7-tägigen Wechselwirkung mit Wasserdampf bei 250 °C stellte eine Abnahme des Sedimentationsvolumens – als ein indirektes Maß für Quellfähigkeit im ungespannten Zustand – um ca. 65–90 % fest /COU 85a/. Das minimale Sedimentationsvolumen wurde bei einem Massenverhältnis der reagierten Wasser und Ton von 0,15 beobachtet, während trockenere und feuchtere Tone eine geringere Abnahme des Sedimentationsvolumens zeigten. Dabei verlor Montmorillonit in den reagierten Bentoniten nicht die Fähigkeit, innerkristallin bis zu einem

Schichtabstand von 1,9 nm zu quellen. Für ein Bentonit wurde zusätzlich jeweils ein Versuch bei 150 und 200 °C bei einem Wasser/Ton-Massenverhältnis von 0,15 durchgeführt, der eine Abnahme des Sedimentationsvolumens um jeweils 65 und 75 % ergab.

Eine Erhitzung eines trockenen, eines wassergesättigten und eines teilweise wassergesättigten Bentonits mit Wasser/Ton-Massenverhältnissen von jeweils 0,05, 0,2 und 0,35 auf 110–260 °C für 1 bis 21 Tage in der Arbeit /OSC 89/ führte ebenfalls zu einer Abnahme des Sedimentationsvolumens um bis zu 85 %, wie in der Abb. A 3 für den teilweise wassergesättigten Bentonit dokumentiert. Die Abnahme des Sedimentationsvolumens war wie auch in /COU 85a/ beim teilweise wassergesättigten Bentonit am stärksten.

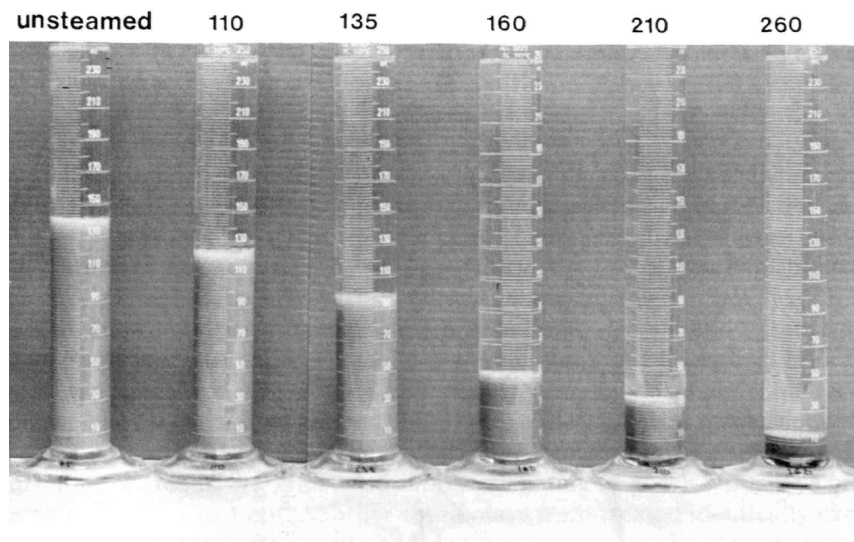


Abb. A 3 Sedimentationsvolumina eines unbehandelten („unsteamed“) und eines für 11 Tage auf unterschiedliche Temperaturen erhitzten Bentonits /OSC 89/.

Eine anschließende Behandlung mit einem Dispersionsmittel und Ultraschall stellte das Sedimentationsvolumen der im trockenen und wassergesättigten Zustand erhitzten Bentonite vollständig wieder her und nur zu 60 % im Fall des teilweise wassergesättigten Bentonits /OSC 89/. Daraus wurde geschlossen, dass die beobachtete Abnahme des Sedimentationsvolumens für die ersteren beiden Fälle aufgrund einer physikalischen Aggregation der Tonmineralteilchen zustande kommt, während sie im letzteren Fall durch diesen Vorgang nur teilweise erklärt werden kann.

In den beiden Untersuchungen /COU 85a/ und /OSC 89/ wurde angenommen, dass der Wasserdampf aus dem im Ton adsorbierten Wasser produziert wird. Da in den Batches

kein freies Wasser vorhanden war, ist ungewiss, ob der Wasserdampf tatsächlich erzeugt wurde und in welchem Umfang. Insofern ist unklar, ob z. B. im Versuch mit luftgetrocknetem Bentonit (Wasser/Ton-Massenverhältnis von 0,08) oder in Bentonit-Suspensionen mit einem Wasser/Ton-Massenverhältnis von 20 /COU 85a/ tatsächlich eine Wechselwirkung zwischen Wasserdampf und Bentoniten stattfand. In der Studie /HEU 14/ wurde hingegen die Reaktion von gefriergetrockneten Bentoniten mit einer aus einem separaten Behälter erzeugten Wasserdampf-Atmosphäre untersucht, so dass kein direkter Kontakt zwischen Bentoniten und dem flüssigen Wasser bestand. Bei den sieben untersuchten Bentoniten wurde nach einer 6-tägigen Wechselwirkung mit Wasserdampf bei 200 °C eine Abnahme des Sedimentationsvolumens um ca. 40 % gemessen /HEU 14/.

In einmonatigen und einjährigen Versuchen mit Bentonit-Suspensionen mit einem Wasser/Ton-Massenverhältnis von 3 bei Temperaturen zwischen 45 und 200 °C in /CUE 01/ kann vermutlich von keiner – in der Arbeit auch nicht erwähnten – Wasserdampf-Bentonit-Wechselwirkung ausgegangen werden. Dennoch wurde ähnlich zu Untersuchungen /COU 85a/ und /OSC 89/ eine starke Abnahme des Sedimentationsvolumens um bis zu 40 % bei 175 °C und ca. 50 % bei 200 °C gemessen, während bei 120 °C und niedrigeren Temperaturen keine signifikante Änderung beobachtet wurde. Der Anteil der Mikroporen mit einem Durchmesser von <2 nm erhöhte sich von 15 % im unbehandelten Bentonit auf 29–35 % bei 175 und 200 °C, während die spezifische Oberfläche um bis zu ca. 35 % abnahm. Diese Änderungen wurden einer physikalischen Aggregation der Tonmineralteilchen zugeschrieben.

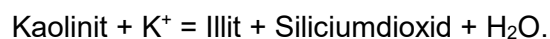
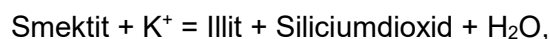
Sowohl in den Studien /COU 85a/ und /OSC 89/ als auch in /CUE 01/ und /HEU 14/ wurden keine Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung der Bentonite festgestellt. In der letzteren Studie wurde zudem auch keine Änderung der Mineralstruktur nachgewiesen. Des Weiteren nahm die Kationenaustauschkapazität um bis zu 30 % für K- und Na-Smektite ab, jedoch blieb diese unverändert für Mg- und Ca-Smektite /HEU 14/. Eine Untersuchung von 10 Bentoniten nach einer 7-tägigen Wechselwirkung mit Wasserdampf bei 250 °C stellte ebenfalls keine Änderung der mineralogischen Zusammensetzung (mit einer Ausnahme von Zersetzung von Gips, wenn vorhanden) und keine signifikante Änderung der Kationenaustauschkapazität, jedoch eine deutliche Abnahme (um ca. 30–70 %) der spezifischen Oberfläche und eine Konversion vom hydrophilen zum hydrophoben Verhalten für alle Bentonite fest /MER 16/.

Als ein Mechanismus für die Beobachtungen in /COU 85a/ und /OSC 89/ wurde eine Zementierung von einzelnen Tonmineralschichten durch das bei einer Tonalteration freigesetzte Silica vorgeschlagen /OSC 96/, /WER 07/. Nach einem alternativen Mechanismus führt eine Erhitzung auf ≥ 150 °C zu einem partiellen oder vollständigen Verlust des Hydratationswassers der austauschbaren Kationen an Tonmineraloberflächen /OUH 10/. Dieser Verlust resultiert in einem Anstieg der Ionenkonzentration, einer entsprechenden Reduktion der Dicke der diffusen Doppelschicht an Tonminerale, einer Abnahme der Abstoßung zwischen einzelnen Tonmineralteilchen und damit zu einer Minderung der osmotischen Quellfähigkeit.

A.2 Auflösung, Transformation und Neubildung von sonstigen Mineralen

Quarz-Zementation

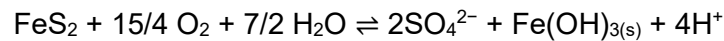
Smektit-Illit- und Kaolinit-Illit-Reaktionen laufen unter geologischen Bedingungen bei Temperaturen von jeweils 60–110/120 °C und 120–140 °C /THY 11/, /GOU 16/ ab und sind die Tonmineralreaktionen, die erhebliche Mengen an Siliciumdioxid – bis zu 30 % der Tonmineralmasse – freisetzen /PEL 09/, /THY 11/. Sie können in vereinfachter Form wie folgt zusammengefasst werden /PEL 09/, /THY 11/:



Im Temperaturbereich 60–80 °C präzipitiert das in der Smektit-Illit-Reaktion freigesetzte Siliciumdioxid – vermutlich lokal – zu mikrokristallinem Quarz /PEL 09/, /THY 11/. Ab einer Temperatur von ca. 85 °C wird die Bildung von verbundenen Netzwerken aus mikrokristallinem Quarz an den Kontaktflächen der Tonkörner – die Quarz-Zementation – begünstigt /PEL 09/, /THY 11/. Bis ca. 130 °C überwiegen noch die Tonmineral-Tonmineral-Kornkontakte im Tongestein /GOU 16/. Ab einer Temperatur von ca. 150 °C können im Tongestein horizontale, nahezu durchgehende Schichten von Quarz gebildet werden /THY 11/.

Pyrit-Oxidation

Eine vermutliche Oxidation von 1–2 Gew. % an Pyrit im COx-Ton entsprechend der Reaktion



bei 85 °C in einem in-situ Versuch im Untertagelabor in Bure (Frankreich) verursachte einen Rückgang des pH in einem Bohrloch von etwa 8 auf 4,5 innerhalb von 200 Tagen /NEC 16/. Die reduzierenden Bedingungen im Versuch wurden nach weiteren 100 Tagen erreicht, so dass der pH sich erst nach weiteren 100 Tagen bei etwa 7,5 stabilisierte. Der in-situ Versuch wurde allerdings so konzipiert, dass vergleichsweise große Lösungsmengen mit dem gelösten Sauerstoff im Bohrloch – in gewisser Ähnlichkeit zum Französischen Endlagerkonzept mit 13 % des Einlagerungsbohrlochvolumens als Hohlraum um die Abfallbehälter – vorhanden waren. Die Relevanz dieses Effektes bei geringeren vorhandenen Hohlräumen kann als eine offene Frage identifiziert werden.

H₂-induzierte Pyrit-Reduktion

Bei Temperaturen kleiner gleich 150 °C und H₂-Partialdrucken unter 3 MPa wird die Hydrogensulfid-Konzentration in der flüssigen und gasförmigen Phase allein durch die Löslichkeit des Pyrits bestimmt. Diese Löslichkeit kann z. B. bei 1–2 Gewichts % an Pyrit im Ton, einem H₂-Partialdruck von 0,6 MPa und einer Temperatur von 150 °C oder 90 °C etwa 0,5 mmol/L bzw. 0,02 mmol/L betragen /TRU 13/. Bei Temperaturen über 150 °C und H₂-Partialdrucken über 3 MPa hingegen wird Pyrit (FeS₂) innerhalb kürzester Zeit vollständig in Pyrrhotite (FeS_{1+x}) mit gleichzeitiger Freisetzung von (1–x) Molen Hydrogensulfid per Mol Pyrit umgesetzt.

Zersetzung von Karbonatmineralen

/COU 98/ berücksichtigt 400 Messwerte des CO₂-Partial-Drucks im Bereich 0,002 bis 130 bar aus 8 unterschiedlichen Sedimentformationen mit Umgebungstemperaturen bis zu 200 °C (Abb. A 4). Er zeigt, dass sich der beobachtete Druck-Temperatur-Zusammenhang durch die Zersetzung von Dolomit und Calcit in Anwesenheit von einem Mg-Al-Silikat, wie z. B. Chlorit oder Phlogopit, zusammen mit anderen Silikat- bzw. Tonmineralen /CER 17/, wie Smektit, Kaolinit, Feldspat oder Quarz, erklärt. Diese Karbonat-Ton-Reaktion kommt durch die Silikathydrolyse zustande und resultiert in eine

Zersetzung von Karbonatmineralen und eine CO₂-Freisetzung, die weit über der CO₂-Freisetzung aus der Organik liegt /HUT 90a/, /HUT 90b/, /CER 17/. Den Tonformationen mit einem hohen Karbonatgehalt wird daher ein Potential für anorganische CO₂-Produktion bei steigender Temperatur bzw. Salinität bescheinigt /HUT 90a/, /HUT 90b/. Diese Reaktion kann nur bei Temperaturen unterhalb 50 °C vernachlässigt werden. Sie gewinnt an Bedeutung bei höheren Temperaturen und dominiert über eine mögliche Karbonatfällung ab etwa 100 °C /SMI 89/, /CER 17/.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass in Langzeitsicherheitsanalysen der Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle bisher üblicherweise von einem gegenteiligen Effekt von erhöhten Temperaturen ausgegangen wird. Z. B. wird in /WER 07/ und in /BRA 14b/ (auf S. 40-41) angenommen, dass Calcit und andere Karbonatminerale bei erhöhten Temperaturen stabiler werden und ausfallen.

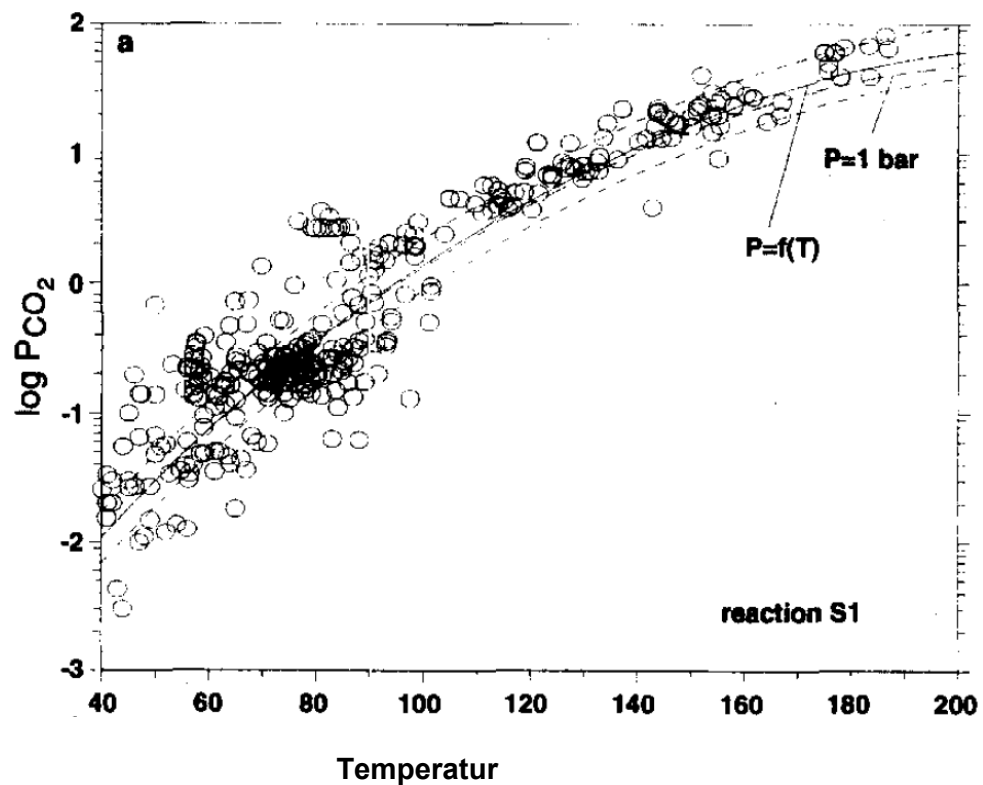


Abb. A 4 Partiieller CO₂-Druck (bar) in Abhängigkeit von den Umgebungstemperaturen in Sedimentformationen /COU 98/.

Das Auftreten der Karbonat-Ton-Reaktion lässt sich auch in Laboruntersuchungen erkennen. Eine anderthalbjährige thermische Behandlung eines Wyoming Bentonits mit einem Calcitgehalt von 7 Gew. % bei 200 °C führte zu einem kompletten Verlust des

Calcits /YAU 87/, der mit einer CO_2 -Freisetzung verbunden sein muss. Auch in einem Versuch mit einem Bentonit mit einem CO_2 -Gehalt von ca. 5,5 Gew. % bei 90°C wurde innerhalb von 28 bis 730 Tagen ein CO_2 -Verlust von 2 bis 5 Gew. % festgestellt /FIL 17/. In einem in-situ Versuch im CO_x -Ton und niedriglegiertem Stahl im Untertagelabor in Bure (Frankreich) führte die Calcit-Zersetzung bei einer Temperatur von 85°C zu einem Anstieg des CO_2 -Partialdrucks auf ca. 1 bar /NEC 16/. Andererseits wurde in Laborversuchen mit CO_x -Proben und Zugabe des metallischen Eisens als Pulver ($40\ \mu\text{m}$), Granulat ($< 2\ \text{mm}$) oder Plättchen ($< 6\ \text{mm}$) bei einer 3- bis 6-monatigen Behandlung bei 90°C nur eine geringfügige CO_2 -Freisetzung von bis zu 0,026 bar festgestellt /PIG 14/, /BOU 14/. In der Arbeit /RIV 15/ wurde denn auch beobachtet, dass die Zugabe des metallischen Eisens als Pulver ($40\ \mu\text{m}$) eine Pufferung des pH-Wertes durch die Zersetzung von Karbonatmineralen behinderte.

Die Menge an gelöstem CO_2 im Porenwasser eines Sedimentgesteins, das Karbonat- und Ton- bzw. Aluminosilikatminerale enthält, wird durch das Gleichgewicht zwischen der wässrigen und festen Phase gesteuert (Abb. A 5a). Sobald die Summe der Partialdrucke der flüchtigen Species (CO_2 , $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ usw.) den Fluiddruck in der wässrigen Phase übersteigt wird eine separate Gasphase gebildet (Abb. A 5b). Der Dichtenunterschied zwischen der Gasphase und der wässrigen Phase begünstigt die nach oben gerichtete Migration von CO_2 (Abb. A 5c).

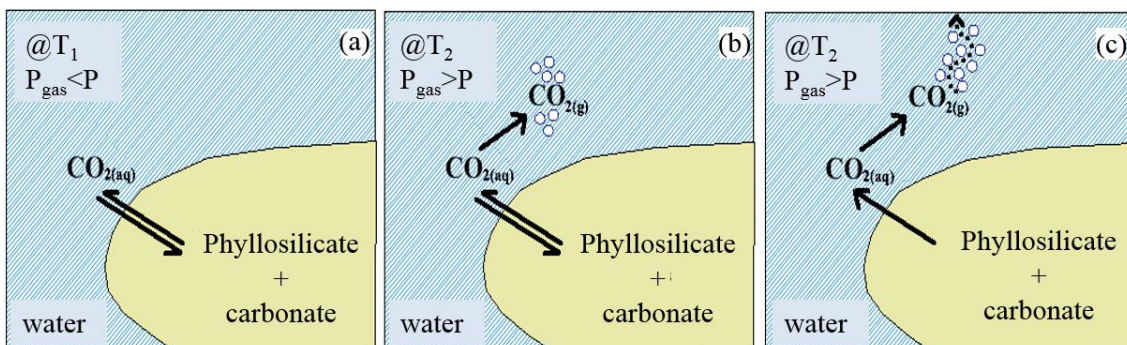


Abb. A 5 Gleichgewichtsänderungen infolge der Karbonat-Ton-Reaktion:
 (a) im Gleichgewicht ist eine separate CO_2 -Gasphase nicht vorhanden;
 (b) ein neues Gleichgewicht mit einem Partialdruck der Gasphase über dem Fluiddruck der wässrigen Phase stellt sich ein;
 (c) eine separate CO_2 -Gasphase bildet sich und migriert nach oben aufgrund des hydrostatischen Auftriebs /CER 17/.

A.3 Chemische Alteration von Organika

Der Gasgehalt kann ca. 1 bis 15 % der Kerogenmasse im Ton betragen /BRU 12/. Dabei ist CO₂ die Hauptgaskomponente mit bis zu ca. 10 % der Kerogenmasse und H₂S die zweitwichtigste Gaskomponente des Kerogens. Die CO₂-Fraktion, die bei T < 200 °C freigesetzt wird, wird als thermolabil bezeichnet und beträgt z. B. bei Boom Clay ca. 50-55 mg pro g Kerogen (Abb. A 6) /LOR 08/, /BRU 12/. Die Freisetzungstemperatur dieser Fraktion hängt dabei mit der Dauer der thermischen Belastung zusammen. So wurde abgeschätzt, dass die thermolabile Fraktion bei 80 °C zur Hälfte und bei 100 °C nahezu vollständig innerhalb von 200 Jahren freigesetzt wird /BRU 12/.

Die Pyrolyse des Kerogens, die ebenfalls zur CO₂-Freisetzung und zusätzlich aufgrund der Spaltung der C=C-Bindungen zur Kohlenwasserstoff-Freisetzung führt, startet hingegen erst bei 150 °C (Abb. A 6).

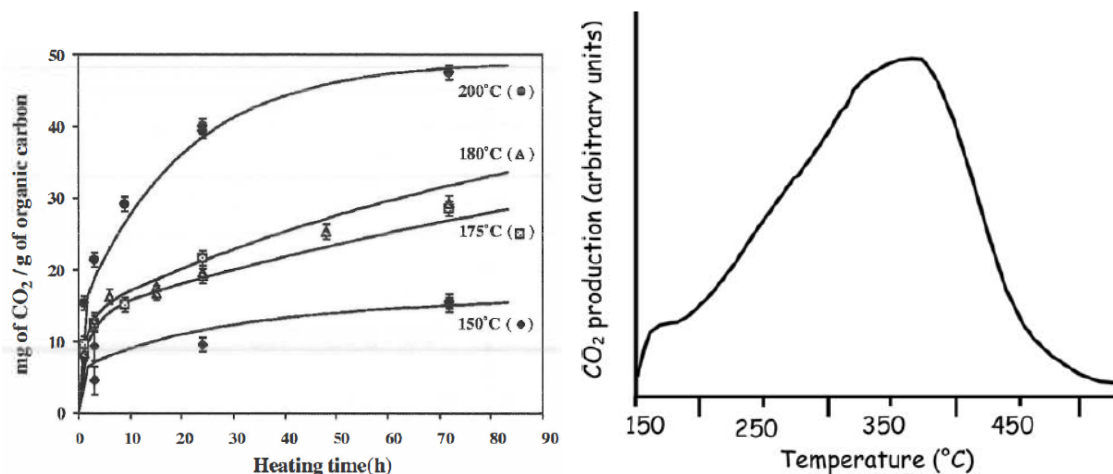


Abb. A 6 links: Freisetzung der thermolabilen CO₂-Fraktion /LOR 08/
rechts: CO₂-Freisetzung bei Pyrolyse /BRU 12/.

Eine abnehmende Temperatur führt zu einer Reduktion der Zersetzung der Organik (Abb. A 7).

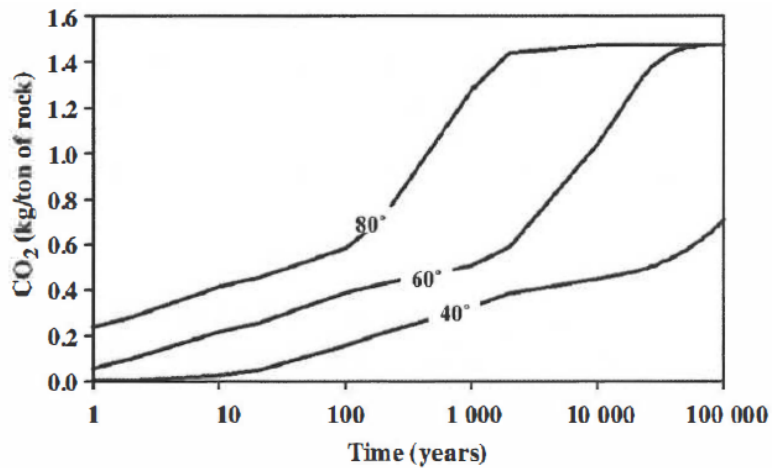


Abb. A 7 Prognostizierte Änderung der CO₂-Freisetzung im Boom Clay mit Temperatur /LOR 08/.

Der Bericht /BRU 12/ stellt fest, dass sich die CO₂-Freisetzung aus Tonproben hinsichtlich sowohl der Menge als auch des Musters von der CO₂-Freisetzung aus Kerogenproben erheblich unterscheidet (Abb. A 8).

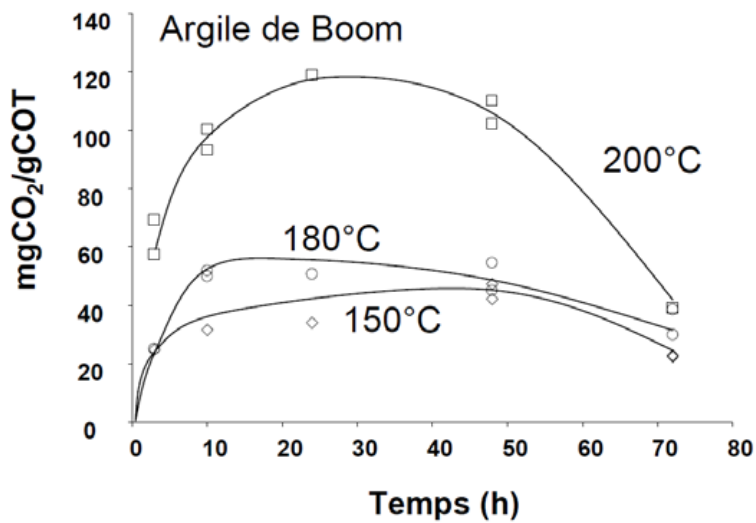


Abb. A 8 CO₂-Freisetzung (mg pro g des organischen Kohlenstoffes) aus einer Boom Clay Probe /BRU 12/.

A.4 Mikrobielle Prozesse

Aktivität von Eisen(III)-reduzierenden Mikroben

Eisen(III)-reduzierende Mikroben können Fe(III)-Reduktion zu Fe(II) in der Tonmineralstruktur des Tons verursachen, die durch eine Auflösung von Tonmineralen begleitet werden kann /MEL 11/, /MEL 14/. Solche Auflösung kann von Mikroben auch ohne den Zwischenschritt Fe(III)-Reduktion durch Erzeugung von niedrigmolekularen Verbindungen mit hoher Fe(III)-Affinität erzwungen werden. Die Fe(III)-reduzierenden Mikroben sind in Tongesteinsformationen indigen und können sich im Temperaturbereich zwischen 4 °C (*Rhodoferax ferrireducens*, *Geopsychrobacter electrodiphilus*, and *Geobacter psychrophilus*) /NEV 05/ bis 121 °C vermehren (strain 121) /KAS 03/ sowie die Temperatur von bis zu 130 °C für etwa zwei Stunden (strain 121) überleben /KAS 03/. Nahezu alle hyperthermophile Mikroben, die bisher aus den tiefen Untergrundsedimenten isoliert wurden, können Fe(III) reduzieren /LOV 04/. Sie sind nicht auf organische Kohlenstoffverbindungen als Energiequelle angewiesen und können für Energiegewinnung das Wasserstoffgas verwerten, das in einem Endlager durch Metallkorrosion, Radiolyse oder mikrobielle Umsetzung von Mineralen erzeugt wird /MEL 11/, /MEL 14/. Eisen(III)-reduzierende Mikroben (unbestimmte Spezies) wurden z. B. für die Umwandlung von Smektiten und Illiten des Oberkreide- bis Eozän-Tongesteins in die weltgrößte Lagerstätte des hochreinen Kaolins in den USA verantwortlich gemacht /HUR 97/. Obgleich sich diese mikrobielle Aktivität im Primärzustand der dadurch entstandenen Kaolin-Lagerstätte aufgrund der nicht mehr vorhandenen Elektronenakzeptoren auf extrem niedrige metabolische Raten reduziert haben muss, verursachte ihr Anstieg in Kaolinschlamm die Notwendigkeit einer routinemäßigen Biozid-Zugabe zwecks Einhaltung des industriellen Toleranzlevels.

Die mikrobielle Reduktion von Fe(III) in der Tonmineralstruktur des Tons führt zum Anstieg der Schichtladung der Tonminerale, wodurch der Quelldruck um bis zu ca. 40 % und die spezifische Oberfläche um bis zu ca. 30–50 % zurückgehen können, wohingegen die Kationenaustauschkapazität um bis zu ca. 20–30 % zunehmen kann /KOS 99/. Sobald ca. 1,2 mmol Fe(III) pro g Ton in der Tonmineralstruktur reduziert werden, wird sie zunehmend instabil und eine Freisetzung von Fe(II) zusammen mit der Tonmineralauflösung kann stattfinden /JAI 08/. Ein Tongestein aus dem Unteren Miozän im Madri-der Becken liefert einen überzeugenden mineralogischen Nachweis der mikrobiellen Reduktion von Fe(III) und der Freisetzung von Fe(II) aus Biotit und Chlorit, die dadurch an Fe um jeweils 24 und 40 Gew. % abgereichert wurden /SAN 09b/.

Beim Vorhandensein von gelöstem Kalium resultiert die Fe(III)-Reduktion und Tonmineralauflösung in einer irreversiblen Umwandlung von Smektit zu Illit. Mikrobielle Aktivität kann diese Reaktion sehr stark beschleunigen, so dass Illit z. B. innerhalb von 14 Tagen bei 25 °C und 0,1 MPa gebildet werden kann /KIM 04/. Eine Untersuchung eines Tongesteins aus dem Kambrium 3. Serie präsentierte einen Nachweis der mikrobiellen Smektit-Auflösung begleitet von Illit-Bildung, die bei Temperaturen von 26–69 °C während der frühen Diagenese stattfand /VOR 09/. Die Auswirkungen der mikrobiell beschleunigten Smektit-Illit-Reaktion sind dieselben wie oben im Abschnitt 0 beschrieben. Da aufgrund dieser Reaktion auch die Porosität und Permeabilität des Tons bei fortschreitender Quarz-Zementation abnehmen, wird die mikrobielle Aktivität wegen der Verringerung des Lebensraums auf ein Minimum zurückgehen, wie z. B. für Callovo-Oxfordian-Tongestein in /LER 11/ diskutiert.

Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben

Sulfat-reduzierende Mikroben reduzieren gelöste Sulfationen zu Sulfid oder Thiosulfat und zeigen ein optimales Wachstum im Temperaturbereich von 7 °C mit der unteren Wachstumstemperatur von –1,8 °C (*Desulfofrigus oceanense*, *Desulfofrigus fragile*, *Desulfofaba gelida*, *Desulfotalea psychrophila*, *Desulfotalea arctica*) /KNO 99/ bis 80–95 °C (möglicherweise thermophile Archaea-Spezies *Archaeoglobus profundus*) /WEB 02/. Ein optimales Wachstum bei noch höheren Temperaturen von 103–106 °C wurde für Sulfat-reduzierende Mikroben (unbestimmte Spezies) in den hydrothermalen Tiefseesedimenten ebenfalls beobachtet /JØR 92/. Allerdings wurde die mikrobielle Reduktion von Sulfat bei über 100 °C in weiteren Studien weder bestätigt noch widerlegt /WEB 02/ und in /MAC 01/ nur sehr seltenen Mikrobenspezies mit einer vernachlässigbaren geologischen Signifikanz bescheinigt. Bentonite wie z. B. Wyoming MX-80 Bentonite weisen eigene Sulfat-reduzierende Mikroben (unbestimmte Spezies) auf, die auch eine Erhitzung des Bentonits bei 120 °C für 15 Stunden – wenn auch mit reduzierter Populationsgröße – vermutlich durch die Bildung von Endosporen überleben können /MAS 10/. Obwohl sich mit Temperaturen von bis zu 95 °C oder ggf. sogar 106 °C für Sulfat-reduzierende Mikroben eine Bedingung für ein optimales Wachstum erfüllen kann, wurde in einigen Experimenten und Sedimentformationen eine Hemmung ihrer Aktivität bei Temperaturen über 70–80 °C beobachtet /PAR 11/.

In einem relevanten Beispiel resultierte eine Platzierung einer zersetzbaren Kohlenstoffquelle im Bohrloch (vermutlich Glycerols in Eh- und pH-Elektroden) in einem In-situ-Versuch im Opalinuston im Untertagelabor Mont Terri in einem Anstieg der Sulfid-

Konzentration durch die Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben (möglicherweise *Desulfosporosinus lacus* und/oder andere nicht bestimmte Spezies /STR 11/) auf bis zu 1,0 mmol/L /WER 11/.

Anstelle von Sulfat als Elektronenakzeptor können Sulfat-reduzierende Mikroben Elektronen an Fe(III) in der Tonmineralstruktur abgeben und metallisches Eisen als Elektrodendonator direkt verwerten /MEL 11/. Auf diesem Wege oder infolge der Sulfid-Produktion kann die Korrosion von Metallen beeinflusst werden. In einem vierjährigen Großversuch wurden Anzeichen der mikrobiell beeinflussten Korrosion der Stahlauskleidung außerhalb der auf $1.8\text{--}2.0\text{ g cm}^{-3}$ verdichteten, ungesättigten Tonverfüllung und des 140 °C heißen Stahlheizelementes in Kontakt mit Sandverfüllung bei Temperaturen von $100\text{--}137\text{ °C}$ festgestellt /KUR 04/. An der Auskleidung bildete sich an einer Stelle eine $\sim 450\text{ }\mu\text{m}$ dicke Schicht aus Chromoxid (Cr_2O_3) und Chromsulfid (Cr_2S_3) auf bis zu $150\text{ }\mu\text{m}$ tiefen Korrosionslöchern. Die Bildung von Chromsulfid auf Edelstahl wurde als ein Reaktionsprodukt zwischen Chromoxid der Passivierungsschicht und des durch Sulfat-reduzierende Mikroben (der unbestimmten Spezies) produzierten H_2S vorgeschlagen /DUA 06/. Am Heizelement bildete sich eine dicke Schicht aus Nanoteilchen von vermutlich Eisensulfid, dessen Bildung für eine mikrobiell beeinflusste Korrosion charakteristisch ist /KUR 04/.

Eine thermophile Sulfat-reduzierende Spezies *Desulfotomalum thermocisternum* strain ST90 reduziert Sulfat zu Sulfid bei 60 °C und Thiosulfat anstelle von Sulfid bei niedrigeren Temperaturen /ZHA 12/. Im nächsten Schritt wurde das Thiosulfat von dieser Spezies zu Sulfid bei 40 und 50 °C jedoch nicht bei 30 °C reduziert. Eine Korrelation zwischen diesem metabolischen Verhalten und der temperaturabhängigen Änderung der Korrosionsrate des unlegierten Stahls mit der Maximalrate bei 60 °C und eine Korrosionsinhibierung bei 30 °C wurde aufgezeigt.

Das durch Sulfat-reduzierende Mikroben produzierte Sulfid in Konzentrationen von etwa $1,0\text{ mmol/L}$ kann durch Fe(III)-Reduktion eine großräumige Umwandlung von quellfähigen Tonmineralen in nicht-quellfähige Minerale innerhalb von einigen Jahrhunderttausenden bis Jahrmillionen bewirken /RAI 96/. Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben kann die Korrosionsrate von eisenhaltigen Materialien im Kontakt mit Ton auf bis zu $600\text{--}700\text{ }\mu\text{m}$ pro Jahr /KUR 04/, /ELH 10/ erhöhen sowie eine gleichmäßige Korrosion in einen Lochfraß überführen /MEL 11/, /MEL 14/. Diese Korrosionsrate gilt als Maximalrate auch für nicht tonige Umgebungen /SHE 11/.

Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben

Methanogene Mikroben produzieren Methan und können bei Temperaturen von 1 °C (*Methanosarcina lacustris*) /SIM 01/ bis zu 116 °C bei einem Umgebungsdruck von 0.4 MPa und 122 °C bei 20 MPa (*Methanopyrus kandleri* strain 116) /TAK 08b/ aktiv bleiben, sind nicht auf CO₂ (oder Methyl) als Elektronenakzeptoren angewiesen und können stattdessen Elektronen an Fe(III) in der Tonmineralstruktur abgeben /MEL 11/. Beispielsweise wurden etwa 1,4 mmol Fe(III) per g Ton innerhalb von vier Wochen in Laborversuchen mit Tonsuspensionen durch *Methanosarcina barkeri* reduziert /LIU 11/. Aufgrund der Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben stieg z. B. die Methankonzentration im Porenwasser des oben angesprochenen In-situ-Versuches im Untertagelabor Mont Terri um drei Größenordnungen bis auf 0,7 mmol/L an /WER 11/. Sie war somit vergleichbar mit der Methankonzentration von 1,1 mmol/L im Grundwasser eines mit Gas-kondensat kontaminierten oberflächennahen sandigen Aquifers in Colorado, USA, in dem methanogene Mikroben als die wichtigste Acetat-konsumierende Spezies fungierten /MEL 11/. Die Anwesenheit von thermophilen und hyperthermophilen methanogenen Mikroben (unbestimmte Spezies) im Opalinuston mit derzeitiger Porenwassertemperatur von 14–25 °C wurde in Inkubationsversuchen bei jeweils 60 und 80 °C bestätigt /STR 11/.

Trotz einer generell hoher Temperaturüberlebensfähigkeit konnte in einem Experiment die Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben (unbestimmte Spezies) durch eine Erhitzung auf 104 °C für zwei Stunden vollständig unterbunden werden /OH 03/. Außerdem, obwohl sich mit Temperaturen von bis zu 122 °C für methanogene Mikroben eine Bedingung für ein optimales Wachstum erfüllen kann, wurde in /PAR 11/ eine Hemmung ihrer Aktivität bei Temperaturen über 70–80 °C beobachtet.

Methan-produzierende Mikroben können metallisches Eisen als Elektronendonator direkt verwerten und Methan und Wasserstoffgas aus metallischem Eisen in Kontakt mit Montmorillonit produzieren /CHA 10/. Eine Inkubation von marinen Sedimenten mit Eisengranulat in einer weiteren Untersuchung zeigte auf, dass Methan-produzierende Mikroben Elektronen aus metallischem Eisen um mehr als eine Größenordnung schneller ziehen können, als es bei einer abiotischen Korrosion durch Wechselwirkung mit Wasser zu erwarten ist /DIN 04/.

Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben kann zur Korrosion von eisenhaltigen Materialien, zur Umwandlung von quellfähigen Tonmineralen in nicht-quellfähige Minerale und zur Gasproduktion in einem Endlager beitragen /MEL 11/.

Aktivität von fermentativen Mikroben

Als eine Fermentation werden mikrobielle metabolische Prozesse bezeichnet, die ohne einen externen Elektronenakzeptoren für die Oxidation der Organika ablaufen und resultieren in der Akkumulierung von solchen reduzierten Verbindungen wie Acetat, Formiat und H₂ sowie des oxidierten Kohlenstoffes (CO₂) /MEL 11/, /MEL 14/. Fermentative Mikroben können bei Temperaturen von -2,5 °C (*Acetobacterium* strains LS1 und LS2) /SAT 07/ bis zu 110 °C (*Pyrodictium abyssi*) /PLE 91/ aktiv bleiben.

Obwohl in /WIL 01/ argumentiert wird, dass Erdöllagerstätten durch eine Erhitzung auf etwa 80–90 °C während ihrer Versenkungsgeschichte von den Kohlenwasserstoff-abbauenden, fermentativen Mikroben sterilisiert werden, zeigen andere Untersuchungen ein etwas differenzierteres Bild. In /ARO 14/ wird über vier unterschiedliche Stämme der fermentativen Bakteriengattung *Clostridium* berichtet, die durch eine Emulgierung des Erdöls und eine Fluiddruckerhöhung aufgrund der metabolischen CO₂-Produktion bei 96 °C die Erdölgewinnung deutlich verbessern können. Fermentative *Thermotoga hypogea*- und *Thermotoga petrophila*-ähnliche Mikroben dominieren die Population einer Erdöllagerstätte in einer Tiefe von etwa 1,70 km mit einem in-situ Druck von 11,3 MPa und einer in-situ Temperatur von 98 °C /YAM 11/.

Eine Fermentation (durch unbestimmte Mikrobenspezies) mit geologisch bedeutenden Raten wurde für ca. 50–900 m tiefen und bis zu 10 m mächtigen Tonschichten der Black Creek Formation in South Caroline, USA, mit einem Organikagehalt von ca. 0,7 Gew. % nachgewiesen /MCM 92/. Diese Fermentation produzierte Acetat und Formiat in Konzentrationen von jeweils bis zu 1,8 und 6,4 mmol l⁻¹ im Tonporenwasser, die in anliegenden sandigen Schichten von Sulfat-reduzierenden Mikroben verstoffwechselt wurden. In einem weiteren Beispiel waren fermentative und Sulfat-reduzierende Mikroben (unbestimmte Spezies) aktiv in einer Unterkreide-Formation an der Grenze zwischen Sandstein und Tongestein mit einem Organikagehalt von ca. 1,5 Gew. % vermutlich aufgrund der Diffusion der Organika aus dem Tongestein /KRU 97/.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine Temperaturerhöhung auf 90 °C auch nach vorheriger 10-monatiger Behandlung der Sedimentproben bei 60 °C die mikrobielle Aktivität

durch die vermutlich verbesserte Abbaubarkeit der abbauresistenten Organika deutlich erhöht /PAR 07/. Des Weiteren können Mikroben (unbestimmte Spezies) die Bildung von H_2 in Sedimenten, die mit Mineralen oder Gesteinen vermengt und auf 40–100 °C erhitzt werden, stark beschleunigen und die H_2 Konzentration um einen Faktor von 325 (auf 1.6 mmol l⁻¹) erhöhen /PAR 11/. In einem weiteren Effekt erhöht die mikrobielle Aktivität bei Temperaturen unter 100 °C abiotische Gasbildung bei einer anschließenden Temperaturerhöhung auf 125–155 °C /PAR 11/.

In /PAR 11/ wurden eine Akkumulierung des Acetats aufgrund der Aktivität der fermentativen Mikroben (unbestimmte Spezies) und gleichzeitige Hemmung der Methanogenese und Sulfat-Reduktion bei Temperaturen über 70–80 °C beobachtet. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass methanogene und Sulfat-reduzierende Mikroben bei solchen Temperaturen Acetat nicht verstoffwechseln können, weil diese Fähigkeit bisher nur Fe(III)-reduzierenden Mikroben bescheinigt wurde /LOV 04/.

Aktivität von Acetat-produzierenden fermentativen Mikroben und von autotroph wachsenden Sulfat-reduzierenden Mikroben kann aufgrund von H_2 - und CO_2 -Verbrauch /MEL 11/ und einer entsprechenden Gasdruckminderung auch positive Auswirkungen auf die Endlagerentwicklung haben. Außerdem kann die Aktivität von Acetat-produzierenden fermentativen Mikroben unter bestimmten Bedingungen die Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben bei >80 °C hemmen.

Bildung von Biofilmen

Die zuvor genannten mikrobiellen Prozesse können durch den Prozess der Biofilmbildung in ihrer Wirkung noch verstärkt werden, da dieser Prozess Mikroben eine effizientere Energie- und Nährstoffverwertung in einem gegen die äußeren Einwirkungen geschützten Raum sichert /MEL 11/. Z. B. bilden Sulfat-reduzierende Mikroben der Spezies *Archaeoglobus fulgidus* Biofilme bei einer Temperaturerhöhung auf 100 °C oder Temperaturerniedrigung auf 60 °C, während sie als planktonische Zellen zwischen 60 und 86 °C gedeihen /LAP 97/. Laut /LAP 97/ kann die Biofilmbildung eine allgemeine Reaktion von Archaeen auf Umgebungsstress darstellen, weil ähnliche Biofilme auch durch *Archaeoglobus profundus*, *Methanococcus jannaschii* und *Methanobacterium thermoautotrophicum* gebildet werden.

In einer positiven Auswirkung kann z. B. die Teilnahme von Fe(III)-reduzierenden Mikroben zusammen mit Sulfat-reduzierenden Mikroben an der Biofilmbildung an

Stahloberfläche bei Verfügbarkeit von Fe(III) die Korrosion des Stahls durch die Passivierung der Oberfläche mit Fe(II)-Sulfid hemmen /LEE 06/.

Bildung von Endosporen

Einige Bakterienarten besitzen die Fähigkeit Endosporen zu bilden, die ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber ungünstigen Umgebungsbedingungen erhöht. Sie wird durch den Mangel an leicht verwertbaren Formen des Kohlenstoffs, Stickstoffs bzw. Phosphors in der lokalen Umgebung eines entsprechend befähigten Bakteriums ausgelöst /NIC 00/. Die letalen Temperaturen z. B. für *Bacillus subtilis* im Endosporen-Zustand liegen um 30–40 °C höher als im aktiven Zustand /NIC 00/. In einer weiteren Untersuchung überlebte thermophile Sulfat-reduzierende *Desulfotomaculum* sp., die das optimale Wachstum zwischen 43 und 78 °C hat, im Endosporen-Zustand eine Erhitzung unter feuchten Umgebungsbedingungen (Autoklavierung) auf 131 °C für 20 min /ROS 91/. In einer anderen Studie konnte *Desulfotomaculum* sp. C1A60 bei 130 °C 30 min und *Desulfotomaculum kuznetsovii* bei 140 °C 15 min überleben /OSU 15/. Dabei kann die Überlebensdauer der Endosporen unter trockenen Umgebungsbedingungen um etwa einen Faktor 1000 höher sein als unter feuchten Umgebungsbedingungen (Abb. A 9).

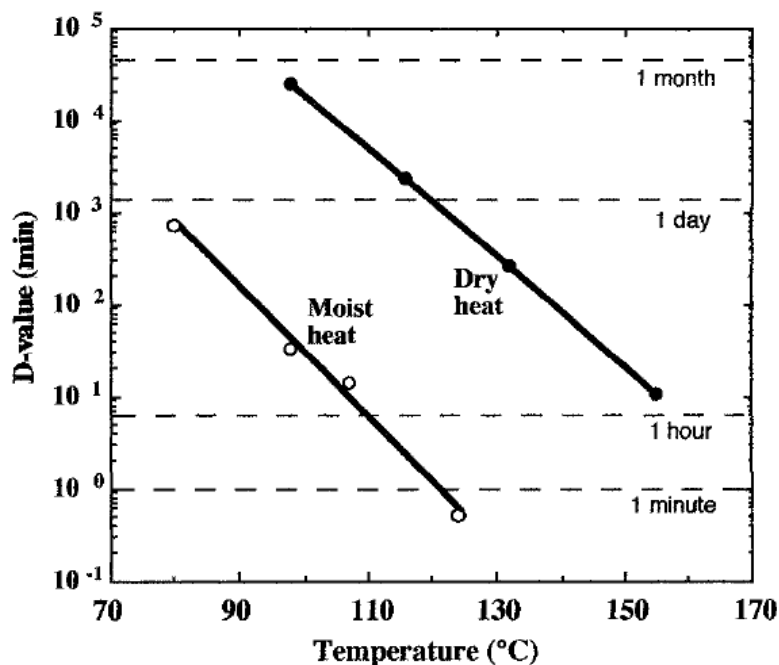


Abb. A 9 Dauer einer trockenen bzw. feuchten thermischen Behandlung (min), die zu einer zehnfachen Abnahme der Anzahl der Endosporen des *Bacillus subtilis* führt, in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur /NIC 00/.

Die obere Temperaturgrenze für die Aktivität von Sulfat- und Fe(III)-reduzierenden Bakterien liegt wie oben diskutiert bei etwa 95–106 °C /JØR 92/, /WEB 02/ bzw. 121 °C /KAS 03/. Da sowohl Sulfat- als auch Eisen(III)-reduzierende Bakterien (jedoch nicht die Methan-produzierenden Archaeen) Endosporen bilden können /SLO 99/, /CHI 08/, wäre demnach eine relativ kurzzeitige thermische Behandlung bei etwa 150 °C benötigt, um etwaige Endosporen in einem Material zu eliminieren. Mit ansteigender Behandlungsdauer kann von einer Abnahme der dafür benötigten Behandlungstemperatur ausgegangen werden, da z. B. in Sedimentgesteinsschichten, die eine Paläotemperatur von 140 °C oder 145 °C während ihrer Entstehungsgeschichte erfahren haben, jeweils nur äußerst geringe bzw. keine Mengen an mikrobieller Biomasse vorgefunden wurden /COL 97/.

A.5 Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen

Laborversuche mit Wyoming-Montmorillonit zeigen, dass in einem geschlossenen System bei einem Temperaturanstieg auf 163 °C Montmorillonit-Zwischenschichten mit drei Wasserlagen (Schichtabstand 1,8-1,9 nm, Wassergehalt von ca. 30 Gewichts %) nur zu einem Anteil von 20 % in einen Montmorillonit mit zwei Wasserlagen (Schichtabstand ca. 1,54 nm, Wassergehalt ca. 20 Gewichts %) und einem durch den teilweisen Zwischenschichtwasserverlust einhergehenden Porendruckanstieg auf 0,6 MPa umgewandelt werden /HUA 94/. Ein weiterer Temperaturanstieg auf 313 °C führte zwar zu einem Porendruckanstieg auf ca. 110 MPa, jedoch nur zu einem geringfügigen weiteren Zwischenschichtwasserverlust. Der Zustand mit zwei Wasserlagen wurde erst bei einer Temperatur von über 330 °C und einem Porendruck von etwa 180 MPa erreicht.

Ein ungesättigter Wyoming-Montmorillonit mit zwei Wasserlagen in 80 % der Zwischenschichten und einer Wasserlage (Schichtabstand 1,24-1,26 nm, Wassergehalt ca. 10 Gewichts %) in den restlichen Zwischenschichten wurde in einen Montmorillonit mit einer Wasserlage bei einer Temperatur von 88 °C umgewandelt. Der Zwischenschichtwasserverlust in diesem geschlossenen System führte zu einem Anstieg des Porendruckes auf 0,16 MPa /HUA 94/. Dieser Zustand blieb bis zu einer Temperatur von 215 °C (Druck 2,07 MPa) größtenteils erhalten. Der Schichtabstand erniedrigte sich geringfügig auf 1,21 nm.

Eine Verringerung des Quelldruckes aufgrund des Zwischenschichtwasserverlustes kann als reversibel betrachtet werden, solange Smektite nicht über 500–600 °C erhitzt

werden /HUA 94/, /DER 12/. Bei 200 °C und unter drainierten Laborbedingungen dehydrieren Smektite nur unvollständig und enthalten etwa 1 Gewichts % des Wassers, das in Form des Hydratationswassers der austauschbaren Kationen in den Zwischenschichten und an den äußeren Oberflächen der Tonmineralteilchen vorliegt /DER 12/. Der komplette Verlust dieses Wassers wird in Smektiten erst durch eine Erwärmung im Vakuum bei 400 °C erreicht.

A.6 Thermische Expansion oder Kontraktion

Das thermisch induzierte Volumenänderung des Tongesteins wird dem Zusammenwirken von drei unterschiedlichen Mechanismen zugeschrieben /COC 16/. Der erste Mechanismus wird durch die elastische (d.h. reversible) zeit- und temperaturabhängige Expansion von Feststoffen und Porenwasser des Tongesteins bestimmt. Wegen der Unterschiede in den Expansionskoeffizienten des Wassers und der Feststoffe, kann Wasser je nach Mineralogie des Tongesteins um Faktor 7–12 stärker als Feststoffe expandieren. Daraus können zwei unterschiedliche Vorgänge resultieren /COC 16/. Im ersten Vorgang findet eine reversible thermische Expansion des gesamten erhitzten Tongesteinsbereichs statt, die durch eine Kontraktion von Feststoffen und Porenwasser beim anschließenden Abkühlen vollständig kompensiert wird. Im zweiten Vorgang generiert die unterschiedlich stark ausgeprägte Expansion von Mineralen und Porenwasser einen Porenwasserdrucküberschuss, wenn das Wasser aus dem erhitzten Tongesteinsbereich nicht abfließen kann (undrainierte Bedingungen) oder – unter drainierten Bedingungen – die Aufheizrate über der Abflussrate des Wassers liegt (so dass effektiv temporäre undrainierte Bedingungen entstehen). Im letzteren Fall resultiert der zeitabhängige Abfluss des Wassers aus dem betroffenen Tongesteinsbereich in dessen Kontraktion, die als thermische Primärkonsolidierung bezeichnet wird /COC 16/. Es kann zusammenfassend zum ersten Mechanismus festgehalten werden, dass je nach Aufheizrate und der Permeabilität des Tongesteins entweder eine thermische Expansion oder eine thermische Kontraktion erfolgen kann.

Abb. A 10 mit den in-situ Ergebnissen für Opalinuston /JOB 07a/, /JOB 07b/ veranschaulicht das Wirken dieses ersten Mechanismus. Der anfänglichen Expansion des Materials bei steigender Temperatur durch Expansion von Mineralmatrix und Porenwasser folgt eine Phase, bei der sich Expansion und Wasserfreisetzung zunächst kompensieren bis dann die Wasserfreisetzung überwiegt. Dies führt dann zu einer Kontraktion des Materials. Bei weiter steigender Temperatur, beginnend bei etwa 110 °C, erfolgt

dann eine pulsweise Freisetzung von Wasser, das jetzt aus den Zwischenschichten in den Porenraum gelangt und anschließend freigesetzt wird.

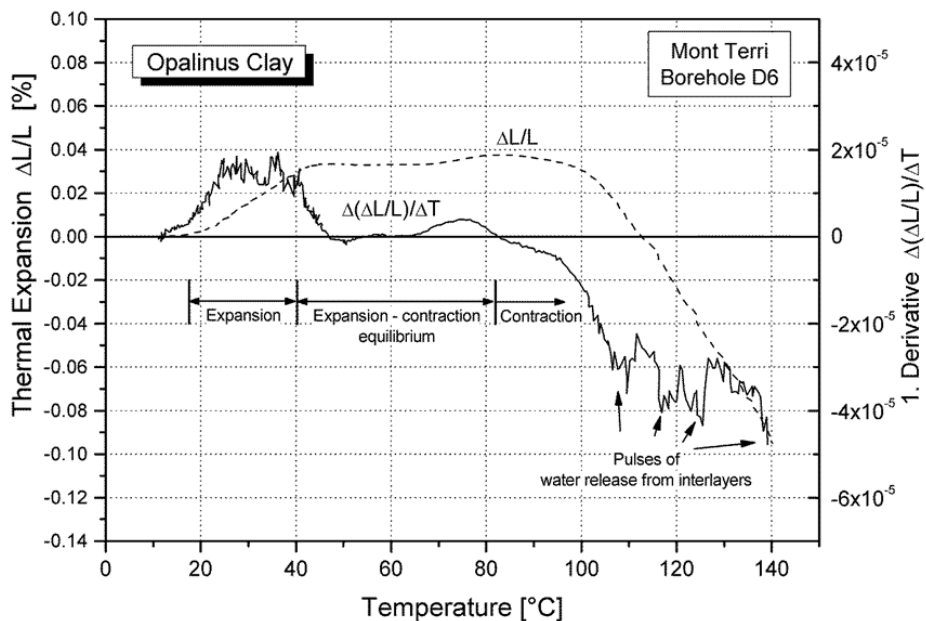


Abb. A 10 Expansion, Kontraktion und Wasserfreisetzung im Opalinuston als eine Funktion der Temperatur (vereinfacht nach /JOB 07b/).

Untersuchungen in /ZHA 10/ bestätigen, dass unter ungesättigten bzw. drainierten Bedingungen eine durch Erhitzung bedingte Porenwasserfreisetzung zu einem Porenkollaps und somit zu einer Tongesteinskonsolidierung führt. Der Anstieg des Porenwasserdruckes auf über 10 MPa nach dem ersten Mechanismus wurde in Laboruntersuchungen des Callovo-Oxfordian-Tongesteins und des Opalinustons bei Temperaturerhöhung von 30 °C auf 80–90 °C bei undrainierten Bedingungen gemessen /ZHA 07/, /ZHA 10/, /ZHA 14/, /ZHA 17/. Im in-situ Versuch HE-D im Opalinuston wurde ein maximaler Porenwasserdruck von 4 MPa beim Erhitzen von 15 °C auf 50 °C beobachtet (Abb. A 11) /ZHA 07/. Sollte dabei die minimale Hauptspannung und die Zugfestigkeit des Gesteins durch den Porenwasserdruck überschritten werden, könnte dies zum hydraulischen Aufreißen bzw. zum Bruch im Wirtsgestein führen. Jedoch wurde dies bisher weder in Laborversuchen mit Bohrkernen noch in in-situ Versuchen in einem Tongestein beobachtet /ZHA 07/, /ZHA 10/, /ZHA 13/.

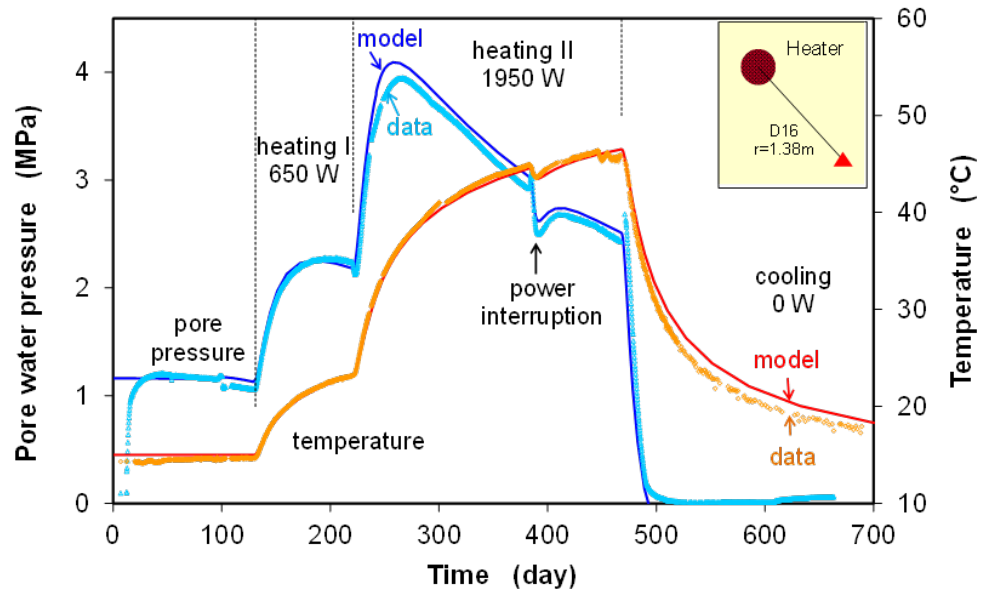


Abb. A 11 Thermisch induzierte Porenwasserdruckänderungen im in-situ Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.

Dass die thermische Tonexpansion nach dem ersten Mechanismus reversibel ist /TAN 08/, wurde auch im in-situ Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri, in dem die Temperatur an der Grenzfläche zwischen einem Erhitzer und dem Opalinuston den Höchstwert von 100 °C erreichte, beobachtet (Abb. A 12) /ZHA 07/, /ZHA 10/, /ZHA 17/.

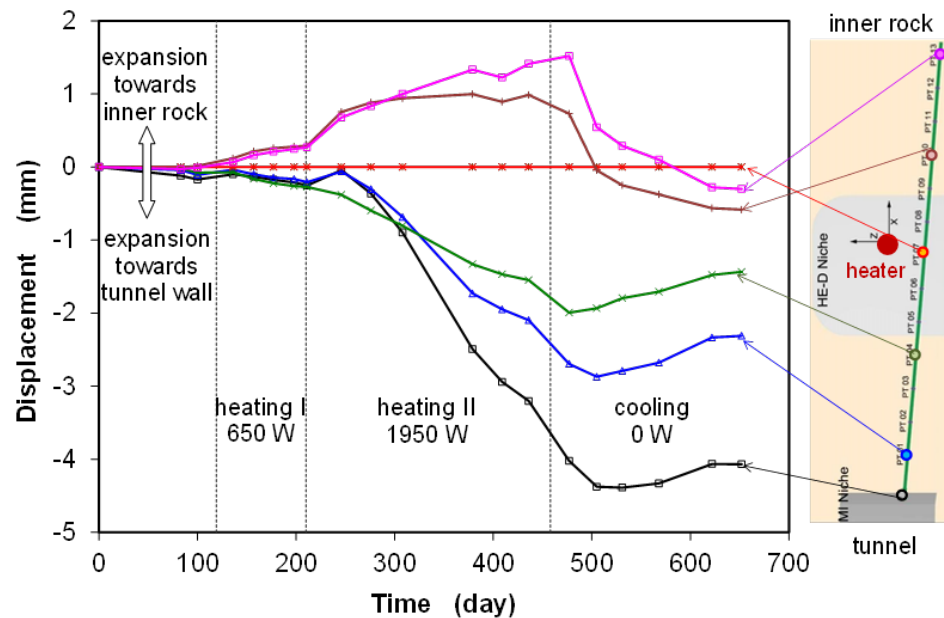


Abb. A 12 Deformation des Opalinustons während der Erhitzung und Abkühlung im in-situ Versuch HE-D im Untertagelabor Mont Terri /ZHA 10/.

Der zweite Mechanismus wird durch die Schwächung der intergranularen Reibung aufgrund eines Anstiegs der thermischen Energie und des damit verbundenen Kollapses des Tongesteinsgerüsts bestimmt und wird als thermische Sekundärkompression bezeichnet /COC 16/. Dieser Mechanismus greift solange ein, bis sich eine für das Tragen der thermo-mechanisch induzierten Spannung ausreichende Anzahl an intergranularen Neubindungen im Tongesteinsgerüst bildet. Die damit einhergehenden Veränderungen im Tongestein werden als irreversibel betrachtet, da keine zusätzlichen intergranularen Bindungen notwendig sind, um die Spannung zu tragen, die aus einem anschließenden Abkühlen des Tongesteins resultiert /COC 16/.

Das Zusammenwirken der beiden Mechanismen wird in /COC 16/ am Beispiel der Ergebnisse von /HOU 85/ für gesättigte pazifische Illit- und Smektit-reiche Sedimente diskutiert. Eine anfängliche Erhitzung unter undrainierten Bedingungen führte zu einer Expansion des Tongesteins. Das Abfließen des Wassers und der damit einhergehende Abbau des Porenwasserdrucküberschusses nach einem anschließenden Wechsel zu drainierten Bedingungen resultierte in einer Kontraktion des Tongesteins – im Prozess der thermischen Primärkonsolidierung. Aber auch nach einem erfolgten Abfluss des überschüssigen Wassers bei dem unveränderten Manteldruck setzte die Kontraktion des Tongesteins – nun im Prozess der thermischen Sekundärkompression – fort. Die Arbeit /HOU 85/ stellte zudem fest, dass der Koeffizient der Sekundärkompression mit der Temperatur linear ansteigt. Die Volumenänderung aufgrund der thermischen Sekundärkompression war dabei viel größer als solche aufgrund der thermischen Primärkonsolidierung.

Ähnliches Verhalten wurde von /ZHA 10/ für Callovo-Oxfordian-Tongestein beobachtet. Eine Erhitzung unter drainierten Bedingungen führte zunächst zu einer Expansion, und – nach Überschreiten der Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs – zu einer Kontraktion des Tongesteins im Prozess der thermischen Primärkonsolidierung (Abb. A 13 links). Eine Erhitzung unter undrainierten Bedingungen führte zunächst ebenfalls zu einer Expansion und – nach Überschreiten der Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs – zu einer Kontraktion im Prozess der thermischen Sekundärkompression (Abb. A 13 rechts).

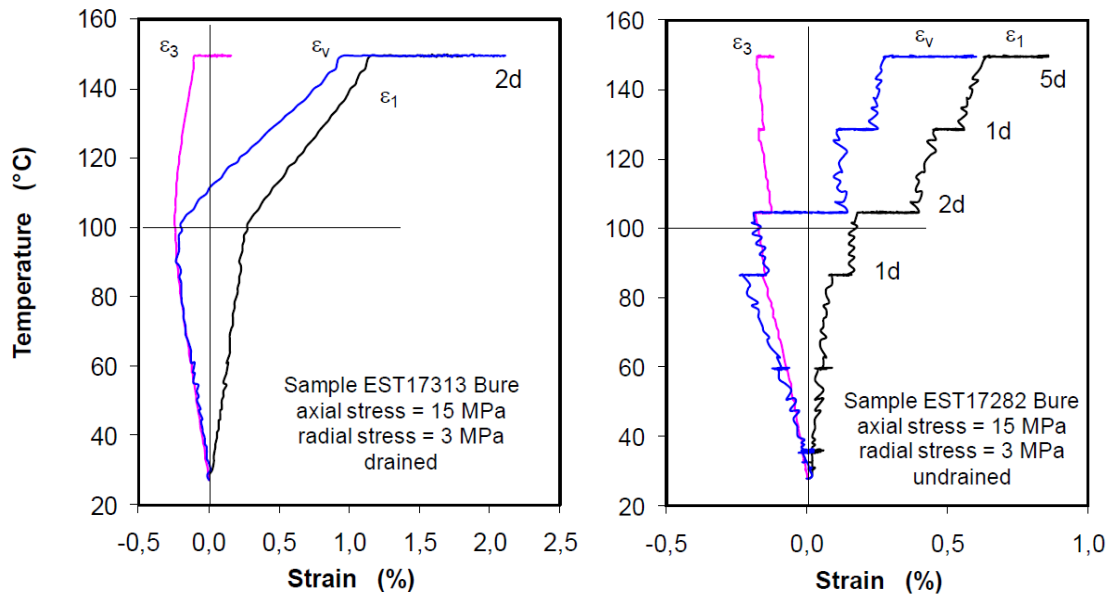


Abb. A 13 Expansion und Kontraktion des Callovo-Oxfordian-Tongesteins als eine Funktion der Temperatur in drainierten (links) und annähernd undrainierten (rechts) triaxialen Deformationsversuchen (d=days, positive Werte auf der x-Achse entsprechen einer Kontraktion) /ZHA 10/.

Die Viskositätsabnahme des Porenwassers mit der ansteigenden Temperatur wird als dritter Mechanismus, der zum thermisch induzierten Volumenänderung des Tongesteins beiträgt, angesehen /COC 16/. Er bewirkt, dass sich die Rate der Volumenänderung bei Erhitzung erhöht, weil das Porenwasser beim Abfließen aus dem betroffenen Tongesteinsbereich weniger Widerstand erfährt. Konsolidierungsversuche mit Ton- und Bentonitproben resultierten zwar bei unterschiedlichen Temperaturen im gleichen Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Feststoffvolumen, jedoch nahm die Konsolidierungsrate mit der Temperatur sehr stark zu /TOW 93/, /COC 16/.

In Übereinstimmung mit diesem dritten Mechanismus zeigte ein Versuch mit natürlichen Tonproben aus einer Störungslette bei den von 20 °C auf 80 °C steigende Temperaturen eine etwa dreifache Zunahme der Wasserpermeabilität (Abb. A 14) /FAU 03/. Diese Zunahme entspricht sehr gut der Wasserpermeabilitätszunahme im gleichen Temperaturbereich, die für auf die Dichten von 1,4, 1,6 und 1,8 g/cm³ kompaktierte Bentonite beobachtet wurde und der Viskositätsabnahme zugeschrieben wurde /CHO 99/. Bei weiterem Temperaturanstieg über 80 °C hinaus nahm jedoch die Wasserpermeabilität im Versuch von /FAU 03/ stetig ab (Abb. A 14). Das Verhalten bei Temperaturen <80 °C wurde der zunehmenden Destabilisierung und Desorption von an Mineraloberflächen adsorbierten Wasserschichten, die die Wasserpermeabilität verhindern, zugewiesen.

Bei höheren Temperaturen dominiert dann die Tonkompaktion, die zu einer Porositätsabnahme und infolgedessen zu einer Permeabilitätsabnahme führt. Bei effektiven Spannungen ≤ 75 MPa wurde keine zunehmende, sondern eine konstante Wasserpermeabilität bei Temperaturen < 80 °C beobachtet, was auf eine über die adsorbierten Wasserschichten hinaus reichende Porenaufweitung zurückgeführt wurde. Auch bei diesen niedrigeren effektiven Spannungen wurde die stetige Abnahme der Wasserpermeabilität bei Temperaturen > 80 °C verzeichnet.

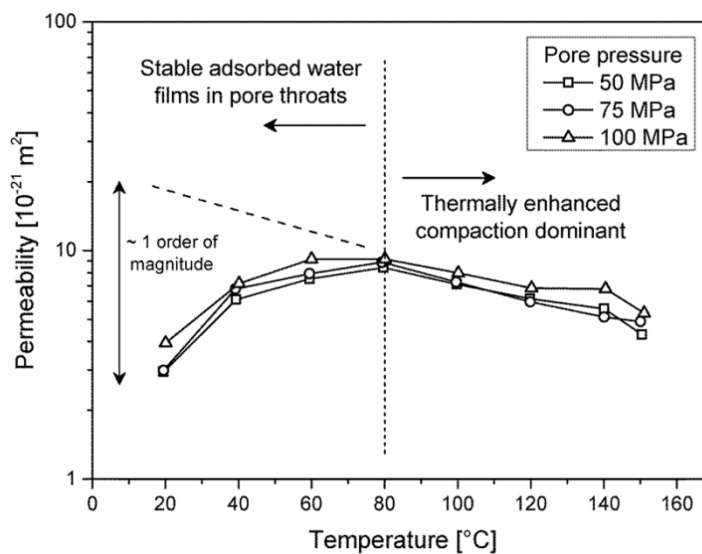


Abb. A 14 Wasserpermeabilität der aus einer Störungslette entnommenen Tongesteinsprobe in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Fluidruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/ (die gestrichelte Linie zeigt den Trend für Argon unter gleichen Versuchsbedingungen).

Laborversuche mit gesättigtem Boom Clay /BAL 91/, /SUL 02/ und ungesättigtem MX-80 Bentonit /TAN 08/ zeigten in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen für andere gesättigte Tongesteine (s. Quellenangabe in /TAN 08/), dass Erwärmung einer kompaktierten Tonprobe oder eines Tongesteins zu seiner Kontraktion bei niedrigen Werten (≤ 1) des Konsolidierungsverhältnisses (engl.: overconsolidation ratio, OCR, ein Verhältnis der senkrechten effektiven Vorkonsolidierungsspannung und der derzeitigen effektiven Spannung) führt. Bei hohen OCR-Werten geht eine thermische Expansion des Tongesteins ab einer bestimmten Temperatur in eine Kontraktion über. Diese Temperatur nimmt von 80 °C bei OCR von 12 auf 50 °C bei OCR von 2 nahezu linear ab (Abb. A 15).

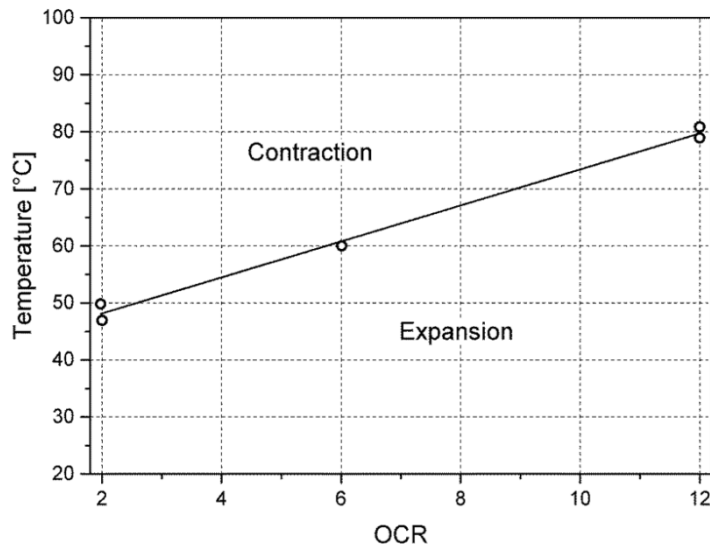


Abb. A 15 Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs als eine Funktion des Konsolidierungsverhältnisses (OCR) für Boom Clay (nach /BAL 91/, /SUL 02/).

Auch in Laborversuchen an einem spanischen Ton mit einem hohen Karbonatgehalt wurde eine Expansion bei 22 °C und 50 °C gefolgt von einer Kontraktion bei 80 °C, 100 °C und 120 °C beobachtet /HUE 09/. Im großmaßstäblichen in-situ Versuch ATLAS im HADES-Untertagelabor wurden entlang desselben Temperaturpfades (im Bereich von 20–95 °C) eine Verschiebung von einer Expansion bei OCR=6 zu einer Kontraktion bei OCR=2 und einer noch stärkeren Kontraktion bei OCR=1 festgestellt /FRA 09/.

Da eine hohe Saugspannung im ungesättigten Tongestein die intergranulare Reibung erhöht, verschiebt sich die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs zu höheren Werten /TAN 08/. Im Einklang mit diesen Untersuchungen steht die Beobachtung aus Triaxialversuchen mit Bohrkernen aus dem Callovo-Oxfordian-Tongestein /ZHA 10/, in denen bei 90 °C unter drainierten Bedingungen (höhere Saugspannung) eine thermische Expansion und unter undrainierten Bedingungen (niedrigere Saugspannung) eine thermische Kontraktion des Tongesteins stattfand (s. Abb. 2.57 dort). Auch Versuche mit kompaktierten GMZ /CUI 11/ und MX-80 /TAN 08/ Bentoniten zeigten bei Temperaturerhöhung von 25 auf 60 °C /CUI 11/ bzw. von 25 auf 80 °C /TAN 08/ eine thermische Expansion bei hohen Saugspannungen (39 und 110 MPa) und eine thermische Kontraktion bei einer niedrigeren Saugspannung von 9 MPa. In diesem Zusammenhang ist ferner zu berücksichtigen, dass sich die Saugspannung eines kompaktierten Bentonits beim

Erhitzen von 25 auf 120 °C je nach Wassergehalt um 20 bis 40 % vermindern kann /JAC 09/.

Zu dem oben diskutierten in-situ Versuch HE-D (Abb. A 12), in dem eine reversible Tongesteinsexpansion beobachtet wurde, kann dementsprechend an dieser Stelle noch angemerkt werden, dass die Temperaturen im Opalinuston bereits bei einem Abstand von ca. 0,8 m vom Erhitzer unter 51 °C lagen /KUL 07/, /ZHA 07/. Im Hinblick auf den zuvor erwähnten Temperaturbereich des Expansion-Kontraktion-Übergangs und seine Abhängigkeit von der Saugspannung ist das Auftreten einer irreversiblen Tonkontraktion im gleichen Tongestein bei höheren Temperaturen nicht ausgeschlossen.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs auch spannungsabhängig ist. Das volumetrische Verhalten eines aus einer Störungslette entnommener Tongesteinsprobe (Abb. A 16) zeigt, dass die Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs mit steigender effektiver Spannung abnimmt /FAU 03/. Während sie bei einer effektiven Spannung von 25 MPa bei etwa 80 °C liegt, verschiebt sie sich zu etwa 40 °C bei der effektiven Spannung von 50 MPa und etwa 30 °C bei der effektiven Spannung von 75 MPa.

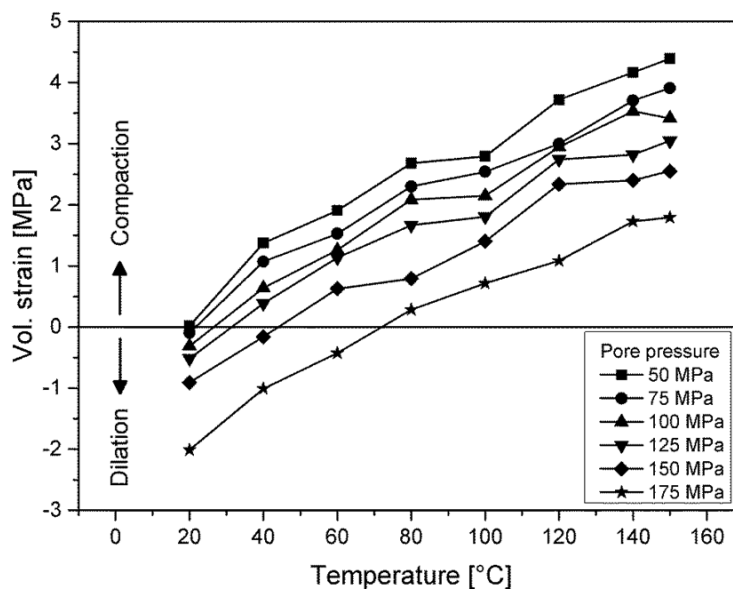


Abb. A 16 Volumetrisches Verhalten des aus einer Störungslette entnommenen Tons über Temperatur in Abhängigkeit vom Fluidruck bei einem Manteldruck von 200 MPa /FAU 03/.

Obwohl laut des ersten, oben diskutierten Mechanismus der thermisch induzierten Volumenänderung die Expansion des Tongesteins als elastisch und somit reversibel postuliert wird, wurde in den Arbeiten /ROM 05/ /FAV 16/ und /FAV 16/ für FEBEX Bentonit, Boom Ton und Opalinuston bei hohen OCR (>6) eine irreversible Expansion bei einer Temperaturerhöhung von 22–23 °C auf 80 °C beobachtet. Die Arbeit /FAV 16/ argumentiert, dass diese irreversible Expansion aufgrund einer strukturellen Anpassung in die Richtung einer stabilen Konfiguration im Tongestein stattfindet. Jedoch steht eine phänomenologische Erklärung für die irreversible Expansion im Unterschied zu den drei oben diskutierten zusammenwirkenden Mechanismen der thermisch induzierten Volumenänderung noch offen.

Des Weiteren wird die Abhängigkeit des Expansion/Kontraktion-Verhaltens des Tongesteins vom OCR in der Arbeit /COC 16/ kritisch unter Einbeziehung der experimentell gestützten Argumentation, dass das Vorzeichen der jüngsten Änderung der mittleren Spannung (mechanische Be- oder Entlastung) während der Vorbereitung der Tongesteinsproben für die beobachtete thermische Expansion/Kontraktion maßgebend ist, hinterfragt. Ferner wurde in der Arbeit /NG 17/ die Volumenänderung der intakten und der rekompaktierten Lössproben verglichen. Bei einer Saugspannung von 0,2 MPa und einer Temperaturerhöhung von 25 auf 60 °C vermindert sich die maximale Expansion einer intakten Probe um 68 %, während diese einer rekompaktierten Probe um 63 % ansteigt. Diese Beobachtungen werfen Fragen bezüglich eines möglichen Einflusses der Probenvorbereitung auf die Ergebnisse der Expansion/Kontraktion-Experimente auf.

A.7 Sorption und Desorption

Sorption lässt sich u. A. anhand von Verteilungskoeffizienten für **chemische Elemente bzw. Radionuklide** quantitativ charakterisieren. Allerdings sind die verfügbaren experimentellen Daten zur Sorptionsfähigkeit verschiedener Tonminerale bei erhöhten Temperaturen ($>60-70$ °C) auf wenige Radionuklide bzw. Schwermetalle begrenzt (Abb. A 17) /JOB 15a/.

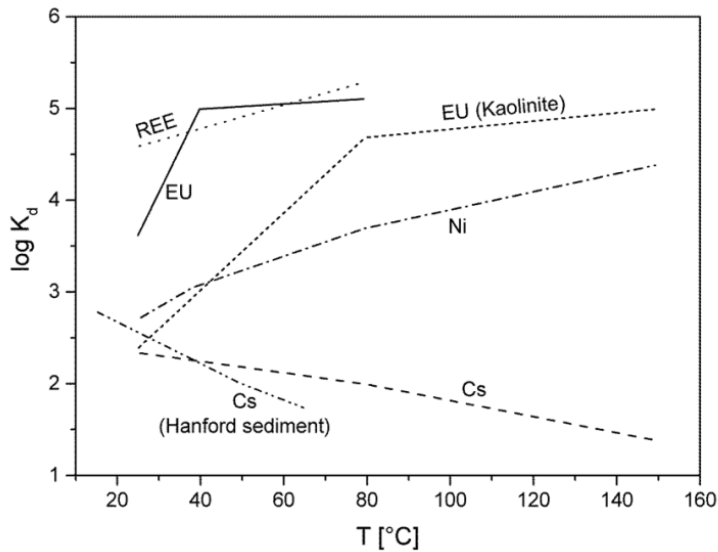


Abb. A 17 Experimentell bestimmte Temperaturabhängigkeit von Verteilungskoeffizienten (K_d) des Cs, Eu, Ni und der REE (Lanthanide, die als chemische Analoga von dreiwertigen Actiniden dienen) für Montmorillonit und Kaolinit /TER 05/, /TER 06/ sowie des Cs für Hanford-Site-Sediment, USA /LIU 03/ aus /JOB 15a/.

Die Abbildung zeigt, dass sich die Verteilungskoeffizienten für Europium, Nickel und dreiwertige Actinide mit der Temperatur erhöhen. Für Cäsium hingegen ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. Der Verteilungskoeffizient für fünfwertiges Neptunium am Opalinuston erhöht sich um etwa 1,5 Größenordnungen bei einem Temperaturanstieg von 40 °C auf 80 °C /FRÖ 15/.

Tone können bis zu 1 mmol/g CO_2 , das während ihrer geologischen Vorgeschichte adsorbiert wurde, enthalten /BUS 08/. Dieses CO_2 kann aus den Zwischenschichten von quellfähigen Mineralen /BUS 16/, /YUA 17/ bzw. Illiten und Glimmern /WAN 18/ desorbieren. **CO_2 -Desorption** aus Tonen setzt bei einer Aufheizung auf **ca. 50 °C** ein, erreicht ein Maximum bei ca. 130 °C und wird erst bei über 200 °C abgeschlossen (Abb. A 18) /YES 17/.

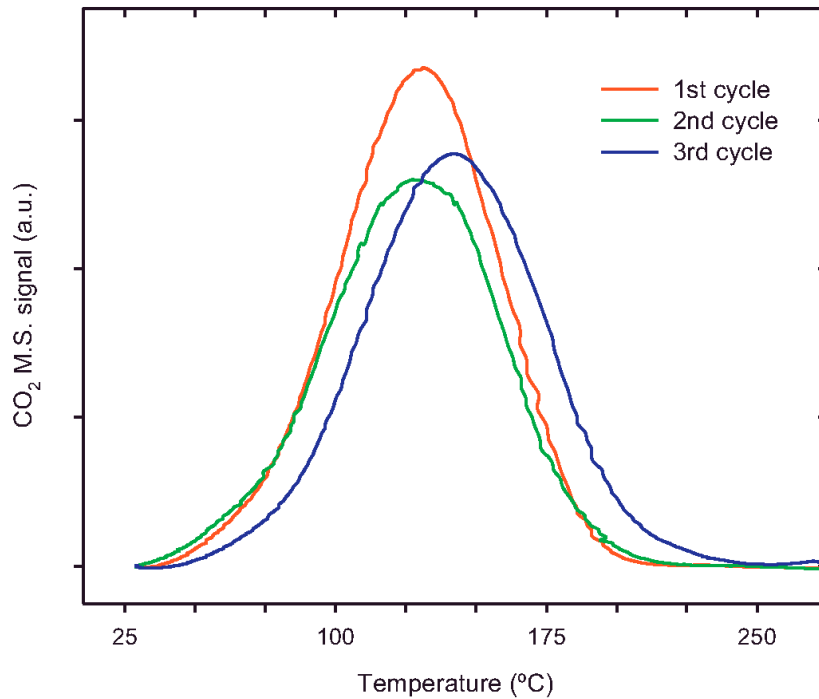


Abb. A 18 Aufeinander folgende Zyklen der CO₂-Desorption nach jeweiliger CO₂-Sorption bei 35 °C für 1 Stunde /YES 17/.

A.8 Thermochemische Sulfatreduktion

Die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) setzt voraus, dass Sulfat, welches in geologischen Formationen überwiegend aus der Auflösung von Gips und Anhydrit stammt, in gelöster Form vorliegt /MAC 01/. Als Reduktionsmittel können dabei entweder organische Verbindungen oder H₂ dienen, so dass im ersteren Fall H₂S und CO₂ und im letzterem Fall nur H₂S als Reaktionsprodukte entstehen /TRU 14/. Die niedrigste abgesicherte Temperatur für Einsetzen der TSR wird in /MAC 01/ mit 127 °C angegeben, während Nachweise ihres Auftretens bei Temperaturen ab etwa 100 °C von /MAC 01/ als fraglich angesehen werden. Unter bestimmten Bedingungen sind für Einsetzen der TSR sogar die Temperaturen von 160 bis 180 °C notwendig /MAC 01/.

Das hat damit zu tun, dass das Zustandekommen und Umsatz der TSR von der Zusammensetzung von Kohlenwasserstoffen, den Konzentrationen von H₂S, SO₄²⁻ und S₃⁻, labilen organischen Schwefelverbindungen, Gesteinsgefüge und -mineralogie, in-situ Temperatur, Wassergehalt, Salinität und pH abhängt /XIA 18/. So wird z. B. in /TRU 14/ und /BAR 17/ argumentiert, dass S₃⁻ für einen effizienten Ablauf der TSR benötigt wird. Die niedrigste Temperatur, bei der S₃⁻ in einer aquatischen Lösung beobachtet wurde,

beträgt 100 °C, daher wird diese Temperaturgrenze in /TRU 14/ und /BAR 17/ mit der unteren Temperaturgrenze für TSR gleichgesetzt. Des Weiteren stellten zweimonatige Versuche mit Methan als Reduktionsmittel bei 300 °C fest, dass keine TSR in Abwesenheit von H₂S zustande kommen kann /TRU 14/. Die letzte Studie liefert zudem einen Nachweis dafür, dass sich die TSR bei einer Erhöhung der gesamten Schwefelkonzentration (Sulfat + Sulfid) von <0,1 M auf >0,1 M um etwa zwei Größenordnungen erhöht. Außerdem kann molekularer Wasserstoff die TSR um Faktor 2–3 bei pH < 2 beschleunigen /TRU 09/.

Auf der Grundlage von Laborexperimenten bei 280–350 °C wurde extrapoliert, dass durch TSR die Hälfte des Sulfats zu H₂S innerhalb von ca. 1 650 Jahren bei 150 °C und ca. 372 000 Jahren bei 100 °C umgewandelt wird /CRO 04/. /MAC 01/ gibt anhand der Laborexperimente bei 175–250 °C hingegen mit 700–7000 Jahren eine deutlich geringere Halbwertszeit für die Sulfat-Umsetzung zu Sulfid bei 100 °C an. Der Unterschied in diesen Voraussagen kann durchaus dem Unterschied der Zusammensetzungen der reagierenden Stoffe in den beiden Experimenten, wie oben diskutiert, geschuldet sein.

Silikate und Alumosilikate (Montmorillonit, Illit und Quarz) beschleunigen und Karbonate (Calcit und Dolomit) verlangsamen die TSR /XIA 18/. Als eine Erklärung für diese Beobachtung wurde der entgegengesetzte Einfluss dieser Minerale auf den pH-Wert der Lösung vorgeschlagen. Silikate und Alumosilikate setzen aufgrund ihrer Auflösung – und im Fall von Montmorillonit auch aufgrund einer Reaktion mit austauschbaren Kationen – Protonen frei, während die Auflösung von Calcit und Dolomit diese konsumiert. Der beschleunigende Einfluss des sinkenden pH-Wert auf TSR wird der steigenden Produktion des Hydrogensulfat-Anions (HSO₄⁻) als einer entscheidenden Vorstufe der TSR zugeschrieben /XIA 18/. Trotz der verlangsamen Wirkung der Karbonate auf die TSR werden Karbonat-Formationen mit assoziiertem Anhydrit als optimale geologische Standorte für TSR angesehen /MAC 01/.

B Beschreibung weiterer temperaturabhängiger FEP

B.1 Auflösung und Ausfällung

Ist eine Lösung bezüglich bestimmter Bestandteile untersättigt, können diese aus festen Stoffen nachgelöst werden. Im Fall einer Übersättigung der Lösung gegenüber (einer oder mehrerer) Festphase(n), können Lösungsbestandteile ausgefällt werden.

Verschiedene FEP (Metallkorrosion, Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen) sind eng mit Auflösungs- und Ausfällungsprozessen verbunden. Aus der Thermodynamik (Entropie) ergibt sich, dass jeder Stoff in jedem anderen Stoff eine gewisse Löslichkeit hat. Die Löslichkeit eines Stoffes gibt an, in welchem Umfang ein Reinstoff in einem Lösungsmittel (insbesondere Wasser) gelöst werden kann. Sie bezeichnet die Eigenschaft des Stoffes, sich unter homogener Verteilung (als Atome, Moleküle oder Ionen) im Lösungsmittel zu vermischen, d. h. zu lösen. Eine Unterscheidung zwischen löslich und unlöslich ist von den betrachteten Bedingungen abhängig. Es handelt sich also um relative Feststellungen wie schwer löslich, begrenzt löslich oder unbegrenzt löslich (mischbar) ein Stoff in einem anderen ist /STU 96/. In einem Endlager befindet sich ein großes Spektrum an Stoffen. In Kontakt mit der vorhandenen Lösung gelangen Bestandteile dieser Stoffe in Lösung. Ihre Konzentration hängt u. a. von der Kinetik der Auflösung und Ausfällung der jeweiligen Materialien und der Durchmischung der Lösung ab. Die Maximalkonzentration der gelösten Stoffe im thermodynamischen Gleichgewicht wird durch das chemische Potential bestimmt, d. h. ihre Neigung, mit anderen Lösungsbestandteilen neue Verbindungen zu bilden, die dann als Festphasen ausfallen können. Das Löslichkeitsprodukt ist eine charakteristische Größe für jede Auflösungs- und Ausfällungsreaktion.

Das **geochemische Milieu** und die **Temperatur** beeinflussen die Auflösungs- und Ausfällungsprozesse /ALT 04a/. Gegenüber dem Einfluss des geochemischen Milieus und der Temperaturen ist der Einfluss des Drucks auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse vergleichsweise gering. Gesättigte Lösungen können bei einer Druck- oder Temperaturerhöhung oder -erniedrigung zusätzliche Salze lösen oder es können Ausfällungen auftreten. Die Prozesse finden solange statt, bis ein thermodynamisches Gleichgewicht der Lösung mit den umgebenden Festphasen erreicht ist (Equilibrierung). Auflösungs- und Ausfällungsprozesse können an allen Stellen des Endlagers stattfinden, an denen Lösungen mit Komponenten des Systems in Kontakt stehen können. Dies sind z. B.:

- im Wirtsgestein,
- in den versetzten Strecken und Schächten,
- an den Verschlussbauwerken,
- an den Abfallgebinden,
- im Kontakt mit den Abfallmatrices.

B.2 Geochemisches Milieu

Das **geochemische Milieu** wird im Wesentlichen durch die geochemischen Charakteristika des Wirtsgesteins, die eingebrachten Abfälle und geo-technischen Barrieren geprägt. Es wird durch die physikalisch-chemischen Randbedingungen und der Zusammensetzung der auftretenden Lösungen, Festphasen und Gase beschrieben:

- die wässrige Lösung wird durch die Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile, den pH-Wert, das Redoxpotential, die Ionenstärke und den Sättigungsgrad gegenüber den Festphasen (bzw. die jeweiligen chemischen Potentiale) definiert,
- die Zusammensetzung der Festphasen des Wirtsgesteins, der Versatzstoffe, der Puffermaterialien und anderer technischer Barrierenmaterialien sowie
- die Zusammensetzung der Gase (z. B. CO₂, H₂) mit ihrem jeweiligen Partialdruck.

Die Wechselwirkungen der vorhandenen Lösungen mit den eingebrachten Stoffen (Abfallprodukte, Versatzstoffe etc.) bewirken Veränderungen in lokalen geochemischen Milieus (z. B. in den Einlagerungsorten, Bohrlöcher oder Strecken). Auch Wechselwirkungen der Materialien von Schacht- und Streckenverschlüssen im Grubengebäude, sowie biotische und abiotische Stoffumsetzungen (z. B. thermochemische Sulfatreduktion) können das jeweilige geochemische Milieu verändern.

Der Ablauf und die Umsatzraten und damit die Einstellung des geochemischen Milieus sind, wie praktisch alle physikalisch-chemischen Prozesse, temperaturabhängig (siehe auch FEP Auflösung und Ausfällung).

B.3 Gasbildung, Gasmenge im Grubenbau

Die vorhandene Gasmenge (FEP Nr. 75) in einem Grubenbau ist zeitlich veränderlich. Auch nach dem Verschließen des Endlagers entstehen Gase.

Das Gasvolumen, das die Gasmenge einnimmt, ergibt sich unter der Berücksichtigung der Randbedingungen der herrschenden **Temperatur** und des Fluiddrucks im Grubenbau. Die Gase können sich entsprechend ihrer Löslichkeit (temperaturabhängig) in einer flüssigen Phase lösen. Gase wie CO₂ stehen mit der Lösung und auch mit festen Phasen im Gleichgewicht.

Zum Zeitpunkt des Verschließens des Endlagers wird die Gasmenge der eingeschlossenen Luft in jedem Grubenbau durch das entsprechende freie Hohlraumvolumen bestimmt. Bei versetzten Strecken ergibt sich dieses Volumen aus der Porosität des Versatzes.

Veränderungen des Gasvolumens können sich zum einen durch gasbildende und gasverbrauchende Prozesse und zum anderen durch Transportprozesse ergeben. Das Gasvolumen verringert sich z. B. beim Verbrauch von dem anfänglich in der Grubenluft enthaltenen Sauerstoff durch Korrosions- und Degradationsprozesse nach Verschließen des Endlagers. Transportprozesse führen zur Veränderung der Gasmenge durch den Zutritt oder Abfluss von Gasen in das Wirtsgestein. Diese Prozesse sind in den FEP Strömungsvorgänge im Grubengebäude (FEP Nr. 59) und Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein (FEP Nr. 100) beschrieben.

Je nach den hydraulischen Gegebenheiten und der **Temperatur** ergibt sich aus dem herrschenden Fluiddruck das von der Gasmenge eingenommene Gasvolumen.

Das FEP Gasbildung (FEP Nr. 74) fasst Prozesse zusammen, bei denen Gas im Endlager gebildet werden kann. Dies sind die Korrosion von Metallen, das Verdampfen von Wasser, die Zersetzung organischer Bestandteile, die thermochemische Sulfatreduktion, die Radiolyse und die Korrosion der Brennstoffmatrix. Die jeweiligen Umsatz- und damit Gasbildungsraten sind temperaturabhängig. Zusätzlich werden auch beim radioaktiven Zerfall Gase gebildet, wie z. B. beim Zerfall von Th-230 in Ra-226. Die Bildung von Gasen beim radioaktiven Zerfall ist jedoch hinsichtlich der gebildeten Gasmenge unbedeutend gegenüber den anderen genannten Gasbildungsprozessen. Sie kann in der Regel vernachlässigt werden und ist temperaturunabhängig.

Voraussetzung für die meisten Gasbildungsprozesse ist die Anwesenheit von Wasser. Die größten Gasmengen können bei der Korrosion von Metallen und der Zersetzung organischer Bestandteile erzeugt werden. Bei der Korrosion von Eisen entsteht Wasserstoff und bei der Zersetzung von Organika entstehen Kohlendioxid, Methan und je nach Zersetzungsprozess weitere Gase. Potenziell gasbildende Stoffe liegen in den Abfallgebirgen, sonstigen metallischen und organischen Stoffen und evtl. organischen Bestandteilen (z. B. Kohlenwasserstoffe) im Wirtsgestein vor.

B.4 Gaseindringdruck

Der Gaseindringdruck (FEP Nr. 76) ist der Druck, den eine gasförmige Phase zusätzlich zum herrschenden hydraulischen Druck überschreiten muss, um in einem Zweiphasensystem (flüssig, gasförmig) die benetzende, flüssige Phase in einem porösen Feststoff (z. B. geotechnische Barrieren, wie versetzte Strecken und Verschlussbauwerke) verdrängen zu können.

Das FEP Gaseindringdruck bezieht sich auf das Eindringen von Gasen in geotechnische Barrieren, wie versetzte Strecken und Verschlussbauwerke. Typische Gaseindringdrücke für geotechnische Barrieren finden sich in z. B. /ROD 99/. Das Eindringen von Gasen in das Wirtsgestein wird im FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden (FEP Nr. 100) behandelt.

Gaseindringdrücke können in einem Endlager prinzipiell an unterschiedlichen Stellen auftreten. Da ein Endlager im Steinsalz zu Beginn nicht lösungsgefüllt ist, gilt dies in diesem Fall nur für zwei Stellen:

- zum einen für den Schachtverschluss am Übergang zum Deckgebirge und
- zum anderen für solche Verschlussbauwerke, die mit geringem Lösungsüberschuss hergestellt werden und somit von Beginn an lösungs gesättigt sind. Dies trifft z. B. üblicherweise auf Verschlussbauwerke aus Salzbeton sowie Sorelbeton zu.

Im Wirtsgestein Steinsalz liegen als Folge der sedimentären Genese im Intergranularraum immer lokale Lösungseinschlüsse und Laugenfilme vor, die ebenfalls kapillare Sperrdruckeffekte bedingen können. Diese liegen dann mutmaßlich im Bereich der Gebirgsspannungen (vgl. FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein).

Eine geringe Temperaturabhängigkeit des Gaseindringdrucks von Materialien wird nach Experteneinschätzung erwartet. Dies ist aber – neben anderen Faktoren - bisher nicht untersucht oder berücksichtigt worden /JOB 17b/.

B.5 Porosität

Die Porosität ist definiert durch das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu gesamtem geometrischen (Außen-) Volumen.

Die Porosität ist zu unterscheiden von der Porenzahl, die das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Feststoffvolumen angibt. Die (Gesamt-)Porosität besteht aus einem von außen zugänglichen Porenraum und geschlossenen Poren. Die Gesamtporosität und der Anteil des Luft- bzw. Lösungserfüllten Porenraums von geologischen und technischen Materialien werden üblicherweise als Pyknometer-Porosität aus den Wertepaaren Korndichte/Gesteinsdichte getrockneter Proben bzw. Korndichte/Gesteinsdichte natürlich feuchter Proben berechnet.

Entscheidend für den Stofftransport durch ein poröses Medium ist die effektive Porosität, die von dem durchgängigen, vernetzten Porensystem innerhalb des Mediums gebildet wird. Die effektive Porosität wird auch als durchfluss- bzw. für Advektion wirksame Porosität bezeichnet. Ähnlich wird für Diffusionsprozesse ebenfalls eine effektive Porosität definiert. Neben der effektiven Porosität gibt es immer einen Porenanteil, der nicht an das Porensystem angeschlossen ist; dieser Anteil ist abhängig von der Struktur des Mediums. Die effektive Porosität ist somit kleiner oder gleich der Gesamtporosität.

Für Strömungs- und Transportprozesse ist die effektive Porosität relevant, für Kompaktionsvorgänge muss die gesamte Porosität berücksichtigt werden.

Es wird zwischen den Porositäten der unterschiedlichen Verfüllungen der Grubenbaue und der geologischen Formationen des Endlagersystems unterschieden: Durch die Konvergenz des Grubengebäudes im Salzgebirge nimmt der Hohlraumanteil der Verfüllungen, z. B. von Salzgrusversatz stetig ab (vgl. FEP Salzgruskompaktion), während sich die Porositäten im Deckgebirge erst in geologischen Zeiträumen ändern können (z. B. /KLI 07/).

- Teilkomponenten für Verschlüsse aus vorkompaktiertem Salzgrus oder ähnlich kompaktierbarem Material verhalten sich wie Salzgrus-Verfüllungen. Sie werden durch Konvergenz kompaktiert (vgl. FEP Salzgruskompaktion).
- Gering kompaktierbare Materialien (z. B. Schotter in Schachtverschlusssystemen) behalten ihre Porosität über lange Zeiträume.
- Offene Hohl- und Porenräume im Abfall werden gebindespezifisch zu einer mittleren effektiven Porosität zusammengefasst. Die Feststoffe des Abfalls, d. h. Glas, Metalle und die Brennstoffmatrix, sind je nach Konsistenz unterschiedlich kompaktierbar, wobei die Ausgangsporosität in den Abfallgebinden durch Vorkompaktion weitgehend minimiert ist. Eine Reduktion des Resthohlraumes ist durch Eindringen von Salzgestein oder Salzgrus in die offenen Hohlräume möglich.
- Im Wirtsgestein (Hauptsalz) sind keine effektiven Porositäten außerhalb von Gas- und Lösungsvorkommen zu erwarten.

Die Porosität als Materialeigenschaft wird indirekt über temperaturabhängige Prozesse beeinflusst.

B.6 Radiolyse

Unter Radiolyse (FEP Nr. 80 im Salzgestein) versteht man die Veränderung chemischer Verbindungen durch die Einwirkung ionisierender Strahlung. Mögliche Veränderungen sind z. B. eine Dissoziation von Molekülen oder die Bildung von Radikalen.

Radiolyse kann in Festphasen, in Flüssigkeiten und in der Gasphase auftreten. Man unterscheidet bei der durch radioaktive Abfälle verursachten Radiolyse zwischen der inneren Radiolyse im Abfallgebilde und der Radiolyse außerhalb der Abfallgebilde (äußere Radiolyse). Die innere Radiolyse ist generell vernachlässigbar gegenüber den Auswirkungen der äußeren Radiolyse. Das Ausmaß der äußeren Radiolyse ist abhängig von der Abschirmung der ionisierenden Strahlung durch die Abfallmatrix und die Abfallbehälter.

In einem Endlager kommen grundsätzlich drei Prozesse in Frage:

1. Radiolyse des Wirtsgesteins und anderer Materialien

Die Energie der gamma-Strahlung wird im Material absorbiert und dabei überwiegend in Wärme umgewandelt. Nur ein geringer Anteil der eingestrahnten gamma-Energie führt über einen komplexen Mechanismus letztlich zur Bildung von Radiolyseprodukten.

Die absorbierte gamma-Energie im umgebenden Gebirge bzw. aus Reaktionen der Radiolyseprodukte ist im Vergleich zum Wärmeeintrag in das Gebirge aus der Wärmeleistung der Abfallkokillen verschwindend gering. Eine spontane, schlagartige Rekombination von Radiolyseprodukten unter Freisetzung der gespeicherten Energie kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Je nach Menge der Radiolyseprodukte könnte es dabei zu lokalen Temperaturerhöhungen sowie zu Erhöhungen der Gebirgsdrücke kommen. Damit wäre eine lokale Beeinträchtigung der Barrierenintegrität im Bereich von wenigen 10 cm um unabgeschirmte, dünnwandige Abfallbehälter herum möglich. Wegen der abschirmenden Wirkung des Gebirges blieben solche Rückreaktionen aber auf das unmittelbare Umfeld der Abfallbehälter begrenzt.

2. Radiolyse von Lösungen

Die Radiolyse von wässrigen Lösungen führt zur Zersetzung des Wassers und zur Bildung von molekularen Bestrahlungsprodukten, die gasförmig oder gelöst vorliegen. Der genaue Mechanismus und die Ausbeute der verschiedenen Bestrahlungsprodukte hängen von der Art der ionisierenden Strahlung, der Dosisleistung und den Lösungsinhaltsstoffen ab. Durch die Radiolyse wird lokal das geochemische Milieu der wässrigen Lösungen verändert; dieser Effekt ist besonders bei der alpha-Radiolyse ausgeprägt, bei der sich oxidierende Bedingungen einstellen.

3. Radiolyse von Kohlenwasserstoffen

Die Radiolyse der gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffe, die zum Stoffbestand von Gesteinen gehören können, führt zunächst zu Bindungsbrüchen von C-C-Bindungen in den organischen Molekülen und zur Bildung reaktiver organischer Radikale in der fluiden Phase. Je nach Gegenwart weiterer Reaktionspartner, wie z. B. Wasser, entstehen im Ergebnis komplexer Reaktionsabläufe molekulare Produkte wie z. B. kürzerkettige Kohlenwasserstoffe, kurzkettige organische Säuren und CO₂.

Die Zusammensetzung der Radiolyseprodukte ist nach Experteneinschätzung nicht nur abhängig von der Bestrahlung, sondern auch temperaturabhängig. Entsprechende Untersuchungen sind für Endlagerkonzepte nicht bekannt.

B.7 Spannungsänderung und Umlagerung

Spannungsänderungen beschreiben eine Erhöhung oder Erniedrigung des Beanspruchungszustandes in einem Gebirgs- oder Tragwerksbereich ohne irreversible Deformationen. Spannungsumlagerungen hingegen sind Spannungsausgleichsprozesse begleitet von irreversiblen Deformationen zwischen unterschiedlich hoch beanspruchten Tragwerksbereichen mit einem daraus folgenden Spannungsabbau in den höchstbeanspruchten Bereichen und einer gleichzeitigen Erhöhung der Spannung in weniger beanspruchten Bereichen des Tragsystems.

Wie die Erfahrungen werden bei der Auffahrung von Grubenbauen Sekundärspannungen an der Hohlraumkontur auftreten, die zu dilatanten Verformungen und somit zu Spannungsumlagerungen unter Ausbildung einer Auflockerungszone mit Rissen führen werden. Außerdem wird es an der Kontur zu konvergenzbedingten Verformungen kommen.

Der teufenabhängige Gebirgsdruck bestimmt den sich nach der Auffahrung an der Hohlraumkontur einstellenden Sekundärspannungszustand, welcher in der geomechanischen Modellierung des Tragsystems zu berücksichtigen ist.

Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges führen zu einer thermischen Expansion bzw. bei der späteren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten. Weiterhin sind während der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den Fluiddruck zu berücksichtigen. Spannungsänderungen können sich in Zukunft u. a. durch geänderte Auflasten (z. B. Gletscherüberfahrung, Sedimentation, Erosion) oder tektonische Prozesse (z. B. Diapirismus) ergeben /MRU 11/, /MRU 11/. Die Bewertung dieser Vorgänge hat modelltechnisch auf Basis von Simulationsrechnungen zu erfolgen (z. B. /MIN 10/).

B.8 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Klüfte sind makroskopisch sichtbare Trennfugen im Gestein, die keine oder nur sehr geringe Dislokationen an den Trennflächen aufweisen. Sie sind von Störungen zu unterscheiden, die durch eine deutliche Dislokation der an eine Störungszone angrenzenden Gesteine gekennzeichnet sind. Klüfte und Störungen sind meist natürlichen Ursprungs, aber auch die Auffahrung eines Endlagers hat Klüfte zur Folge (z. B. Auflockerungszone).

Die Bildung von Klüften beginnt mit der durch Deformation oder **Wärmeeintrag** verursachten Ausbildung von Rissen. Als natürliche Ursachen für die Entstehung von Rissen und Klüften gelten vor allem tektonische Prozesse. Klüfte entstehen bei Spannungsdifferenzen oder an Grenzflächen zwischen Gesteinen. Wenn Spannungsdifferenzen die Festigkeit des Wirtsgesteins überschreiten, bilden sich Risse, die sich zu Klüften vergrößern können. Risse können durch Fluiddruck entstehen sofern das Minimalspannungskriterium überschritten wird. In diesem Fall infiltrieren die Fluide die Risse, worauf diese wieder verheilen können.

B.9 Strömungsvorgänge im Grubengebäude

In einem Grubenbau vorhandene Fluide können in Folge der herrschenden Potentialunterschiede die Resthohlräume des Grubengebäudes durchströmen. Wegsamkeiten für Fluide gibt es im Versatz, in den Porenräumen der technischen Bauwerke, in den Auflockerungszonen und im Porenraum der Abfallgebände.

Die wesentlichen Antriebsmechanismen für Strömungsprozesse in Lösungen sind der hydraulische Gradient, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Lösungen (Auftrieb) oder innerhalb einer Lösung (Konvektion) sowie im Grubengebäude die Konvergenz und die **Temperaturgradienten**. Strömungsvorgänge der Gasphase werden durch Gasbildung, die Konvergenz und den Auftrieb verursacht. In lösungserfüllten Hohlräumen können gebildete Gase zu einer Verdrängung vorhandener Lösungen führen.

Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen bewegt, spricht man von Mehrphasenströmung. In der Natur ist am bedeutendsten die Zweiphasenströmung von Gasgemischen (z. B. Luft) und wässrigen Lösungen. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive

Permeabilitäten). Das Verhältnis zwischen effektiver und absoluter Permeabilität ist als relative Permeabilität für die jeweilige Phase definiert.

Am Standort sind grundsätzlich folgende Strömungsprozesse denkbar:

- Eine laminare Strömung wässriger Lösungen in gesättigten Grubenbauen, z. B. durch Konvergenz (Darcy-Strömung, turbulente Strömungen sind unter Endlagerbedingungen unwahrscheinlich).
- Eine Strömung auf Grund von Druck- und Temperaturgradienten, z. B. durch die Konvergenz der Grubenbaue (Verdrängung) und durch die Bildung von Gasen.
- Ein Zweiphasenfluss, dort wo zutretende Lösungen auf vorhandene Gasgemische treffen oder durch das Einbringen wasserhaltiger Materialien (z. B. Bentonit, Salzbeton) zwei fluide Phasen vorliegen.

Strömungsprozesse von Lösungen und Gasen sind für das gesamte Grubengebäude zu betrachten. Insbesondere bei Betrachtungen von Entwicklungen des Endlagersystems, bei denen Verschlussbauwerke versagen oder unerwartete Lösungsvolumina innerhalb des Wirtsgesteins auftreten, sind deren Auswirkung von Bedeutung. Im Nahbereich der Abfälle können dann neben der Advektion auch Konvektionen, d. h. Strömungen von Lösungen, die durch Temperatur- und Konzentrationsunterschiede ausgelöst werden, auf Grund der Wärmeproduktion durch die radioaktiven Abfälle entstehen.

Im Rahmen von Temperaturlauslegungsrechnungen und thermisch-mechanisch gekoppelten numerischen Modellrechnungen könnte standortspezifisch ein **Temperatureinfluss** auf die Strömungsvorgänge untersucht werden. Der **Temperatureinfluss** aufgrund der Wärmeabgabe der Abfallgebinde auf Strömungen wurde allerdings bisher nicht modelltechnisch für ein Endlagerkonzept untersucht, da Lösungszutritte im Steinsalz erst nach der thermischen Phase erwartet werden.

Siehe weitere Transportprozesse im Detail im Kap. B.13.

B.10 Thermische Materialeigenschaften (u. a. Versatz, Bohrlochverrohrung)

Die FEP der Tab. 6.1 Versatz (FEP-Nr. 36), Verschlussmaterial (FEP-Nr. 37), Schachtverschlüsse (FEP-Nr. 38), Streckenverschlüsse (FEP-Nr. 39), sonstige

Verschlussbauwerke (FEP-Nr. 41) sowie Bohrlochverrohrung (FEP-Nr. 43) berücksichtigen temperaturabhängige Eigenschaften. Diese FEP sind jedoch Eigenschaften.

Unter **Versatz** (FEP-Nr. 36) werden alle bergmännisch eingebrachten Stoffe verstanden, die zur Ausfüllung untertägiger Hohlräume zum Einsatz kommen. Die Zusammensetzung des in die Grubenbaue eingebrachten Versatzes bestimmen dessen Verhalten gegenüber chemischen, thermischen, hydraulischen, mechanischen und anderen physikalischen Einwirkungen und dessen Eigenschaften. Als Versatz können unter anderem Anwendung finden: Salzhautwerk (Salzgrus), Schotter (z. B. aus Basalt) oder Kies, Bentonit, Bentonit-Mineral-Gemische oder zementhaltige Materialien. Im Endlagerkonzept nach /BOL 11/ ist vorwiegend Salzhautwerk als Versatz und Barriere vorgesehen.

Die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, die wichtige Eigenschaften des Versatzmaterials sind, sind abhängig von Parametern wie Dichte, Porosität und Korngröße, die auch die Permeabilität und das Kompaktionsverhalten bestimmen. Diese Eigenschaften hängen auch von der gewählten Zusammensetzung (Anteil der Bindemittel und Zuschlagstoffe, des Durchmischungsgrades von Bindemitteln und Zuschlagstoffen, vom Quellvermögen bzw. Schrumpfverhalten beim Abbinden, Aushärten oder vom Kontakt mit Lösungen) und der Art des Einbringens ab, die einen wesentlichen Einfluss auf seine Verdichtung bzw. die Anzahl, Form, Größe und Ausfüllung der verbleibenden Poren zwischen den Versatzkörnern hat. Die Versatzverdichtung kann während des Einbringens durch die Wahl des Versatzverfahrens und eines gegebenenfalls einzusetzenden Nachverdichtens eingestellt werden. Die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ist selbst auch temperaturabhängig.

Durch Sackungen im Versatz, die in erster Näherung als temperaturabhängig betrachtet werden können, können auch bevorzugte Fließwege ausgebildet werden (siehe FEP's Nr 56 und 5 Kanalisierung im Salzgrus). Die Bedingungen im Nahfeld sowie im Wirtsgestein können sich durch Spannungsänderungen, Spannungsumlagerungen, Konvergenz und/oder Scherverformungen und Zustrom von Fluiden (charakterisiert durch Chemismus und thermodynamische Fluideigenschaften) auf den Zustand des Versatzmaterials auswirken.

Die genannten Eigenschaften des Versatzes machen zunächst keine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters erforderlich, sondern stellen in einem gewissen Umfang wählbare Parameter da, die einen Wärmeabfluss vom

Behälter begünstigen oder behindern können. Daher kann aus diesen Eigenschaften auch keine minimale mindestens gewünschte Temperatur abgeleitet werden. Temperaturfestlegungen sind nur mit Kenntnissen zu den konkreten Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept möglich.

Die **Bohrlochverrohrung** ist als FEP Nr. 46 der FEP-Liste aufgenommen. Um bei einer Bohrlochlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente die gesetzlich geforderte Möglichkeit zur Rückholung und Bergung der Endlagerbehälter während des Endlagerbetriebes und bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers zu gewährleisten, ist eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher erforderlich. Die thermische Expansion oder Kontraktion des Gebirges wirkt auf diese Verrohrung ein. Diese sind daher bei einer Auslegung der technischen Eigenschaften der Bohrlochverrohrung zu berücksichtigen. Die genannten Eigenschaften der Bohrlochverrohrung machen zunächst keine Festlegung einer maximalen Temperatur an der Außenfläche eines Behälters erforderlich, sondern stellen in einem gewissen Umfang einstellbare Parameter dar, die einen Wärmeabfluss vom Behälter begünstigen oder behindern können. Daher kann aus diesen Eigenschaften auch keine minimale mindestens gewünschte Temperatur abgeleitet werden. Temperaturfestlegungen sind nur mit Kenntnissen zu den konkreten Bedingungen am Standort und dem Endlagerkonzept möglich. Die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften der Bohrlochverrohrung sollte bei entsprechender Auslegung der Verrohrung nicht relevant sein.

B.11 Wärmebedingte Hebung und Senkung des Deckgebirges

Die Wärmeabgabe durch den Zerfall der Radionuklide in den Abfällen führt zu einer Ausdehnung des Wirtsgesteins. Dadurch erfährt das Deckgebirge zunächst eine Hebung und nach Abklingen der Wärmeentwicklung aufgrund der Kontraktion des Wirtsgesteins eine Senkung. Die Hebung oder Senkung der Erdoberfläche kann nach gegenwärtigem Kenntnisstand im Meterbereich liegen /NIP 00/.

B.12 Weitere chemisch-physikalische Prozesse

Radionuklidmobilisierung

Die Radionuklidmobilisierung umfasst die Freisetzung der Radionuklide aus der ursprünglichen Bindungsform in eine transportfähige Bindungsform und ist daher mit verschiedenen Korrosionsprozessen verbunden. Die Mobilisierung von Radionukliden kann somit schon vor der Einlagerung stattgefunden haben. Dies ist z. B. bei den Brennelementen der Fall, bei denen Radionuklide in die Gasphase des Gebindes freigesetzt worden sind. Solange die Behälter dicht sind, stehen diese mobilisierten Radionuklide allerdings nicht für einen Transport im Endlager zur Verfügung. Es kann nach der Mobilisierung zu einer Ausfällung der Radionuklide oder einer Sorption an Korrosionsprodukten kommen. Andererseits sind Radionuklide vorhanden, die quasi instantan bei Zutritt von Lösung oder bei Undichtigkeit des Behälters transportfähig werden. Diese werden als Instant Release Fraction (IRF) bezeichnet und im Quellterm berücksichtigt. Die Mobilisierung von Radionukliden aus Brennelementen unterscheidet folgende Bestandteile /JOH 05/, /KIE 12/:

- Ein Teil der Spaltprodukte sammelt sich bevorzugt im Plenum der Brennelemente (Spaltgase und möglicherweise I-129), an den Korngrenzen, Klüften und Spalten der Brennstoffmatrix sowie im Zwischenraum zwischen den Brennstoff-Pellets und in Zwickeln zum Hüllrohr. Diese Radionuklide können bei Kontakt mit Lösung im Endlager relativ schnell freigesetzt werden und in Lösung gehen (Instant Release Fraction).
- Ein geringerer Teil der Radionuklide befindet sich in den Metallteilen wie Hülsen und Strukturteilen des Brennelements. Diese Radionuklide sind im Allgemeinen Aktivierungsprodukte, die während des Betriebs im Reaktor durch Neutroneneinfang und Folgeprozesse entstehen. Die Radionuklide werden im Endlager in der Regel kongruent mit der Korrosion aus den Metallteilen freigesetzt.
- Der überwiegende Teil der Radionuklide ist in der Brennstoffmatrix fixiert und wird erst bei deren Auflösung freigesetzt. Bei den Brennelementen besteht die Abfallmatrix vorwiegend aus Urandioxid, aber auch aus Uran-Plutonium-Mischoxid, U_3Si_2 -/UAlx-Al-Legierungen oder Graphit. Die Matrixkorrosion ist stark abhängig von den geochemischen Bedingungen, insbesondere dem Redoxpotential.

Für die verschiedenen Bestandteile der Brennelemente werden bei der Modellierung unterschiedliche Mobilisierungsraten angesetzt. Bei der Brennstoffmatrix werden die Matrix-gebundenen Radionuklide (u. a. Actiniden) entsprechend der Matrixkorrosionsrate mobilisiert. Bei den Metallteilen des Brennelementes kann der wesentliche Anteil während einiger hundert Jahre nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt werden. Die Instant Release Fraction wird quasi instantan bzw. über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt.

Die Radionuklidmobilisierung aus einer Glasmatrix (HAW-Kokille und CSD-B) beruht im Wesentlichen auf der Korrosion der Glasmatrix. Die Korrosion führt dann zu einer Zunahme der Siliziumkonzentration in der Lösung. Nach Erreichen der Sättigungskonzentration für Silizium fällt die Korrosionsrate deutlich ab. Die anfängliche Rate der Glaskorrosion bis zum Erreichen der Siliziumsättigung ist vor allem von der Lösungszusammensetzung, der Temperatur, der Lösungsmenge und der Beschaffenheit der Glasoberfläche abhängig.

Viele aufgelöste Stoffe können auf Grund des herrschenden geochemischen Milieus wieder ausfallen und neue feste Phasen bilden, in denen Radionuklide fixiert werden.

Die Mobilisierung ist als physikalisch-chemischer Prozess temperaturabhängig.

Sorption und Desorption

Kondensierte Phasen (Flüssigkeiten und Festkörper) können aus ihrer Umgebung Fremdmoleküle aufnehmen. Dieser Vorgang wird als Sorption bezeichnet. Der aufzunehmende Stoff (Sorbent) kann dabei in das Innere der kondensierten Phase (Sorbens) eindringen oder sich an seiner Grenzfläche anreichern. Der Umkehrprozess zur Sorption wird Desorption genannt. Erfolgt eine Anreicherung des Sorptivs an der Grenzfläche des Sorbens, dann handelt es sich um Adsorption. Die Anreicherung im Inneren des Sorbens wird als Einbau (Inkorporation) bezeichnet. Das Eindringen und die Verteilung des Sorptivs im Volumen des Sorbens wird als Sorption im weiteren Sinne verstanden.

Verschiedene chemische/physikalische Prozesse sind Grundlage der Sorption, wie

- Adsorption,
- Absorption,

- Ionenaustausch,
- Oberflächenausfällung und
- Einbauprozesse.

Diesen Reaktionen liegen Wechselwirkungen zwischen dem Sorptiv und den (Oberflächen-) Eigenschaften des Sorbens zu Grunde. Die Eigenschaften vieler Oberflächen sind abhängig vom geochemischen Milieu, die je nach pH-Wert negative oder positive Ladungen besitzen können. Die Speziation (Ladungszustand, etc.) der Radionuklide hängt ebenfalls vom jeweiligen geochemischen Milieu ab. Daher ergibt sich, dass die Sorption von Radionukliden stark pH-Wert abhängig ist. Weitere Einflussgrößen sind die Art des Sorbens, die Ionenstärke, die **Temperatur** und die Konzentration von Liganden und konkurrierenden Spezies /ALT 04a/.

Im Allgemeinen wird die Sorption anhand von Gleichgewichtsprozessen beschrieben, in denen die gelöste und die sorbierte Konzentration des betrachteten Sorptivs im chemischen Gleichgewicht miteinander stehen. Ändert sich die Konzentration des Sorptivs ändert sich auch die sorbierte Konzentration an der Oberfläche. Allerdings weisen Sorptions- und Desorptionsreaktionen eine Kinetik auf, die sehr unterschiedlich sein kann.

In einfachen Modellen wird das Gleichgewicht zwischen gelöster und sorbierter Konzentration, welches sich bei nicht zu schnellen Strömungen unter isothermen Bedingungen einstellt mit Hilfe von Sorptionsisothermen beschrieben. Man unterscheidet dabei zwischen linearen Sorptionsmodellen nach dem K_d -Konzept (Henry-Isotherme) oder nichtlinearen Sorptionsmodellen mit Langmuir- oder Freundlich-Isothermen (z. B. /STU 96/). Diese Isothermen sind im Modell nur anwendbar, wenn die Systemeigenschaften wie pH-Wert, Ionenstärke, Anzahl von Sorptionsplätzen, etc. denjenigen der zu Grunde liegenden Messwerte entsprechen /STU 96/.

Kolloide

Kolloide sind Teilchen oder Tröpfchen, die in einem anderen Dispersionsmedium (Feststoff, Gas oder Flüssigkeit) fein verteilt vorliegen. Das einzelne Kolloid hat typischerweise einen Durchmesser zwischen 1 Nanometer und 1 Mikrometer. Kolloide werden über ihre Größe definiert und stellen keine einheitliche Stoffklasse dar. Kolloidale Systeme stellen einen Zwischenzustand der beiden Grenzfälle einer homogenen (einphasigen) Mischung und einer heterogenen (mehrphasigen) Mischung dar.

Generell unterscheidet man zwischen hydrophilen und hydrophoben Kolloiden. Bei hydrophilen Kolloiden handelt es sich meist um Polymere, Polyelektrolyte oder Proteine, die gut löslich sind, spontan ein Sol bilden und relativ unempfindlich auf Destabilisierung durch Elektrolytzusatz reagieren. Im Falle von Metalloxiden/-hydroxiden, die eine geringe Löslichkeit besitzen, hat man es zumeist mit hydrophoben Kolloiden zu tun. Hydrophobe Kolloiddispersionen sind im Wesentlichen nur infolge ihrer Oberflächenladung stabilisiert und besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Elektrolytdestabilisierung. Hydrophobe Kolloide können zusätzlich sterisch stabilisiert werden, wenn Polyelektrolyte wie z. B. Huminstoffe an der Oberfläche sorbieren und einen Kontakt der hydrophoben Oberflächen, der zur Agglomeration führen kann, verhindern.

Radionuklide können an Kolloide gebunden sein. Auch können sich Kolloide aus Radionuklidphasen durch Agglomeration bilden. Deshalb wird zwischen Eigenkolloiden unterschieden, bei denen das Radionuklid einen Hauptbestandteil darstellt, z. B. in polymeren Actinidhydroxiden/oxiden, und Fremdkolloiden (Pseudokolloiden), bei denen das Radionuklid an aquatische Kolloide sorbiert bzw. darin eingebaut vorliegt. In Abhängigkeit vom geochemischen Milieu, insbesondere vom pH-Wert und von der Ionenstärke der Lösungen, können solche Kolloide langfristig metastabil vorkommen und die Speziation bestimmter Radionuklide dominieren /ALT 04b/. Die Bildung von Eigenkolloiden ist für vierwertige Actiniden von großer Bedeutung. Diese Eigenkolloide stehen im Gleichgewicht mit entsprechenden Actinidfestphasen. Werden die Kolloide, wie im Fall eines Transports aus dem Nahfeld, aus dem Gleichgewicht mit den Festphasen entfernt, stellen sie keine stabilen und somit keine migrierenden Spezies dar. Die Löslichkeit wird unter diesen Bedingungen durch nicht-kolloidale Actinid(IV)spezies bestimmt.

Geochemische Bedingungen wie z. B. niedrige Ionenstärke und hoher pH-Wert begünstigen das Entstehen kolloidaler Lösungen. Generell nimmt die Stabilität der Kolloide mit Zunahme der Ionenstärke ab. Einbau in bzw. Sorption an Kolloide mit großer spezifischer Oberfläche hält solche Radionuklide wie z. B. die Actiniden Pu und Am in Lösung, die wegen ihrer starken Sorptionseigenschaften bzw. ihrer geringen Löslichkeit geringere Konzentrationen aufweisen sollten. Temperaturabhängigkeiten wurden nach gegenwärtigem Kenntnisstand noch nicht endlagerspezifisch untersucht.

Komplexbildung

Gelöste Radionuklide liegen in der Regel als positive Kationen vor. Außerdem können anionische Spezies einiger Spalt- und Aktivierungsprodukte (z. B. C-14, Cl-36, I-129, Se-79, Tc-99) auftreten. Die geochemische Stabilität von positiv geladenen Spezies, d. h. ihre Tendenz keine Komplexe mit Bestandteilen der Lösung einzugehen, nimmt mit der Ladung des Zentralatoms ab /STU 96/. Die Löslichkeit von Radionukliden kann durch Komplexbildung signifikant erhöht werden. Durch die Verminderung der Ladung von komplexierten Kationen verringert sich die Tendenz zur Sorption /KIE 01/.

Bei der Berechnung von Radionuklidkonzentrationen (besonders von Actiniden) in endlagerrelevanten Lösungen anhand der thermodynamischen Löslichkeit bestimmter Festphasen muss die Bildung von Komplexen in der Lösung berücksichtigt werden. Die wichtigsten Komplexe in natürlichen Lösungen sind die Hydrolyse- und Karbonatkomplexe, deren Bildungskonstanten für viele Radionuklide bekannt sind. Schwache Komplexe, wie Chloridkomplexe werden häufig nicht explizit, sondern beispielsweise als Korrekturterm in den Pitzerkoeffizienten berücksichtigt. Die Komplexbildung und -stabilität ist wie jede chemische Reaktion und Verbindung temperaturabhängig.

B.13 Transportprozesse

Transportprozesse stehen im Zusammenhang mit Strömungsvorgängen im Grubengebäude (Kap. B.9).

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklide liegen in Lösungen in gelöster Form, als Eigenkolloide oder sorbiert an Kolloiden vor und können durch folgende Prozesse transportiert werden:

- Advektiv mit der Lösung, ausgelöst im Grubengebäude durch die Konvergenz und/oder Gasspeicherung sowie im Deck- und Nebengebirge durch Grundwasserströmungen,
- durch mechanische Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes, z. B. ausgelöst durch Geschwindigkeitsunterschiede in einem porösen Medium,
- durch Diffusion als Folge von Konzentrationsunterschieden in einem Lösungsvolumen.

Transportprozesse sind in unterschiedlichem Maß temperaturabhängig.

Advektion

Advektion bezeichnet den Transport von gelösten Stoffen mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas). Ein Temperatureinfluss ist vorhanden jedoch noch nicht endlagerspezifisch untersucht.

Mechanische Dispersion

Als mechanische Dispersion wird die Aufweitung von Schadstoffverteilungen, die in einem Fluid gelöst vorliegen, durch ungleichförmige Geschwindigkeitsprofile und unterschiedliche Weglängen in den Hohlräumen eines porösen Mediums bezeichnet. Ein Temperatureinfluss ist vorhanden jedoch noch nicht endlagerspezifisch untersucht.

Diffusion

Unter Diffusion versteht man die Durchmischung verschiedener Stoffe, die durch die **thermisch** bedingte Eigenbewegung der beteiligten Teilchen (Brownsche Molekularbewegung) zustande kommt (z. B Ionen, Atome, Moleküle). Besteht in einem Gasgemisch oder in einer Lösung für eine Substanz ein Konzentrationsgefälle, so wird dieses durch die Diffusion reduziert, die dabei zu einer statistisch gerichteten Bewegung wird und einen Transportprozess darstellt.

Matrixdiffusion

Als Matrixdiffusion bezeichnet man den diffusiven Übergang von gelösten Stoffen aus Bereichen, in denen, in eine Matrix mit immobilem Porenwasser, advektiver Transport dominiert. Ein Temperatureinfluss ist vorhanden jedoch noch nicht endlagerspezifisch untersucht.

Sonstige Transportprozesse

Beim Transport von Wasser (Transportmedium) und seinen Inhaltsstoffen dominieren Advektion, Diffusion und Dispersion /MAR 86/. Daneben existieren aber noch gekoppelte thermodynamische Prozesse, wie z. B.

- **thermische** Osmose: Einfluss eines Temperaturgradienten auf die Strömung des Transportmediums,
- chemische Osmose: Einfluss eines Konzentrationsgradienten auf die Strömung des Transportmediums,
- Hyperfiltration (auch Druckdiffusion oder Umkehrosmose): Einfluss eines hydraulischen Gradienten auf den Transport der Inhaltsstoffe und
- Thermodiffusion (Soret-Effekt): Einfluss eines Temperaturgradienten auf den Transport der Inhaltsstoffe.

Gegebenenfalls ist auch der Wärmetransport zu beachten. Dann können zusätzlich auch

- **thermische** Filtration: Einfluss eines hydraulischen Gradienten auf den Wärmetransport und
- der Dufour-Effekt: Einfluss eines Konzentrationsgradienten auf den Wärmetransport als gekoppelte thermodynamische Prozesse auftreten.

Für den Opalinuston in der Schweiz wurde eine Bewertung gekoppelter thermodynamischer Prozesse durchgeführt /SOL 99/. Für Ton hat danach nur die **thermische** Osmose das Potential, Einfluss auf einen Transport von Radionukliden zu nehmen.

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

Die Hebung oder das Absinken von Abfallbehältern ändert die Lageposition der Abfallbehälter und der sich darin befindlichen Radionuklide im Vergleich zu ihrer Einlagerungsposition.

Ein Transport der Endlagerbehälter von ihrem ursprünglichen Einlagerungsort weg könnte dann stattfinden, wenn sich durch Gebirgsbewegungen die Anordnung der Einlagerungshohlräume verändert oder die Einlagerungshohlräume deformiert werden. Auslösend für solche Gebirgsbewegungen könnte der Diapirismus sein. Als weiterer Transportmechanismus kommt eine Lageverschiebung der Abfallbehälter aus dem Einlagerungsbereich mit aufsteigenden Gesteinsschmelzen infolge eines Vulkanismus in Frage.

Neben diesen geologischen Prozessen muss überprüft werden, ob aufgrund der Fließfähigkeit des Salzes und der gegenüber dem umgebenden Steinsalz größeren Wichte von Einlagerungsbehältern eine schwerkraftbedingte Absinkbewegung der Einlagerungsbehälter auftreten kann. Für ein eventuelles Absinken eines Abfallbehälters im Steinsalz sind dessen Form und Gewicht sowie die u. a. von der **Temperatur** und Feuchte abhängige Kriechfähigkeit des Salzes relevant. Im Falle der Einlagerung von Abfällen in Bohrlöchern werden die Verrohrung und die sich in ihr befindlichen Abfallgebinde als eine Einheit betrachtet.

Radionuklidtransport in der Gasphase

Gasförmige Radionuklide und radioaktive Aerosole werden in der Gasphase transportiert:

- durch Advektion,
- durch Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes,
- durch Diffusion in der Gasphase als Folge von Konzentrationsunterschieden.

Ein Temperatureinfluss ist zu erwarten.

C Tabelle der THMCB-Prozesse

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Smektit-Illit-Reaktion	Setzt bei 50-60 °C ein. In der ersten Reaktionsstufe reduziert sich der Smektit-Anteil auf 35-50 % nach >10 000 Jahren bei >120 °C im Tongestein und >150 °C im Bentonit. In der zweiten Stufe reduziert sich der Smektit-Anteil auf <15 % bei 150-190 °C im Tongestein und >190 °C im Bentonit. Die dritte Stufe (vollständige Smektit-Umwandlung) findet erst bei >240-270 °C statt.	Verringert die einschlusswirksamen Eigenschaften (Quellvermögen, Sorptionsfähigkeit und Plastizität) des Tons	Tongestein	geologische Barriere (Tongestein)	>150 °C (190-240 °C)	Da die erste (und ggf. <u>zweite</u>) Reaktionsstufe während der diagenetischen Geschichte des Tongesteins abgeschlossen wurde, ist erst die zweite (ggf. <u>dritte</u>) Stufe relevant.
	Steinsalz/Tongestein/Kristallgestein		geotechnische Barriere (Bentonitbuffer, Versatz, Schichtabdichtung) bei pH<13 und Cl ⁻ -Konzentration <0,1 M	>150 °C	Bei dieser Temperatur bleibt noch ausreichend hoher Smektit-Anteil im Bentonit über den sicherheitsrelevanten Zeitraum erhalten.	

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
			Steinsalz/Tongestein/Kristallgestein	geotechnische Barriere (Bentonitbuffer, Versatz, Schichtabdichtung) bei pH>13 oder Cl ⁻ -Konzentration >0,1 M	>80 °C	Verminderte Grenztemperatur soll dem negativen Einfluss von pH oder Cl ⁻ entgegenwirken.
Chemische Alteration von Organika	Freisetzung volatiler Gase (CO ₂ , H ₂ S) aus tonhaltigem Material ab 150 °C. Einsatz der Kerogenpyrolyse ab 80 °C bei hohem Kerogengehalt möglich	Verstärkte Behälterkorrosion, Fluidrunderhöhung und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Ton- und Kristallgestein	geologische Barriere (Tongestein)	>150 °C	Ausschluss der Kerogenpyrolyse (vernachlässigbar für geringen Kerogengehalt).
				geotechnische Barriere (Bentonit)	>150 °C	Kerogengehalt durch Bentonitzusammensetzung regulierbar.
Desorption von CO ₂	Freisetzung von adsorbiertem CO ₂ . Freisetzung beginnt ab 50 °C, hat sein	Fluidrunderhöhung und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Ton- und Kristallgestein	geologische Barriere (Tongestein)	50-200 °C	Bei einem geringen adsorbierten CO ₂ -Gehalt im Tongestein bzw.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
	Maximum bei ca. 130 °C erreicht und ist bei 200 °C abgeschlossen.			geotechnische Barriere (Bentonit)	50-200 °C	Buffer vernachlässigbar.
Zersetzung von Karbonatmineralen	Freisetzung von CO ₂ durch die Zersetzung von Karbonatmineralen im Tongestein. Beginn ab 50 °C, Gasbildung dominierend (gegenüber Karbonatausfällung) ab ca. 100 °C	Fluiddruckerhöhung und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)	≥ 50 °C	Bei geringem Gehalt an Karbonatmineralen im Tongestein bzw. Buffer vernachlässigbar.
				geotechnische Barriere (Bentonit)	≥ 50 °C	
Quarz-Zementation	Bildung von verbundenen Netzwerken an den Kontaktflächen der Tonkörner. Beginnt ab ca. 85 °C, bis 130 °C weniger ausgeprägt und ab 150 °C durchgehend beobachtbar.	Verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellfähigkeit, Plastizität)	Tongestein	geologische Barriere (Tongestein)	≥ 85 °C	Quarz-Zementation hängt vom Fortschritt der Smektit-Illit-Reaktion ab.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
			Ton- und Kristallingestein	geotechnische Barriere (Bentonit) bei pH<13 und Cl ⁻ -Konzentration <0,1 M	≥ 150 °C	
			Ton- und Kristallingestein	geotechnische Barriere (Bentonit) bei pH>13 oder Cl ⁻ -Konzentration >0,1 M	≥ 80-90 °C	
Smektit-Umwandlung aufgrund Eisen-Ton-Wechselwirkung	Umwandlung von Tonmineralen in nicht quellfähige Schichtsilikate beginnend bei ca. 55-90 °C	Verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellvermögen, Kationenaustauschkapazität)	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	≥ 55 °C	
H ₂ -induzierte Pyrit-Reduktion	Bildung von H ₂ S unter reduzierenden Bedingungen im Wesentlichen ab 150 °C	Verstärkt die Metallkorrosion der Behälter und kann weitere Mineralumwandlungen induzieren	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	≥ 150 °C	Bei geringem Gehalt an Pyrit im Tongestein bzw. Buffer vernachlässigbar.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	Freisetzung von Porenwasser ab etwa 88 °C statt.	Fluiddruckerhöhung (falls das Wasser nicht abfließen kann) und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	$\geq 88 \text{ °C}$	
Thermische Expansion und Kontraktion	Volumenzunahme bis zum Expansions-Kontraktions-Übergang. Anschließend irreversible Kontraktion.	Änderung des geomechanischen Spannungsfeldes (Rissbildung oder -schließung möglich)	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	$\leq 150 \text{ °C}$	Temperaturwert abhängig von Konsolidierungsverhältnis, Saugspannung und effektiver Spannung. Nur bis 150 °C detaillierter untersucht.
Aktivität von Eisen(III)-reduzierenden Mikroben	Mikrobielle Aktivität zwischen 4 und 121 °C. Reduzierung von Eisen in Smektit mit daraus folgender Auflösung bzw. Umwandlung der Tonminerale.	Verringert die einschlusswirksamen Eigenschaften des Tons (Quellvermögen, Sorptionsfähigkeit und Plastizität).	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	$\leq 121 \text{ °C}$	Temperaturbereich bestimmt die konkrete Spezies. Aktivität auch abhängig von Größe des Lebensraums bzw. Nährstoffangebotes sowie Aktivität anderer Mikroorganismen.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben	Mikrobielle Aktivität zwischen -1,7 und 95 °C (möglicherweise 106 °C). Gelöstes Sulfat wird zu Sulfid reduziert. Reduzierung von Eisen in Smektiten. Eisen dient als Elektronendonator.	Verstärkt die Metallkorrosion der Behälter und verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellvermögen, Sorptionsfähigkeit, Plastizität).	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	≤ 95-106 °C	
Aktivität von Methan-produzierenden Mikroben	Mikrobielle Aktivität zwischen 1 und 122 °C. Produziert CH ₄ . Reduzierung von Eisen in Smektiten. Eisen dient als Elektronendonator.	Verstärkt die Metallkorrosion der Behälter und erhöht den Fluiddruck. Verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellvermögen, Sorptionsfähigkeit, Plastizität).	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	≤ 122 °C	
Aktivität von fermentativen Mikroben	Mikrobielle Aktivität zwischen -2,5 und 110 °C statt. Produziert organische Säuren und Gase.	Gasproduktion kann zu einem erhöhten Fluiddruck und zu einer Rissbildung im Tongestein beitragen.	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	≤ 110 °C	

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Bildung von Biofilmen	Kann zu einer Verstärkung der Aktivität von Mikroben führen.	s. oben zu Aktivitäten von Mikroben	Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	$\leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Thermochemische Sulfatreduktion	Gasbildung (H_2S , CO_2) infolge der Auflösung von Sulfat aus Evaporiten ab $127\text{-}180 \text{ }^{\circ}\text{C}$.	Verstärkt die Metallkorrosion der Behälter und erhöht den Fluiddruck. Verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellvermögen, Sorptionsfähigkeit, Plastizität).	Steinsalz, Ton- und Kristallingestein	geologische Barriere (Steinsalz, Tongestein)/geotechnische Barriere (Bentonit)	$> 127\text{-}180 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperaturbereich abhängig von den konkreten geochemischen in-situ Bedingungen.
Gefrieren von Bentonit	Unterhalb des Gefrierpunktes kann Wasser im Buffer gefrieren. Dieser liegt unterhalb von $-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.	Verringert einschlusswirksame Eigenschaften von Ton (Quellvermögen)	Kristallingestein	Geotechnische Barriere (Buffer)	$\leq -4 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Im skandinavischen KBS3-Konzept als Temperaturbegrenzung berücksichtigt. Aufgrund der Teufenlage eines Endlagers in Deutschland vor. vernachlässigbar.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Korrosion der Behälteroberfläche	Die Korrosionsrate für Stahl nimmt zunehmender Temperatur bei Anwesenheit von Wasser zu.	Der Abfallbehälter kann die Einschussfähigkeit verlieren	Kristalline-gestein	Behälter	(100 °C)	Höhere Temperaturen wurden nicht in Betracht gezogen.
Spaltkorrosion (Titanlegierung)	Die Korrosionsrate für Titanlegierungen nimmt zunehmender Temperatur bei Anwesenheit von Wasser zu.	Der Abfallbehälter kann die Einschussfähigkeit verlieren	Kristalline-gestein	Behälter	(100 °C)	Behälter aus einer Titanlegierung wurden in Kanada in Erwägung gezogen.
Änderungen in der Struktur des Behältermaterials	Da für den Buffer bereits eine regulatorische Grenztemperatur festgelegt ist, wurde dieser Prozess nicht genauer untersucht.	Der Abfallbehälter verliert die Einschussfähigkeit früher	Kristallin	Behälter	(100 °C)	Höhere Temperaturen wurden nicht in Betracht gezogen.
Mechanische Festigkeit	Die mechanische Festigkeit der Behältermaterialien (innen & außen) ist temperaturabhängig	Mechanisches Versagen des Behälters, Verlust der Einschussfähigkeit	Kristallin	Behälter	≥ 0 °C	Die Festigkeiten der Behälter im KBS-3-Konzept sind für Temperaturen ab 0 °C ausgelegt.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Thermische Zersetzung von Mineralen	Ab einer mineralspezifischen, druckabhängigen Temperatur zersetzen sich Hydratsalze und setzen Wasser frei.	Fluidruckerhöhung und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Steinsalz	Nebengestein (Lokation des Carnallitits)	$\geq 153-167 \text{ }^\circ\text{C}$	Geringe Druckabhängigkeit des Schmelzpunktes von Carnallit.
			Steinsalz	Wirtsgestein (mit Polyhalit)	$\geq 230 \text{ }^\circ\text{C}$	In-Situ Bedingungen.
			Steinsalz	Wirtsgestein (mit Kieserit)	$\geq 335 \text{ }^\circ\text{C}$	Laborversuch (1 bar)
Verdampfen von Wasser	Stark druckabhängiger Phasenübergang von wässrigen Lösungen von flüssig zu gasförmig. Leicht abhängig von der Lösungszusammensetzung.	Fluidruckerhöhung und mögliches Transportmedium für Radionuklide	Steinsalz, Ton- und Kristallingestein	Wirtsgestein (Lokation der Lösungen)	$\geq 290-320 \text{ }^\circ\text{C}$	Abhängig von der Teufenlage (hier exemplarisch für 300–500 m) Salzgesättigte Lösungen erhöhen den Temperaturbereich (um ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Mikrobielle Aktivität	Die Aktivität von Mikroorganismen kann zu chemischen Prozessen beitragen und z. B. die Korrosion von Metallen sowie die Gasbildung beschleunigen	Abfallbehälter seine Einschlussfähigkeit früher verlieren (Korrosion) und Fluiddruck erhöht werden (Gasbildung)	Steinsalz	Wirtsgestein	$\leq 122 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Temperaturabhängigkeit von der konkreten Spezies abhängig.
Salzkriechen	Plastische Verformung des Wirtsgesteins mit Selbstheilungseigenschaften ansteigend mit zunehmender Temperatur. Verstärkt ab $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ beobachtet.	Hohlraumverringern und schnellerer Einschluss der Abfälle	Steinsalz	Wirtsgestein	$\geq 50\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Keine feste Fließgrenze. Stark material- und umgebungsabhängig.
Kompaktion	Verringerung des Hohlraumvolumens von Versatzmaterial (Salzgrus). Kompaktionsrate steigt mit zunehmender Temperatur	Hohlraumverringern und schnellerer Einschluss der Abfälle	Steinsalz	Versatz	$\geq 50\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Keine feste Grenze.

Prozessname	Kurzbeschreibung	Sicherheitstechnische Bedeutung	Wirtsgestein	Komponente/Material	Temperaturbereich	Anmerkung
Blausprödigkeit	Blausprödigkeit bezeichnet das Verhalten gehärteter Stähle, bei Anlass-temperaturen zwischen 200 und 350 °C an Zähigkeit zu verlieren. Bei Verformung der Stähle in diesem Temperaturbereich besteht die Gefahr des sogenannten Blaubruchs, da sich die Bruchfläche blau färbt (Anlassfarbe). Ursache hierfür ist die Ausscheidung von Zementit (Fe_3C) aus dem Martensit.	Mechanische Schwäche von Gusseisen mit Kugelgraphit	alle	Behälter	> 200 °C	

D Temperaturen¹⁹ zur Endlagerauslegung im internationalen Vergleich

Land	Wirtsgestein	Behälteraußenfläche	Buffer/Verfüllmaterial	Wirtsgestein	Rückholbarkeit
Belgien	Ton(gestein)	Max. 100 °C /BEL 01/, /WIC 08/	< 100 °C im Bentonit /WEE 09/ Erwartet: 65-80 °C /WIC 08/	Erwartet: 55-70 °C /WIC 08/	Rückholbarkeit ist gesetzlich gefordert /FED 14/
Deutschland	Steinsalz	100 °C nach StandAG (Phase 1) /STA 17/	200 °C Salz, Salzgrus, /AME 04/, /BOL 11/	100 °C (Rückholung) /ENG 95/	Rückholbarkeit ist gesetzlich gefordert /STA 17/
	Tongestein		100 °C Bentonitbuffer /AME 04/	150 °C (ANSichtT) /JOB 17a/	
	Kristalline-gestein		100 °C	100 °C (Asterix) /BOL 14/	
Finnland	Kristalline-gestein	Erwartet: 95 °C (ungs- ättigter Bentonitbuffer) bzw. 75 °C (gesättigter Bentonitbuffer) /POS 13/	100 °C im Bentonitbuf- fer /POS 13/	65 °C erwartet /POS 13/	Planung muss Rückho- lung in der Nachbe- triebsphase berücksich- tigen /STUK 01/
Frankreich	Tongestein	90-100 °C /AND 05d/	100 °C für Bentonit /AME 04/	90 °C (Einlagerungskam- mern) /AND 05b/, /AND 05d/	Rückholbarkeit ist gesetzlich gefordert /RÉP 06/
	Kristalline-gestein	90 °C /AND 05c/	90 °C /AND 05e/	100 °C /AND 05e/	./.

¹⁹ Die genannten Temperaturen basieren u. a. auf Temperaturfeldberechnungen (erwartete Temperaturen), die auf Basis eines Endlagerkonzeptes mit bekannter Wärmeproduktion des Abfallinventars (Behälterbeladung) für die einzelnen Endlagerkomponenten berechnet wurden.

Land	Wirtsgestein	Behälteraußenfläche	Buffer/Verfüllmaterial	Wirtsgestein	Rückholbarkeit
Großbritannien	Nicht spezifiziert	100 °C (HAW) 50 °C (LLW und ILW) /NIR 03/, /NDA 14/	./.	./.	./.
Japan	Kristallgestein	./.	100 °C /NEA 03/, /BOL 04/, /HIC 09/	./.	Endlagerkonzept berücksichtigt Methoden zur Rückholung /AME 04/
Kanada	Kristallgestein	-50-100 °C /NEA 03/, /BOL 04/	./.	./.	Nein /CNS 06/
Russland	Kristallgestein	./.	100 °C /BOL 04/	./.	Nein /BOL 04/
Schweden	Kristallgestein	< 100 °C /SKB 11a/	< 100 °C /SKB 06b/	./.	Nein /SSM 08a/, /SSM 08b/, /SSM 08c/
Schweiz	Tongestein (Opalinuston)	Max. 140-160 °C /JOH 02/	125 °C (in der äußeren Hälfte des Bentonitbuffers) /JOH 02/	70 °C bis 95 °C an der Grenze Buffer/ Wirtsgestein /JOH 02/	Rückholbarkeit ist gesetzlich gefordert /KEG 03/
	Kristallgestein	126 °C /SAT 98/, /NAG 85/	103 °C /SAT 98/, /NAG 85/	98 °C /SAT 98/, /NAG 85/	Zum damaligen Zeitpunkt wurde keine Rückholbarkeit gefordert /NAG 85/
Spanien	Kristallgestein	./.	100 °C /IAEA 93/, /AME 04/, /BOL 04/	./.	Nein /GRU 00/
Südkorea	Kristallgestein	./.	100 °C /LEE 07/, ggfs. 125 °C /CHO 16/	./.	./.
USA	Tuff	< 350 °C (im Behälter) /REC 14/	Kein Buffer/Verfüllung	200 °C /REC 14/ 230 °C /CZY 94/	Ja /TRB 18/

Anlage 1 Erstellung einer Literaturdatenbank zur Grenztemperatur und zur Rückholbarkeit (Bergbarkeit) und Handhabbarkeit der Abfallbehälter

Erstellung einer Literaturdaten-
bank zur Grenztemperatur und
zur Rückholbarkeit (Bergbarkeit)
und Handhabbarkeit der Abfall-
behälter

Bracke, Guido
Weyand, Torben
Hartwig-Thurat, Eva
Fischer-Appelt, Klaus
Meleshyn, Artur
Kock, Ingo
Larue, Jürgen
Seher, Holger

März 2018

Auftrags-Nr.: 4717E03241

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde lie-
gende Vorhaben wurde vom Bun-
desamtes für kerntechnische Ent-
sorgungssicherheit (BfE) beauftragt.

Die Arbeiten wurden von der Gesell-
schaft für Anlagen- und Reaktorsi-
cherheit (GRS) gGmbH ausgeführt.
Die Verantwortung für den Inhalt
liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und
Meinung der GRS wieder und muss
nicht mit der Meinung des Bundes-
amtes für kerntechnische Entsor-
gungssicherheit (BfE) übereinstim-
men.

Deskriptoren

Literaturdatenbank, Grenztemperatur; THMC-Prozesse; Salz; Ton; Kristallin; Rückholbarkeit

Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis.....	I
1	Einleitung	2
2	Zielsetzung.....	5
3	Literaturverwaltungsprogramm Citavi	7
3.1	Anwendung.....	7
3.1.1	Dokumententypen.....	7
3.1.2	Wissenselemente	10
3.1.3	Kategoriensystem zur Verschlagwortung	11
3.1.4	Filterfunktion	13
3.1.5	Export in gängige Literaturformate	14
3.2	Herleitung und Gruppierung der Schlagwörter	16
3.2.1	Gruppierung „Länder“	16
3.2.2	Gruppierung „Anforderungen“	17
3.2.3	Gruppierung „Wirtsgestein/Material“	19
3.2.4	Gruppierung „Komponenten“	20
3.2.5	Gruppierung „THMCB-Prozesse“	22
3.2.6	Gruppierung „Eigenschaften“	25
3.2.7	Gruppierung „Untersuchungsart“	25
3.2.8	Gruppierung „Offene Fragen“	26
3.3	Literaturrecherche.....	26
4	Zusammenfassung	27
	Literaturverzeichnis.....	28
	Abbildungsverzeichnis.....	33
	Tabellenverzeichnis.....	33
	Abkürzungsverzeichnis.....	33
	Anhang 1 FEP-Listen und Zuordnung der Schlagworte für Prozesse	35

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben, das dieser Literaturstudie zugrunde liegt, hat zum Ziel eine Grundlage für die Bewertung von wirtsgesteinsspezifischen Grenztemperaturen zu liefern, die für die Abfallbehälter in einem Endlager festgelegt werden könnten. Hierfür ist eine Kenntnis des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik (W&T) hinsichtlich der Auswirkungen des Wärmeeintrags der Abfallbehälter im Endlagerbergwerk auf

- Wärme-induzierte gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische Prozesse (THMC)
- Rückholbarkeit (Bergbarkeit) inkl. Handhabbarkeit der Abfallbehälter

erforderlich.

Es sollen Prozesse und Aspekte identifiziert werden, die in Zukunft besonders zu betrachten sind, und darüber hinaus deren Relevanz nach Stand von W&T hinsichtlich für die Betriebs- und Langzeitsicherheit eines Endlagers bewertet werden.

Dabei sollen auch die Erkenntnisse und Festlegungen anderer Länder berücksichtigt und überprüft werden inwiefern die Festlegungen und Anforderungen für potentielle Wirtsgesteine in Deutschland anwendbar sind.

Abschließend soll ein Ausblick auf die Auswirkungen der Festlegung einer Grenztemperatur für mögliche Endlagerkonzepte in Deutschland gegeben werden.

In verschiedenen nationalen und internationalen Veröffentlichungen sowie Studien zu Salz-, Ton- und Kristallingestein wurde bereits die Wärmeverträglichkeit potentieller Wirtsgesteine in Deutschland untersucht und analysiert /JEN 02/, /MEL 16/, /ESK 16/, /BRÄ 16/, /BUR 16/, /JOB 15/.

Die derzeitige vorläufige Annahme einer Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Abfallbehälter von hochradioaktiven Abfällen im StandAG (§27 (4)) basiert auf einer entsprechenden Empfehlung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ /KOM 16/. Diese Empfehlung wurde ausdrücklich als vorläufige Festlegung formuliert und war zudem Gegenstand abweichender und kritischer Meinungen /FIS 16/, /KUD 16/. Diese vorläufige Festlegung aus Vorsorgegründen wurde von Experten bei einer Anhörung im Umweltausschuss des Deutschen Bundestages als nicht zielführend kritisiert /REI 17/. Niedrigere Temperaturen unterhalb von 100 °C seien in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Endlagerkonzepten nicht zwingend sicherheitstechnisch

vorteilhaft /RÖH 17/, /MEL 16/. Vielmehr sollten wirtsgesteins- und konzeptspezifisch Vor- und Nachteile transparent dargelegt werden, die sich aus abweichenden Grenztemperaturen ergeben. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass kein potentieller Standort mit einer „bestmöglichen Sicherheit“ vorab aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen wird /WAT 17/. Daher wurde auch empfohlen den Paragraphen 27 (4) ersatzlos zu streichen /REI 17/, /RÖH 17/.

Da die Vorgabe einer Grenztemperatur im StandAG starke Auswirkungen beispielsweise auf die Standortauswahl, die zukünftigen Endlagerkonzepte und die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in allen Wirtsgesteinen haben kann, wurde eine Forcierung der ausstehenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten empfohlen /RÖH 17/. Die vorliegende Literaturstudie liefert hierzu einen Beitrag und soll mithilfe von wissenschaftlich-technischen Studien eine tiefere Diskussion der zuvor genannten Kritikpunkte ermöglichen.

2 Zielsetzung

Die vorliegende Literaturstudie soll die Grundlagen des aktuellen Standes von W&T zur Wärmeverträglichkeit der potentiellen Wirtsgesteine Salz, Tonstein und Kristallin und möglichen sicherheitsrelevanten temperaturabhängigen Prozessen dokumentieren. Über die bereits bekannten Literaturhinweise in der Leistungsbeschreibung sollten weitere Literaturstellen recheriert und in einer Literaturdatenbank zusammengestellt werden, die einen Bezug zu den sicherheitsrelevanten Konsequenzen einer Temperaturerhöhung (bzw. Temperaturänderung) in den geotechnischen Barrieren und potentiellen Wirtsgesteinen für die Endlagerung und damit auf die Festlegung einer Grenztemperatur am Behälter haben können. Hierzu gehören Forschungsstudien, die sich mit den möglichen bestehenden bzw. hervorgerufen durch Wärmeeinwirkungen entstehenden thermo-hydraulisch-mechanisch-chemisch-biologisch gekoppelten Prozessen (THMCB) und der Rückholbarkeit/Bergbarkeit sowie Handhabbarkeit der Abfallbehälter in Bezug auf mögliche Grenz- und Auslegungstemperaturen befassen.

Zur Recherche der Literatur werden frei zugängliche Recherchemöglichkeiten (pubmed, sciencedirect, scholar.google.com, researchgate...), kostenpflichtige Recherchemöglichkeiten wie z. B. SciFinder (Chemical Abstracts Service) sowie eine Citavi Datenbanksuche und auch persönliche Kontakte eingesetzt, um eine möglichst umfassende und abdeckende Literaturdatenbank zur Beantwortung der Fragestellung zusammenzustellen.

Zur Einordnung und Sortierung der recherierten Literatur sollte eine aussagekräftige Verschlagwortung in Bezug auf die Fragestellung erfolgen. Die Herleitung der Verschlagwortung sollte nachvollziehbar erfolgen. Hierzu sollte ein Konzept erarbeitet und angewendet werden, das nach einer fachlich-wissenschaftlichen Sichtung der Literatur die Sortierung und Kennzeichnung ermöglicht.

Mittels der Software Citavi /CIT 17/ wird die recherierte Literatur nach Schlagworten bzw. Kategorien als Literaturdatenbank erfasst und dokumentiert. Soweit vorhanden werden DOI- bzw. ISBN-Nummern der Literaturquellen angegeben und die Volltexte beigefügt soweit dies unter Beachtung des Copyrights möglich ist. Der Export und die Ausgabe in weitere gängige Literaturformate ist möglich. Hierzu wird eine Kurz-Anleitung für die kostenfrei verwendbare Version gegeben.

Die Literaturrecherche und Pflege der Datenbank soll und wird kontinuierlich bis zur Erstellung des Abschlussberichts des Gesamtvorhabens fortgeführt.

Die nachfolgenden Kapitel sollen die Anwendung des Literaturverwaltungsprogramms Citavi in diesem Vorhaben und die Auswahl der Schlagworte erläutern.

3 Literaturverwaltungsprogramm Citavi

3.1 Anwendung

Das Literaturverwaltungsprogramm Citavi wurde für die Dokumentation, die Verschlagwortung der recherchierten Literatur und die Erstellung der Datenbank ausgewählt. Citavi ist eine gängige Software, um Literatur zu dokumentieren und in einer Datenbank zusammenzufassen. Die im Folgenden genannten Citavi-Funktionen beschreiben die Handhabung der entwickelten Citavi-Datenbank:

- Zuweisung und Einteilung der Literatur in sogenannte **Dokumententypen**,
- Umgang mit Textstellen in der Literatur, den sogenannten **Wissenselementen**,
- Zuweisung/Darstellung der Literatur anhand von **Kategorien** und **Gruppen**,
- die Nutzung der **Filterfunktion** zur Bedienung der Datenbank für die Suche nach den Literaturstellen,
- und eine Kurzanleitung zum **Export der Literatur** in andere Literaturformate.

3.1.1 Dokumententypen

Eine Citavi-Literaturdatendank beinhaltet Literatureinträge, die in Citavi technisch als „Titel“ bezeichnet werden. Jeder Titel ist eine Literaturstelle, d. h. ein recherchiertes Dokument (Bericht, Zeitschriftenartikel, Konferenzbeitrag usw.). Citavi unterscheidet die Titel anhand ihres zugewiesenen Dokumententyps, deren Verwendung im Folgenden kurz erläutert wird. Ein neuer Titel wird über den Reiter „+ Titel“ (Tastenkürzel STRG+N) hinzugefügt. In dem neu erschienenen Fenster wird der Dokumententyp ausgewählt (Abb. 3.1).

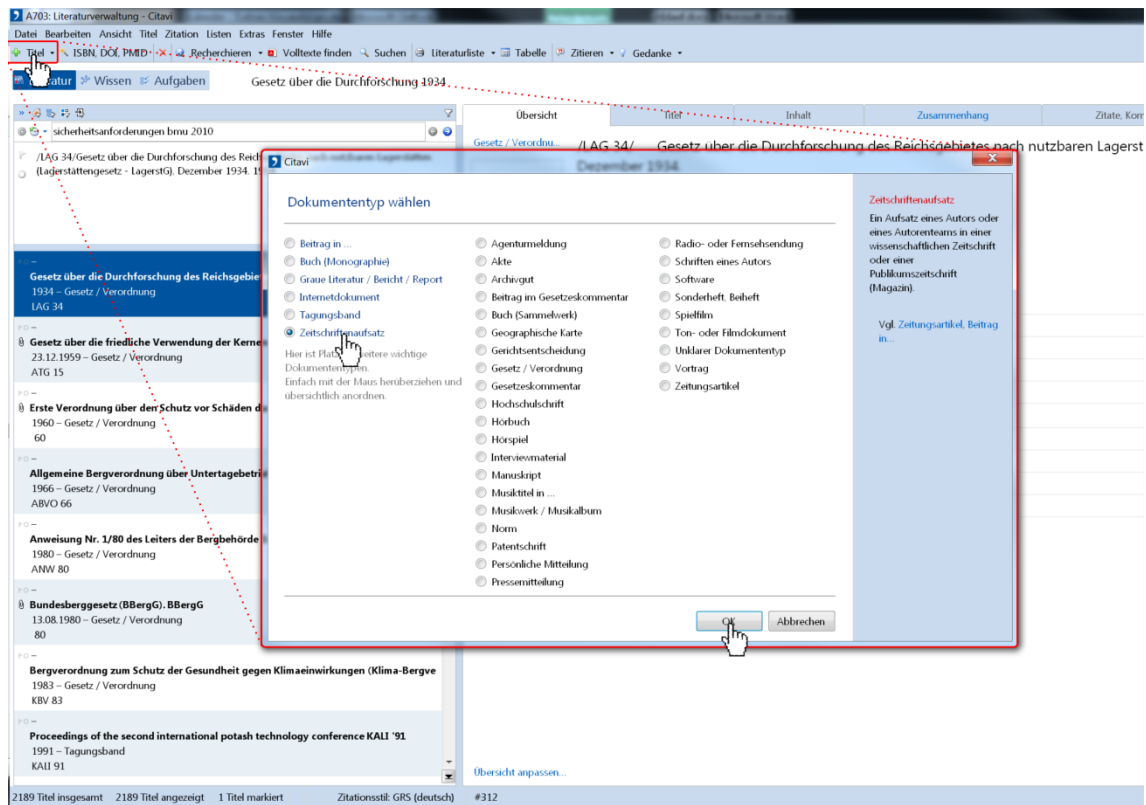


Abb. 3.1 Neuen Titel (Literaturstelle) in Citavi hinzufügen

Die folgenden Dokumententypen (nach Häufigkeit absteigend sortiert) werden für die recherchierten Titel in diesem Vorhaben angewendet:

- Zeitschriftenaufsatz,
- Graue Literatur/Bericht/Report,
- Buch (Monographie),
- Beitrag in ...,
- Vortrag,
- Gesetz/Verordnung,
- Hochschulschrift,
- Buch (Sammelwerk),
- sowie Tagungsband.

Sie können über die Filterfunktion sortiert angezeigt werden (Abb. 3.2).

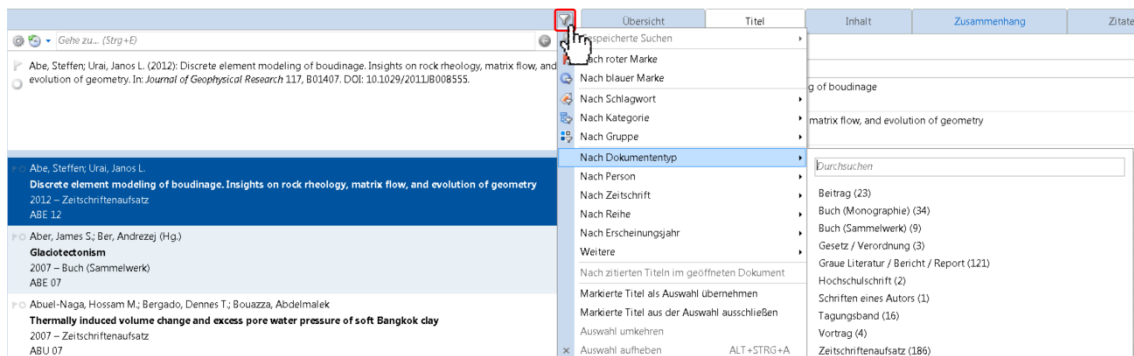


Abb. 3.2 Darstellung der Filterfunktion für Dokumententypen

Zeitschriftenaufsätze sind Artikel, die in nationalen und internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften erschienen sind. Hierbei handelt es sich i. d. R. um wissenschaftliche Publikationen von Universitäten und Forschungseinrichtungen, die einem *peer review* Prozess vor ihrer Veröffentlichung unterzogen wurden. Hierbei kann es sich um generische Studien, Literatur- und Reviewarbeiten, Modellierungen oder um Ergebnisse aus Labor- bzw. in-situ-Versuchen handeln. Viele Zeitschriftenartikel sind kostenpflichtig und unterliegen Nutzungsbeschränkungen.

Der Dokumententyp **Graue Literatur/Bericht/Report** enthält überwiegend Berichte, die von nationalen und internationalen Aufsichts- und Genehmigungsbehörden, Sachverständigen- und Gutachtergesellschaften sowie Forschungseinrichtungen eigenständig veröffentlicht oder in Auftragsarbeit erstellt wurden. Berichte dieses Dokumententypes unterliegen teilweise Nutzungsbeschränkungen und/oder benötigen zur Verwendung oder Zitierung eine Freigabe (z. B. bei Auftrags-, Eigenforschungsarbeiten).

Literatur der Typen **Buch (Monographie)** und **Buch (Sammelwerk)** sind sowohl Lehrbücher als auch Berichte, die der Literatur des Typs Graue Literatur gleichen. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist die vorhandene ISBN-Nummer bei Büchern. Diese Unterscheidung ist gewollt, da sich die Zitationsstile dieser beiden Dokumententypen unterscheiden können. Ein Buch (Sammelwerk) beinhaltet mehrere Beiträge bzw. Kapitel, die zudem von unterschiedlichen Autoren geschrieben sein können.

Hochschulschriften wurden an (oder in Zusammenarbeit mit) nationalen und internationalen Universitäten und Fachhochschulen angefertigt. Diese beinhalten Dissertationen, Habilitationen und Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom).

Im Dokumententyp **Gesetz/Verordnung** sind überwiegend nationale Regelwerke hinterlegt. Internationale Regelwerke können aufgrund ihrer unterschiedlichen Zitierweise auch teilweise dem Dokumententyp **Graue Literatur** zugewiesen sein. Eine bessere Eingrenzung zur Auswahl der Regelwerke kann u. U. mithilfe der Kategorie „Regelwerk“ und dessen Unterkategorien erreicht werden.

Ein **Tagungsband** enthält schriftliche Beiträge (Beitrag in ...) zu nationalen und internationalen Konferenzen. Häufig stellt die Literatur des Dokumententyps Tagungsband eine Zusammenfassung der an der Konferenz beteiligten Autoren mit Kurzfassungen und Artikeln dar.

Mündliche Präsentationen auf (öffentlichen) Fachveranstaltungen inkl. Foliensatz erhalten den Dokumententyp **Vortrag**.

3.1.2 Wissenselemente

Citavi bietet die Möglichkeit konkrete Textstellen in der Literatur zu markieren und auszuwerten. Diese Markierungen werden in Citavi **Wissenselemente** genannt. Um Wissens-elemente nutzen zu können, **muss** die Literatur als PDF zur Verfügung stehen und in Citavi hinterlegt sein. Durch die Markierung von Textstellen innerhalb eines pdf-Dokumentes können Zitate in einem Bericht (z. B. Abschlussbericht zu den Arbeitspaketen 2 und 3) transparent und nachvollziehbar dokumentiert werden. Die Verwendung von Wissens-elementen ist insbesondere bei umfassenden Dokumenten, die mehrere Themenkomplexe enthalten, vorteilhaft, da mit Wissens-elementen direkt auf die betreffende Textstelle verwiesen werden kann statt lediglich die Literaturstelle des Volltextes anzugeben.

Den Wissens-elementen können genauso wie der Literatur Schlagwörter bzw. Kategorien zugewiesen werden. Dies ermöglicht es mit der Filterfunktion auch Wissens-elemente zu erfassen. So kann nicht nur die Literatur, sondern können auch die Textstellen verschlagwortet und nach Kategorien sortiert angezeigt werden (Abb. 3.3).

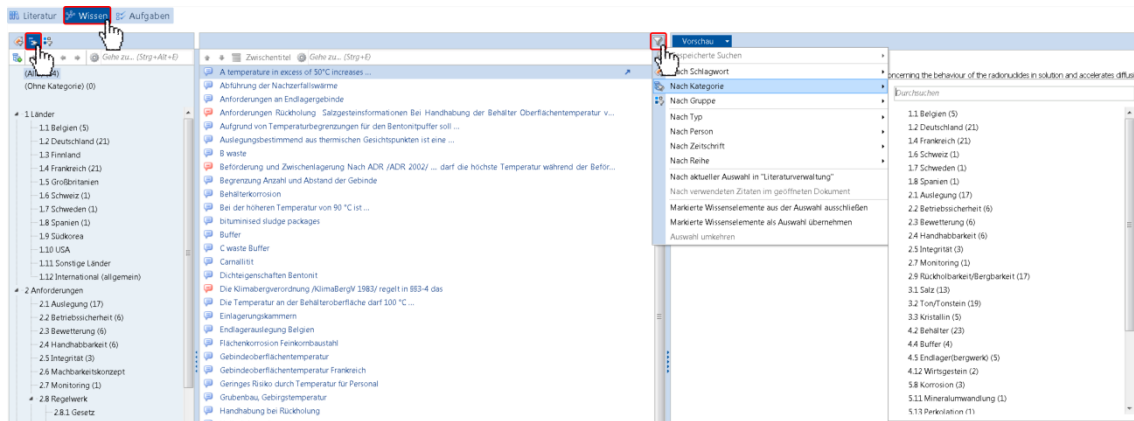


Abb. 3.3 Anwendung der Filterfunktion für Wissens-elemente

3.1.3 Kategoriensystem zur Verschlagwortung

Citavi bietet die Möglichkeit die recherchierte Literatur fachlich-wissenschaftlich zu sortieren und eine aussagekräftige Kennzeichnung (Verschlagwortung) der Literatur mithilfe eines Kategoriensystems vorzunehmen. Bereits in der Literatur vergebene „Schlagwörter“ könnten von Citavi automatisiert aus der Literaturstelle übernommen werden. Diese Schlagwörter entsprechen in den meisten Fällen nicht den Schlagwörtern, die in diesem Vorhaben zur Verschlagwortung ausgewählt werden, da diese nicht systematisch abgeleitet wurden und sehr umfangreich und diversitär sind. Technisch sind in Citavi „Schlagwörter“ eine Aneinanderkettung von ausgewählten Wörtern, die nicht in Citavi hierarchisch gruppiert werden können.

Daher wird nicht die in Citavi vorgegebene Möglichkeit „Schlagwörter“ zu vergeben/übernehmen genutzt, sondern stattdessen die Funktion „Kategorien“ ausgewählt und verwendet. Die Verwendung von „Kategorien“ in Citavi erlaubt eine Gruppierung und somit eine fachlich-wissenschaftliche Gruppierung der Literatur. Die Begriffe der jeweils gewählten „Kategorien“ entsprechen den geforderten aussagekräftigen „Schlagwörtern“, d. h. die Begriffe „Kategorie“ und „Schlagwort“ sind synonym.

Den einzelnen Literaturstellen/Beiträgen in Sammelwerken/Tagungsbänden werden Kategorien zugewiesen, jedoch nicht dem jeweiligen übergeordneten Sammelwerk oder dem Tagungsband. Das übergeordnete Sammelwerk/Tagungsband bleibt „ohne Kategorie“, um Doppelungen zu vermeiden.

Die Herleitung der gewählten Schlagwörter/Kategorien ist in Kap. 3.2 beschrieben. Die Kategorien können in Citavi über die Funktion „Kategorien als Spalte einblenden“ angezeigt werden (Abb. 3.2).

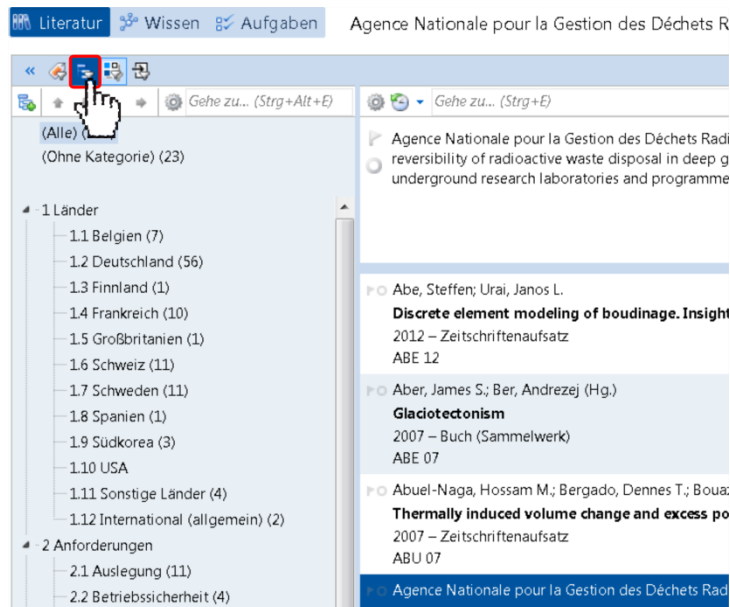


Abb. 3.4 Darstellung der Kategorien nach Kap. 3.2 in Citavi

Gruppen

Die Citavi-Funktion „Gruppen“ ähnelt der Funktion „Kategorien“ mit dem Unterschied, dass Gruppen keine hierarchische Einteilung besitzen. Gruppen können unabhängig von den Kategorien dargestellt und zugewiesen werden. Die Funktion „Gruppen“ wird in diesem Vorhaben verwendet, um eine Kennzeichnung bzgl. der Nutzungsbeschränkung von Literatur vorzunehmen. Für die vorliegende Citavi-Datenbank werden die Gruppen

- Frei zugänglich,
- Erwerbspflichtig,
- Freigabe erforderlich,

verwendet. Gruppen können ähnlich wie Kategorien über die Funktion „Gruppen als Spalte einblenden“ angezeigt werden (Abb. 3.5).

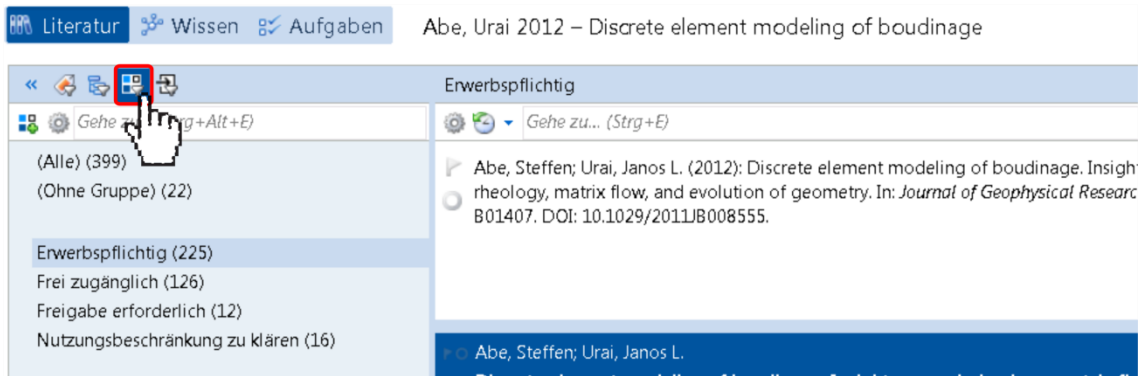


Abb. 3.5 Darstellung der Gruppen in Citavi

Frei zugängliche Literatur ist im Internet zum Zeitpunkt der Aufnahme in die Datenbank kostenfrei digital verfügbar. Die Online-Adresse für diese Literatur ist hinterlegt und es ist vermerkt, an welchem Tag die Online-Adresse zuletzt geprüft wurde. Das jeweilige pdf-Dokument ist in die Datenbank aufgenommen.

Erwerbspflichtige Literatur ist nutzungsbeschränkt und kostenpflichtig. Diese kann über übliche Beschaffungsmaßnahmen in digitaler oder analoger Form bestellt werden und darf i. d. R. wegen des Copyrights nicht frei verbreitet werden. Sofern verfügbar wird eine Online-Adresse oder eine DOI beigefügt, mit welcher z. B. eine Kurzfassung der Literatur im Internet eingesehen bzw. beschafft werden kann.

Die Gruppe **Freigabe erforderlich** enthält Literatur, die Nutzungsbeschränkungen unterliegt und i. d. R. nicht über übliche Beschaffungsmaßnahmen bestellt werden kann. Hierbei handelt es sich überwiegend um Auftragsarbeiten, die nur mit Zustimmung des Auftraggebers verbreitet oder zitiert werden dürfen. Hier muss der Kontakt mit den betroffenen Institutionen im Einzelfall hergestellt werden, um die Literatur zu beschaffen. Insbesondere ältere Literatur dieser Gruppe liegt häufig nur in Papierform vor.

3.1.4 Filterfunktion

Mithilfe der Filterfunktion können Bedingungen eingestellt werden, um Literatur in einer Citavi-Datenbank zu selektieren. Die Filtereinstellungen sind vielseitig und es können z. B. Bedingungen nach Kategorien, Gruppen oder Dokumenttypen ausgewählt werden. Zur Suche nach Literatur innerhalb der Datenbank ist die Verwendung der Filterfunktion äußerst wichtig und kann nicht durch eine sogenannte „Freiwortsuche“ ersetzt werden (außer der Nutzer kennt bereits die konkrete Literaturstelle).

Bei Verwendung der Filterfunktion zur Einschränkung der Literatur nach Kategorien ist es hilfreich bei der Suche zunächst „grobe“ (mit vielen Literaturstellen) und anschließend „feinere“ Filter (mit weniger Literaturstellen) zu setzen. Wenn beispielsweise nur das Wirtsgestein Salz als Filter gesetzt wird, erscheinen über hundert Literatureinträge. Sobald gleichzeitig weitere Filter gesetzt werden (wie eine spezifische Komponente und ein THMCB-Prozess), wird nur noch Literatur angezeigt, die auf alle gesetzten Filter zutreffen (Abb. 3.6). Durch die Kombination von mehreren Filtern lässt sich die Anzahl an zutreffenden Literatureinträgen stark reduzieren und die gesuchte Literatur selektieren. Citavi schlägt beim Setzen weiterer Filter die Kategorien automatisch vor, in welchen weitere Literatur verschlagwortet ist, die für alle bislang gesetzten Filtereinstellungen zutrifft.

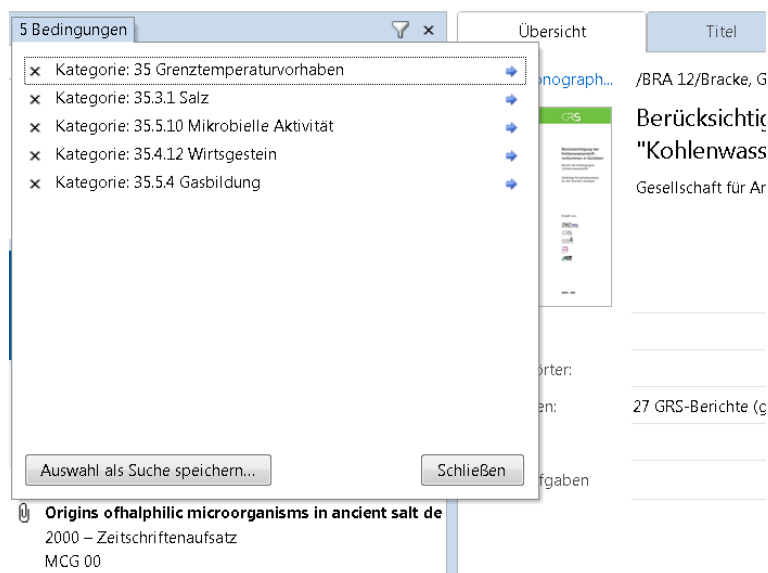


Abb. 3.6 Beispiel verknüpfter Filtereinstellungen zur Suche nach gasbildenden Prozessen infolge mikrobieller Aktivität im Wirtsgestein Salz

3.1.5 Export in gängige Literaturformate

Citavi bietet die Möglichkeit die bibliographischen Daten der Literaturdatenbank in gängige andere Formate für eine Literaturverwaltung zu exportieren. Die Literaturstellen können in unterschiedlichen Zitationsstilen dargestellt werden. Im Folgenden werden zwei Kurzanleitungen zu diesen beiden Funktionen beschrieben.

Zum Export der bibliographischen Daten in andere Literaturformate wird im Reiter „Datei“ die Option „Exportieren“ ausgewählt. Daraufhin kann unterschieden werden, ob die

vollständige Datenbank exportiert werden soll oder lediglich die aktuelle Auswahl. Die aktuelle Auswahl bezieht sich auf die gesetzten Filtereinstellungen. Daraufhin werden gängige bibliographische Formate wie EndNote, RIS und BibTeX als Option angeboten. Weitere online verfügbare bibliographische Formate können über die Funktion „Exportfilter hinzufügen“ ausgewählt werden (Abb. 3.7). Abschließend wird der Dateiname und -pfad eingegeben und die Literatureinträge werden exportiert. Beim Export werden die Metadaten exportiert, die in Citavi unter dem Reiter „Titel“ eingetragen sind. Weitere Funktionen, wie das Kategorien- und Wissenssystem, können beim Export (in Abhängigkeit vom gewählten bibliographischen Format) i. d. R. nicht mit exportiert werden. Informationen außerhalb der Metadaten gehen bei einem Export daher i. d. R. verloren.

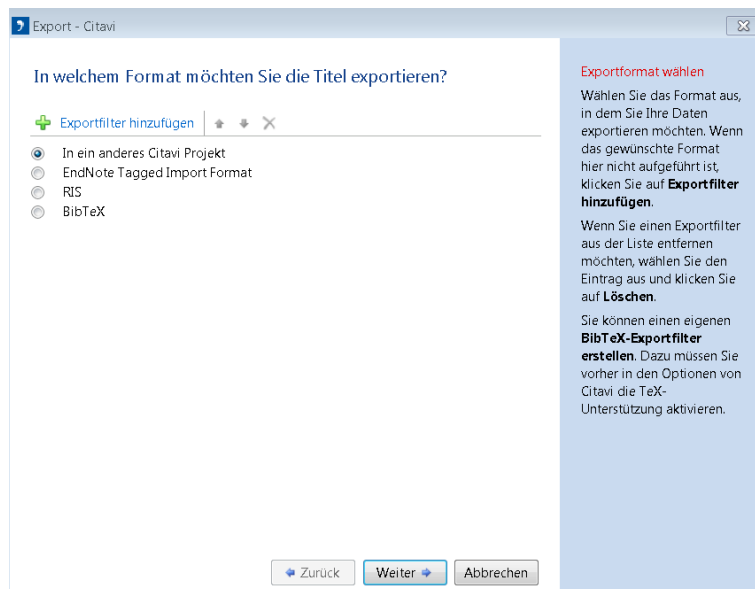


Abb. 3.7 Export der Citavi-Literatureinträge in andere bibliographische Formate

Die in der Datenbank verfügbare Literatur kann bei Zitaten in Berichten in unterschiedlichen Zitationsstilen dargestellt werden. Hierzu muss ein Zitationsstil ausgewählt oder neu erstellt werden, der aus den Metadaten die passenden Informationen dem Zitationsstil entsprechend formatiert und ausgibt. Zitationsstile können im Reiter „Zitation“ mit der Option „Zitationsstile“ ausgewählt werden. Zitationsstile können unter diesem Menüpunkt hinzugefügt werden. Hierzu greift Citavi auf online verfügbare Zitationsstile zu. Unter anderem können hier Zitationsstile für unterschiedliche Zeitschriften oder auch der Zitationsstil der GRS ausgewählt werden.

3.2 Herleitung und Gruppierung der Schlagwörter

Verständliche und nachvollziehbare Schlagwörter (synonym: Kategorien in Citavi, s. Kap. 3.1) sollen in Bezug auf eine Bewertungsmöglichkeit, welche wirtsgesteinsspezifischen Grenztemperaturen für die Abfallbehälter in einem Endlager festgelegt werden könnten, aussagekräftig und gleichzeitig auch abdeckend sein. Eine zu starke Detaillierung oder eine zu große Anzahl der Schlagwörter erschwert den Überblick und ist nicht mehr handhabbar. Daher wurde die Anzahl der Schlagwörter beschränkt. Eine thematische Gruppierung der Schlagwörter erwies sich im Verlauf der Bearbeitung als hilfreich und wird mittels Kategorien in Citavi hierarchisch abgebildet. Die Auswahl der Schlagwörter/Kategorien wird nachfolgend unter den jeweiligen gruppierenden Kategorien erläutert.

Die thematische Gruppierung der Schlagwörter in Citavi ermöglicht eine schnelle Übersicht der Literaturstellen. Die ausgewählten Schlagwörter sind in folgende Gruppierungen/Kategorien eingeordnet:

- Länder,
- Anforderungen,
- Wirtsgestein/Material,
- Komponenten,
- THMCB-Prozesse,
- Eigenschaften,
- Untersuchungsart,
- Offene Fragen.

Nachfolgend werden die Gruppierungen und die Schlagwörter erläutert.

3.2.1 Gruppierung „Länder“

Die thematische Gruppierung „Länder“ umfasst die verschiedenen Staaten, in denen entweder standortspezifische Untersuchungen dokumentiert sind oder für die thematische Untersuchungen landesspezifisch vorliegen. Sofern mehrere Literaturstellen für ein Land vorhanden sind, wurde der entsprechende Landesname als Schlagwort vergeben. Sind nur wenige oder nur eine einzige landesspezifische Literaturstelle vorhanden, wird das Schlagwort „sonstige Länder“ vergeben. Das Schlagwort „International (Allgemein)“

Rückholbarkeit bis zum Verschluss des Bergwerks (Ende der Betriebs- bzw. Nachbetriebsphase) gegeben sein muss. Nach Verschluss des Bergwerks wird von Bergbarkeit gesprochen. Im internationalen Verständnis gibt es davon Abweichungen.

Temperaturbedingungen (Auslegungstemperaturen), die sich aus der Auslegung des Endlagerkonzepts (Endlagerauslegung) ergeben und sowohl für die Betriebsphase als auch die Nachbetriebsphase und somit auch für die Rückholbarkeit gelten müssen, werden mit dem Schlagwort „**Auslegung**“ versehen.

Das Schlagwort „Arbeits-/**Betriebssicherheit**“ bezieht sich auf (Grenz-)Temperaturen zum Schutz von Menschen und Maschinen, die auch für betriebliche Tätigkeiten im Rückholungsbetrieb einzuhalten sind. Hierzu gehören zum Einen die Temperaturen, welche die betriebliche „**Handhabbarkeit**“ der Behälter und zum Anderen die Einhaltung der arbeitsschutzrechtlichen (klimatischen) Temperaturbedingungen untertage sicherstellen sollen. Aus der Einhaltung dieser Temperaturbedingungen ergeben sich Anforderungen an die Frischluftzufuhr, Abluftabfuhr und Kühlung des Grubengebäudes, die unter dem Schlagwort „**Bewetterung**“ aufgeführt werden.

Literatur, die sich mit der technischen Umsetzbarkeit von Konzepten für eine Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit befasst (Maschinen, Ausbau des Bergwerks, Bewetterung für die Herstellung notwendiger klimatischer Temperaturverhältnisse), wird unter dem Schlagwort „**Machbarkeitskonzept**“ geführt.

Literaturstellen, die sich mit der Instrumentierung und Überwachung des Endlagerbergwerks befassen und die benötigt werden, um die Temperaturentwicklung im Endlager zu beobachten, auch hinsichtlich der Rahmenbedingungen einer möglichen Rückholbarkeit der Abfälle, sind dem Schlagwort „**Monitoring**“ zugeordnet.

Die Literatur, die den Schlagworten „**Gesetz**“, „**Vorschrift**“ und „**Richtlinie**“ zugeordnet werden kann, ist derzeit dem Schlagwort „**Regelwerk**“ zugewiesen. Die weitere Unterverschlagwortung ist vorgesehen.

Trifft ein Bericht oder eine Literaturstelle Aussagen zur „**Rückholbarkeit/Bergbarkeit**“, wird dieser/diese grundsätzlich entsprechend verschlagwortet, auch wenn keine weiteren Angaben bzgl. Grenz- oder Auslegungstemperaturen enthalten sind. In Citavi wird das Schlagwort „**Rückholbarkeit/Bergbarkeit**“ als übergeordnetes gemeinsames

Schlagwort verwendet, wobei hier auf internationale Unterschiede im Verständnis der Abgrenzung von Rückholbarkeit und Bergbarkeit hinzuweisen ist (s. Abb. 3.8).

Wenn Berichte oder Literatur im Zusammenhang mit Rückholbarkeit oder Bergbarkeit konkret Bezug nehmen auf Komponenten wie z. B. „**Behälter**“, das „**Endlagerbergwerk**“ oder auch „**Wirtsgestein**“ (siehe Gruppierung „**Komponenten**“), wird das entsprechende Schlagwort der anderen Gruppierung/Kategorie zusätzlich zugewiesen.

3.2.3 Gruppierung „Wirtsgestein/Material“

Das Schlagwort „**Salz**“ wird sowohl Literatur zugeordnet, die sich mit Salzgestein als Wirtsgestein beschäftigt, als auch Literatur, die sich mit dem Material Salz oder Salzgestein und dessen Eigenschaften und darin ablaufenden Prozessen beschäftigt.

Analog wird das Schlagwort „**Ton**“ verwendet, wenn sich Literatur mit Ton oder Tongestein als Wirtsgestein beschäftigt oder auch mit dem Material Ton oder Tongestein und dessen Eigenschaften sowie darin ablaufenden Prozessen.

Das Schlagwort „**Kristallin**“ wird sowohl Literatur zugeordnet, die sich mit plutonischem Gestein als Wirtsgestein, das auch metamorph überprägt sein kann, als auch Literatur, die sich mit diesen Gesteinen und dessen Eigenschaften und darin ablaufenden Prozessen beschäftigt.

Das Schlagwort „**Bentonit**“ wird für Literatur vergeben, die sich mit dem Material Bentonit und dessen Eigenschaften und darin ablaufenden Prozessen im weitesten Sinne beschäftigt. Je nach Vorkommen oder Verwendung des Bentonits kann gleichzeitig eine Zuordnung zum Schlagwort „**Ton**“ erfolgen.

Das Schlagwort „**Salzgrus**“ wird für Literatur vergeben, die sich mit dem Material Salzgrus und dessen Eigenschaften und darin ablaufenden Prozessen im weitesten Sinne beschäftigt. Je nach Vorkommen oder Verwendung des Salzgrus kann gleichzeitig eine Zuordnung zum Schlagwort „**Salz**“ erfolgen.

Das Schlagwort „Sonstiges Material“ wird Literatur zugeordnet, die sich mit Eigenschaften und darin ablaufenden Prozessen von Materialien befasst, die nicht den vorangehenden Schlagworten zugeordnet werden kann, aber dennoch eine sicherheitstechnische Relevanz für die Zuordnung einer Grenz- bzw. Auslegungstemperatur an

Endlagerbehältern haben könnten. Sollten mehrere Literaturstellen eines bestimmten Materials einem aussagekräftigen Schlagwort zugeordnet werden können, so kann während der Bearbeitung ein neues Schlagwort vergeben werden.

3.2.4 Gruppierung „Komponenten“

Ein Endlagersystem umfasst mehrere Komponenten, deren sicherheitstechnische Eigenschaften einem Temperatureinfluss unterliegen und die für die Festlegung einer Grenztemperatur relevant sein können. Um eine möglichst hohe Kohärenz mit bisherigen Arbeiten zu erhalten, erfolgte die Auswahl der Schlagworte auf Basis des Kompartimenten- und Komponentenmodells (Abb. 3.9) aus dem Vorhaben VerSi (Vergleichende Sicherheitsanalysen) /FIS 17/, /FIS 10/. Betrachtet wurde dabei ein System gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten, bestehend aus technischen und natürlichen Barrieren, die innerhalb ineinander verschachtelter und abstrakt definierter Kompartimente liegen. Die Begriffsdefinitionen nach dem StandAG /STA 17/ erwiesen sich nicht als praktikabel.

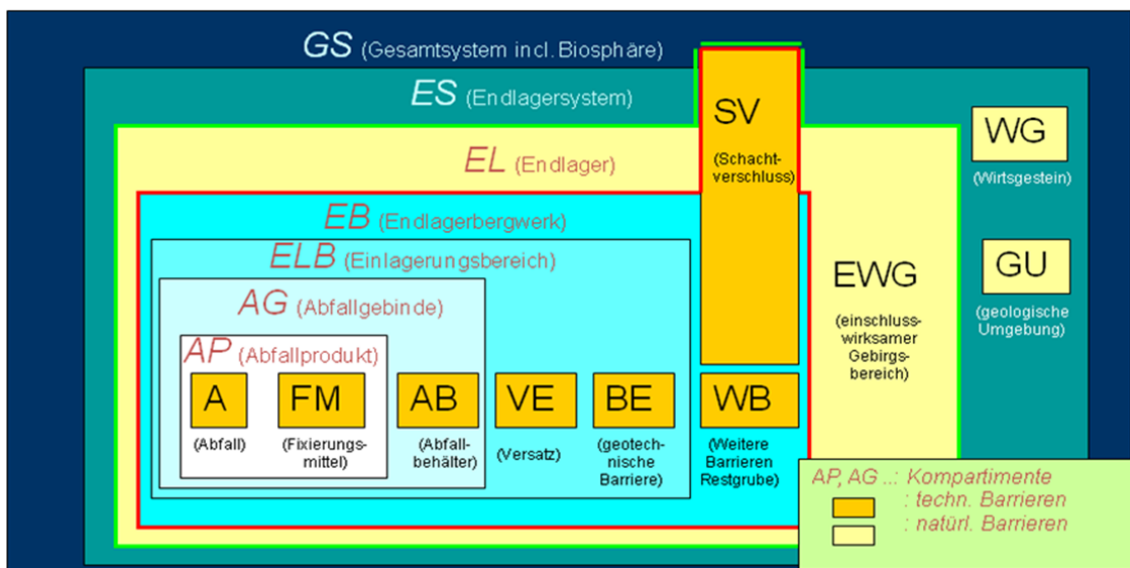


Abb. 3.9: Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems im Vorhaben VerSi I und II /FIS 17/, /FIS 10/

Das Schlagwort „**Wirtsgestein**“ erfasst die Komponente WG (Wirtsgestein). Die Kombination der Schlagwortvergabe aus „Wirtsgestein“ und der in der Gruppierung „Wirtsgestein/Material“ geführten Schlagworte „**Kristallin, Salz** und **Ton**“ erlaubt die Zuweisung von Literatur für gesteins- bzw. materialspezifische Eigenschaften.

Das Schlagwort „**Abfall**“ erfasst die Komponenten „Abfall“ mit „Fixierungsmittel“ sowie „Abfallprodukt“. Eine detaillierte Verschlagwortung zur Unterscheidung des derzeit nicht fixierten abgebrannten Brennstoffs sowie verglaster Abfälle erscheint zum aktuellen Bearbeitungszeitpunkt nicht erforderlich. Auch das Kompartiment „Abfallprodukt“ wird unter dem Schlagwort „Abfall“ erfasst, da mit Ausnahme der verglasten Abfälle keine weitere Konditionierung der hoch radioaktiven Abfälle erwartet wird.

Das Schlagwort „**Behälter**“ erfasst die Komponente „Abfallbehälter“ und das Kompartiment „Abfallgebinde“. Auch hier erschien eine detaillierte Unterscheidung nicht erforderlich, da der Aufpunkt zur Grenztemperaturfestlegung auf der Behälteroberfläche liegt, die gleichzeitig auch die Oberfläche des Abfallgebundes darstellt.

Das Schlagwort „**Biosphäre**“ bildet in diesem Verständnis das Kompartiment Gesamtsystem mit Biosphäre nach VerSi I und II ab und insoweit Auswirkungen von temperaturabhängige Eigenschaften, Prozessen und Wechselwirkungen auf die Biosphäre, die relevant für eine Festlegung einer Grenztemperatur werden könnten.

Das Schlagwort „**Buffer**“ steht für geotechnische Barrieren in Nahfeld (Kompartiment Einlagerungsbereich) der eingelagerten Abfälle. Dies sind in der Regel die Bentonitbuffer um die eingelagerten Behälter, jedoch werden auch andere Materialien damit erfasst (z. B. Materialgemische), die als Buffer wirken sollen.

Das Schlagwort „**Versatz/Verfüllung**“ wird für Literaturstellen verwendet, die Versatz oder Verfüllung von Bergwerken oder Bohrungen behandelt. Die nähere Spezifikation der Materialien erfolgt mit weiteren Schlagworten.

Das Schlagwort „**Endlager(-bergwerk)**“ ergibt sich aus der formalen Systematik als ein Schlagwort für die Kompartimente Endlager und Endlagerbergwerk, obwohl sicherheitstechnische Eigenschaften hinsichtlich temperaturrelevanter Prozesse nicht direkt einem Kompartiment zugeordnet werden.

Das Schlagwort „**Verschlüsse**“ umfasst Literatur über Verschlüsse in Bergwerken (Strecken oder Schächte) oder in Bohrlöchern. Damit werden die Komponenten Schachtverschluss, geotechnische Barrieren und ggfs. weitere Barrieren erfasst. Die nähere Spezifikation der Materialien erfolgt mit weiteren Schlagworten.

Das Schlagwort „**Einschlusswirksamer Gebirgsbereich**“ (ewG) erfasst die entsprechende Komponente nach VerSi. Es handelt sich um einen theoretisch zu definierenden, abgegrenzten Gebirgsbereich. Die nähere Spezifikation der Materialien erfolgt mit weiteren Schlagworten.

Das Schlagwort „**Geosphäre/Deckgebirge**“ berücksichtigt die das Endlager umgebende Geosphäre (i. W. das Deckgebirge), die mit dem Wirtsgestein den Schutz des ewG gegenüber mechanischen, hydraulischen oder geochemischen Einflüssen von außen durch integritätswahrende Sicherheitsfunktionen gewährleisten soll.

Mit dem Kompartimenten- und Komponentenmodell nach VerSi werden allerdings nicht alle Aspekte erfasst, die in der Literatur intensiv diskutiert werden.

Daher wurde zusätzlich das Schlagwort „**Lösungen**“ aufgenommen, da deren Eigenschaften und deren Transport temperaturabhängig sind. Lösungen sind in den Analysen für Sicherheitsuntersuchungen relevant. Ferner stellt die „**Verrohrung**“ von Bohrungen eine wichtige sicherheitstechnische Komponente für Endlagerkonzepte im Tonstein dar und wurde daher als Schlagwort aufgenommen.

3.2.5 Gruppierung „THMCB-Prozesse“

Die nachvollziehbare Ableitung der Schlagworte für Prozesse und Eigenschaften ist anspruchsvoll, da hier viele wechselseitige Zusammenhänge bestehen. Die Gruppierung „THMCB-Prozesse“ erfasst thermische (T), hydraulische (H), mechanische (M), chemische (C) und biologische (B) Prozesse, die eine Bedeutung für die Ableitung einer Grenztemperatur haben könnten. Um eine möglichst umfassende, überschaubare aber auch konsistente Ableitung der Schlagworte zu erhalten, wurden die Features, Events and Processes (FEP) der FEP Kataloge für die Wirtsgesteine Salz /WOL 12a/, /WOL 12b/, Ton /STA 16/ und Granit /SKB 10/ als Basis zugrunde gelegt. Diese Kataloge sind Weiterentwicklungen der NEA-FEP-Datenbasis /RWMC 14/, /NEA 00/.

Die gewählten Schlagworte der Gruppierung „THMCB-Prozesse“ werden nachfolgend kurz erläutert. Die Einzelzuordnung der Prozesse der jeweiligen FEP-Kataloge zu den Schlagworten kann dem Anhang 1 entnommen werden.

Tab. 3.1: Schlagworte für THCMB-Prozesse

	Schlagwort	Verständnis
1.	Abkühlung	Die FEP-Kataloge beinhalten den Prozess Abkühlung (Freezing) für Kristallin und die Bildung von (kryogenen) Rissen/Klüften im Salzgestein infolge einer Temperaturabnahme.
2.	Auflösung / Ausfällung	Diese beiden Prozesse sind in den FEP Katalogen für Salz und Ton für viele Materialien und Prozesse abdeckend genannt. Der FEP-Katalog für Kristallin führt zahlreiche Einzelprozesse auf, die mit Auflösungen und Ausfällungen verbunden sind.
3.	Expansion / Kontraktion	Dieses Schlagwort umfasst sowohl eine thermisch bedingte Expansion oder Kontraktion von Materialien aber auch das feuchtigkeitsbedingte Quellen oder Schrumpfen von Bentonit, wie auch Phasenübergänge mit Volumenänderungen.
4.	Gasbildung	Gasbildung ist als Prozess im FEP-Katalog für Salz und Kristallin aufgenommen, jedoch nicht für Ton. Das Schlagwort „Gasbildung“ ist in der Regel mit einem anderen Prozess kombiniert.
5.	Kanalisation	Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Fließwegen (Kanälen) in Strömungsrichtung verstanden, in denen sich ein strömendes Medium bevorzugt ausbreiten kann. Dies kann beispielsweise durch Auflösungen in Salzgrus und Dichtelementen auftreten, aber auch in anderen Materialien (Lochkorrosion bei Metallen, Ausspülen von Bentonit).
6.	Kolloidbildung	Der Temperatureinfluss auf die Bildung und Stabilität von Kolloiden scheint gering zu sein, wird jedoch als offene Frage angesehen /WOL 12b/. Prozesse mit Kolloiden sind in den FEP-Katalogen aller Wirtsgesteine aufgeführt.
7.	Kompaktion	Die FEP-Kataloge führen diesen Prozess nur für Salzgrus an, ist jedoch auch für andere Materialien denkbar.
8.	Korrosion	Der Begriff Korrosion wird nicht nur auf Metalle, sondern auch auf andere Materialien (z. B. Glas, Zement, Brennstoffmatrix) mit in unterschiedlicher Weise ablaufenden Prozessen bezogen und stellt somit einen Oberbegriff dar. Die weitere Differenzierung erfolgt in Verbindung mit anderen Schlagworten (Komponente, Material).
9.	Kriechen / Konvergenz	Kriechen und Konvergenz sind miteinander verbunden. Unter Konvergenz wird die Querschnittsverkleinerung von untertägigen Hohlräumen verstanden, die aufgrund von Spannungsumlagerungen nach der Auffahrung im umgebenden Gebirge unter Kriechen des Gesteins einsetzt. Das Kriechen ist temperaturabhängig und wird als eine sicherheitsrelevante Eigenschaft des Salzgesteins bewertet. Konvergenz tritt in allen Gesteinen auf.
10.	Mikrobielle Aktivität	Dieses Schlagwort umfasst die Gesamtheit der durch Mikroorganismen verursachten Prozesse im Endlager und Wirtsgestein. Die weitere Differenzierung erfolgt in Verbindung mit anderen Schlagworten (Komponente, Material, Prozesse).

	Schlagwort	Verständnis
11.	Mineralumwandlung	Dieses Schlagwort wurde aufgenommen, da viele Prozesse mit einer Mineralumwandlung verbunden sind. Die weitere Differenzierung erfolgt in Verbindung mit anderen Schlagworten (Komponente, Material, Prozesse). Das Schlagwort leitet sich nicht aus einem der FEP-Kataloge ab, sondern wurde als Oberbegriff wegen häufiger Verwendung aufgenommen.
12.	Osmose	Dieser sehr spezifische Prozess wurde nur im FEP-Katalog für kristalline Gesteine aufgeführt. Obwohl nur wenige Literaturstellen, die sich mit osmotischen Prozessen beschäftigen, zu erwarten sind, wurde dieses Schlagwort wegen der unbedingten Temperaturabhängigkeit aufgenommen.
13.	Perkolation	Dieser sehr spezifische Prozess beschreibt die druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein. Obwohl sich nur Literaturstellen für Salzgesteine mit Perkolation beschäftigen, wurde dieses Schlagwort wegen aktueller Diskussionen und laufender Arbeiten diesbezüglich aufgenommen.
14.	Quellen / Schrumpfen	Bei Wasseraufnahme quellen Bentonit und andere Materialien. Der gegenteilige Prozess ist Schrumpfen. Daher wurden die Begriffe Quellen/Schrumpfen gemeinsam als Schlagwort aufgenommen (siehe auch Expansion / Kontraktion).
15.	Radioaktivität / Strahlung	Die Radioaktivität bzw. die Strahlung hat mehrere Wirkungen. Während im FEP-Katalog für Salz- oder Tongestein keine FEP diesebezüglich aufgeführt sind, werden Strahlungswirkungen im FEP-Katalog für kristalline Gesteine mehrfach aufgeführt (z. B. Radiolyse von Wasser).
16.	Rissbildung	Rissbildung wird im FEP-Katalog für kristalline Gesteine aufgeführt. Im FEP-Katalog für Salzgestein wird (kryogene) Rissbildung in Verbindung mit dem Prozess Abkühlung angeführt.
17.	Schmelzen	Der FEP-Katalog für Salzgestein weist das Schmelzen des Salzgesteins als FEP aus. Auch das Schmelzen anderer Materialien wird in Kombination mit anderen Schlagwörtern unter diesem Aspekt verschlagwortet.
18.	Sorption	Alle FEP-Kataloge führen Sorption als FEP. Sorption wird als wichtiger Prozess zur Rückhaltung von Radionukliden angesehen (Gegenteil: Desorption). Sorption ist temperaturabhängig.
19.	Transport	Der Transport der Radionuklide ist der wichtigste Prozess, der in der Sicherheitsanalyse zu betrachten ist. Dazu zählen im Wesentlichen die Advektion (Lösung oder Gasphase) und Diffusion aber auch die Hebung oder Absenkung von Endlagerbehältern oder auch die Thermomigration und ein Wärmestrom (Energie). Das Schlagwort „Transport“ berücksichtigt mehrere FEP's.
20.	Verbindungs- bildung	Alle chemischen Prozesse beinhalten eine Verbindungsbildung bzw. eine Mineralumwandlung. Mehrere Prozesse, die in den FEP-Listen aufgeführt werden, werden durch dieses Schlagwort erfasst.
21.	Verformung	Die Verformung bzw. Verformbarkeit der Behälter wird im FEP-Katalog für kristallines Gestein als ein wichtiger Prozess angesehen.

3.2.6 Gruppierung „Eigenschaften“

Die Eigenschaften „**Wärmeleitfähigkeit**“ und „**Wärmekapazität**“ der Materialien sind wichtig für die Festlegung von Auslegungs- und Grenztemperaturen. Ebenso ist der „**Ausdehnungskoeffizient (thermisch)**“ von Bedeutung. Literatur, die sich mit der Bestimmung und Verwendung dieser Eigenschaften befasst, wird diesen Schlagworten zugeordnet.

Die „**Löslichkeit**“ von Substanzen ist temperaturabhängig und kann sowohl zu- wie auch abnehmen.

Auch „**(gebirgs-)mechanische Eigenschaften**“ sind temperaturabhängig und somit für Auslegungs- und Grenztemperaturen von Bedeutung.

„**Permeabilität**“ und „**Porosität**“ sind Eigenschaften der Materialien und Gesteine, die für Transportrechnungen in Langzeitsicherheitsanalysen relevant sind.

Die „**Temperatur**“ eines Materials bzw. eines Gesteins stellt eine Eigenschaft dar, die gesondert gewürdigt wird. Die Einordnung der jeweiligen Literatur erfolgt nach Temperaturbereichen ($<100\text{ °C}$, $100 < T < 200\text{ °C}$, $>200\text{ °C}$), die sich an bisher diskutierten Grenztemperaturen an Behälteroberflächen orientieren.

3.2.7 Gruppierung „Untersuchungsart“

„**Generische Studie**“ wird als Schlagwort zur Kennzeichnung der Literatur verwendet, die ohne einen konkreten Bezug hinsichtlich der Standorte (oder auch der Materialien) ist.

„**In-situ Untersuchung (Formation / UTL)**“ wird als Schlagwort verwendet, um standortbezogene Studien zu kennzeichnen, die in oder an geologischen Formationen oder in Untertage-Laboren erfolgten.

„**Laboruntersuchung**“ kennzeichnet als Schlagwort Studien, die vorwiegend experimentell eine Datengrundlage erstellen.

„**Modellierung**“ kennzeichnet als Schlagwort Studien, die unter Verwendung von Daten oder Annahmen rechentechnische Untersuchungen und Auswertungen vornehmen.

„**Review**“ sind Berichte, die die Ergebnisse mehrerer Studien zu einem Thema darstellen und gegebenenfalls bewerten.

3.2.8 Gruppierung „Offene Fragen“

„Offene Fragen (F&E-Bedarf)“ umfasst Studien, die im Zusammenhang mit der Ableitung von Grenztemperaturen, explizit offene Fragen dokumentieren.

3.3 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche und -beschaffung erfolgte im Internet oder wurde über gängige Bestellmethoden beschafft (Kauf, Fernleihe) soweit diese nicht bereits im Literaturfundus der GRS vorhanden war. Es wurden mit abnehmender Bedeutung verwendet:

- Vorhandene Kenntnisse/eigene Literaturdatenbank,
- Scencedirect.com,
- Homepages der Institutionen, Betreiber, Behörden,
- Literaturverweise,
- Google scholar,
- Konferenzproceedings,
- Pubmed,
- Scifinder (Chemical Abstracts),
- Citavi-Datenbanksuche (sofern Datenbank frei verfügbar),
- link.springer.com.

Der überwiegende Teil der Literatur konnte elektronisch erhalten werden. Soweit Literatur im Haus in Papierform vorhanden war, wurde diese digitalisiert und in die Datenbank übernommen.

4 Zusammenfassung

Der Aufbau einer Literaturdatenbank, die sich mit den Wirkungen des Wärmeeintrags der Abfallbehälter im Endlagerbergwerk auf THMCB-Prozesse und der Anforderung an die Rückholbarkeit/Bergbarkeit inkl. Handhabbarkeit der Abfallbehälter befasst, mit Verschlagwortung erfolgte mit Citavi. Diese fortzuschreibende Literaturdatenbank dient als Grundlage der weiteren Bearbeitung. Im Ergebnis soll möglich werden zu bewerten, welche wirtsgesteinsspezifischen Grenztemperaturen für die Abfallbehälter in einem Endlager festgelegt werden könnten.

Die Literaturdatenbank besteht zum derzeitigen Bearbeitungszeitpunkt aus ca. 400 Literaturstellen. Zur Suche wurden sowohl frei zugängliche Recherchemöglichkeiten (wie z. B. pubmed, sciencedirect, scholar.google.com, researchgate), als auch kostenpflichtige wie z. B. SciFinder eingesetzt. Zur Erstellung einer umfassenden und abdeckenden Literaturdatenbank wurde der bestehende Literaturfundus der GRS verwendet. Die Pflege der Datenbank inkl. der Recherchetätigkeiten wird während der Auswertung bis hin zur Erstellung des Abschlussberichtes des Vorhabens fortgeführt. Im vorliegenden Bericht wurden die maßgeblich genutzten Funktionen von Citavi beschrieben und deren Anwendung im Kontext des Vorhabens erläutert.

Die recherchierte Literatur wurde nach einer fachlich-wissenschaftlichen Sichtung mithilfe von hergeleiteten Schlagwörtern bzw. Kategorien gruppiert und in der Datenbank sortiert eingepflegt. Um eine möglichst aussagekräftige und nachvollziehbare Verschlagwortung zu ermöglichen, wurde ein Konzept zur Herleitung erarbeitet und im vorliegenden Bericht dokumentiert. Das Konzept orientierte sich an dem Vorhaben VerSi und an der Systematik der FEP-Kataloge für Salz-, Ton- und Kristallingesteine.

Die recherchierte Literatur wird mithilfe der erstellten Datenbank in Hinblick auf die zentralen Fragestellungen zur Konkretisierung einer möglichen Grenztemperatur für die potentiellen Wirtsgesteine in Deutschland ausgewertet werden. Hierzu gehören insbesondere die Temperaturabhängigkeit der für die Langzeitsicherheit eines Endlagers relevanten THMCB-Prozesse sowie Anforderungen an die Rückholbarkeit/Bergbarkeit sowie Handhabbarkeit der Abfallbehälter.

Literaturverzeichnis

- /BRÄ 16/ Bräuer, V., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., et al.: Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit, Beratung der Endlagerkommission, 9S2014010000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Material für die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 55, 62 S.: Hannover, März 2016.
- /BUR 16/ Burlaka, V., Jobmann, M., Meleshyn, A., Rübel, A.: Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Arbeitsbericht, TEC-13-2016-B, 85 S.: Peine, 4. Juli 2016.
- /CIT 17/ Swiss Academic Software GmbH: Citavi 5 Handbuch. Stand vom 3. Mai 2017, erreichbar unter <https://www.citavi.com/sub/manual5/de/index.html>, abgerufen am 17. August 2017.
- /ESK 16/ Entsorgungskommission (ESK): Stellungnahme der ESK - Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung. 61 S., 12. Mai 2016.
- /FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3536: Köln, 1. Dezember 2010.
- /FIS 16/ Fischer, B., Jäger, G.: Sondervotum zu dem Abwägungskriterium "Gute Temperaturverträglichkeit". In: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, S. 506: Berlin, August 2016.

- /FIS 17/ Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Faß, T., Larue, P.-J., Mayer, K.-M., Seher, H., Hartwig-Thurat, E.: Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-478, ISBN 978-3-946607-61-8: Köln, Oktober 2017.
- /HAR 17/ Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Ableitung von sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rückholbarkeit radioaktiver Abfälle aus betrieblicher Sicht, Anforderungen an aktuelle Endlagerkonzepte für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen, Bericht zum Arbeitspaket 2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-471 Anhang 8, 75 S.: Köln, August 2017.
- /HER 16/ Herold, P.: Rückholbarkeit - eine Herausforderung für die Entwicklung von Endlagerkonzepten. Präsentation, 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau: Essen, 25. Februar 2016.
- /JEN 02/ Jentzsch, G.: Temperaturverträglichkeit der Gesteine, Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten. Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 28 S.: Jena, 14. Juni 2002.
- /JOB 15/ Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A., Polster, M.: Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, 38 S.: Peine, 15. Dezember 2015.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /KUD 16/ Kudla, W.: Sondervotum zum "Temperaturkriterium". In: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht, Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines

nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, S. 506–508: Berlin, August 2016.

- /MEL 16/ Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H., Wieczorek, K.: Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, K-MAT 64, 172 S., DOI 10.13140/RG.2.1.1882.8406, Mai 2016.
- /NEA 00/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database. Radioactive Waste Management, 92 S., ISBN 92-64-18514-3, DOI 10.1787/9789264187511-en, OECD Publications: Paris, France, 2000.
- /NEA 11/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel, Final Report of the NEA R&R Project (2007-2011). Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2011)4, 76 S.: Paris, 2011.
- /REI 17/ Reichert, B.: Stellungnahme aus Sicht des ESK-Ausschusses "Endlagerung radioaktiver Abfälle" zur öffentlichen Anhörung des Umweltausschusses am 08.03.2017 zur Fortentwicklung des StandAG. Universität Bonn, Entsorgungskommission (ESK) - Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL), Ausschussdrucksache, 18(16)526-L, 3 S.: Berlin, 6. März 2017.
- /RÖH 17/ Röhlig, K.-J.: Stellungnahme anlässlich der öffentlichen Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Hrsg.: Deutscher Bundestag (BT), Technische Universität Clausthal-Zellerfeld, Ausschussdrucksache, 18(16)526-H, 8 S.: Berlin, 1. März 2017.
- /RWMC 14/Radioactive Waste Management Committee (RWMC): Updating the NEA International FEP List, An Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note Technical Note 1: Identification and Review of Recent

Project-specific FEP Lists 25 September 2012. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), NEA/RWM/R(2013)7, 29. Januar 2014.

- /SKB 10/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): FEP report for the safety assessment SR-Site. SKB Technical Report, TR-10-45, 270 S., ISBN 1404-0344: Stockholm, Schweden, 2010.
- /STA 16/ Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mru-galla, S., Reinhold, K., Rübél, A.: FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD, Konzept und Aufbau, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-16-2016-TB, 47 S.: Peine, 30. März 2016.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch-radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).
- /WAT 17/ Watzel, R.: Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Umweltausschusses am 08.03.2017 zur Fortentwicklung des StandAG. Hrsg.: Deutscher Bundestag (BT), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ausschussdrucksache, 18(16)526-G, 2 S.: Berlin, 1. März 2017.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., et al.: FEP-Katalog für die VSG, Konzept und Aufbau, Berichte zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-282, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., et al.: FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 864 S., 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Neuen Titel (Literaturstelle) in Citavi hinzufügen.....	8
Abb. 3.2	Darstellung der Filterfunktion für Dokumententypen	9
Abb. 3.3	Anwendung der Filterfunktion für Wissens Elemente	11
Abb. 3.4	Darstellung der Kategorien nach Kap. 3.2 in Citavi	12
Abb. 3.5	Darstellung der Gruppen in Citavi	13
Abb. 3.6	Beispiel verknüpfter Filtereinstellungen zur Suche nach gasbildenden Prozessen infolge mikrobieller Aktivität im Wirtsgestein Salz.....	14
Abb. 3.7	Export der Citavi-Literatureinträge in andere bibliographische Formate	15
Abb. 3.8:	Abgrenzung der Begriffe Rückholbarkeit und Bergbarkeit /HAR 17/, verändert nach /NEA 11/, /HER 16/	17
Abb. 3.9:	Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems im Vorhaben VerSi I und II /FIS 17/, /FIS 10/.....	20

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Schlagworte für THCMCB-Prozesse	23
-----------	---------------------------------------	----

Abkürzungsverzeichnis

ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events and Processes
THMC	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische
THMCB	thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemische-biologische
W&T	Wissenschaft und Technik

Anhang 1 FEP-Listen und Zuordnung der Schlagworte für Prozesse

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
Korrosion	Korrosion der Brennstoffmatrix (2.1.09.04)	Korrosion der Brennstoffmatrix	<i>Copper corrosion</i> <i>Kupferkorrosion</i>
Korrosion	Korrosion von Glas (2.1.09.05)	Alteration von Glas	<i>Copper deformation from internal corrosion products</i> <i>Kupferverformung durch interne Korrosionsprodukte</i>
Korrosion	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen (2.1.09.06)	Korrosion von Zementphasen	<i>Corrosion of cast iron insert</i> <i>Korrosion des Gusseiseneinsatzes</i>
Korrosion	Metallkorrosion (2.1.09.03)	Metallkorrosion	<i>Corrosion of copper canister</i> <i>Korrosion des Kupferbehälters</i>
Korrosion	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (2.1.09.07)	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	<i>Corrosion of steel components</i> <i>Korrosion von Stahlbestandteilen</i>
Korrosion	Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)	Metallversprödung durch Strahlung	<i>Earth currents – stray current corrosion</i> <i>Erdströme - Streustromkorrosion</i>
Korrosion			<i>Galvanic corrosion</i> <i>Galvanische Korrosion</i>
Korrosion			<i>Metal corrosion</i> <i>Metallkorrosion</i>
Korrosion			<i>Steel corrosion</i> <i>Korrosion von Stahl</i>
Korrosion			<i>Stress corrosion cracking of cast iron insert</i> <i>Stresskorrosion des Gusseiseneinsatzes</i>
Korrosion			<i>Stress corrosion cracking of the copper canister</i> <i>Stresskorrosion des Kupferbehälters</i>
Korrosion			<i>Iron-bentonite interaction</i> <i>Reaktion von Eisen und Bentonit</i>
Auflösung / Ausfällung	Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)	Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen	<i>Alteration of central area backfill</i> <i>Veränderung der Verfüllung</i>
Auflösung / Ausfällung		Auflösung, Transformation und Neubildung von sonstigen Mineralen	<i>Alteration of concrete</i> <i>Veränderung des Betons</i>
Auflösung / Ausfällung			<i>Alteration of concrete components</i> <i>Veränderung der Betonbestandteile</i>
Auflösung / Ausfällung			<i>Alterations of backfill impurities</i> <i>Veränderungen von Verunreinigungen</i>
Auflösung / Ausfällung			<i>Alterations of impurities</i> <i>Veränderungen von Verunreinigungen</i>
Auflösung / Ausfällung			<i>Alterations of impurities in bentonite</i> <i>Veränderung der Verunreinigungen im Bentonit</i>

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
Auflösung / Ausfällung			<i>Montmorillonite colloid release</i> Freisetzung von Kolloiden aus Montmorillonit
Auflösung / Ausfällung			<i>Montmorillonite transformation</i> Transformation von Montmorillonit
Auflösung / Ausfällung			<i>Liquefaction</i> Verflüssigung
Auflösung / Ausfällung			<i>Deposition of salts on canister surface</i> Salzablagerungen
Auflösung / Ausfällung			<i>Chemical alteration of the fuel matrix</i> Veränderung der Brennstoffmatrix
Auflösung / Ausfällung			<i>Fuel dissolution</i> Brennstoffauflösung
Auflösung / Ausfällung			<i>Reactions groundwater/rock matrix</i> Wasser-Gesteins-Wechselwirkung
Auflösung / Ausfällung			<i>Dissolution of gap inventory</i> Auflösung des Inventars im Spalt
Auflösung / Ausfällung			<i>Dissolution/precipitation of fracture-filling minerals</i> Auflösung / Ausfällung von Kluffmineralen
Auflösung / Ausfällung			<i>Cementation</i> Zementation
Auflösung / Ausfällung			<i>Degradation of grout</i> Zementzersetzung
Auflösung / Ausfällung			<i>Formation/dissolution/reaction of gaseous species</i> Bildung / Auflösung/Reaktionen gasförmiger Spezies
Auflösung / Ausfällung	Zersetzung von Organika (2.1.10.01)	Chemische Alteration von Organika	
Mikrobielle Aktivität	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock	Mikrobielle Prozesse	<i>Microbial processes</i> Mikrobielle Prozesse
Quellen / Schrumpfen	Quellen des Bentonits (2.1.08.08)	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	<i>Swelling/mass redistribution</i> Quellen / Materialverlagerung
Kriechen/Konvergenz	Konvergenz (2.1.07.01)	Konvergenz	<i>Creep</i> Kriechen
Kompaktion	Salzgruskompaktion (2.1.07.03)		
Expansion/Kontraktion	Thermische Expansion oder Kontraktion (2.1.11.02)	Thermische Expansion oder Kontraktion	<i>Thermal expansion (both cast iron insert and copper canister)</i> thermische Ausdehnung des Eisen- u. Kupferbehälters
Expansion/Kontraktion		Quellen und Schrumpfen von Beton	
-		Phasenübergänge	
-	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)	Spannungsfortpflanzung	

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
-		Dispersion	
-		Lösen und Ausgasen	
-		Migration von Bitumen	
Radioaktivität/Strahlung		Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung	<i>Radiation effects</i> <i>Strahlungswirkung</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radiation effects (rock and grout)</i> <i>Strahlungswirkungen (Gestein, Beton)</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radiation-induced transformations</i> <i>Strahlungsinduzierte Veränderungen</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radiation-induced transformations</i> <i>Strahlungsinduzierte Veränderungen</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radioactive decay</i> <i>Radioaktiver Zerfall</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radiolysis of porewater</i> <i>Radiolyse von Porenwasser</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Water radiolysis</i> <i>Wasseradiolyse</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Radiation attenuation/ heat generation</i> <i>Strahlungsabschirmung / Wärmeentwicklung</i>
Radioaktivität/Strahlung			<i>Residual gas radiolysis/ acid formation</i> <i>Gasradiolyse, Säurebildung</i>
-	Zündfähige Gasgemische (2.1.12.04)	Zündung von Gasgemischen	
Sorption	Sorption und Desorption (3.2.03.01)	Sorption und Desorption	<i>Sorption</i> <i>Sorption</i>
Sorption			<i>Sorption (including exchange of major ions)</i> <i>Sorption</i>
Sorption			<i>Speciation and sorption</i> <i>Speziation und Sorption</i>
Verbindungsbildung			<i>Speciation of radionuclides</i> <i>Radionuklidspeziation</i>
Verbindungsbildung			<i>Speciation of radionuclides, colloid formation</i> <i>Radionuklidspeziation, Kolloidbildung</i>
Verbindungsbildung			<i>Aqueous speciation and reactions</i> <i>Speziation in Lösung und Reaktionen</i>
Verbindungsbildung (auch Gasbildung)	Thermochemische Sulfatreduktion (2.2.10.05)	Thermochemische Sulfatreduktion	
Verbindungsbildung	Komplexbildung (3.2.05.01)	Komplexbildung	

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
Verbindungsbildung (auch Auflösung / Ausfällung)	Thermische Carnallitersetzung (2.2.10.03)		
Verbindungsbildung			<i>Methane hydrate formation</i>
Kolloidbildung	Kolloide (3.2.04.01)	Kolloidbildung und -filtration	<i>Colloid formation and transport</i>
Kolloidbildung			<i>Colloid release</i>
Kolloidbildung			<i>Colloid transport</i>
Kolloidbildung			<i>Colloidal processes</i>
Kolloidbildung			<i>Backfill colloid release</i>
Gasbildung	Gasbildung (2.1.12.01)		<i>Formation/dissolution/reaction of gaseous species</i>
Gasbildung			<i>Helium production</i>
Gasbildung	Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)		
-	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.04)		
Kanalisation	Kanalisation im Salzgrus (2.1.08.04)		
Kanalisation	Kanalisation in Dichtelementen (2.1.08.05)		<i>Piping/erosion</i>
Schmelzen	Schmelzen des Salzgesteins (2.2.10.04)		
Perkolation	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein		
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Strömungsvorgänge im Grubengebäude (2.1.08.07)	Strömungsvorgänge	
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase (3.2.07.01)		<i>Transport of radionuclides by a gas phase</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Advektion (3.2.07.02)		<i>Transport of radionuclides in the gas phase</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Matrixdiffusion (3.2.07.05)		<i>Transport of radionuclides in the water phase</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Sonstige Transportprozesse (3.2.07.06)		<i>Water and gas transport in canister cavity, boiling/condensation</i>
			<i>Methanhydratbildung</i>
			<i>Kolloidbildung u. -transport</i>
			<i>Freisetzung von Kolloiden</i>
			<i>Kolloidtransport</i>
			<i>Kolloidprozesse</i>
			<i>Freisetzung von Kolloiden</i>
			<i>Bildung/Auflösung/Reaktionen gasförmiger Spezies</i>
			<i>Heliumbildung</i>
			<i>Kanalisation / Erosion</i>
			<i>Radionuklidtransport in der Gasphase</i>
			<i>Radionuklidtransport in der Gasphase</i>
			<i>Radionuklidtransport in Lösung</i>
			<i>Wasser u. Gastransport, Verdampfen, Kondensation</i>

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern (3.2.08.01)		<i>Water transport for saturated conditions</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Radionuklidtransport in der Gasphase (3.2.09.01)		<i>Water uptake and transport for unsaturated conditions</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Wärmeproduktion (2.1.11.01)	Wärmestrom	<i>Heat transport</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Thermomigration (2.2.10.02)		<i>Advection and diffusion</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Advective transport of species</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Advective transport/mixing of dissolved species</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Diffusion (3.2.07.04)	Diffusion	<i>Diffusive transport of dissolved species in fractures and rock matrix</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Diffusive transport of species</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)	Radionuklidmobilisierung (3.2.01.01)		<i>Radionuclide transport</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Gas transport/dissolution</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Groundwater flow</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Gas flow/dissolution</i>
Transport (incl. Advektion, Diffusion)			<i>Displacements in intact rock</i>
Rissbildung			<i>Fracturing</i>
-			<i>Reactivation – Displacement along existing discontinuities</i>
Verformung			<i>Deformation of cast iron insert</i>
Verformung			<i>Deformation of copper canister from external pressure</i>
Kanalisierung			<i>Erosion/sedimentation in fractures</i>
Abkühlung		Bildung kryogener Klüfte (1.3.04.02)	<i>Freezing</i>

Schlagwort	FEP Salz (incl. Nr. nach NEA) /WOL 12a/	FEP Ton /STA 16/	FEP Kristallin /SKB 10/
-			<i>Induced fission (criticality)</i> <i>Kritikalität</i>
-			<i>Mechanical cladding failure</i> <i>mechanisches Hüllrohrversagen</i>
Osmose			<i>Osmosis</i> <i>Osmose</i>
-			<i>Salt exclusion</i>
-			<i>Structural evolution of fuel matrix</i> <i>Abfallmatrix</i>
-			<i>Surface weathering and erosion</i> <i>Verwitterung und Erosion</i>

Verteiler zum Abschlussbericht des Vorhabens 4715E03230

GRS-A-Bericht 3948

Berichtstitel:

Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern

Druckexemplare:

Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)

Fachgebiet FA 2

Dr. Ute Maurer-Rurack

2 x

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Projektleiter / Autor (BGU)

1 x

Bibliothek (LAN)

1 x

Gesamt

4 x

PDF-Version:

Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)

Fachgebiet FA 2

Dr. Ute Maurer-Rurack (ute.maurer-rurack@bfe.bund.de)

1 x

Dr. Axel Liebscher (axel.liebscher@bfe.bund.de)

1 x

Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)

Fachgebiet FA 1 (FA1@bfe.bund.de)

1 x

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Geschäftsführer (STJ, SUW)

2 x

Bereichsleiter (KSE, FIL)

2 x

Abteilungsleiter (FAP)

1 x

Projektleiter / Autoren (BGU, WET, LAR, MEA, THV)

8 x

Projektcontrolling (HNC)

1 x

TECDO (WEV)

1 x

Gesamt

18 x

Kontakt:
Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
Krausenstraße 17-18
10117 Berlin
Telefon: + 49 3018 767676 5000
E-Mail: info@bfe.bund.de
Internet: www.bfe.bund.de
Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier



Bundesamt für
kerntechnische
Entsorgungssicherheit