

Bewertung der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur unter Vorsorgeaspekten -Rev. 02

BMUB-Vorhaben UM16E03210

Darmstadt,
31.10.2016

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

Autorinnen und Autoren

Dipl.-Geol. Stefan Alt
Dipl.-Ing. Beate Kallenbach-Herbert
Dr.-Ing. Veronika Ustohalova

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1. Einleitung	9
2. Stand von Wissenschaft und Technik zu den Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf verschiedene Wirtsgesteine und Buffermaterialien	11
2.1. Einleitung	11
2.2. Faktoren mit Einfluss auf die Oberflächentemperatur des Behälters	11
2.2.1. Überblick	11
2.2.2. Zerfallswärme der einzulagernden Abfälle	12
2.2.3. Endlagerbehälter und Behälterbeladung	14
2.2.4. Einfluss der Temperaturverteilung auf den Flächenbedarf des Endlagers	14
2.3. Wirtsgesteinstyp Steinsalz	15
2.3.1. Überblick zur Endlagerung in Steinsalz	15
2.3.2. Relevante Materialeigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial	17
2.3.3. Relevante Materialeigenschaften Steinsalz	18
2.3.4. Thermisch induzierte Prozesse im Salzgestein	20
2.3.4.1. Verhalten von Wirtsgestein und Verfüllmaterial	20
2.3.4.2. Bildung und Verhalten von Fluiden	25
2.3.4.3. Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse	27
2.3.5. Überlagerung und gegenseitige Beeinflussung der Temperaturfelder	27
2.4. Wirtsgesteinstyp Tonstein	29
2.4.1. Überblick zur Endlagerung im Tonstein	29
2.4.2. Relevante Materialeigenschaften von Tonstein und Bentonit	30
2.4.3. Thermisch induzierte Prozesse im Tongestein	33
2.4.3.1. Verhalten von Wirtsgestein und Buffer	33
2.4.3.2. Bildung und Verhalten von Fluiden	35
2.4.3.3. Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse	36
2.4.4. Bestehende Festlegungen / Empfehlungen für Grenztemperaturen bei der Lagerung in Tonstein	37
2.4.4.1. Schweiz	37
2.4.4.2. Deutschland	39
2.4.4.3. Frankreich	40

2.5.	Wirtsgesteinstyp Kristallin	42
2.5.1.	Überblick zur Endlagerung im Kristallin	42
2.5.2.	Relevante Materialeigenschaften kristalliner Gesteine	42
2.5.3.	Thermisch induzierte Prozesse im kristallinen Gestein	44
2.5.3.1.	Verhalten von Wirtsgestein und Buffer	44
2.5.3.2.	Bildung und Verhalten von Fluiden	47
2.5.3.3.	Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse	48
2.5.4.	Bestehende Festlegungen / Empfehlungen für Grenztemperaturen bei der Lagerung in Kristallingestein	48
2.6.	Synopse: Wirtsgesteinsspezifisch relevante thermisch induzierte Prozesse	50
3.	Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Endlagerung und das Standortauswahlverfahren	51
3.1.	Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Betriebssicherheit	51
3.2.	Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Langzeitsicherheit	51
3.3.	Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit von Endlagergebänden	53
3.4.	Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Prüfung der Temperaturverträglichkeit im Standortauswahlverfahren	55
3.5.	Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Entwicklung des Endlagerkonzepts und die Systematik des Auswahlverfahrens	56
4.	Zusammenfassende Bewertung der Vorsorgeorientierung einer Grenztemperatur von 100°C und Einfluss auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen	59
4.1.	Bewertung der Vorsorgeorientierung	59
4.2.	Einfluss bestehenden Forschungsbedarfs auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen	63
	Literaturverzeichnis	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Entwicklung der Zerfallswärme eines UO_2 - bzw. MOX-Brennelements für DWR-Brennelemente in Abhängigkeit vom Abbrand und der Abkühlzeit	13
Abbildung 2-2:	Zerfallswärme bezogen auf das bis Ende 2022 insgesamt akkumulierte Inventar abgebrannter Brennelemente in Deutschland, Zeitskala ab 2023	13
Abbildung 2-3:	Konzept der Strecken- oder Bohrlochlagerung im Salzgestein	17
Abbildung 2-4:	Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur	18
Abbildung 2-5:	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Steinsalzproben	19
Abbildung 2-6:	Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient von Salzgestein in Abhängigkeit der Temperatur	20
Abbildung 2-7:	Temperaturabhängigkeit der Kriechrate von Steinsalz	21
Abbildung 2-8:	Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase	22
Abbildung 2-9:	Vergleich von Porositäts-Zeitverläufen mit Salzgrus versetzter Strecken bei unterschiedlichen Randbedingungen	24
Abbildung 2-10:	Temperaturbedingte Volumenänderung von gesättigter NaCl-Lösung (in %, bezogen auf das Volumen bei 40°C)	26
Abbildung 2-11:	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Behälter in Abhängigkeit von Behälterstandort und Abfalltyp	28
Abbildung 2-12:	Zeitlicher Verlauf der Temperatur in einem Einlagerungsfeld mit DWR Brennelementen in Abhängigkeit von Behälterposition und Entfernung von der Behälteroberfläche	29
Abbildung 2-13:	Schematische Darstellung des Endlagerkonzepts im Opalinuston aus dem Entsorgungsnachweis der Nagra	30
Abbildung 2-14:	Kopplung zwischen Gesteinsstruktur, Deformationsverhalten und Stofftransporteigenschaften im Schweizer Opalinuston	31
Abbildung 2-15:	Temperaturverlauf im Nahfeld eines Endlagergebindes für das Endlagerkonzept im Opalinuston gemäß (NAGRA 2002b)	39
Abbildung 2-16:	Wärmeleistung französischer Abfallgebände mit verglasten Abfällen nach Abfalltyp und Alter der Gebinde	41
Abbildung 2-17:	Das KBS-3 Konzept für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Granit gemäß (SKB 2011-1)	42
Abbildung 2-18:	Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit metamorpher und plutonischer Gesteine und ihren Anteilen gesteinsbildender Minerale (Clauser & Huenges 1995)	43
Abbildung 2-19:	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Kristallinproben in Abhängigkeit von der Temperatur	44
Abbildung 2-20:	Temperaturverlauf im Buffer und am Bohrlochrand für das KBS-3 Endlagerkonzept im schwedischen Forsmark	45
Abbildung 2-21:	Sicherheitsfunktionen des Buffers im KBS-3 Konzept nach (SKB 2009)	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Flächenbedarf eines Endlagers in Abhängigkeit von Grenztemperatur und Wirtsgesteinstyp	15
Tabelle 2-2:	Bandbreiten der Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Tonsteinarten	31

Zusammenfassung

Die Endlagerkommission hat im Zusammenhang mit dem Abwägungskriterium „Gute Temperaturverträglichkeit“ empfohlen, aus Vorsorgegründen in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zunächst von einer Grenztemperatur an der Oberfläche des endgelagerten Abfallgebindes für hoch radioaktive Abfälle von 100°C auszugehen, bis auf der Basis von Forschungsarbeiten maximal mögliche Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen festgelegt und daraus spezifische Grenztemperaturen abgeleitet werden können.

Zur Unterstützung des BMUB in Vorbereitung auf eine Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen im Hinblick auf Anforderungen zur Einhaltung der zulässigen Temperaturen hat das Öko-Institut die wissenschaftlichen Grundlagen der Einführung einer wirtsgesteinsunabhängigen Grenztemperatur für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und Kristallin aufbereitet und bewertet. Hierauf aufbauend wurden Betrachtungen angestellt zur Bedeutung einer Grenztemperatur für die betriebliche Sicherheit, die Langzeitsicherheit und die Rückholbarkeit/Bergbarkeit der Abfälle. Außerdem wurden die Anwendung auf das Standortauswahlverfahren hinsichtlich der Prüfung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ und des Flächenbedarfs betrachtet. In der Zusammenfassenden Bewertung nehmen wir Stellung zu den Fragen, ob die empfohlene Grenztemperatur als vorsorgeorientiert zu bezeichnen ist und ob die Abarbeitung von Forschungsfragen Auswirkungen auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen hat.

Für die Bewertung der Vorsorgeorientierung wird auf die Definition des Vorsorgeprinzips der Europäischen Kommission zurückgegriffen, die die Einführung von Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen für gerechtfertigt hält, wenn *wegen wissenschaftlicher Unsicherheiten keine umfassende Risikobewertung möglich ist*. Sobald neue wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, sind die getroffenen Maßnahmen zu prüfen und ggf. zu revidieren.

Unter diesen Randbedingungen lässt sich als Ergebnis feststellen, dass die von der Endlagerkommission vorgeschlagene wirtsgesteinsunabhängige Grenztemperatur von 100°C als Randbedingung für die Auslegung der Endlagerkonzepte in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens in Bezug auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit als vorsorgeorientiert zu bezeichnen ist.

Darüber hinaus ist für Endlagerkonzepte in Tonstein und Kristallin im Hinblick auf den Schutz des Bentonitbuffers eine Grenztemperatur von 100°C auch hinsichtlich der Langzeitsicherheit als vorsorgeorientiert einzustufen.

Im Übrigen ergibt sich aus den durchgeführten Betrachtungen keine Notwendigkeit, diese Grenztemperatur aus Vorsorgegründen einzuführen. Es ist jedoch aufgrund ihrer zeitlichen Begrenzung auf die Phase 1 des Standortauswahlverfahrens kein eindeutig negativer Einfluss zu berücksichtigen, der der vorübergehenden Anwendung entgegensteht.

Eine Anpassung der Grenztemperatur im Verfahren setzt gemäß den Empfehlungen der Kommission weitere Forschungsarbeiten voraus, die eine zuverlässige Festlegung der maximal physikalisch möglichen Temperatur wirtsgesteinspezifisch begründen. Als ein zentrales generisches Forschungsthema kann der Einfluss der Temperatur auf Konzepte zur Rückholbarkeit angesehen werden. Um nach Abschluss der Phase 1 eine wirtsgesteins- und standortspezifische Anpassung der Grenztemperatur vornehmen zu können, müssten die bisher vorliegenden Ausführungen zur Rückholbarkeit im Hinblick auf die Betrachtungen zum Temperatureinfluss noch deutlich weiterentwickelt werden.

Neben dem generischen Forschungsbedarf trägt der im Standortauswahlverfahren zunehmende Kenntnisstand der standortbezogenen Verhältnisse dazu bei, dass die mit einem vorsorgeorientierten Ansatz potenziell verbundenen „Überkonservativitäten“ im Auswahlverfahren reduziert werden können, ohne dass sich dadurch Einschränkungen in der Sicherheit ergeben.

Die in (GRS 2016) und (ESK 2016b) formulierten Forschungsfragen sind für eine thermische Optimierung von Endlagerkonzepten in den verschiedenen Wirtsgesteinen bzw. an konkreten Untersuchungsstandorten sinnvoll. Durch die Kopplung an den Forschungsstand wird der in den Empfehlungen der Endlagerkommission vorgeschlagenen Grenztemperatur eine Dynamik zugewiesen, die im fortgeschrittenen Standortauswahlverfahren – im Falle entsprechender Forschungsergebnisse – eine flexible, wirtsgesteins- und standortspezifische Anpassung ermöglicht. Da es sich bei der Grenztemperatur um eine Empfehlung für ein vorübergehend zu berücksichtigendes Auslegungsmerkmal handelt und nicht um ein Kriterium für das Standortauswahlverfahren oder eine Sicherheitsanforderung für Endlager, steht eine dynamische Anpassung auch nicht im Widerspruch zur Festlegung einheitlicher Bewertungskriterien für alle Phasen des Auswahlverfahrens.

Die Abarbeitung der Forschungsfragen zum Temperatureinfluss, die in (GRS 2016) und (ESK 2016b) thematisiert werden, stellt keine Voraussetzung für die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen dar.

1. Einleitung

Mit Beginn des Standortauswahlprozesses für die Bestimmung eines Endlagerstandorts mit der bestmöglichen Sicherheit hat das BMUB u.a. die Aufgabe, die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) fortzuschreiben und an die Bedürfnisse des Gesamtprozesses anzupassen.

Bezüglich des Einflusses der mit den Abfällen eingebrachten Wärmeleistung enthalten die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) derzeit in Abschnitt 7.2.1 im Hinblick auf die Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die Anforderung, dass die *„Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [durch die Temperaturentwicklung] nicht unzulässig beeinflusst werden [darf]“* sowie in Abschnitt 7.9 die Anforderung dass im Sicherheitsnachweis der Einfluss der Wärmeleistung auf die Mobilisierung grundwasser- oder bodenrelevanter Stoffe und die Veränderung von Grundwasserströmen zu untersuchen ist.

Die Kommission "Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" des Deutschen Bundestags (Endlagerkommission) empfiehlt in ihrem Abschlussbericht (Kommission 2016) für das kommende Standortauswahlverfahren im Zusammenhang mit der Erfüllung eines geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums „Gute Temperaturverträglichkeit“¹ u.a., dass *„das Wirtsgestein und insbesondere der ewG²“* so beschaffen sein sollen, *„dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten führen.“*

„Gute Temperaturverträglichkeit“ beschreibt also zunächst eine Eigenschaft eines Wirtsgesteinsvorkommens an einem bestimmten Ort: je unempfindlicher das Wirtsgestein im ewG auf einen Temperatureintrag reagiert, desto positiver ist die Temperaturverträglichkeit zu bewerten.

Um sicherzustellen, dass Wirtsgestein und Buffer keine unerwünschten temperaturbedingten Änderungen erfahren, empfiehlt die Kommission, zunächst die für Wirtsgestein und Buffer *physikalisch maximal mögliche* Temperatur zu ermitteln von der, unter Berücksichtigung einer Sicherheitsmarge, eine *zulässige maximale Temperatur* abgeleitet wird. Diese Fragen sollten bis zum Ende der Phase 1 durch Forschungsarbeiten geklärt werden. Bis entsprechende Ergebnisse vorliegen, empfiehlt die Kommission *„aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter von 100 Grad Celsius auszugehen, solange nicht die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen auf Grund von Forschungsarbeiten zuverlässig festgelegt worden sind.“*

Unter dem Terminus „Grenztemperatur“ versteht die Endlagerkommission die sich im verschlossenen Endlager an der Außenfläche des Endlagerbehälters maximal einstellende Temperatur. Die Empfehlung einer Grenztemperatur an der Außenfläche der Behälter stellt nicht das Kriterium der guten Temperaturverträglichkeit dar. Sie ist vielmehr eine von der Endlagerkommission vorläufig für die Phase 1 empfohlene Anforderung an die Auslegung der generischen Endlagerkonzepte zu Verfahrensbeginn.

Zur Unterstützung des BMUB in Vorbereitung auf eine Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen im Hinblick auf *„Bestimmungen zur Einhaltung der zulässigen*

¹ Kommission 2016, siehe dort S. 325 ff, „Anforderung 8“

² einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Temperaturen³“ erhielt das Öko-Institut den Auftrag, *die vorteilhaften und nachteiligen temperaturabhängigen Prozesse für ein Endlager gegenüberzustellen und zu bewerten sowie den bestehenden Forschungsbedarf hinsichtlich seiner Relevanz für die Bewertung der Endlagersicherheit und Festlegung von Grenztemperaturen zu bewerten* (BMUB 2016).

Das vorliegende Gutachten beleuchtet in diesem Kontext zunächst den Stand von Wissenschaft und Technik. Grundlage hierfür ist insbesondere das Gutachten (GRS 2016), das einen Überblick über den Kenntnisstand bezüglich temperaturinduzierter Prozesse in den Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein gibt. Wir haben diesen Überblick zusammengefasst, stellenweise ergänzt und dergestalt strukturiert, dass für jeden Wirtsgesteinstyp die temperaturinduzierten Prozesse nach derselben Systematik abgearbeitet wurden. Hieraus ergeben sich die in Kapitel 2 behandelten Sachverhalte.

In Kapitel 3 wird die Bedeutung temperaturabhängiger Prozesse bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Aspekte betriebliche Sicherheit, Langzeitsicherheit, Rückholbarkeit, und Flächenbedarf bewertet sowie der Einfluss auf die Prüfung des Abwägungskriteriums „gute Temperaturverträglichkeit“ betrachtet. Kapitel 4 widmet sich der zusammenfassenden Bewertung der Vorsorgeorientierung einer Grenztemperatur von 100°C in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens und betrachtet den Einfluss des bestehenden Forschungsbedarfs auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen.

³ Kommission 2016, siehe dort S. 284

2. Stand von Wissenschaft und Technik zu den Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf verschiedene Wirtsgesteine und Buffermaterialien

2.1. Einleitung

Bei der Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle ist die Untersuchung möglicher Auswirkungen der durch die Abfälle entstehenden Temperaturänderungen in den umgebenden Barrieren eine wesentliche Fragestellung, der sich die Endlagerkommission in ihrer „Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit“ widmet (Kommission 2016). Thermisch induzierte Effekte in verschiedenen Wirtsgesteinen wurden in einer Vielzahl von Forschungsvorhaben untersucht. Für die Endlagerkommission wurde ein Überblick über die vorliegenden Forschungen in (GRS 2016) erstellt.

Dieses Kapitel fasst als Grundlage für die weitere Diskussion zur Frage einer „Grenztemperatur“ an der Oberfläche der Endlagergebäude den Stand von Wissenschaft und Technik zu den temperaturabhängigen Eigenschaften der jeweiligen Wirtsgesteine und zu den relevanten Prozessen zusammen.

Im Kapitel 2.2 wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die wesentlichen Zusammenhänge gegeben, die die Temperatur an der Behälteroberfläche bei der Endlagerung beeinflussen. In den folgenden Kapiteln wird dann der relevante Kenntnisstand über thermisch beeinflusste Prozesse für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz (Kapitel 2.3), Tonstein (Kapitel 2.4) und Kristallin (Kapitel 2.5) beschrieben. In Kapitel 2.6 fassen wir die für das jeweilige Wirtsgestein und das zugehörige Endlagersystem aus unserer Sicht relevanten thermisch induzierten Prozesse zusammen.

2.2. Faktoren mit Einfluss auf die Oberflächentemperatur des Behälters

2.2.1. Überblick

Die Temperatur, die sich an der Oberfläche eines Endlagerbehälters nach seiner Einlagerung einstellt, wird im Wesentlichen durch die Entwicklung der Wärmeleistung des pro Behälter eingelagerten Abfalls, die Auslegung des Endlagerbehälters und den Wärmetransfer in das Wirtsgestein bestimmt.

Welche Wärmeleistung im Abfall selbst langfristig entwickelt wird, hängt von der Art und dem Abbrand des Brennstoffs ab, bzw. von der Spezifikation der verglasten Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung. Die Dauer der Zwischenlagerung vor der Einlagerung in ein Endlager beeinflusst außerdem die insgesamt in das Endlager eingebrachte integrale Wärmeleistung. Im Falle der abgebrannten Brennelemente können Mischbeladungen von Behältern mit Brennelementen unterschiedlicher Wärmeleistung die Wärmeleistung pro Gebinde im Hinblick auf das geplante Endlagerkonzept beeinflussen.

Neben der Temperaturbegrenzung des Wirtsgesteins bzw. Buffers spielt hinsichtlich der Wärmeabfuhr die Einhaltung zulässiger Temperaturen des Inventars eine Rolle, für die die Kommission das Schutzziel „Abfuhr der Zerfallswärme“ formuliert hat. Gemäß (Kommission 2016⁴) ist anzustreben, dass der Behälter über ein geeignetes Wärmeabfuhrvermögen verfügt, so dass „die Zerfallswärme in ausreichendem Maß und möglichst gleichmäßig verteilt an die Umgebung

⁴ Kommission 2016, siehe dort S. 366

abgeführt wird“. „In ausreichendem Maß“ wäre demnach am Schutz des Inventars zu orientieren, während der Hinweis auf die gleichmäßige Wärmeabfuhr auch auf die Vermeidung von Temperaturspitzen im Buffer abzielt. In der Vergangenheit wurden in Deutschland für die Endlagerung verschiedene Behälterkonzepte wie Pollux für die Streckenlagerung oder Brennstabkokille (BSK3) für die Bohrlochlagerung entwickelt. Auch die direkte Endlagerung von CASTOR-Behältern wird diskutiert. Die Endlagerkommission ist im Ergebnis einer Anhörung und ihrer eigenen Beratungen zu der Auffassung gelangt, dass die in Deutschland entwickelten Referenzkonzepte für Endlagerbehälter nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und daher der Weiter- oder Neuentwicklung bedürfen, „insbesondere vor dem Hintergrund aktueller oder zusätzlicher Sicherheitsanforderungen“. (Kommission 2016⁵). Sie verweist dabei auch auf im Ausland bereits vorliegendes Knowhow für Endlager in Tonstein und Kristallingestein.

Wie effizient die Zerfallswärme in die Umgebung „weitertransportiert“ wird (Wärmeübertragung) und welche Temperaturgradienten sich dabei einstellen, darüber entscheiden die thermischen Eigenschaften der den Behälter umgebenden Barrieren (Salzgrusversatz bzw. Buffermaterial und Wirtsgestein). Die Überlagerung und Wechselwirkung von Wärmefeldern im Wirtsgestein wird durch die bei der Endlagerauslegung definierte Anordnung der Behälter im Einlagerungsfeld beeinflusst. Während die thermischen Eigenschaften von Gestein und Buffer als fixe Größen in die Endlagerauslegung eingehen, können die Gebindeauslegung und –anordnung variabel gestaltet und an die im jeweiligen Endlagerkonzept angestrebte Maximaltemperatur im Buffer oder Wirtsgestein angepasst werden.

2.2.2. Zerfallswärme der einzulagernden Abfälle

Die Kenntnis über die langfristige Entwicklung der Zerfallswärme je nach Art des Brennstoffs bzw. der einzulagernden Abfälle ist wesentlich für die Betrachtung bzw. Modellierung der zeitlichen Entwicklung des Temperaturgradienten und des Temperaturfeldes im Buffer und Wirtsgestein. Sie ist außerdem die Grundlage für Konzepte zur Optimierung der Behälterbeladung und des Flächenbedarfs des Endlagers bei einer bestimmten Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche.

Der Betrag und die zeitliche Entwicklung der Zerfallswärmeleistung der abgebrannten Brennelemente sind abhängig von der Art des Brennstoffs (Uranoxid oder MOX), der Anfangsanreicherung mit spaltbarem U-235 bzw. Pu-fiss sowie dem Abbrand.

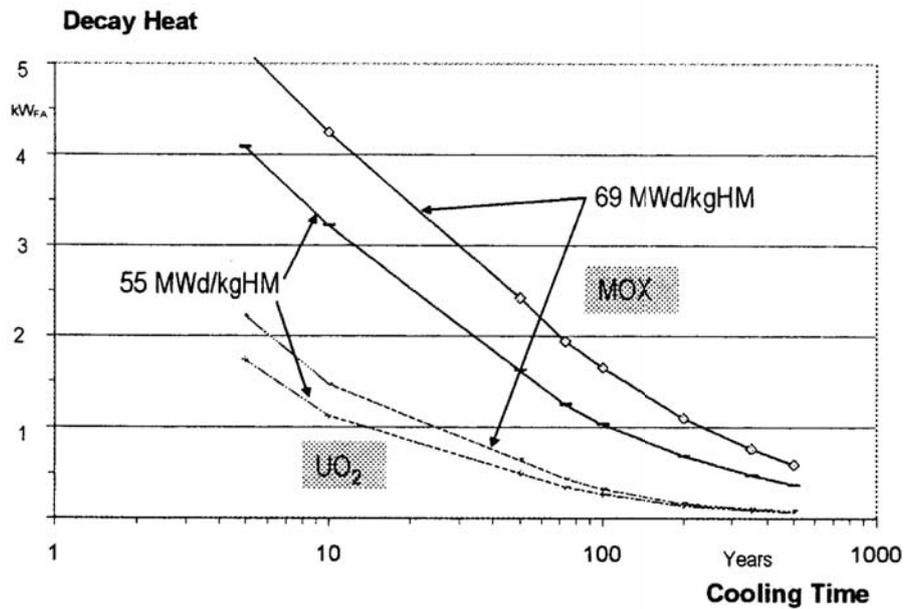
Abklingzeiten in Abhängigkeit von Brennstoff und Abbrand wurden z.B. in (Goll 2000) für Uran- und MOX-Brennstoff ermittelt. Wie in (Abbildung 2-1) ersichtlich ist die Wärmeleistung des MOX-Brennstoffs erheblich höher als die des Uranbrennstoffs. Außerdem ist die Steigerung des Abbrandes bei MOX-Brennstoff mit einem deutlich höheren Anstieg der Zerfallswärme verbunden als bei Uranbrennstoff.

Die insgesamt in Deutschland endzulagernden hoch radioaktiven Abfälle umfassen Uran- und MOX-Brennelemente mit verschiedenen Anreicherungen und Abbränden sowie verglaste hochradioaktive Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung (verglaste Abfälle). Die Abbildung 2-2 aus (Schwenk-Ferrero 2013) zeigt, wie sich die Wärmeleistung der bis zum Jahr 2022 akkumulierten wärmentwickelnden Abfälle bezogen auf Aktiniden und Spaltprodukte und deren Summe entwickeln wird. Es wird deutlich, dass die Zerfallswärme in den ersten 30 Jahren nach der Beendigung der Bestrahlung der Brennelemente im Reaktor durch die Spaltprodukte bestimmt

⁵ Kommission 2016, siehe dort S. 369

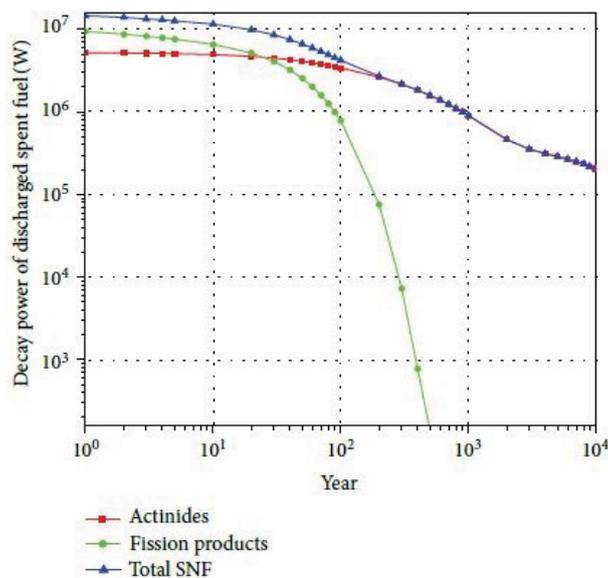
wird. Ihr Beitrag nimmt aber bereits innerhalb der ersten einhundert Jahre rapide ab. Langfristig dominiert die Zerfallswärme der Aktiniden im abgebrannten Brennstoff die Wärmeleistung.

Abbildung 2-1: Entwicklung der Zerfallswärme eines UO_2 - bzw. MOX-Brennelements für DWR-Brennelemente in Abhängigkeit vom Abbrand und der Abkühlzeit



Quelle: (Goll 2000)

Abbildung 2-2: Zerfallswärme bezogen auf das bis Ende 2022 insgesamt akkumulierte Inventar abgebrannter Brennelemente in Deutschland, Zeitskala ab 2023



Quelle: (Schwenk-Ferrero 2013)

2.2.3. Endlagerbehälter und Behälterbeladung

Die wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte stellen unterschiedliche Anforderungen an die Auslegung der Endlagerbehälter hinsichtlich des Materials, der Geometrie und der thermischen Eigenschaften. Diese sind so zu konzipieren, dass sowohl die vorgesehenen Temperaturen im Versatz bzw. Wirtsgestein als auch die Begrenzungen für Inventar und Bauteiltemperaturen innerhalb des Behälters eingehalten werden (ESK 2016a). Zur Optimierung der gebindespezifischen Wärmeleistung können Behälter mit Brennelementen oder Brennstäben unterschiedlicher Wärmeleistung beladen werden. Damit können beispielsweise die MOX-Brennelemente mit UO_2 -Brennelementen so gemischt werden, dass ihre hohe Wärmeleistung auf eine Vielzahl von Gebinden und verschiedene Einlagerungsbereiche des Endlagers verteilt wird. Außerdem kann die Gesamtwärmeleistung zum Beginn der Einlagerung durch die Dauer der Abkühlzeit (Zwischenlagerung) beeinflusst werden. Im Fall der verglasten Abfälle kann die Wärmeleistung pro Kokille nur durch die Dauer der Abklingzeit beeinflusst werden, da eine Variation / Vermischung des Inventars nicht mehr möglich ist (GRS 2016).

Um zu zeigen, welche Optionen des Mischungsverhältnisses in Anbetracht des Temperaturkriteriums für die jeweiligen Wirtsgesteine denkbar und sinnvoll wären, wurden im Auftrag der Endlagerkommission in (DBEtec 2016a) Beladepvarianten für fiktive Endlagerkonzepte in Steinsalz, Tonstein und Kristallin jeweils für eine maximale Oberflächentemperatur der Behälter von 100°C sowie zusätzlich von 200°C für ein Endlager im Steinsalz vorgestellt. Dabei wurde die gebindespezifische Wärmeleistung über das Mischungsverhältnis von MOX- und Uran-Brennelementen optimiert.

2.2.4. Einfluss der Temperaturverteilung auf den Flächenbedarf des Endlagers

Für die räumliche Auslegung des Endlagers ist das Zusammenspiel zwischen dem natürlichen geothermischen Temperaturgradienten, der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität von Buffermaterial und Wirtsgestein sowie der Wärmeleistung und der angestrebten Temperatur an der Behälteroberfläche (Grenztemperatur) ausschlaggebend. Bei höheren Temperaturen in großen Tiefen fällt die Differenz zwischen natürlicher Gebirgstemperatur und angestrebter Maximaltemperatur geringer aus, was den möglichen Wärmeeintrag durch das endzulagernde Inventar bezogen auf ein bestimmtes Wirtsgesteinsvolumen begrenzt. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit trägt zur schnelleren Wärmeabfuhr und -verteilung im Wirtsgestein bei, der Wärmetransport ist dabei gleichzeitig vom Temperaturgradienten direkt proportional abhängig. Zum Zeitpunkt der Einlagerung wird sich der Gradient aus dem Unterschied zwischen der Grenztemperatur, der Temperatur des Versatzmaterials bzw. Buffers und der des Wirtsgesteins entsprechend dem Abstand zur Wärmequelle und der Tiefe einstellen. Über eine geeignete räumliche Verteilung der Behälter kann der Gradient und somit die Wärmeverteilung beeinflusst werden.

In (DBEtec 2016a) wurden exemplarisch thermische Auslegungsberechnungen für vier Endlagervarianten (Salz 100°C und 200°C , Ton 100°C , Granit 100°C) durchgeführt mit dem Ziel, den Flächenbedarf in Abhängigkeit von Wirtsgestein und Auslegungstemperatur abzuschätzen. Dazu wurden die Materialparameter für die drei Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und Granit (als Vertreter kristalliner Wirtsgesteine), die Endlagergebindedtypen sowie das Versatz- bzw. Buffermaterial festgelegt. Je Variante wurden zunächst die thermischen Charakteristiken je nach Gebindebeladung abgeleitet und anschließend die zugehörigen Gebinde- und Streckenabstände zusammengestellt. Im Sinne der besseren Vergleichbarkeit wurden für alle vier Varianten einheitlich eine Tiefe von 600 m und ein geothermischer Temperaturgradient von 3 K pro 100 m mit einer daraus resultierenden ungestörten Gebirgstemperatur von 27°C angesetzt.

Der in (DBEtec 2016a) für die betrachteten Endlagervarianten ermittelte untertägige Flächenbedarf ist der Tabelle 2-1 zu entnehmen. In Bezug auf den Wirtsgesteinstyp (Stein)salz (und ausschließlich hierfür) verdeutlicht die Übersicht, dass eine höhere Grenztemperatur zu einem geringeren Flächenbedarf führt. Für die anderen Wirtsgesteinstypen wurden höhere Grenztemperaturen nicht betrachtet⁶.

Tabelle 2-1: Flächenbedarf eines Endlagers in Abhängigkeit von Grenztemperatur und Wirtsgesteinstyp

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

Quelle: (DBEtec 2016a)

2.3. Wirtsgesteinstyp Steinsalz

2.3.1. Überblick zur Endlagerung in Steinsalz

Die Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Wirtsgestein Steinsalz wird neben Deutschland in den Vereinigten Staaten, in den Niederlanden und in Polen als Konzept geprüft. Wissenschaftler und Behördenvertreter aus den vier Staaten arbeiten im sogenannten "Salt Club" zusammen (SaltClub 2011). In den Vereinigten Staaten ist ein Endlager für Transuranabfälle aus dem militärischen Bereich, die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), in einem Steinsalzvorkommen in Carlsbad, New Mexico in Betrieb. In Deutschland sind es das Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle in Morsleben, das havarierte Endlager und heutige Rückholprojekt Asse und das ehemalige Erkundungsbergwerk Gorleben, wo die Salzgesteinseigenschaften Gegenstand umfangreicher Untersuchungen waren. In den Niederlanden und Polen gibt es derzeit keine konkreten Untersuchungsstandorte.

⁶ Die Untersuchungen in (DBEtec 2016a) basieren auf vorgegebenen Grenztemperaturen. In der Tat werden in heutigen Endlagerkonzepten, z.B. in der Schweiz, auch Temperaturbeaufschlagungen des Buffers von über 100 °C vorgeschlagen, die dazu führen, dass für einen inneren Bereich des Buffers geschwächte Eigenschaften (z.B. Quellvermögen) akzeptiert und durch den äußeren, kälteren Bereich des Buffers kompensiert werden (s. hierzu Kap. 2.4.4.1).

In den folgenden Ausführungen zu den thermisch beeinflussten Prozessen im Salzgestein wird primär auf die Kenntnisse und Erfahrungen in Deutschland zurückgegriffen. Sofern sinnvoll werden die Veröffentlichungen des „Salt Club“ und andere Literaturquellen einbezogen.

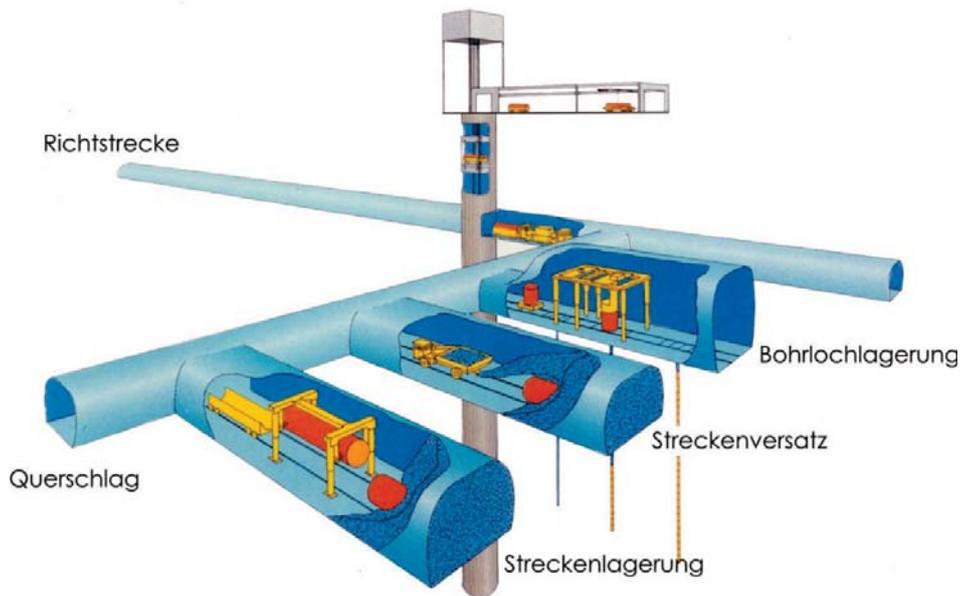
Im Hinblick auf die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle werden allgemein die hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz für die Abfuhr der von den Abfällen erzeugten Wärme sowie sein viskoplastisches Verhalten, das über die Zeit die Konvergenz von Hohlräumen, Poren und Rissen bewirkt, als günstige Eigenschaften hervorgehoben. Gleichzeitig sind potenziell ungünstige temperaturinduzierte Effekte wie die thermische Zersetzung von Hydratsalzen zu beachten (siehe Kapitel 2.3.3), die ein zentrales Kriterium für die Festlegung der Grenztemperatur in den bisherigen Sicherheitskonzepten (GRS 2016) darstellt.

Das Endlagerkonzept für Steinsalz basiert auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle aufgrund der Kriechfähigkeit und Undurchlässigkeit von Steinsalz. Bei der Endlagerung im Steinsalz, ist im Fall der Streckenlagerung (s. u.) zum Einschluss der Abfallgebinde ein Buffer aus Salzgrus vorgesehen, welcher langfristig durch Salzkriechen und Kompaktion die Struktur und somit die Eigenschaften des umgebenden „ungestörten“ Salzgesteins annimmt. Bevor dieser Prozess abgeschlossen ist, besitzt der Salzgrus eine erhöhte Porosität und weist gegenüber dem Steinsalz unterschiedliche thermische Materialeigenschaften auf (GRS 2016). Die Beschreibungen zu den thermischen Eigenschaften und Prozessen in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 behandeln gesondert das Steinsalz und die wesentlichen Merkmale von Salzgrus.

In Deutschland werden für Steinsalz sowohl die Bohrloch- als auch die Streckenlagerung als Konzepte diskutiert (siehe Abbildung 2-3). Bei der Bohrlochlagerung werden nach gegenwärtigem Konzept Brennstabkokillen (BSK) oder Triple-Packs (für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) von der Einlagerungssohle in senkrechte Bohrlöcher eingebracht. Der verbleibende Ringraum um die Kokille wird mit einem Versatzmaterial verfüllt und zum Ende ein Verschluss des Bohrlochs eingebracht. In älteren Konzepten war die Verfüllung mit Steinsalzgrus vorgesehen, die aber die heutigen Anforderungen an die Rückholbarkeit der Behälter aus dem vertikalen Bohrloch erschweren würde. Aus diesem Grund werden heute für die Bohrlochlagerung das Einbringen einer verlorenen Stahl-Verrohrung und die Verfüllung mit Sand diskutiert.

Bei der Streckenlagerung (Abbildung 2-3) werden die Abfallbehälter in Einlagerungsstrecken horizontal abgelegt. Nach der Einlagerung des einzelnen Behälters wird der verbleibende Resthohlraum um diesen Behälter mit Salzgrus verfüllt. In Abhängigkeit von der gebinde-spezifischen Wärmeleistung kann der Behälterabstand angepasst werden und innerhalb einer Strecke mehrere Meter betragen. Nach der Einlagerung des letzten Behälters wird die jeweilige Strecke vollständig mit Salzgrus verfüllt (DBEtec 2008, DBEtec 2016b).

Abbildung 2-3: Konzept der Strecken- oder Bohrlochlagerung im Salzgestein

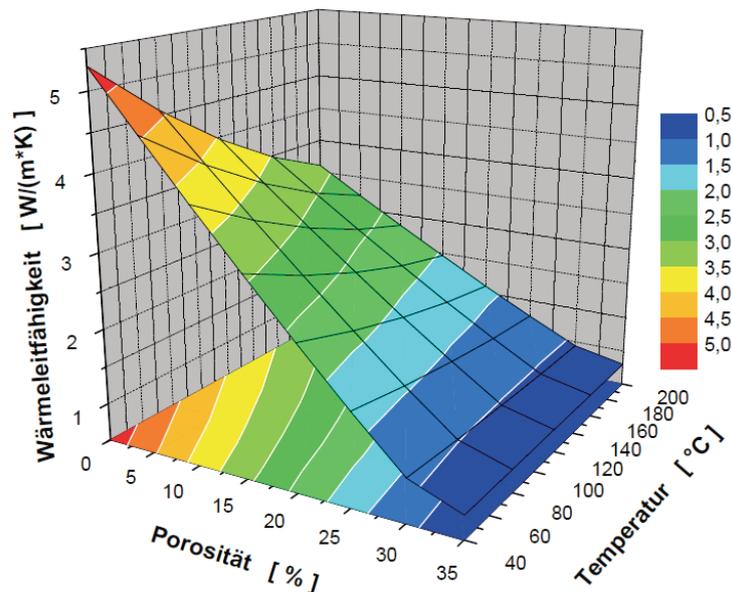


Quelle: (GNS/DBE, <http://www.endlagerung.de/language=de/7175/endlagerkonzepte>)

2.3.2. Relevante Materialeigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial

Salzgrus weist ein porositätsabhängiges elastoplastisch-viskoplastisches Verhalten auf, welches sich je nach der mechanischen und thermischen Beanspruchung verändert. Die Beschreibung des Wärmetransportes im Salzgrus war u.a. Gegenstand des Vorhabens „Backfill and Material Behaviour in Underground Salt Repositories (BAMBUS)“. In diesem Projekt wurden mathematische Funktionen abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen der Änderung der Porosität und den thermischen Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität) beschreiben. Parallel dazu erfolgte eine experimentell gestützte Validierung für einen Temperaturbereich von 20°C bis 200°C und einen Porositätsbereich bis 30 % (GRS 2016). Diese Messungen haben eine lineare Abhängigkeit zwischen der Porosität und der Wärmeleitfähigkeit sowie der spezifischen Wärmekapazität im Salzgrus gezeigt. Die Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses setzt sich dabei aus der Wärmeleitfähigkeit der Steinsalzkörner und der in den Poren enthaltenen Luft zusammen. In Abbildung 2-4 ist die Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur dargestellt. Bei einer theoretischen Porosität von 0 % entspricht die Wärmeleitfähigkeit des Salzgruses der des unverritzten Steinsalzes (GRS 2016).

Für den Salzstock Gorleben wurden (räumliche) Modellberechnungen durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen Salzgruskompaktion, Wärmeleitfähigkeit und Temperatur an der Behälteroberfläche für eine Auslegungstemperatur von maximal 200°C zeigen. Für diesen Auslegungsfall würden innerhalb eines Jahres nach der Einlagerung Temperaturmaxima von ca. 185°C an der Behälteroberfläche erreicht. Durch die zunehmende Salzgruskompaktion erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit und die Temperatur sinkt zunächst ab, bis sich die Temperaturfelder der benachbarten Strecken unter der vorgegebenen räumlichen Konstellation nach einigen Jahren überlagern und ein neues Maximum von ca. 190°C an der Behälteroberfläche erreicht wird. Entsprechend den Modellberechnungen würden die Temperaturen innerhalb der folgenden Jahrzehnte stetig zurückgehen und der Wärmeeintrag das Fernfeld erreichen. Dabei würden sich die Temperaturen am Salzspiegel um einige Grad erhöhen.

Abbildung 2-4: Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus in Abhängigkeit von Porosität und Temperatur

Quelle: (GRS 2016)

2.3.3. Relevante Materialeigenschaften Steinsalz

Gesteinsstruktur

Steinsalz ist ein polykristallines Sedimentgestein und kann aufgrund seiner Struktur bereits bei niedrigen Druck- oder Zugbeanspruchungen plastisch verformt werden (visko-plastisches Verhalten). Steinsalz ist ein aus unterschiedlichen Korngrößen bestehendes Gestein mit heterogenem Korngefüge und einer sehr geringen Porosität (Promillebereich bis 1 %). Natürlich vorkommendes Steinsalz besteht zu 90 % aus Halit sowie Beimengungen von verschiedenen Mineralphasen wie Anhydrit oder Tonmineralen. Der Lösungsgehalt liegt unter 1 %, die benachbarten Korngrenzen sind nicht einfach planar sondern unterschiedlich rau und ineinander verwachsen, was die Bildung von Wegsamkeiten behindert. Steinsalz ist aufgrund dessen gegenüber Gasen und Flüssigkeiten undurchlässig, lediglich ist unter bestimmten Bedingungen die Bildung von lokalen mehrphasigen Fluideinschlüssen möglich (DAEF 2016). Daher sind entstandene Risse potenzielle Fluidleiter, aufgrund des viskoplastischen Verhaltens verheilen sie allerdings mit der Zeit.

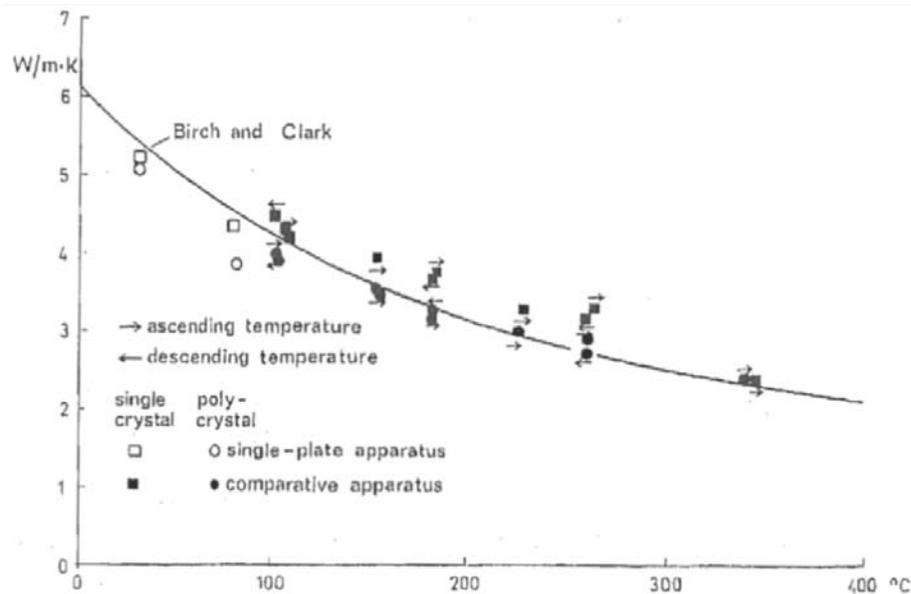
Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Eine Temperaturerhöhung im Steinsalz führt zur Veränderung sowohl der thermischen als auch der mechanischen Eigenschaften wie z.B. der Bruchfestigkeit. Die thermischen Eigenschaften Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und thermischer Ausdehnungskoeffizient weisen eine unterschiedlich ausgeprägte Temperaturabhängigkeit auf, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Steinsalz weist im Vergleich mit Tonstein und Kristallin die größte die Wärmeleitfähigkeit auf. Die hohe Wärmeleitfähigkeit hat zur Folge, dass sich ein Wärmeintrag recht schnell im Gestein fortpflanzt und ein Salzvorkommen sich großräumig aufheizen kann. Die Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz zeigt eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit: sie nimmt mit zunehmender

Temperatur ab und ist z.B. bei 25°C über 50 % höher als bei 200°C (siehe Abbildung 2-5) (GRS 2016).

Abbildung 2-5: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten von Steinsalzproben



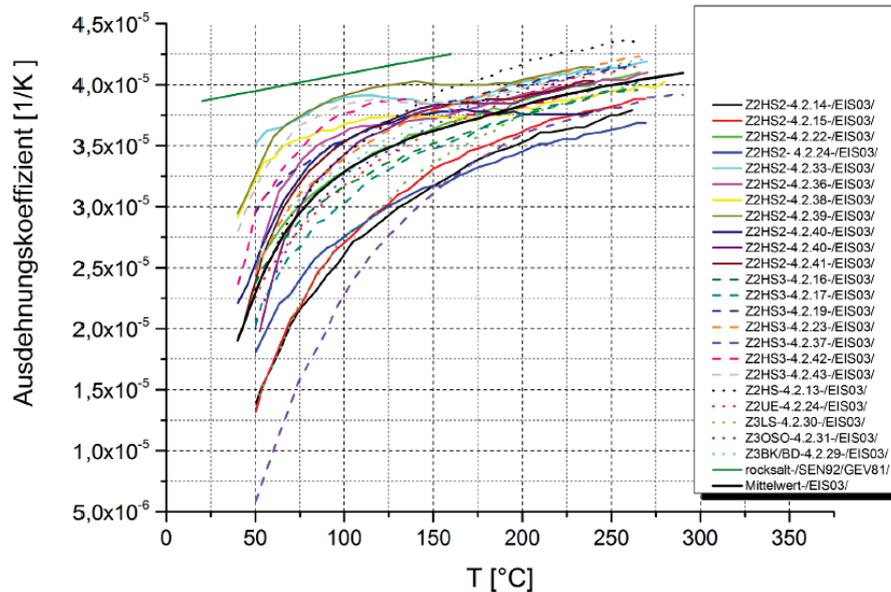
Quelle: (GRS 2016), Herkunft der Proben: Asse-Steinsalz

Die spezifische Wärmekapazität von Steinsalz ist hingegen weniger temperaturabhängig. Besonders wenig ausgeprägt ist sie bei Temperaturen unter 100°C. Sie nimmt dann mit steigenden Temperaturen in etwa linear zu. Zwischen 100°C und 300°C steigt die Wärmekapazität von Steinsalz im Schnitt von ca. 850 auf 960 J/kgK. Ein Anstieg der spezifischen Wärmekapazität ist für die Endlagerung grundsätzlich positiv, weil größere Wärmemengen im Wirtsgestein aufgenommen werden können.

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Im Steinsalz ist der (lineare) thermische Ausdehnungskoeffizient im Temperaturbereich bis 150°C stark temperaturabhängig, bei weiterem Temperaturanstieg zeigt sich ein geringerer Einfluss bei fast linearem Zusammenhang. Abbildung 2-6 aus (Heemann 2014) zeigt den Anstieg des thermischen Ausdehnungskoeffizienten über der Temperatur für eine Reihe unterschiedlicher Steinsalzproben. Größere Unterschiede im Verlauf der Temperaturabhängigkeit werden dabei auf die Inhomogenitäten in der Salzstruktur zurückgeführt.

Abbildung 2-6: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient von Salzgestein in Abhängigkeit der Temperatur



Quelle: (Heemann 2014) Herkunft der Proben: Gorleben (i. W. Hauptsalz Z2HS)

2.3.4. Thermisch induzierte Prozesse im Salzgestein

Die nachfolgend beschriebenen Sachverhalte beruhen, soweit nicht anders angegeben, im Wesentlichen auf der Zusammenstellung in (GRS 2016). Die von (GRS 2016) abweichende Gliederung sowie Ergänzungen erfolgten mit dem Ziel einer für alle Wirtsgesteinstypen einheitlichen Vorgehensweise in Bezug auf die Abfolge und den Umfang der Betrachtungen.

2.3.4.1. Verhalten von Wirtsgestein und Verfüllmaterial

Wärmeausdehnung des Gesteins

Steinsalz kann auf einen Wärmeeintrag großräumig mit Volumenzunahme durch Wärmeausdehnung reagieren. Diese ist bei höheren Temperaturen ausgeprägter als bei niedrigeren. Die Volumenzunahme kann potentiell zu einer Auflockerung des Gesteins und zu einer Verringerung der kleinsten Haupt(druck)spannung führen. Unterschreitet diese Spannung den in der jeweiligen Tiefe möglichen Fluidruck, so kann die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers im Steinsalz gefährdet werden (GRS 2016, Verletzung des Fluidruckkriteriums).

Die Volumenzunahme kann Spannungen, ggf. auch bruchhafte Verformungen im Deckgebirge hervorrufen und sich bis zur Geländeoberfläche bemerkbar machen. Modellrechnungen unter der Annahme einer Grenztemperatur von 200°C zeigten Hebungsbeträge an der Geländeoberfläche in der Größenordnung von einem Meter und mehr im Bereich des größten Hebungsbetrags.

Eine Integritätsgefährdung bei einem bestimmten Wärmeeintrag kann dabei immer nur standortbezogen beurteilt werden, da hier die spezifischen Charakteristika des jeweiligen Wirtsgesteinsvorkommens und die Eigenschaften des ebenfalls betroffenen Deckgebirges eine zentrale Rolle spielen.

Wird die Expansion durch das umgebende Gebirge behindert, kann es zunächst zu thermisch induzierten Spannungen im Gebirgsbereich unmittelbar um das Einlagerungsbergwerk (Nahfeld) kommen und mit der Zeit kann auch das Fernfeld zunehmend beansprucht werden (GRS 2016).

Die großräumige Aufheizung und die thermische Expansion von Wirtsgestein und Deckgebirge können durch eine geeignete räumliche Behälteranordnung sowie die Tiefenlage des Endlagers beeinflusst werden.

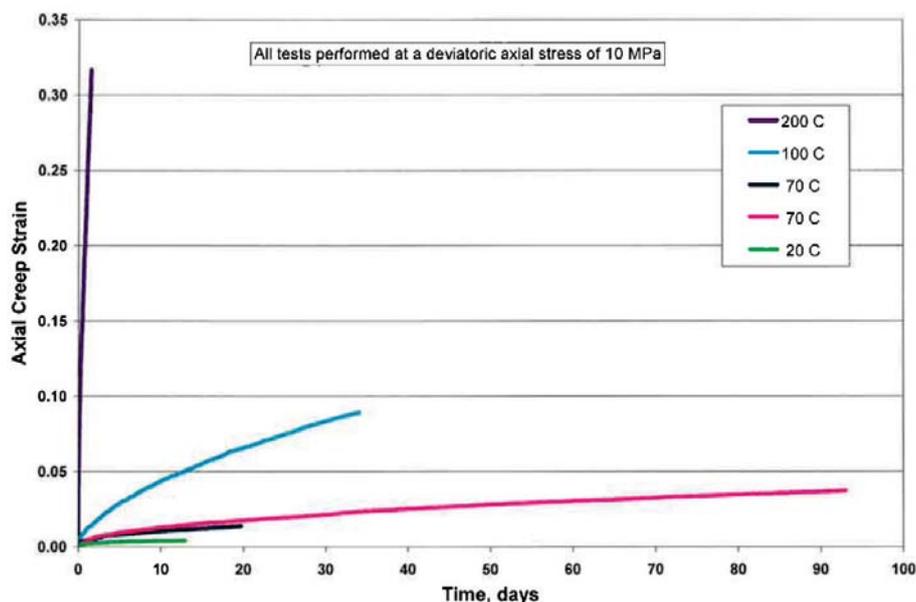
Thermisch induzierte Rissbildung im Steinsalz

Die während der thermischen Expansion entstehenden thermomechanischen Spannungen können unter Umständen zu einer thermisch induzierten Rissbildung führen, die durch einen Temperaturgradienten oder durch unterschiedliches Wärmeausdehnungsverhalten von Materialinhomogenitäten verursacht wird. Aufgrund der ausgeprägten Kriecheigenschaften von Salz kann die Spannungsakkumulation abgebaut werden; der Prozess der „Selbstheilung“ von Rissen wirkt der thermisch induzierten Rissbildung entgegen.

Kriechverhalten

Salzkriechen beschreibt das zeitabhängige plastische Verformen unter Belastung, ohne dass bruchhafte Verformungen eintreten. Steinsalz zeigt, auch im Vergleich zu anderen Salzmineralen, ein sehr ausgeprägtes Kriechverhalten, das stark temperaturabhängig ist (gezeigt z.B. bei Untersuchungen in der WIPP, (WIPP 2011)). Durch diesen Vorgang werden Hohlräume mit der Zeit verschlossen. Das Schließen der Hohlräume bewirkt auch den Abbau der Spannungsunterschiede zwischen dem Endlagerbauwerk und dem umgebenden Gestein.

Abbildung 2-7: Temperaturabhängigkeit der Kriechrate von Steinsalz



Quelle: (WIPP 2011)

Die Abbildung 2-7 zeigt, dass die Kriechverformung bei Temperaturen von 200°C deutlich schneller verläuft als bei 100°C. Eine erhöhte Temperatur begünstigt also die Konvergenz und beschleunigt die Hohlraumverschließung. Es zeigt sich auch, dass die Kriechverformung von natürlich vorkommendem Steinsalz bereits bei Temperaturen von etwa 70°C gegenüber Normaltemperatur beschleunigt abläuft. Dieser Effekt verstärkt sich zu höheren Temperaturen hin.

Wie sich die Kriechverformung auf die Hohlraumkonvergenz eines konkreten Endlagers auswirkt muss standort- bzw. konzeptspezifisch untersucht werden.

In der VSG (GRS 2013 siehe dort S. 55) wird im Kontext des Sicherheitskonzepts die Zielstellung definiert, dass die für den Verschluss des Endlagers gewählten Materialien so beschaffen sein sollen, dass „möglichst schnell geringe Porositäts- und Permeabilitätswerte erreicht werden“. Diese Zielstellung führt in der VSG allerdings nicht dazu, dass eine Mindesttemperatur in den Einlagerungsbereichen zugrunde gelegt würde, um aus Sicherheitsgründen eine möglichst schnelle Kompaktion durch Kriechen zu erreichen. Beispielsweise sieht das modellhafte Endlagerkonzept der VSG vor, Brennelemente sowjetischer Bauart (WWER-Brennelemente) in einem eigenen Einlagerungsfeld zu lagern, in dem sich Oberflächentemperaturen der Endlagerbehälter unterhalb von 80°C einstellen, siehe Abbildung 2-11. Durch die Anordnung des WWER-Einlagerungsfelds, relativ zum Schacht, „hinter“ den thermisch stärker beaufschlagten DWR-Einlagerungsfeldern profitiert dieser Bereich implizit von der hierdurch beschleunigten Konvergenz der Zugangsstrecken, während der Einlagerungsbereich selbst deutlich langsamer konvergiert.

Abbildung 2-8 aus (GRS 2012c) reflektiert, dass die VSG bezüglich der Kompaktion des Streckenversatzes von einem eher qualitativ zu erfassenden Prozess ausgeht. Eine vollständige Kompaktion während der zu angenommenen Behälterstandzeit wird gemäß der Darstellung nicht unterstellt.

Abbildung 2-8: Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase



Quelle: (GRS 2012c)

Das plastische Verhalten von Steinsalz kann mittel- bis langfristig auch dazu führen, dass Endlagergebäude ihre Position im Wirtsgestein verändern. Dieser Effekt nimmt mit steigender Gebirgstemperatur zu. Er ist insofern relevant, als er die Wiederauffindbarkeit von Endlagergebäuden im Falle einer Bergung nach Verschluss des Endlagers behindern kann.

Volumenänderung von Salzgrusversatz

Ein Wärmeeintrag wirkt sich auf die Kompaktion von Salzgrus positiv aus, da seine Kompaktionsrate bei einer Temperaturzunahme ansteigt. Voraussetzung ist eine entsprechende Druckbeaufschlagung durch Kraftschluss mit dem umgebenden Gebirge, wiederum bedingt durch das Kriechverhalten des Wirtsgesteins (s.o.). Die Porosität des Salzgruses nimmt unter gleicher Beaufschlagung bei höherer Temperatur schneller ab. Durch die Kompaktion nähern sich die thermischen Materialeigenschaften über die Zeit denen von Steinsalz an. Ausgehend von Raumtemperatur bewirkt bereits eine Temperaturerhöhung um 30 K eine signifikante Erhöhung der Kompaktionsrate. Der Effekt ist also bereits bei Temperaturen deutlich unterhalb von 100°C wirksam.

Der Prozess der Versatzkompaktion bis zu einem Zustand, in dem das Versatzmaterial Barriere-Eigenschaften angenommen hat, benötigt Zeit. Aus diesem Grund sind in Endlagerkonzepten in Steinsalz geotechnische Verschlüsse von Einlagerungsstrecken und Schächten vorgesehen, die von vorne herein Barriere-Eigenschaften aufweisen. Über die Konzeption derartiger Barrieren wird beispielsweise in (GRS 2012a) berichtet. Dort wird auch ausgeführt, dass der Zeitraum, über den die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Barrieren gezeigt werden muss, standortspezifisch herzuleiten ist. Für das in (GRS 2012a) betrachtete Endlagerkonzept für den Standort Gorleben wurde aus Modellrechnungen bei Grenztemperaturen von 200°C abgeleitet, dass trockener Salzgrusversatz im Bereich von Einlagerungsstrecken (ELS) mit wärmeentwickelnden Abfällen aufgrund der dort thermisch beschleunigten Konvergenz bereits nach wenigen Jahrzehnten eine hinreichende Barrierefunktion mit Permeabilitäten, die denen des ungestörten Steinsalzes nahe kommen, (Porosität < 1%) aufweisen kann (s.a. Abbildung 2-9). Auch für weiter entfernten, aber noch merkbar Wärme beaufschlagte Richtstrecken und Querschläge („RS Ost“ und „QS Ost“⁷) folgt aus dem (wenn auch geringeren) Wärmeeintrag eine beschleunigte Kompaktion, die in wenigen hundert Jahren zu Barriere-Eigenschaften des Salzgrusversatzes führt. In (GRS 2012a) wird außerdem auf einen Unterschied zwischen angefeuchtetem und naturtrockenem Salzgrus hingewiesen: feuchter Salzgrus („RS West“⁸) kompaktiert auch bei ähnlicher (hier niedriger) Temperatur schneller als trockener Salzgrus („QS West“⁸). In Bereichen, die nur vernachlässigbarer Temperaturerhöhung ausgesetzt wären, würde trockener Salzgrus („QS West“) mehrere tausend Jahre benötigen, um eine Porosität unter 2 % zu erreichen, während angefeuchteter Salzgrus („RS West“) innerhalb von 100 Jahren eine Porosität von etwa 1 % erreichen würde.

Die zugehörigen Temperaturbereiche bzw. Temperaturverläufe werden in (GRS 2012a) im Übrigen nur qualitativ angegeben⁹. Unter dem Vorbehalt, dass die Angaben in GRS 2012a standortbezogen abgeleitet wurden, und dass dabei geotechnische Barrieren und der Streckenversatz betrachtet wurde, lassen sich die Angaben für die weiter von den Endlagerbehältern entfernten Bereiche der Querschläge und Richtstrecken dennoch als Analoga für das Konvergenz/Kompaktionsverhalten bei niedrigerer Wärmebeaufschlagung betrachten. Insgesamt ist festzustellen, dass die Salzgruskompaktion über die thermisch beeinflusste Hohlraumkonvergenz eine deutliche Temperaturabhängigkeit aufweist, dass allerdings auch bei

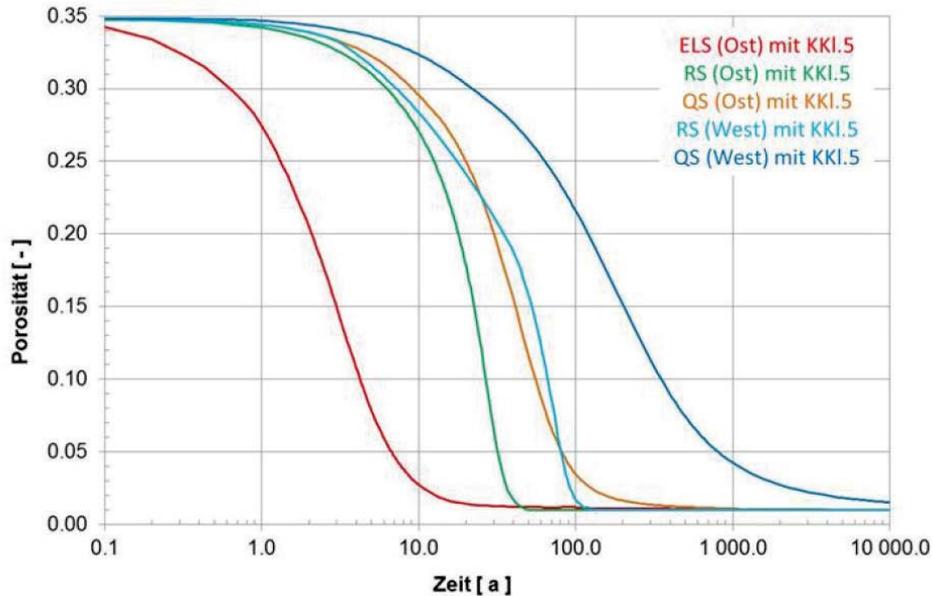
⁷ Die mit „Ost“ bezeichneten Rechenfälle beziehen sich in (GRS 2012a) auf Bereiche des für die VSG konzipierten Endlagerbergwerks, die sich in der Nähe von Einlagerungsstrecken mit wärmeentwickelnden Abfällen befinden.

⁸ Die mit „West“ bezeichneten Rechenfälle beziehen sich in (GRS 2012a) auf den westlichen Teil des für die VSG konzipierten Endlagerbergwerks, das für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgesehen war. In diesem Bereich war also keine relevante Wärmebeaufschlagung vorgesehen.

⁹ GRS 2012a nennt hier die Kategorien trocken/heiß, trocken/warm, trocken/kalt, feucht/warm und feucht/kalt als Kombination aus Feuchtgrad und Temperatur.

Temperaturen deutlich unter 100°C eine Porosität von etwa 1 % innerhalb von ca. 100 Jahren erreicht werden kann, wenn das Versatzmaterial entsprechend ausgelegt wird

Abbildung 2-9: Vergleich von Porositäts-Zeitverläufen mit Salzgrus versetzter Strecken bei unterschiedlichen Randbedingungen



(ELS – Einlagerungsstrecke, RS – Richtstrecke, QS – Querschlag)

KKI.: Kriechklasse gem. einer von BGR für Gorleben definierten Skala von 0 bis 9. KKI. 5 beschreibt ein mittleres Kriechvermögen

Quelle: (GRS 2012a)

Änderung der Durchlässigkeit

Solange die Temperatur im Salzgestein 120°C unterschreitet, wird eine temperatur- oder fluiddruckbedingte Ausbildung eines Porennetzwerkes mit erhöhter Durchlässigkeit nicht erwartet.

Mineralumwandlungen

Die in Salzstöcken vertretenen Mineralparagenesen werden bis zu einer Temperatur von ca. 100°C als thermisch stabil angesehen. Kristallwasserhaltige Salzminerale können aber empfindlich auf Temperaturveränderungen mit Mineralumwandlungen reagieren. Vorkommen von kristallwasserhaltigen Salzmineralen sollten daher zugunsten homogener Steinsalzvorkommen gemieden werden.

Änderung von mechanischen / physikalische Gesteinseigenschaften

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) von Steinsalz nimmt mit zunehmender Temperatur ab, damit nimmt die Plastizität zu. Die dynamische Viskosität steigt grundsätzlich mit zunehmender Temperatur an. Dieser Effekt unterstützt das viskoplastische Verhalten von Steinsalz.

Änderung der Sorptionseigenschaften

Salzgestein wird in Sicherheitsanalysen im Allgemeinen keine Sorptionseigenschaft gegenüber Radionukliden zugeordnet (GRS 2012b), so dass keine Temperaturabhängigkeit dieser Eigenschaft zu betrachten ist.

Hydrochemische Wechselwirkung zwischen Porenlösung und Salzgestein

Die Löslichkeit von Mineralen in wässrigen Lösungen ist grundsätzlich temperaturabhängig. Halit (Steinsalz) besitzt einen geringen positiven Temperaturkoeffizienten, sodass bei Temperaturerhöhung geringfügig mehr Halit in zutretendem Wasser gelöst werden kann. Bei Temperaturen unter 100°C ist dieser Effekt deutlich schwächer als bei höheren Temperaturen.

2.3.4.2. Bildung und Verhalten von Fluiden

Lösungsfreisetzung

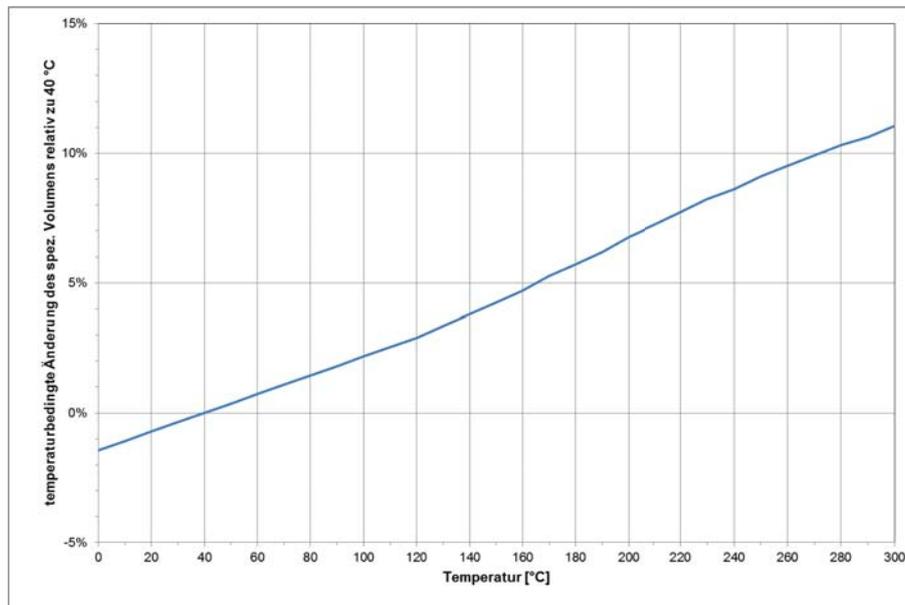
Steinsalz zeichnet sich durch einen nur geringen mineral- oder porengelassenen Fluidgehalt aus, so dass eine thermisch induzierte Lösungsfreisetzung aus Steinsalzvorkommen in der Regel kein relevanter Effekt ist.

Durch einen Wärmeeintrag können aber wasserhaltige Salzminerale (Hydratsalze, z.B. Carnallit) zersetzt bzw. umgewandelt werden und Kristallwasser freisetzen. Für Carnallit wurde die kritische Temperatur der Kristallwasserfreisetzung (bei konstantem Druck und Luftfeuchtigkeit) zwischen 80°C bis 170°C, für Polyhalit 230°C bis 280°C, für Bischofit 155°C bis 220°C und für Kieserit ab 280°C festgestellt (GRS 2016). Der Prozess wird durch eine Abnahme des Feststoffvolumens begleitet, wobei sich Fluidwegsamkeiten ausbilden können. Mit dem freigesetzten Wasser können Radionuklide durch diese neu gebildeten Wegsamkeiten transportiert werden. Empfehlenswert sind daher möglichst homogene, hydratsalzfreie Steinsalzvorkommen sowie ein Sicherheitsabstand zu benachbarten kristallwasserhaltigen Mineralvorkommen, der eine ungünstige Aufheizung dieser Vorkommen verhindert.

Wärmeausdehnung von Fluiden im Salzgestein

Die Ausdehnungskoeffizienten der im Salzgestein vorhandenen Fluide sind generell höher als die des Salzgesteins selbst. Durch das Aufheizen von Gesteinsfluiden in dem vom verschlossenen Endlager thermisch beeinflussten Bereich kann der lokale Fluiddruck ansteigen, hierdurch werden zusätzliche Spannungen im Gestein erzeugt. Wenn die expandierten Fluide durch das dichte Salzgebirge nicht abfließen können (Fluideinschluss), kann die Zugfestigkeit überschritten werden, was wiederum zu hydraulischen Wegsamkeiten führen kann (sekundäre Permeabilität). Diese Prozesse sind in ihrem Ausmaß standortspezifisch und müssen daher fallbezogen untersucht werden.

Abbildung 2-10: Temperaturbedingte Volumenänderung von gesättigter NaCl-Lösung (in %, bezogen auf das Volumen bei 40°C)



Quelle: eigene Darstellung, auf Basis von Daten aus (NBS 1981)

Solange der Fluidgehalt nur wenige Volumen-Prozent beträgt und der Druckaufbau durch die Volumenvergrößerung auf einem Niveau ist, das lediglich zu einer lokalen Infiltration ohne Makrorisse führt, wird eine integritätsgefährdende Einwirkung durch punktuell erhöhte Fluiddrücke in homogenem Steinsalz als vernachlässigbar angesehen (GRS 2016). Abbildung 2-10 zeigt die Proportionalität der Wärmeausdehnung am Beispiel von gesättigter Steinsalzlösung: Gegenüber dem Volumen bei 40°C, entsprechend einer mittleren zu erwartenden Gebirgstemperatur in Endlagertiefe, beträgt die Änderung des spezifischen Volumens einer solchen Lösung bei 100°C rund 2 %, bei 200°C rund 7%.

Fluidmobilisierung im Salzgestein

Die Mobilisierung von Fluiden kann durch einen Temperaturgradienten induziert werden, der lokale Lösungs- und Fällungsreaktionen im Salzgebirge bewirkt (Thermomigration). Durch Verschiebung von Korngrenzen können dabei Fluide bewegt werden.

Eine Lösungszirkulation tritt in einem fluidgesättigten Milieu auch in Folge von Dichteunterschieden auf, wenn eine Wärmequelle tiefer als eine Wärmesenke liegt. Das erwärmte Fluid erfährt dann aufgrund geringerer Dichte einen Auftrieb. Voraussetzung für eine solche Konvektion sind entsprechende Wegsamkeiten.

Gasbildung

Eine erhöhte Wärmezufuhr in Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen kann eine thermochemische Sulfatreduktion (TSR) beschleunigen und somit die Korrosion (durch H_2S) und die Gasbildungsrate erhöhen. Sie setzt die Anwesenheit von Sulfat und Kohlenwasserstoffen im Einflussbereich des Wärmeeintrags voraus. Sowohl Kohlenwasserstoffe als auch Sulfatvorkommen sind in Salzformationen anzutreffen, was bei der Konzeption der Einlagerungsbereiche und der Bewertung ihres thermischen Einflusses auf die Umgebung zu berücksichtigen ist.

Die TSR wird aufgrund der dann geringen Umsatzrate bei Temperaturen kleiner 80°C als vernachlässigbar angesehen. Zu höheren Temperaturen hin steigen die Umsatzrate und damit die Relevanz des Prozesses signifikant an. Bei 200°C läge die Halbwertszeit des Sulfatumsatzes z.B. nur noch bei etwa 10 Jahren (siehe hierzu auch die Ausführungen zum Wirtsgesteinstyp Tonstein, Kapitel 2.4.3.2).

Wasserdampf unter Endlagerbedingungen

Durch ein Aufheizen von gesättigter Salzlösung bis oberhalb des Siedepunkts würde der Beitrag von Wasserdampf zu den Effekten der Wärmeausdehnung von Fluiden (s.o.) im Salzgestein verstärkt werden. Der Siedepunkt von Wasser in der Endlagertiefe liegt allerdings im verschlossenen Endlager bei ca. 280°C, für salzgesättigte Lösungen noch höher. Dies ist eine Temperatur, die weit über die zu erwartenden Temperaturen in einem Endlager hinausgeht.

In Bereichen und in Zeiträumen, in denen der Gebirgsdruck während Betrieb und Offenhaltung des Endlagerbergwerks noch reduziert ist, (also bis zur Einstellung des tiefenabhängigen hydrostatischen Drucks nach Verschluss des Endlagers), herrscht im Endlager zunächst atmosphärischer Druck, so dass Wasserdampf bei Temperaturen um die 100°C und Anwesenheit wässriger Lösungen entstehen könnte. Bei planmäßiger Entwicklung sollten während Betrieb und Offenhaltung des Bergwerks keine Lösungen in den Einlagerungsbereichen vorhanden sein, so dass es nicht zu erhöhtem Fluiddruck kommen kann. Ein Kontakt feuchter Grubenwetter zu empfindlichen Hydratsalzvorkommen (e.g. Carnallit) kann durch bergbauliche und wettertechnische Maßnahmen vermieden werden. Nach Verschluss wird sich der Fluiddruck den Druckverhältnissen in der Endlagertiefe entsprechend entwickeln. Da mit dem Druck der Siedepunkt von Wasser steigt, wird auch der Anteil an Wasserdampf zurückgehen, so dass der Einfluss von Wasserdampf insgesamt gesehen also eher gering ist.

2.3.4.3. Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse

In Anwesenheit von Mikroorganismen und Kohlenwasserstoffen kann durch mikrobielle Prozesse unter anaeroben Bedingungen Sulfat reduziert (bakterielle Sulfatreduktion, BSR) und gleichzeitig organischer Kohlenstoff oxidiert werden. Es bilden sich H₂S und CO₂ (bzw. Kohlesäure oder Kalk). Bei Anwesenheit von Wasser oder Wasserstoff ist eine BSR auch unterhalb eines Temperaturbereiches von 80°C – 110°C noch möglich. Die BSR wird bei erhöhten Temperaturen gehemmt, da die Lebensbedingungen von Mikroorganismen im Salzgestein bei hohen Temperaturen ungünstiger werden. Ihr Einfluss auf die Korrosionsraten und die Gasbildung wird bei Temperaturen oberhalb 110°C also grundsätzlich eingeschränkt. Der Prozess ist allerdings nach Abklingen des Temperaturimpulses reversibel (Wiederbesiedelung, z.B. aus Endosporen).

Unterhalb von 100°C sind mikrobielle Prozesse als Randbedingung immer zu berücksichtigen, wobei ihre Intensität neben der Temperatur auch von den sonstigen Lebensbedingungen der Mikroorganismen und den im Wirtsgestein herrschenden Randbedingungen abhängt.

2.3.5. Überlagerung und gegenseitige Beeinflussung der Temperaturfelder

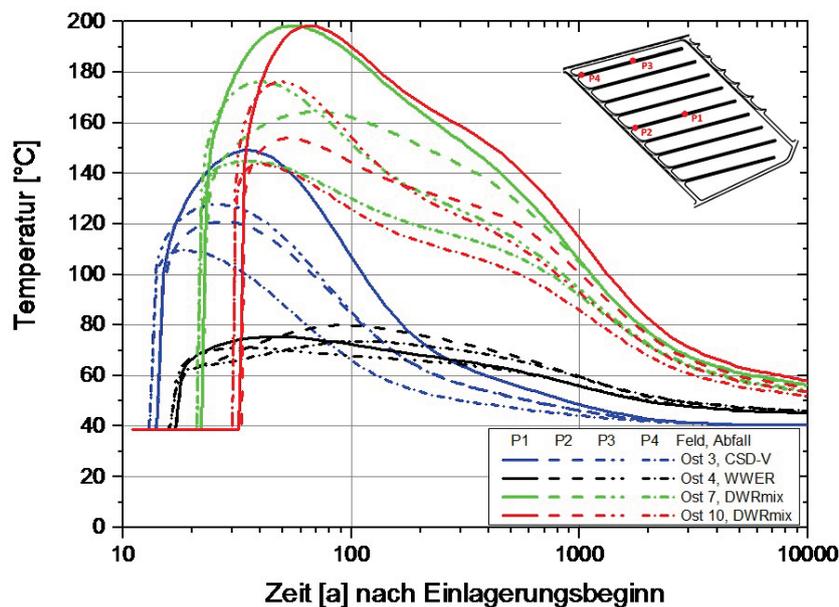
Zur thermischen Auslegung eines Grubengebäudes in Steinsalz wurden in der Vergangenheit thermomechanisch gekoppelte Berechnungen durchgeführt (Bollingerfehr et al. 2012), welche die Salzgruskompanktion berücksichtigen und die langfristigen Entwicklungen im Temperaturfeld aufzeigen. Die Berechnungen beziehen sich auf eine Auslegungstemperatur von 200°C. U.a. wurde dabei der zeitliche Verlauf der Temperaturen an der Behälteroberfläche in Abhängigkeit der Position im Einlagerungsfeld jeweils für Streckenlagerung und Bohrlochlagerung betrachtet. Dabei

wurden verschiedene Behälterbeladungen sowie die gegenseitige thermische Beeinflussung benachbarter Behälter berücksichtigt.

Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch den zeitabhängigen Temperaturverlauf an der Oberfläche von Endlagerbehältern in Streckenlagerung an jeweils vier gleichen relativen Positionen (P1 – P4), für unterschiedliche Abfalltypen (verglaste Spaltprodukte (CSD-V), WWER Brennelemente, und DWR-Brennelemente mit 11 % MOX-Anteil). Für WWER-Brennelemente liegen in diesem Beispiel aufgrund der geringen Wärmeleistung die Maxima der Temperaturen unter 80°C und es gibt nur geringe Unterschiede zwischen den Einlagerungspositionen P1 bis P4. Die Temperaturabnahme mit der Zeit verläuft aufgrund der niedrigeren Temperaturgradienten verhältnismäßig langsamer als bei anderen Abfalltypen.

Je höher die Oberflächentemperatur der Behälter desto stärker zeigt sich der Einfluss der Überlagerung der Temperaturfelder. Für DWR-Brennelemente ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit des Temperaturverlaufs von der Behälterposition im Einlagerungsfeld, bedingt durch die Überlagerung von Temperaturfeldern. Für die Behälter in den Randlagen (P4) ergeben sich deutlich geringere Temperaturen, während die mittig in den Einlagerungsstrecken gelegenen Positionen P1 die Temperaturmaxima aufweisen, die im Falle der DWR-Brennelemente die Auslegungstemperatur von 200°C erreichen. Einlagerungsbereiche verglaster Abfälle (CSD-V) zeigen in der Abbildung einen ähnlichen Temperaturverlauf, allerdings modifiziert durch ihre andersartige Wärmecharakteristik.

Abbildung 2-11: Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Oberfläche ausgewählter Behälter in Abhängigkeit von Behälterstandort und Abfalltyp

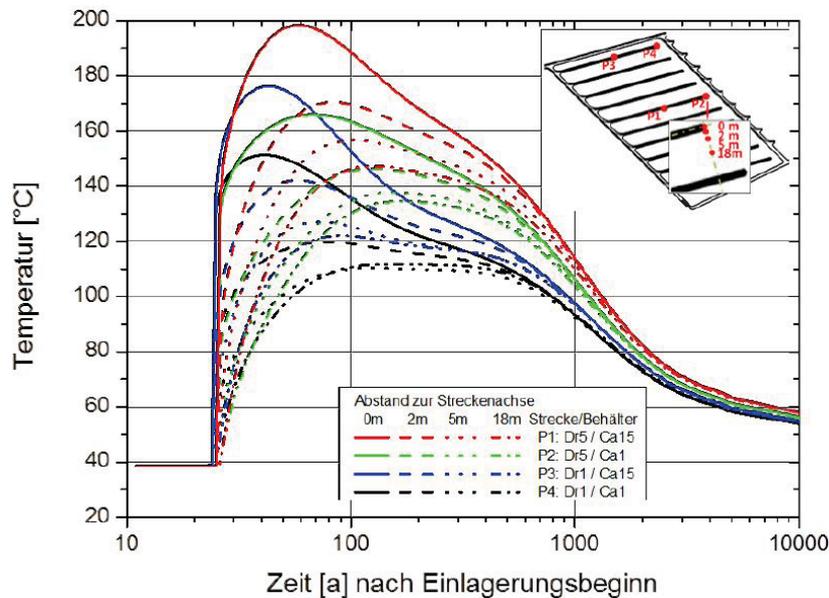


Quelle: (Bollingerfehr et al. 2012), grafisch korrigiert von DBEtec (11.11.2016)

Die Abbildung 2-12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit von der Behälterposition und der Entfernung zur Behälteroberfläche exemplarisch für ein modellhaftes Einlagerungsfeld mit abgebrannten DWR-Brennelementen. Die Temperatur nimmt mit der Distanz vom Behälter in Richtung Pfeilmitte (in 18 m Entfernung von der Behälteroberfläche) ab. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich 80 Jahre nach Beginn der Einlagerung das gesamte Einlagerungsfeld auf ein Niveau über 100°C (je nach Position bis zum vorgegebenen Maximum

von 200°C) erwärmt hat und sich nach einigen hundert Jahren wieder auf unter 100°C abkühlt. In diesen Zeitraum fällt die Anforderung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Endlagerbehältern.

Abbildung 2-12: Zeitlicher Verlauf der Temperatur in einem Einlagerungsfeld mit DWR Brennelementen in Abhängigkeit von Behälterposition und Entfernung von der Behälteroberfläche



Quelle: (Bollingerfehr et al. 2012)

2.4. Wirtsgesteinstyp Tonstein

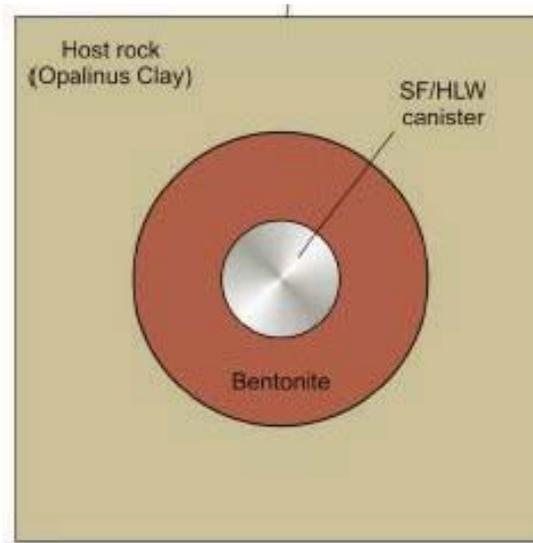
2.4.1. Überblick zur Endlagerung im Tonstein

Bezüglich der Endlagerung im Tonstein ist das Schweizer Konzept für ein geologisches Tiefenlager am weitesten fortgeschritten. Neben der Beschreibung einiger temperaturinduzierter Effekte, die im Wesentlichen auf den Ausführungen in (GRS 2016) basieren, stützen sich die nachfolgenden Ausführungen zum Stand der Technik hinsichtlich der Festlegung von „Grenztemperaturen“ bei Endlagern in Tonstein vor allem auf die entsprechenden Regelungen und Annahmen aus dem Schweizer Sachplanverfahren und dem „Entsorgungsnachweis“. Ergänzend wird auf die entsprechenden Regelungen und Annahmen zum französischen Endlagervorhaben eingegangen.

Zum Einschluss der Abfallgebände ist im Tonstein ein Buffer aus Bentonit vorgesehen. Es ist daher sowohl das Verhalten des Bentonits bei Wärmeeintrag als auch des Tonsteins selber und ggf. am Übergang zwischen Buffer und Wirtsgestein zu betrachten.

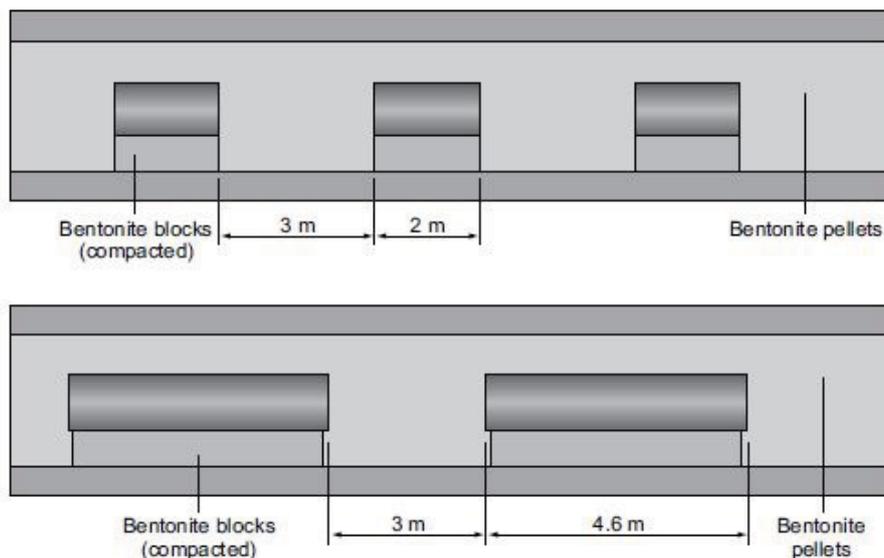
Die Abbildung 2-13 gibt einen Überblick über das Endlagerkonzept im Opalinuston, das im Rahmen des Entsorgungsnachweises in der Schweiz aus dem Jahr 2002 von der Nagra entwickelt wurde. Es sieht neben der Einlagerung von abgebrannten Brennelementen und verglasten Spaltprodukten auch die Lagerung von mittelradioaktiven Abfälle (ILW) vor.

Abbildung 2-13: Schematische Darstellung des Endlagerkonzepts im Opalinuston aus dem Entsorgungsnachweis der Nagra



Emplacement tunnel SF/HLW

- a) Querschnitte durch die Einlagerungsstrecke mit einem für Behälter für verglaste Spaltprodukte oder abgebrannte Brennelemente



- b) Längsschnitt durch die Einlagerungsstrecken für Behälter mit verglasten Spaltprodukten (oben) und abgebrannten Brennelemente (unten)

Quelle: (NAGRA 2002b)

2.4.2. Relevante Materialeigenschaften von Tonstein und Bentonit

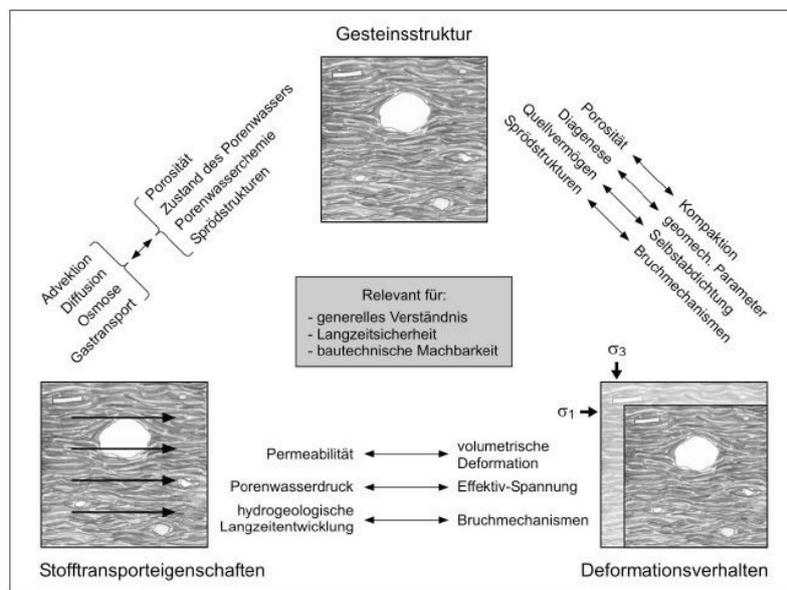
Gesteinsstruktur und –eigenschaften

Tonstein weist in natürlicher Lagerung ein ausgeprägt anisotropes Verhalten auf und ist hinsichtlich seiner Parameter jeweils parallel und senkrecht zur Schichtrichtung zu betrachten.

In Abhängigkeit von Mineralzusammensetzung, Konsolidierung (Wassergehalt / Sättigung), Porosität etc. weisen Tonsteine unterschiedliche Eigenschaften auf (siehe z.B. die große Spann-

breite möglicher Werte für die Wärmeleitfähigkeit in Tabelle 2-2). Außerdem sind Deformationsverhalten, Stofftransporteigenschaften und Gesteinsstruktur eng mit einander gekoppelt, so dass Veränderungen bestimmter Parameter jeweils hinsichtlich ihres Einflusses auf das komplexe Gesamtsystem zu betrachten sind, wie Abbildung 2-14 aus (NAGRA 2002a) zeigt. Entsprechend sind auch temperaturbedingte Einflüsse jeweils im Kontext des Gesamtsystems zu bewerten.

Abbildung 2-14: Kopplung zwischen Gesteinsstruktur, Deformationsverhalten und Stofftransporteigenschaften im Schweizer Opalinuston



Quelle: (NAGRA 2002a, siehe dort S. 226)

Bentonit wird zur Herstellung von Buffer-Materialien verwendet. Er besteht zu wesentlichen Anteilen aus dem Smektitmineral Montmorillonit. In vielen Eigenschaften ähnelt Bentonit dem Tonstein, allerdings ohne die für Tonstein aufgrund seiner internen Lagenstruktur charakteristische Anisotropie.

Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Für die resultierende Temperaturerhöhung beim Eintrag einer bestimmten Wärmeleistung sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität die wesentlichen Gesteinsparameter.

In Abhängigkeit von den konkreten Gesteinseigenschaften zeigt die Wärmeleitfähigkeit die bereits oben angesprochene große Bandbreite auch als Funktion des Wassergehalts und der Dichte (siehe beispielhafte Werte in Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Bandbreiten der Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Tonsteinarten

Tonart	parallel zur Schichtung	senkrecht zur Schichtung
Opalinuston (je nach Quarzgehalt)	1,92 – 3,22 W/mK	1,03 – 1,72 W/mK
Unterkreide Norddeutsches Becken	1,65 – 2,50 W/mK	1,41 – 1,52 W/mK
Boom Clay	1,69 W/mK	

Quelle: Werte aus (GRS 2016), eigene Darstellung

Im Verhältnis zu dieser hohen materialspezifischen Schwankungsbreite ist der Temperatureinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit relativ gering. Für Opalinuston sind in (GRS 2016¹⁰) Schwankungen von ca. 0,2 W/mK im Bereich zwischen 30 und 140°C angegeben, wobei die geringste Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich von ca. 110°C liegt.

Einen ähnlichen Verlauf zeigen experimentelle Ergebnisse für Bentonit mit einem Wassergehalt von 10 % und 17 %, wobei die Schwankungen in diesem Fall für den Temperaturbereich zwischen 40°C und knapp 200°C zwischen 0,8 und 1,2 W/mK liegen. Beim getrockneten Bentonit (Wassergehalt 0 %) liegt dagegen die geringste Wärmeleitfähigkeit bei niedrigen Temperaturen mit einem etwa konstanten Wert bis etwa 110°C und einem anschließenden Anstieg von ca. 0,9 auf gut 1,1 W/mK bei knapp 200°C. Von diesem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit wird bei den Betrachtungen in (NAGRA 2002b, s.u.) anscheinend kein Kredit genommen. Dort wird auch von einem deutlich niedrigeren Wert der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits ausgegangen.

Die spezifische Wärmekapazität von Tonsteinen weist eine deutliche Temperaturabhängigkeit auf. Außerdem zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt. In (GRS 2016) wird beispielsweise für eine Probe aus der Bohrung Konrad 101 berichtet, dass die spezifische Wärmekapazität von 1030 J/kgK bei 30°C auf 2000 J/kgK bei 70°C ansteigt, was darauf zurückzuführen ist, dass der Hauptanteil des Wassers freigesetzt wird. Aufgrund des sinkenden Wassergehalts geht die mittlere spezifische Wärmekapazität bei weiter steigenden Temperaturen auf 900 J/kgK bei 200°C zurück. Für einen ungestörten gesättigten Boom Clay ist eine mittlere spezifische Wärmekapazität von 1400 J/kgK angegeben.

Expansions-Kontraktions-Übergang

Eine Besonderheit der Reaktion von natürlichem Tonstein auf einen Wärmeeintrag ist der Wechsel von thermischer Expansion, im Wesentlichen bedingt durch die thermische Ausdehnung von Fluiden im Tonstein und in geringerem Maße durch die thermische Ausdehnung der Feststoffmatrix, zu einer ebenfalls thermisch bedingten Kontraktion bei Überschreitung der Temperatur des sogenannten Expansions-Kontraktions-Übergangs. Steigt die Gebirgstemperatur an, so überwiegt zunächst die thermische Ausdehnung der Fluide und der Gesteinsmatrix, verbunden mit einer Volumenzunahme (Expansion). Mit weiter steigender Temperatur wird aber vermehrt Porenwasser und an Tonmineral-Zwischenschichten gebundenes Wasser aus der Tonsteinmatrix freigesetzt. In Folge davon wird die Tonsteinmatrix geschwächt und kontrahiert schließlich. Der Effekt ist u.a. vom bereits vorhandenen Konsolidierungsgrad abhängig, für höher konsolidierten Tonstein ist ab etwa 80°C mit einer thermisch bedingten Kontraktion zu rechnen.

¹⁰ GRS 2016, siehe dort S. 100

2.4.3. Thermisch induzierte Prozesse im Tongestein

Nachfolgend werden die temperaturabhängigen Prozesse im Tonstein zusammengestellt, die – sofern nicht anders angegeben – der Stoffsammlung in (GRS 2016) entnommen sind. Sie wurden im Hinblick auf eine systematische Gegenüberstellung der Wirtsgesteinstypen gruppiert und ggf., auch in Analogie zu anderen Wirtsgesteinstypen, ergänzt.

2.4.3.1. Verhalten von Wirtsgestein und Buffer

Wärmeausdehnung des Gesteins

In wassergesättigtem Tonstein dominiert bis zur Temperatur des Extraktions-Kontraktions-Übergang (bei ca. 80°C) die Expansion des Porenfluids. Die Wärmeausdehnung der Feststoffkörner wird demgegenüber eher als vernachlässigbar angesehen. Oberhalb von 80°C dehnt sich Tongestein bei Wärmezufuhr in Summe nicht aus, sondern kontrahiert, bedingt durch die Freisetzung von Poren- und Zwischenschichtwasser.

Thermisch induzierte Rissbildung im Tonstein

(GRS 2016¹¹) stellt fest, dass weder durch die Erwärmung noch durch die nachfolgende Abkühlung bei Temperaturen bis 150°C eine Rissbildung im Tonstein beobachtet werden konnte. In (NAGRA 2002a¹²) wird ausgeführt, dass Risse und Scherbrüche höchstens im unmittelbaren Umfeld der Auflockerungszone erwartet werden und zu einer geringfügigen Vergrößerung der Auflockerungszone führen. Ein Durchschlagen von Rissen ins Fernfeld sei auszuschließen.

Kriechverhalten

Ein Wärmeeintrag beschleunigt die Kriechverformung eines Tonsteins. In dem in (GRS 2016) gegebenen Beispiel¹³ wird für Tonstein des Callovo-Oxfordian vom Standort Bure über Untersuchungen im Temperaturbereich zwischen etwa 30 und 110°C berichtet die gezeigt haben, dass sich die Kriechgeschwindigkeit dieses Tonsteins bei einer Temperaturerhöhung bis etwa 90°C um eine Größenordnung erhöht. Bei höherer Temperatur (hier 110°C) ergab sich keine klare Fortsetzung dieses Trends. Wärme begünstigt daher, zumindest in dem betrachteten Temperaturbereich, die Fähigkeit von Tonstein zur Selbstverheilung von Rissen, die beispielsweise in der Auflockerungszone um ein Endlagerbergwerk auftreten können.

Volumenänderung von Tonstein oder Buffer-Material, Quellfähigkeit

Der bisherige Kenntnisstand zeigt (gemäß GRS 2016) noch kein konsistentes Bild der Quelldruckabhängigkeit in Tonstein oder Buffer von der Temperatur. Grundsätzlich scheint die Quellfähigkeit von Tonmineralen nach dem Erhitzen abzunehmen, und zwar bereits bei Temperaturen um 100°C (s.a. Abschnitt Expansions-Kontraktions-Übergang).

Änderung der Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit für Wasser zeigte nach (GRS 2016) in Versuchen entweder keine thermisch bedingten Veränderungen gegenüber dem ungestörten Gestein oder sie zeigte bei Temperaturen

¹¹ GRS 2016, siehe dort S. 100

¹² NAGRA 2002a, siehe dort S. 495

¹³ GRS 2016, siehe dort S. 108f

bis 80°C eine leichte Zunahme, um bei weiterer Temperatursteigerung bis 150°C wieder abzunehmen.

Mineralumwandlungen

Ein wesentlicher mineralogischer Effekt unter Temperatureinfluss, der zu einer potenziellen Verschlechterung der Eigenschaften von Tonstein und Bentonit-Buffer führt, ist die Umwandlung von Smektit in Illit. Diese Illitisierung führt zur Versprödung des Gesteins sowie zu einer Reduzierung der Quelfähigkeit (NAGRA 2002a¹⁴). Die spezifische Oberfläche und die Kationenaustauschkapazität von Smektiten (in Tonstein oder Bentonit) sind außerdem sehr viel höher als die von Illiten. Die Umwandlung von Smektit zu Illit kann daher Auswirkungen auf das Retentionsverhalten eines Tonsteins oder Bentonit-Buffers haben.

Die Illitisierung setzt ein ausreichendes Angebot an Kalium sowie genügend hohe Temperaturen über einen genügend langen Zeitraum (Größenordnung: Jahrzehntausende) voraus. Bei Temperaturen unter 150°C werden merkbar negative Veränderungen aufgrund der Illitisierung nicht erwartet, zumal die Temperatur im Wirtsgestein aufgrund der aus den Abfällen resultierenden Wärmeleistung bereits nach einigen tausend Jahren deutlich abnimmt. (GRS 2016) nennt exemplarisch einen Temperaturverlauf von anfänglich 150°C im Buffer, der nach 2000 Jahren auf etwa 60°C und nach 5000 Jahren auf etwa 50°C zurückgeht. Für Temperaturen von 100°C und von 75°C setzt eine sichtbare Illitisierung frühestens nach 10.000 bzw. nach 100.000 Jahren ein. Unter diesen Bedingungen wäre also keine signifikante Illitisierung im Buffer oder Wirtsgestein zu erwarten.

Änderung von mechanischen / physikalische Gesteinseigenschaften

Bei Temperaturen von über 110°C kann es in Tonstein zu einer geringen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit kommen (vgl. Ausführungen in Kapitel 2.4.2): bedingt durch die thermisch induzierte Kontraktion ergibt sich ein besserer Kontakt der Mineralmatrix bei verringertem Porenraum. Dabei erhöht sich generell die Festigkeit und Steifigkeit des Tonsteins, zu Lasten von Plastizität und Quellvermögen.

Änderung der Sorptionseigenschaften

Es gibt Hinweise, dass für Europium, Nickel und die dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des Tonsteins erhöht. Für Cäsium ist eine Verringerung der Sorption zu erwarten (GRS 2016). Hinsichtlich der Sorptionseigenschaften kann daher die Wirkungsrichtung eines Wärmeeintrags nicht allgemeingültig angegeben werden kann.

Hydrochemische Wechselwirkung zwischen Porenlösung und Tonstein

Erhöhte Fluidtemperaturen erhöhen die Löslichkeit von SiO₂ im Tonstein, gefolgt von seiner erneuten Ausfällung bei Abkühlung. Hieraus folgt eine Porenzementierung mit Quarz oder amorphem Silica, durch die die Plastizität, die hydraulische Leitfähigkeit und die Quelfähigkeit des Tonsteins beeinflusst werden kann. Der Effekt ist bei Temperaturen bis zu 130°C geringfügig. Erst ab 150°C werden die Veränderungen von Plastizität und Quelfähigkeit signifikanter, die hydraulische Durchlässigkeit bleibt niedrig.

¹⁴ NAGRA 2002a, siehe dort S. 489

Im Bentonit-Buffer kann insbesondere die Verringerung der Quelfähigkeit durch SiO₂-Ausfällung bei höheren Temperaturen Auswirkungen auf die Funktion des Buffers haben.

Abiotische H₂S-Produktion in einem Ton bzw. tonhaltigen Material kann unter reduzierenden Bedingungen durch Wasserstoff-induzierte Pyritreduktion stattfinden und damit zu Korrosion und Gasbildung beitragen. Bei Temperaturen unter 150°C und H₂-Partialdrücken unter 3 Mpa wird die H₂S-Konzentration in Lösung aber alleine durch die Löslichkeit des Pyrits bestimmt, die Temperatur hat hier keinen signifikanten Einfluss.

Die abiotische H₂S-Produktion ist für den Buffer dann nicht relevant, wenn, z.B. durch Pyritoxidation, sichergestellt werden kann, dass im Buffer keine nennenswerten Mengen an Pyrit vorliegen.

2.4.3.2. Bildung und Verhalten von Fluiden

Lösungsfreisetzung

Unter ungesättigten bzw. drainierten Bedingungen kann Porenlösung oder Zwischenschichtwasser durch Erwärmung freigesetzt werden. Dies führt zum Porenkollaps und somit zu einer Konsolidierung (Tonsteinkontraktion). Aber auch unter annähernd gesättigten Bedingungen findet eine Tonsteinkontraktion nach Überschreiten der Temperatur des Expansion-Kontraktion-Übergangs (je nach Vorkonsolidierung 50 bis 80°C) statt. Thermische Tonsteinkontraktion bleibt auch nach einer anschließenden Abkühlung bestehen, ist also irreversibel.

Wärmeausdehnung von Fluiden im Wirtsgestein

Die thermische Expansion von wassergesättigtem Tonstein wird in der Regel durch die Expansion des Porenwassers dominiert, weil der Expansionskoeffizient des Wassers um etwa zwei Größenordnungen höher ist als der der Mineralkörner. Falls das sich thermisch ausdehnende Porenwasser wegen der geringen Permeabilität des Tonsteins nicht schnell genug in Richtung geringeren Druckes migrieren kann, kann dies zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks führen. Brüche oder Risse im Wirtsgestein können dann entstehen, wenn der Porenwasserdruck die minimale Hauptspannung und die Zugfestigkeit des Tonsteins überschreitet. In diesem Fall wird die Integrität des Gesteins beeinträchtigt.

GRS 2016 berichtet über eigene Laboruntersuchungen, bei denen durch eine Erhitzung von 30°C auf 80 – 90°C ein Anstieg des Porenwasserdrucks auf 10 Mpa gemessen wurde. Diese Laborversuche wurden bei undrainierten Bedingungen durchgeführt. Der sich räumlich unter Realbedingungen einstellende Porenwasserdruck dürfte niedriger liegen als der im Labor bestimmte Maximalwert: In einem In-Situ-Versuch im Untertagelabor Mont Terri wurde beim Erhitzen des Tonsteins von 15°C auf 50°C ein maximaler Porenwasserdruck von 4 Mpa beobachtet. Die Nagra geht in (NAGRA 2002b¹⁵) auf Basis von Modellrechnungen von einem möglichen Anstieg des Porenwasserdrucks auf 5 Mpa innerhalb einiger hundert Jahre aus. Der Druckanstieg ist bei Abkühlung des Gesteins reversibel.

Fluidmobilisierung im Wirtsgestein

Erhöhter Porenwasserdruck kann hydraulische Druckgradienten im Tonstein erzeugen, die dazu führen, dass Fluide in Richtung des geringeren Druckes migrieren. Dieser Prozess ist zeitlich

¹⁵ NAGRA 2002b, siehe dort S. 131

begrenzt und reversibel. Durch die annähernd gleichmäßige Erwärmung eines kompletten Einlagerungsfeldes sind die entstehenden Druckgradienten innerhalb des Feldes gering, so dass nur ein begrenztes Ausmaß thermisch induzierter Fluidbewegung erwartet wird.

Temperatureinfluss auf die Gasbildung

Nachgewiesen ist eine thermochemische Sulfatreduktion (TSR) mit Bildung von H₂S im Tonstein für Temperaturen ab 80°C. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein von Wasserstoff (aus Metallkorrosion) und Sulfat in Lösung, nachgeliefert aus dem umgebenden Gestein.

Die Halbwertszeit für die Umsetzung von Sulfat liegt dann bis 80°C im Bereich geologischer Zeiträume (GRS 2016). Bei 90°C wurde eine Halbwertszeit von ca. 210.000 Jahren berechnet, bei 125°C etwa 20.000 Jahre. Bei 150°C beträgt sie nur noch etwa 1.650 Jahre, bei 200°C wird die Hälfte des verfügbaren Sulfats bereits innerhalb von 10 Jahren umgesetzt.

Auch im Bentonit-Buffer kann es zu TSR kommen, wobei der Sulfatgehalt des Buffer-Materials bei der Herstellung beeinflusst (durch vorherige Pyritoxidation ggf. auch erhöht) werden kann.

Wasserdampf unter Endlagerbedingungen

Ein Verdampfen von Porenwasser ist höchstens in örtlich und zeitlich begrenztem Umfang in der Auflockerungs- und der ungesättigten Zone zu erwarten, solange das Gesamtsystem nach Verschluss des Endlagers nicht in einen gesättigten Gleichgewichtszustand zurückgekehrt ist (GRS 2016). Unter Endlagerungsbedingungen in ca. 700 m Tiefe beträgt der hydrostatische Druck nach der Wiederherstellung des Gleichgewichtszustands im Endlager ca. 7 Mpa. Sobald dieses Gleichgewicht im Tonstein erreicht ist, liegt der Siedepunkt des Wassers in der Endlagertiefe bei ca. 280°C. Dies ist eine Temperatur, die weit über die zu erwartenden Temperaturen in einem Endlager hinausgeht.

Die Anwesenheit von Wasserdampf bei Temperaturen von 150 – 250°C kann die Quelfähigkeit in Tonstein und Buffer reduzieren. (BGR 2016) enthält einen Hinweis, dass in einer Versuchsanordnung eine Überschreitung der Siedetemperatur (hier als „Boiling“ bezeichnet) die Barrierenintegrität von Bentonit zerstörte. Temperaturen oberhalb der (druckabhängigen) Siedetemperatur von Wasser sollten daher in Endlagerkonzepten mit Tonstein bzw. Bentonit grundsätzlich vermieden werden, um die Integrität der Barrieren nicht zu gefährden. Die Siedetemperaturen ergeben sich konzeptspezifisch aus der Entwicklung der Temperatur- und Druckverhältnisse in den Einlagerungsbereichen.

2.4.3.3. Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse

(GRS 2016¹⁶) kommt zu dem Schluss, dass *„eine Erwärmung der Nahfeldbarrieren über 122°C hinaus zu einer erheblichen Verringerung der Population und Aktivität der Mikroben führen [kann] und ... als positiv zu bewerten [ist].“* Dieser Prozess ist allerdings nach Abklingen des Temperaturimpulses reversibel (Wiederbesiedelung, z.B. aus Endosporen).

Methanproduktion durch Mikroorganismen kann zu einem Überdruckaufbau und ggf. zur Rissbildung beitragen oder die Sulfatreduktion begünstigen. Methanogene Mikroben bleiben bei Temperaturen von bis zu 122°C aktiv.

¹⁶ GRS 2016, siehe dort S. 90

Sulfat-reduzierende Bakterien können zur Bildung von H₂S beitragen. Sie haben ein optimales Wachstum im Temperaturbereich von 80 – 95°C, bei über 120°C werden sie inaktiv.

Unterhalb von 100°C sind mikrobielle Prozesse als Randbedingung immer zu berücksichtigen, wobei ihre Intensität neben der Temperatur auch von den sonstigen Lebensbedingungen der Mikroorganismen und den im Wirtsgestein herrschenden Randbedingungen abhängt.

2.4.4. Bestehende Festlegungen / Empfehlungen für Grenztemperaturen bei der Lagerung in Tonstein

2.4.4.1. Schweiz

Die Standortauswahl für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz erfolgt nach dem Sachplanverfahren, das in (BFE 2008) beschrieben ist. Ein zentraler Bestandteil des Verfahrens ist ein Kriteriensatz zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit. Ein Bezug zum Wärmeeintrag findet sich in dem Kriterium „Lagerbedingte Einflüsse“. Als relevante Indikatoren sind diesem Kriterium unter anderem die Parameter Wärmeeintrag und Wärmeleitfähigkeit zugeordnet. Eine konkrete Temperaturbegrenzung für den Bentonit-Buffer oder den Tonstein findet sich in dem Kriteriensatz nicht. Entsprechende Festlegungen sind vielmehr vom Betreiber im Rahmen der Konzeptentwicklung und Antragstellung in den verschiedenen Stufen des Auswahlverfahrens zu treffen.

Die Nagra hat Festlegungen für die anzustrebende Maximaltemperatur in ihren technischen Berichten für die Etappen 1 (NAGRA 2008) und 2 (NAGRA 2014) des Auswahlverfahrens getroffen. Diese Festlegung bezieht sich nicht auf die Behälteroberfläche sondern auf die Grenzfläche zwischen dem Bentonit und dem umgebenden Tonstein („Stollenwand“). Für die Etappe 1 findet sich in (NAGRA 2008¹⁷) folgende Festlegung: *Die maximale Temperatur an der Stollenwand ist nach einigen hundert Jahren erreicht und beträgt ca. 85 bis 95°C [...], ggf. auch bis ca. 110°C (abhängig von In-situ-Temperatur, Wärmeleistung der Behälter und der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins).*“

Für diese Temperaturen werden folgende Effekte im Wirtsgestein erwartet:

- thermisch induzierte Spannungen,
- Porenwasser Überdruck sowie
- gegebenenfalls eine Reduktion der mechanischen Festigkeit des Gesteins im Umfeld der Lagerstollen und eine Erhöhung der Kriechrate, wobei dies aufgrund der bereits verfüllten Lagerstollen nicht zu einer signifikanten Vergrößerung der Auflockerungszone führe, sondern die Selbstabdichtung beschleunigen könne.

Für die Etappe 2 werden in (NAGRA 2014) die Angaben zur Temperatur insofern angepasst, als sich der Hinweis auf eine evtl. mögliche Erhöhung auf 110°C nicht mehr findet und damit der Zielwert klar auf 85°C bis 95°C an der Stollenwand festgelegt ist. Im Hinblick auf möglicherweise resultierende temperaturinduzierte Effekte werden nur noch die beiden erstgenannten Punkte aufgeführt (auf die *Reduktion der mechanischen Festigkeit des Gesteins im Umfeld der Lagerstollen und eine Erhöhung der Kriechrate* wird nicht mehr hingewiesen).

Hinsichtlich mineralogischer Auswirkungen unterstellt die Nagra keine nennenswerten Effekte, da der Opalinuston bei seiner Versenkung ähnliche Temperaturen über einen deutlich längeren

¹⁷ NAGRA 2008, siehe dort S. 135

Zeitraum erfahren habe. Entsprechende Ausführungen finden sich in verschiedenen Arbeiten (vgl. z.B. (GRS 2010)).

Die genannten Temperaturen an der Stollenwand gehen zurück auf Betrachtungen zum thermischen Verhalten des Endlagersystems im „Entsorgungsnachweis“, der Nagra (NAGRA 2002a und NAGRA 2002b). Die Umgebungstemperatur im Opalinuston in 650 m Tiefe beträgt demnach 38°C. Der Bentonit hat anfänglich einen geringen Wassergehalt von ca. 2 %, so dass für die ersten 1000 Jahre nach Abschluss der Einlagerung eine geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,4 W/m K angenommen wird, da mit einer schnellen Aufsättigung nach Beendigung der Einlagerung nicht zu rechnen sei. Die auslegungsbestimmende Größe ist die Temperatur des Bentonits: Unter Bezug auf verschiedene Untersuchungen geht die Nagra davon aus, dass das als Buffer vorgesehene Bentonitgranulat ab einer Temperatur von 150°C etwa 50 % seiner Quellfähigkeit verliert. Bei Temperaturen bis 125°C wird hingegen nur eine geringe Abnahme der Quellfähigkeit erwartet. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des ungesättigten Bentonits und der relativ hohen Umgebungstemperatur hält die Nagra es für „schwierig“ eine Temperatur unter 125°C im gesamten Bentonit-Buffer einzuhalten. Für die Endlagerauslegung wird daher angestrebt, dass in der äußeren Hälfte des Bentonit-Buffers Temperaturen von 125°C unterschritten werden sollen, um wenigstens in diesem Bereich die maximale Quellfähigkeit des Bentonits zu erhalten und eine gute hydraulische Abdichtung der Behälter zu erreichen.

Für diese Zielgröße wurde in (NAGRA 2002b) ein Endlagerkonzept mit folgenden variablen Parametern entworfen:

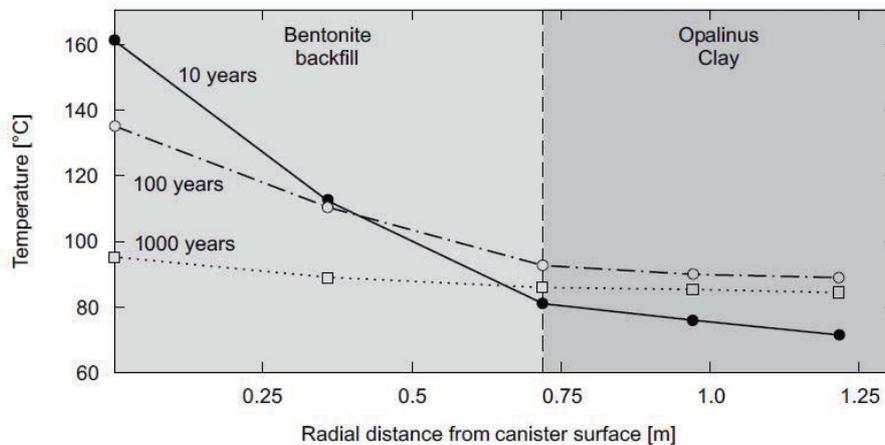
- Wärmeleistung der Gebinde: max. 1500 W pro Gebinde mit abgebrannten Brennelementen und etwa 30 – 40 Jahre Abklingzeit für die verglasten Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung,
- Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken 40 m,
- Gebindeabstand innerhalb einer Strecke 3 m und
- Wandstärke des Buffers 72,5 cm bzw. 78 cm je nach Behältertyp.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des ungesättigten Bentonits stellen sich unter den genannten Bedingungen nach Abschluss der Einlagerung an der Behälteroberfläche Temperaturen im Bereich von 140 – 160°C ein (sowohl für HAW als auch für BE).

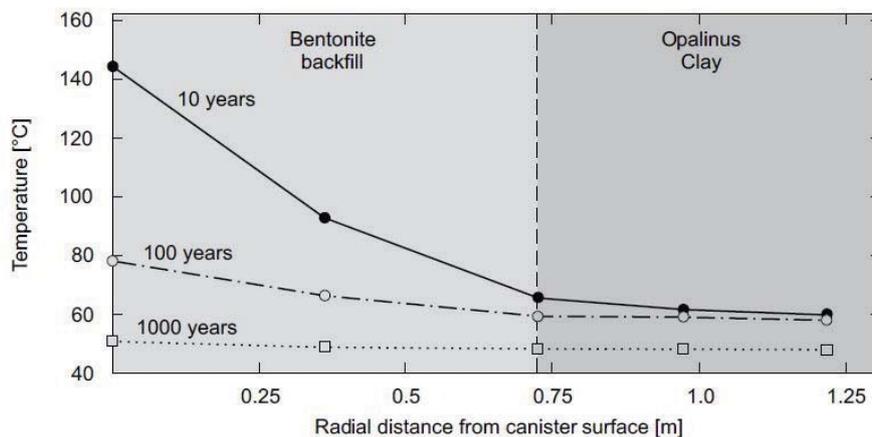
Für HAW sinkt die Temperatur an der Behälteroberfläche aufgrund der abnehmenden Wärmeleistung (vgl. Ausführungen in Kapitel 2.2) schneller ab als für die abgebrannten Brennelemente. Unter den genannten Ausgangsbedingungen liegt sie bereits nach 100 Jahren bei ca. 80°C, während Behälter mit abgebrannten Brennelementen erst nach 1000 Jahren eine Temperatur von 100°C unterschreiten.

Die Entwicklung der Temperatur an der Behälteroberfläche sowie der Verlauf im Bentonit-Buffer und in den ersten Dezimetern des Wirtsgesteins ist in Abbildung 2-15 gemäß (NAGRA 2002b) dargestellt.

Abbildung 2-15: Temperaturverlauf im Nahfeld eines Endlagergebindes für das Endlagerkonzept im Opalinuston gemäß (NAGRA 2002b)



- a) Umgebung eines Endlagergebindes mit abgebrannten Brennelementen, Wärmeleistung zum Zeitpunkt der Einlagerung 1490 W



- b) Umgebung eines Endlagergebindes mit verglasten Spaltprodukten

Bedingungen für a) und b): Wärmeleitfähigkeit des (trockenen) Bentonits 0,4 W/mK, Wärmekapazität 1200 J/m³K, unbeeinflusste Umgebungstemperatur 38°C

Quelle : NAGRA 2002b, siehe dort S. 127 f.

2.4.4.2. Deutschland

In den in Deutschland durchgeführten Forschungsvorhaben zu Endlagern in Tonstein finden sich folgende Annahmen zu Grenztemperaturen:

- Im Projekt GENESIS (DBEtec 2007¹⁸) wird eine Grenztemperatur von 100°C angesetzt, die an keiner Stelle des Bentonit-Buffers überschritten werden soll. Für den Übergang vom Buffer zum Tonstein wird in dieser Konstellation eine Temperatur von 90°C ermittelt. Die Temperaturbegrenzung wird damit begründet, dass der Bentonit bis 100°C seine

¹⁸ DBEtec 2007, siehe dort S. 6 und 24

„einschlusswirksame Funktion besitzt“. Oberhalb dieser Temperatur könnte eine Wasserdampffreisetzung und „ungewollte chemische Veränderungen im Material auftreten“. Außerdem wird auch die Möglichkeit der Bildung von Kohlenwasserstoffen (thermogene Gase und Erdöl) durch Zersetzung organischer Substanzen thematisiert. Es wird auf einen starken Anstieg der Unsicherheiten in Bezug auf die einschlusswirksame Funktion des Bentonits bei Temperaturen oberhalb von 100°C verwiesen.

- Im aktuelleren Projekt AnSichT (GRS 2014) wird unter Bezug auf Untersuchungen von Jobmann aus dem Jahr 2013 eine Grenztemperatur von 150°C im Bentonit-Buffer angesetzt. Die Arbeit legt damit ähnliche Temperaturen wie der Entsorgungsnachweis der Nagra zugrunde.

Unter Berücksichtigung der von der Nagra verwendeten Temperaturkriterien sowie aktueller nationaler Forschungsergebnisse ist zusammenfassend Folgendes festzustellen: Die maximale Temperatur im Buffer sollte ca. 150°C nicht überschreiten. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Quellfähigkeit sollte jedoch ein Teil des Buffermaterials nicht über 125°C erhitzt werden. Thermisch induzierte mineralogische Prozesse im Tonstein können ausgeschlossen werden, wenn die Versenkungstemperatur des Gesteins nicht langfristig überschritten wird. Bei entsprechender Auslegung des Endlagers können (auch bei den genannten Temperaturen im Buffer) am Übergang vom Buffer zum Tonstein Temperaturen deutlich unter 100°C erreicht werden.

2.4.4.3. Frankreich

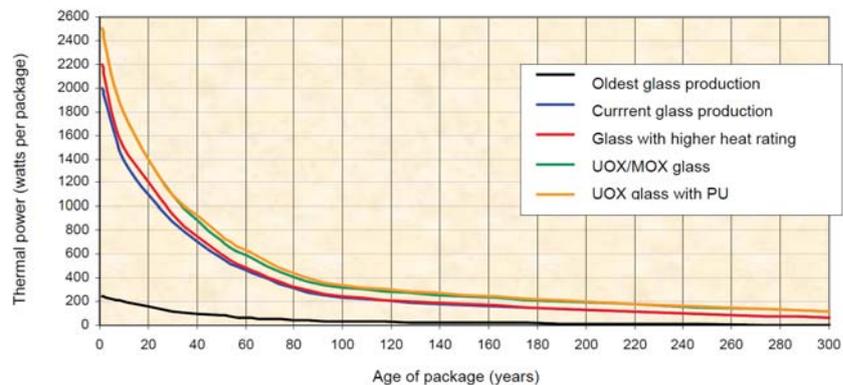
In Frankreich wird ein Endlager in einer Tonsteinformation geplant, in dem im Wesentlichen verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente endgelagert werden sollen. Für die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente liegen keine konkreten Planungen vor sondern lediglich eine kursorische Prüfung als optionale Vorgehensweise. Für die thermische Auslegung steht daher die für die verglasten Spaltprodukte charakteristische Entwicklung der Wärmeleistung im Fokus, die über die Zeit eine deutlich schnellere Abnahme aufweist (vgl. Abbildung 2-2).

Das französische Endlagerkonzept sieht vor, eine Temperatur von maximal 100°C an der Oberfläche der Endlagergebäude und zusätzlich im Wirtsgestein eine Maximaltemperatur von 90°C zu unterschreiten (Dossier Argile 2005). Dabei ist neben der Temperatur auch die als „thermale Phase“ bezeichnete Einwirkdauer von Bedeutung: Aus den Untersuchungen zur Machbarkeit der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in der dafür vorgesehenen geologischen Tonsteinformation des Callovo-Oxfordian wurde ergänzend geschlussfolgert, dass eine Temperatur von 70°C, die über einen Zeitraum von 10.000 Jahren auf den Tonstein eingewirkt hat, nachweislich nicht zu relevanten mineralogischen Umwandlungen des Wirtsgesteins führt.

Hieraus leitet sich eine erweiterte Temperaturanforderung ab, die auch den zeitlichen Verlauf des vom Endlager ausgehenden Temperaturimpulses berücksichtigt: Neben der Grenztemperatur an der Oberfläche der Endlagergebäude (maximal 100°C) und der Temperatur im umgebenden Tonstein bzw. Buffer (maximal 90°C) gilt, dass ein Abklingen der Temperatur im Wirtsgestein auf Werte unterhalb 70°C konservativ innerhalb der ersten 1.000 Jahre nachzuweisen ist (Andra 2005a).

Dieser Ansatz ist kompatibel mit der Wärmeleistung der für die Endlagerlagerung vorgesehenen verglasten Abfälle, deren Wärmeleistung bereits innerhalb der ersten etwa 300 Jahre nach ihrer Herstellung weitgehend abgeklungen ist.

Abbildung 2-16: Wärmeleistung französischer Abfallgebinde mit verglasten Abfällen nach Abfalltyp und Alter der Gebinde



Quelle: Andra 2005a

Hinsichtlich der einzelnen Einlagerungsbereiche geht das französische Konzept davon aus, dass diese so angeordnet werden können, dass sie thermisch quasi voneinander unabhängig sind (Andra 2005b), dass es also nicht zu einer Überlagerung der Temperaturfelder kommt, und dass sich die Temperaturen in relativ kurzen Zeiträumen (nach ca. 1.000 Jahren für verglaste Abfälle, nach ca. 3.000 Jahren für optional betrachtete abgebrannte Brennelemente) auf niedrigem Niveau (bei max. ca. 45°C für beide Abfallarten) im Einlagerungsbereich homogenisieren.

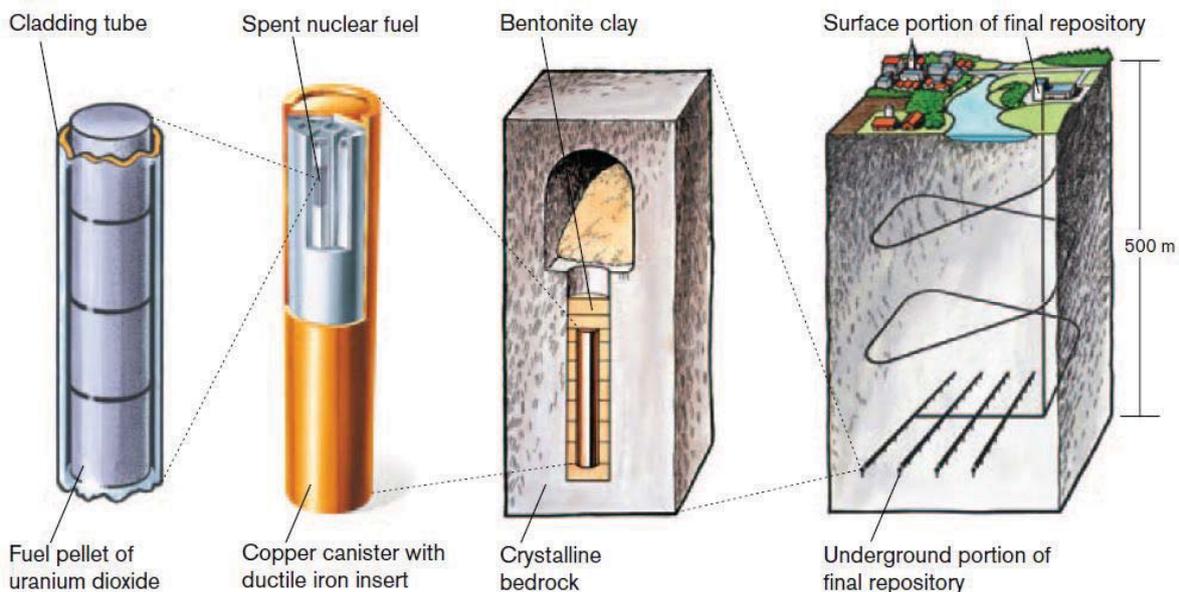
Für die optionale Endlagerung abgebrannter Brennelemente werden die gleichen Anforderungen hinsichtlich der Temperaturbegrenzungen zu Grunde gelegt, allerdings bei längerer Einwirkdauer des Wärmeeintrags. Bei Einhaltung der Temperaturvorgaben wird weder für verglaste hochradioaktive Abfälle noch für die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente mit einer maßgeblichen thermisch bedingten Veränderung der Gesteinseigenschaften gerechnet.

2.5. Wirtsgesteinstyp Kristallin

2.5.1. Überblick zur Endlagerung im Kristallin

Für die Endlagerung in kristallinen Gesteinen liegen mit den Projekten in Schweden und Finnland fortgeschrittene Konzepte vor. Da beide Konzepte weitgehend auf den Planungen der schwedischen SKB basieren, wird in den folgenden Betrachtungen das schwedische Konzept zugrunde gelegt. Ebenso wie bei der Endlagerung im Tonstein ist zum Einschluss der Abfallgebinde ein Buffer aus Bentonit vorgesehen, der einen wesentlichen Einfluss auf die thermische Auslegung hat, da das kristalline Gestein selber aufgrund der hohen Temperaturen während der Genese eine geringe Sensibilität für thermische Einflüsse in den bei der Endlagerung relevanten Temperaturbereichen zeigt. Das in Schweden geplante „KBS-3 Konzept“ ist in Abbildung 2-17 dargestellt.

Abbildung 2-17: Das KBS-3 Konzept für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Granit gemäß (SKB 2011-1)



Quelle: (SKB 2011-1, siehe dort S. 146)

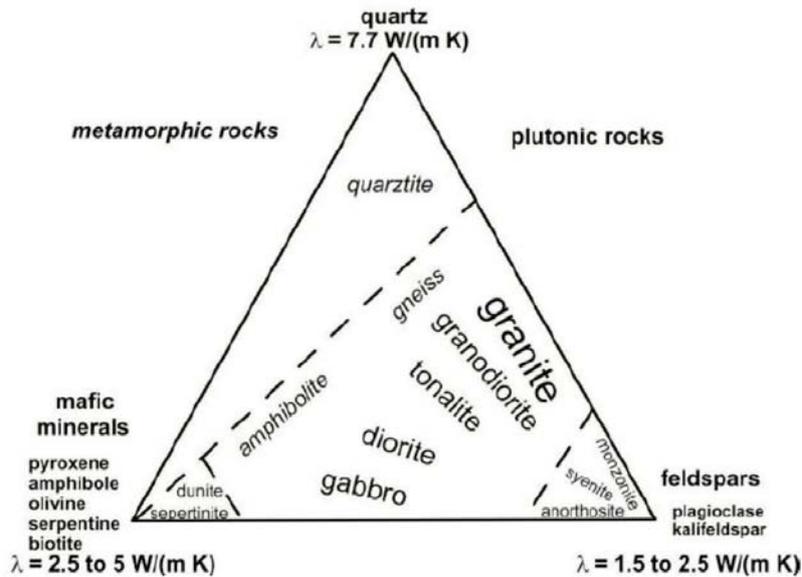
2.5.2. Relevante Materialeigenschaften kristalliner Gesteine

Die Minerale der kristallinen Gesteine besitzen aufgrund des Druck- und Temperatureinflusses während der Genese keine Quellfähigkeit, so dass das Kristallin kein Selbstabdichtungsvermögen aufweist. Da kristalline Gesteine eine kleine Porengröße und geringe Konnektivität der Poren aufweisen, besitzt die Gesteinsmatrix an sich eine geringe hydraulische Durchlässigkeit, die jedoch aufgrund der Neigung zur Bildung von Klüften nur bedingt zum Tragen kommt (Nagra 2008).

Die Wärmeleitfähigkeit kristalliner Gesteine ist wesentlich von der Mineralzusammensetzung sowie von der Dichte (bzw. Porosität) des Gesteins abhängig. Die Abhängigkeit von der Mineralzusammensetzung ist in (Clauser & Huenges 1995) ausführlich beschrieben und schematisch entsprechend Abbildung 2-18 zusammengefasst. Wesentlich ist dabei ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit dem Gehalt an Quarz einerseits und dem Gehalt mafischer Minerale andererseits. Die Wärmeleitfähigkeit steigt außerdem mit der Gesteinsdichte. In Abhängigkeit hiervon werden

beispielsweise für den schwedischen Standort Laxemar Werte der Wärmeleitfähigkeit zwischen 2,2 und 3,4 W/mK angegeben (GRS 2016).

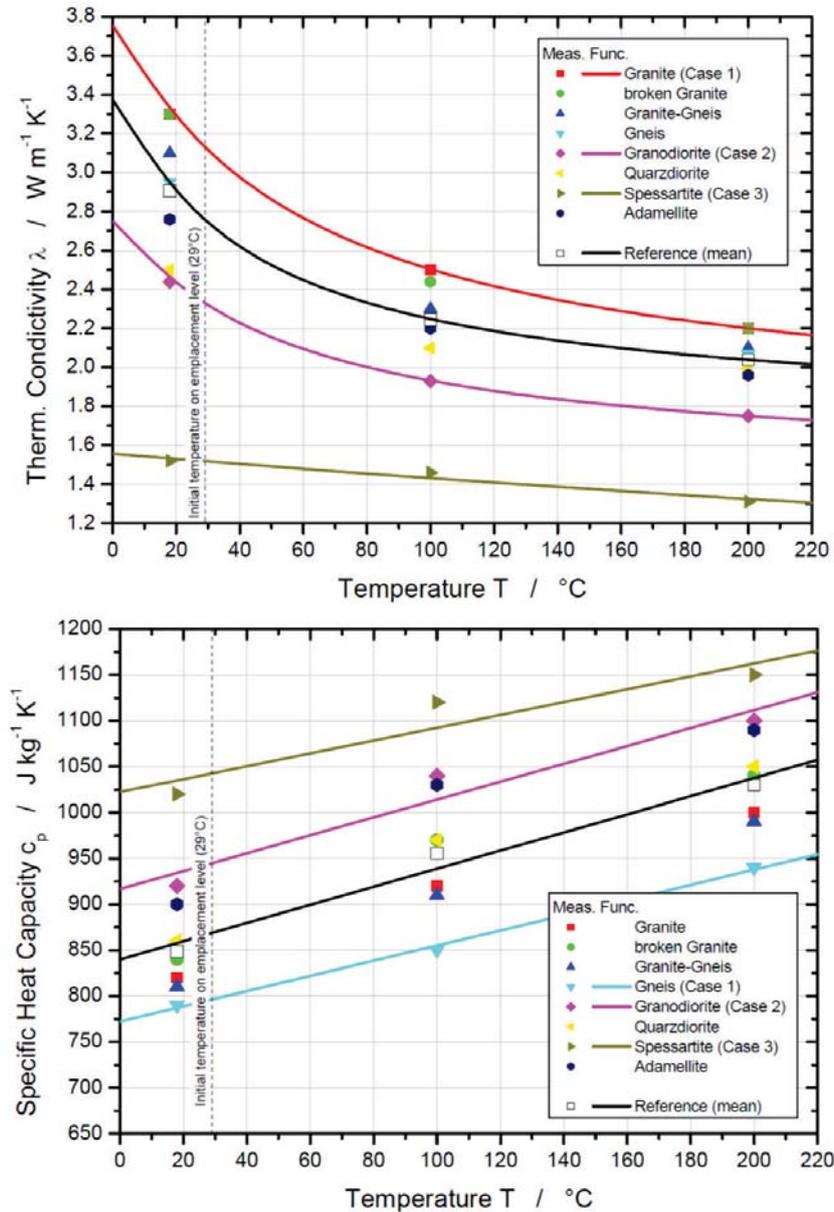
Abbildung 2-18: Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit metamorpher und plutonischer Gesteine und ihren Anteilen gesteinsbildender Minerale (Clauser & Huenges 1995)



Quelle: (Clauser & Huenges 1995)

Sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die spezifische Wärmekapazität zeigen eine gewisse Temperaturabhängigkeit, die in Abbildung 2-19 aus (GRS 2005) am Beispiel verschiedener Kristallinproben dargestellt ist. Während die Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich bis zu 100°C (mit Ausnahme von Spessartit) exponentiell abnimmt, steigt die spezifische Wärmekapazität durchgehend linear mit steigender Temperatur an.

Abbildung 2-19: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität von Kristallinproben in Abhängigkeit von der Temperatur



Quelle: (GRS 2005, siehe dort S. A-82)

2.5.3. Thermisch induzierte Prozesse im kristallinen Gestein

Nachfolgend werden die temperaturabhängigen Prozesse im Tonstein zusammengestellt, die – sofern nicht anders angegeben – der Stoffsammlung in (GRS 2016), sowie Unterlagen der schwedischen SKB entnommen sind. Sie wurden im Hinblick auf eine systematische Gegenüberstellung der Wirtsgesteinstypen gruppiert und ggf., auch in Analogie zu anderen Wirtsgesteinstypen und besonders im Hinblick auf die Buffer-Eigenschaften, ergänzt.

2.5.3.1. Verhalten von Wirtsgestein und Buffer

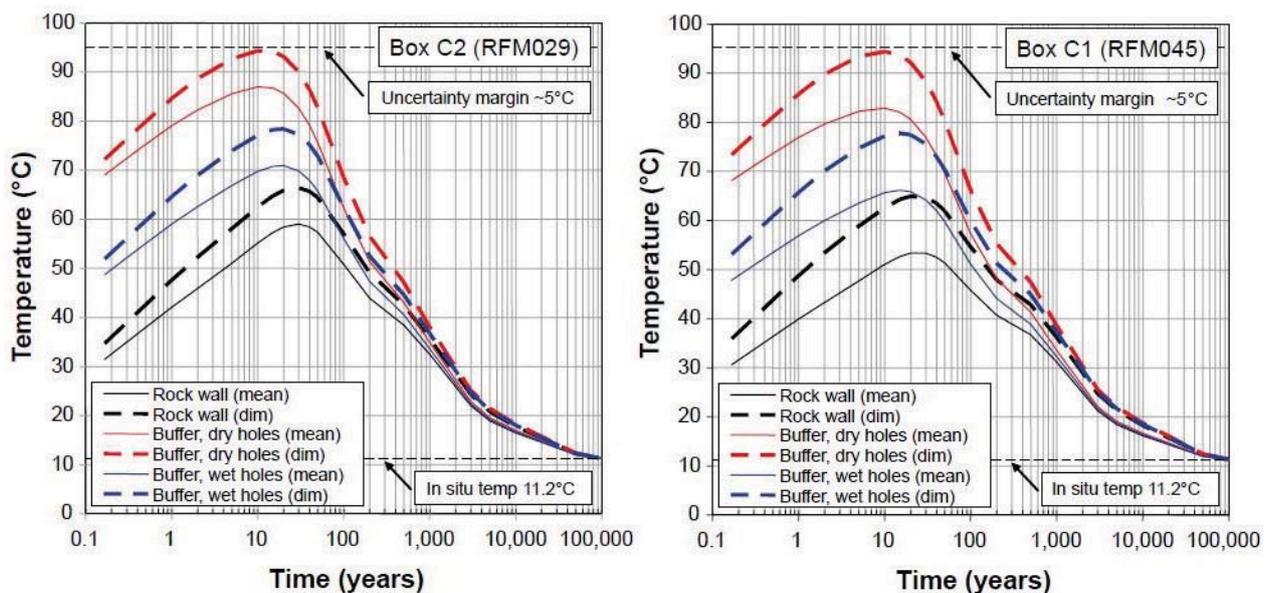
Wärmeausdehnung des Gesteins

Gemäß (GRS 2016¹⁹) führt die geringe Wärmedehnung dazu, dass bei Temperaturen unter 250°C die thermisch induzierten Spannungen in kristallinen Gesteinen gering sind. In Bezug auf das thermomechanische Verhalten verweist (GRS 2016²⁰) jedoch darauf, dass „trotz der geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten je nach Temperatureinwirkung hohe Spannungen möglich [sind].“ Beim Überschreiten bestimmter Zugfestigkeiten könnten diese zu Brüchen führen. Um den Aufbau solcher ungünstigen Spannungen sicher zu vermeiden, wird in (Jentzsch 2002) die Unterschreitung einer Temperatur von 100°C im Wirtsgestein empfohlen.

Thermisch induzierte Rissbildung im Kristallingestein

Im Sicherheitsbericht für den schwedischen Standort Forsmark werden alle denkbaren thermomechanischen Beeinträchtigungen des Granits für die entsprechend dem Endlagerkonzept erwarteten Temperaturverhältnisse untersucht (SKB 2011-2²¹) Abbildung 2-20 zeigt den ermittelten Temperaturverlauf über die Zeit im Buffer und am Bohrlochrand für das KBS-3 Konzept bei einer Auslegungstemperatur von maximal 100°C im Buffer. Im Ergebnis wird für diese Temperaturverhältnisse lediglich eine Auflockerung im Nahbereich des Bohrlochs durch thermisch induzierte Rissbildung für möglich gehalten.

Abbildung 2-20: Temperaturverlauf im Buffer und am Bohrlochrand für das KBS-3 Endlagerkonzept im schwedischen Forsmark



mean = Mittelwert, dim = Dimensionierung für den Fall ungünstiger Wärmeleitfähigkeit

Quelle: (SKB 2011-2, siehe dort S. 329)

Kriechverhalten

Erst bei mehreren hundert Grad Gebirgstemperatur und entsprechenden Druckbedingungen reagieren Kristalline Gesteine mit plastischer Verformung. Unter den bei der Endlagerung zu betrachtenden Bedingungen besitzen kristalline Gesteine kein plastisches Verhalten, insofern

¹⁹ GRS 2016, siehe dort S. 123, unter Bezug auf (GRS 2005)

²⁰ GRS 2016, siehe dort S. 125 unter Bezug auf (AkEnd 2002)

²¹ SKB 2011-2, siehe dort S. 329 ff.

ergibt sich hier kein relevanter Zusammenhang mit einem Wärmeeintrag aus den eingelagerten Abfällen.

Volumenänderung von Versatz- bzw. Buffer-Material

Der bisherige Kenntnisstand zeigt kein konsistentes Bild der Quelldruckabhängigkeit im Buffer von der Temperatur (GRS 2016). Grundsätzlich scheint die Quellfähigkeit von Tonmineralen nach dem Erhitzen abzunehmen, und zwar bereits bei Temperaturen um 100°C, bedingt durch Porenkontraktion und ggf. Umlösung / Ausfällung von Silikat.

Änderung der Durchlässigkeit

Die Durchlässigkeit von Kristallingesteinen wird im Wesentlichen durch ihr Kluftsystem bestimmt. Sie wird durch Temperaturen im Bereich von 100°C nicht beeinflusst.

Die Wasserdurchlässigkeit des Bentonit-Buffers ist nach einer Erhitzung auf Werte oberhalb des Extraktions-Kontraktions-Übergangs (bei ca. 80°C) mit der von nicht erhitztem Bentonit vergleichbar (GRS 2016). Durch thermische Kontraktion und Porenzementierung kann sie sich verringern. Eine Temperatur oberhalb von 80°C hat demnach also keine negativen Auswirkungen auf die Durchlässigkeit.

Mineralumwandlungen

Temperaturbedingte Mineralumwandlungen im Kristallingestein treten erst bei Temperaturen von mehreren hundert Grad auf, unter Endlagerbedingungen bei vergleichsweise niedrigem lithostatischem Druck und Temperaturen um 100°C sind solche Effekte nicht relevant.

Im Bentonit-Buffer kann die Umwandlung von Smektit zu Illit (Illitisierung) Auswirkungen auf das Retentionsverhalten des Buffers haben. Die Illitisierung setzt ein ausreichendes Angebot an Kalium sowie genügend hohe Temperaturen über einen genügend langen Zeitraum voraus. Die Halbwertszeit für die Umsetzung von Smektit in Illit liegt beispielsweise bei 150°C bei etwa 3.500 Jahren und bei 200°C bei etwa 20 Jahren.

Für Temperaturen von 100°C und von 75°C setzt eine sichtbare Illitisierung frühestens nach 10.000 bzw. nach 100.000 Jahren überhaupt erst ein. Über die hiermit verbundenen Halbwertszeiten des Smektitumsatzes liegen keine Informationen vor, sie dürften im Bereich geologischer Zeiträume liegen. Dem gegenüber klingt eine durch das Endlager verursachte Anfangstemperatur von bis zu 150°C im Buffer bereits nach 2.000 Jahren auf etwa 60°C und nach 5.000 Jahren auf etwa 50°C ab. Unter diesen Bedingungen wäre also keine signifikante Illitisierung im Buffer zu erwarten.

Änderung von mechanischen / physikalischen Gesteinseigenschaften

Die relevanten mechanischen Eigenschaften von Kristallingestein werden durch Temperaturen im Bereich von 100°C nicht unmittelbar beeinflusst. Erst bei Temperaturen ab etwa 450°C werden verringerte Gesteinsdichten und Zugfestigkeiten beobachtet, die auf die Bildung von Mikrorissen und daraus folgender Volumenvergrößerung zurückgeführt werden.

Änderung der Sorptionseigenschaften von Kristallingestein bzw. Buffer

Kristallingestein selbst besitzt keine für die Endlagersicherheit relevanten Sorptionseigenschaften gegenüber Radionukliden, insofern ergibt sich hier keine Temperaturabhängigkeit (siehe auch BGR 2016).

Änderungen im Sorptionsverhalten des Bentonit-Buffers ergeben sich nicht unmittelbar aus dem Wärmeeintrag, sondern aus der ggf. erfolgenden Illitisierung von Smektit (siehe Abschnitt „Mineralumwandlungen“).

Hydrochemische Wechselwirkung zwischen Porenlösung und Kristallingestein bzw. Buffer

Relevante temperaturinduzierte oder temperaturabhängige Wechselwirkungen sind nach heutigem Kenntnisstand für das Buffer-Material zu betrachten, für kristallines Wirtsgestein hingegen zu vernachlässigen.

Im Buffer kann es durch bei höherer Temperatur intensivere Lösung von Silikat und seiner Ausfällung bei Abkühlung zu einer Verringerung der Quelfähigkeit kommen. Eine für Tonstein ggf. relevante abiotische H₂S-Produktion kann für den Buffer vernachlässigt werden, wenn pyritarmer oder entsprechend behandelter Bentonit verwendet wird.

2.5.3.2. Bildung und Verhalten von Fluiden

Lösungsfreisetzung

Weder für den Mineralbestand noch für die Gesteinsmatrix von Kristallingestein wird von einer Möglichkeit der Lösungsfreisetzung durch Wärmeeintrag berichtet.

Wärmeausdehnung von Fluiden und Fluidmobilisierung im Kristallingestein

Über Kristallin-spezifische Untersuchungen zur Wärmeausdehnung von Fluiden in Kristallingestein wird in (GRS 2016) nicht berichtet. Bei den heute für Endlager im Kristallin diskutierten Temperaturen (max. 100°C im Buffer, dadurch deutlich geringere Temperaturen im Wirtsgestein) erscheinen die Auswirkungen auf die Wirtsgesteinsintegrität und die Endlagersicherheit nicht relevant.

Aufgrund des geringen Porenvolumens und der geringen Konnektivität vorhandener Poren ist auch eine thermisch induzierte Fluidmobilisierung in der Kristallinmatrix vernachlässigbar. Denkbar ist eine Fluidmobilisierung im Kluftsystem der Wirtsgesteinsformation, bedingt durch wärmegetriebene Konvektion. Eine Lösungszirkulation tritt dann in Folge von Dichteunterschieden auf, wenn eine Wärmequelle tiefer als eine Wärmesenke liegt. Das erwärmte Fluid erfährt dann aufgrund geringerer Dichte einen Auftrieb.

Temperatureinfluss auf die Gasbildung

Im Bentonit-Buffer eines Endlagers könnte es bei erhöhten Temperaturen zu einer thermochemischen Sulfatreduktion kommen, der mit einer Minimierung des Sulfatgehalts im Bentonit begegnet werden kann.

Wasserdampf unter Endlagerbedingungen

Unter den Bedingungen eines verschlossenen Endlagers nach Einstellung des Druckgleichgewichts liegt die Siedetemperatur von Wasser bei etwa 280°C. Eine solche Temperatur wird im

Endlager nicht auftreten. Wasserdampf kann daher nur im Zeitraum bis zur Aufsättigung von Buffer (und ggf. Wirtsgestein) und bis zur Wiederherstellung der ursprünglichen Druckbedingungen auftreten. Die Anwesenheit von Wasserdampf bei Temperaturen von 150 – 250°C kann in diesem Zeitraum die Quelfähigkeit im Buffer reduzieren. (BGR 2016) enthält einen Hinweis, dass in einer Versuchsanordnung eine Überschreitung der Siedetemperatur (hier als „Boiling“ bezeichnet) die Barrierenintegrität von Bentonit zerstörte. Temperaturen oberhalb der (druckabhängigen) Siedetemperatur von Wasser sollten daher in Endlagerkonzepten mit Bentonit-Buffer grundsätzlich vermieden werden, um die Integrität der Barrieren nicht zu gefährden. Die Siedetemperaturen ergeben sich konzeptspezifisch aus der Entwicklung der Temperatur- und Druckverhältnisse in den Einlagerungsbereichen.

2.5.3.3. Temperatureinfluss auf mikrobielle Prozesse

In Endlagerkonzepten im Wirtsgesteinstyp Kristallin werden Grenztemperaturen an der Behälteroberfläche oder im Buffer von maximal 100°C diskutiert, daraus folgen Temperaturen im Wirtsgestein von deutlich unter 90°, die mit der Zeit abnehmen. Unter diesen Bedingungen hat die Temperatur im Wirtsgestein keinen positiven Einfluss im Sinne einer Verringerung der mikrobiellen Aktivität.

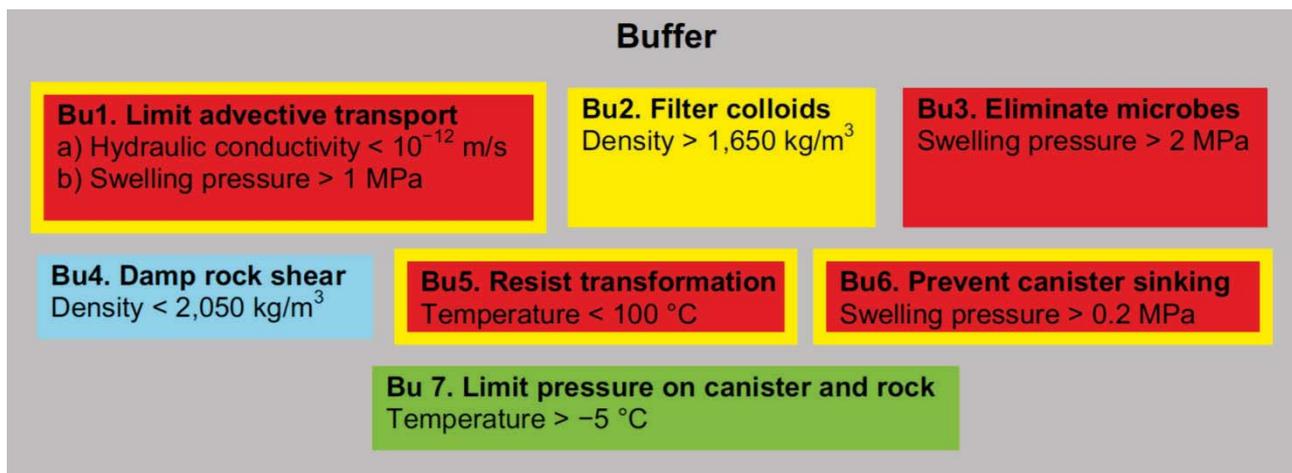
Eine Erwärmung der Nahfeldbarrieren, d.h. des Bentonit-Buffers, über 122°C hinaus kann zu einer erheblichen Verringerung der Population und Aktivität der Mikroorganismen führen. Der Prozess ist allerdings nach Abklingen des Temperaturimpulses reversibel (Wiederbesiedelung, z.B. aus Endosporen). Unterhalb von 100°C sind mikrobielle Prozesse als Randbedingung immer zu berücksichtigen, wobei ihre Intensität neben der Temperatur auch von den sonstigen Lebensbedingungen der Mikroorganismen und den im Kristallingestein herrschenden Randbedingungen (Fluidgehalt, Oberflächen, Nährstoffangebot und Angebot an Elektronenakzeptoren als Energielieferanten) abhängt.

2.5.4. Bestehende Festlegungen / Empfehlungen für Grenztemperaturen bei der Lagerung in Kristallingestein

Das schwedische Regelwerk umfasst zwei Vorschriften, die spezifische Anforderungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle formulieren: Der Regulatory Code 2008:37 (SSMFS 2008:37) regelt den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umgebung und umfasst u.a. Festlegungen zulässiger Risiken für heutige und zukünftige Generationen sowie zum Betrachtungszeitraum bei der Nachweisführung. Die Sicherheitsanforderungen für ein Endlager sind im Regulatory Code 2008:21 (SSMFS 2008:21) dargelegt. Im Hinblick auf die Funktion der Barrieren verweist das Regelwerk darauf, dass temperaturbezogene Faktoren bei der Auslegung zu berücksichtigen sind. Entsprechend dem insgesamt sehr übergeordneten Charakter dieses Codes finden sich keine konkretisierenden Ausführungen. Eine Grenztemperatur, die bei der Endlagerauslegung zu berücksichtigen wäre, ist im schwedischen Regelwerk nicht vorgegeben.

Die konkreten Design-Vorgaben für die Endlagerauslegung wurden von der SKB entwickelt und in dem Bericht (SKB 2009) dargelegt. Dem Buffer werden dabei wesentliche Sicherheitsfunktionen zugewiesen (siehe Abbildung 2-21). Rote Felder mit gelber Umrandung repräsentieren die zentralen Anforderungen bezüglich des Schutzes des Behälters vor Korrosion und zur Nuklidrückhaltung.

Abbildung 2-21: Sicherheitsfunktionen des Buffers im KBS-3 Konzept nach (SKB 2009)



Quelle: (SKB 2009)

Zur Einhaltung der Anforderung „Bu1.“ (Begrenzung des advektiven Transports) führt (SKB 2009) aus, dass der angestrebte Quelldruck, die geforderte maximale hydraulische Durchlässigkeit sowie die Unterschreitung der vom Behälter abtragbaren Scherspannung nach Abschluss des Quellens in einem Temperaturbereich des Buffers zwischen 0°C und 100°C erreicht werden. Entsprechend wird in der Anforderung „Bu5.“ die Unterschreitung einer Temperatur von 100°C im Buffer als Indikator für die Vermeidung unerwünschter Veränderungen der Buffereigenschaften definiert. In Übereinstimmung mit dieser Anforderung wird im Sicherheitsbericht (SKB 2011-1) für die Dimensionierung der Wärmeleistung der Endlagergebäude und des Einlagerungsbereichs eine maximale Buffer-Temperatur von 100°C herangezogen.

Im Projekt ASTRID, in dem Anforderungen für ein HAW Endlager für verglaste Abfälle in Russland aufgestellt wurden (GRS 2005²²), wurde ebenfalls eine Zieltemperatur von 100°C für den Bentonit-Buffer angesetzt. Für diesen Fall wird ausgeführt, dass temperaturinduzierte Prozesse im Granit unter diesen Bedingungen nicht relevant sind.

Aufgrund der hohen Relevanz des Bentonit-Buffers für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Kristallingestein ist bei den hier betrachteten Konzepten für Schweden und für ein HAW-Endlager in Russland eine maximale Buffer-Temperatur von 100°C als Grenztemperatur an der Behälteroberfläche definiert. Die Temperaturen im Wirtsgestein leiten sich hiervon ab, sie liegen deutlich unter 100°C. Unter dieser Randbedingung wird in beiden Fällen ausgeführt, dass temperaturinduzierte Prozesse im kristallinen Wirtsgestein nicht relevant sind.

²² GRS 2005, siehe dort S. A-51

2.6. Synopse: Wirtsgesteinsspezifisch relevante thermisch induzierte Prozesse

Die Beschreibungen in den vorherigen Kapiteln lassen die unterschiedlichen Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf die Buffer- und Gesteinseigenschaften und die dadurch thermisch induzierten Prozesse erkennen. Die folgende Darstellung fasst überblicksartig zusammen, welche Prozesse bei welchem Buffer/Wirtsgestein besonders relevant sind.

Im Wirtsgesteinstyp Steinsalz beeinflusst die Temperatur im Wesentlichen das Kriechverhalten und damit die Geschwindigkeit der Selbstverheilung von Fluidwegsamkeiten, das Schließen von Hohlräumen und die Kompaktion von Salzgrusversatz. Die Kriechverformung von natürlich vorkommendem Steinsalz läuft bereits bei Temperaturen von etwa 70°C gegenüber Normaltemperatur beschleunigt ab. Dieser Effekt verstärkt sich zu höheren Temperaturen hin. Zu Hydratsalzvorkommen ist ein Sicherheitsabstand einzuhalten, um die thermisch induzierte Freisetzung von Fluiden im Umfeld der eingelagerten Abfälle zu verhindern. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Salzes kommt es zu einer größeren Raumwirkung des Wärmeeintrags, verbunden mit einer Volumenzunahme durch Wärmeausdehnung, die sich bis an die Geländeoberfläche als Hebung bemerkbar machen und die Bildung von Fluidwegsamkeiten begünstigen kann.

Im Wirtsgesteinstyp Tonstein hat die Gebirgstemperatur insbesondere Einfluss auf die Freisetzung und Mobilisierung von Porenwasser und auf die damit in Zusammenhang stehende Kontraktion des Wirtsgesteins bei Temperaturen ab etwa 80°C. Ebenfalls relevant erscheint die Umlösung von und ggf. Porenzementierung durch Silica bzw. Kieselsäure, verbunden mit einer Versprödung des Materials. Oberhalb von 150°C ist bei längerer Temperatureinwirkung mit einer Illitisierung smektitischer Tonminerale zu rechnen, was die Quellfähigkeit reduziert und ggf. das Retentionsverhalten beeinflusst. Eine solche länger andauernde Temperatureinwirkung durch das Endlager auf das Wirtsgestein ist aber systembedingt nicht zu erwarten. Die Sorptionsfähigkeit wirkt außerdem je nach betrachtetem Radionuklid unterschiedlich, eine allgemeingültige direkte Abhängigkeit von der Wirtsgesteinstemperatur lässt sich nicht angeben.

Der Wirtsgesteinstyp Kristallingestein erscheint gegenüber einem Wärmeeintrag, wie er bei Endlagerkonzepten im Kristallingestein auftreten soll, weitgehend unempfindlich.

Endlagerkonzepte in Tonstein und Kristallingestein basieren zu wesentlichen Teilen auf der Funktion des Bentonit-Buffers. Dieses Material ist in seiner Reaktion auf Wärmeeintrag mit Tonstein vergleichbar: Höhere Temperaturen führen zu Versprödung und zu Verringerung der Quellfähigkeit, ggf. auch zur Minderung der Sorptionseigenschaften. In allen Endlagerkonzepten, die einen Bentonitbuffer mit Barriereigenschaften enthalten, ist daher bereits der Wärmeeintrag in den Buffer ein bestimmendes Auslegungsmerkmal, das in allen bekannten Konzepten, auch bei Buffer-Temperaturen von bis zu 150°C wie im Schweizer Endlagerkonzept, zu Temperaturen unterhalb 100°C im Wirtsgestein führt.

Mikroorganismen sind in allen Wirtsgesteinstypen in unterschiedlichem Ausmaß zu berücksichtigen. Hohe Temperaturen (oberhalb von 122°C) führen zu einer temporären Inaktivität mikrobieller Prozesse und damit zur Verzögerung ihres Einflusses auf Korrosion und Gasbildung. Mit nachlassender Temperatur ist dieser Effekt reversibel.

3. Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Endlagerung und das Standortauswahlverfahren

Nachfolgend wird die Bedeutung temperaturabhängiger Prozesse bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Aspekte betriebliche Sicherheit, Langzeitsicherheit, Rückholbarkeit, und Flächenbedarf bewertet sowie der Einfluss auf die Prüfung des Abwägungskriteriums „gute Temperaturverträglichkeit“ betrachtet.

3.1. Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Betriebssicherheit

Die Grenztemperatur an der Behälteroberfläche nach der Einlagerung im Endlager ergibt sich aus verschiedenen Parametern, die in Kapitel 2.2 im Einzelnen beschrieben sind. Die Auslegung der Endlagergebinde ist dabei nur eine Variable, die nicht zu Einschränkungen hinsichtlich einer an der betrieblichen Sicherheit orientierten Gestaltung der Gebinde führen darf. Unabhängig von der geplanten Grenztemperatur können die Gebinde sowohl für die Handhabung im Normalbetrieb einschließlich des Strahlenschutzes des Personals als auch unter Stör- und Unfallgesichtspunkten optimiert werden.

Im Hinblick auf den Arbeitsschutz für die Arbeiten im Bergwerk sind die regulatorischen Vorgaben für die Umgebungstemperatur untertage zu beachten. Als Handhabungstemperatur der Abfallgebinde bei der Einlagerung wird derzeit eine Maximaltemperatur von 85°C gefordert (DBEtec 2016c). Eine Grenztemperatur bezieht sich dem gegenüber auf die sich nach Einbau und Verdämmung der Endlagergebinde an deren Oberfläche maximal einstellende Temperatur und hat insofern keinen direkten Einfluss auf die Handhabbarkeit.

Bei fortgeschrittener Beladung und Betriebszeit des Endlagers ist zu erwarten, dass der Aufwand zur Sicherstellung der bergrechtlich vorgeschriebenen Temperaturen in den Arbeitsbereichen steigt. In den vorliegenden Konzepten zur Endlagerung in Salz und Tonstein mit Behälteroberflächentemperaturen von bis zu 200°C bzw. 150°C wird jedoch die Machbarkeit einer entsprechenden Klimatisierung nicht in Frage gestellt.

Unabhängig vom Wirtsgestein werden bei niedrigeren Grenztemperaturen an der Behälteroberfläche die Temperaturdifferenzen zwischen den bereits verfüllten Einlagerungsbereichen und den noch betriebenen und bewetterten Schächten und Strecken reduziert. Dies wirkt sich grundsätzlich positiv auf die Vermeidung thermisch induzierter Spannungen und daraus resultierender potenziell langzeitsicherheitsrelevanter Schädigungsmechanismen aus.

3.2. Bedeutung einer Grenztemperatur von 100°C für die Langzeitsicherheit

Die vom Endlager in seiner Umgebung hervorgerufene Temperaturänderung kann – in unterschiedlicher Ausprägung, je nach Wirtsgestein und betrachteter Grenztemperatur – im Wesentlichen Auswirkungen auf

- das Kriechverhalten (von Steinsalz und Salzgrus im Hinblick auf Konvergenz und Kompaktion),
- die Fluidfreisetzung (aus Hydratsalzvorkommen bzw. bei der Kontraktion von Tonstein),
- die Wärmeausdehnung von Gestein und Fluiden (mit Auswirkungen auf die Gebirgsspannungen im Nahbereich und auf Deckgebirge und ggf. Geländeoberfläche im Hinblick auf bruchhafte Verformung und Hebungsvorgänge) und
- die Quellfähigkeit und ggf. das Sorptionsvermögen (von Tonstein und Bentonit-Buffer),

haben (siehe auch Kapitel 2, insbesondere Kapitel 2.6).

Wie stark sich diese und ggf. andere Effekte wirtsgesteins-, standort- oder konzeptspezifisch auswirken, muss im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse betrachtet werden. Dabei sind die denkbaren Auswirkungen in den wahrscheinlichen Entwicklungen (inklusive der erwarteten Normalentwicklung) und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen zu analysieren (s.a. BMU 2010). Gegen hieraus folgende ungünstige Einwirkungen ist das Endlager auszulegen.

Für die Endlagerung in Steinsalz liegen Endlagerkonzepte vor, die eine maximale Temperatur von 200°C an der Behälterwandung zulassen. In diesem Temperaturbereich sind in Hydratsalzen Fluidfreisetzungen möglich, so dass ein hinreichender Abstand zu entsprechenden Schichten sicherzustellen ist. Positiv wirken sich höhere Temperaturen im Sinne eines beschleunigten Kriech- und Kompaktionsverhalten von Steinsalz und Salzgrusversatz, und somit auf die Selbstverheilung und Konvergenz aus. Hieraus ergäbe sich für eine höhere Behältertemperatur ein früheres Erreichen des langzeitsicheren Endzustands. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass dieser Prozess asymptotisch verläuft und zum größten Teil weitgehend in der frühen Nachverschlussphase stattfindet. (ESK 2016b) nennt einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten bis maximal 2000 Jahren bis zur „(nahezu) vollständigen Kompaktion des Salzgrusversatzes“, allerdings ohne Angabe der dabei unterstellten Temperaturen. In (ESK 2016a und ESK 2016b) wird die Phase bis zur vollständigen Kompaktion des Versatzes als „Übergangsphase“ bezeichnet. In dieser Phase soll der Einschluss der radioaktiven Stoffe durch die geotechnischen Barrieren (Strecken- und Schachtverschlüsse) und die Endlagergebäude übernommen werden. Für diese Zeit, deren Dauer konzeptspezifisch zu ermitteln ist, muss gemäß (ESK 2016a) die Integrität des Endlagergebäudes gegeben sein. Für die Funktionsdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse wird in der VSG ein Zeitraum von bis zu 50.000 Jahren angenommen (GRS 2012a).

Bezüglich der Bewertung positiver Einflüsse thermisch induzierter Effekte im Steinsalz ist zu berücksichtigen, dass sich eine Grenztemperatur nicht flächendeckend im Endlager einstellt, sondern nur in den Bereichen der insgesamt höchsten Temperatur, also grundsätzlich an den Behältern mit der jeweils größten Wärmeleistung in Endlagerbereichen mit starker Überlagerung von Temperaturfeldern. Modellhafte Endlagerkonzepte zeigen beispielsweise deutliche Unterschiede zwischen Endlagerbehältern mit DWR-Brennelementen, WWER-Brennelementen oder verglasten Abfällen (siehe Abbildung 2-11). In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager im Steinsalz (nur dort ist der positive Temperatureffekt durch beschleunigtes Kriechen relevant) wurden bis dato keine Minimaltemperaturen zur Gewährleistung einer beschleunigten Konvergenz festgelegt, noch wurden unterschiedliche Anforderungen an Behälterstandzeiten in Abhängigkeit von der Temperatur und der Konvergenzrate in unterschiedlichen Endlagerbereichen aufgestellt.

Für den Wirtsgesteinstyp Kristallin entspricht eine Grenztemperatur im Bereich von 100°C dem internationalen Stand der Diskussion. Sie zielt auf die Schonung des Buffermaterials bzw. die Aufrechterhaltung seiner sicherheitsgerichteten Eigenschaften (Quellvermögen, Dichtheit, Wärmeleitfähigkeit, Sorptionskapazität) ab. Von der Unempfindlichkeit von Kristallingestein gegenüber Temperaturen oberhalb 100°C²³ kann aufgrund der Buffer-Eigenschaften kein Kredit genommen werden.

Beim Schweizer Endlagerkonzept im Tonstein (siehe Kapitel 2.4.4.1), das eine Beaufschlagung des inneren Teils des Buffermaterials mit Temperaturen von 150°C bis 125°C vorsieht, werden die temperaturempfindlichen positiven Eigenschaften des Bentonits im inneren Teil des Buffers

²³ theoretisch bis hin zu Gebirgstemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius, die außerhalb des bei der Endlagerung betrachteten Wärmeeintrags liegen

„geopfert“, bzw. ihre Verschlechterung durch den Temperatureinfluss in Kauf genommen. Gleichzeitig ist der weitgehende Erhalt der sicherheitsgerichteten Eigenschaften im äußeren Teil des Buffers expliziter Bestandteil des Konzepts. Andere Endlagerkonzepte, beispielsweise das französische Konzept zur Endlagerung der verglasten Spaltprodukte (und optional abgebrannter Brennelemente) sehen diese Opferschicht nicht vor, sondern begrenzen die Oberflächentemperatur der Gebinde auf Temperaturen unter 100°C. Für den Wirtsgesteinstyp Tonstein ist außerdem die Empfindlichkeit der Wirtsgesteinsformation gegenüber höheren Temperaturen der Grund dafür, dass im Wirtsgestein selbst in allen heutigen Konzepten die Gebirgstemperatur deutlich unterhalb von 100°C bleiben soll.

In allen Wirtsgesteinen wirken sich Temperaturen oberhalb 120°C positiv auf die Reduzierung mikrobieller Prozesse aus. Da eine Wiederbesiedlung auch des Behälternahbereichs nach Abklingen der Temperatur zu erwarten ist, ist auf Basis generischer Betrachtungen ein eindeutiger Sicherheitsvorteil nicht ableitbar.

3.3. Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit von Endlagergebinden

Unter dem Begriff der Rückholbarkeit wird in (Kommission 2016) die Fähigkeit verstanden, den hoch radioaktiven Abfall aus einem Endlager wieder zurückzuholen, bis hin zu dem Zustand, dass Einlagerungsbereiche verfüllt bzw. verschlossen sind, das Endlagerbergwerk selbst aber noch offen und zugänglich ist. Dieser Zeitraum fällt in die Betriebsphase des Endlagers. Für die Nachbetriebsphase, in der das gesamte Endlager bereits langzeitsicher verschlossen ist, wird unter dem Begriff der Bergbarkeit zusätzlich die Fähigkeit verstanden, Behälter mit hoch radioaktivem Abfall aus dem verschlossenen Endlager zu bergen, was zum einen die Handhabbarkeit der Behälter, zum anderen ihre Wiederauffindbarkeit voraussetzt. Der hierfür festgelegte Zeitraum umfasst 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

In Abhängigkeit vom Zeitpunkt, an dem eine Rückholung oder Bergung umzusetzen wäre, von der vorher festgelegten Grenztemperatur und von weiteren Merkmalen des Endlagerkonzepts wie Wirtsgestein, Buffermaterial und Gebindeanordnung ergeben sich Voraussetzungen für die Arbeitsbedingungen unter Tage, die für die Umsetzung von Rückhol- bzw. Bergungsarbeiten relevant sind.

In (GRS 2011) wird zur Beherrschbarkeit von Gebirgstemperaturen die bergbauliche Anforderung beschrieben, dass die Gebirgstemperatur im Bereich zu bergender²⁴ Abfälle unter 100°C liegen sollte. Abgeleitet wird dies aus einer Temperatur von 70°C im Arbeitsbereich, unterhalb der die „Durchführbarkeit bergbaulicher Arbeiten“ noch gegeben sei, sowie aus einem Temperaturgradienten zwischen Wetter und Gebirge von maximal 30°C, um stabilitätsgefährdende thermoinduzierte Spannungen im Bereich aufgefahrener Hohlräume zu vermeiden. Bezüglich der Maximaltemperatur von 70°C zitiert (GRS 2011) eine Veröffentlichung der DBE aus dem Jahr 1995 (DBE 1995), die sich auf die Rückholbarkeit von POLLUX-Behältern aus einem Endlager in Steinsalz bezieht.

Für die Streckenlagerung im Salz zitiert (GRS 2011) aus der gleichen Literaturquelle, dass sich die verschlossene Einlagerungsstrecke bei einer Auslegungstemperatur von 200°C für die Endlagerbehälter rapide auf Werte oberhalb von 100°C aufheizt, und dass die Bergung eines Endlagerbehälters unter diesen Randbedingungen bereits nach etwa einem Jahr temperaturbedingt „nur

²⁴ Der Begriff der zu bergenden Abfälle ist in diesem Zusammenhang wohl sowohl auf die Rückholung während der Betriebsphase als auf die Bergung aus dem verschlossenen Bergwerk zu beziehen.

noch eingeschränkt möglich“ sei. Nach ca. 1.000 Jahren sei die Temperatur in allen Einlagerungsfeldern wieder unter 90°C abgesunken. Es dauere unter den 1995 angenommenen Modellbedingungen also ebenfalls etwa 1.000 Jahre, bis eine vollständige Bergung aller eingelagerten Abfälle möglich sei. Im Falle der Bohrlochlagerung seien die temperaturbedingten bergbaulichen Probleme geringer, wenn die Bergung oder Rückholung über die Begleitstrecke zu den Bohrlöchern erfolgen solle, da in dieser Strecke die Gebirgstemperaturen wohl unter 100°C bleiben werden.

In (Nagra 2002c) ist ein Rückholungskonzept für ein Tiefenlager im Tonstein skizziert. Es geht von einer vollständig fernbedienten Technik aus. Die Umgebungsbedingungen werden für die Lagerstollen mit „Temperaturen bis gegen 100°C und darüber“ und einer trockenen bis gesättigten Bentonitverfüllung angegeben. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Realisierbarkeit der Rückholung wird in dem Bericht nicht thematisiert (vermutlich weil von der Verwendung einer ferngesteuerten Technik ausgegangen wird), und Betrachtungen zu Temperaturgradienten zwischen Gebirge und Rückholstrecken hinsichtlich des Auftretens thermoinduzierter Spannungen erfolgen nicht.

Die Klima-Bergverordnung (KlimaBergV 1983) nennt bezüglich der Beschäftigung von Personen unter Tage in Salzbergwerken eine Trockentemperatur der Wetter von maximal 52°C, bzw. eine Feuchttemperatur von maximal 27°C. Außerhalb des Salzbergbaus (also für Endlagerkonzepte in Tonstein und Kristallin) gilt eine Effektivtemperatur von maximal 30°C, oberhalb derer ein Beschäftigungsverbot besteht. Arbeiten im Bereich der Maximaltemperaturen sind an zeitliche Auflagen gebunden. In Einzelfällen kann die zuständige Behörde unter Einsatz „*besonderer Einrichtungen*“ Überschreitungen zulassen, wenn sichergestellt ist, dass „*für den einzelnen Beschäftigten die Klimabelastung in ihrer physiologischen Gesamtwirkung*“ nicht so groß ist wie bei den ansonsten geltenden Maximaltemperaturen.

Höhere Gebirgstemperaturen können die Rückholbarkeit und Bergbarkeit also vor größere Herausforderungen im Hinblick auf die Wettertemperatur im Arbeitsbereich stellen. Inwiefern die bei einer Grenztemperatur von 200°C im Wirtsgestein sich einstellenden Maximaltemperaturen (siehe auch Abbildung 2-12) bei einer Rückholung oder Bergung wettertechnisch oder durch „*besondere Einrichtungen*“ (KlimaBergV 1983) beherrschbar wären, ist bisher nicht belastbar nachgewiesen. Oberhalb bestimmter Temperaturniveaus ist die Beschäftigung von Personen unter Tage nicht mehr oder nur mit entsprechendem Zusatzaufwand (Wetterkühlung) und zeitlichen Einschränkungen möglich. Eine vollständig fernbedienbare Bergungstechnik ist bisher nicht entwickelt. Vollständig entwickelte Konzepte für die Rückholung sind für kein Wirtsgestein bekannt.

Es ist aufgrund der betrachteten Effekte derzeit davon auszugehen, dass die Rückholung von Endlagergebänden während des Betriebs und auch bei einer späteren Bergung aus dem verschlossenen Endlagerbergwerk bei niedrigeren Temperaturen leichter gelingt als bei höheren. Insofern trägt eine Begrenzung der Oberflächentemperatur der Endlagergebände zu einer Vereinfachung der Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit bei. Welche Temperaturen wirtsgesteins- und konzeptspezifisch im Behälterumfeld konkret möglich oder anzustreben wären, lässt sich aus den ausgewerteten Quellen nicht ableiten. Diese könnten möglicherweise auch mit Behälteroberflächentemperaturen erreicht werden, die oberhalb der von der Endlagerkommission vorläufig vorgeschlagenen Grenztemperatur von 100°C liegen. Sofern Rückholkonzepte längerfristige Aufenthalte von Beschäftigten in Einlagerungsbereichen erforderlich machen, ergeben sich Restriktionen im Wesentlichen durch die Vorgaben der Klima-Bergverordnung, deren Realisierbarkeit auch bei Behältertemperaturen von 100°C anspruchsvoll sein könnte und noch zu zeigen wäre.

Die Entsorgungskommission stellt in (ESK 2016b) Forschungsbedarf hinsichtlich der „*Ableitung der Anforderungen an die Ausgestaltung der Rückholbarkeit von wärmeentwickelnden Abfällen aus einem Endlager unter Berücksichtigung limitierender Faktoren für die Rückholung von Endlagerbehältern*“ fest. In dem Zusammenhang wird als einer der wesentlichen limitierenden Faktoren die Temperatur genannt. Betont wird in dem Dokument „*die Berücksichtigung hoher Umgebungstemperaturen im Hinblick auf die Rückholtechnik*“ bei der Weiterentwicklung des Rückholungskonzepts.

Eine weitere von der Endlagerkommission angeführte Bedingung zur Gewährleistung der Bergbarkeit aus dem verschlossenen Endlager ist die Auffindbarkeit der Endlagerbehälter. Dieser Aspekt ist insbesondere beim Salzgestein relevant, weil hier das temperaturbedingt stärker ausgeprägte Kriechverhalten eine deutliche Verschiebung einzelner Behälter zur Folge haben kann, so dass Aufzeichnungen der Behälterposition im konkreten Bergungsfall möglicherweise nicht mehr zutreffen. Für das Wirtsgestein Steinsalz kann die Grenztemperatur und die sich damit im Zeitraum der Bergbarkeit einstellende Gebirgstemperatur also die Wiederauffindbarkeit der Endlagerbehälter beeinflussen. Eine niedrigere Grenztemperatur begünstigt daher im Steinsalz voraussichtlich die Wiederauffindbarkeit der Endlagerbehälter als Voraussetzung für ihre Bergbarkeit. Da Tonstein und Kristallingestein kein vergleichbar ausgeprägt plastisches Verhalten zeigen, besteht hier zwischen der Wiederauffindbarkeit der Endlagerbehälter und der Grenztemperatur kein relevanter Zusammenhang.

Die vorsorgliche Annahme einer eher niedrigen (deutlich unterhalb der für Steinsalz diskutierten 200°C) liegenden Grenztemperatur erscheint aufgrund der noch offenen Fragen bezüglich des Temperatureinflusses bei der Rückholbarkeit und Bergbarkeit angemessen. Eine eindeutige Rechtfertigung, diese Temperatur auf genau 100°C festzulegen, lässt sich aus dem vorliegenden Kenntnisstand nicht ableiten.

3.4. Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Prüfung der Temperaturverträglichkeit im Standortauswahlverfahren

Die Endlagerkommission hat die Empfehlungen zur Anwendung einer einheitlichen Grenztemperatur dem Abwägungskriterium „Gute Temperaturverträglichkeit“ zugeordnet (Kommission 2016²⁵). Mit diesem Kriterium soll gezeigt werden, dass

„der ewG und das überlagernde Deckgebirge (einschließlich des Nebengebirges, soweit möglicherweise betroffen) so beschaffen sind, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten führen. Die Ableitung der Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens muss daher die Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung bewerten, sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins im Rahmen von Mineralumwandlungen abschätzen.“
(Kommission 2016²⁶)

Die Abwägungskriterien sollen erstmals in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zur Anwendung kommen, nachdem im ersten Schritt die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen angewandt wurden (Kommission 2016²⁷). Die Phase 1 dient der Festlegung von geologisch potenziell geeigneten Teilgebieten und darin enthaltenen Standortregionen, die für die

²⁵ Kommission 2016, siehe dort S. 53 und 327

²⁶ Kommission 2016, S. 327, zur Anforderung 8 „Gute Temperaturverträglichkeit“

²⁷ Kommission 2016, siehe dort S. 254

übertägige Erkundung in Phase 2 in Frage kommen. Diese Eingrenzung erfolgt ausschließlich auf der Basis vorliegender geologischer Daten bzw. Informationen. Betrachtungen zur Temperaturverträglichkeit der in den Teilgebieten vorhandenen Wirtsgesteine werden daher voraussichtlich eher den Charakter einer ersten Abschätzung haben.

In den folgenden Phasen 2 und 3 soll im Rahmen der über- und untertägigen Erkundung wiederum das gesamte Set der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien angewendet werden. In diesen Phasen wird die Anzahl der betrachteten Standortregionen weiter eingegrenzt und in der Größe auf die potenziellen Standorte reduziert. Außerdem werden standortspezifische Informationen durch Erkundungsmaßnahmen gewonnen, so dass die Charakterisierbarkeit der Wirtsgesteine im Hinblick auf die Temperaturverträglichkeit zunehmend verbessert werden kann.

Für die eigentliche Bewertung der Temperaturverträglichkeit der Standortregionen bzw. Standorte in den drei Phasen der Standortauswahl spielt die vorhergehende Festlegung einer einheitlichen Grenztemperatur keine Rolle, da es nicht Aufgabe dieser Untersuchungen sein kann, die Eignung der Gesteine für genau diese Temperatur festzustellen. Im Gegenteil wäre in dieser Hinsicht die Annahme einer eher geringen Grenztemperatur nicht konservativ, da es gerade darum geht, eine gute Verträglichkeit zu zeigen, das heißt ein robustes Verhalten gegenüber Temperatureinflüssen, das dadurch gekennzeichnet sein kann, dass die maximal mögliche Temperatur höher liegt als die angestrebte Grenztemperatur.

Die Konservativität einer einheitlichen Grenztemperatur von 100°C ergibt sich erst dadurch, dass bei der Entwicklung der vorläufigen Endlagerkonzepte in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zunächst auf die geringere einheitliche Grenztemperatur abgestellt wird, auch wenn bereits der heutige Kenntnisstand erwarten lässt, dass ein Wirtsgestein voraussichtlich mit Temperaturen deutlich oberhalb 100°C beaufschlagt werden könnte, ohne dass sicherheitsmindernde Effekte zu erwarten wären. Eine gute Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins kommt also in Phase 1 als positive Eigenschaft bei der vorläufigen Endlagerplanung nicht vollständig zum Tragen und führt ggf. zu „überkonservativen“ Annahmen bei der thermischen Endlagerauslegung.

Bezogen auf die Prüfung des Abwägungskriteriums „Gute Temperaturverträglichkeit“ ist die von der Kommission empfohlene einheitliche Grenztemperatur also insofern nicht einschlägig, als eine konkrete Prüfung der Temperaturverträglichkeit die Eignung eines Wirtsgesteinsvorkommens für möglichst hohe Temperaturen nachweisen soll. Diese Schlussfolgerung ergibt sich bereits aus der eingangs ausgeführten Betrachtung, dass es sich bei der vorgeschlagenen Grenztemperatur nicht um ein Kriterium für gute Temperaturverträglichkeit, sondern um eine vorläufig für die Phase 1 empfohlene Anforderung an die Auslegung der generischen Endlagerkonzepte zu Verfahrensbeginn handelt (vergleiche Kapitel 1).

3.5. Einfluss einer Grenztemperatur von 100°C auf die Entwicklung des Endlagerkonzepts und die Systematik des Auswahlverfahrens

Im vorhergehenden Kapitel wurde ausgeführt, dass durch die Festlegung einer einheitlichen Grenztemperatur eine potenziell hohe Temperaturverträglichkeit als positive Gesteinseigenschaft bei der vorläufigen Endlagerplanung nicht vollständig zum Tragen käme. Als wesentlicher Effekt kann sich daraus eine Überschätzung des Flächenbedarfs des Endlagers ergeben, da höhere Grenztemperaturen eine dichtere Anordnung der Endlagergebäude ermöglichen (siehe auch Tabelle 2-1).

Außerdem kann sich durch die Möglichkeit einer höheren Grenztemperatur eine größere Variationsbreite potenzieller Endlagerkonzepte ergeben, die sich nicht nur auf den Platzbedarf sondern beispielsweise auch auf die Auslegung der Endlagergebäude auswirken kann. Damit könnte z. B. im Vorfeld der Endlagerung ein verringerter Aufwand bei der Konditionierung vor allem der abgebrannten Brennelemente mit hoher Wärmeleistung verbunden sein, so dass sich in diesem Entsorgungsschritt sicherheitstechnische Vorteile ergäben. Ein geringeres Endlagervolumen könnte außerdem dazu führen, dass sich potenzielle Umweltauswirkungen durch das Auffahren des Bergwerks und die Ablagerung des Aushubs verringern.

Durch den Einfluss der Grenztemperatur auf den Flächenbedarf des Endlagers wirkt sich diese Empfehlung zur Endlagerauslegung auf die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (Kommission 2016²⁸) aus. Im Hinblick auf die Standortauswahl bedeutet dies, dass der durch die Grenztemperatur 100°C implizierte größere Flächenbedarf grundsätzlich dazu führen kann, dass ein ansonsten potenziell geeigneter Standort allein aufgrund zu geringer Größe aus dem Standortauswahlverfahren ausscheidet. Dies ist insofern bemerkenswert, als das Prinzip der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in allen anderen Kriterien darauf ausgerichtet ist, nur solche Regionen auszuschließen, die auf jeden Fall ungeeignet sind, also eher „zurückhaltend“ vorgeht. Wenn nun der Flächenbedarf aufgrund einer niedrigen Grenztemperatur in der Phase 1 als größer anzunehmen ist als nach einer möglichen Anpassung (Erhöhung) der Grenztemperatur in den folgenden Phasen, kehrt sich dieses Prinzip der zurückhaltenden Eingrenzung um. Aus folgenden Erwägungen heraus erwächst daraus jedoch kein grundsätzliches Problem für das Erreichen des Ziels eines Standorts mit bestmöglicher Sicherheit über einen Zeitraum von einer Million Jahren (Kommission 2016²⁹):

Die Sicherheit des Endlagers kann nicht von einem einzelnen Kriterium abhängig gemacht werden, sondern beruht auf der günstigen geologischen Gesamtsituation, die in Sicherheitsuntersuchungen zu zeigen ist. Ein auf diese Weise als geeignet ausgewiesener Standort wäre nur dann „ungünstiger“ als ein ggf. frühzeitig ausgeschlossener kleinerer Standort, wenn dieser trotz geringeren Flächenangebots unter Tage eine höhere Sicherheit böte als der im Standortauswahlverfahren qualifizierte Standort. Dabei ist z.B. zu berücksichtigen, dass mit Blick auf die Robustheit des Endlagerkonzepts ein größerer Standort auch größere Abstände zu den Rändern der Formation und potenziellen Störungen ermöglicht und somit in dieser Hinsicht vorteilhaft wäre.

Falls sich dennoch mit fortschreitendem Verfahren ein Verdacht ergeben würde, dass eine Formation fälschlicherweise als zu klein aussortiert wurde, weil der Flächenbedarf überschätzt wurde, wäre dies in einem reversiblen Verfahren grundsätzlich korrigierbar. Allerdings liegen hinsichtlich der praktischen Umsetzung eines reversiblen Verfahrens bisher keine Erfahrungen vor. Es ist aus heutiger Sicht eher nicht zu erwarten, dass die Wiederaufnahme einer aufgrund einer Mindestanforderung ausgeschlossenen Standortregion in das Verfahren vermittelbar wäre, ohne das Verfahren zu beschädigen. In dieser Hinsicht kann die Auswertung der Erfahrungen in der Schweiz von Interesse sein, wo derzeit ein von der Nagra zurückgestellter Standort möglicherweise aufgrund einer abweichenden Einschätzung des Gutachters wieder in das Auswahlverfahren aufgenommen wird.

Selbst wenn eine solche Korrektur nicht erfolgte, ein Standort also tatsächlich aufgrund seiner Fläche aus dem Verfahren ausscheiden würde, wäre dies verfahrenskonform, da die Auswahl entsprechend den zuvor vereinbarten Regeln erfolgt. Im Rahmen dieser Regeln würde also nach

²⁸ Kommission 2016, siehe dort S. 303 f.

²⁹ Kommission 2016, siehe dort z.B. S. 24, S. 26ff

wie vor der „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ gefunden werden, die von der Endlagerkommission in ihrem Abschlussbericht folgendermaßen definiert wird: *„Geleitet von der Idee der Nachhaltigkeit wird der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit nach dem Stand von Wissenschaft und Technik mit dem in diesem Bericht beschriebenen Auswahlverfahren und den darin angegebenen und anzuwendenden Kriterien und Sicherheitsuntersuchungen festgelegt.“*

Das „Risiko“, dass ein ansonsten potenziell geeigneter Standort an der Mindestanforderung des Flächenbedarfs scheitert, obwohl das Platzangebot bei einer späteren Zulassung einer höheren Grenztemperatur ausreichend gewesen wäre, ist somit nicht gleich Null. Es stellt aber weder die Anwendbarkeit des Standortauswahlverfahrens noch die Auffindbarkeit des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit in Frage, und ist auch im Zusammenhang der sonstigen konzeptionellen Faktoren, die Einfluss auf den Flächenbedarf unter Tage haben (insbesondere Wahl von Strecken- oder Bohrlochlagerung) einzuordnen.

4. Zusammenfassende Bewertung der Vorsorgeorientierung einer Grenztemperatur von 100°C und Einfluss auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen

4.1. Bewertung der Vorsorgeorientierung

Im Folgenden werden die Ausführungen der Kapitel 3.1 bis 3.5 dahingehend bewertet, ob eine für alle Wirtsgesteine einheitliche Festlegung einer Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens als vorsorgeorientiert bezeichnet werden kann. Die Endlagerkommission stellt den Zusammenhang zwischen der Grenztemperatur und dem Vorsorgegedanken im Kontext des Abwägungskriteriums „Gute Temperaturverträglichkeit“ folgendermaßen her:

„Bis dahin [d.h. bis die zulässige maximale Temperatur auf der Basis von Forschungsergebnissen abgeleitet wurde] empfiehlt die Kommission, aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur an der Außenfläche Behälter von 100 Grad Celsius auszugehen, [...]“ (Kommission 2016³⁰).

Der Vorhabenträger soll nach dieser Empfehlung in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens aus Vorsorgegründen von einer einheitlich eher geringen Temperaturverträglichkeit von Wirtsgestein und/oder Buffer ausgehen, die nur eine Maximaltemperatur an der Behälteroberfläche von 100°C erlaubt. Die Endlagerkommission versteht in diesem Zusammenhang den Begriff der Vorsorge vermutlich nicht im atomrechtlichen Sinne der „nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Vorsorge gegen Schäden“. Die zeitliche Begrenzung der Maßnahme sowie der Bezug zu den während dieser Zeitspanne durchzuführenden Forschungsarbeiten weisen vielmehr auf ein Verständnis hin, wie es von der europäischen Kommission in den Ausführungen zum „Vorsorgeprinzip“ (KOM 2000) definiert ist:

„Die Anwendung des Vorsorgeprinzips gehört [...] zum Risikomanagement, erfolgt also dann, wenn wegen der wissenschaftlichen Unsicherheit keine umfassende Risikobewertung möglich ist, die Entscheidungsträger aber der Meinung sind, daß das festgelegte Schutzniveau für die Umwelt und die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen bedroht sein könnte.“ (KOM 2000, S. 14)

Neben der Möglichkeit von vorbeugenden Maßnahmen bei unzureichendem Wissensstand zur Reduzierung potenzieller negativer Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist dort auch klar gefordert, diese Maßnahmen im Lichte neuer Erkenntnisse regelmäßig zu prüfen und ggf. zu revidieren:

„Dass die Maßnahmen überprüft werden, sobald neue wissenschaftliche Daten vorliegen, bedeutet, dass sie nur aufrechterhalten werden sollten, solange die vorhandenen wissenschaftlichen Informationen unzureichend sind oder keine eindeutigen Schlüsse zulassen, [...] Die Maßnahmen sollten in regelmäßigen Abständen im Lichte des wissenschaftlichen Fortschritts überprüft und gegebenenfalls abgeändert werden.“ (KOM 2000, S. 5)

Die Bewertung der Vorsorgeorientierung eines einzelnen Parameters (Grenztemperatur der Behälter) stößt aufgrund der Komplexität eines Endlagersystems, der vielfältigen Einflussfaktoren und Abhängigkeiten an Grenzen, die sich zwangsläufig in vereinfachten Betrachtungen anstelle

³⁰ Kommission 2016, siehe dort S. 327

multidimensionaler Abwägungen niederschlagen. Gleichwohl können folgende Feststellungen hinsichtlich der Vorsorgeorientierung einer einheitlichen Grenztemperatur getroffen werden. Der Begriff „Grenztemperatur“ wird dabei immer für die sich an der Behälteroberfläche im verschlossenen Endlager einstellende maximale Temperatur verwendet.

Betriebliche Sicherheit

Aufgrund vorliegender Endlagerkonzepte ist davon auszugehen, dass die betriebliche Sicherheit auch bei Grenztemperaturen oberhalb 100°C gewährleistet werden kann. Die Notwendigkeit einer Grenztemperatur von 100°C aus Vorsorgegründen kann daher aus den Erfordernissen der betrieblichen Sicherheit nicht abgeleitet werden.

Gleichwohl ist festzustellen, dass niedrigere Grenztemperaturen den Aufwand zur Klimatisierung von Arbeitsbereichen reduzieren und zur Verringerung des Temperaturgradienten zwischen verfüllten Bereichen und bewetterten Strecken und Schächten führen. Dies kann sich positiv auf die Vermeidung thermisch induzierter Spannungen auswirken.

Langzeitsicherheit

Aufgrund des vorliegenden Forschungsstandes zur Langzeitsicherheit der Endlagerung in Steinsalz ergibt sich keine Notwendigkeit, aus Vorsorgegründen eine Grenztemperatur von 100°C anzunehmen. Insbesondere sind für Steinsalz die positiven Effekte des beschleunigten Kriechens und der zeitlich begrenzten Reduzierung von Mikroben zu berücksichtigen und gegen potenziell negative Effekte wie Fluidfreisetzungen aus Hydratsalzvorkommen, Gebirgsspannungen und Hebungen und ggf. noch weiter in der Forschung zu vertiefende Fragen, z.B. zu chemischen Reaktionen, abzuwägen. Diese Abwägung wäre jedoch im Rahmen des Auswahlverfahrens an konkreten Standorten möglich und würde keine vorsorgende Temperaturempfehlung im Sinne einer Vorsorgemaßnahme zum Risikomanagement erfordern.

Allerdings gibt es auch keine Hinweise, dass potenzielle positive Effekte, die im Steinsalz bei höheren Temperaturen stärker wirken, bei einer Grenztemperatur von 100°C soweit unterbunden würden, dass dadurch die Nachweisführung für die Langzeitsicherheit in Frage gestellt würde. Verschiedene Endlagerkonzepte gehen auch heute davon aus, dass in einigen Einlagerungsbereichen die Oberflächentemperaturen der Gebinde unter 100°C liegen. Die auf die Phase 1 begrenzte Berücksichtigung einer Grenztemperatur von 100°C führt also nicht dazu, dass generische Sicherheitsbetrachtungen unter Annahme dieser Auslegungsbedingung für ein Endlager im Steinsalz nicht möglich wären.

Für die Wirtsgesteinstypen Tonstein und Kristallin ist insgesamt festzustellen, dass die meisten von einem Wärmeeintrag beeinflussten Prozesse von einer niedrigeren Grenztemperatur profitieren: Sie schont den Buffer und vermindert oder verhindert die Freisetzung von Fluiden und die Gasbildung aufgrund chemischer oder physikalischer Prozesse. Hinsichtlich der antimikrobiellen Wirkung würden hohe Temperaturen die mikrobielle Aktivität im Nahfeld der Endlagerbehälter be- oder verhindern, mit Abklingen des Wärmeeintrags würde dieser Effekt schwinden und die Aktivität der Mikroorganismen wieder zunehmen. Grenztemperaturen deutlich über 100°C werden zwar im Schweizer Konzept angenommen, sind jedoch nur unter der spezifischen Annahme, dass ein Teil des Buffers als „Opferschicht“ dient, realisierbar.

Um in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens die Betrachtungen auf Konzepte zu beschränken, in denen keine nachteilige Beeinträchtigung der Bentonit-Eigenschaften zu erwarten ist, kann die Annahme einer Grenztemperatur von 100°C als vorsorgeorientierte Maßnahme angesehen werden. Bei entsprechender Fortentwicklung des Forschungsstands und der konzeptionellen Möglichkeiten für ein Endlager in Deutschland würden höhere Temperaturen nicht ausgeschlossen.

Rückholbarkeit und Bergbarkeit

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3 wirkt sich die Einhaltung eher niedriger Grenztemperaturen potenziell positiv auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Abfällen aus, da sie die Arbeitsbedingungen beim Wiederauffahren der Einlagerungsbereiche und beim Handling der Behälter begünstigt und das Risiko thermisch induzierte Gebirgsspannungen reduziert.

Die Anwendung des Vorsorgeprinzips ist in diesem Zusammenhang als angemessen zu bewerten, da noch keine ausgereiften Konzepte für die Rückholung vorliegen. Es ist daher unklar, bei welchen Grenztemperaturen einerseits die Intervention durch ein voll oder teil-automatisiertes Rückholen/Bergen der Behälter möglich ist und welche Anforderungen sich andererseits hinsichtlich der Vermeidung temperaturinduzierter Spannungen ergeben, die vor allem im Falle einer Teilrückholung nicht zu einer Schädigung des Endlagerbereichs führen dürfen.

Für die Endlagerung im Salz wirkt sich außerdem ein geringeres Fließen des Salzes nach der Einlagerung grundsätzlich positiv auf die Auffindbarkeit der Behälter im Falle einer Bergung aus. Das Fließvermögen von Salzgestein wird durch hohe Temperaturen gefördert, das Wiederauffinden damit potenziell durch geringere Temperaturen erleichtert. Allerdings ist dieser Effekt für den relevanten Zeitraum von 500 Jahren und die derzeit diskutierte Temperaturspanne zwischen 100°C und 200°C nicht quantifiziert, es ist aber zumindest in der Tendenz eine Verringerung von Lageänderungen der Behälter zu erwarten.

Hinsichtlich der Rückholbarkeit/Bergbarkeit ist die Festlegung einer eher niedrigen Grenztemperatur für die Phase 1 eindeutig als vorsorgeorientiert zu bezeichnen, wobei der konkrete Wert von 100°C sich nicht zwingend aus dem derzeitigen Erkenntnisstand ableiten lässt.

Flächenbedarf

Für den Flächenbedarf eines Endlagers in einem gegebenen Wirtsgestein ist die Grenztemperatur an der Behälteroberfläche einer der maßgeblichen Einflussfaktoren. Wie in Kapitel 2.2.4 dargestellt, kann im Steinsalz durch eine Erhöhung der Behälteroberflächentemperatur von 100°C auf 200°C die in Modellrechnungen ermittelte Fläche eines Endlagers fast halbiert werden. Andererseits lassen sich temperaturbedingte Sicherheitsabstände zu hydratsalzhaltigen Bereichen eines Salzvorkommens bei niedrigerer Grenztemperatur ggf. reduzieren, was sich wiederum positiv auf die Flächenausnutzung einer gegebenen Salzstruktur auswirken kann. Dieser Effekt wurde in den modellhaft ermittelten Flächenbedarfen in (DBEtech 2016a) vereinfachend nicht berücksichtigt. Die mögliche Flächenreduzierung durch höhere Temperaturen würde daher unter Umständen etwas geringer ausfallen.

Für die anderen Wirtsgesteine liegen Vergleiche der Flächenbedarfe bei unterschiedlichen Einlagerungstemperaturen nicht vor. Allerdings könnte für Tonstein und Kristallin wahrscheinlich

aufgrund der geringeren Variationsbreite möglicher Behältertemperaturen oberhalb von 100°C auch höchstens ein deutlich geringerer Effekt erzielt werden.

Neben der Grenztemperatur kann allerdings auch das Einlagerungskonzept einen nennenswerten Einfluss auf den Flächenbedarf eines Endlagers haben. So weisen Bollingerfehr et al. (2014) darauf hin, dass sich beispielsweise bei einem Endlager in Steinsalz für die flächenhaft angeordnete Streckenlagerung von massiven Endlagerbehältern ein um 60 % größerer Flächenbedarf des Endlagers ergibt als bei der Lagerung von Kokillen in ca. 300 m tiefen Bohrlöchern.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass nach den Vorgaben des Stand AG alle drei Wirtsgesteine bei der Standortauswahl zu berücksichtigen sind. Die erheblichen Unterschiede im Flächenbedarf wurden dabei nicht als sicherheitsrelevanter Faktor thematisiert.

Insgesamt ist in Bezug auf den Flächenbedarf festzustellen, dass höhere Auslegungstemperaturen grundsätzlich zu einer Verringerung des Flächenbedarfs führen können. Dieser Effekt wird jedoch durch die deutlich größere Variationsbreite, die sich aus der Wahl des Wirtsgesteins ergibt, und durch den Einfluss des Endlagerkonzepts auf den Flächenbedarf (z.B. Behälter- oder Kokillenlagerung) überlagert. Eine eher geringe Grenztemperatur ist hinsichtlich des Flächenbedarfs nicht als vorsorgeorientiert zu bewerten.

Mit steigendem Flächenbedarf erhöht sich potenziell die Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager. Dieses Szenario ist allerdings gemäß (BMU 2010) als nachrangiges Optimierungsziel gegenüber anderen Sicherheitserwägungen zu betrachten und ist daher hinsichtlich der Bewertung der Vorsorgeorientierung von untergeordneter Bedeutung.

Im Übrigen hat der Flächenbedarf Einfluss auf das Standortauswahlverfahren, da wie in Kapitel 3.5 dargelegt, das Risiko besteht, dass Standorte ausgeschlossen werden, die bei Anwendung geringerer Grenztemperaturen keine ausreichende Fläche bieten, bei Konzepten mit höheren Grenztemperaturen aber ausreichend wären.

Im Hinblick auf die Mindestanforderung „Flächenbedarf“ im Standortauswahlverfahren ist die Anwendung einer Grenztemperatur von 100°C demnach nicht vorsorgeorientiert. Sie führt aber – wie in Kapitel 3.5 ausgeführt – voraussichtlich auch nicht zu erheblichen Einschränkungen im Standortauswahlverfahren.

Zusammenfassende Betrachtung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die von der Endlagerkommission vorgeschlagene wirtsgesteinsunabhängige Grenztemperatur von 100°C als Randbedingung für die Auslegung der Endlagerkonzepte in der Phase 1 in Bezug auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit als vorsorgeorientiert zu bezeichnen ist.

Darüber hinaus ist für Endlagerkonzepte in Tonstein und Kristallin im Hinblick auf den Schutz des Bentonitbuffers eine Grenztemperatur von 100°C auch hinsichtlich der Langzeitsicherheit als vorsorgeorientiert einzustufen.

Im Übrigen ergibt sich aus den durchgeführten Betrachtungen keine Notwendigkeit, diese Grenztemperatur aus Vorsorgegründen einzuführen. Es ist jedoch aufgrund der potenziellen zeitlichen Begrenzung seiner Geltung und der in den nachfolgenden Phasen an konkreten Standorten möglichen Optimierung der Endlagerkonzepte auch kein eindeutig negativer Einfluss zu berücksichtigen, der der vorübergehenden Anwendung entgegen stünde.

Eine Anpassung der Grenztemperatur nach der Phase 1 setzt gemäß den Empfehlungen der Kommission weitere Forschungsarbeiten voraus, die eine zuverlässige Festlegung der maximal physikalisch möglichen Temperatur wirtsgesteinsspezifisch begründen. Als ein zentrales generisches Forschungsthema kann der Einfluss der Temperatur auf Konzepte zur Rückholbarkeit angesehen werden. Weitere Themen sind in Kapitel 4.2 auf Basis der Ausführungen in (GRS 2016) und (ESK 2016b) zusammengestellt.

Neben dem generischen Forschungsbedarf trägt der im Standortauswahlverfahren zunehmende Kenntnisstand der standortbezogenen Verhältnisse dazu bei, dass die mit einem vorsorgeorientierten Ansatz potenziell verbundenen „Überkonservativitäten“ im Auswahlverfahren reduziert werden können, ohne dass sich dadurch Einschränkungen in der Sicherheit ergeben.

Aus Sicht der Gutachter sind folgende Aspekte besonders hervorzuheben:

Es erscheint sinnvoll, den in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens abzuarbeitenden (generischen) Forschungsbedarf zwischen den zentralen Institutionen noch genauer zu spezifizieren, um die Bedingungen für die Anwendung wirtsgesteins- und standortspezifisch angepasster Grenztemperaturen in der Phase 2 möglichst klar zu definieren.

Die Rückholbarkeit/Bergbarkeit ist ein zentraler Aspekt, der die Beschränkung der Grenztemperatur aus Vorsorgegründen derzeit rechtfertigt. Um nach Abschluss der Phase 1 eine wirtsgesteins- und standortspezifische Anpassung der Grenztemperatur vornehmen zu können, müssten die bisher vorliegenden Ausführungen zur Rückholbarkeit im Hinblick auf die Betrachtungen zum Temperatureinfluss weiterentwickelt werden.

Die in der Phase 1 erforderlichen generischen Endlagerkonzepte werden voraussichtlich weitgehend auf bekannten Konzepten beruhen, die nur im notwendigen Umfang angepasst werden. Möglicherweise empfiehlt es sich daher, unabhängig davon bereits in der Phase 1 auch die Überlegungen zu neuen Endlagerkonzepten voranzutreiben, um für die Phasen 2 und 3 weiteres Optimierungspotenzial zu erschließen.

4.2. Einfluss bestehenden Forschungsbedarfs auf die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen

Die Endlagerkommission hat ihre Empfehlung zur vorsorglichen Einhaltung einer Grenztemperatur von 100°C in der Phase 1 mit der Beantwortung einer Reihe von Fragestellungen verknüpft, die wirtsgesteinsbezogen zu beantworten sind:

- Prüfung und Begründung der Verträglichkeit von Wirtsgestein und Buffer gegenüber der sich an der Außenfläche des Abfallgebundes einstellenden Temperatur
- Bestimmung eines Sicherheitsabstands zwischen der sich tatsächlich einstellenden Temperatur und der Temperatur, bei der kritische Zustände auftreten können
- Intensivierung der Forschungsaktivitäten zu physikalisch maximal möglichen Temperaturen an der Außenfläche Abfallgebunde zu Wirtsgestein und Buffer
- Ableitung einer zulässigen maximalen Temperatur aus der physikalisch maximal möglichen Temperatur unter Einhaltung eines Sicherheitsabstands

Die Endlagerkommission fordert vom Vorhabenträger, diese Fragestellungen bis zum Ende der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zu klären. Die Endlagerkommission gibt damit das Ziel

vor, bis zur Festlegung von Standorten für die übertägige Erkundung wissenschaftlich begründete Temperaturgrenzwerte für die Wirtsgesteinstypen abzuleiten und bis dahin die als vorsorgeorientiert angesehene Grenztemperatur von 100°C für alle Wirtsgesteinstypen zu verwenden.

Im Hinblick auf eine von der Endlagerkommission empfohlene und vom BMUB geplante Fortschreibung der Endlagersicherheitsanforderungen (BMU 2010) ist hier die Frage zu behandeln, ob der von der Endlagerkommission thematisierte und zuletzt in (GRS 2016) und (ESK 2016b) spezifizierte Forschungsbedarf zur Temperaturverträglichkeit eine solche Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen unmittelbar beeinflusst.

In (GRS 2016) wurde hinsichtlich des Temperatureinflusses auf die verschiedenen Wirtsgesteine eine ganze Reihe von offenen Forschungsfragen formuliert. Für den Wirtsgesteinstyp Steinsalz³¹ beziehen sich diese im Wesentlichen auf das Verhalten bei Gebirgstemperaturen oberhalb von 100°C, die bei der empfohlenen Grenztemperatur nicht auftreten können. In (ESK 2016b) wird die quantitative Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus in Abhängigkeit von der Temperatur und anderen Parametern als Teil des vorrangigen Forschungsbedarfs genannt.

Für den Wirtsgesteinstyp Tonstein nennt (GRS 2016) im Wesentlichen den Einfluss mikrobieller Prozesse, die weitere Untersuchung der thermisch-hydraulisch-mechanischen Eigenschaften von Tonstein und Bentonit, die Quelldruckabhängigkeit von der Temperatur und den Einfluss von Inhomogenitäten im Wirtsgestein als maßgebliche Forschungsfragen. Des Weiteren wird die Verbreiterung des Kenntnissstands bezüglich des Temperatureinflusses auf die Sorptionseigenschaften von Tonmineralen gegenüber Radionukliden empfohlen. Gemäß (ESK 2016b) besteht noch Forschungsbedarf, um die Aussagemöglichkeiten bezüglich der Temperaturbeschränkungen an der Gebindeoberfläche für Endlager in Tonstein zu verbessern.

Generische Forschungsfragen zu Temperatureffekten im Wirtsgesteinstyp Kristallin werden in (GRS 2016) nicht formuliert, standortspezifische Fragestellungen sind ohnehin erst im Kontext konkreter Standortoptionen zu untersuchen.

(ESK 2016b) verweist außerdem auf grundsätzlichen Forschungsbedarf zur verbesserten Beschreibung der Temperaturabhängigkeiten von „*chemischen Prozessen im Endlager im Hinblick auf Freisetzung und Löslichkeit von Radionukliden, Sorption- und Redox-Prozesse sowie Korrosion der Brennelementstrukturteilen*“. Weiterhin seien Forschungstätigkeiten zum Temperatureinfluss bei Konzepten zur Rückholbarkeit erforderlich.

Die genannten Forschungsthemen sind für eine thermische Optimierung von Endlagerkonzepten in den verschiedenen Wirtsgesteinen bzw. an konkreten Untersuchungsstandorten sinnvoll. Durch die Kopplung an den Forschungsstand wird der in den Empfehlungen der Endlagerkommission vorgeschlagenen Grenztemperatur eine Dynamik zugewiesen, die im fortgeschrittenen Standortauswahlverfahren – im Falle entsprechender Forschungsergebnisse – eine flexible, wirtsgesteins- und standortspezifische Anpassung ermöglicht. Da es sich bei der Grenztemperatur um eine Empfehlung für eine vorübergehend zu berücksichtigendes Auslegungsmerkmal handelt und nicht um ein Kriterium für das Standortauswahlverfahren oder eine Sicherheitsanforderung für Endlager, steht eine dynamische Anpassung auch nicht im Widerspruch zur Festlegung einheitlicher Bewertungskriterien für alle Phasen des Auswahlverfahrens.

³¹ GRS 2016, siehe dort S. 69f

Die Abarbeitung der Forschungsfragen zum Temperatureinfluss, die in (GRS 2016) und (ESK 2016b) thematisiert werden, stellt keine Voraussetzung für die Fortschreibung der Sicherheitsanforderungen dar.

Literaturverzeichnis

AkEnd 2002	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd. Köln, Dezember 2002
Andra 2005a	Andra: Dossier 2005 Argile Tome Architecture and management of a geological repository, Dezember 2005
Andra 2005b	Andra: Dossier 2005 Argile Tome Phenomenological evolution of a geological repository, Dezember 2005
BFE 2008	Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager, Konzeptteil. April 2008
BMU 2010	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010
BMUB 2016	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMUB): Leistungsbeschreibung, FKZ UM16E03210, 26.07.2016
Bollingerfehr et al. 2012	W. Bollingerfehr, W. Filbert, S. Dörr, P. Herold, Ch. Lerch (alle DBETEC), P. Burgwinkel, F. Charlier, B. Thomauske (alle nse), G. Bracke, R. Kilger (alle GRS): Endlagerauslegung und –optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Juni 2012 mit Änderung von Dezember 2012
Bollingerfehr et al. 2014	W. Bollingerfehr, D. Buhmann, W. Filbert, J Mönig: Auswirkungen von Partitionierung und Transmutation auf Endlagerkonzepte und Langzeitsicherheit von Endlagern für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) (GRS – 318). August 2014
BGR 2016	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Beratung der Endlagerkommission – Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“; Hannover, März 2016
Clauser & Huenges 1995	Clauser, C. & E. Huenges, E.: Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. – Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants. pp 105-126. American Geophysical Union, Washington, 1995
DBE 1995	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB - Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Februar 1995
DBEtec 2007	DBE Technology GmbH (M. Jobmann, L. Uhlig, P. Amelung, D. Billaux, M. Polster, H. Schmidt): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland – GENESIS, Abschlussbericht. März 2007
DBEtec 2008	DBE Technology GmbH (M. Kreienmayer, Ch. Lerch, M. Polster, M. Tholen): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW, ISIBEL, AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. FKZ 02 E 10065, April 2008
DBEtec 2016a	DBE Technology GmbH: Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, veröffentlicht als K-MAT 58. Peine, 2016

DBEtec 2016b	DBE Technology GmbH: Rückholbarkeit – eine Herausforderung für die Entwicklung von Endlagerkonzepten. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau, Essen 25.02.2016
DBEtec 2016c	DBE Technology GmbH: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte. Abschlussbericht. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11112, Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 24 c, Peine, 2014.
ESK 2016a	Anforderungen an Endlagergebäude zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle, Empfehlung der Entsorgungskommission vom 17.03.2016
ESK 2016b	Stellungnahme der Entsorgungskommission vom 12.05.2016: Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung
Goll 2000	IAEA-TCM, Goll und Fuchs: Requirements for extremely Long Term Spent Fuel Storage Facilities, Vienna, 16.-20. Austria; October 2000.
GRS 2005	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, DBE Technology GmbH, VNIPI PT (Russland): Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER). März 2005
GRS 2010	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: VerSi Endlagerung im Tonstein, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einen Tonsteinstandort. Dezember 2010
GRS 2011	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (F. Peiffer, T. Fass, S. Weber): Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, Abschlussbericht zum Vorhaben 3608R02612, GRS – A – 3613. Juli 2011
GRS 2012a	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1 Vorbemessung; Bericht zum Arbeitspaket 9.2 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Juli 2012
GRS 2012b	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (H. Seher, G. Bracke): Chemische Vorgänge in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Ton- und Salzgestein – Synthesebericht (GRS-Bericht 301), September 2012
GRS 2012c	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (J. Mönig, D. Buhmann, A. Rübel, J. Wolf, B. Baltes, K. Fischer-Appelt): Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4 – Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Juni 2012
GRS 2013	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (K. Fischer-Appelt, B. Baltes, D. Buhmann, J. Larue, J. Mönig): Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. März 2013
GRS 2014	Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie, GRS-338. August 2014

GRS 2016	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (A. Meleshyn, T. Weyand, G. Bracke, H. Kull, K. Wiczorek): Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. Im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, veröffentlicht als K-MAT 64. Mai 2016
Heemann et al. 2014	U. Heemann, H. Kull, S. Li, R. Miehe, C. Müller (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH): 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, GRS-354 Anhang B, ISBN 3944161343. Braunschweig, Dezember 2014
Jentzsch 2002	G. Jentzsch: Temperaturverträglichkeit der Gesteine - Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten, Jena, 2002
KlimaBergV 1983	Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV) vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685)
KOM 2000	Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mitteilung der Kommission - die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips (KOM (2000) 1 endgültig), Brüssel, den 2.2.2000
Kommission 2016	Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes; Abschlussbericht. Veröffentlicht als K-Drs. 268. Juli 2016
Kröhn et al. 2009	K.P. Kröhn, D. Stührenberg, M. Herklotz, U. Heemann, C. Lerch, M. Xie (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager - Phase 1, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8. 2009
NAGRA 2002a	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Technischer Bericht 02-03. Wettingen, Dezember 2002
NAGRA 2002b	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Project Opalinus Clay, Safety Report, Technical Report 02-05. Wettingen December 2002
NAGRA 2002c	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Technischer Bericht 02-02. Wettingen, Dezember 2002
NAGRA 2008	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Technischer Bericht 08-03. Wettingen, Oktober 2008
NAGRA 2014	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage, Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2, Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Textband, Technischer Bericht 14-01. Wettingen, Dezember 2014
NBS 1981	US Department of Commerce, National Bureau of Standards: Physical Properties Data for Rock Salt; NBS Monograph 167, Washington 1981
SaltClub 2011	https://www.oecd-nea.org/rwm/saltclub/

Schwenk-Ferrero 2013	Schwenk-Ferrero, A.: German Spent Nuclear Fuel Legacy: Characteristics and High-Level Waste Management Issues. In: Science and Technology of Nuclear Installations Article ID 293792. DOI: 10.1155/2013/293792, 2013.
SKB 2009	Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. November 2009
SKB 2011-1	Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I, March 2011
SKB 2011-2	Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume II, March 2011
SSMFS 2008:21	Swedish Radiation Safety Authority (SSM): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations and General Advice Concerning Safety in Connection with the Disposal of Nuclear Material and Nuclear Waste, SSMFS 2008:21. Januar 2009
SSMFS 2008:37	Swedish Radiation Safety Authority (SSM): 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, SSMFS 2008:37. Januar 2009
WIPP 2011	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
