



STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

Zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes

INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund	2
2	Stand von Wissenschaft und Technik	3
2.1	Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Steinsalz.....	3
2.2	Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein	5
2.3	Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Kristallingestein.....	6
2.4	Einfluss der Temperatur auf geotechnische und technische Barrieren	7
3	Schlussfolgerung für die Endlagerauslegung	9
4	Fazit und Empfehlungen der ESK zum weiteren Vorgehen	10
5	Unterlagen	12

1 Hintergrund

Im Standortauswahlgesetz [1 § 27 (4)] wird festgehalten: *„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“* Eine derartige „Grenztemperatur“ war im Abschlussbericht [2] der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) empfohlen worden.

Die aus [1] zitierte Anforderung legt für die „Grenztemperatur“ einen klaren örtlichen Bezug fest. Es wird darüber hinaus auf noch ausstehende Forschungsarbeiten verwiesen. Eine zeitliche Festlegung, bis wann diese Forschungsarbeiten abgeschlossen sein müssen, wie dies seitens der Endlagerkommission empfohlen wurde ([2], S. 327: *„bis zum Ende der Phase 1 zu klären“*), wurde nicht in das Gesetz übernommen.

Die Anforderung in [1, § 27 (4)] steht im Widerspruch zu Aussagen in [2], in dem auf S. 326/327 festgehalten wird, dass *„Festlegungen von wirtsgesteinspezifisch oder gar allgemein gültigen Grenztemperaturen und ihre Anwendung zur zuverlässigen Vermeidung nachteiliger Konsequenzen für die Endlagersicherheit nur bedingt geeignet“* sind, da *„durch die Temperaturerhöhung in geotechnischen Barrieren und umgebendem Gebirge Prozesse mit unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit ausgelöst, beschleunigt oder verstärkt werden können“*. Diese Passagen finden sich wortgleich auch in der Gesetzesbegründung [3, S. 35].

Der Bericht der Endlagerkommission [2] enthält auch zwei Sondervoten zum Kriterium einer „Grenztemperatur“. In einem ersten Sondervotum [2, S. 506] wird ausgeführt, dass das „Grenztemperatur“-Kriterium *„bei der Standortauswahl keine Differenzierung der infrage kommenden Standorte ermöglicht“* und außerdem *„die Begrenzung der Temperatur nicht zwangsläufig sicherheitsgerichtet“* ist, da *„höhere oder niedrigere Temperaturen im Endlager [...] sowohl Vor- als auch Nachteile haben“* können. *„Erst bei genauer Kenntnis des Wirtsgesteins und des Endlagerkonzeptes können diese im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen so optimiert werden, dass bestmögliche Sicherheit erreicht werden kann“*. Der Temperaturgrenzwert von 100 °C wird in diesem Sondervotum daher abgelehnt.

In einem zweiten Sondervotum [2, S. 506/507] wird darauf hingewiesen, dass *„Kriterien wissenschaftlich ableitbar“* sein müssen, dass jedoch *„von keinem einzigen der acht Wissenschaftler in der Endlagerkommission [...] eine einheitliche Grenztemperatur von 100 °C für alle drei Wirtsgesteine gefordert“* wurde, demzufolge *„die Lösung der strittigen Frage „Temperaturverträglichkeit“ aus politischen Gründen erfolgt wäre, obwohl der Endlagerkommission bereits damals ein Bericht der GRS [4] vorlag, der bzgl. Temperaturverträglichkeit zu einem wissenschaftlich anderen Schluss gekommen war [2, S. 327].*

Inzwischen liegt dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ein weiterer Bericht der GRS [5] vor, der zum Resultat kommt, dass *„„Grenztemperaturen“ für die Außenfläche von Abfallbehältern für das jeweilige Sicherheits-, Endlagerkonzept und Wirtsgestein abgeleitet werden“* sollten und *„eine generelle „Grenztemperatur“ den Standortauswahlprozess wegen der eingeschränkten Möglichkeiten einer Optimierung des Endlagers erschweren“* könnte.

In § 12 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV, [6]) ist festgelegt, dass das Endlager

hinsichtlich der Langzeitsicherheit und hinsichtlich der Betriebssicherheit zu optimieren ist. Dies gilt auch bei der Standortauswahl, da dabei vorläufige Endlagerkonzepte entwickelt werden müssen.

Unter Gesichtspunkten der sicherheitsgerichteten Optimierung kann in Steinsalz ein Endlager auch auf eine höhere Temperatur als 100 °C an der Außenfläche der Behälter ausgelegt werden. In Tongestein gibt es Gesichtspunkte, die eher für eine hohe Temperatur, und Gesichtspunkte, die eher für eine niedrige Temperatur an der Behälteraußenfläche sprechen. Die Größe eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist ganz wesentlich von der Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche abhängig.

Die Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche spielt bereits in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens eine wesentliche Rolle, da in diesem Schritt Endlagerkonzepte entwickelt werden. Damit wird auch die Endlagergröße festgelegt und es werden die ersten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorgenommen.

Die vorliegende ESK-Stellungnahme zeigt kurz zusammengefasst den Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Kenntnisse zum Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in den verschiedenen Wirtsgesteinen auf und gibt Empfehlungen zur Berücksichtigung des Parameters Temperatur im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Die maximal zulässige Temperatur („Grenztemperatur“) im Wirtsgestein eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle muss so festgelegt werden, dass die Integrität der wesentlichen Barrieren (vgl. [6, § 2]) und damit die Sicherheit des Endlagers (potenzielle Freisetzung von Radionukliden) gewährleistet ist. Erhöhte Temperaturen können sich sowohl positiv als auch negativ auf die Integrität des Barrierensystems, insbesondere der geotechnischen und geologischen Barrieren, auswirken. Bereits aus diesem Grunde ist die Festlegung einer allgemeingültigen „Grenztemperatur“ für alle infrage kommenden Formationen nicht zielführend. Die Auslegungstemperatur kann nur durch einen Optimierungsprozess für den konkreten Endlagerstandort (inkl. Wirtsgestein) und ein konkretes Konzept festgelegt werden. Die dazu erforderlichen grundlegenden Kenntnisse und Daten sind weitestgehend verfügbar.

Im Folgenden wird der Stand von Wissenschaft und Technik für die drei potenziellen Wirtsgesteine Steinsalz (Kap. 2.1), Tongestein (Kap. 2.2) und Kristallingestein (Kap. 2.3) zusammengefasst. Anschließend werden die Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf die mit diesen Wirtsgesteinen potenziell verbundenen geotechnischen und technischen Barrieren betrachtet (Kap. 2.4).

2.1 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Steinsalz

Die wesentlichen die Barrierenintegrität beeinflussenden temperaturabhängigen Prozesse im Wirtsgestein Steinsalz sind in [5, Kap. 6.1] zusammengefasst, ausführlich diskutiert und weitgehend korrekt wiedergegeben und bewertet. Diese sind:

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden (Perkolation): Die Perkolation beschreibt die Migration von Lösungen durch einen Feststoff. Neue Studien haben gezeigt, dass nach derzeitigem Kenntnisstand keine Permeabilitätssteigerung in natürlichen Steinsalzproben unter den bei einem Endlager zu betrachtenden Drücken und Temperaturen zu erwarten ist.

Kompaktion von Salzgrusversatz: Durch Wärmeeintrag (Temperaturerhöhung) nimmt die Salzgruskompaktionsrate deutlich zu und verursacht einen schnelleren flüssigkeitsdichten Verschluss des Endlagers. Temperaturen um 200 °C im Nahbereich haben somit einen deutlich positiven Effekt auf die Sicherheit und sollten daher bei der Auslegung der Temperatur angestrebt werden. Stoffgesetze und zugehörige Daten zur Beschreibung der Kompaktion von Steinsalzgrus sind gut bekannt.

Mikrobielle Prozesse: Durch mikrobielle Prozesse kann es zu Zersetzungen von z. B. organischen Substanzen, zur Gasbildung, Korrosion und zu Mineralumwandlungen kommen. Es sind meist hyperthermo- und halophile Mikroorganismen bekannt, die bis zu einer Temperatur von etwa 120 °C existieren können. Bei höherer Temperatur kann eine biologische Aktivität jedoch ausgeschlossen werden. Damit wirkt sich eine erhöhte Temperatur oberhalb 100 °C [1] positiv auf die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aus.

Bildung von Sekundärpermeabilitäten durch thermische Degradation von Salz-, Doppelsalz- und Tripelsalzhydraten: In einem geschlossenen System ergibt sich unterhalb des (meist inkongruenten) Schmelzpunkts des Hydrates keine thermische Degradation. Von den zu betrachtenden Hydraten schmilzt unterhalb von 200 °C lediglich der Carnallit inkongruent bei etwa 167 °C. Im offenen System kann eine thermische Entwässerung der Hydrate bereits bei niedrigeren Temperaturen einsetzen. Dies hängt ab vom Gradienten zwischen Gleichgewichtswasserdampfdruck (der seinerseits temperaturabhängig ist) und vom Umgebungsdruck. Insbesondere für den am meisten relevanten Carnallit lässt sich die thermische Entwässerung in offenen Systemen basierend auf dem sehr gut bekannten Phasendiagramm des Systems KCl-MgCl₂-H₂O (Carnallitsystem) und den Wasserdampfdrücken dieses Systems im Temperaturbereich bis etwa 250 °C vorausberechnen [7]. Die Bildung von Sekundärpermeabilitäten durch thermische Degradation, und der damit einhergehende Einfluss auf die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen im Einzelfall standort- und szenarienabhängig geprüft werden.

Thermische Expansion des Wirtsgesteins: Prinzipiell könnte eine thermisch induzierte Volumenexpansion des Gesteins zu einer Verletzung des Fluidruckkriteriums und damit zu einer Beeinflussung der Integrität des Einschchlussvermögens führen. Im Rahmen von Temperatursicherheitsrechnungen und thermisch-mechanisch gekoppelten numerischen Modellrechnungen kann standortspezifisch eine maximal zulässige Temperatur im Wirtsgestein bestimmt werden, unterhalb derer die Einschchlusswirksamkeit nicht gefährdet ist. Beispielsweise wurde gezeigt, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei einer Begrenzung der Temperatur an der Außenfläche der Behälter auf 200 °C in den für die Endlagersicherheit relevanten Bereichen standortspezifisch nicht gefährdet ist.

Thermomigration: Unter Thermomigration ist die durch einen Temperaturgradienten induzierte Mobilisierung von eingeschlossenen Fluiden durch Auflösungs- und Kristallisationsprozesse zu verstehen. Fluideinschlüsse ohne Gasphase können aufgrund eines positiven Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit in Richtung zur Wärmequelle migrieren und Fluideinschlüsse mit Gasphase in die entgegengesetzte Richtung.

Basierend auf sowohl theoretischen Betrachtungen als auch Experimenten („Brine Migration Test“ im Untertagelabor Asse) wurde gezeigt, dass derartige Effekte im Steinsalz vernachlässigbar gering sind.

Zusammenfassend ergibt sich basierend auf dem Stand von Wissenschaft und Technik folgendes Ergebnis: Im Steinsalz sind Temperaturen im Bereich um 200 °C aufgrund der deutlich schnelleren Kompaktion des Verfüllmaterials Salzgrus und des damit einhergehenden relativ schnellen und ausgesprochen wirksamen Abschließens der Abfälle vor potenziellen Laugenzuflüssen von großem Vorteil für die Sicherheit des Endlagers. Die Barrieren werden erst bei extrem hohen Temperaturen nahe der Schmelztemperatur des Steinsalzes geschädigt. Die Bildung von potenziellen Sekundärpermeabilitäten durch thermische Degradation von Salz-, Doppelsalz- und Tripelsalzhydraten lässt sich durch Einhaltung entsprechend großer Abstände zu insbesondere Carnallitvorkommen ausschließen. Die gegebenenfalls sehr geringen Beimengungen von Polyhalit und Kieserit im Nahfeld der Endlagerformation verursachen aufgrund deren relativ hoher inkongruenter Schmelzpunkte (weit oberhalb von 200 °C) keine merklichen Sekundärpermeabilitäten im Temperaturbereich bis über 200 °C.

2.2 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

Die wesentlichen Prozesse, die im Wirtsgestein Tongestein bei erhöhten Temperaturen die Barrierenintegrität beeinflussen können, werden in [5, Kap. 6.2] diskutiert und bewertet. Sie werden im Folgenden zusammengefasst und umfassen vor allem:

Stabilität der Tonminerale: Temperaturabhängige Mineralumwandlungen beeinflussen die einschlusswirksamen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Mit zunehmender Temperatur kann die Illitisierung quellfähiger Smektit-Anteile zunehmen, das Tongestein verliert dabei schrittweise an Quellfähigkeit und Plastizität. Der Übergang von Smektit zu Illit ist abhängig von der thermischen Vorgeschichte des Gesteins (vom noch vorhandenen Smektit-Gehalt in den Tonmineralen), vom Angebot an Kalium und von der Zeitdauer eines thermischen Pulses. In Anwesenheit von Eisen können sich neben Illit auch weitere nicht-quellbare Schichtsilikate bilden. Das kritische Temperaturfenster reicht von 50 °C bis 270 °C.

Auflösung und/oder Neubildung von weiteren Mineralen: Mit der Smektit-Illit-Umwandlung entstehen auch größere Mengen an Quarz, was zusätzlich zur Abnahme von Plastizität und Quellbarkeit des Gesteins führt. Dies wurde in einem Temperaturfenster von 60 °C bis 150 °C beobachtet.

Chemische Alteration der Organika: In Tongestein vorhandenes organisches Material kann bei höheren Temperaturen stufenweise umgewandelt werden und zu einer höheren CO₂- und H₂S-Freisetzung führen (Erhöhung Fluiddruck). Die ablaufenden Prozesse sind stark abhängig von der Art des im Tongestein eingelagerten organischen Materials und dessen thermischer Vorgeschichte. So zeigen schwach konsolidierte Tone wie der Boom-Clay bereits ab 80 °C signifikante Veränderungen, in anderen Gesteinen starten nachweisbare Reaktionen erst ab 150 °C. Die ablaufenden Reaktionen können die Zusammensetzung des Porenwassers verändern sowie Mineralausfällungen oder -auflösungen begünstigen.

Mikrobielle Prozesse: Mikroorganismen sind in allen Tongesteinen vorhanden. Mikrobielle Prozesse werden im Tongestein durch die Auffahrung untertägiger Hohlräume und die Bildung von Auflockerungszonen im

Umfeld der Grubengebäude beeinflusst. Die Aktivität einzelner Mikroorganismengruppen ist stark temperaturabhängig: Erhöhte Temperaturen reduzieren die mikrobiellen Prozesse, bei einer Temperatur um ca. 120 °C kommt die mikrobielle Aktivität nach derzeitigem Kenntnisstand zum Erliegen, somit ist in diesem Fall eine Temperatur oberhalb von 100 °C [1] möglicherweise von Vorteil.

Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen: Tonminerale können auf ihren Oberflächen reversibel Wasser binden, bei Wasseraufnahme quellen und bei Wasserabgabe schrumpfen. Bei Erwärmung geht gebundenes Wasser wieder in freies Porenwasser über und erhöht die kinematische Porosität. Quellen und Schrumpfen sind temperaturabhängige Prozesse, die schon unterhalb von 100 °C beginnen.

Sorption und Desorption: Die Dichte verfügbarer experimenteller Daten zur Sorptionsfähigkeit von Radionukliden an verschiedenen Tonmineralen bei erhöhten Temperaturen nimmt bei erhöhten Temperaturen ab. Das Sorptionsverhalten zeigt dabei keine einheitliche Temperaturabhängigkeit. Mit zunehmender Temperatur kann gleichzeitig vorgängig adsorbiertes CO₂ freigesetzt werden (Desorption).

Thermische Expansion oder Kontraktion: Temperatursensitive Prozesse können sich auf die Integrität des Tongesteins auswirken. Erwärmungen im Tongestein wirken sich bei tiefen Temperaturen nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften des Tongesteins aus, oberhalb von etwa 150 °C ist hingegen eine positive Wirkung auf die Wärmeleitfähigkeit, die Festigkeit, die Steifigkeit und die Permeabilität des Tongesteins festzustellen. Im Unterschied zur Expansion bei tiefen Temperaturen scheint jedoch die Kontraktion bei hohen Temperaturen irreversibel.

Zusammenfassend zeigen die Betrachtungen der GRS [5], dass sich je nach betrachtetem Prozess sowohl eine Temperaturzunahme als auch eine Temperaturabnahme negativ auf die Sicherheit eines Endlagers in einem Tongestein auswirken könnte. Ein Teil der Prozesse kann bereits bei Temperaturen unterhalb von 100 °C relevant sein und daher die Wahl eines Wirtsgesteins und der Materialien der geotechnischen und technischen Barrieren, d. h. die Gesamtauslegung eines Endlagers beeinflussen. Die tongesteinspezifische Temperaturabhängigkeit der Prozesse ist jedoch von einer Vielzahl von Parametern und Wechselwirkungen abhängig. Bei diversen Literaturdaten sollte die Übertragbarkeit auf ein konkretes Tongestein geklärt werden.

Die GRS [5, Kap. 6.2] kommt zum Schluss, dass die Festlegung einer pauschalen Temperaturbegrenzung ohne Berücksichtigung eines Endlagerkonzepts in Tongestein „sicherheitstechnisch unzureichend begründbar“ ist. Die Ausführungen der GRS werden durch internationale Berichte gestützt (z. B. [8]).

2.3 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Kristallingestein

Kristallin als Wirtsgestein ist entstehungsbedingt temperaturunempfindlich. So waren Kristallingesteine während ihrer magmatischen und/oder metamorphen Entstehung Temperaturen ausgesetzt, die weit oberhalb der Temperaturen liegen, die in Endlagern aufgrund der Zerfallswärme radioaktiver Abfälle zu erwarten wären. Die meisten silikatischen Minerale wandeln sich erst bei einem Druck von ca. 600-800 MPa (d. h. bei deutlich höheren als in einem Endlager erwarteten Drücken) und einer Temperatur von über 300 °C unter den Bedingungen einer Regionalmetamorphose sekundär um [5, Kap. 6.3].

Innerhalb von Kristallingesteinen treten Trennflächen mit natürlich auftretenden tonigen Kluffbelägen auf, welche aus der hydrolytischen Verwitterung der angrenzenden silikatischen Festgesteinsmatrix resultieren. Diese wären mineralogisch in der Lage, den Transport gelöster Radionuklide durch Sorptionsvorgänge zu verzögern. In den derzeitigen Sicherheitskonzepten für Kristallinsysteme wird in unmittelbarer Endlagernähe kein sicherheitstechnischer Kredit genommen, da hier das Auftreten von Trennflächen aufgrund ihrer hydraulischen Transmissivität als nachteilig angesehen wird. So werden in dem heute seitens Finnland und Schweden verfolgten Sicherheitskonzept (KBS-3-Konzept, [9]) Endlagerbehälter nicht eingelagert, wenn bei der Auffahrung von Einlagerungsbohrlöchern relevante Trennflächen angetroffen werden. Stattdessen wird das Einlagerungsbohrloch ohne Behälter mit Bentonit verfüllt. Weiterhin ist der Nachweis der Existenz dieser tonigen Kluffüllungen methodisch sehr schwierig.

Sicherheitskonzeptionelle Temperaturlimitierungen ergeben sich daher vor allem aufgrund der Tatsache, dass in den derzeitigen Verschlusskonzepten für Endlager in Kristallingestein gleichermaßen wie solchen im Tongestein der Einsatz von Bentonit als die Behälter umgebendes Versatzmaterial (Buffer) vorgesehen ist. Insofern gelten die gleichen Temperatureinflüsse wie in Kapitel 2.2 für Tongestein dargelegt.

Insbesondere gilt dies für

- temperaturabhängige Umwandlungen von Tonmineralen (Transformation von Smektit in Illit),
- Auflösung und/oder Neubildung von weiteren Mineralen,
- mikrobielle Prozesse,
- Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen und
- Sorption und Desorption.

Im von Finnland und Schweden verfolgten KBS-3-Konzept wird zur Gewährleistung der einschlusswirksamen Eigenschaften des Bentonitbuffers daher eine obere Temperaturgrenze von 100 °C festgelegt. Weiterhin wird seitens der schwedischen SKB eine untere Temperaturbegrenzung von -4 °C festgesetzt, um das Gefrieren des Buffers und den damit einhergehenden Verlust der Quelldruckentwicklung von Bentonit ausschließen zu können [9].

Nach [10] wird angenommen, dass möglicherweise bei Temperaturen oberhalb von 100 °C die Korrosion an den Außenflächen der Behälter aufgrund einer möglichen Anreicherung von ausgefällten Mineralen bei Sättigung des Bentonit-Buffers infolge eines teilweisen Verdampfens der wässrigen Lösung im Porenraum des Bentonits zunimmt.

Ein weiterer Grund, seitens SKB die Temperatur an der Außenseite der Endlagerbehälter auf 100 °C zu beschränken, ist, dass nicht auszuschließen ist, dass bei höheren Temperaturen die Struktur des Behältermaterials nachteilig beeinflusst wird [11].

2.4 Einfluss der Temperatur auf geotechnische und technische Barrieren

Die Temperatur hat einen Einfluss auf eine Reihe von Prozessen in der Nachverschlussphase eines Endlagers, die nicht das Wirtsgestein betreffen, aber die ggf. weiteren eingesetzten geotechnischen und technischen

Barrieren (vgl. [5, Kap. 6.4]). Im Unterschied zum Wirtsgestein können diese Barrieren an die Temperaturentwicklung zumindest in gewissem Grade angepasst werden. Die folgende Liste temperatursensitiver Prozesse ist nicht vollständig, zeigt aber gleichwohl, dass die Verwendung einer einheitlichen 100 °C-„Grenztemperatur“ nicht sinnvoll ist.

Bentonitstabilität: Eine Übersicht über den aktuellen Wissensstand zu den temperaturabhängigen Eigenschaften von Bentonit findet sich in [8]. Alle Prozesse, die die Quelleigenschaften von Bentonit beeinflussen, sind temperaturabhängig, aber unter 130 °C von geringer Bedeutung. Bei einer Temperatur von 150 °C und darüber sinkt der Quelldruck, und die hydraulische Leitfähigkeit nimmt zu. Dennoch zeichnen sich auch diese hydrothermal veränderten Bentonite durch eine sehr niedrige hydraulische Leitfähigkeit sowie eine angemessene Plastizität und Sorptionsfähigkeit aus, selbst wenn der Gehalt an quellfähigem Ton gering ist.

Eigenschaften der Bentonitbarriere: Der Quelldruck von kompaktiertem Bentonit hängt stark von der Trockendichte des Bentonits ab und nimmt mit steigender Temperatur ab. Die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit hat erhebliche Auswirkungen auf die Spitzentemperaturen im Nahbereich der eingelagerten radioaktiven Abfälle. Da das Grundwasser nur langsam in Richtung der Abfälle strömt und ein thermischer Gradient über die Barriere existiert, wird der ungesättigte Bentonit in der Nähe des Behälters einige Jahrzehnte lang ungesättigt bleiben und erhöhten Temperaturen ausgesetzt sein. Eine gute Modellierung der thermischen Eigenschaften erfordert die Berücksichtigung der Änderungen der Wärmeleitfähigkeit mit dem Sättigungsgrad des Bentonits.

Mineralogische Veränderungen in Bentonit treten bei $T > 100$ °C auf, wie die Umwandlung von Montmorillonit in Beidellit. Die Kationenaustauschkapazität und die spezifische Oberfläche nehmen ab, ebenso die Wasserdampfadsorption. Einige der Veränderungen hängen mit der unterschiedlichen Zusammensetzung der Zwischenschichtkationen und mit Smektit-Aggregationsprozessen zusammen. Eine wichtige thermische Auswirkung auf das mechanische Verhalten ist die thermische Ausdehnung, die von einem konstanten thermischen Dilatationskoeffizienten abgeleitet werden kann.

Behälterkorrosion: Eine Temperaturerhöhung führt in Kontakt mit Grund- oder Porenwasser generell zu einer Erhöhung der Korrosionsraten von Endlagerbehältern in der wenige tausend Jahre dauernden thermischen Phase. Die Behälterausrüstung muss dies z. B. bei der Materialwahl oder der Wahl der Behälterwandstärke berücksichtigen, um die in der Endlagerauslegung vorgesehenen Behälterstandzeiten zu gewährleisten.

Stabilität der hochaktiven Abfallprodukte: Der Endlagerbehälter stellt sicher, dass keine Grund- oder Porenwässer insbesondere im Verlauf der thermischen Phase in Kontakt mit den Abfallprodukten kommen. Sollte trotz dieser Vorsorge eine kleine Zahl von Behältern undicht werden, so lässt sich zum Verhalten der Abfallprodukte bei erhöhter Temperatur festhalten:

- **Stabilität der verglasten Abfälle:** Anfängliche Korrosionsraten erhöhen sich mit einer von der Glaszusammensetzung abhängigen bekannten Aktivierungsenergie, die jedoch nach Sättigung des vorhandenen Porenwassers mit aufgelöstem Silizium schnell um mehrere Größenordnungen abnimmt. Für die Kopplung zwischen Korrosionsraten von Glas und der Präsenz von Behälterkorrosionsprodukten ist der Einfluss der Temperatur nicht bekannt; diese Kopplung wird daher in Sicherheitsanalysen konservativ beschrieben. Da die thermische Phase im Vergleich zur Lebensdauer der Glaskokillen kurz

ist, lässt sich aus den Bedingungen der Glasstabilität für keine geologische Formation eine „Grenztemperatur“ ableiten.

- **Stabilität des abgebrannten Kernbrennstoffes:** Die Temperaturabhängigkeit der Brennstoffkorrosion im Porenwasser ist unabhängig vom Wirtsgestein sehr gering. Dies gilt auch für die Höhe der instantanen Freisetzung einiger Nuklide wie ^{129}I , sodass sich hieraus keine „Grenztemperatur“ ableiten lässt.

Mobilität der Radionuklide: Sollten trotz aller Vorsorge einzelne Behälter während der thermischen Phase undicht werden, so könnten Radionuklide durch Korrosion der Abfallprodukte freigesetzt werden. Die Mobilität der Radionuklide im Nahfeld der Abfallprodukte wird dann durch temperaturabhängige Löslichkeit, Mitfällungen, Redoxreaktionen und Sorption (an Behälterkorrosionsprodukten, Verfüllmaterialien und Mineralen der Gesteinsformation) sowie Diffusions- und Advektionsprozesse bestimmt. Zugehörige thermodynamische Konstanten sind für Schlüsselnuklide in allen Gesteinsformationstypen weitgehend bekannt, wobei die Datendichte mit zunehmender Temperatur abnimmt. Die Mobilität einiger Radionuklide kann sich dabei mit zunehmender Temperatur erhöhen, aber der Einfluss auf die Endlagersicherheit ist gering, da die thermische Phase im Hinblick auf die langen Migrationszeiten bis zur Biosphäre kurz ist und erwartet wird, dass nur wenige Behälter ihre Dichtheit in der thermischen Phase verlieren. Eine „Grenztemperatur“ lässt sich darüber nicht begründen.

Zusammenfassend zeigen die Ausführungen in Kapitel 2, dass eine Beschränkung auf eine „Grenztemperatur“ angesichts der verschiedenen zur Diskussion stehenden Endlagerkonzepte einen für alle Wirtsgesteine geltenden Temperaturwert nicht rechtfertigt. Der im Auftrag des BASE von der GRS 2019 vorgelegte Bericht [5] kommt zu einem klaren Resultat: *„Daher sollten „Grenztemperaturen“ für die Außenfläche von Abfallbehältern für das jeweilige Sicherheits-, Endlagerkonzept und Wirtsgestein abgeleitet werden. Eine generelle „Grenztemperatur“ könnte den Standortauswahlprozess wegen der eingeschränkten Möglichkeiten einer Optimierung des Endlagers erschweren.“* Die ESK schließt sich dieser Schlussfolgerung an.

3 Schlussfolgerung für die Endlagerauslegung

Gemäß StandAG [1] und Bericht der Endlagerkommission [2] wurde die „Grenztemperatur“ aus Vorsorgegründen eingesetzt. Dieser Bezug auf ein Vorsorgeprinzip ist aus Sicht der ESK nicht korrekt, da der Bezug auf ein Vorsorgeprinzip immer eine Richtung voraussetzt, in die vorsorglich optimiert werden kann. Die Ausführungen in Kapitel 2 zeigen hingegen, dass dies nur beschränkt und für bestimmte Wirtsgesteine überhaupt nicht zutrifft. Weder im StandAG [1] oder dessen Begründung [3], noch im Bericht der Endlagerkommission [2] wird genauer ausgeführt, was für ein Vorsorgeprinzip hier effektiv Anwendung findet. Die Ausführungen in Kapitel 2 zeigen hingegen, dass eine pauschal für alle Wirtsgesteine geltende, maximal zulässige Temperatur von 100 °C an der Außenfläche der Abfallbinde „aus Vorsorgegründen“ wissenschaftlich nicht begründbar ist.

In [1, § 27 (4)] wird das Einsetzen einer „Grenztemperatur“ *„aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten“* begründet. Die ESK ist in Übereinstimmung mit den Schlussfolgerungen in [4] und [5] der Ansicht, dass der Stand von Wissenschaft und Technik bereits heute klar zeigt, dass die Formulierung einer wirtsgestein-unabhängigen bzw. standortübergreifenden „Grenztemperatur“ wissenschaftlich und sicherheitstechnisch nicht

begründbar ist. Das im Gesetz vorgesehene Abwarten ausstehender Forschungsergebnisse zu einer solchen „Grenztemperatur“ ist damit obsolet. Forschungen zu den Temperaturabhängigkeiten bleiben jedoch im Standortauswahlverfahren weiterhin wichtig für jedes Wirtsgestein, z. B. zum Einfluss thermisch induzierter Schädigungen auf die Langzeitentwicklung relevanter Prozesse oder zu wirtsgestein- und endlagerkonzept-abhängigen Auslegungstemperaturen. Darüber hinaus stellen Sicherheitsuntersuchungen im Ausland darauf ab, dass die Behälter über die thermische Phase hinweg dicht bleiben, so dass z. B. eine exakte Prognose des Radionuklidtransports bei erhöhten Temperaturen entfallen kann.

Ein wichtiger Parameter bei der Auswahl des Endlagerstandorts mit der „bestmöglichen Sicherheit“ (vgl. [1, § 1]) ist die Größe des Endlagers. Die Variabilität von Gesteins- und Gebirgseigenschaften innerhalb eines kleineren Volumens ist geringer als bei einem größeren Volumen. Ein kleineres Volumen ist vorteilhaft für die Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und kann die Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager senken. Ein Endlager kann umso kleiner ausgelegt werden, je höher die mögliche Temperatur an der Außenfläche der Behälter ist, je höher die Wärmeleitfähigkeit des Gebirges ist und je länger die Zeit der Zwischenlagerung ist. Die Flächengröße von Endlagern in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein ist in [12] bei verschiedenen Auslegungstemperaturen an der Außenfläche der Behälter berechnet worden. Für Steinsalz wurde berechnet, dass sich die Fläche des Endlagers bei einer Auslegungstemperatur von 200 °C an der Außenfläche der Behälter mehr als halbiert gegenüber der Fläche eines Endlagers mit einer Auslegungstemperatur von nur 100 °C. Dieses Beispiel zeigt, dass die Temperatur als kritischer Auslegungsparameter wirtsgestein-, endlagerkonzept- und im Verlauf des Standortauswahlverfahrens auch standortspezifisch zu berücksichtigen ist. Es wird auch ersichtlich, dass bereits in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens eine Anwendung von [1, § 27 (4)] zum voreiligen Ausschluss von potenziellen Standorten aufgrund ihres Platzangebotes führen könnte und daher dringend eine Klärung zum Umgang mit den entsprechenden Forderungen des Standortauswahlgesetzes notwendig ist.

4 Fazit und Empfehlungen der ESK zum weiteren Vorgehen

Das Standortauswahlgesetz [1] fordert in § 27 (4): *„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“* Bereits in der Gesetzesbegründung [3, S. 76] wird jedoch festgestellt: *„Da durch die Temperaturänderungen in geotechnischen Barrieren und umgebendem Gebirge Prozesse mit unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit ausgelöst, beschleunigt oder verstärkt werden können, sind Festlegungen von wirtsgesteinspezifisch oder gar allgemein gültigen Grenztemperaturen und ihre Anwendung zur zuverlässigen Vermeidung nachteiliger Konsequenzen für die Endlagersicherheit nur bedingt geeignet.“*

Der oben dargestellte Stand von Wissenschaft und Technik bestätigt die in [3] formulierte Sicht. Die Festlegung jeglicher Grenzwerte kann nur dann durch das Vorsorgeprinzip gerechtfertigt werden, wenn eine Einhaltung der Grenzwerte eindeutig risikomindernd wirkt und dadurch unnötige „Umweltgefahren vermieden“ werden (<https://www.juraforum.de/lexikon/vorsorgeprinzip>). Dies ist jedoch wegen der „unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit“ [2, 3] im vorliegenden Fall nicht gegeben. Eine isolierte Betrachtung einzelner Effekte ist in diesem Zusammenhang nicht zielführend. Auch im Standortauswahlverfahren entspricht die Festlegung eines Grenzwertes für die Temperatur nicht dem

Vorsorgeprinzip: So führt z. B. eine Endlagerauslegung aufgrund der Festlegung solcher Grenzwerte zu potentiell hohem Platzbedarf. Durch die damit größere Ausdehnung des Endlagers ist mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs stärker variieren als bei einem Endlager mit kleineren Abmessungen. Dies führt, insbesondere vor dem Beginn von Erkundungen, zu höheren Ungewissheiten.

Für die ESK ergeben sich drei Schlussfolgerungen:

- Die Festlegung einer wirtsgesteinunabhängigen „Grenztemperatur“ ist durch das Vorsorgeprinzip nicht gerechtfertigt.
- Die in [1, § 27 (4)] als „ausstehend“ bezeichneten Forschungsergebnisse liegen vor, so dass nicht mehr von einer für alle Wirtsgesteine einheitlichen „Grenztemperatur“ ausgegangen werden sollte (vgl. [4], [5], [8]). Forschung und Entwicklung – auch hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Auswirkungen des Wärmeeintrags in ein Endlager – entwickeln sich weiter, die wesentlichen Effekte sind aber seit Langem bekannt. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wären ggf. konzeptspezifisch, wirtsgesteinspezifisch und standortspezifisch, nicht jedoch allgemein verbindlich generisch abzuleiten.
- In Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens sind von der Vorhabenträgerin Konzepte für Endlager in verschiedenen Wirtsgesteinen zu entwickeln und damit auch die räumliche Ausdehnung (Fläche und Höhe) des Endlagers festzulegen. Für diese Endlagerkonzepte werden repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen ausgeführt. Diesen sollte keine einheitliche „Grenztemperatur“ zu Grunde gelegt werden. Vielmehr sollten aufgrund des jeweiligen vorläufigen Sicherheitskonzepts Anforderungen hinsichtlich der Temperaturverteilung und -entwicklung im Endlagersystem wirtsgesteinspezifisch bzw. standortspezifisch formuliert und das Endlager entsprechend ausgelegt werden (Temperatur als Auslegungsparameter bei den Sicherheitsuntersuchungen). Die Auswirkungen des Wärmeeintrags auf die Barrierenintegrität und auf die Sicherheit von Einlagerungs- und Rückholprozessen sowie auf die jeweilige gewählte Auslegungstemperatur sind dabei entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik einschließlich der vorhandenen Datendichte zu beurteilen, eventuelle Ungewissheiten sind (z. B. durch Variantenbetrachtungen) zu berücksichtigen und ggf. Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wirtsgestein- bzw. endlagerkonzeptspezifisch abzuleiten. Mit einer solchen Vorgehensweise wird auch das Risiko umgangen, dass Untersuchungsräume allein aufgrund des 100 °C Kriteriums frühzeitig aus dem Verfahren ausscheiden, obwohl deren sonstige Eigenschaften für einen Verbleib im Verfahren sprechen.

Die Endlagerkommission hatte vorgeschlagen, die Fragestellungen zur Temperatur „*vom Vorhabenträger bis zum Ende der Phase 1*“ klären zu lassen [2, S. 327]. Das BASE hatte die Initiative ergriffen und der GRS den Auftrag erteilt, zum Thema „Grenztemperatur“ eine klärende Literaturstudie vorzulegen. Diese liegt seit dem Frühjahr 2019 vor. Ausgehend von diesen Studienergebnissen kommt die ESK zu der Schlussfolgerung, dass für die BGE die Möglichkeit besteht, von einer einheitlichen „Grenztemperatur“ von 100 °C [1] abzuweichen. Die Vorhabenträgerin kann somit in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens bereits im Hinblick auf die Temperatur als Auslegungsparameter optimierte Endlagerkonzepte als Grundlage für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen entwickeln. Gegebenenfalls sind für die Nachweisführung ergänzende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu initialisieren.

5 Unterlagen

- [1] StandAG:
Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [2] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
Abschlussbericht
Deutscher Bundestag, Drucksache 18/9100, 19.07.2016, 579 S.
- [3] Begründung des Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze (Deutscher Bundestag – 18. Wahlperiode – Drucksache 18/11398 - 76).
- [4] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2016):
Wärmeverträglichkeit/Gesteinsverträglichkeit. Gutachten im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.
K-MAT 64 (Auftrags-Nr. 565003).
- [5] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2019):
Untersuchungen zu den “maximalen physikalisch möglichen Temperaturen” gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern - Vorhaben 4717E03241
urn:nbn:de:0221-2019111520402.
- [6] Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094).
- [7] H.-H. Emons and Th. Fanghänel
Thermal decomposition of carnallite ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) - comparison of experimental results and phase equilibria
Journal of Thermal Analysis 35, 2161-2167 (1989).

- [8] Villar, M.V., Armand, G., Conil, N., de Lesquen, Ch., Herold, Ph., Simo, E., Mayor, J.C., Dizier, A., Li, X., Chen, G., Leupin, O., Niskanen, M., Bailey, M., Thompson, S., Svensson, D., Sellin, P., Hausmannova, L.
D7.1 HITEC. Initial State-of-the-Art on THM behaviour of i) Buffer clay materials and of ii) Host clay materials.
Deliverable D7.1 HITEC. EURAD Project, Horizon 2020, No 847593, 214 pp.
- [9] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site.
SKB Technical Report, TR10-47, 361 S., 2010.
- [10] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
Deep repository for spent nuclear fuel, SR 97 - Post-closure safety.
SKB Technical Report, TR-99-06: Stockholm, 1999.
- [11] Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB):
Design, production and initial state of the canister.
SKB Technical Report, TR-10-14, 111 S., 2010.
- [12] DBE-Technology (4/2016):
Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für Wärme entwickelnde hoch radioaktive Abfälle“ im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle
K-MAT 58.