



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens

Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur

GRUNDLAGENBERICHT

BGE-2024-GB-1

April 2024



**BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG**

DOI

10.61046/BGE2024GB1

IMPRESSUM

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

© 2024

Alle Inhalte dieses Berichtes, insbesondere Texte, Fotografien und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das ausschließliche Verwertungsrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Bitte fragen Sie uns vorab, falls Sie die Inhalte dieses Berichts verwenden möchten

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 3

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt	1
Revisionsblatt	2a
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
Anlagenverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Veranlassung	6
2 Zusammenfassung der beauftragten Studien	9
2.1 Studie zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten	9
2.1.1 Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Steinsalz	11
2.1.2 Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein	13
2.1.3 Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten im Kristallin	15
2.2 Studie zur Prüfung der Machbarkeit des sicheren Betriebs und der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit	17
2.2.1 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Steinsalz	18
2.2.2 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Tongestein	18
2.2.3 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Kristallin	19
3 Festlegung der wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen für Schritt 2 der Phase I	20
3.1 Bezug zum Sicherheitskonzept	20
3.2 Auslegungstemperatur für Steinsalz	20
3.3 Auslegungstemperatur für Tongestein	21
3.4 Auslegungstemperatur für Kristallin	23
Literaturverzeichnis	25
Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	27

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 4

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der RN-transportrelevanten (a) und integritätsrelevanten (b) TUFs für den Versatz sowie die daraus erstellten GTUF.	12
Abbildung 2:	Abbildung der integritätsrelevante TUFs für den ewG. (a) Variante 1, basierend u. a. auf der Gleichgewichtung aller Prozesse, wodurch der vorteilhafte Einfluss mikrobieller Prozesse erkennbar ist. (b) Variante 2, basierend u. a. auf der Gewichtung der beteiligten Prozesse entsprechend ihrer Bilanzierung.	14
Abbildung 3:	Darstellung der integritätsrelevanten TUF und GTUF für den Behälter für Variante 2 (a) und der TUF bzw. GTUF für den Versatz, unabhängig der Variante (b).	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Festgelegte wirtsgesteinsspezifische Auslegungstemperaturen für den Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.	20
------------	--	----

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Prüfvorgabe für eine Studie einer geeigneten wirtsgesteins-spezifischen Auslegungstemperatur für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle entsprechend StandAG GZ: SG02301/7-16/1-2022#1 Objekt-ID: 920199 Revision: 00	Blattzahl: 8
-----------	--	--------------

Gesamte Anzahl der Blätter dieses Dokumentes inkl. Anlagen 35

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 5

Abkürzungsverzeichnis

BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
BGE TEK-ES	Bereich Technik, Endlagersicherheit
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
DAEF	Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Endlagerforschung
EndISiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
ESK	Entsorgungskommission
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	features, events and processes
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
GTUF	Gesamttemperaturunverträglichkeitsfunktion
H₂S	Schwefelwasserstoff
NBG	Nationales Begleitgremium
RN	Radionuklid
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
StandAG	Standortauswahlgesetz
TG	Teilgebiet(e)
THMCBR-Prozesse	thermische, hydraulische, mechanische, chemische, biologische und radiologische Prozesse
TUF	Temperaturunverträglichkeitsfunktion
vsU	vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 6

1 Veranlassung

In der vorliegenden Unterlage erläutert die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) den Umgang mit der Grenztemperatur in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens. Wesentlicher Inhalt des Dokuments sind wirtsgesteinsspezifische Auslegungstemperaturen, die ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens von der BGE angewendet werden. Dafür werden zunächst die Inhalte der relevanten, durch die BGE beauftragten Grundlagenarbeiten zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Einordnung der Grundlagenarbeiten, aus welcher die Auslegungstemperaturen hervorgehen.

Für die Anwendungen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) ist nach § 27 Abs. 4 Standortauswahlgesetz (StandAG) Folgendes vorgegeben:

„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.“

Die hier angegebene Grenztemperatur ist eine Festlegung, die sich aus der Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle, den thermischen Eigenschaften des Versatzmaterials und des Wirtsgesteins und der Gebirgstemperatur in der jeweiligen Teufe ergibt. Die Gebirgstemperatur nimmt mit der Teufe graduell und variabel zu (geothermischer Gradient), diese Zunahme ist regional verschieden (räumlich unterschiedlicher, natürlicher Wärmefluss). Im Mittel beträgt die Zunahme in Deutschland ca. 3 °C pro 100 m Teufe, sodass unter Einbeziehung einer Oberflächentemperatur von bspw. 10 °C in 1 000 m Teufe 40 °C vorliegen würden. Basierend auf existierenden Bohrlochinformationen werden derzeit Karten zur Ableitung der Temperaturverteilung im Untergrund entwickelt; die an dem jeweiligen Standort tatsächlich vorliegende Temperatur bleibt jedoch konkreten Erkundungsarbeiten vor Ort vorbehalten.

Die im StandAG vorläufig festgelegte Grenztemperatur basiert auf einer Empfehlung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (K-Drs. 268). Sie stellt keine „maximal physikalisch mögliche“ Temperatur dar, sondern eine regulatorische Vorgabe, welche mit einer Vorsorge begründet wird. Diese Vorgabe wird von verschiedenen Seiten kritisch diskutiert. Je nach Wirtsgestein und Endlagerkonzept sind Temperaturen von maximal 100 °C nicht ausschließlich vorteilhaft für die Sicherheit (Röhlig 2017). Darüber hinaus schränkt eine Festlegung auf eine vorzeitige Grenztemperatur Optimierungspotenziale ein (K-Drs. 268, S. 507). Die Entsorgungskommission (ESK) kommt zu dem Schluss, dass eine standortübergreifende und für alle Wirtsgesteine allgemein gültige Grenztemperatur wissenschaftlich und sicherheitstechnisch nicht begründbar ist (ESK 2022).

Der Begriff der Grenztemperatur wird in der Fachwelt kritisch diskutiert. Für die BGE ist zum aktuellen Zeitpunkt des Verfahrens wichtig, belastbare und bis zum Ende der Phase I nicht mehr angepasste Temperaturen bspw. für die Berechnung der Flächenbedarfe oder des Radionuklidtransports vorliegen zu haben. Des Weiteren wird eine Festlegung bereits jetzt für die Endlagerbehälterentwicklung für Phase II benötigt. Aus diesem Grund wird hier der Begriff einer Auslegungstemperatur für die Phase I, Schritt 2 verwendet. Ziel ist es, anhand von verschiedenen Grundlagenarbeiten

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 7

günstige Auslegungstemperaturen für die Anwendung in Schritt 2 Phase I zu erhalten. Es ist prinzipiell möglich, diese Auslegungstemperaturen in späteren Phasen des Verfahrens anzupassen, dies ist jedoch nicht beabsichtigt. Diese Auslegungstemperaturen gelten ebenfalls für die Außenfläche der Behälter. Sie erheben jedoch nicht den Anspruch die „maximal physikalisch möglichen“ Temperaturen zu sein¹, da als „maximal physikalisch möglich“ Temperaturen auch höhere Temperaturen verstanden werden können, die aus Sicht der Machbarkeit des Einlagerungs- und Rückholungsbetriebes vielleicht machbar, aber weder sinnvoll noch zielführend sind (z. B. aufgrund eines nicht vertretbaren technischen Aufwands oder nicht vertretbaren Einflusses auf die Betriebssicherheit bzw. Rückholbarkeit).

Als Grundlage wurden von der BGE die folgenden Arbeiten beauftragt:

- 2020: THMC-Sim Vorhaben (Langtitel: „Thermische Integrität von Ton und Tonsteinen – Experiment und gekoppelte THMC-Simulationen“), Verständnis des Langzeitverhaltens von Ton und Tongestein bei variablen Temperaturen² (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS))
- 2022: Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten, wirtsgesteinsspezifische Aufstellung wissenschaftlicher Grundlagen für die Ableitung einer für die Langzeitsicherheit günstigen Temperatur (GRS)
- 2023: Bewertung des sicheren Betriebs und der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit (BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC))

Die Auslegungstemperaturen sollen wirtsgesteinsspezifisch und größer gleich 100 °C sein. Dies erfolgt insbesondere aufgrund der Tatsache, dass es auch bei Auslegungstemperaturen abweichend von 100 °C sowohl negative als auch positive Effekte auf die Sicherheit eines Endlagers (Begründung zum StandAG) geben kann, die wiederum abhängig vom Wirtsgestein sind (Bracke et al. 2019). Die Anpassung, der nach § 27 Abs. 4 StandAG vorgegebenen Grenztemperatur zu einer Auslegungstemperatur, soll im Wesentlichen die Integrität der wesentlichen Barriere und somit den sicheren Einschluss der Radionuklide bestmöglich gewährleisten.

Die BGE schließt zum gegenwärtigen Zeitpunkt Temperaturen kleiner als 100 °C grundsätzlich für die Auslegung aus. Es wurden solche Temperaturen zwar punktuell mit untersucht, sie sind jedoch nicht Teil dieser Einordnung.

¹ Die Auslegungstemperatur ist eine notwendige Temperaturannahme für die Planung der Endlagerauslegung, sie darf bei der Planung nicht überschritten werden.

² Der Forschungssteckbrief für das THMC-Sim Vorhaben ist unter folgendem Link zu finden: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20220112_BGE_Steckbrief_fuer_Forschungsvorhaben_Thermische_Integritaet_REV00_barrierefrei.pdf

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 8

Die BGE hat u. a. in einer Reihe von öffentlichen Veranstaltungen zu dem aktuellen Stand der Arbeiten zum Thema Grenztemperatur berichtet:

- bei den 2. (11. – 12.02.2021) und 3. Tagen der Standortauswahl (8. – 10.06.2022),
- am Fachworkshop des Bundesamts für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Grenztemperatur als Anforderung im Standortauswahlverfahren (28.03.2023)
- und dem 1. Forum Endlagersuche (20./21.05.2022) sowie dem 2. Forum Endlagersuche (18.11.2023).

Zudem fanden eine Reihe von Diskussionen mit Fachexperten und Fachexpertinnen statt, bei denen die Herangehensweise der BGE zur Aktualisierung der Grenztemperatur vorgestellt und kritisch diskutiert wurde. Aus den Diskussionen mit Fachleuten und der Öffentlichkeit resultierten immer wieder Anpassungen bei der Bearbeitung durch die BGE. Das aktuellste Beispiel ist die Einbeziehung der Rückholbarkeit, welche beim „Fachworkshop: Grenztemperatur als Anforderung im Standortauswahlverfahren“ im März 2023 gefordert wurde.

Gemäß § 13 Abs. 1 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) müssen die Behälter „... bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein.“ Da hohe Temperaturen einige hundert Jahre nach Verfüllung auftreten können (BGE 2022/2), ist es möglich, dass die Rückholung von Abfällen auf einen Zeitpunkt maximaler Aufheizung fällt. Daher ist zur Prüfung der Machbarkeit des Einlagerungs- und des Rückholungsbetriebs dieser ungünstigste Zeitpunkt bei der Erarbeitung einer Auslegungstemperatur zu berücksichtigen.

Während des Fachworkshops des BASE wurde ebenfalls eindeutig durch das BASE und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) kommuniziert, dass die Aufgabe der Anpassung der Grenztemperatur im Standortauswahlverfahren bei der BGE liegt. Die Prüfung der Arbeiten der BGE durch das BASE findet nach Vorlage des Standortregionenvorschlags im Rahmen von § 15 StandAG durch das BASE statt.

Für die BGE ist eine verbindliche Festlegung der Auslegungstemperatur für Schritt 2 Phase I bis Ende des I. Quartals 2024 von großer Bedeutung, um keinen zeitlichen Verzug in dem umfangreichen Projekt der Ermittlung von Standortregionen (§ 14 StandAG) zu riskieren. Eine Überprüfung der Konkretisierung dieser Auslegungstemperaturen, z. B. im Sinne einer standortspezifischen Anpassung, in späteren Phasen des Verfahrens erscheint aus heutiger Sicht als sinnvoll.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 9

2 Zusammenfassung der beauftragten Studien

Die Studie der GRS zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten beschäftigt sich mit den Themen der Langzeitsicherheit (Kapitel 2.1), während die Studie der BGE TEC die Betriebssicherheit behandelt (Kapitel 2.2). Die Ergebnisse dieser Studien stellen die wesentlichen Grundlagen für den Vorschlag der Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I dar. An dieser Stelle werden Zusammenfassungen der jeweiligen Studien präsentiert. Details zu den Arbeiten sind den jeweiligen Ergebnisberichten der GRS (Czaikowski et al. 2024a, 2024b, 2024c) und der BGE TEC (Bertrams & Leonhard 2024) zu entnehmen. Die Ergebnisse des THMC-Sim Vorhabens fließen nicht direkt in die Festlegung der Auslegungstemperaturen mit ein. Ergebnisse des Vorhabens wurden teils in der Studie zur Ableitung von Temperaturverträglichkeiten mitverarbeitet.

2.1 Studie zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten

Das von der GRS durchgeführte Vorhaben „Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten“ begann im Mai 2022 und endet im November 2023 (Czaikowski et al. 2024a, 2024b, 2024c). Ziel des Vorhabens war es, wirtsgesteinsspezifische Temperaturvorschläge (sog. Prüfvorgaben³, Anlage 1) der BGE durch die GRS prüfen zu lassen.

Basierend darauf entwickelte die GRS eine Methodik, die es erlaubt, die Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten in Abhängigkeit des Wirtsgesteins abzuleiten. Dabei bewertet die Temperaturverträglichkeit einer Endlagerkomponente die Konsequenzen hinsichtlich der Langzeitsicherheit dieser Komponente, indem die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport und die Integrität der Barrieren in dem Temperaturbereich von 35 °C bis 250 °C untersucht werden. Ziel der Methodik ist es, eine günstige Temperatur (oder Temperaturbereich) pro Endlagerkomponente abzuleiten, um daraus eine Aussage zu einer günstigen Temperatur für das gesamte Endlagersystem hinsichtlich der Langzeitsicherheit treffen zu können.

Im Allgemeinen lässt sich die Methodik zur Ableitung der komponenten- und wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit wie folgt zusammenfassen, eine detaillierte Beschreibung der Methodik ist den Ergebnisberichten (Czaikowski et al. 2024a, 2024b, 2024c) zu entnehmen:

³ Die von der BGE vorgelegten Prüfvorgaben waren: 130 °C für Tongestein, 180 °C für Steinsalz und 100 °C für Kristallgestein (https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220822_Grenztemperatur-Pruefvorgabe_fuer_Studie_barrierefrei.pdf). Die von der GRS verwendete Bewertungsmethodik wurde erst im Laufe des Projekts entwickelt.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 10

1. Zunächst wird das jeweilige Endlagersystem auf Basis eines vorläufigen Einlagerungskonzepts in seine Komponenten und Eigenschaften, sowie darauf einwirkende Prozesse und Ereignisse (FEP) auf Basis der FEP-Liste von Freeze et al. (2020) gegliedert um eine systematische Vorgehensweise zu ermöglichen. Daraufhin erfolgt eine umfassende Analyse, in der die Relevanz der FEP geprüft und damit die Anzahl der zu betrachtenden FEP reduziert wird. Dies schließt alle temperaturbeeinflussten Komponenten, thermischen Prozesse (insbesondere THMCBR⁴-Prozesse) und thermischen Eigenschaften des Endlagersystems ein.
2. Daraufhin erfolgt eine Priorisierung der Prozesse, die als relevant für die Festlegung einer günstigen Temperatur einer Komponente identifiziert wurden. In diesem Zuge erfolgt eine qualitative Bewertung des Prozesses hinsichtlich seines Einflusses auf die Integrität der Komponente sowie die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport.
3. Die Temperaturabhängigkeit der priorisierten Prozesse wird danach in so genannte Temperaturunverträglichkeitsfunktionen (TUF) beschrieben, die mathematisch so genannten Kostenfunktionen entsprechen. Diese Funktionen erlauben eine quantitative Einschätzung der Temperaturabhängigkeit relevanter Prozesse hinsichtlich der Integrität und des Radionuklidtransports. Zur Ableitung der TUF werden zunächst primäre TUF (z. B. Quellen oder Mineralumwandlung) erstellt und Bilanzierungsgrößen (z. B. Porosität und Gasmenge) definiert. Die priorisierten Prozesse werden den primären TUF zugeordnet. Für Prozesse, die sich aus der Wechselwirkung mehrerer TUF ergeben, werden abgeleitete TUF erstellt. Die TUF sind von 0 bis 1 normiert; dabei nehmen die TUF bei günstigen Temperaturen kleine Funktionswerte und bei ungünstigen Temperaturen große Funktionswerte an. Um eine günstige Temperatur für alle relevanten Prozesse einer Komponente zu finden, werden Gesamttemperaturunverträglichkeitsfunktionen (GTUF) als gewichtete Summe der TUF ermittelt. Durch Minimierung der GTUF ergibt sich je Komponente eine günstige Temperatur (bzw. Temperaturbereich) für jeweils die Integrität und den Radionuklidtransport.
4. Im letzten Schritt erfolgt eine verbalargumentative Zusammenführung der Ergebnisse für die einzelnen Komponenten und die Begründung einer günstigen wirtsgesteinsspezifischen Temperatur für das jeweils zu betrachtende Endlagersystem.

Wesentlich für die Einordnung der Ergebnisse dieser Studie sind die für jedes Wirtsgestein aufgestellten Prämissen, welche sich aus der noch geringen Detaillierung der vorläufigen Endlagerkonzepte sowie dem fehlenden Standortbezug ergeben.

Die Methodik der GRS wurde in einem computergestützten Rechenprogramm⁵ umgesetzt. Dies erlaubt eine adaptive, sowie transparente Herleitung der günstigen Temperaturen und ermöglicht auch im weiteren Verfahren, durch Einbringung neuer Erkenntnisse, günstige Temperaturbereiche schnell zu präzisieren.

⁴ THMCBR-Prozesse entsprechen thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen, biologischen und radiologischen Prozessen, die untereinander gekoppelt sein können.

⁵ Das Rechenprogramm wurde in julia programmiert und liegt der BGE vor. Eine Veröffentlichung ist in Planung.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 11

2.1.1 Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Steinsalz

Eine wichtige Prämisse für die Analyse im Steinsalz umfasst unter anderem die Annahme, dass ausreichender Abstand zu Anhydritlagen und dem wasserhaltigen Kalisalz Carnallit eingehalten wird. Darüber hinaus betreffen weitere Prämissen das Einlagerungskonzept sowie Prozessabläufe in den Komponenten.

Anhand der primären TUF und der Bilanzierungsgrößen werden insgesamt 14 abgeleitete TUF erstellt. Aus diesen TUF wird für jede relevante Komponente (Behälter, Versatz, Auflockerungszone, einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)) eine GTUF für Steinsalz abgeleitet. Bei der Erstellung der GTUF im Steinsalz wurden alle TUF mit der Wichtung 1 versehen, bis auf die Prozesse „Behälterabsinken“ und „Kornbruch“, denen jeweils eine Wichtung von 0,1 zugeordnet wurde. Für den Prozess „Behälterabsinken“ liegt eine ausgeprägte Ungewissheit von „gefährdend für den sicheren Einschluss“ bis „vernachlässigbar“ vor, weshalb eine geringere Wichtung gewählt wurde. Nach Expertenmeinung ist durch den Prozess „Kornbruch“ keine Bildung von Fluidwegsamkeiten und somit keine Verletzung der Integrität des ewG zu erwarten. Daher wurde diesem Prozess ebenfalls eine geringere Wichtung zugewiesen.

Die Ergebnisse im Steinsalz zeigen, dass in einem sehr großen Bereich, von 120 bis 190 °C, für alle Komponenten prinzipiell günstige Temperaturen vorliegen. Für die Entscheidung bezüglich der günstigen Temperatur wird die Komponente Versatz als entscheidungsrelevant angesehen (siehe Abbildung 1). Dies begründet die GRS in ihrem Ergebnisbericht mit „[...] der Tatsache, dass der Entwicklung des Versatzes sowohl hinsichtlich der Integrität des ewG als auch beim möglichen Transport von Radionukliden im Sicherheitskonzept für ein Endlager im Salz eine besondere Rolle zufällt.“. Aus den Minima der RN-transportrelevanten GTUF und der integritätsrelevanten GTUF für den Versatz wird somit die günstige Temperatur abgeleitet.

Basierend darauf kommt die GRS zu dem Ergebnis von 170 °C als günstige Temperatur für Steinsalz (Czaikowski et al. 2024b).

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 12

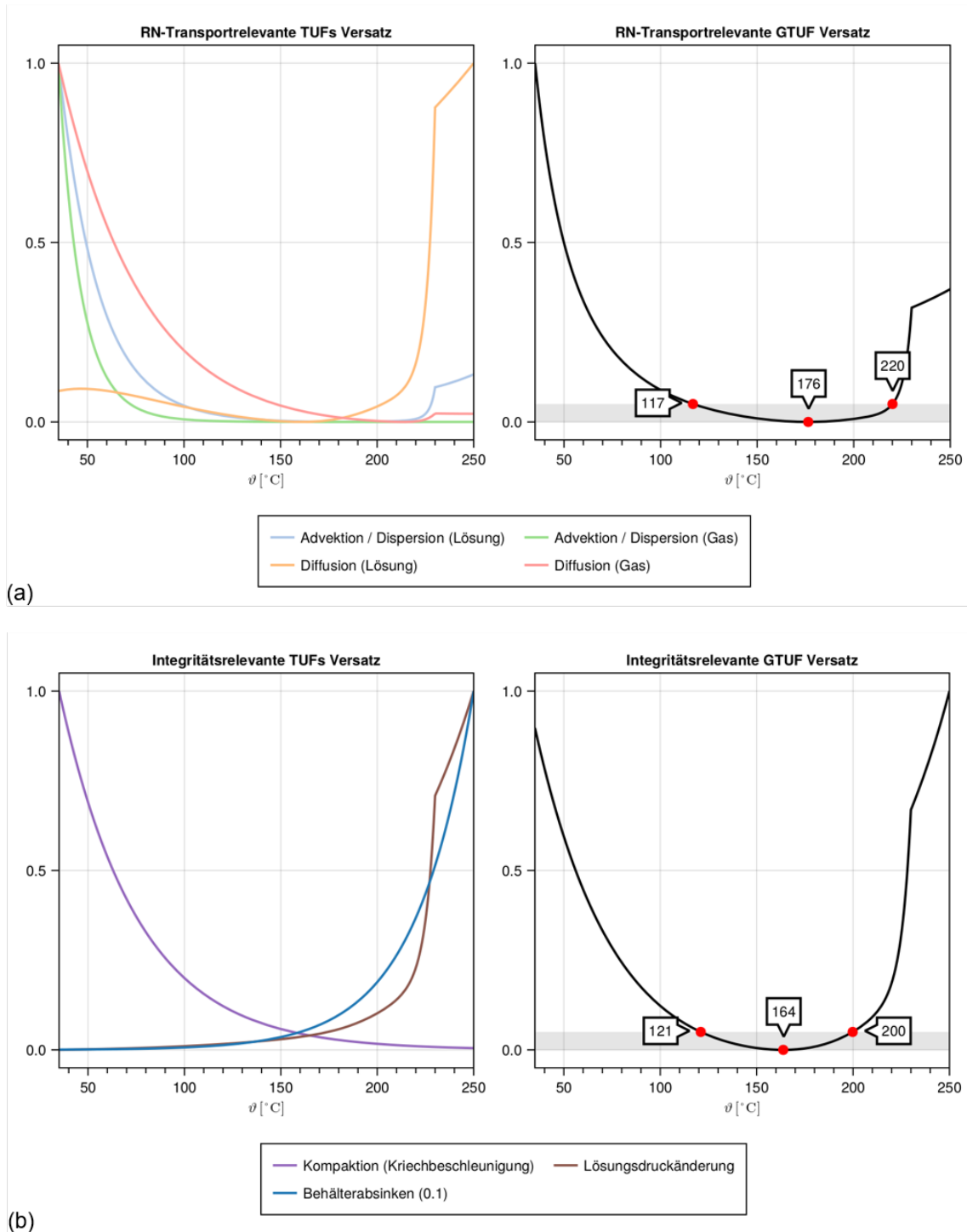


Abbildung 1: Darstellung der RN-transportrelevanten (a) und integritätsrelevanten (b) TUFs für den Versatz sowie die daraus erstellten GTUF. Der graue Bereich stellt den Temperaturbereich dar, bei dem die GTUF einen maximalen Wert 0.05 annimmt. Dieser Wert wurde auf 5 % festgelegt, um die Ungewissheiten bei der Bewertung zu berücksichtigen. (Czaikowski et al. 2024b)

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 13

2.1.2 Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein

Wichtige Prämissen für die Ableitung der Temperaturverträglichkeit im Tongestein umfassen bspw. die Annahme, dass keine separate Komponente für eine so genannte Opferschicht⁶ vorliegt und dass die Tongesteinsformation hinreichend mächtig ist, sodass Heterogenitäten zu vernachlässigen sind. Darüber hinaus bestehen weitere Prämissen hinsichtlich der Standortbedingungen, des Einlagerungskonzepts, z. B. der Eigenschaften des gewählten Bentonits und der zu betrachtenden Prozesse.

Anhand der primären TUF und der Bilanzierungsgrößen werden insgesamt sieben abgeleitete TUF erstellt. Für die Erstellung der abgeleiteten TUF aus den primären TUF hat die GRS für das Wirtsgestein Tongestein zwei Varianten erarbeitet. Für Variante 1 erfolgte bei der Ableitung der TUF aus den primären TUF eine Gleichgewichtung der beteiligten Prozesse, wodurch der vorteilhafte Einfluss der Reduktion von mikrobiellen Prozessen erkennbar ist. Darüber hinaus umfasst Variante 1 einen positiven Einfluss der Karbonatzersetzung auf die Quellfähigkeit der Tone und einen vernachlässigbaren Pyrit-Gehalt im Versatz. Für Variante 2 erfolgte bei der Ableitung der TUF eine Gewichtung der beteiligten, primären TUF anhand ihrer Bilanzierung basierend auf Pekala et al. (2019). Des Weiteren beinhaltet Variante 2 einen vernachlässigbaren Einfluss der Karbonatzersetzung auf die Quellfähigkeit der Tone und die Verfügbarkeit des Pyrits im Versatz.

Aus diesen abgeleiteten TUF wird für jede relevante Komponente (Behälter, Versatz, Streckenausbau, Auflockerungszone, ewG) eine GTUF für Tongestein abgeleitet. Bei der Erstellung der GTUF im Tongestein wurden alle abgeleiteten TUF mit der Wichtung 1 versehen.

Die Ergebnisse von Variante 1 zeigen, dass bei Temperaturen von 100 bis 120 °C günstige Temperaturen für alle Komponenten, mit Ausnahme der Komponente der Auflockerungszone, vorliegen. Die Relevanz der Auflockerungszone wird von der GRS als untergeordnet im Hinblick auf die Wahl der günstigen Temperatur betrachtet. Als günstige Temperatur wird, unter Berücksichtigung der vorteilhaften Entwicklung der TUF basierend auf dem vorteilhaften Einfluss der Reduktion mikrobieller Aktivität, 120 °C gewählt.

Die Ergebnisse von Variante 2 zeigen, dass für Tongestein eine Temperatur, die möglichst gering von der Gebirgstemperatur abweicht, die höchste Temperaturverträglichkeit gewährleistet.

Der Vergleich der Ergebnisse verdeutlicht insbesondere den Einfluss der mikrobiellen Prozesse. Je nach Größe der Beiträge der mikrobiellen Prozesse können günstige Temperaturen entweder ober- oder unterhalb 100 °C liegen (siehe Abbildung 2).

Basierend darauf kommt die GRS zu zwei Ergebnissen: Bei Variante 1 liegt die günstige Temperatur für Tongestein bei 120 °C. Bei Variante 2 ist eine von der Gebirgstemperatur möglichst gering abweichende Temperatur als günstig zu bewerten (Czaikowski et al. 2024c).

⁶ Mit diesem Begriff wird, in Analogie zur Opferanode, eine Endlagerkonzeption benannt bei der ein geringer Teil des unmittelbar an den Behälter grenzenden Tons so stark erhitzt wird, dass er wesentliche Barriereigenschaften verliert. Gleichzeitig wird von mächtigen weiteren Tonbarrieren hinter dieser Opferschicht ausgegangen, welche den sicheren Einschluss weiterhin garantieren.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 14

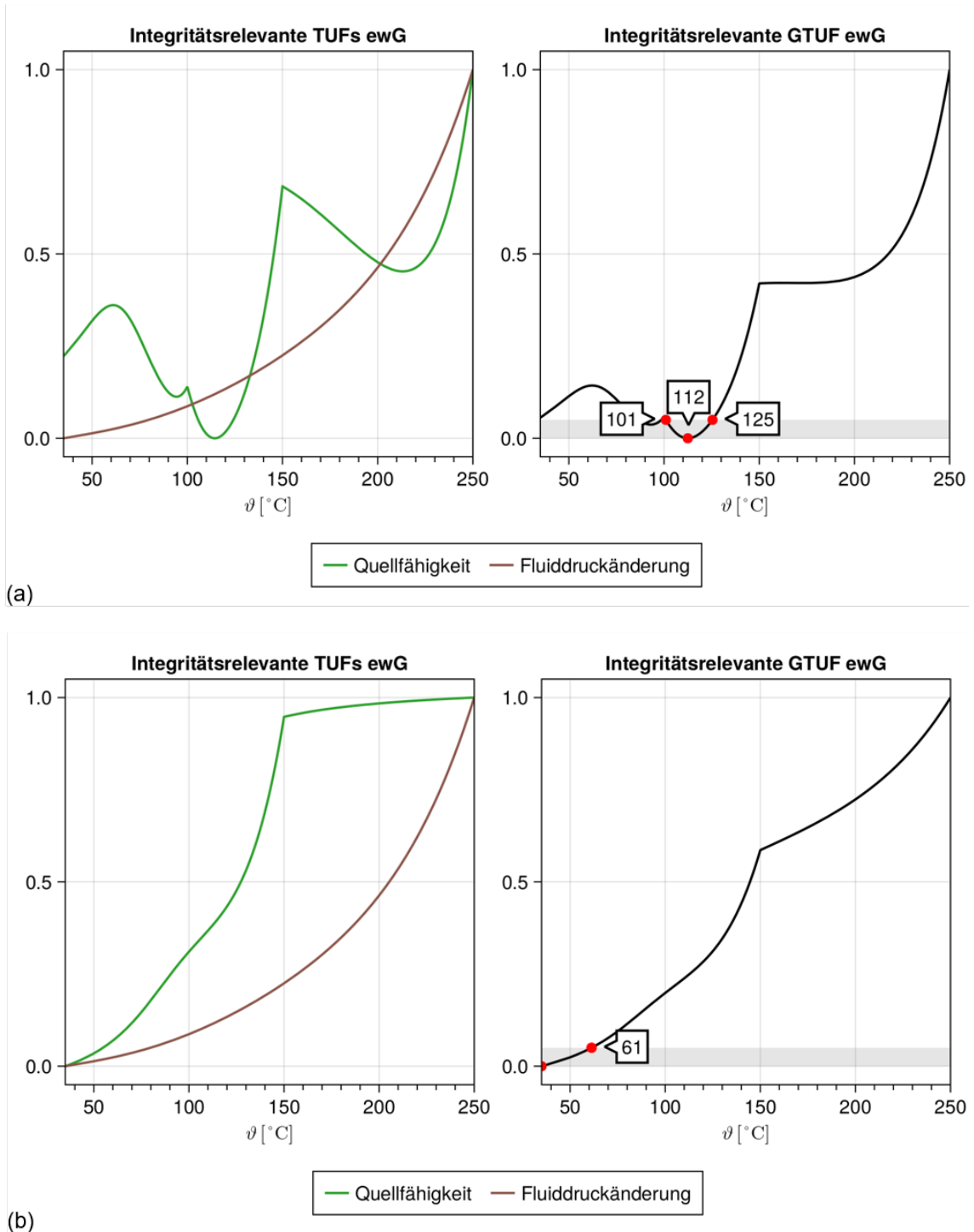


Abbildung 2: *Abbildung der integritätsrelevante TUFs für den ewG. (a) Variante 1, basierend u. a. auf der Gleichgewichtung aller Prozesse, wodurch der vorteilhafte Einfluss mikrobieller Prozesse erkennbar ist. (b) Variante 2, basierend u. a. auf der Gewichtung der beteiligten Prozesse entsprechend ihrer Bilanzierung. Der graue Bereich stellt den Temperaturbereich dar, bei dem die GTUF einen maximalen Wert 0.05 annimmt. Dieser Wert wurde willkürlich auf 5 % festgelegt, um die Ungewissheiten bei der Bewertung zu berücksichtigen. (Czaikowski et al. 2024c)*

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 15

2.1.3 Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten im Kristallin

Wichtige Prämissen für die Analyse im kristallinen Wirtsgestein umfassen unter anderem, die Annahme, dass die technischen und geotechnischen Barrieren wesentlich sind, das kristalline Wirtsgestein ausschließlich eine unterstützende Funktion einnimmt und dass eine gleichmäßige Aufsättigung des Versatzes gewährleistet wird. Ebenfalls bestehen weitere Prämissen, die das Einlagerungskonzept sowie Prozessabläufe in den Komponenten betreffen.

Anhand der primären TUF und der Bilanzierungsgrößen werden insgesamt 7 abgeleitete TUF erstellt. Analog zum Vorgehen im Tongestein wurden für das kristalline Wirtsgestein zwei Varianten erarbeitet. Bei Variante 1 wurde der vollständige Verbrauch von H₂S im Bentonitversatz angenommen, wodurch für die Korrosion des Behälters kein H₂S verfügbar ist. Im Gegensatz dazu wurde für Variante 2 nur der teilweise Verbrauch von H₂S im Bentonitversatz angenommen, wodurch eine relevante Menge an H₂S für die Korrosion am Behälter verfügbar ist. Aus diesen TUF wurde für die relevanten Komponenten (Behälter und Versatz) je eine GTUF abgeleitet. Bei der Erstellung der GTUF im Kristallin wurden alle TUF mit der Wichtung 1 versehen.

Die Ergebnisse für Variante 1 zeigen, dass in einem Endlagersystem im Kristallin eine Temperatur günstig ist, die möglichst gering von der Gebirgstemperatur abweicht.

Die Ergebnisse für Variante 2 zeigen, dass für die Komponente Behälter zwischen 80 und 180 °C günstige Temperaturen vorliegen. Für die Komponente Versatz gewährleistet hingegen eine von der Gebirgstemperatur möglichst gering abweichende Temperatur die beste Temperaturverträglichkeit. Daher wird in der Spanne von 80 und 180 °C der untere Temperaturbereich als günstig angesehen. Dies führt zu einem günstigen Temperaturbereich zwischen 80 und 120 °C, mit dem günstigen Temperaturwert bei 100 °C (siehe Abbildung 3).

Durch den Vergleich der Ergebnisse der zwei Varianten wird insbesondere die Bedeutung der verfügbaren H₂S-Menge deutlich, die das Ergebnis der günstigen Temperatur beeinflussen kann.

Basierend darauf kommt die GRS zu zwei Ergebnissen: Bei Variante 1 ist eine von der Gebirgstemperatur möglichst gering abweichende Temperatur als günstig zu bewerten. Bei Variante 2 liegt die günstige Temperatur für Kristallingestein bei 100 °C (Czaikowski et al. 2024a).

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 16

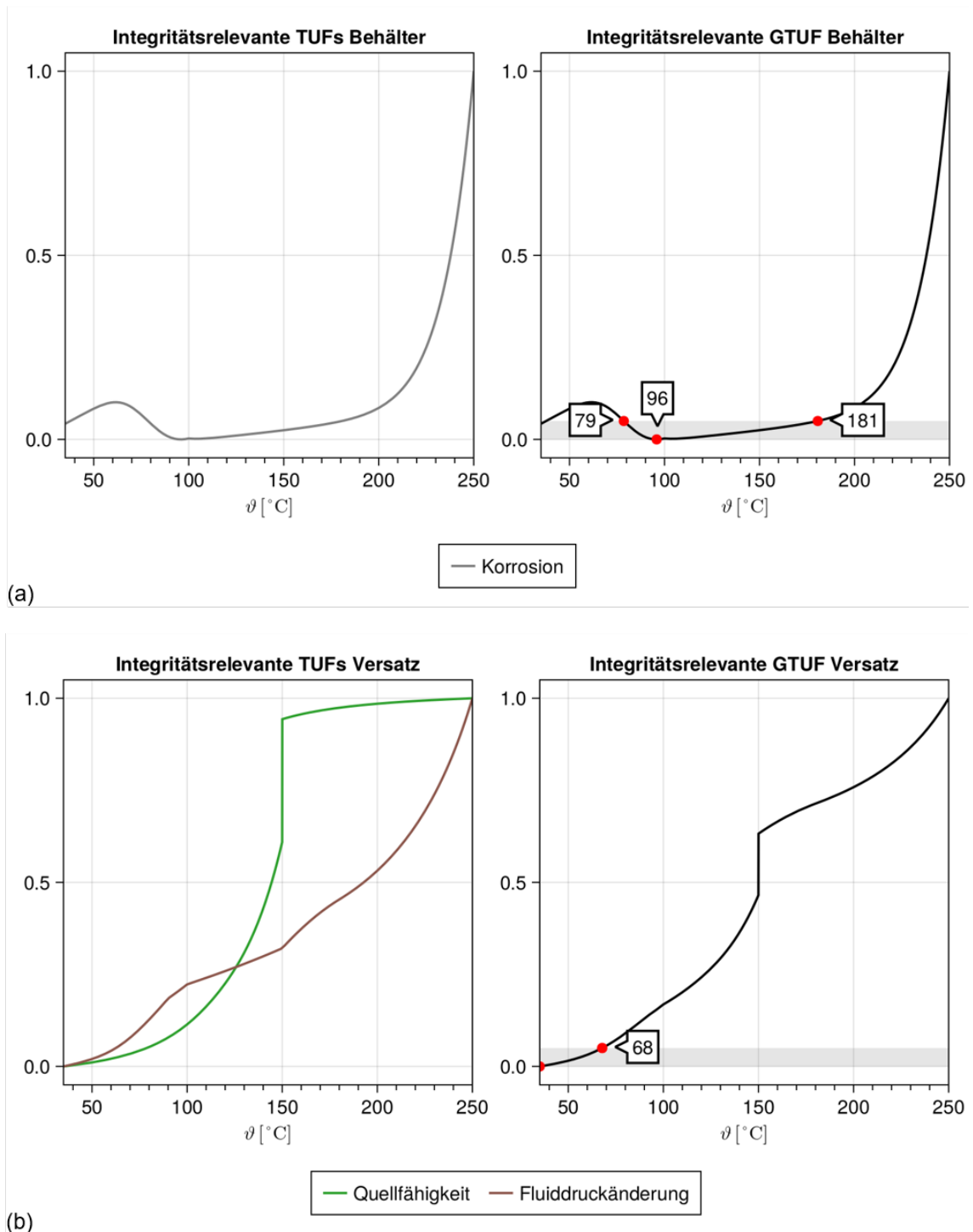


Abbildung 3: Darstellung der integritätsrelevanten TUF und GTUF für den Behälter für Variante 2 (a) und der TUF bzw. GTUF für den Versatz, unabhängig der Variante (b). Der graue Bereich stellt den Temperaturbereich dar, bei dem die GTUF einen maximalen Wert 0.05 annimmt. Dieser Wert wurde willkürlich auf 5 % festgelegt, um die Ungewissheiten bei der Bewertung zu berücksichtigen. (Czaikowski et al. 2024a)

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 17

2.2 Studie zur Prüfung der Machbarkeit des sicheren Betriebs und der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit

Das Projekt „Grenztemperatur – Prüfung der Machbarkeit in Bezug auf Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb“ (Bertrams & Leonhard 2024), welches durch die BGE TEC durchgeführt wurde, lief von Mitte 2023 bis Ende 2023. Ziel des Projekts war es, die Temperaturen, die durch die GRS in der Studie zur Ableitung von Temperaturverträglichkeiten (Kapitel 2.1.2 bis 2.1.2), ermittelt wurden, im Hinblick auf die Machbarkeit des Einlagerungs- und des Rückholungsbetriebs zu prüfen. Dafür wurden folgende Temperaturen bezüglich ihrer Machbarkeit geprüft:

- Steinsalz: 170 °C
- Tongestein: 120 °C
- Kristallingestein: 100 °C

Zwei Fragestellungen werden als wesentlich für die Bewertung der Machbarkeit des Einlagerungs- und Rückholungsbetriebs im Hinblick auf steigende Temperaturen präsentiert:

- „Ist es möglich, die Strecken über einen ausreichenden Zeitraum zu stabilisieren, um die betrieblichen Arbeiten durchzuführen? Diese Frage ist vor allem gebirgsmechanisch bzw. thermomechanisch zu beantworten.“
- „Sind die klimatischen Bedingungen in den Strecken derart, dass sie ein Arbeiten von Personen erlauben? Diese Frage bezieht sich auf die thermisch relevanten Eigenschaften der durchströmenden Wetter und die Einhaltung der Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (KlimaBergV).“ (Bertrams & Leonhard 2024)

Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass wenn der sichere Rückholungsbetrieb machbar ist, prinzipiell auch der sichere Einlagerungsbetrieb gewährleistet werden kann. Daher wird hier ausschließlich die Machbarkeit des Rückholungsbetriebs geprüft. Zur Prüfung der Machbarkeit des Rückholungsbetriebs wird der ungünstigste thermische Fall zu Grunde gelegt und eine Endlagerauslegung betrachtet, die den Einlagerungsbereich thermisch möglichst gut ausnutzt.

Die Methodik zur Prüfung der betrieblichen Machbarkeit lässt sich in zwei Schritte untergliedern:

Zunächst wird bestehendes Wissen aus Forschung und Entwicklung für jedes Wirtsgestein zusammengetragen und präsentiert. Dann werden weitere Untersuchungen durchgeführt, um die Fragestellungen hinsichtlich der klimatischen Bedingungen sowie der Offenhaltung der Strecken zu bearbeiten. Dazu wird auf die wirtsgesteinsspezifischen Endlagerkonzepte zurückgegriffen, die in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) Anwendung finden. Für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz wird somit Streckenlagerung betrachtet, wobei für Kristallin die vertikale Einlagerung einzelner Behälter (nach dem skandinavischen KBS-3V Konzepts) berücksichtigt wird.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 18

2.2.1 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Steinsalz

Zur Bewertung der klimatischen Bedingungen wird durch ein wettertechnisches Modell in der Software VentSim™ Design 5 geprüft, inwieweit die Grenzwerte der KlimaBergV eingehalten werden können. Die Auswertung der Simulationsrechnungen ergeben, dass sich bei einer Grenztemperatur von 170 °C klimatische Verhältnisse einstellen lassen, die unterhalb der Grenzwerte der KlimaBergV liegen. Diese klimatischen Verhältnisse lassen sich mit verhältnismäßig akzeptablem Aufwand erreichen. Jedoch wird die Bewertung zu Gunsten der Machbarkeit nur knapp erreicht.

Zur Bewertung der Offenhaltung der Strecken wird ein analytisches Verfahren zur Berechnung der Konvergenz gewählt. Die berechnete Konvergenz wird dann anhand eines Kriteriums der Gebrauchstauglichkeit bewertet. Dieses Kriterium basiert auf der Dauer der Offenhaltung der Strecken und des damit verbundenen Aufwands. Für das Kriterium zur Gebrauchstauglichkeit wird dazu eine zulässige Konvergenzrate abgeleitet, die mit dem Wert der errechneten Konvergenzrate verglichen wird. Nach den Überprüfungen der BGE TEC wird eine akzeptable Konvergenzrate in einer Teufe von 1 400 m bei einer maximal zulässigen Temperatur von 100 °C erreicht. Bei einer Grenztemperatur von 170 °C ist überschlägig davon auszugehen, dass dies zu einer Gebirgstemperatur von 130 °C bis 150 °C nahe der Strecken führt. Dies stellt die Offenhaltung der Strecken in einer Teufe ab 1 000 m und somit die Machbarkeit der Rückholung infrage.

Auf Grundlage der Überprüfung der BGE TEC ergaben sich im Steinsalz sowohl Herausforderungen bei der Offenhaltung der Strecken, bedingt durch die Konvergenz des Gebirges, als auch bei der Einstellung der klimatischen Verhältnisse im Einlagerungsbetrieb. Diese Herausforderungen lassen sich teilweise durch verschiedene Maßnahmen technisch beherrschen. Dennoch zeigt die Studie, dass sich in Teufen größer als 1 000 m erhebliche Schwierigkeiten bezüglich des Rückholungsbetriebs aufgrund der temperatur- und druckgetriebenen Konvergenz ergeben.

Dies stellt daher die betriebliche Machbarkeit in Teufen größer als 1 000 m bei einer Grenztemperatur von 170 °C infrage. Daraus schließend empfiehlt die BGE TEC den Effekt der sowohl temperatur- als auch druckgetriebenen Konvergenz „*schon in der Endlagerauslegung zu berücksichtigen, die Endlagerauslegung anzupassen und/oder die Grenztemperatur zu verkleinern*“ (Bertrams & Leonhard 2024).

2.2.2 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Tongestein

Durch die Überprüfung des aktuellen Wissensstands von Forschung und Entwicklung (Herold et al. 2018) konnte bereits entnommen werden, dass aus betrieblicher Sicht eine Grenztemperatur von 150 °C im Tongestein machbar, wenn auch anspruchsvoll, ist. Daraus folgernd kann bereits angenommen werden, dass eine Rückholung auch bei einer geringeren Temperatur von 120 °C machbar ist. Analog zum Steinsalz wurden wettertechnische Modelle berechnet. Die Auswertungen der Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeigen, dass alle Rechenfälle die Grenzwerte einhalten. Mit verhältnismäßig akzeptablem Aufwand lassen sich somit bei einer Grenztemperatur von 120 °C klimatische Verhältnisse einstellen, die die Grenzwerte des Beschäftigungsverbots der KlimaBergV einhalten.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 19

Die Offenhaltung der Strecken im Tongestein stellt hauptsächlich eine gebirgsmechanische Herausforderung dar. Diese gebirgsmechanischen Herausforderungen sind insbesondere abhängig von der Art des Tongesteins, seinen Eigenschaften sowie der Teufe und zumindest teilweise unabhängig von der Grenztemperatur. Basierend auf Herold et al. 2018 ist zu erwarten, dass sich bei einer Grenztemperatur von 120 °C relativ schnell Gebirgstemperaturen kleiner als 80 °C einstellen und nur lokale Temperaturspitzen vorkommen, die an den Endlagergebinden zu verorten sind. Somit liegen Temperaturen vor, die bereits im tiefen Gewinnungsbergbau beherrscht wurden (Schacke 2009).

Auf dieser Grundlage ergibt sich für die Rückholung im Tongestein bei 120 °C eine wesentliche temperaturspezifische Herausforderung, welche die Einstellung der klimatischen Verhältnisse in der Nähe der Endlagergebände betrifft.

Diese Herausforderungen lassen sich durch verschiedene technische Maßnahmen beherrschen, sodass die Rückholung in Tongestein bei 120 °C als machbar angesehen werden kann (Bertrams & Leonhard 2024).

2.2.3 Prüfung des Rückholungsbetriebs im Kristallin

Auf Basis der Überprüfung von bestehendem Wissen aus Forschung und Entwicklung in kristallinem Wirtsgestein ist bereits zu erwarten, dass eine Grenztemperatur von 100 °C beherrschbar ist. Des Weiteren gilt kristallines Wirtsgestein als wenig temperaturempfindlich und standfest, wodurch die Offenhaltung von Hohlräumen leichtfallen sollte und die Machbarkeit der Offenhaltung der Strecken nicht infrage gestellt wird. Um die Machbarkeit der Rückholung hinsichtlich der klimatischen Bedingungen zu überprüfen, wird ebenfalls ein wettertechnisches Modell in der Software VentSim™ Design 5 für das kristalline Wirtsgestein erstellt.

Nach Auswertung der Simulationen ist erkennbar, dass fast alle Rechenfälle die Grenzwerte aus der KlimaBergV einhalten. Die Rechenfälle, die nicht unter den Grenzwerten liegen, verdeutlichen, dass ausreichend Bewetterungsmengen notwendig und hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden sind. Daraus folgernd lassen sich im kristallinen Wirtsgestein, unter verhältnismäßig akzeptablem Aufwand, klimatische Bedingungen einstellen, die die Grenzwerte der KlimaBergV einhalten.

Als Herausforderung, die von der Grenztemperatur abhängt, wurde die Einstellung der klimatischen Bedingungen identifiziert, die mit einer ausreichenden und gekühlten Bewetterung beherrscht werden kann.

Zusammenfassend lässt sich für kristallines Wirtsgestein die Rückholbarkeit bei 100 °C Grenztemperatur und Bohrlochlagerung als positiv und somit machbar bewerten (Bertrams & Leonhard 2024).

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 20
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	00	

3 Festlegung der wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen für Schritt 2 der Phase I

Die BGE sieht die in Kapitel 2 vorgestellten Arbeiten als abdeckend an, um als Schlussfolgerung aus den durchgeführten Arbeiten eine Festlegung von wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen für den Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens durchführen zu können. Im Ergebnis hält die BGE die folgenden Auslegungstemperaturen für sinnvoll und wendet sie ab sofort in Schritt 2 Phase I an:

Tabelle 1: Festgelegte wirtsgesteinsspezifische Auslegungstemperaturen für den Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.

Wirtsgestein	Auslegungstemperatur
Steinsalz	150 °C
Tongestein	100 °C
Kristallin	100 °C

Die Gründe für die verschiedenen wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen und deren Einfluss auf die Sicherheit werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

3.1 Bezug zum Sicherheitskonzept

In den vorläufigen Sicherheitskonzepten für Steinsalz, Tongestein und Kristallin wird zwischen zwei Hauptsicherheitsfunktionen unterschieden, denen jeweils komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden, um den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten. Unter der ersten Hauptsicherheitsfunktion *Einschluss der radioaktiven Abfälle* werden Sicherheitsfunktionen zusammengefasst, die gewährleisten sollen, dass das Barrierensystem vor schädlichen Einflüssen geschützt wird, sodass die Integrität des gesamten Barrierensystems, insbesondere aber die Integrität der wesentlichen Barrieren, aufrechterhalten bleibt. Die zweite Hauptsicherheitsfunktion *Rückhaltung von Radionukliden* zielt darauf ab, dass Radionuklide nach einem möglichen Versagen eines oder mehrerer Endlagerbehälter die in § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV beschriebenen Grenzwerten für den Massen- und Stoffmengenausstrag im Bewertungszeitraum nicht überschreiten und somit der sichere Einschluss im Bereich der wesentlichen Barrieren gewährleistet wird. Die zweite Hauptsicherheitsfunktion beinhaltet daher Funktionen, die dazu beitragen, die Migration von Radionukliden zu be- bzw. verhindern. Dies betrifft insbesondere den Zeitraum nach einem Integritätsverlust der Endlagerbehälter.

3.2 Auslegungstemperatur für Steinsalz

Ein wesentlicher Grund für eine Auslegungstemperatur größer als 100 °C im Steinsalz ist der Aspekt des beschleunigten Salzkriechens, insbesondere im Versatz (Abbildung 1b). Durch die Kompaktion des Versatzmaterials, sowie das Kriechen des Wirtsgesteins werden Hohlräume, die durch die Errichtung des Endlagers entstanden sind wieder geschlossen. Bei zunehmenden Temperaturen wird

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 21

dieser Prozess begünstigt. Durch die Verwendung einer Auslegungstemperatur größer als 100 °C werden die Behälter nach der Einlagerung schneller eingeschlossen und die positiven Barriereigenschaften des Wirtsgesteins und des Versatzes, die zum Zeitpunkt des Ausgangszustandes vorlagen, schneller wiederhergestellt, was den sicheren Einschluss der Abfälle und die Integrität des Endlagersystems deutlich begünstigt. Dies trägt erheblich dazu bei, dass die Hauptsicherheitsfunktion *Einschluss der radioaktiven Abfälle* auch erfüllt werden kann. Um den positiven Effekt des Kriechens nutzen zu können, sind 150 °C knapp ausreichend, auch wenn bei höheren Temperaturen der positive Einfluss des Prozesses weiter zunimmt (Kapitel 2.1.1).

Für Temperaturen größer als 100 °C sprechen ebenfalls die Prozesse, die eine Relevanz für den Radionuklidtransport im Versatz vorweisen. Sowohl der Einfluss diffusiver als auch advektiver Prozesse nimmt im Versatz bei Temperaturen größer als 100 °C ab, wobei dieser teils bei Temperaturen ab ca. 180 °C wieder ansteigt (Abbildung 1a). Diffusion und Advektion basieren in diesem Fall auf TUF, die mehrere Prozesse zusammenfassen. Der Verlauf dieser TUF ist vor allem auf die Temperaturabhängigkeit der Reduktion der Porosität und der zunehmenden Kompaktion (Kriechen) zurückzuführen. Bei einer Temperatur von 150 °C wird der Transport von Radionukliden im Versatz somit verringert und der sichere Einschluss der Radionuklide wird begünstigt.

Der wesentliche Grund für eine Auslegungstemperatur nicht größer als 150 °C ist die Betriebssicherheit. Um eine sichere Rückholbarkeit, und somit den sicheren Betrieb, gewährleisten zu können, muss die Temperatur gut beherrschbar sein. Bei der geprüften Temperatur von 170 °C ergeben sich aufgrund des beschleunigten Kriechens Herausforderungen bezüglich der Offenhaltung der Strecken sowie der Einstellung der klimatischen Verhältnisse. Diese Herausforderungen sind ebenfalls abhängig von der Teufe des zu errichtenden Endlagers. Daher empfiehlt die BGE TEC in ihrer Studie die Grenztemperatur zu senken (Kapitel 2.2.1). Dieser Empfehlung wird mit der Wahl einer Auslegungstemperatur von 150 °C gefolgt. Bei dieser Auslegungstemperatur ist davon auszugehen, dass der sichere Betrieb für alle derzeit betrachteten Endlagerteufen gewährleistet werden kann.

Durch eine Erhöhung der Auslegungstemperatur auf 150 °C in Schritt 2 Phase I nimmt der benötigte Flächenbedarf ab. Dies ist insbesondere für Steinsalz in steiler Lagerung relevant, da hier Gebiete, aufgrund der Genese von Salzstöcken, mit vergleichsweise kleineren Flächen vorliegen.

3.3 Auslegungstemperatur für Tongestein

Es ist bekannt, dass die günstigen Eigenschaften von Tongestein und tonhaltige Versatzmaterialien, als geologische und geotechnische Barrieren bezüglich der Langzeitsicherheit, bei erhöhten Temperaturen, graduell reduziert werden. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Studie der GRS zu Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein. Anhand der abgeleiteten TUFs und GTUFs (Abbildung 2) lässt sich erkennen, dass eine zunehmende Temperatur für alle zu betrachtenden Prozesse und Komponenten unvorteilhaft ist. Unter anderem ist ein besonders hervorzuhebender Prozess die Illitisierung von Smektiten. Mit Erhöhung der Temperatur nimmt die Illitisierung zu und führt zu einer Abnahme der Quellfähigkeit. Da im Besonderen die Quellfähigkeit sowohl vom Wirtsgestein als auch vom tonhaltigen Versatzmaterial eine positive Eigenschaft ist, könnte eine

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 22

Abnahme der Quelfähigkeit dazu führen, dass die Selbstheilungseigenschaften (im Englischen präziser als „Self Sealing“ bezeichnet (Bock et al. 2010)), wie im vorläufigen Sicherheitskonzept gefordert, nicht mehr vorhanden sind. Dies wiederum kann die Sicherheit des Endlagers negativ beeinflussen. Die Minimierung einer Illitisierung des Wirtsgesteins und der tonhaltigen Versatzmaterialien geht mit der komponentenspezifischen Sicherheitsfunktion chemische Zusammensetzung einher.

Die aktuellen Konzepte für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein sehen Bentonit als Verschluss- bzw. Versatzmaterial vor. Bentonit wird aufgrund seiner günstigen sicherheitsrelevanten Eigenschaften (wie z. B. seiner hohen Quelfähigkeit) gewählt, die jedoch mit steigender Temperatur beeinträchtigt werden können. Der Bentonitversatz am Behälter trägt im gestaffelten und robusten System der Barrieren im Endlager erheblich zum Einschluss der Radionuklide im Endlagerbehälter bei, indem er den Behälter u. a. vor einem korrosionsbedingten Versagen schützen soll. Dies ist insbesondere in der frühen, thermischen Phase relevant, in der Temperaturspitzen auftreten können und die Konvergenz des Gebirges noch nicht abgeschlossen ist. Um die erste Hauptsicherheitsfunktion *Einschluss der Radionuklide* zu erfüllen, ist es demnach erforderlich, dass der Bentonit den Einschluss der Behälter in der thermischen Phase gewährleisten kann und den Behälter vor Korrosion, durch z. B. den Eintritt von Wasser, schützt.

Eine Bewertung der Konsequenzen einer temperaturbedingten Schädigung eines größeren Bereichs der Barriere des Wirtsgesteins oder des Versatzes (Bentonit) auf den sicheren Einschluss kann derzeit nicht getroffen werden. Dies ist insbesondere für Gebiete relevant, bei denen die gesamte Mächtigkeit des Wirtsgesteins die erforderlichen 100 m nicht wesentlich überschreitet. Darüber hinaus weist der Versatz eine noch geringere Mächtigkeit im Vergleich zum Wirtsgestein auf, wodurch Schädigungen im Versatz eine noch höhere Sicherheitsrelevanz erlangen. Um die bestmögliche Sicherheit zu gewährleisten, sollten daher in der aktuellen Endlagerplanung potenzielle temperaturbedingte Schädigungen der geotechnischen und geologischen Barriere zum jetzigen Zeitpunkt bestmöglich vermieden oder minimiert werden. In diesem Kontext ist insbesondere die komponentenspezifische Sicherheitsfunktion Temperaturstabilität des vorläufigen Sicherheitskonzepts zu nennen. Diese beschreibt, dass sowohl das Wirtsgestein als auch die Versatzmaterialien, im Besonderen der Versatz am Endlagerbehälter, möglichst keine thermisch bedingten Schädigungen erfahren dürfen, da hierdurch die Barriereeigenschaften negativ beeinflusst und somit die Sicherheitsfunktionen eventuell nicht eingehalten werden können.

Die Prüfvorgabe der BGE, mit der die Bearbeitung 2022 gestartet wurde, betrug für Tongestein, basierend auf vorherigen Studien (Bracke et al. 2019), 130 °C. Maßgeblich für diese vergleichsweise hohe Temperatur war die Annahme, dass die mit höheren Temperaturen stattfindende Reduktion mikrobieller Aktivität und die damit verbundene verringerte Gasbildung einen Sicherheitsgewinn bringt, indem mögliche Korrosionsprozesse reduziert werden. Dieser Sicherheitsgewinn konnte jedoch durch die Arbeit der GRS nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse der GRS zeigen, dass je nach Größe der Beiträge der mikrobiellen Prozesse günstige Temperatur entweder unterhalb oder oberhalb von 100 °C liegen können. Hier sind ggf. weitere Studien, idealerweise an Vorort-Proben erforderlich (Kapitel 2.1.2).

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 23

Generell stellt die aktuelle Phase I des iterativen Standortauswahlverfahrens im Vergleich zu den Phasen II und III eine generische Basis dar. Auf Grundlage dieser Basis und mit einem fortschreitenden standortspezifischen Erkenntnisgewinn, z. B. durch Erkundungsergebnisse, können detailliertere Betrachtungen und Auslegungen erfolgen. In der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens kann eine Differenzierung der Auslegungstemperatur aufgrund fehlender Standortdaten nicht nach unterschiedlichen Tongesteinsformationen erfolgen. Hier könnten bspw. Paläotemperaturen von Relevanz sein. Es ist anzunehmen, dass in Tongesteinen, die bereits höhere Paläotemperaturen erfahren haben, temperaturbedingte Mineralumwandlungen bereits stattgefunden haben und diese somit stabiler gegenüber weiteren Temperatureinflüssen sind, solange diese Temperatureinflüsse nicht die maximal erfahrene Paläotemperatur übersteigen. Eine entsprechende Bewertung setzt jedoch standortspezifische Erkundungsarbeiten voraus und es verbleibt der Aspekt der Schädigung des Versatz- bzw. Verschlussmaterials.

Angesichts der oben beschriebenen Sachlage erscheint es sinnvoll, 100 °C für das Wirtsgestein Tongestein nicht zu überschreiten. Eine geringere Temperatur führt zu größeren Endlagerflächen, jedoch treten Tongesteine faziell bedingt üblicherweise über große Flächen auf. Dahingehend sind Endlager im Tongestein auch in größeren Teufen weiterhin realisierbar.

Wie die Ergebnisse der BGE TEC zeigen, ist auch der Rückholungsbetrieb bei 120 °C machbar. Basierend darauf ist anzunehmen, dass auch der Rückholungsbetrieb bei 100 °C im Tongestein machbar ist und keine Anpassungen der Auslegungstemperatur auf Basis der Betriebssicherheit erfolgen müssen.

3.4 Auslegungstemperatur für Kristallin

Für das Wirtsgestein Kristallin wird ebenfalls nach dem aktuellen Konzept für die Endlagerauslegung Bentonit als Verschlussmaterial gewählt, der den Einschluss der Behälter gewährleisten soll und somit den Erhalt der Hauptsicherheitsfunktion *Rückhaltung von Radionukliden* sicherstellt. Insbesondere für das Endlagersystem Typ 2, das allein auf geotechnischen Barrieren beruht, ist somit der Erhalt dieser Barriere essenziell und temperaturbedingte Schädigungen sollten bestmöglich minimiert werden. Die Ergebnisse der GRS zeigen, dass mit zunehmender Temperatur die Quellfähigkeit und die Fluiddruckänderung im Versatz ungünstiger werden (Abbildung 3).

Da das Wirtsgestein Kristallin bruchhaft auf Belastungen reagiert, sind die vorgeschlagenen 100 °C zum Schutz der geotechnischen Barriere generell sinnvoll unabhängig davon, ob ein Endlagersystem Typ 1 oder Typ 2 betrachtet wird. Es muss auch in undurchlässigem Kristallin Vorsorge getroffen werden, dass aufgrund entstehender Brüche (bspw. durch Erdbeben oder Gletscherauflast) keine Transportwegsamkeiten für die Radionuklide entstehen. Daher soll das Verschlussmaterial bestmöglich intakt sein und, soweit möglich, keine temperaturbedingten Schädigungen aufweisen, um potenziellen Radionuklidtransport in das geschädigte kristalline Wirtsgestein zu verhindern.

In skandinavischen Endlagervorhaben, die bereits detailliertere Erfahrungen im Kristallin gesammelt haben, werden ebenfalls keine Temperaturen über 100 °C am Behälter verwendet (Anlage 1). In Posiva Oy (2021) wird beschrieben, dass die Temperatur im Versatz am Behälter kleiner als 100 °C sein soll, um Mineralumwandlungen zu limitieren.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 24

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der GRS zwei Varianten: Bei Variante 1 ist eine von der Gebirgstemperatur möglichst gering abweichende Temperatur als günstig zu bewerten. Bei Variante 2, bei der Korrosion von Relevanz ist, liegt die günstige Temperatur für Kristallingestein bei 100 °C (Abbildung 3). Die Wahl der Auslegungstemperatur von 100 °C unterstützt somit auch die Hauptsicherheitsfunktionen *Einschluss der radioaktiven Abfälle* sowie *Rückhaltung von Radionukliden* im Falle, das H₂S für die Korrosion am Behälter verfügbar ist.

Wie die Ergebnisse der BGE TEC zeigen, ist auch der Rückholungsbetrieb bei 100 °C machbar, somit müssen keine Anpassungen der Auslegungstemperatur auf Basis der Betriebssicherheit erfolgen.

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 25

Literaturverzeichnis

Bertrams, N. & Leonhard, J. (2024): *Grenztemperatur – Prüfung der Machbarkeit in Bezug auf Einlagerungs- und Rückholungsbetrieb*. Abschlussbericht. BGE TEC 2023-05. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

BGE (2022/2): *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf

Bock, H.; Dehandschutter, B.; Martin, C. D.; Mazurek, M.; Haller, A. de; Skoczylas, F.; Davy, C. (2010): *Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste*. Review and Synthesis. NEA No. 6184. OECD/NEA. Paris

Bracke, G.; Hartwig-Thurat, E.; Larue, J.; Meleshyn, A.; Weyand, T. (2019): *Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern*. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln

Czaikowski, O.; Förster, B.; Hinze, M.; Mayer, K.-M.; Meleshyn, A.; Middelhof, M.; Rübel, A.; Wiczo-rek, K.; Wolf, J. (2024a): *Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten*. Wirtsgestein Kristallin. GRS. 755. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Czaikowski, O.; Förster, B.; Hinze, M.; Mayer, K.-M.; Meleshyn, A.; Middelhof, M.; Rübel, A.; Wiczo-rek, K.; Wolf, J. (2024b): *Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten*. Wirtsgestein Steinsalz. GRS. 756. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Czaikowski, O.; Förster, B.; Hinze, M.; Mayer, K.-M.; Meleshyn, A.; Middelhof, M.; Rübel, A.; Wiczo-rek, K.; Wolf, J. (2024c): *Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten*. Wirtsgestein Ton. GRS. 754. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

ESK (2022): *Stellungnahme der Entsorgungskommission zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes*. Entsorgungskommission. Bonn

Freeze, G.; Sevougian, S.; Kuhlman, K.; Gross, M.; Wolf, J.; Buhmann, D.; Bartol, J.; Leigh, C.; Mönig, J. (2020): *Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive*. SAND-2020-13186. Sandia National Lab. (SNL-NM). Albuquerque, NM (United States). DOI: <https://doi.org/10.2172/1815346>

Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	00

Blatt: 26

Herold, P.; Bertrams, N.; Prignitz, S.; Simo Kuate, E. (2018): *Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen*. ER-NESTA. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

K-Drs. 268: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Berlin, 5. Juli 2016

KlimaBergV: Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685), die durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist

Pekala, M.; Wersin, P.; Cloet, V.; Diomidis, N. (2019): *Reactive transport calculations to evaluate sulphide fluxes in the near-field of a SF/HLW repository in the Opalinus Clay*. Applied Geochemistry, Bd. 100. S. 169 – 180. ISSN 0883-2927. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.006>

Posiva Oy (2021): *Buffer, Backfill and Closure Evolution*. Working Report. 2021-08. Posiva Oy. Eurajoki

Röhlig, K.-J. (2017): *Stellungnahme anlässlich der öffentlichen Anhörung zu dem Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze*. Clausthal, Technische Universität. Berlin

Schacke, V. (2009): *Entwicklung der Maßnahmen zur Kühllhaltung der Gruben unter besonderer Berücksichtigung der tiefen, warmen Bergwerke im östlichen Ruhrrevier*. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist

