



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens

Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur

GRUNDLAGENBERICHT

BGE-2024-GB-1

Oktober 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.

Revisionsblatt



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 2
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	Stand: 29.10.2024

Titel der Unterlage:

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

Rev.	Rev.-Stand Datum	Verantwortliche Stelle	Revidierte Blätter	Kat.*	Erläuterung der Revision
00	20.03.2024	STA-SU.2			Ersterstellung
01	29.10.2024	STA-SU.2	alle	R	Aktualisierung der Formatvorlage
			alle	R	Anpassung Geschäftszeichen (GZ), Objekt-ID; (alt: GZ SG02301/16-13/1-2024#2 - Objekt-ID 10706104)
			alle	V	Anpassung des Dokumententitels: anstatt „in Schritt“ zu „ab Schritt“ geändert
			alle	R	Redaktionelle Änderungen
			5	R	Aktualisierung des Abkürzungsverzeichnisses
			6	R	Einfügen des Glossars
			13	S	Letzter Absatz: ersten drei Sätze ergänzt
			14,15	S	Absatz ergänzt
			15	V	Neu beschrieben
			15,16	S	Absätze ergänzt
			21	V	Ergänzung Fußnote
			22 fortführend	R	Wording von Kristallin zu Kristallingestein oder kristallinem Wirtsgestein geändert
			24,25	S	Absätze ergänzt
			29,30,31	V,S	Neu beschrieben, Absätze ergänzt
			32	S	Neu beschrieben

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
Kategorie S = substantielle Änderung
mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 3
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt		1
Revisionsblatt		2
Inhaltsverzeichnis		3
Abbildungsverzeichnis		4
Tabellenverzeichnis		4
Anlagenverzeichnis		4
Abkürzungsverzeichnis		5
Glossar		6
Erläuterung zur Revision des Berichts		9
1	Veranlassung	13
2	Zusammenfassung der beauftragten Studien	16
2.1	Studie zur Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten	16
2.1.1	Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Steinsalz	18
2.1.2	Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein	20
2.1.3	Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten im kristallinen Wirtsgestein	22
2.2	Studie zur Prüfung der Machbarkeit des sicheren Betriebs und der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit	24
2.2.1	Prüfung des Rückholungsbetriebs im Steinsalz	25
2.2.2	Prüfung des Rückholungsbetriebs im Tongestein	26
2.2.3	Prüfung des Rückholungsbetriebs im kristallinen Wirtsgestein	27
3	Festlegung der wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperaturen für Schritt 2 der Phase I	27
3.1	Bezug zum Sicherheitskonzept	28
3.2	Auslegungstemperatur für Steinsalz	28
3.3	Auslegungstemperatur für Tongestein	30
3.4	Auslegungstemperatur für kristallines Wirtsgestein	32
Literaturverzeichnis		33
Anzahl der Blätter dieses Dokumentes		35

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 4
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der RN-transportrelevanten (a) und integritätsrelevanten (b) TUFs für den Versatz sowie die daraus erstellten GTUF.	19
Abbildung 2:	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.	21
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).	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Festgelegte wirtsgesteinsspezifische Auslegungstemperaturen für den Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.	28
------------	--	----

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Prüfvorgabe für eine Studie einer geeigneten wirtsgesteinsspezifischen Auslegungstemperatur für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle entsprechend StandAG	Blattzahl: 8
	GZ: SG02301/7-16/1-2022#1 Objekt-ID: 8263431 Revision: 00	
	VDIS: SG/0230/-/-/E/RZ/0002/00	

Gesamte Anzahl der Blätter dieses Dokumentes inkl. Anlagen	43
---	-----------

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 5

Abkürzungsverzeichnis

ALARA	As Low As Reasonably Possible
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGE TEC	BGE TECHNOLOGY GmbH
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, Processes
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH
GTUF	Gesamttemperaturunverträglichkeitsfunktion
H₂S	Schwefelwasserstoff
NBG	Nationales Begleitgremium
RN	Radionuklid
rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
StandAG	Standortauswahlgesetz
THMCBR-Prozesse	thermische, hydraulische, mechanische, chemische, biologische und radiologische Prozesse
TUF	Temperaturunverträglichkeitsfunktion
vsU	vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 6

Glossar

- Behälter** Dicht verschließbare Hülle der radioaktiven Abfälle zum Zweck des Transportes und/oder der Lagerung. Dient als technische Barriere und erfüllt Sicherheitsfunktionen.
- Bewetterung** Unter Bewetterung (Wetter) versteht man die planmäßige Versorgung des Grubengebäudes mit frischer Luft.
- Brennelement** Ein wesentlicher Bestandteil eines Kernreaktors. Es ist zusammengefügt aus mehreren Brennstäben, die den Kernbrennstoff beinhalten.
- einschlusswirksamer Gebirgsbereich** Der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet.
- Einlagerungsbereich** Der räumliche Bereich des Gebirges, in den die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet.
- Endlagergebäude** Die zur Endlagerung vorgesehenen Behälter mit radioaktiven Abfällen.
- Endlagersystem Typ 1/2** Ein Endlagersystem bewirkt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken verschiedener Komponenten und umfasst das Endlagerbergwerk, die wesentlichen und weiteren Barrieren und die das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, sofern sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen (vgl. § 2 Nr. 11 Standortauswahlgesetz (StandAG)). Beim Endlagersystem Typ 1 bildet der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) die wesentliche Barriere, beim Endlagersystem Typ 2 bestehen die wesentlichen Barrieren aus technischen und geotechnischen Komponenten (BGE 2022/1, S. 27ff).
- Erkundung** Die über und untertägige Untersuchung des Untergrundes auf seine Eignung zur Einrichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle. Die Erkundung erfolgt typischerweise mit geophysikalischen (z. B. Seismik) und hydrogeologischen Verfahren, Bohrungen oder auch Bergwerken.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 7

- Gebiete** Laut § 2 Nr. 6 StandAG bezeichnet der Begriff „sämtliche hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort zu bewertenden räumlichen Bereiche innerhalb Deutschlands; ein Gebiet umfasst die übertägigen Flächen und die darunterliegenden untertägigen Gesteinsformationen“. Ein Gebiet ist also ein unbestimmter räumlicher Bereich und kann je nach Kontext einen Untersuchungsraum (UR), ein Gebiet einer bestimmten Kategorie (z. B. ein in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) definiertes Kategorie A-Gebiet) oder einen Teil eines dieser räumlichen Bereiche umfassen.
- Langzeitsicherheit** Der dauerhafte Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung radioaktiver Abfälle.
- Radionuklid** Ein instabiles Nuklid, das durch radioaktiven Zerfall in andere Nuklide übergeht.
- repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** Gemäß § 27 Abs. 1 StandAG ist das wesentliche Ziel der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zu beurteilen, inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann. Die Inhalte der rvSU sind in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndSiAnfV) und der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndSiUntV) festgelegt. „Die Ergebnisse der rvSU bilden in der weiteren Bearbeitung des § 14 StandAG die Grundlage für die Erarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme, der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und damit der Ermittlung günstiger Standortregionen.“
- Rückholbarkeit** Die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase.
- Sicherheitskonzept** In einem Sicherheitskonzept ist darzulegen, wie das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle nach § 4 Abs. 1 erreicht werden soll. Dabei ist das gesamte Endlagersystem während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung sowie im Bewertungszeitraum zu berücksichtigen.
- Sicherheitsfunktion** Eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen an ein sicherheitsbezogenes System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente erfüllt.
- Standortregionen** Die nach § 14 StandAG zu ermittelnden Gebiete, die innerhalb der Teilgebiete liegen und die für die übertägige Erkundung zur Ermittlung der in diesen Regionen liegenden möglicherweise geeigneten Endlagerstandorte in Betracht kommen.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 8

- Störfall** Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Kerntechnischen Anlage, der Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die Kerntechnische Anlage oder die Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung auszulegen ist oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind.
- Teufe** Mit dem bergmännischen Begriff Teufe wird die [vertikale] Tiefenlage unter der Tagesoberfläche angegeben. Die Teufe hat entsprechend immer ein positives Vorzeichen.
- Ungewissheiten** Ungewissheit ist ein Mangel an Gewissheit und/oder Informationen zur Beschreibung des Systems und somit zur Einschätzung möglicher negativer Konsequenzen. Ungewissheiten können sowohl durch fehlendes Wissen [...] als auch durch natürliche Variabilität entstehen.
- Verfüllung** Mit Verfüllung wird das Einbringen von Versatzmaterial in die Grubenbaue zur Verringerung des verbleibenden Hohlraumvolumens bezeichnet.
- Versatz** Unter Versatz werden Materialien verstanden, die im Endlagerbergwerk genutzt werden, um die durch die Auffahrung entstandenen Hohlräume zu verfüllen. Hierdurch tragen Versatzmaterialien, z. B. durch die Reduzierung des Hohlraumvolumens oder der Rückhaltung von Radionukliden, erheblich zur Langzeitsicherheit des Endlagerbergwerks bei. Versatzmaterialien werden in Hinblick auf die erforderlichen Funktionen und aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften gewählt.
- wesentliche Barrieren** Die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht.
- Wirtsgestein** Gesteinstyp, der gemäß § 1 Abs. 3 StandAG in Deutschland „grundsätzlich für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle [...] in Betracht [kommt].“ Dies sind „die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein.“

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 9

Erläuterung zur Revision des Berichts

Anfang 2024 wurde der vorliegende Bericht erstmals veröffentlicht. Nach der Veröffentlichung erfolgte am 15. April 2024 ein Fachdialog zwischen dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) und der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) zum Thema Grenztemperatur in dem über die Inhalte des Berichts diskutiert wurden. Im Anschluss daran wurde durch das BASE in einem Schreiben vom 29. Mai 2024 die Erläuterung verschiedener Aspekte gefordert (Kraus 29.05.2024). Um diese Aspekte aufzugreifen und zu beantworten wurde eine Revision des Berichts angefertigt.

Die Antworten auf diese Aspekte werden zum einen hier knapp zusammengefasst. Zum anderen werden die Antworten in den Kapiteln 1 bis 3 integriert, Änderungen sind dort entsprechend markiert.

1. *„In den Studien der GRS (Czaikowski et al. 2024c, 2024a, 2024b; Bertrams und Leonhard 2023) kommen bei der Abschätzung von günstigen Temperaturen in dieser Phase des Verfahrens in Abwesenheit standortspezifischer Daten teilweise sehr generische Annahmen und Konzepte und sehr große Konservativitäten zur Anwendung. Mit Blick auf das Optimierungsgebot für die Langzeit- und Betriebssicherheit nach § 12 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMUV 06.10.2020) stellt sich die Frage, warum es Ihrer Auffassung nach möglich, aber nicht beabsichtigt ist, die gewählten Auslegungstemperaturen in den Phasen II und III des Standortauswahlverfahrens erneut anzupassen. Bitte erläutern Sie dies und gehen Sie in diesem Zusammenhang auch auf den von Ihnen gewählten pauschalen Ausschluss von Temperaturen unter 100°C für die mögliche Endlagerauslegung ein.“* (Kraus 29.05.2024)

Für die Festlegung der Auslegungstemperaturen wurden zwar Temperaturen kleiner 100 °C im Rahmen der beauftragten Arbeiten untersucht, sie sind jedoch nicht Teil dieser Einordnung. Durch die hier präsentierten Forschungsergebnisse wurden keine Erkenntnisse gewonnen, die Auslegungstemperaturen kleiner als 100 °C erfordern. Daher wird eine Festlegung auf Auslegungstemperaturen kleiner als 100 °C zum jetzigen Zeitpunkt als nicht zielführend erachtet, da noch keine gebietspezifischen Endlagerkonzepte vorliegen und insbesondere bei Gebieten in größeren Teufen geringere Auslegungstemperaturen ggf. nicht realistisch umsetzbar sind (da bspw. nicht realisierbar große Flächenbedarfe resultieren oder die geringere Auslegungstemperatur nicht eingehalten werden könnte, da die Entscheidung getroffen wurde Brennelemente nicht zu zerlegen).

Die in diesem Dokument präsentierten Forschungsarbeiten werden nach dem aktuellen Kenntnisstand als abdeckend für die Festlegung der Auslegungstemperaturen angesehen. Sollte sich der Kenntnisstand ändern und neue Forschungsergebnisse eine Anpassung erfordern, ist dies, insbesondere im Sinne des lernenden Verfahrens, möglich. Darüber hinaus ist anzumerken, dass mit fortschreitendem Verfahren (Phase II und III des Standortauswahlverfahrens) zunehmende Informationen zur Verfügung stehen werden und somit Konzepte, wie z. B. die Endlagerauslegung, detaillierter beschrieben werden können. Ebenso wird ab den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Untersuchung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hinsichtlich Temperaturentwicklung im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse gefordert.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 10

Die aktuellen Auslegungstemperaturen beziehen sich auf die Außenfläche der Behälter. Es ist vorstellbar, dass mit zunehmenden Detaillierungsgrad des Verfahrens weitere Auslegungstemperaturen für andere Komponenten im Endlagersystem definiert werden. Die Überprüfung einer weiteren Konkretisierung der Auslegungstemperaturen in späteren Phasen des Verfahrens erscheint aus heutiger Sicht als sinnvoll.

2. *„Die BGE mbH wählt für Tongestein eine Auslegungstemperatur von 100 °C, abweichend von Ergebnissen der GRS-Studie (Czaikowski et al. 2024c), die für eine von zwei Varianten im Tongestein eine günstige Temperatur von 120 °C vorschlägt. Ihre schriftliche Begründung hierzu ist für uns nicht vollumfänglich nachvollziehbar. Bitte erläutern Sie, welche Rolle die beiden betrachteten Varianten in der genannten Studie in Ihren eigenen Abwägungen spielen, ob der Einfluss bestimmter Prozesse, wie beispielsweise der der mikrobiellen Aktivität, anders als in der Studie gewichtet wurde und ob und welche weiteren Aspekte in der gewählten Auslegungstemperatur von 100 °C Berücksichtigung finden.“ (Kraus 29.05.2024)*

Wesentlich für die Festlegung der Auslegungstemperatur im Tongestein sind die Ergebnisse der von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) durchgeführten Studie (Czaikowski et al. 2024c). Im Rahmen dieser Arbeiten wurden für Tongestein zwei Varianten erarbeitet, da verschiedene Prozesse mit Ungewissheiten behaftet sind und unterschiedlich berücksichtigt werden können:

- Variante 1 führt zu einem günstigen Temperaturbereich von 100 – 120 °C
- Variante 2 liefert als Ergebnis, dass eine möglichst gering von der Gebirgstemperatur abweichende Temperatur günstig ist.

Die Prüfvorgabe der BGE, mit der die Bearbeitung der GRS 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 Temperaturen entweder unterhalb oder oberhalb von 100 °C liegen können (Variante 1 und 2). Hier sind ggf. weitere Studien, idealerweise an Vorort-Proben in den Standortregionen erforderlich (Kapitel 2.1.2).

Um die Vielzahl der Gebiete im Tongestein mit unterschiedlichen Eigenschaften abzudecken, wurden bei der Wahl der Auslegungstemperatur beide Varianten miteinbezogen. Dabei wurde aus dem günstigen Temperaturbereich von Variante 1 die niedrigste Temperatur gewählt, was das Ergebnis von Variante 2 berücksichtigt. Dies führt zu einer Auslegungstemperatur von 100 °C.

3. *„Die Abschätzungen zur Machbarkeit einer Rückholung in der Studie der BGE TEC (Bertrams und Leonhard 2023) basieren auf generischen Konzepten und konservativen Annahmen. Bitte führen Sie vertieft aus, wie Sie die ausgewählte Auslegungstemperatur von 150 °C im Steinsalz abgeleitet und inwiefern die begrenzte Aussagefähigkeit der Annahmen bei*

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 11

Ihrer Entscheidung eine Rolle gespielt haben. Bitte erläutern Sie den Einfluss der Gebirgskonvergenz als auch der Schaffung arbeitstechnisch geeigneter klimatischer Verhältnisse untertage auf die Wahl der Auslegungstemperatur. Bitte führen Sie weiterhin aus, weshalb eine ferngesteuerte Rückholung in den Planungen nicht berücksichtigt wird, und erläutern Sie, ob die angenommenen Rückholungsmaßnahmen auf eine mögliche Gefährdung der Langzeitsicherheit nach § 13 Abs. 3 Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (BMUV 06.10.2020) geprüft worden ist. Bitte führen Sie aus, inwieweit sich die von Ihnen gewählte, niedrigere als von der GRS vorgeschlagene, Auslegungstemperatur im Steinsalz auf den Flächenbedarf auswirkt und ob durch diese niedrigere Auslegungstemperatur Gebiete aus dem Verfahren ausscheiden.“ (Kraus 29.05.2024)

Die Wahl der Auslegungstemperatur hat Einfluss auf die sich entwickelnden Temperaturen im Endlager, sobald Abfälle eingelagert werden. Die Auslegungstemperatur tritt an der Behälteroberfläche auf und übersteigt erheblich die Gebirgstemperaturen, die im klassischen Gewinnungsbergbau nachweislich beherrscht werden. Auch das Nahfeld der Endlagerbehälter (Verfüllmaterial und Gebirge) heizt sich nach Einlagerung und Verfüllung des die Behälter umgebenden Hohlraums auf. Insbesondere im Fall einer Rückholung können also (je nach Zeitpunkt) Temperaturen deutlich größer als die Gebirgstemperatur angetroffen werden.

Die Geschwindigkeit der Konvergenz im Steinsalz nimmt mit steigenden Gebirgsdrücken (und damit Teufen) und steigenden Temperaturen zu. Eine Aufheizung kann die Standzeit und Stabilität von Strecken gefährden. Ebenso besteht die Herausforderung, arbeitstechnisch geeignete klimatische Verhältnisse unter Tage zu schaffen.

Um den positiven Effekt des Kriechens zu nutzen, wurde daher eine möglichst hohe Auslegungstemperatur angestrebt, die im Hinblick auf die Betriebssicherheit und Rückholbarkeit noch machbar ist. Basierend auf den Arbeiten der BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC) wurde die Auslegungstemperatur von 170 °C in Teufen größer als 1000 m als kritisch eingestuft, da sich Herausforderungen bezüglich der Offenhaltung der Strecken sowie der Einstellung der klimatischen Verhältnisse ergaben. Die klimatischen Verhältnisse wären zwar unter verhältnismäßig akzeptablem Aufwand knapp erreichbar, aber die Offenhaltung der Strecken würde bei Endlagern in Teufen ab ca. 1000 m aufgrund der temperatur- und druckgetriebenen Konvergenz in Frage gestellt werden. Aus diesem Grund wurde die Auslegungstemperatur auf 150 °C gesenkt. Die Reduktion der Auslegungstemperatur von 170 °C auf 150 °C ist somit eine Maßnahme zur Gewährleistung der Rückholbarkeit. 150 °C liegen nach wie vor im günstigen Temperaturbereich für die Langzeitsicherheit im Steinsalz.

Die Machbarkeit der Rückholung wurde mit Hilfe von konservativen und generischen Annahmen und eines abschätzenden Berechnungsverfahren geprüft. Eine weitere quantitative Herleitung der Auslegungstemperatur von 150 °C hat nicht stattgefunden. Aus Sicht der BGE ist eine detaillierte, z. B. numerische Herleitung einer „genauen“ Auslegungstemperatur nicht sinnvoll machbar, da die Auslegungstemperatur einerseits für eine Vielzahl von unterschiedlichen Gebieten im Steinsalz gelten muss. Andererseits sind meist nur generische Parameter verfügbar, wodurch die weitere Quantifizierung und Abwägung von Vor- und Nachteilen von Auslegungstemperaturen auf Langzeit- und

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 12

Betriebssicherheit nicht so durchführbar ist, dass die Ergebnisse einer solchen Analyse für einen Standort konkrete Aussagen erwarten lassen.

Auf dieser Grundlage erfolgte die fachlich untersetzte Festlegung der Auslegungstemperatur im Steinsalz auf 150 °C durch die BGE.

Im Vergleich zu einer Temperatur von 170 °C erhöht sich der Flächenbedarf bei einer Auslegungstemperatur von 150 °C. Dennoch ist der resultierende Flächenbedarf geringer als der vorsorglich festgelegte Wert, der durch die Begründung des StandAG vorgegeben ist. Der Flächenbedarf eines Endlagers wird innerhalb des Prüfschritt basierten Vorgehens der rvSU mehrfach geprüft. Dabei kann eine Unterschreitung des Mindestflächenbedarfs zum Ausschluss eines Gebietes führen. Dies kann insbesondere für Steinsalz in steiler Lagerung relevant sein, da hier Gebiete, aufgrund der Genese von Salzstöcken, mit vergleichsweise kleineren Flächen vorliegen.

Des Weiteren werden Verfahren zur Rückholung entsprechend dem aktuellen Stand der Technik angenommen. Eine Prognose zum technischen Fortschritt bis zur Betriebszeit des Endlagers wurde nicht vorgenommen. Eine vollständige Fernsteuerung der Arbeiten ist im Normalbetrieb auch heute zwar schon denkbar, aber nicht Stand der Technik. Gerade im Fall von Betriebsstörungen/Störfällen kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass Personal vor Ort eingesetzt werden muss. Die dann notwendigen Tätigkeiten sind in hohem Maße sicherheitsrelevant, erfordern hohe Konzentration und Effizienz (auch im Sinn des ALARA¹-Prinzips). Aus diesem Grund sollten die klimatischen Bedingungen so einstellbar sein, dass sie für menschliches Arbeiten akzeptabel sind. Als Maßstab dafür wurden die Vorgaben der KlimaBergV verwendet.

Die Prüfung der Machbarkeit von Betrieb und Rückholung erfolgte ausschließlich im Kontext der Festlegung einer Auslegungstemperatur und betrachtete damit ausschließlich Effekte, die von der Wahl der Auslegungstemperatur abhängig sind. A priori wurden für diese Prüfung keine Maßnahmen angenommen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit (§ 13 Abs. 3 EndlSiAnfV) dienen. Sollte die Machbarkeit von Betrieb und Rückholung in Frage stehen, besteht die Möglichkeit die Auslegungstemperatur anzupassen oder es können für kritische Teufen- und Temperaturbereiche, Parameter der Endlagerauslegung (Behälterbeladung, Behälterabstände, Streckenabstände) unter Beibehaltung der Auslegungstemperatur so eingestellt werden, dass die Randbedingungen der Rückholung erleichtert werden. Ein Einfluss auf die Langzeitsicherheit ist nur im konkreten Anwendungsfall prüfbar, z. B., wenn dadurch die Endlagerfläche steigt und die Barrieremächtigkeit des Wirtsgesteins zu klein wird. Die Maßnahmen der Rückholung selbst haben zwangsläufig Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit, da sie das Endlagersystem deutlich beeinflussen.

¹ Die Abkürzung ALARA steht für „As Low As Reasonably Achievable“ und beschreibt das Optimierungsgebot zur Reduzierung von Strahlungsexposition.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 13

1 Veranlassung

In der vorliegenden Unterlage erläutert die BGE den Umgang mit der Grenztemperatur in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens. Wesentlicher Inhalt des Dokuments sind wirtsgesteinspezifische Auslegungstemperaturen, die ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens von der BGE angewendet und im Folgenden erläutert 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 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, dem Endlagerbehälterkonzept und der Endlagerauslegung, sowie 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, so dass unter Einbeziehung einer Oberflächentemperatur von bspw. 10 °C in 1000 m Teufe 40 °C vorliegen würden. Die an dem jeweiligen Standort tatsächlich vorliegende Temperatur bleibt jedoch konkreten Erkundungsarbeiten vor Ort vorbehalten.

Die im StandAG vorsorglich 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).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Wirtsgesteine in den Gebieten jeweils unterschiedliche, räumlich variable Eigenschaften aufweisen. Diese Eigenschaften sind heute, wenn überhaupt, nur sehr eingeschränkt bekannt. Diese Informationen werden erst im Rahmen der Erkundung in Phase II des Standortauswahlverfahrens zur Verfügung stehen. Für die BGE ist jedoch 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. Da der Begriff der Grenztemperatur, wie oben beschrieben, in der

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 14

Fachwelt kritisch diskutiert wird, wird hier der Begriff einer Auslegungstemperatur verwendet. Ziel ist es, anhand von verschiedenen Grundlagenarbeiten günstige Auslegungstemperaturen für die Anwendung ab Schritt 2 Phase I zu erhalten. Diese Auslegungstemperaturen gelten ebenfalls für die Außenfläche der Behälter. Sie erheben jedoch nicht den Anspruch die „maximal physikalisch möglichen“ Temperaturen zu sein², da als „maximal physikalisch mögliche“ 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 Temperaturen³ (GRS, Technische Universität Darmstadt) (Meleshyn et al. 2024)
- 2022: Ableitung der wirtsgesteinsspezifischen Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten, wirtsgesteinsspezifische Aufstellung wissenschaftlicher Grundlagen für die Ableitung einer für die Langzeitsicherheit günstigen Temperatur (GRS) (Czaikowski et al. 2024a, 2024b)
- 2023: Bewertung des sicheren Betriebs und der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit (BGE TEC) (Bertrams & Leonhard 2024)

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.

Für die Festlegung der Auslegungstemperaturen wurden zwar Temperaturen kleiner 100 °C im Rahmen der beauftragten Arbeiten untersucht, sie sind jedoch nicht Teil dieser Einordnung. Durch die hier präsentierten Forschungsergebnisse wurden keine Erkenntnisse gewonnen, die Auslegungstemperaturen kleiner als 100 °C erfordern. Daher wird eine Festlegung auf Auslegungstemperaturen kleiner als 100 °C zum jetzigen Zeitpunkt als nicht zielführend erachtet, da noch keine gebietspezifischen Endlagerkonzepte vorliegen und insbesondere bei Gebieten in größeren Teufen geringere

² Die Auslegungstemperatur ist eine notwendige Temperaturannahme für die Planung der Endlagerauslegung, sie darf bei der Planung nicht überschritten werden.

³ 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 ab 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	01

Blatt: 15

Auslegungstemperaturen ggf. nicht realistisch umsetzbar sind (da bspw. nicht realisierbar große Flächenbedarfe resultieren oder die geringere Auslegungstemperatur nicht eingehalten werden könnte, da die Entscheidung getroffen wurde Brennelemente nicht zu zerlegen).

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 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 EndlSiAnfV müssen die Behälter „... bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein.“ Da ein Temperaturzuwachs im Endlager nach der Einlagerung und Verfüllung der ersten Endlagerbehälter auftritt (BGE 2022/2), ist es möglich, dass die Rückholung von früh eingelagerten 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 Auslegungstemperaturen 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.

Die in diesem Dokument präsentierten Forschungsarbeiten werden nach dem aktuellen Kenntnisstand als abdeckend für die Festlegung der Auslegungstemperaturen angesehen. Sollte sich der Kenntnisstand ändern und neue Forschungsergebnisse eine Anpassung erfordern, ist dies, insbesondere im Sinne des lernenden Verfahrens, möglich. Darüber hinaus ist anzumerken, dass mit fortschreitendem Verfahren (Phase II und III des Standortauswahlverfahrens) zunehmende Informationen zur Verfügung stehen werden und somit Konzepte, wie z. B. die Endlagersauslegung, de-

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 16

taillierter beschrieben werden können. Ebenso wird ab den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen die Untersuchung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hinsichtlich Temperaturentwicklung im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse gefordert.

Die aktuellen Auslegungstemperaturen beziehen sich auf die Außenfläche der Behälter. Es ist vorstellbar, das mit zunehmenden Detaillierungsgrad des Verfahrens weitere Auslegungstemperaturen für andere Komponenten im Endlagersystem definiert werden. Die Überprüfung einer weiteren Konkretisierung der Auslegungstemperaturen in späteren Phasen des Verfahrens erscheint aus heutiger Sicht als sinnvoll.

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. Prüfvorgaben⁴, 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.

⁴ 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 ab 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	01

Blatt: 17

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:

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 THMCBR⁵-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 durch so genannte Temperaturunverträglichkeitsfunktionen (TUF) beschrieben, die im Sinne einer mathematischen Optimierung 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.

⁵ THMCBR-Prozesse entsprechen thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen, biologischen und radiologischen Prozessen, die untereinander gekoppelt sein können.

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 18
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

Die Methodik der GRS wurde in einem computergestützten Rechenprogramm⁶ 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.

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).

⁶ Das Rechenprogramm wurde in julia programmiert und liegt der BGE vor. Eine Veröffentlichung ist in Planung.

Auslegungstemperaturen ab 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	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	01

Blatt: 19

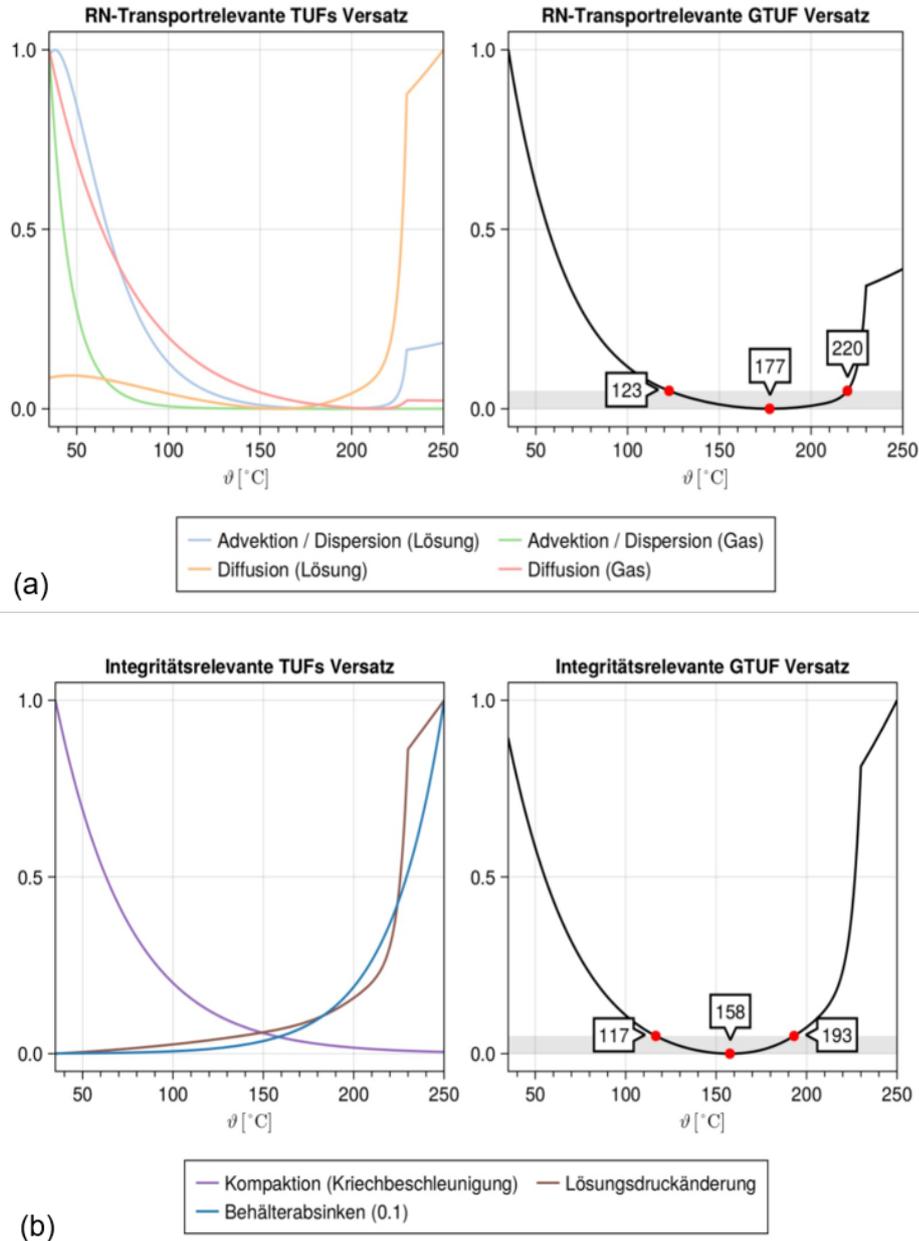


Abbildung 1: Darstellung der RN-transportrelevanten (a) und integritätsrelevanten (b) TUFs für den Versatz sowie die daraus erstellten GTUF. Der graue Bereich stellt den Temperaturbereich dar, bei dem die GTUF einen maximalen Wert 0.05 annimmt. Dieser Wert wurde auf 5 % festgelegt, um die Ungewissheiten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

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
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	01	

2.1.2 Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein

Wichtige Prämissen für die Ableitung der Temperaturverträglichkeit im Tongestein umfassen bspw. die Annahme, dass keine so genannte Opferschicht⁷ 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 u. a. 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).

⁷ 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 ab 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	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	01

Blatt: 21

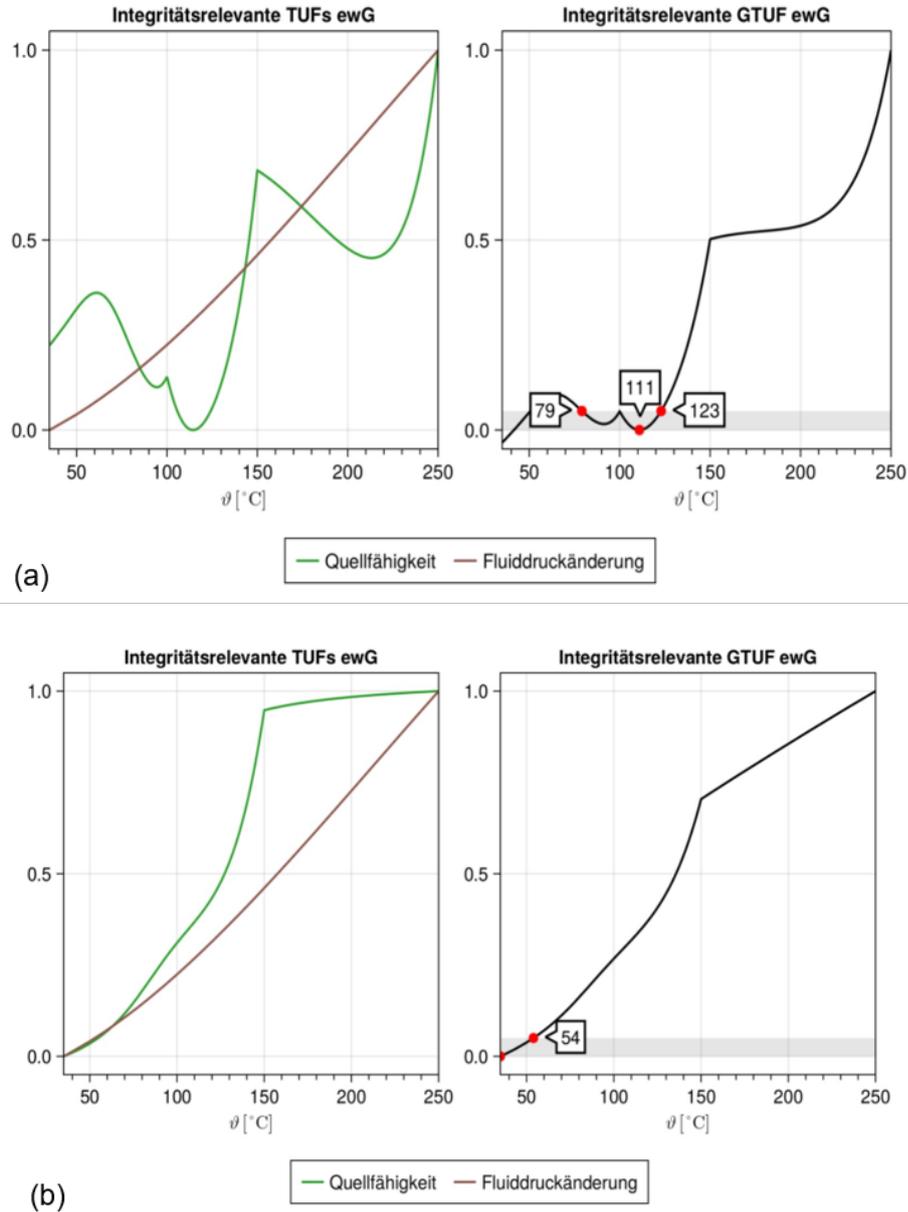


Abbildung 2: *Integritätsrelevante TUFs für den ewG. (a) Variante 1, basierend u. a. auf der Gleichgewichtung aller Prozesse, wodurch der vorteilhafte Einfluss mikrobieller Prozesse erkennbar ist. (b) Variante 2, basierend u. a. auf der Gewichtung der beteiligten Prozesse entsprechend ihrer Bilanzierung. ⁸ 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)*

⁸ Es ist anzumerken, dass die abgeleitete TUF „Quellfähigkeit“ in Czaikowski et al. (2024c) auch als „Reduzierung der Quellfähigkeit [...]“ betitelt wurde.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 22

2.1.3 Temperaturverträglichkeit von Endlagerkomponenten im kristallinen Wirtsgestein

Wichtige Prämissen für die Analyse im kristallinen Wirtsgestein umfassen unter anderem, die Annahme, dass die technischen und geotechnischen Barrieren wesentlich sind, dass das kristalline Wirtsgestein ausschließlich eine unterstützende Funktion einnimmt und dass eine gleichmäßige Auf-sättigung 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 sieben 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 kristallinen Wirtsgestein wurden alle TUF mit der Wichtung 1 versehen.

Die Ergebnisse für Variante 1 zeigen, dass in einem Endlagersystem im kristallinen Wirtsgestein 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 ab 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	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0230				E	RZ	0001	01

Blatt: 23

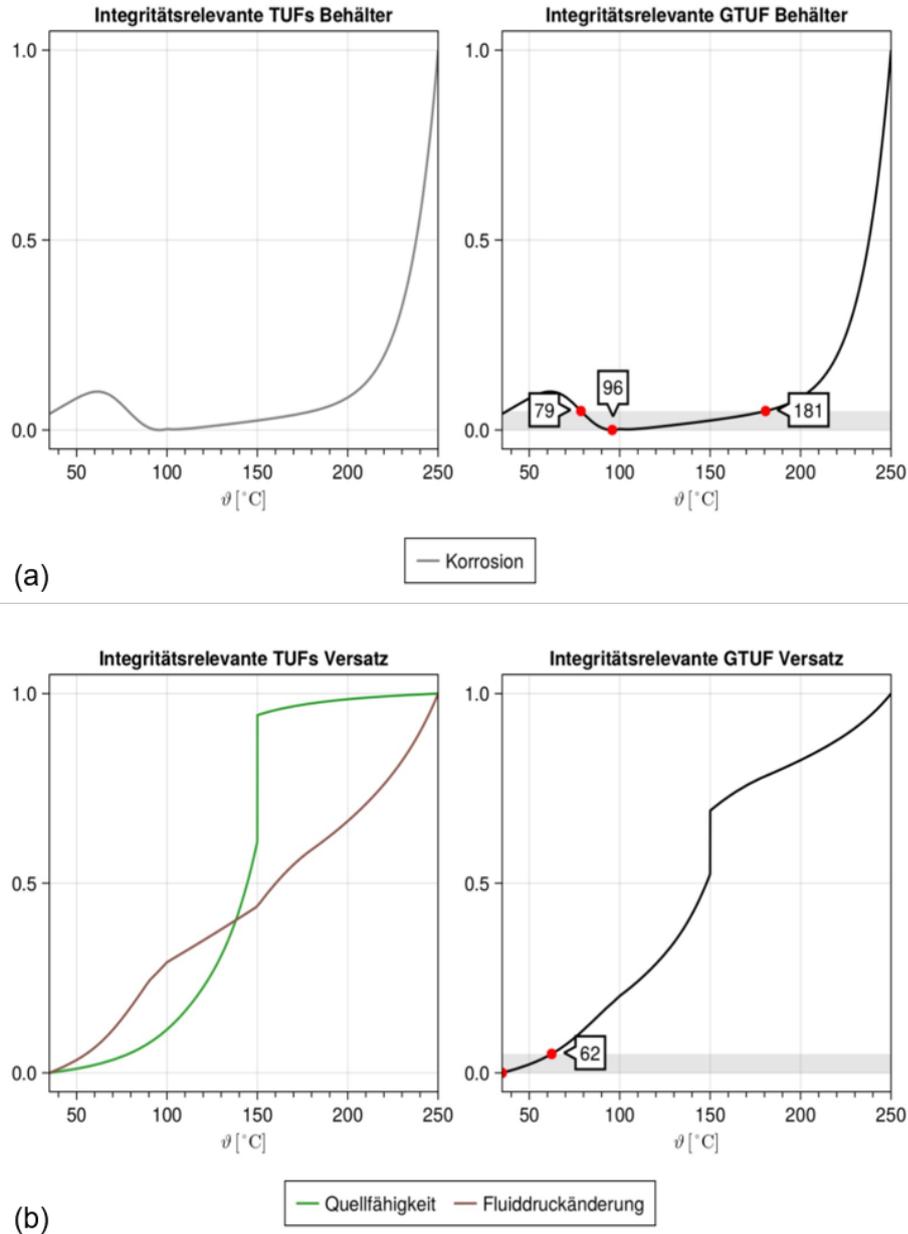


Abbildung 3: Darstellung der integritätsrelevanten TUF und GTUF für den Behälter für Variante 2 (a) und der TUF bzw. GTUF für den Versatz, unabhängig der Variante (b). Der graue Bereich stellt den Temperaturbereich dar, bei dem die GTUF einen maximalen Wert 0.05 annimmt. Dieser Wert wurde willkürlich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

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 24
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

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), 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

Die Wahl der Auslegungstemperatur hat Einfluss auf die sich entwickelnden Temperaturen im Endlager, sobald Abfälle eingelagert werden. Die Auslegungstemperatur tritt an der Behälteroberfläche auf und übersteigt erheblich die Gebirgstemperaturen, die im klassischen Gewinnungsbergbau nachweislich beherrscht werden. Auch das Nahfeld der Endlagerbehälter (Verfüllmaterial und Gebirge) heizt sich nach Einlagerung und Verfüllung des die Behälter umgebenden Hohlraums auf. Insbesondere im Fall einer Rückholung können also (je nach Zeitpunkt) Temperaturen deutlich größer als die Gebirgstemperatur angetroffen werden.

Die Geschwindigkeit der Konvergenz im Steinsalz nimmt mit steigenden Gebirgsdrücken (und damit Teufen) und steigenden Temperaturen zu. Eine Aufheizung kann die Standzeit und Stabilität von Strecken gefährden. Ebenso besteht die Herausforderung, arbeitstechnisch geeignete klimatische Verhältnisse unter Tage zu schaffen.

Basierend darauf werden als wesentlich für die Bewertung der Machbarkeit des Einlagerungs- und Rückholungsbetriebs im Hinblick auf steigende Temperaturen folgende Fragestellungen untersucht:

- *„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 Klimateinwirkungen (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.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 25

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 rvSU Anwendung finden. Für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz wird somit Streckenlagerung betrachtet, wobei für Kristallingestein die vertikale Einlagerung einzelner Behälter (nach dem skandinavischen KBS-3V Konzept) berücksichtigt wird.

Des Weiteren werden Verfahren zur Rückholung entsprechend dem aktuellen Stand der Technik angenommen. Eine Prognose zum technischen Fortschritt bis zur Betriebszeit des Endlagers wurde nicht vorgenommen. Eine vollständige Fernsteuerung der Arbeiten ist im Normalbetrieb auch heute zwar schon denkbar, aber nicht Stand der Technik. Gerade im Fall von Betriebsstörungen/Störfällen kann aber nicht ausgeschlossen werden, das Personal vor Ort eingesetzt werden muss. Die dann notwendigen Tätigkeiten sind in hohem Maße sicherheitsrelevant, erfordern hohe Konzentration und Effizienz (auch im Sinn des ALARA-Prinzips). Aus diesem Grund sollten die klimatischen Bedingungen so einstellbar sein, dass sie für menschliches Arbeiten akzeptabel sind. Als Maßstab dafür wurden die Vorgaben der KlimaBergV verwendet.

Die Prüfung der Machbarkeit von Betrieb und Rückholung erfolgte ausschließlich im Kontext der Festlegung einer Auslegungstemperatur und betrachtete damit ausschließlich Effekte, die von der Wahl der Auslegungstemperatur abhängig sind. A priori wurden für diese Prüfung keine Maßnahmen angenommen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit (§ 13 Abs. 3 EndlSiAnfV) dienen. Sollte die Machbarkeit von Betrieb und Rückholung in Frage stehen, besteht die Möglichkeit die Auslegungstemperatur anzupassen oder es können für kritische Teufen- und Temperaturbereiche, Parameter der Endlagerauslegung (Behälterbeladung, Behälterabstände, Streckenabstände) unter Beibehaltung der Auslegungstemperatur so eingestellt werden, dass die Randbedingungen der Rückholung erleichtert werden. Ein Einfluss auf die Langzeitsicherheit ist nur im konkreten Anwendungsfall prüfbar, z. B., wenn dadurch die Endlagerfläche steigt und die Barrieremächtigkeit des Wirtsgesteins zu klein wird. Die Maßnahmen der Rückholung selbst haben zwangsläufig Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit, da sie das Endlagersystem deutlich beeinflussen.

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.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 26

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 1400 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 1000 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 1000 m erhebliche Schwierigkeiten bezüglich des Rückholungsbetriebs aufgrund der temperatur- und druckgetriebenen Konvergenz ergeben.

Dies stellt daher die betriebliche Machbarkeit in Teufen größer als 1000 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.

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 Endlagergebänden zu verorten sind. Somit liegen Temperaturen vor, die bereits im tiefen Gewinnungsbergbau beherrscht wurden (Schaacke 2009).

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 27
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

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 Endlagergebinde 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 kristallinen Wirtsgestein

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).

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:

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 28
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

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 Sicherheitskonzepten⁹ für Steinsalz, Tongestein und kristallinen Wirtsgestein wird zwischen zwei Hauptsicherheitsfunktionen unterschieden, denen jeweils barrierespezifische Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden, um den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten. Unter der ersten Hauptsicherheitsfunktion *Integrität des Barrierensystems* 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 Funktionen, die dazu beitragen, die Migration von Radionukliden nach einem Integritätsverlust der Endlagerbehälter aus dem Bereich der wesentlichen Barriere zu be- bzw. verhindern.

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 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

⁹ Die vorläufigen Sicherheitskonzepte wurden mit Stand der Publikation des vorliegenden Berichts noch nicht veröffentlicht. Um jedoch den Sicherheitsbezug der Auslegungstemperaturen aufzuzeigen, werden hier bereits einige Inhalte dargestellt.

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 29

Endlagersystems deutlich begünstigt. Dies trägt erheblich dazu bei, dass die Hauptsicherheitsfunktion *Integrität des Barrierensystems* auch erfüllt werden kann

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. Somit wird der Transport von Radionukliden im Versatz verringert und der sichere Einschluss der Radionuklide wird begünstigt (Kapitel 2.1.1).

Um den positiven Effekt des Kriechens zu nutzen wurde daher eine möglichst hohe Auslegungstemperatur angestrebt, die im Hinblick auf die Betriebssicherheit und Rückholbarkeit noch machbar ist. Basierend auf den Arbeiten der BGE TEC wurde die Auslegungstemperatur von 170 °C in Teufen größer als 1000 m als kritisch eingestuft, da sich Herausforderungen bezüglich der Offenhaltung der Strecken sowie der Einstellung der klimatischen Verhältnisse ergaben. Die klimatischen Verhältnisse wären zwar unter verhältnismäßig akzeptablem Aufwand knapp erreichbar, aber die Offenhaltung der Strecken würde bei Endlagern in Teufen ab ca. 1000 m aufgrund der temperatur- und druckgetriebenen Konvergenz in Frage gestellt werden. Aus diesem Grund wurde die Auslegungstemperatur auf 150 °C gesenkt. Die Reduktion der Auslegungstemperatur von 170 °C auf 150 °C ist somit eine Maßnahme zur Gewährleistung der Rückholbarkeit. 150 °C liegen nach wie vor im günstigen Temperaturbereich für die Langzeitsicherheit im Steinsalz.

Die Machbarkeit der Rückholung wurde mit Hilfe von konservativen und generischen Annahmen und eines abschätzenden Berechnungsverfahren geprüft. Eine weitere quantitative Herleitung der Auslegungstemperatur von 150 °C hat nicht stattgefunden. Aus Sicht der BGE ist eine detaillierte, z. B. numerische Herleitung einer „genauen“ Auslegungstemperatur nicht sinnvoll machbar, da die Auslegungstemperatur einerseits für eine Vielzahl von unterschiedlichen Gebieten im Steinsalz gelten muss. Andererseits sind meist nur generische Parameter verfügbar, wodurch die weitere Quantifizierung und Abwägung von Vor- und Nachteilen von Auslegungstemperaturen auf Langzeit- und Betriebssicherheit nicht so durchführbar ist, dass die Ergebnisse einer solchen Analyse für einen Standort konkrete Aussagen erwarten lassen.

Auf dieser Grundlage erfolgte die fachlich untersetzte Festlegung der Auslegungstemperatur im Steinsalz auf 150 °C durch die BGE.

Im Vergleich zu einer Temperatur von 170 °C erhöht sich der Flächenbedarf bei einer Auslegungstemperatur von 150 °C. Dennoch ist der resultierende Flächenbedarf geringer als der vorsorglich festgelegte Wert, der durch die Begründung des StandAG vorgegeben ist. Der Flächenbedarf eines Endlagers wird innerhalb des Prüfschritt basierten Vorgehens der rvSU mehrfach geprüft. Dabei kann eine Unterschreitung des Mindestflächenbedarfs zum Ausschluss eines Gebietes führen. Dies kann insbesondere für Steinsalz in steiler Lagerung relevant sein, da hier Gebiete, aufgrund der Genese von Salzstöcken, mit vergleichsweise kleineren Flächen vorliegen.

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 30
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

3.3 Auslegungstemperatur für Tongestein

Wesentlich für die Festlegung der Auslegungstemperatur im Tongestein sind die Ergebnisse der von der GRS durchgeführten Studie (Czaikowski et al. 2024c). Im Rahmen dieser Arbeiten wurden für Tongestein zwei Varianten erarbeitet, da verschiedene Prozesse mit Ungewissheiten behaftet sind und unterschiedlich berücksichtigt werden können:

- Variante 1 führt zu einem günstigen Temperaturbereich von 100 – 120 °C
- Variante 2 liefert als Ergebnis, dass eine möglichst gering von der Gebirgstemperatur abweichende Temperatur günstig ist.

Die Prüfvorgabe der BGE, mit der die Bearbeitung der GRS 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 Temperaturen entweder unterhalb oder oberhalb von 100 °C liegen können (Variante 1 und 2). Hier sind ggf. weitere Studien, idealerweise an Vorort-Proben in den Standortregionen erforderlich (Kapitel 2.1.2).

Um die Vielzahl der Gebiete im Tongestein mit unterschiedlichen Eigenschaften abzudecken wurden bei der Wahl der Auslegungstemperatur beide Varianten miteinbezogen. Dabei wurde aus dem günstigen Temperaturbereich von Variante 1 die niedrigste Temperatur gewählt, was das Ergebnis von Variante 2 berücksichtigt. Dies führt zu einer Auslegungstemperatur von 100 °C. Im Folgenden wird die Wahl dieser Auslegungstemperatur weiter erläutert.

Es ist bekannt, dass die günstigen Eigenschaften, wie Quelfähigkeit und Sorptionsvermögen, von Tongestein und tonhaltigen Versatzmaterialien, als geologische und geotechnische Barrieren bezüglich der Langzeitsicherheit, bei erhöhten Temperaturen, graduell reduziert werden (Bracke et al. 2019). Dies zeigen auch die Ergebnisse der Studie der GRS zu Temperaturverträglichkeiten von Endlagerkomponenten im Tongestein (Abbildung 2). 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 Quelfähigkeit. Da im Besonderen die Quelfähigkeit sowohl vom Wirtsgestein als auch vom tonhaltigen Versatzmaterial eine positive Eigenschaft ist, könnte eine 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 barrierespezifischen Sicherheitsfunktion *chemische, mineralogische, biologische Eigenschaften* einher.

Die aktuellen Konzepte für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein sehen Bentonit als Verschluss- bzw. Versatzmaterial vor. Bentonit wird aufgrund seiner günstigen sicherheitsrelevanten

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 31

Eigenschaften (wie z. B. seiner hohen Quellfähigkeit) 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 vorzeitigen korrosionsbedingten Versagen schützen soll. Dies ist insbesondere in der frühen, thermischen Phase relevant, in der Temperaturspitzen auftreten können und die Aufsättigung des Bentonits als auch die Konvergenz des Gebirges noch nicht abgeschlossen ist. Um die erste Hauptsicherheitsfunktion *Integrität des Barriensystems* zu erfüllen, ist es demnach erforderlich, dass der Bentonit das vorzeitige Versagen des Behälters in der thermischen Phase verhindert.

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 barrierespezifische Sicherheitsfunktion *Thermische Eigenschaften* 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.

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. Im Vergleich zu 120 °C führt diese geringere Temperatur zu größeren Endlagerflächen, jedoch treten Tongesteine faziell bedingt üblicherweise über große Flächen auf. Dahingehend sind Endlager im Tongestein auch in größeren Teufen weiterhin realisierbar.

Auslegungstemperaturen ab Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens Einordnung zum Umgang mit der Grenztemperatur								 BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev	Blatt: 32
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
SG	0230				E	RZ	0001	01	

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 kristallines Wirtsgestein

Für das kristalline Wirtsgestein wird ebenfalls nach dem aktuellen Konzept für die Endlagerauslegung Bentonit als Versatzmaterial gewählt, der den Einschluss der Behälter gewährleisten soll und somit den Erhalt der Hauptsicherheitsfunktion *Rückhaltung von Radionukliden* sicherstellt. Insbesondere für das Endlagersystem Typ 2, in dem der sichere Einschluss allein auf technischen und 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 Quelfähigkeit und die Fluiddruckänderung im Versatz ungünstiger werden (Abbildung 3).

Da das kristalline Wirtsgestein bruchhaft auf Belastungen reagiert, sind die vorgeschlagenen 100 °C zum Schutz der geotechnischen Barriere generell sinnvoll und unabhängig davon, ob ein Endlagersystem Typ 1 oder Typ 2 betrachtet wird. Es muss auch in undurchlässigem Kristallingestein 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 ver- bzw. behindern.

In den skandinavischen Endlagervorhaben, die bereits detailliertere Erfahrungen im Kristallingestein 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.

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 *Integrität des Barrierensystems* 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 ab 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	01

Blatt: 33

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. https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/BGE/2024_01_05-Pruefung_der_Grenztemperatur.pdf

BGE (2022/2): *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

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. <https://access.archive-ouverte.unige.ch/access/metadata/ae3b7cf9-5a90-42a9-b35e-fe03307a4d1b/download>

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). <https://www.osti.gov/biblio/1815346>. DOI: <https://doi.org/10.2172/1815346>

Auslegungstemperaturen ab 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	01

Blatt: 34

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

Kraus, M. (29.05.2024): *Nachforderung zu dem Bericht der Auslegungstemperaturen in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens*. Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). Berlin

Meleshyn, A.; Hinze, M.; Middelhof, M.; Friedenber, L.; Jantschik, K. (2024): *Thermische Integrität von Ton und Tonsteinen*. Experiment und gekoppelte THMC-Simulationen (THMC-Sim). Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS). Braunschweig

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 Kühlhaltung 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

