



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

Fachliche Einordnung zur  
„Stellungnahme des TLUBN zur Methodenentwicklung der  
BGE zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen  
Sicherheitsuntersuchungen“ vom 30.05.2022

Stand 16.09.2022

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2 Wesentliche Anmerkungen des TLUBN und fachliche Einordnung</b>	<b>5</b>
2.1 Hinweise zum Arbeitsstand der Methodenentwicklung der rvSU	5
2.1.1 Berücksichtigung der Empfehlungen aus dem Validierungsbericht des TLUBN	5
2.1.2 Hinweise zum Arbeitsstand der Methodenentwicklung der rvSU: Dokumentstrukturplan	6
2.1.3 Anmerkungen zur Klassifikation von Datentypen	6
2.1.4 Kenngrößen zur Datenlage und den geologischen Rahmenbedingungen (DQL, DQN, IDN, KX)	7
2.1.5 Tektonische Überprägung der geologischen Einheit	9
2.1.6 Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen	10
2.1.7 FEM-Simulation der Wärmeleitung und Auslegung des Endlagerbergwerkes (Kapitel 4)	12
2.1.8 Numerische Modellierung des Austrages der Nuklide (Kapitel 8.5 und Anlage 3)	14
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>21</b>
<b>Anzahl der Blätter dieses Dokumentes</b>	<b>22</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BGE</b>	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
<b>DQL</b>	„Datenqualität“
<b>DQN</b>	„Datenquantität“
<b>EndlSiUntV</b>	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
<b>FEM-Simulationen</b>	Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode
<b>GeoIDG</b>	Geologiedatengesetz
<b>geoWK</b>	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien
<b>GOK</b>	Geländeoberkante
<b>GzME</b>	Gebiet(e) zur Methodenentwicklung
<b>IDN</b>	„Interpretative Daten und weitere (indirekte) Nachweise“
<b>KX</b>	„Geologische Komplexität“
<b>MA</b>	Mindestanforderungen
<b>planWK</b>	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien
<b>rvSU</b>	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung/en
<b>SGD</b>	Staatlichen Geologischen Dienste
<b>StandAG</b>	Standortauswahlgesetz
<b>TLUBN</b>	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz

## 1 Einleitung

Am 28.03.2022 hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (im Weiteren BGE) einen Methodenvorschlag zu den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) in Form eines Arbeitsstandes vorgestellt (BGE 2022a, 2022b) und bis Ende Mai 2022 zur Diskussion gestellt. Gegenstand der Veröffentlichung war das Konzept zur Durchführung der rvSU, welches den Arbeitsstand der Methode zur Durchführung der rvSU darstellt und zu welchem die BGE um fachlichen Input aufrief. Zudem wurden in Form der mitveröffentlichten Anlage „Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ Beispiele aus den Gebieten zur Methodenentwicklung (GzME) dargestellt, die die Methode praxisnah illustrieren. Eine detaillierte Darstellung von Arbeitsständen der einzelnen GzME war ausdrücklich nicht das Ziel dieses Methodenvorschlags.

Am 30.05.2022 wurden der BGE durch das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) eine Stellungnahme mit Fragen und Anmerkungen zum Methodenvorschlag vorgelegt. Für die Übersendung der Fragen und Anmerkungen bedankt sich die BGE ausdrücklich. Die Anlage zum Schreiben des TLUBN trägt den Titel „*Stellungnahme des TLUBN zur Methodenentwicklung der BGE zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen*“ (TLUBN 2022) und ist auf der [Homepage](#) der BGE veröffentlicht.

In dieser fachlichen Einordnung wollen wir in Kapitel 2 auf die wesentlichen Punkte aus der Stellungnahme des TLUBN eingehen.

Das TLUBN thematisiert in seiner Stellungnahme zum Konzept der Methodenentwicklung der rvSU und dessen Anlage hauptsächlich die Art und Weise der Berücksichtigung der Empfehlungen aus seinem Validierungsbericht zum Zwischenbericht Teilgebiete (TLUBN 2021). Weiterhin werden Hinweise zum „Dokument(en)strukturplan“, Anmerkungen zur „Klassifikation von Datentypen“ und zu „Kenngrößen zur Datenlage und den geologischen Rahmenbedingungen (DQL, DQN, IDN, KX)“<sup>1</sup>, Kommentare zur „Tektonische Überprägung der geologischen Einheit“ sowie zur „Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen“, zur „FEM-Simulation der Wärmeleitung und Auslegung des Endlagerbergwerkes“ und zur „Numerischen Modellierung des Austrages der Nuklide“ gegeben.

Kritische Anmerkungen betreffen vornehmlich die Ausführungen zum GzME „Thüringer Becken“. Das TLUBN äußert in seiner Stellungnahme zum veröffentlichten Arbeitsstand zur Methodik für die rvSU verschiedentlich auch Anerkennung für die beschriebene Vorgehensweise und begrüßt, dass Empfehlungen aus dem Validierungsbericht (TLUBN 2021) zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020g) von der BGE berücksichtigt wurden und dass die vom TLUBN in dessen Validierungsbericht empfohlene nochmalige Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen durch die BGE frühzeitig im Schritt 2 der Phase I verankert wird.

---

<sup>1</sup> Die Akronyme „DQL, DQN, IDN und KX“ stehen für die Kenngrößen „Datenqualität“, „Datenquantität“, „Interpretative Daten und weitere (indirekte) Nachweise“ sowie „Geologische Komplexität“ (vgl. dazu BGE 2022b, Blätter 232 – 239).

## 2 Wesentliche Anmerkungen des TLUBN und fachliche Einordnung

Im folgenden Kapitel werden einige Kritikpunkte der Stellungnahme des TLUBN aufgegriffen und diskutiert. Dabei besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Nachvollziehbare fachliche Hinweise werden im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens berücksichtigt, aber nicht in jedem Fall explizit kommentiert. Jedem Unterkapitel vorangestellt werden die Anmerkungen des TLUBN in blauer Schriftfarbe gekürzt wiedergegeben; Kernaussagen werden zitiert und kursiv dargestellt. Die Einordnung und Begründung durch die BGE folgt dann in schwarzer Schrift.

### 2.1 Hinweise zum Arbeitsstand der Methodenentwicklung der rvSU

#### 2.1.1 Berücksichtigung der Empfehlungen aus dem Validierungsbericht des TLUBN

Das TLUBN äußert sein generelles Unverständnis darüber, dass die BGE zur Darstellung der Verbreitung des Staßfurt- und Werra-Salinars Karten aus Seidel (2013) nutzt und nicht auf Basis der vom TLUBN gelieferten Bohrungsdaten und geophysikalischen Messdaten eigene reproduzierbare Isopachenkarten erstellt und diese bei der Ausweisung der Untersuchungsräume anwendet.

#### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN

*„Entgegen den Empfehlungen des TLUBN nutzt die BGE im GzME „Thüringer Becken“ für die erweiterte Anwendung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ ähnlich wie bereits bei der Ermittlung der Teilgebiete die Karten zur Verbreitung des Staßfurt- und Werra-Salinars aus Seidel (2013) (Beispiel 35 in BGE 2022c Blatt 266 ff.). Nach Auffassung des TLUBN sind diese Karten unter Anwendung aktueller geowissenschaftlicher Informationen nicht reproduzierbar. Bereits bei der Datenlieferung vom 30.06.2018 zur Anwendung der Mindestanforderungen sowie im mehrfachen fachlichen Austausch wurde die BGE durch das TLUBN darauf hingewiesen, dass alle gelieferten Isopachenpläne nur eingeschränkt verwendbar sind. In der „Validierung des Zwischenberichts Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung für die Gebietsanteile Thüringens“ (TLUBN 2021) wurden die inhaltlichen Probleme bei der quantitativen Auswertung speziell der Karten von Seidel (2013) ausführlich dargelegt. Es ist für das TLUBN daher nicht ersichtlich, warum die BGE nicht auf Basis der gelieferten Bohrungsdaten und geophysikalischen Messdaten „eigene“ reproduzierbare Isopachenkarten erstellt und diese bei der Ausweisung der Untersuchungsräume anwendet.“ (TLUBN 2022, S. 4 f.)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Der Untersuchungsraum 03\_00UR (Thüringer Becken) wurde für Steinsalz in stratiformer Lagerung als GzME ausgewählt. Im Rahmen der Methodenentwicklung hat die BGE getestet, wie mit unterschiedlichen Datentypen und Informationen für eine geowissenschaftliche Bearbeitung umgegangen werden kann, wobei der Detaillierungsgrad der Bearbeitung mit zunehmender Eignung eines Gebietes steigen soll. Nach dem Test verschiedener Vorgehensweisen erscheint es generell sinnvoll, dass eine erste Eingrenzung des Untersuchungsraums über Modellvorstellungen erfolgt, die in unterschiedlichen Karten und Profilschnitten dargestellt wurden. Diese Interpretationen (wie z. B. von Seidel 2013) werden mit Bohrungsdaten abgeglichen und validiert. So kann sichergestellt werden, dass die strukturgeologischen Informationen und geologischen Modellvorstellungen, die in

die Erstellung der Karten und Profilschnitte eingeflossen sind, berücksichtigt werden, keine Widersprüche zu den Bohrungsdaten vorliegen und somit ausreichend belastbar für die jeweilige Bewertungsentscheidung sind.

Der präsentierte Stand im Thüringer Becken zur Verbreitung der Werra- und Staßfurt-Steinsalze ist nicht endgültig, sondern zeigt einen Arbeitsstand mit einer ersten Eingrenzung. In diesem iterativen Vorgehen werden zunächst solche Gebiete direkt in Kategorie D eingeordnet, die eine Mindestanforderung nicht erfüllen oder für die ein Ausschlusskriterium zutrifft. Dies heißt im Umkehrschluss nicht, dass alle verbleibenden Gebiete geeignet sind. Diese verbleibenden Gebiete werden in Teiluntersuchungsräume unterteilt und detaillierter charakterisiert. Dazu zählt auch die vom TLUBN angesprochene detaillierte Bohrungsauswertung und Interpolation. Diese detaillierte Bohrungsinterpolation und Modellierung wurde inzwischen für die verbleibenden Staßfurt-Steinsalz-TUR im Thüringer Becken durchgeführt und wird aktuell auch für die Werra-Steinsalz-TUR erarbeitet.

### **2.1.2 Hinweise zum Arbeitsstand der Methodenentwicklung der rvSU: Dokumentstrukturplan**

Das TLUBN ist der Meinung, dass die BGE ihren Dokument(en)strukturplan (vom TLUBN werden zwei verschiedene Schreibweisen verwendet) einfacher und nachvollziehbar gestalten muss.

#### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN

*„Es ist jedoch vermutlich für den Großteil der interessierten Öffentlichkeit nicht nachvollziehbar, wann und in welchem Umfang Berichte durch die BGE veröffentlicht werden müssen.“*

*Das TLUBN ist der Auffassung, dass die BGE den Dokumentenstrukturplan einfacher konstruieren und deutlicher beschreiben sollte, um die Öffentlichkeit als Gestalter des Verfahrens weiterhin mit einzubeziehen.“ (TLUBN 2022, S. 5)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Der Dokumentstrukturplan soll gemäß EndSiUntV die Bezüge zwischen den Berichten zu den Sicherheitsuntersuchungen und den untersetzenden Unterlagen nachvollziehbar machen. Ein Zeitplan für die Veröffentlichungen von z. B. Arbeitsständen ist nicht Teil des Dokumentenstrukturplans.

### **2.1.3 Anmerkungen zur Klassifikation von Datentypen**

Das TLUBN kritisiert die Art und Weise der Benennung der Datentypen und ihrer geologischen Aussagefähigkeit durch die BGE (Datenkategorie 1: Direkte Nachweise; Datenkategorie 2: Indirekte Nachweise; Datenkategorie 3: Zusätzliche, interpretative Nachweise“ laut BGE 2022b, Blatt 230).

#### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN

*„Generell suggeriert der Begriff „Nachweis“ auch in den Datenkategorien 1 und 2 eine Erkenntnissicherheit, die bei geologischen Fachdaten aufgrund ihres empirischen Charakters innerhalb eines komplexen Umfelds häufig nicht gegeben ist. Aus Sicht des TLUBN wäre daher eine „weichere“ Formulierung der Bezeichnungen der Datenkategorien wissenschaftlich belastbarer, z.B. folgendermaßen:*

*Datenkategorie 1: Beobachtungen aus direkten Aufschlüssen*

*Datenkategorie 2: Beobachtungen aus indirekten Erkundungsmethoden*

*Datenkategorie 3: Interpretationen auf Grundlage der Bewertung von Daten der Kategorien 1 und 2.“ (TLUBN 2022, S. 5)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann den Hinweis nachvollziehen.

Begründung: Die BGE stimmt mit dem TLUBN überein, dass der Begriff „Nachweis“ eine Erkenntnissicherheit suggeriert, die faktisch so nicht gegeben ist. Um die fälschlicherweise suggerierte Erkenntnissicherheit abzumildern, könnte auf andere Begriffe zurückgegriffen werden, z. B. Beobachtung, Hinweis, Indiz, Beleg o. ä. Die BGE kann den Hinweis des TLUBN folglich nachvollziehen und wird die Bezeichnung der Datentypen überdenken. Mit einer Kategorisierung im Sinne des Geologiedatengesetzes (GeolDG) hat diese Zuordnung nichts zu tun. Es wird in diesem Kapitel stets von Datentypen gesprochen, also verschiedenen Arten von Daten, die entsprechend ihrer geologischen Aussage unterschiedlich in die verschiedenen Kenngrößen einfließen (vgl. Antwort zu 2.1.4).

#### **2.1.4 Kenngrößen zur Datenlage und den geologischen Rahmenbedingungen (DQL, DQN, IDN, KX)**

Das TLUBN kritisiert die Beschreibung und Kategorisierung der Kenngrößen zur Datenlage (DQL, DQN, IDN, KX) durch die BGE.

##### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN (Hervorhebung durch BGE)

*„Zur Kenngröße DQL: Die pauschale Annahme, dass es sich bei Bohrungsdaten mit hohem Detailgrad im Vergleich zu Bohrungsdaten mit geringerem Detailgrad um verlässlichere Daten handelt, ist aus Sicht des TLUBN inkorrekt. Streng genommen handelt es sich bei der Kenngröße DQL um eine Quantifizierung und nicht um eine Qualifizierung. Zudem ist es nicht ersichtlich, ob sich Teilgebiete nach der Kategorisierung noch miteinander vergleichen lassen.*

*Zur Kenngröße DQN: Auch hier werden die Kennzahlen durch die Verwendung von Relativbegriffen eher verschleiert und es ist nicht klar, ob sich die Teilräume nach der Anwendung von DQN noch miteinander vergleichen lassen.*

*Zur Kenngröße IDN: Die Kategorisierung der Daten ist verwirrend, da Profilschnitte und 3D-Modelle einer anderen Datenkategorie zugeordnet werden als Gravimetrie und Geoelektrik (lt. GeolDG als sog. Fachdaten/Bewertungsdaten bezeichnet). Des Weiteren erscheint die Quantifizierung vorhandener Daten sinnvoller als die hier vorgestellte Kategorisierung.*

**Zur Kenngröße KX:** *Die ausschließlich subjektive Bewertung anhand vorhandener Bewertungsdaten erscheint im Gegensatz zur Nutzung mathematischer bzw. statistischer Methoden auf Grundlage der Auswertung vorhandener Fachdaten wenig sinnvoll. Eine Alternative würde z. B. die Analyse der Variabilität der Petrographie in den Schichtverzeichnissen zu einer bestimmten Schicht, Anzahl tektonischer Nachweise pro Flächeneinheit, oder (bei Bewertungsdaten) die Anzahl der kartierten Störungen pro Flächeneinheit darstellen.“ (TLUBN 2022, S. 6)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nur teilweise anschließen. Das Kapitel verfolgt den Zweck, die vorhandenen Daten und deren Informationsgehalt systematisch zu benennen und den Umgang mit diesen Daten im Rahmen der Bearbeitungen der Geosynthese darzulegen.

Begründung: Das TLUBN benutzt in seiner Stellungnahme mehrfach den Begriff „Kategorisierung“ wie er auch im GeolDG verwendet wird. Um Missverständnisse zu vermeiden, soll an dieser Stelle klargestellt werden, dass die Kategorisierung von Daten im Sinne des GeolDG nicht mit der Einordnung und Verwendung der Daten für die Bestimmung der heterogenen Datenlage gleichzusetzen ist, weshalb der Begriff „Kenngröße“ verwendet wird.

Das vorgestellte Verfahren über die Bestimmung des Informationsgehaltes von Bohrungen als Input zur Kenngröße DQL dient nicht der Überprüfung und Darstellung der Güte von Informationen und ist damit keine Qualitätskontrolle in dem vom TLUBN angedeuteten Sinn. Es bildet lediglich den Gehalt an bereits digital verfügbaren Informationen über Bohrungsdaten in den vorhandenen Datenbanken ab. Es ist damit auch eine Komponente bei der Erfassung und Darstellung der heterogenen Datenlage, die es der BGE ermöglicht, dort, wo nötig, noch Daten gezielt nachzupflegen. Die DQL-Abschätzung zielt demnach darauf ab, eine Aussage darüber zu tätigen, ob die Daten eine hohe Auflösung hinsichtlich der Erfassung der Wirtsgesteine haben. Einschätzungen zur Qualität der fachlichen Aussage sollen im Kontext des zunehmenden Detaillierungsgrads bei der Bearbeitung erfolgen. In diesem Zusammenhang ist es für die BGE besonders hilfreich, wenn solche Informationen vom Datenbereiter zur Verfügung gestellt werden. Mehrere Landesbehörden führen eine initiale digitale Qualitätseinschätzung zu Schichtenverzeichnissen durch und stellen diese bei der Datenübermittlung der BGE für die Bearbeitung zur Verfügung. Diese initiale Qualitätseinschätzung durch die zuständigen Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) ist für die BGE von sehr großem Wert.

Die Kenngröße DQN schaut dagegen nicht mehr auf den Informationsgehalt jeder einzelnen Bohrung, sondern stellt nur die Dichte von relevanten Bohrungen, die den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion erreichen oder durchteufen, im Untersuchungsraum dar.

Den Vorschlag des TLUBN zur Kenngröße KX sieht die BGE kritisch. Eine statistische Auswertung der Anzahl tektonischer Nachweise pro Flächeneinheit, oder der Anzahl der kartierten Störungen pro Flächeneinheit, wie vom TLUBN vorgeschlagen, ist theoretisch denkbar. Aufgrund der Komplexität und schwierigen Vergleichbarkeit der Ergebnisse (z. B. welche Elemente werden berücksichtigt, welcher Maßstab der Betrachtung, unterschiedliche Datengrundlagen in den Bundesländern etc.) ist dieses Vorgehen aber zeitlich und fachlich wenig zielführend. Bei einer Analyse der Varia-

bilität der Petrographie in den Schichtenverzeichnissen zu einer bestimmten Schicht würde automatisch wieder der Informationsgehalt (also die Quantität und Qualität) in KX mit einfließen. KX ist bewusst gewählt eine Kenngröße, die ein „Expert Judgement“, also eine fachliche Beurteilung, vorsieht und damit über eine Synthese aller zur Verfügung stehender Informationen einen fachlichen Blick auf die geologische Situation zulässt.

### 2.1.5 Tektonische Überprägung der geologischen Einheit

Das TLUBN hält die „verbalargumentative“ Gesamtbewertung des Tektonischen Großraums sowie die Beurteilung der „Diffusen Tektonik“ durch die BGE für phasenweise nicht nachvollziehbar bzw. weitgehend unklar.

#### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN (Hervorhebung durch BGE)

*„Die „verbalargumentative“ Gesamtbewertung des Tektonischen Großraums auf Basis von Deformationsphasen, Intensität und Deformationsart erscheint nur teilweise nachvollziehbar. Zum Beispiel spielt die Anzahl von Deformationsphasen kaum eine Rolle, wenn die letzte Phase eine hochgradig-regionalmetamorphe Überprägung beinhaltet. Sinnvoller wäre es, bei der Betrachtung von deformierten Gesteinen darauf zu achten, ob ein Kohäsionsverlust (Kataklasit) oder nicht (Mylonit) stattgefunden hat. Zudem ist nicht klar, wie genau die Intensität der Deformation festgestellt werden soll, da Relativbegriffe verwendet werden („intensive Blattverschiebung“, „große Zerrüttungszone“, „...Großteil des Gesteinskörpers“, ...).*

*Auch die Beurteilung der „Diffusen Tektonik“ bleibt durch die Verwendung zahlreicher Relativbegriffe wie „weit verbreitetes Netz an Störungen“ oder „engständige Zerböckung“ weitgehend unklar, da eine detailliertere Beschreibung mit Werten sowohl im Text als auch in den Beispielen fehlt, und sich letztere ausschließlich mit der Ausweisung tektonischer Großräume befassen.“ (TLUBN 2022, S. 7)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Die Ausweisung und Bewertung tektonischer Großräume wird verbalargumentativ durch eine Analogiebetrachtung anhand der Deformationsgeschichte eines Untersuchungsraums vorgenommen. Wie im Methodendokument (BGE 2022b) beschrieben, wird keine pauschale Bewertung durch die Anzahl der Deformationsphasen vorgenommen. Die Abbildung 130 sowie Tabelle 20 (BGE 2022b) verdeutlichen noch einmal, dass eine hohe Anzahl an Deformationsphasen nicht zwangsläufig zu einer schlechteren Bewertung führt.

Die Begriffe „intensive“ und „schwache Deformation“ sind fachlich verbalargumentativ ableitbar aus der Art und Skalierung der Deformation im jeweiligen Großraum. Intensive Deformation wird z. B. durch Blattverschiebungen erzeugt, die eine intensive Zerrüttung des Gesteinskörpers verursachen (Kim et al. 2004). Auf- und Abschiebungen mit Versatzbeträgen im 100er-Meter-Bereich sowie Faltenbildung sind ebenfalls als intensive Deformation einzustufen. Deformationen sind als schwach zu bewerten, wenn Auf- und Abschiebungen mit geringen Versatzbeträgen in reduzierter Anzahl sowie Flexuren auftreten. Da die Störungslängen mit dem Versatz entlang von Störungen korrelieren, kann bei fehlenden Versatzbeträgen eine Abschätzung getroffen werden. Dieser Ansatz wird im Schritt 2 der Phase I an den vorhandenen Daten angewendet und ist eine weiterentwickelte Methode. Die

Verwendung von Relativbegriffen ist daher sinnvoll, da eine gebietsspezifische Bewertung vorgenommen werden muss.

### **2.1.6 Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen**

Das TLUBN ist der Auffassung, dass die von der BGE verwendete Datengrundlage für die Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen nicht geeignet ist. Konkret wird kritisiert, dass häufig lediglich Kurzsichtenverzeichnisse mit stark gestrafften petrographischen Beschreibungen verwendet wurden und ein Teil der geophysikalischen Bohrlochmessungen derzeit nur analog im Bohrarchiv des TLUBN vorliegt und seitens der BGE keine Berücksichtigung in der Methodik zu den rvSU gefunden hat.

#### Kernaussagen der Anmerkung des TLUBN

*„Die BGE stützt sich dabei auf die durch das TLUBN gelieferten digitalen Schichtenverzeichnisse für Bohrungen tiefer als 300 m. Diese Schichtenverzeichnisse wurden durch das TLUBN je nach Erfordernissen in unterschiedlichen Detailtiefen erfasst. Häufig wurden ausschließlich Kurzsichtenverzeichnisse mit stark gestrafften petrographischen Beschreibungen in die Bohrdatenbank des TLUBN aufgenommen. Aus diesen inhaltlich reduzierten Kurzsichtenverzeichnissen lässt sich naturgemäß nur eine geringe Variationsbreite der petrographischen Eigenschaften ableiten. Für einige Bohrungen wurden durch das TLUBN ausführliche Schichtenverzeichnisse digital erfasst. Diese Schichtenverzeichnisse könnten sich durchaus für eine quantitative Auswertung der petrographischen Beschreibungen wie von der BGE vorgeschlagen eignen. Allerdings wären die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Detailtiefe der Datenerfassung nicht mit den Ergebnissen der Bearbeitung der Kurzsichtenverzeichnisse vergleichbar. Weiterhin stützt sich die BGE zur Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften auf digitalisierte bohrlochgeophysikalische Daten, die durch das TLUBN zur Verfügung gestellt wurden. Hierzu ist anzumerken, dass bisher nur ein geringer Teil der im TLUBN vorhandenen geophysikalischen Bohrlochmessungen digitalisiert wurde. Für einen großen Teil der im Rahmen der Endlagersuche ggf. relevanten Bohrungen liegen die Bohrlochmessungen bisher nur analog im Bohrarchiv des TLUBN vor. Diese Daten finden derzeit keine Berücksichtigung in der Methodik zu den rvSU.“ (TLUBN 2022, S. 8)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann die Hinweise fachlich nachvollziehen und wird für relevante Bereiche eine Verdichtung der digitalen bohrlochgeophysikalischen Daten anstreben.

Begründung: Die BGE ist sich bewusst, dass unterschiedliche Detailtiefen bei den zugrunde gelegten Informationsquellen zur Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) vorliegen. Dies betrifft zum einen, wie vom TLUBN erwähnt, die vorliegenden Schichtenverzeichnisse, deren Informationsgehalt abhängig vom Erkundungszweck der Bohrung ist, zum anderen aber auch die größere Verlässlichkeit der Interpretationen aus bohrlochgeophysikalischen Messungen im Vergleich zu Schichtenverzeichnissen. Dem begegnet die BGE, indem die detaillierteste vorliegende Informationsquelle zu einer Bohrung für die Bewertung des Indikators 3.1a verwendet wird. Liegen an einer Lokation so-

wohl Schichtenverzeichnis als auch bohrlochgeophysikalische Messungen vor, werden, wie im Methodenbericht (BGE 2022b) erläutert, bevorzugt die Bohrlochmessungen für eine Bewertung des Indikators 3.1a herangezogen. Liegen in einem Bereich lediglich Schichtenverzeichnisse vor, wird jeweils die Interpretationsversion des Schichtenverzeichnisses mit der höchsten Auflösung verwendet. Bohrungen, die lediglich ein Kurzschichtenverzeichnis haben, fließen in die Bewertung dort ein, wo keine detaillierteren Informationen vorliegen. Aus diesen unterschiedlichen Quellen wird – unter Berücksichtigung des Informationsgehaltes der jeweiligen Daten – eine geologisch schlüssige Interpretation abgeleitet. Diese wird dann in einem für einen bestimmten Bereich repräsentativen Profil zusammengefasst. Eine große Herausforderung ist es, diese unterschiedlichen Informationsgehalte in die Fläche zu bringen, was eine Interpolation und Interpretation unerlässlich macht.

Darüber hinaus wird im Rahmen des Umgangs mit der heterogenen Datenlage für die Kennzahl DQL die Detailtiefe der digital vorliegenden Schichtdaten bewertet (nicht die initiale Qualität!). Darüber werden Bohrungen, für die nur Kurzschichtenverzeichnisse vorliegen, automatisch erfasst. Der Informationsgehalt kann dementsprechend bei der Bewertung zum Indikator 3.1a berücksichtigt werden.

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass eine detaillierte Darstellung von Arbeitsständen der einzelnen GzME ausdrücklich nicht das Ziel dieses Methodenvorschlags war. Trotzdem bedankt sich die BGE für den Hinweis, dass sich weitere analoge Daten zu den bohrlochgeophysikalischen Messungen im Archiv des TLUBN befinden, und wird diesbezüglich zur gegebenen Zeit auf das TLUBN im Rahmen einer Datenabfrage zugehen.

### 2.1.7 FEM-Simulation der Wärmeleitung und Auslegung des Endlagerbergwerkes (Kapitel 4)

Das TLUBN kritisiert Aspekte der Simulation der Wärmeleitung und Auslegung des Endlagerbergwerkes mittels „Finite Elemente Methode“ wie folgt:

#### Kernaussagen der Anmerkungen des TLUBN

„- **Blatt 105:** *Abbildung 13: Eine Beschriftung der (Linien-)Farbcodes der Barrieren erhöht die Verständlichkeit.*“ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Die Linienfarbcodes haben keine spezifische Bedeutung, sondern dienen der einfacheren Unterscheidbarkeit. In dem gestaffelten Barrierensystem schützen die äußeren Barrieren die inneren Barrieren. So ist die Sicherheitsfunktion zum Erhalt der Barrierewirkung des Deckgebirges für den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierfunktion, die Verschlussbauwerke, den Versatz und den Endlagerbehälter in Dunkelblau dargestellt. Die Schutzfunktion des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierfunktion ist fliederfarben markiert, die der Verschlussbauwerke in Orange dargestellt und die des Versatzes in Grün. Zusätzlich ist die Sicherheitsfunktion zum Erhalt der Barrierewirkung des Endlagerbehälters für die Abfallform als hellblaue Linie gehalten.

„- **Blatt 126-129:** *Nachvollziehbarerweise ist die Planung der Endlagerstruktur in einer sehr frühen Phase. Erstaunlich ist, dass scheinbar kein Bezug zu den bereits mithilfe von Gorleben über Jahrzehnte gewonnenen Erkenntnissen hergestellt wird.*“ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Der Hinweis betrifft den Detaillierungsgrad der Erläuterungen im Text.

Begründung: Auf den vom TLUBN benannten Blättern ist die allgemeine Beschreibung der Methodik zum Aufbau des Endlagerbergwerkes unabhängig von der Art des Wirtsgesteins enthalten. Dort sind allgemeine Erkenntnisse (auch aus der Erkundung des Salzstocks Gorleben) eingeflossen, die aber nicht explizit hervorgehoben wurden. In den weiter unten aufgeführten Beispielen zu „Steinsalz in steiler Lagerung“ wurden die Erkenntnisse aus der Erkundung des Salzstocks Gorleben dagegen aufgeführt (z. B. beim Behälterkonzept, bei der Transport- und Einlagerungstechnik oder im Einlagerungsbereich der radioaktiven Abfälle).

„- **Blatt 136:** *„Eine Kontaminationsverschleppung über die Wetter aus dem Kontrollbereich heraus ist damit bei planmäßiger Wetterführung ausgeschlossen.“ Über eine nicht planmäßige Wetterführung und insbesondere geplante Sicherheitsmaßnahmen am Frischwetterschacht sind Angaben wünschenswert.*“ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Der Hinweis betrifft den Detaillierungsgrad der Endlagerauslegung.

Begründung: Für den jetzigen Verfahrensschritt, die Durchführung der rvSU, sind solche detaillierten Angaben noch nicht erforderlich. Eine Endlagerauslegung (gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV) ist ausreichend. Im Hinblick auf die Bewertung der Betriebssicherheit ist lediglich „die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebs darzustellen, jedoch keine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse durchzuführen“ (§ 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV). Die vom TLUBN angesprochenen Angaben sind erst ab Phase II des Standortauswahlverfahrens erforderlich, bei dem eine betriebliche Sicherheitsanalyse nach § 8 EndlSiUntV durchzuführen ist.

„- **Blatt 143:** ‚Vom Hauptwetterstrom im Querschlag aus werden die Einlagerungsstrecken über Wetterlütten und Lüfter sonderbewettert. Für die Auffahrungsbereiche ist dies absehbar ebenfalls erforderlich.‘ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Der Hinweis betrifft den Detaillierungsgrad der Erläuterungen im Text.

Begründung: Der Aussage stimmt die BGE zu. Sie ist in der Angabe, dass die Einlagerungsstrecken sonderbewettert werden müssen, gedanklich enthalten. Die Einlagerungsstrecken müssen auch bei der Auffahrung sonderbewettert werden, da bei der Auffahrung von Strecken naturgemäß keine durchgängige Bewetterung möglich ist. Um Missverständnisse zu vermeiden, wird die BGE dies in Zukunft entsprechend hervorheben bzw. benennen.

„- **Blatt 205 und Blatt 210:** *Streckenabstand zwischen 16,7 m und 55,3 m für Opalinuston und 15,3 m Teufen-unabhängig für Steinsalz. Welche Zellenbreite wurde mit FEM simuliert? Betrachtet man Abb. 45 und Abb. 46 erscheint es so, als ob nur ca. 24 m Breite simuliert wurden. Wenn ja, warum? 15,3 m kann man nach Blatt 205 aufgrund der erforderlichen mechanischen Stabilität nicht gehen. Interessant ist doch gerade erst, welche Temperatur an der Behälteroberfläche noch entsteht, wenn die Strecken weiter auseinanderliegen. Wurde die Zellenbreite variiert? Derartige Informationen wären im Text wünschenswert.*“ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Die Hinweise betreffen den Detaillierungsgrad der Erläuterungen im Text. Bei zukünftigen Darstellungen wird die BGE die Details gern tiefergehend erläutern.

Begründung: In vorgeschalteten Testläufen (in denen die Zellenbreite variiert wurde) hat sich gezeigt, dass in der Regel ein minimaler, abfallspezifischer Flächenbedarf erzielt werden kann, wenn die geometrischen Abmessungen (Strecken- und Behälterabstand) möglichst klein gewählt werden. Daher wurde die Wahl getroffen, jeweils den bergbaulichen Mindestabstand für die Endlagerauslegung heranzuziehen und damit auch als Zellenbreite für die FEM-Simulationen zu verwenden. Die Angaben in der Tabelle 26 beziehen sich ausschließlich auf den Opalinuston, daher stellt dies keinen Widerspruch zu den 15,3 m Mindestabstand im Steinsalz dar. Die Annahmen hierzu werden in BGE (2022b) im Kapitel 4.2.7. „Gebirgsmechanische Auslegung“ beschrieben. Die Zellenbreite beträgt aus Symmetriegründen die Hälfte des Streckenabstandes, d. h.  $0,5 * 30,3$  m (bei 600 m Teufe im Opalinuston) in der Abbildung 45 (siehe BGE 2022b, Blatt 210) und  $0,5 * 15,3$  m (bei 600 m Teufe

im Steinsalz) in der Abbildung 46 (siehe BGE 2022b, Blatt 210). Im jeweils linken Teil der Abbildungen ist der Unterschied in der Zellenbreite auch deutlich erkennbar.

„- **Blatt 217-219:** *Wie die Ergebnisse in den Abbildungen 54 und 56 aus den Daten von Abb. 53 und 55 mithilfe der FEM-Simulationen gewonnen wurden, ist anhand der textlichen Darstellung nicht nachvollziehbar (der thermische Gradient ist in K/m anzugeben).*“ (TLUBN 2022, S. 8)

Fachliche Einordnung: Die Hinweise betreffen den Detaillierungsgrad der Erläuterungen im Text. Bei zukünftigen Darstellungen wird die BGE die Details gern tiefergehend erläutern.

Begründung: Die Abbildungen 54 (siehe BGE 2022b, Blatt 218) und 56 (siehe BGE 2022b, Blatt 219) sind nur eine andere Darstellung der Ergebnisse aus den Abbildungen 53 (siehe BGE 2022b, Blatt 217) und 55 (siehe BGE 2022b, Blatt 219). Hierzu wurde die initiale Temperatur im Einlagerungsbereich wie folgt berechnet. Für die Annahme eines linearen Temperaturanstiegs über die Teufe gilt die nachfolgende Gleichung. Die Geländeoberkante ist aus Gründen der Übersichtlichkeit als GOK abgekürzt:

$$[\text{initiale Temperatur im Einlagerungsbereich}] = [\text{initiale Temperatur GOK}] + [\text{Teufe des Endlagers}] \cdot [\text{geothermischer Gradient}]$$

Für die Angabe der Einheit des Gradienten wurde „°C/m“ gewählt, da auch die Temperaturen in der Abbildung in Grad Celsius angegeben sind und diese Temperaturangabe dem größten Teil der Bevölkerung geläufiger ist als die Angaben in Kelvin bzw. Kelvin pro Meter. Der Zahlenwert einer Temperaturdifferenz ist in den beiden Einheiten Kelvin und Grad Celsius identisch.

### 2.1.8 Numerische Modellierung des Austrages der Nuklide (Kapitel 8.5 und Anlage 3)

Das TLUBN kritisiert Aspekte der numerischen Modellierung des Austrages der Nuklide wie folgt:

#### Kernaussagen der Anmerkungen des TLUBN (Hervorhebung durch BGE)

„- **Blatt 523:** *Dem Text nach wurden die Parameter Sorption- und Diffusionskoeffizient modifiziert. Da der Absolutwert der erreichten Transportlänge nicht angegeben ist, sind die angegebenen Absolutwerte der Veränderung nur schwer einzuordnen. Die Koeffizienten wurden generisch um 1 % modifiziert. Welche Modifikation rufen jedoch z.B. Temperaturveränderungen oder Variation des hydrostatischen Drucks bei diesen Koeffizienten im zu betrachtenden Teufenbereich hervor? Werden diese Veränderungen auch in der numerischen Lösung berücksichtigt? Wird die Variation der Porosität und der Tortuosität ebenfalls bei der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden?*“ (TLUBN 2022, S. 9)

Fachliche Einschätzung: Die BGE beantwortet die Fragen wie folgt.

Begründung: In der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rVSU werden in BGE (2022b) auf den Blättern 522 ff. exemplarische Sensitivitätsuntersuchungen der nuklidspezifischen Parameter beschrieben. Für die Methodenentwicklung wurde auf vorläufige Parameterwerte aus unterschiedlichen Literaturquellen zurückgegriffen. Damit der Fokus auf die methodischen Aspekte und nicht auf

die vorläufig berechneten Transportlängen gerichtet ist, wurden bewusst nur die prozentualen Veränderungen der berechneten Transportlängen dargestellt. Die Berücksichtigung von Variationen der Temperaturen und des hydrostatischen Druckes über den Simulationszeitraum sind in der aktuellen Phase des Verfahrens nicht vorgesehen. Gesteinsspezifische Eigenschaften, wie beispielsweise Porositäten, unterliegen ebenfalls naturgemäß Variationen, die im Rahmen von Ungewissheitsuntersuchungen in die Analysen mit einfließen können. Siehe hierzu auch die Antwort zu Blatt 528.

*„- **Blatt 525 und 526:** Der Beschreibung nach handelt es sich nicht um Monte-Carlo-Simulationen, sondern um Monte-Carlo-Sampling.“ (TLUBN 2022, S. 9)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Es werden Parameterkombinationen mit Hilfe eines Zufallsgenerators erzeugt (Monte-Carlo-Sampling). Für jedes der erzeugten Parametersets wird anschließend auf Grundlage des Radionuklidtransportmodells eine Transportlänge (deterministisch) berechnet. Die Kombination aus dem zufallsbasierten Ziehen der Parameter und der anschließenden Simulation kann als Monte-Carlo-Simulation bezeichnet werden.

*„- **Blatt 528:** Es ist nicht ersichtlich, inwieweit chemisch-physikalische Überlegungen in die Wechselwirkung und Abhängigkeiten der Parameter untereinander einbezogen sind: So lässt eine hohe Porosität auf eine hohe Sorption schließen, da mehr Oberfläche zur Verfügung steht. Die Durchlässigkeit für ein Nuklid könnte von der Sorption eines anderen Radionuklids im Porenraum beeinflusst werden (z.B. bei Durchsättigung mit einem einzelnen Radionuklid). Da aufgrund der für jedes Nuklid unterschiedlichen Diffusionsgeschwindigkeit natürlicherweise eine Trennung von Elementen (ähnlich der zu chromatographischen Trennverfahren) einsetzt, ist bei der sich über lange Zeiträume ausbildenden, vom Ursprungsort ausgehenden Nuklidabfolge eine Abschätzung sinnvoll, ob aus chemischer Sicht die Verdrängung einzelner, bereits eingelagerter Radionuklide durch die nachfolgend diffundierenden Radionuklide besonders beeinträchtigt werden kann (bspw. aufgrund anderer Oxidationsstufen). Ebenfalls ist durch eine mögliche bevorzugte Retention eines bestimmten Radionuklides im Porenraum eines Gesteins die Möglichkeit einer Redox-Reaktion mit nachfolgend diffundierenden Metallkationen gegeben. Diese Redox-Reaktion könnte theoretisch auch aufgrund einer Grenzphase zwischen zwei Gesteinen durch eingeschränkte Diffusion oder Variation des pH-Wertes erfolgen, hierbei ist auch eine Beeinflussung des Redox-Potentials durch die Oberflächenadsorption selbst im Vergleich zur wässrigen Lösung denkbar.*

*Da nur punktuell Daten vorliegen, muss aktuell eine konservative Abschätzung der Parameter erfolgen, welcher einer realitätsnahen Ausbreitungsrechnung entgegensteht. Aufgrund der geringen Datendichte könnte besonders bei Modellberechnungen außerhalb von Tonmineralen in der ersten Phase ein standardisierter Datensatz für jedes Mineral festgelegt werden, um eine Gleichbehandlung der Teiluntersuchungsräume zu gewährleisten.“ (TLUBN 2022, S. 9)*

Fachliche Einordnung: Die BGE bedankt sich für die Anmerkungen und begründet die Vorgehensweise wie folgt.

Begründung: Die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Radionukliden und der Transportchemie innerhalb der 1D-Radionuklidtransportmodellierung ist aufgrund der in dieser Hinsicht sehr limitierten Datenlage in der aktuellen Phase des Verfahrens nicht zielführend – dies wurde vom TLUBN im letzten Absatz der vorherigen Anmerkung anscheinend ähnlich gesehen. Innerhalb der Modelle sind die Parameter aller berücksichtigten Prozesse selbst-konsistent berechnet worden. Das bedeutet, dass die Zwischenabhängigkeiten der Parameter im Modell abgebildet sind (z. B.: geringe Porosität führt zu hoher Tortuosität, was zu kleinen Diffusionskoeffizienten führt). Mögliche Wechselwirkungen, die nicht explizit im Modell abgebildet werden, werden durch die entsprechende Variation von Parametern (also etwa durch die Annahme von entsprechend reduzierten Sorptionskoeffizienten o. ä.) in ihren Auswirkungen abgeschätzt.

„- **Blatt 531:** der thermische Gradient ist in K/m anzugeben.“ (TLUBN 2022, S. 9)

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Zwar ist die Anmerkung inhaltlich richtig, aber die Vorgehensweise der BGE ist auch gängig. Solange die Einheit angegeben ist, darf auch von SI-Basiseinheiten abgewichen werden und abgeleitete Einheiten (wie Grad Celsius) verwendet werden. Erst bei Folgeberechnungen ist ggf. auf SI-Basiseinheiten umzurechnen (jedoch unterscheidet sich der Zahlenwert bei einem Temperaturgradienten nicht, wenn zwischen Kelvin und Grad Celsius umgerechnet wird).

„- **Blatt 531:** Bei steilstehenden Salzstrukturen sollte nach einer ersten numerischen 1-D Analyse mindestens eine zweite numerische Simulation im zweidimensionalen Raum erfolgen. Der Grund dafür ist, dass die Annahme des 1-D Modells, also ein unendlich ausgedehntes Endlager in einer Transportrichtung parallel zur Sohle des Endlagers, nicht gegeben ist. Die geringe Höhenausdehnung des Endlagers von ca. 10 m muss dann berücksichtigt werden. Andernfalls werden möglicherweise Untersuchungsräume mit steil stehenden Salzstrukturen aufgrund von zu konservativen (unrealistischen) Annahmen unnötig ausgeschlossen. (siehe dazu: „Im Standortauswahlverfahren ist es zu vermeiden, dass Untersuchungsräume aus nicht gerechtfertigten Gründen aus dem Verfahren ausscheiden. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn nur aufgrund konservativer Annahmen zusätzliche Expositionen abgeschätzt werden, welche zu einer Überschreitung der in § 7 Absatz 2 EndlSiAnfV festgelegten Grenzwerte führen. Um dies zu vermeiden gilt für die Dosisabschätzung die Vorgabe nach § 9 Absatz 2 EndlSiUntV, dass für die Analyse des Verhaltens des Endlagersystems im Bewertungszeitraum „[...] hinreichend qualifizierte numerische Modellierungen auf Grundlage realitätsnaher Annahmen durchzuführen [...]“ sind.““ (TLUBN 2022, S. 9)

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: In den 1D-Modellrechnungen ist die Berücksichtigung der Höhenausdehnung des Endlagers tatsächlich vorgesehen. Aufgrund des vergleichenden Charakters der rvSU ist es weiterhin

vorgesehen, bei allen Salzstöcken gleiche Kriterien anzuwenden. Gleichmaßen wird berücksichtigt, dass die betrachtete Transportrichtung bei einer potentiellen 1D-Modellierung nicht unbedingt vertikal ist. Ein ungerechtfertigter Ausschluss im Falle der steilstehenden Salzstrukturen ist hier nicht zu erwarten. Die vom TLUBN referenzierten Vorgaben nach § 9 EndlSiUntV sind nicht Gegenstand der rvSU.

*„- **Blatt 536:** Ausgehend von einem 1-dimensionalen Modell wurde unter der Annahme konstanter Faktoren für Retardation und Porosität die Ausbreitung von 47 ausgewählten Radionukliden über eine Million Jahre simuliert. Hierbei zeigten sich bei der Verwendung gleicher Parameter gute Übereinstimmungen zu Simulationen durch Navarro et al. (2019). Entscheidende Faktoren der zugrundeliegenden Modellierung nach Gleichung (8) sind die Porosität, die sowohl direkt, als auch indirekt durch den Retardationsfaktor eingeht, und der Diffusionskoeffizient. Die 1-dimensionale Betrachtung der Ausbreitung ist für den Fall eines homogenen Schichtsystems und einer uniform vom Ausgangspunkt verlaufenden Gesteinsabfolge gut für eine erste Abschätzung geeignet. Die Zusammensetzung der Gesteine innerhalb einer Lagerstätte ist jedoch oft lokalen Schwankungen unterworfen, was sowohl das Verhältnis der vorhandenen Minerale, als auch deren Ausbreitung angeht. Dies zieht deutliche Schwankungsbreiten bei Porosität und Diffusion nach sich. Ist die Lagerstätte nicht homogen in Schichten ausgeprägt, sondern durch Störungen oder steile Lagerung beeinflusst, ist eine einfache 1-dimensionale Betrachtung nicht mehr aussagekräftig. Hier könnte entweder eine Abfolge von 1-dimensionalen Modellierungen in unterschiedlichen Ausbreitungsvektoren zur Oberfläche hin oder eine 2-dimensionale Modellierung unter Berücksichtigung heterogen ausgeprägter Schichtfolgen (evtl. mit Störpunkten oder -zonen) in einem Querschnitt vom Endlagerort zur Oberfläche Abhilfe schaffen. Generell sollte im Modell das Ausbreitungsverhalten in Grenzgebieten zwischen verschiedenen Gesteinen berücksichtigt werden, da Transportprozesse zwischen Gesteinsarten neben physikalischen Faktoren (wie Porengröße und Sorption), auch chemischen (wie pH-Wert-Gradienten und unterschiedlichem Ionenaustauschverhalten) unterliegen, die die Weitergabe von Radionukliden zwischen den Gesteinen beeinflussen können. Inwieweit dies im aktuellen Modell erfolgt, ist auf Grundlage von Beispiel 95 nicht ersichtlich. Zusätzlich spielen Druck und Temperatur sowohl bei physikalischen Transportprozessen, als auch bei chemischen Wechselwirkungen zwischen Gestein und Radionuklid eine entscheidende Rolle, und können erst nach Festlegung der Teufe des Endlagers berücksichtigt werden.“ (TLUBN 2022, S. 10)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann die Kritik nachvollziehen und bezieht wie folgt Stellung.

Begründung: In der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens ist eine flächendifferenzierte Parametrisierung der genannten chemisch-physikalischen Prozesse nicht zielführend möglich. Eine Einbeziehung dieser Prozesse in die derzeit eingesetzten Modelle ist daher nicht vorgesehen (aber anvisiert für zukünftige Verfahrensphasen). Die von Ihnen angesprochenen Punkte spiegeln daher sehr gut wider, auf welche Aspekte für die Ermittlung des Erkundungsbedarfs geachtet werden muss.

„- **Blatt 547:** Wenn die Permeabilitäten sehr gering sind, sollte auch beim Steinsalz, vor allem in Bezug auf eine mögliche Ausbreitung bis an die Grenze einer steilen Sole, der Vollständigkeit halber eine Untersuchung zur Ausbreitung durchgeführt werden. Die angeführten Messwerte zur Porosität von 0,02% bis hin zu 1,2% spannen einen Bereich des 60-fachen des unteren Wertes auf. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass auch hier gebietsabhängig die Porosität im Detail betrachtet werden sollte.“ (TLUBN 2022, S. 10)

Fachliche Einordnung: Die BGE kann die Kritik nachvollziehen und bezieht wie folgt Stellung.

Begründung: Es wird zurzeit geprüft, ob und in welcher Form im Steinsalz Transportberechnungen erstellt werden können. Die Datenverfügbarkeit zu Permeabilität und Porosität sind standortspezifisch jedoch sehr begrenzt. Wie das TLUBN in seiner Anmerkung richtig beschrieben hat, sind die Bandbreiten der zur Verfügung stehenden Porositätsmesswerte sehr hoch. Aus diesem Grund werden in der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens multiple Rechenläufe unter Variation der Parameter angestrebt. Sollten gebietsspezifische Messwerte oder Analogieschlüsse aus gebietsspezifischen Informationen vorliegen, fließen diese in die Festlegung der Bandbreiten für die Parameter mit ein.

„- **Blatt 555:** Als Beitrag zur Transportchemie ist der pH-Wert des Grundwassers vermutlich nur in geringem Maße relevant, da eine sehr viel größere Beeinflussung des pH-Wertes durch gelöste, transportierte Nuklide stattfinden könnte, welche mit und ohne Mitwirkung des Gesteins zustande kommen kann.“ (TLUBN 2022, S. 10)

Fachliche Einordnung: Die BGE kann die Anmerkung nachvollziehen und bezieht wie folgt Stellung.

Begründung: Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers spielt bei Transportprozessen der Radionuklide generell eine wichtige Rolle. Es ist davon auszugehen, dass in einem neutralen bis schwach alkalischen Bereich Kationen im Tongestein aufgrund der Ladungsverhältnisse gebunden werden können und Anionen eher nicht. Aus diesem Grund wird, genau wie das TLUBN in seinem Kommentar formuliert hat, von initial günstigen pH-Werten ausgegangen. Neben dem pH-Wert spielen auch andere Faktoren und die Tonminerale selber eine Rolle (z. B. Anzahl der Schichten; eingelagerte Kationen etc.). Die durch die Radionuklide in Zusammenarbeit mit den Tonmineralen hervorgerufenen Veränderungen des pH-Werts können in der aktuellen Phase des Verfahrens nicht quantifiziert werden, weil die hydrochemischen Wechselwirkungen sehr komplex sind. Im Rahmen der rvSU ist eine wechselseitige Modellierung von chemischen Prozessen in einem hohen Detailgrad aufgrund der in dieser Hinsicht sehr limitierten Datenlage nicht vorgesehen.

„- **Blatt 660:** Es wird ein pH-Wert von neutral bzw. schwach alkalisch angenommen sowie anoxisch-reduzierende Verhältnisse. Da Wechselwirkungen von transportierten Radio-nukliden i. V. m. Gestein, Wasser, Druck, Temperatur durch Redoxreaktionen vorstellbar sind, sollte auch überprüft werden, ob negative Auswirkungen durch schwach saure Bedingungen vor Ort zu erwarten sind.“ (TLUBN 2022, S. 10)

Fachliche Einordnung: Dies wird als „Anmerkung“ interpretiert.

Begründung: Nach Auffassung der BGE wirkt sich insbesondere der pH-Wert des Porenwassers auf das Sorptionsverhalten von Tongesteinen aus. Dies hängt u. a. mit der Kationenaustauschkapazität zusammen, die sich in Abhängigkeit des pH-Wertes verändert (z. B. zunehmende Protonierung der Tonoberfläche). In der aktuellen Phase des Verfahrens wird für die Modellierung, solange keine Messwerte vorliegen, von den beschriebenen Bedingungen ausgegangen. In Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG werden Kriterien zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse aufgezählt. Unter anderem werden dort neutrale bis leicht alkalische Bedingungen im Bereich des Tiefenwassers als Orientierungswerte genannt. Die getroffenen Annahmen bewirken Ungewissheiten in den berechneten Transportlängen der Radionuklide, die durch multiple Simulationen mit variierenden Parametern aufgefangen werden.

*„- **Blatt 671:** Die Literaturquelle der Gleichung (8) ist nicht nachvollziehbar, insbesondere ist unklar, wieso  $\varphi$  und  $R_i$  vor der Zeitableitung stehen. Aus den Gleichungen (8) und (11) geht nicht hervor, welche Eingangsparameter räumlich konstant und welche von  $x$  abhängig sind. Die Darstellung von Transportprozessen erfolgt in der Regel mithilfe von Bilanzgleichungen. Numerische Umsetzungen solcher Gleichungen, ohne Berücksichtigung der räumlichen Abhängigkeit von Parametern können zu zusätzlichen Quellen und Senken (zusätzlich zum Term  $W$ ) in den räumlichen Übergangsbereichen dieser Parameter führen (siehe Abbildung 201 und z.B. auch Diersch & Kolditz (2002), Seite 938, zweiter Absatz). Den einsehbaren Literaturzitat auf den Blättern 670 und 671 ist nicht zu entnehmen, dass auf bestehende Ansätze mit numerischen Simulationen für Bereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften und deren Übergangsbereiche aufgebaut wird.“ (TLUBN 2022, S. 10 – 11)*

Fachliche Einordnung: Die BGE kann sich der geäußerten Kritik in dieser Form nicht anschließen.

Begründung: Bei der genannten Gleichung handelt es sich um eine Standardgleichung für die Beschreibung von Transportprozessen (z. B. Gleichung 3.21 in Ingebritsen et al. 2006). Beide Größen,  $\varphi$  und  $R_i$ , stehen vor der Zeitableitung, weil sie nicht zeitabhängig sind. Alle Materialparameter (Sorptionkoeffizienten, Diffusionskoeffizienten,  $k_r$ -Wert, Mächtigkeiten, Porositäten) sind zeitunabhängig, aber räumlich differenziert. Bei der Diskretisierung der Differentialgleichung wurde das berücksichtigt.

*„- **Blatt 671:** Insbesondere die Ausgangssituation der numerischen Simulation ist als kritisch zu betrachten, da nur auf dem „Startfeld“ eine Konzentration  $> 0$  vorhanden ist. Damit liegen hohe Werte für  $\partial c/\partial x$  vor. Näherungen für kleine Werte, wie üblich bei der numerischen Umsetzung können nur begrenzt angewendet werden, bzw. man nimmt numerische Fehler in Kauf. In dem Zusammenhang ist die Diskretisierung des Raumes ( $x$ ) und der Zeit ( $t$ ) von Bedeutung, wird eine dynamische Zeitschritt- ( $t$ ) Skalierung genutzt, um die Konzentrationsveränderung  $c/x$  zu begrenzen? Welche Diskretisierung wird verwendet? Dazu sind keine Angaben in den Unterlagen zu finden. Die geplante Veröffentlichung in einem Journal mit Peer-Review-Verfahren ist zu begrüßen.“ (TLUBN 2022, S. 11)*

Fachliche Einschätzung: Die BGE begründet ihre Vorgehensweise im Folgenden.

Begründung: Es wird eine räumliche Diskretisierung zweiter Ordnung und ein monoton bis zu einem Maximalwert ansteigender Zeitschritt verwendet (Standard-3-point-stencil). Ein Vergleich eines Zeitschrittverfahrens 8ter Ordnung mit einem adaptivem Zeitschrittverfahren lieferte keinen relevanten Unterschied in der numerischen Lösung. Die Annahme einer instantanen Freisetzung der Radionuklide zum Zeitpunkt Null ist stark vereinfachend, aber auch sehr konservativ. Es wird zurzeit an Erweiterungen eines Freisetzungsmodells gearbeitet.

*„- **Blatt 689:** Die Formulierung „elektrische Ladung von Tonteilchen“ lässt einen großen Diskussionspielraum zu. Aufgrund des Aufbaus von Tonmineralen (sic!) können Kationen zwischen den anionischen Schichten (Phyllosilikate), Ketten (Inosilikate) oder Inseln (Nesosilikate) einfach durch Diffusionsprozesse ausgetauscht werden. Durch die komplex aufgebauten Silikate ergibt sich durch deren Größe und Ladungsverteilung ein zusätzliches Hindernis für den Anionenaustausch. Dieser hierdurch bedingte Anionenausschlusseffekt ist zusätzlich abhängig von der Art der komplexierten Metallkationen und der Porosität der Partikel. Auch die Formulierung „neutrale Elemente“ lässt weitere Interpretation zu. Die Diffusion von Elementmodifikationen ist im Vergleich zu der von Metallkationen gering ausgeprägt, da deren Löslichkeit im Porenwasser stark begrenzt ist. Die Diffusionsgeschwindigkeit einzelner, neutraler Atome, ist vermutlich ebenfalls gering im Vergleich zu der von Kationen, sofern diese Spezies überhaupt unter den genannten Bedingungen existieren können. Bei schweren Elementen ist dies wohl nur durch Dispersionswechselwirkungen gegeben. Wird ein effektiver Diffusionskoeffizient berechnet, sollte auch effektiver Porenraum berechnet werden, der Sättigungseffekte an der Oberfläche mit einbezieht. Beim Kationenaustausch besteht die Möglichkeit, dass ein Kation nach dem Austausch nicht mehr durch ein anderes Kation ausgetauscht werden kann, da es stärker bindet als das nachfolgende.“ (TLUBN 2022, S. 11)*

Fachliche Einschätzung: Die BGE bezieht wie folgt Stellung.

Begründung: Außer in sehr sauren Böden (z. B. in den Tropen) ist die Oberfläche von Tonteilchen negativ geladen. Die Stärke der Ladung ist, wie das TLUBN richtig beschrieben hat, von verschiedenen Faktoren abhängig (z. B. isomorpher Ersatz der eingelagerten Kationen, pH-Wert ...). Es gibt unterschiedliche theoretische Ansätze zur modellhaften (mathematischen) Beschreibung des Sorptionsverhaltens, wie Sorptionsisotherme (z. B. Langmuir oder Freundlich). In der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens ist eine flächendifferenzierte Parametrisierung des Sorptionsverhaltens nicht möglich und auch nicht vorgesehen. Der vergleichende Charakter der derzeitigen Arbeitsschritte ermöglicht es, auf eine zu detaillierte Prozessbeschreibung innerhalb des 1D-Modells zu verzichten. Sorptionsprozesse werden trotzdem berücksichtigt. Die Ungewissheiten werden durch Variationen der Transport- und Reaktionsparameter im Rahmen multipler Rechenläufe bestmöglich abgebildet.

Im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens ist eine zunehmende Detailbeschreibung der Prozesse vorgesehen, was zwingenderweise eine erhöhte Informations- und Datendichte voraussetzt. Die rvSU zielt unter anderem auf die Abschätzung des zukünftigen Erkundungsbedarfs ab, in die auch die (Prozess-)modelle und deren Parametrisierungsbedarfe einfließen.

## Literaturverzeichnis

- BGE (2020g): *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Standortsuche/Wesentliche\\_Unterlagen/Zwischenbericht\\_Teilgebiete/Zwischenbericht\\_Teilgebiete\\_barrierefrei.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf)
- BGE (2022a): *Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- BGE (2022b): *Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.
- EndSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)
- GeolDG: Geologiedatengesetz vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1387)
- Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E. & Neuzil, C. E. (2006): *Groundwater in Geologic Processes*. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521603218
- Kim, Y.-S., Peacock, D. C. & Sanderson, D. J. (2004): *Fault damage zones*. Journal of Structural Geology, Bd. 26 (3). 503 – 517. ISSN 01918141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- Seidel, G. (2013): *Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens*. Beiträge zur Geologie von Thüringen. Neue Folge, Bd. 20. 21 – 78. Zugriff am: 20200713
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist
- TLUBN (2021): *Validierung des Zwischenberichts Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung für die Gebietsanteile Thüringens*. 07.06.2021. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN). o. O.
- TLUBN (2022): *Stellungnahme des TLUBN zur Methodenentwicklung der BGE zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen*. 30.05.2022. Thüringer Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz. Weimar

**Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH**  
**Eschenstraße 55**  
**31224 Peine**  
**T +49 05171 43-0**  
**[poststelle@bge.de](mailto:poststelle@bge.de)**  
**[www.bge.de](http://www.bge.de)**