

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
(Außenstelle Weimar) Carl-August-Allee 8 - 10, 99423 Weimar

Stellungnahme des TLUBN zur Methodenentwicklung der BGE zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen

Stand: 30.05.2022

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
Abteilung 8 Geologie, Bergbau
Referat 81 (Geologische Landesaufnahme, Geologisches Landesarchiv)
Referat 86 (Umweltschutz, Markscheidewesen)

1. Veranlassung und Einordnung der Stellungnahme

Im Zuge des Standortauswahlverfahrens zur Suche und Auswahl eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) als Vorhabenträgerin im Verfahren die Aufgabe, im Schritt 2 der Phase 1 aus den bisherigen 90 Teilgebieten des Zwischenberichts (BGE 2020) Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln. Dazu soll eine deutliche Einengung der Standortregionen im Vergleich zur Anzahl und Größe der Teilgebiete erreicht werden. Die vorgeschlagenen Standortregionen sollen eine für die übertägige Erkundung in Phase 2 des Standortauswahlverfahrens handhabbare Fläche aufweisen. In dem Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen hat die BGE außerdem für Gebiete mit nicht ausreichenden Informationen eine Empfehlung aufzunehmen, wie mit diesen Gebieten weiter verfahren werden soll. Hierfür hat die BGE nach § 27 des Standortauswahlgesetzes (StandAG 2017) in den ermittelten Teilgebieten zunächst repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) durchzuführen, deren Anforderungen und Umfang in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV 2020) und der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) näher bestimmt sind. Die streng mit den gesetzlichen Vorgaben abgestimmte Methodik zur Durchführung der rvSU wurde in einer Veranstaltungsreihe der BGE (25.03.2022 – 01.04.2022) der Öffentlichkeit vorgestellt und diskutiert. Des Weiteren wurde das Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß EndlSiUntV in Form von 3 Dokumenten veröffentlicht:

1. Kurzfassung Fachlicher Methodenvorschlag (BGE 2022b)
2. Fachlicher Methodenvorschlag (BGE 2022a)
3. Anlagen (Herleitung und Beispielanwendung) (BGE 2022c).

Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Göschwitzer Straße 41
07745 Jena

Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Außenstelle Weimar
Dienstgebäude 1
Harry-Graf-Kessler-Straße 1
99423 Weimar

**Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Außenstelle Weimar
Dienstgebäude 2
Carl-August-Allee 8 - 10
99423 Weimar**



Thüringer Landesamt für Umwelt,
Bergbau und Naturschutz (TLUBN)
Außenstelle Gera
Puschkinplatz 7
07545 Gera

poststelle@tlubn.thueringen.de

www.tlubn.thueringen.de

Ust.-ID: 812070140

Informationen zum Umgang mit Ihren Daten im TLUBN und zu Ihren Rechten nach der EU-DSGVO
finden Sie im Internet auf der Seite <https://www.tlubn.thueringen.de/datenschutz>

Der durch die BGE vorgestellte Arbeitsstand zur Methodik der rvSU stellt die fachliche Umsetzung der §§ 3, 5, 6, 7, 10, 11 und 12 der EndlSiUntV dar. Dabei werden die Arbeitsschritte zur Ausweisung von Untersuchungsräumen (§ 3 EndlSiUntV), zur Erstellung der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV) und des vorläufigen Sicherheitskonzeptes mit der Entwicklung der vorläufigen Auslegung des Endlagers (§ 6 EndlSiUntV) sowie zur Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) konkret erläutert. Für die Arbeitsschritte zur umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV), Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV) sowie der Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV) wird jeweils ein Ausblick gegeben.

Die BGE legt dar, dass die einzelnen auf der EndlSiUntV aufbauenden Arbeitsschritte miteinander komplex verzahnt sind und nicht streng in der Reihenfolge der Paragraphen abgearbeitet werden können. Schwerpunkt des vorgestellten Arbeitsstandes zu den rvSU ist ein von der BGE entwickelter Arbeitsablauf („Workflow“), der alle verbleibenden infrage kommenden Standortregionen im Negativausschlussverfahren transparent und nachvollziehbar kategorisieren soll (Abb. 1).

Die Einstufung der Kategorien D-A (Abb. 1) erfolgt dabei für sogenannte Teilbereiche von Teiluntersuchungsräumen (TUR), wobei die Summe aller TUR einen Untersuchungsraum (= Teilgebiet) ergibt. Die Kategorien stellen eine abgestufte Bewertung der jeweiligen Teilbereiche der TUR hinsichtlich ihrer Eignung zur Ausweisung einer potentiellen Standortregion dar, wobei ausschließlich die Kategorie A diejenigen Bereiche erfasst, die nach Abschluss der rvSU im Standortauswahlverfahren verbleiben. Die Kategorien werden von der BGE folgendermaßen definiert:

Kategorie D: enthält auf Grund des Vorliegens von Ausschlusskriterien oder der Nichteinhaltung von Mindestanforderungen ungeeignete Bereiche (Prüfschritt der zielgerichteten Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen).

Kategorie C: enthält Bereiche, die auf Grund der qualitativen oder quantitativen Bewertung ungeeignet sind oder keine überwiegend gute Bewertung vorweisen (Prüfschritt der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses und Prüfschritt der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses).

Kategorie B: enthält Bereiche, die auf Grund der quantitativen Bewertung genauer untersucht werden, aber weniger gut geeignet sind als die Bereiche in Kategorie A (Prüfschritt des sicherheitsgerichteten Diskurses).

Kategorie A: enthält die am besten geeigneten Bereiche (Prüfschritt des sicherheitsgerichteten Diskurses). Ausschließlich die Bereiche aus Kategorie A werden im Anschluss an die rvSU im Rahmen von § 14 StandAG mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien weiterbearbeitet.

Von den 90 Teilgebieten wurden vier Gebiete (Gebiete zur Methodenentwicklung; GzME) von der BGE ausgewählt, um Methoden zur Durchführung der rvSU zu entwickeln und an realen Daten zu erproben. Ausgewählt wurden der Salzstock Bahlburg in der Nähe von Hamburg, das Teilgebiet Opalinuston in Süddeutschland und mit den Teilgebieten Thüringer Becken und Saxothuringikum auch zwei Teilgebiete, die teilweise in Thüringen liegen.

Zur Einordnung der Stellungnahme sollte betont werden, dass es sich bei der jetzt vorgestellten Methodik der rvSU um einen frühen, noch in der Entwicklung befindlichen Arbeitsstand der BGE handelt. In keinem der Gebiete zur Methodenentwicklung (GzME) wurde die bisherige Methodik der rvSU vollständig angewendet. In vielen Aspekten der rvSU erwartet die BGE zudem für das weitere Verfahren noch einen Erkenntnisgewinn aus aktuell laufenden oder noch zu initiiierenden Forschungsvorhaben. Die vorliegende Methodenbeschreibung (BGE 2022c) zeigt sowohl die Durchführung einzelner methodischer Schritte zur Ausweisung von Untersuchungsräumen als auch die Erarbeitung der Geosynthese und Analyse und Bewertung des Endlagersystems in den vier GzME auf.

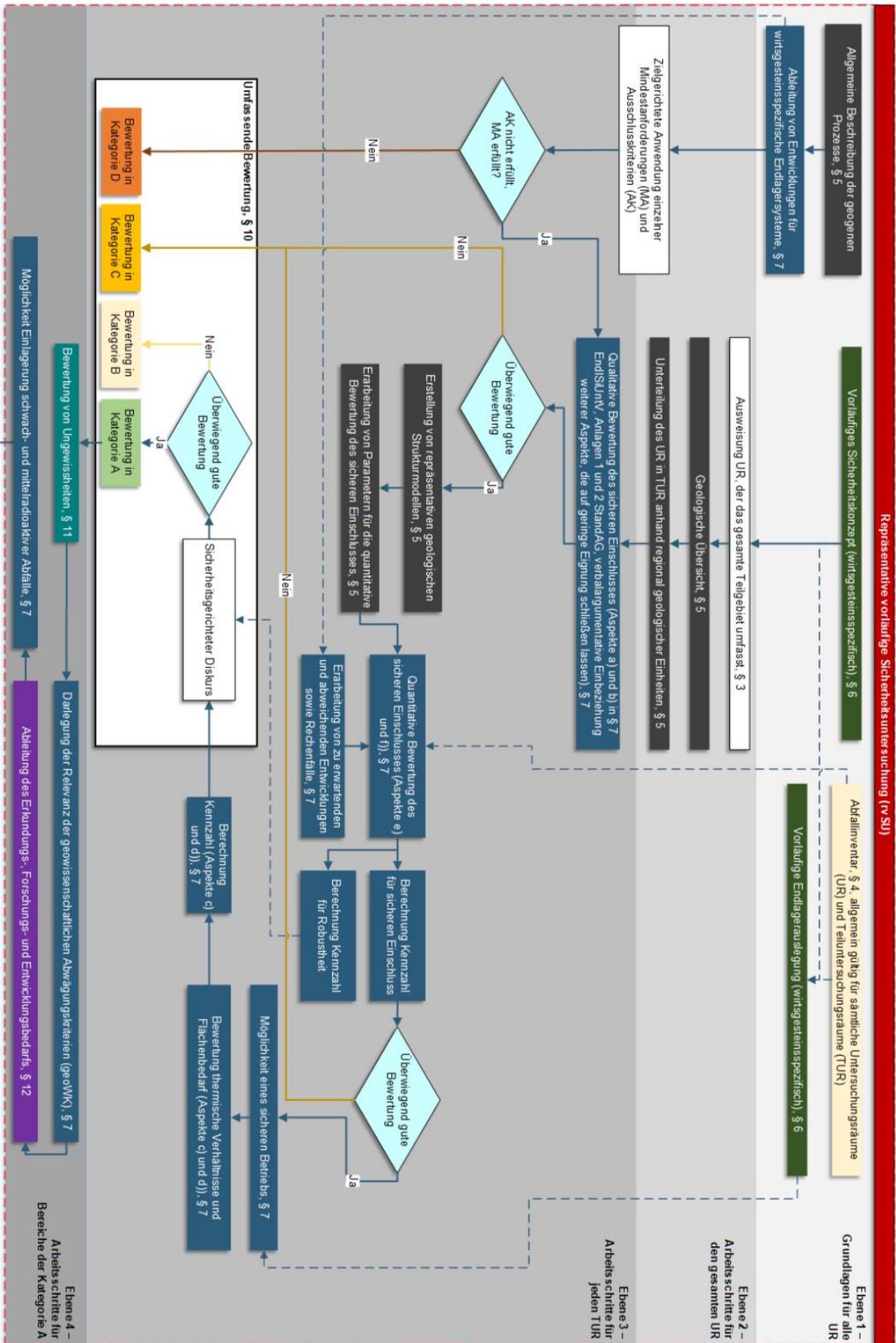


Abbildung 1: Ablauf der Bearbeitungsschritte einer vSU. Prüfschritte (als Rauten dargestellt); Arbeitsschritte (Rechtecke, farblich nach Paragraphen der EndSiUntV gekennzeichnet); Bearbeitungsreihenfolge inkl. Informationsweitergabe (als dicke Pfeile dargestellt), Informationsweitergabe (gestrichelte/dünne Pfeile) (BGE 2022a).

Vor dem Hintergrund der engen gesetzlichen Vorgaben, der die BGE bei der Methodenentwicklung Rechnung tragen muss, konzentriert sich die vorliegende Stellungnahme auf allgemeine Hinweise, Empfehlungen und Kommentare zu folgenden Punkten:

1. Berücksichtigung der Empfehlungen aus dem Validierungsbericht des TLUBN
2. Dokumentstrukturplan
3. Anmerkungen zur Klassifikation von Datentypen
4. Kenngrößen zur Datenlage und den geologischen Rahmenbedingungen (DQL, DQN, IDN, KX)
5. Tektonische Überprägung der geologischen Einheit
6. Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen
7. FEM-Simulation der Wärmeleitung und Auslegung des Endlagerbergwerkes
8. Numerische Modellierung des Austrages der Nuklide.

2. Hinweise zum Arbeitsstand der Methodenentwicklung der rvSU

2.1 Berücksichtigung der Empfehlungen aus dem Validierungsbericht des TLUBN

Der geplante Verfahrensablauf der rvSU (z.B. BGE 2022a, Abb. 2) gliedert sich in insgesamt vier Prüfschritte, von denen der erste die zielgerichtete Prüfung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen umfasst. Obwohl nicht explizit in § 14 StandAG bzw. in der EndSiUntV gefordert, wendet die BGE die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen auch im Schritt 2 der Phase 1 an, um ungeeignete Bereiche in den Untersuchungsräumen auszuweisen und der Kategorie D zuzuordnen. Diese Bereiche werden im Rahmen der umfassenden Bewertung des Endlagersystems der rvSU als ungeeignet klassifiziert und im weiteren Verfahren nicht mehr berücksichtigt. Die BGE greift damit in der Methodik der rvSU die in verschiedenen Stellungnahmen der Staatlichen Geologischen Dienste (u.a. TLUBN 2021) geäußerte Kritik auf, dass im Schritt 1 der Phase 1 bei der Anwendung der Ausschlusskriterien, insbesondere bei der Anwendung der Mindestanforderungen vielfach ungeeignete Daten mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen, Kenntnisständen und Detaillierungsgraden verwendet wurden. Hingegen wurden wichtige Daten, die den aktuellen digital verfügbaren Wissensstand widerspiegeln und bereits in Schritt 1 der Phase 1 eine deutlich genauere räumliche Eingrenzung der Teilgebiete erlaubt hätten, nicht bzw. nicht adäquat berücksichtigt. Die jetzt in der rvSU geplante, frühzeitige nochmalige Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen wird daher auch vom TLUBN als sinnvoll und dringend notwendig erachtet.

Für das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen Atekonische Vorgänge“ im GzME „Thüringer Becken“ zeigt Beispiel 41 (BGE 2022c), dass die Hinweise des TLUBN berücksichtigt werden. Im Beispiel 42 wurde die Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“ für das Thüringer Becken - wie in (BGE 2020) angekündigt - vervollständigt.

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.

2.2 Dokumentstrukturplan

Nach Artikel 2 § 4 Abs. 5 der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird der Vorhabenträger aufgefordert, für jede durchgeführte vorläufige Sicherheitsuntersuchung einen Bericht zu erstellen sowie Bezüge in einem Dokumentstrukturplan darzustellen.

Im vorliegenden Methodikkonzept der rvSU (Arbeitsstand) erfüllt die BGE diese gesetzliche Verpflichtung.

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.

2.3 Anmerkungen zur Klassifikation von Datentypen

In BGE (2022c) wird im Kapitel „5.1.1 Datentypen und ihre geologische Aussagefähigkeit“ auf Blatt 230 ff. eine Klassifikation von Datentypen vorgestellt. Die BGE unterscheidet dabei drei Datentypen:

Datenkategorie 1: Direkte Nachweise

Datenkategorie 2: Indirekte Nachweise

Datenkategorie 3: Zusätzliche, interpretative Nachweise.

Zu den *direkten Nachweisen* zählen nach Darstellung der BGE dabei vor allem Bohrungsdaten und Informationen aus Bergwerken. Zu den *indirekten Nachweisen* werden alle geophysikalischen Erkundungsergebnisse gezählt. Die dritte Kategorie der *zusätzlichen, interpretativen Nachweise* umfasst nach Ansicht der BGE „alle interpretierten Daten, wie 3D-Modelle, Profilschnitte, Fazieskarten, etc., aber auch Studien, Ausarbeitungen, regionalgeologische Expertise zu einem bestimmten Gebiet sowie geologische Karten“ (Blatt 231 in BGE 2022c).

Die Daten der dritten Kategorie werden im Geologiedatengesetz (GeolDG 2020) unter dem Begriff „Bewertungsdaten“ subsumiert. Aus Sicht des TLUBN können Bewertungsdaten durchaus ergänzend als fachliche Grundlage für eine erste Eingrenzung von Gebieten zur Standortauswahl dienen. Es ist aber falsch, im Zusammenhang mit Bewertungsdaten von „interpretativen Nachweisen“ zu sprechen. Die Bewertungsdaten stellen ja gerade keinen Nachweis dar, sondern sind eine Interpretation vorhandener Beobachtungen aus direkten Aufschlüssen oder indirekten Erkundungsmethoden.

Generell suggeriert der Begriff „Nachweis“ auch in den Datenkategorien 1 und 2 eine Erkenntnis-sicherheit, die bei geologischen Fachdaten aufgrund ihres empirischen Charakters innerhalb eines komplexen Umfelds häufig nicht gegeben ist. Aus Sicht des TLUBN wäre daher eine „weiche“ 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.

2.4 Kenngrößen zur Datenlage und den geologischen Rahmenbedingungen (DQL, DQN, IDN, KX)

Im Rahmen der Geosynthese soll unter anderem die „Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit“ bewertet werden. Dafür dienen der BGE vier sogenannte Kenngrößen als Basis. Die Ermittlung der Ableitbarkeit des Untergrundes aus diesen vier Kenngrößen ist laut BGE noch unklar und wird noch erarbeitet werden müssen.

Datenqualität DQL: Für Bohrungs- und reflexionsseismische Daten. Die Einteilung erfolgt bei Bohrungen in 6 Stufen („sehr gute“ bis „sehr schlechte Qualität“) in Abhängigkeit vom Detailgrad der Schichtbeschreibungen.

Datenquantität DQN: Bewertung anhand von Bohrungs- und reflexionsseismischen Daten. „Bestimmung der Quantität der Bohrungsinformationen über eine Nachbarschaftsanalyse“, deren Einteilung in 6 Stufen vorgenommen wird („sehr groß“ bis „sehr gering“).

Interpretative Daten und weitere (indirekte) Nachweise IDN: Subjektive Bewertung in 6 Stufen anhand von weiteren indirekten Nachweisen und interpretierten Daten.

Geologische Komplexität KX: Subjektive Einschätzung der „geologischen Komplexität“, Einteilung in 6 Stufen („sehr geringe Komplexität“ bis „sehr hohe Komplexität“) anhand von Informationen zu tektonischen Strukturen u.a. aus Karten, 3D-Modellen und Profilschnitten.

Unstrittig ist, dass ein solch automatisierter Arbeitsablauf die Quantifizierung von Daten in Kenngrößen erfordert. Die von der BGE vorgeschlagene Kategorisierung numerischer Werte führt zu Unklarheiten. Es ist nicht ersichtlich, was genau einen Wert der Kategorie „sehr gute Qualität“ oder „eher geringe Komplexität“ von „mäßiger Qualität“ oder „eher hoher Komplexität“ unterscheidet. Zudem bestehen Unstimmigkeiten bezüglich der genannten Kenngrößen, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

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. Geo-IDG 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.

2.5 Tektonische Überprägung der geologischen Einheit

Der Arbeitsablauf für die Bewertung des „Ausmaßes der tektonischen Überprägung“ soll anhand der geologischen Gesamtsituation eines Untersuchungsraumes in verschiedenen Maßstäben unter Zuhilfenahme von drei Komponenten erfolgen: dem „tektonischen Großraum“, den „überregionalen und regionalen Störungszonen“ und der „diffusen tektonischen Überprägung“. Die Gesamtbewertung des „**Tektonischen Großraums**“ erfolgt verbalargumentativ („ungünstig – bedingt günstig – günstig“) auf Basis von Intensität und Dichte der Deformationsstrukturen, welche durch die Indikatoren „Anzahl der Deformationsphasen“, „Intensität der Deformation“ und „Art der Deformation“ ermittelt werden. Für Untersuchungsräume mit einer positiven Bewertung erfolgt die weitere Betrachtung bezüglich der Ausweisung **regionaler/überregionaler Störungszonen** anhand von regionalen Daten. Dabei wird der Bereich um überregionale Störungszonen >3 km und bei regional-maßstäblichen Störungen >1 km mit „günstig“ eingestuft. Der „bedingt günstige“ Bereich beschränkt sich auf 100 m bis 3 km bzw. auf 100 m bis 1 km bei regionalen Störungen. Auch für den Indikator „diffuse tektonische Überprägung“ zieht die BGE publizierte regionale Daten heran. Sie definiert den Begriff der „diffusen Tektonik“ folgendermaßen: „Als diffus überprägt wird der Gesteinskörper betrachtet, wenn ein weit verbreitetes Netz aus Störungen auftritt, das zur einer engständigen Zerblockung führt. An vielen Stellen ist das Störungsmuster zwar im Detail weitgehend unbekannt, die vorhandenen strukturgeologischen Daten und untergeordneten, auch konzeptionellen Überlegungen deuten aber auf eine erhöhte kleinräumige tektonische Zergliederung hin.“

Tektonische Überprägung stellt ein wichtiges Merkmal einer geologischen Einheit dar, speziell in Bezug auf potentielle Fluidwegsamkeiten. Die Beurteilung der tektonischen Überprägung innerhalb der rvSU erfolgt wie beschrieben in einem Betrachtungsmaßstab von grob nach fein. Dies ist grundsätzlich zu begrüßen, da eine schnelle Reduzierung der Fläche von ursprünglich weit gefassten Teilgebieten erfolgen kann. Allerdings werden seitens des TLUBN folgende Kritikpunkte bzw. Kommentare geäußert.

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 Zerüttungszone“, „...Großteil des Gesteinskörpers“, ...).

Auch die Beurteilung der „Diffusen Tektonik“ bleibt durch die Verwendung zahlreicher Relativbegriffe wie „weit verbreitetes Netz an Störungen“ oder „engständige Zerblockung“ 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.

2.6 Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein anhand digitaler Schichtenverzeichnisse und Bohrlochmessungen

In BGE (2022c) wird ab Blatt 353 ff. die Methodik zur Anwendung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ an Beispielen aus allen vier GzME dargelegt. Die Arbeiten im GzME „Thüringer Becken“ werden in Beispiel 55 (Blatt 357 ff.) für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR vorgestellt. Die Heterogenität der Steinsalzbereiche wird hier durch eine quantitative Auswertung des Auftretens von Nebenkomponenten und Zwischenschichten innerhalb des jeweiligen Steinsalzbereichs ermittelt. Das Ziel ist, möglichst reine bzw. homogene Steinsalzbereiche mit einer Mindestmächtigkeit von 100 m zu ermitteln.

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.

Die von der BGE verwendete Datengrundlage ist daher insgesamt aus Sicht des TLUBN unzureichend und für die vorgeschlagene quantitative Analyse zur Ermittlung der Variationsbreite der Eigenschaften im Wirtsgestein nicht geeignet.

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

- **Blatt 105:** Abbildung 13: Eine Beschriftung der (Linien-)Farbcodes der Barrieren erhöht die Verständlichkeit.
- **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 Gorbelen über Jahrzehnte gewonnenen Erkenntnissen hergestellt wird.
- **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 Frischwettererschacht sind Angaben wünschenswert.
- **Blatt 143:** „Vom Hauptwetterstrom im Querschlag aus werden die Einlagerungsstrecken über Wetterlütten und Lüfter sonderbewettert.“ Für die Auffahrungsbereiche ist dies absehbar ebenfalls erforderlich.
- **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.
- **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).

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

- **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?
- **Blatt 525 und 526:** Der Beschreibung nach handelt es sich nicht um Monte-Carlo-Simulationen, sondern um Monte-Carlo-Sampling.
- **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 Oberflächensorption 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.

- **Blatt 531:** der thermische Gradient ist in K/m anzugeben.
- **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.“).

- **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.
- **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.
- **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.
- **Blatt 660:** Es wird ein pH-Wert von neutral bzw. schwach alkalisch angenommen sowie anoxisch-reduzierende Verhältnisse. Da Wechselwirkungen von transportierten Radionukliden 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.
- **Blatt 671:** Die Literaturquelle der Gleichung (8) ist nicht nachvollziehbar, insbesondere ist unklar, wieso φ 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.

- **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- (Δt) Skalierung genutzt, um die Konzentrationsveränderung $\Delta c/\Delta x$ 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.
- **Blatt 689:** Die Formulierung „elektrische Ladung von Tonteilchen“ lässt einen großen Diskussionsspielraum zu. Aufgrund des Aufbaus von Tonmineralen 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.

3. Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise bei der Methodenentwicklung

Die Beurteilung des bisherigen Arbeitsstands der rvSU-Methodik zeigt, dass einige Empfehlungen aus dem Validierungsbericht (TLUBN 2021) zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020) von der BGE bereits berücksichtigt wurden (Kap. 2.1), und dass die vom TLUBN im Validierungsbericht empfohlene nochmalige Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen durch die BGE frühzeitig im Schritt 2 der Phase 1 verankert wird.

Bezüglich der erweiterten Anwendung der Mindestanforderungen im GzME „Thüringer Becken“ gibt das TLUBN zum wiederholten Mal der BGE die Empfehlung, die Verbreitungen, Mächtigkeiten und Tiefenlagen der Steinsalze der Staßfurt- und Werra-Formationen auf Basis der gelieferten Bohrungsdaten und geophysikalischen Messdaten selbständig mittels reproduzierbarer Methoden zu ermitteln (s. Kap. 2.1). Die vertiefte Anwendung der Mindestanforderungen „Mächtigkeit

des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im Rahmen der rvSU wird zu einem dauerhaften Ausschluss von großen Flächen mit der Kategorie D und demzufolge zu einer deutlichen räumlichen Einengung des Suchraums im Untersuchungsraum Thüringer Becken führen. Dieser essenzielle Schritt muss aus Sicht des TLUBN auf der Grundlage der am besten geeigneten Daten und mit Methoden durchgeführt werden, deren Ergebnisse vollständig reproduzierbar sind.

Weiterhin empfiehlt das TLUBN die in Kap. 2.2 bis 2.6 angesprochenen Punkte zur Weiterentwicklung der Geosynthese und qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses sowie die in 2.7 und 2.8 genannten Punkte zum vorläufigen Sicherheitskonzept, zur vorläufigen Endlagerauslegung und Analyse des Endlagersystems zu berücksichtigen.

Der in BGE (2022c, 2022b, 2022a) veröffentlichte frühe Arbeitsstand der rvSU-Methodik wird durch Hinweise, wie sie z.B. in der jetzigen Konsultationsphase gegeben werden, oder durch die zukünftigen Kenntnisergebnisse aus Forschungsprojekten noch vielfache Änderungen und zunehmende Konkretisierungen erfahren. Aus Sicht des TLUBN ist es daher wichtig, dass die BGE im gesamten Schritt 2 der Phase 1 zur Ermittlung von Standortregionen über den jeweils aktuellen Arbeitsstand der rvSU-Methodik kontinuierlich die Öffentlichkeit informiert und diesen zur fachlichen Diskussion stellt.

QUELLENVERZEICHNIS

- BGE (2020). Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG (S. 444). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>.
- BGE (2022a). Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (S. 62). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Konzept_zur_Durchfuehrung_der_rvSU_barrierefrei.pdf
- BGE (2022b). Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung—Kurzfassung (S. 5). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_STA_BGE_Kurzfassung_fuer_Eilige_zu_rvSU_Konzept_barrierefrei.pdf
- BGE (2022c). Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (S. 744). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf
- Diersch, H. J., & Kolditz, O. (2002). Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in water resources*, 25(8-12), 899-944.
- Gesetz zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur Übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Zurverfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben Geologiedatengesetz—GeolDG), Pub. L. No. BGBl. I S. 1387, 21 (2020). <https://www.gesetze-im-internet.de/geoldg/GeolDG.pdf>
- Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz—StandAG), Pub. L. No. BGBl. I S. 1074 (2017). https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/StandAG.pdf
- Navarro, V., Asensio, L., Gharbieh, H., De la Morena, G., & Pulkkanen, V. M. (2019). Development of a multiphysics numerical solver for modeling the behavior of clay-based engineered barriers. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(4), 1047-1059.
- Seidel, G. (2013). Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens. *Beiträge zur Geologie von Thüringen*, 21–78.
- TLUBN (2021). Validierung des Zwischenberichts Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung für die Gebietsanteile Thüringens (S. 146). Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/000_TLUBN/Geologie_und_Bergbau/Landesgeologie/TLUBN_Validierung_Zwischenbericht_Teilgebiete.pdf

Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung—EndlSiUntV), Pub. L. No. BGBl. I S. 2094, 2103 (2020). <https://www.gesetze-im-internet.de/endlsiuntv/EndlSiUntV.pdf>

Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung—EndlSiAnfV), Pub. L. No. GBl. I S. 2094, 13 (2020). <https://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/EndlSiAnfV.pdf>