Gutachten:

Analyse und Bewertung der Verwendung geologischer 3D-Modelle im Zuge der vertieften Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen am Beispiel des Gebiets zur Methodenentwicklung (GzME) „Thüringer Becken“

Auftraggeber:

Nationales Begleitgremium Geschäftsstelle,
Buchholzweg 8, 13627 Berlin

Gutachter:

Prof. Dr. Michael Kühn,
Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ),
Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Aktenzeichen 07 124/0003#0130

Potsdam, 15. Januar 2023

Zusammenfassung der Analyse und Bewertung der Verwendung geologischer 3D-Modelle am Beispiel des Gebiets Thüringer Becken

Im Auftrag des Nationalen Begleitgremiums (NBG), das den Prozess der Endlagersuche für hochradioaktiven Müll unabhängig und vermittelnd begleitet, wurde die genaue Verwendung des geologischen Modells des Thüringer Beckens am Beispiel des gleichnamigen Gebiets zur Methodenentwicklung (GzME) analysiert und bewertet. Das hier vorgelegte Gutachten beantwortet die Fragen, was das 3D-Modell im Detail beinhaltet, ob die Modellerstellung nachvollziehbar ist und das Modell aktuell fortgeschrieben wird, Informationen zu Ungewissheiten verfügbar sind und inwieweit die Übertragung der angewendeten Vorgehensweise für das GzME auf andere Teilgebiete (TG) des Wirtsgesteins Steinsalz in flacher Lagerung möglich ist.

Das geologische Modell des Thüringer Beckens ist aufgebaut aus insgesamt 14 Basis- bzw. Oberflächen verschiedener stratigrafischer Schichteinheiten der Erdneuzeit (Känozoikum), der Erdmittelzeit (Mesozoikum) und des Erdaltertums (Paläozoikum). Darüber hinaus sind tektonisch verursachte strukturelle Veränderungen in Form von 59 verschiedenen geologischen Störungszonen Teil des Modells. Das GzME Thüringer Becken ist größer als das geologische Modell.

Das Modell wurde der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) in Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens vom Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) zur Verfügung gestellt. Die Modellerstellung ist nicht dokumentiert und daher nicht nachvollziehbar. Hingegen sind die Modellerweiterungen im aktuellen Schritt 2 der Phase I mit Blick auf den Zechstein und die Steinsalzformationen Staßfurt und Werra ausführlich beschrieben und gut nachvollziehbar. Die Weiterentwicklung erfolgte für die vertiefte Anwendung der Mindestanforderungen Mächtigkeit und Tiefenlage. Dafür wurden vor allem gebietsspezifische Informationen verwendet.

Einerseits wurde das Modell nach Nordosten um das Gebiet des Landes Sachsen-Anhalt erweitert, das zum TG Thüringer Becken gehört. Hierfür wurden die Oberfläche und die Basis des Zechsteins entsprechend ergänzt. Andererseits wurde für das gesamte TG die Steinsalzformation Staßfurt und für den Südwesten die des Werra neu modelliert, um die relevanten Teiluntersuchungsräume (TUR) abzudecken. Das erweiterte Modell wird durch die BGE aktuell genutzt, um die verschiedenen TUR abzugrenzen und die Kategorien (A, B, C und D) auszuweisen.

Geologische Modelle enthalten signifikante Ungewissheiten in Form von Ungenauigkeiten und Unbestimmtheiten. Die Untersuchungen zu Ungewissheiten des Modells vom Thüringer Becken entsprechen nicht dem Stand der Wissenschaft. Die beschriebenen ersten Arbeiten zur Ermittlung der Ungenauigkeiten des Modells sind ein guter Start, aber der Umfang ist bislang sehr begrenzt und es müssen auch Untersuchungen zur Bewertung von Unbestimmtheiten folgen.

Die Methodenentwicklung der Geosynthese ist soweit abgeschlossen, dass sie auf die anderen TG übertragen werden kann. Die 14 TG des Wirtsgesteins Salz in flacher Lagerung werden nahezu vollständig durch geologische Modelle abgedeckt. Die Datenlage ist in allen TG mit Blick auf verfügbare Bohrungen geschätzt ausreichend gut für eine Eingrenzung und Kategorisierung.

Im Wesentlichen bleiben die in den vorhergehenden Berichten gemachten Empfehlungen zum GzME Thüringer Becken bestehen bzw. werden durch das hier vorgelegte Gutachten für die nächsten Schritte noch einmal bekräftigt.

Summary of the analysis and evaluation of the use of geological 3D models using the example of the Thuringian Basin area

On behalf of the National Citizens' Oversight Committee (NBG), which accompanies in an independent mediating manner the process of the search for a final repository for high-level radioactive waste, the exact use of the geological model of the Thuringian Basin was analysed and evaluated using the example of the area for method development (GzME) of the same name. The review presented here answers the questions of what the 3D model contains in detail, whether the creation of the model is comprehensible and it is currently updated, information on uncertainties is available and to what extent the applied approach used for the GzME can be transferred to other subareas (TG) of the host rock type stratiform rock salt.

The geological model of the Thuringian Basin is built up from a total of 14 top and bottom units of different stratigraphic formations of the Cenozoic, Mesozoic and Palaeozoic eras. In addition, tectonically caused structural changes in the form of 59 different geological fault zones are part of the model. The GzME Thuringian Basin is larger than the geological model.

The model was provided by the Thuringian State Agency for the Environment, Mining and Nature Conservation (TLUBN) to the Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) in Step 1 of Phase I of the site selection process. The modelling procedure is not documented and therefore not comprehensible. In contrast, the model extensions made in the current Step 2 of Phase I with regard to the Zechstein and the Staßfurt and Werra rock salt formations are described in detail and are well traceable. Further development was carried out for the more in-depth application of the minimum requirements for thickness and depth. For this purpose, mainly area-specific information was used.

On the one hand, the model was extended to the north-east to include the area of Saxony-Anhalt, which belongs to the TG Thuringian Basin. For this, the surface and the base of the Zechstein were supplemented accordingly. On the other hand, the Staßfurt rock salt formation was newly modelled for the entire TG, as well as that of the Werra for the south-west in order to cover the relevant investigation areas (TUR). The extended model is currently used by the BGE to delineate the different TURs and to designate categories (A, B, C and D).

Geological models contain significant uncertainties in the form of imprecisions and indeterminacies. The investigations of uncertainties of the Thuringian Basin model do not correspond to the state of the art in science. The described initial work to determine the imprecisions of the model is a good start, but the scope is very limited so far and studies to evaluate indeterminacies must also follow.

The method development of geosynthesis has been completed to the extent that it can be transferred to the other TGs. The 14 TG of the host rock type stratiform rock salt are almost entirely covered by geological models. The data situation is estimated to be sufficiently good for delimitation and categorisation in all TGs with regard to available boreholes.

Essentially, the recommendations made in the previous reports on the GzME Thuringian Basin remain unchanged or are reaffirmed by the review presented here for the next steps.

1. Hintergrund und Bezug zum Standortauswahlverfahren

„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung [...] in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens […] bestimmt wird und […] den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“ (StandAG § 1, Satz 2, https://www.gesetze-im-internet.de/standag_2017/).

Das **Nationale Begleitgremium (NBG)** ist ein unabhängiges, pluralistisch zusammengesetztes Gremium, welches die Bandbreite der gesamten Gesellschaft widerspiegelt. Die Aufgabe des NBG ist gemäß des **Standortauswahlgesetzes** (StandAG, § 8, Satz 1) die vermittelnde und unabhängige Begleitung des Verfahrens, insbesondere mit Blick auf die Öffentlichkeitsbeteiligung. Nicht alle vorhandenen geologischen Daten, die im Standortauswahlverfahren gesammelt und verwendet werden, sind für die Öffentlichkeit zugänglich. Daher hat das NBG seine Möglichkeit genutzt, eine **Sachverständigengruppe** zur Einsicht und Bewertung nichtöffentlicher Daten zu beauftragen. Ziel ist es, dadurch die Transparenz im Verfahren zu erhöhen. Aufgabe der Sachverständigen ist die **stichprobenartige Qualitätskontrolle** und die diesbezügliche **Information der Öffentlichkeit** vonseiten des NBG.

Die **Durchführung** des **Standortauswahlverfahrens** richtet sich nach dem StandAG. Die **Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)** ermittelt im **Schritt 2** der **Phase I** aus den Teilgebieten (TG) nach § 13 StandAG die **Standortregionen für die übertägige Erkundung** gemäß § 14 StandAG (Seidel und Wengler, 2021). Alle TG, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen, sind im „Zwischenbericht Teilgebiete“ (BGE, 2020) zusammengefasst.

Die BGE nutzt im Schritt 2 von Phase 1 als wesentliche **Datengrundlage** für die vertiefte Anwendung der **Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen** geologische **3D-Modelle**, die ihr von den **Staatlichen Geologischen Diensten** bereits im Schritt 1 übermittelt wurden. Für die TG mit dem Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung erfordert dies insbesondere die Bestimmung der **Tiefenlage und Mächtigkeit** von einzelnen **Steinsalzhorizonten** in den regionalen stratigrafischen Stufen Malm, Keuper, Muschelkalk und Zechstein (STDK, 2022). Die 3D-Modelle lassen sich in dem Rahmen zusammen mit weiteren, (noch) nicht öffentlich bereitgestellten geologischen Daten (z. B. Bohrungen, Seismik) auf unterschiedliche Weise einsetzen.

Im hier **vorgelegten Gutachten** erfolgte die **Analyse und Bewertung** der genauen Verwendung des **geologischen Modells** des **Thüringer Beckens** am Beispiel des gleichnamigen Gebiets zur Methodenentwicklung (GzME). Das **NBG** hat hierfür die folgenden **Fragen** formuliert:

- Was beinhaltet das verfügbare **3D-Modell** des **Thüringer Beckens**?
- Lassen sich die **Arbeitsschritte** der **Modellerstellung** nachvollziehen?
- Wird das **Modell** durch die BGE im Schritt 2 der Phase I **fortgeschrieben**?
- Liegen Informationen zu den **Ungewissheiten** des **Modells** vor?
- Ist die **Vorgehensweise** am gewählten **GzME** auf andere TG **übertragbar**?

2. Vorgehensweise bei der Begutachtung

Ausgangspunkt für die Begutachtung war die **Prüfung** des **öffentlich** verfügbaren **Materials** bzgl. des 3D-Modells vom Thüringer Becken. Wesentliche Informationen lassen sich in dem Rahmen aus der **Anlage** zur „**Methodenbeschreibung** zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ (BGE, 2022) entnehmen. Das Modell selber ist mit einer Webanwendung auf Basis der Software GST der Firma GiGa infosystems, dem sogenannten **„3D-Viewer“**, über das **Internetportal** der **BGE** einsehbar (https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/3d-viewer/). Dieser dient aber lediglich der **Visualisierung**. Daten sind nicht zugänglich. Es handelt sich dabei um die **ursprünglich** vom Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) bereitgestellte **Version** des Modells.

Weiterhin wurde eine umfangreiche **Literaturrecherche** durchgeführt zum Stand der Wissenschaft bei der **Erstellung** von **3D geologischen Modellen** aus Erkundungsdaten. Diese Art der Modelle stellen eine **Veredelung** von Daten dar und bilden eine wesentliche **Entscheidungsgrundlage**. Aus den gesammelten und erhobenen Daten werden Informationen extrahiert, welche in die Modelle überführt werden und am Ende eine Beurteilung mit Bezug zum **Standort** mit der **bestmöglichen Sicherheit** ermöglichen (Kühn et al., 2021a).

Abschließend erfolgte eine umfangreiche **Akteneinsicht** von nicht öffentlichem Material, dem aktuellen Modell des Thüringer Beckens und den zugrunde liegenden Daten. Diese wurde im **Datenarchiv** der BGE in Peine am **13. und 14. Dezember 2022** durchgeführt. Während des Besuchs wurde das genannte Themenspektrum mit den **Mitarbeiter*innen** der **BGE ausführlich erörtert**.

3. Aufbau des 3D-Modells Thüringer Becken

Das **Thüringer Becken umfasst** eine Fläche von ca. 12 000 km² und liegt vorwiegend im Freistaat Thüringen; kleinere Gebietsanteile gehören zu Bundesländern Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen. Es wird vom Thüringer Wald im Südwesten, dem Thüringischen Schiefergebirge im Südosten und von Harz und Kyffhäuser im Norden begrenzt. **Geologisch** gesehen handelt es sich um eine **Mulde**, die mit oberkarbonischen bis triassischen **Sedimenten gefüllt** ist und durch mehrere NW-SO verlaufenden **Verwerfungen** in einzelne **tektonische Schollen** untergliedert ist. Detaillierte Informationen zu den geologischen Verhältnissen gibt Seidel (2003).

Das vom **TLUBN** an die BGE gelieferte **3D-Modell** des Thüringer Beckens wurde im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Projekts („Spitzenforschung und Innovation in den Neuen Ländern – **Verbundprojekt INFLUINS**: Integrierte Fluiddynamik in Sedimentbecken“) an der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) in den Jahren **2010 bis 2014** entwickelt. Zur Modellerstellung wurde das Programmpaket „Paradigm SKUA-GOCAD“ verwendet. *„Ziel war es, ein instruktives Übersichtsmodell der Thüringer Mulde bereitzustellen, das auch für großräumige hydrogeologische Modellierungen nutzbar ist“* (unveröffentlichte Erläuterungen zum geologischen 3D-Modell des Thüringer Beckens; aktuell ist die Internetseite des Projekts nicht erreichbar). Die **Grundlage** des Modells sind **Erkundungsdaten**, die im Rahmen der umfangreichen Erforschung von Erdöl- und Erdgasvorkommen sowie bei der Suche nach Grundwasser, Kalisalz, Uran und Buntmetallen erhoben wurden.

Der **Aufbau** des **3D-Modells** erfolgte konkret mit Hilfe der **digitalen Übersichtskarte** von Thüringen (Maßstab 1: 200 000), ergänzt durch die entsprechenden Kartenwerke der angrenzenden Bundesländer. Weiterhin sind **Bohrungsdaten** des Geologischen Landesarchivs eingegangen: 2 800 mit eine Teufe von über 100 m und 1 400 von 30 m bis 100 m. Die **Tiefenlinienpläne** der Basis des Oberen Muschelkalks von Brosin et al. (1969), der Basis Zechstein von Seidel (2004) und der Oberfläche des variszischen Grundgebirges (Paläozoikum) von Willenberg (1969) wurden bei der Modellierung ebenfalls verwendet. Eine weitere Grundlage ist die **Lithofazieskarte** des Quartär des Zentralen Geologischen Instituts (Maßstab 1: 50 000, Erscheinungsjahre 1971-1987). Reflexionsseismische Messungen wurden aufgrund mangelnder Qualität bei der Modellerstellung nicht berücksichtigt. Die geografische Lage des Gebiets ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Ausdehnung des 3D-Modells Thüringer Becken, hier mit der Oberfläche des Zechsteins dargestellt, projiziert auf die Landkarte in entsprechender geographischen Lage (3D-Viewer, BGE).

Das geologische **Modell** ist **aufgebaut** aus insgesamt **14 Basis- bzw. Oberflächen** verschiedener **stratigrafischer Schichteinheiten** der Erdneuzeit (Känozoikum), der Erdmittelzeit (Mesozoikum) und des Erdaltertums (Paläozoikum; vgl. STDK, 2022). Darüber hinaus sind tektonisch verursachte strukturelle Veränderungen in Form von **59** verschiedenen **geologischen Störungszonen** Teil des Modells (Abbildung 2).

Das als **GzME** von der BGE ausgewählte **TG** (078_02TG_197_02IG_S_f_z) befindet sich im **Thüringer Becken** und bezieht sich auf die **stratigrafische Einheit Zechstein**, die das Wirtsgestein **Steinsalz in stratiformer Lagerung** enthält. Es erstreckt sich über die Bundesländer Thüringen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen. Es umfasst eine **Fläche** von **6 200 km²** und hat eine maximale **Mächtigkeit** von **1 200 m**. Die Basisfläche des Teilgebiets befindet sich in einer **Teufenlage** von **400 bis 1 500 m** unterhalb der Geländeoberkante (Abbildung 3).

Das **GzME Thüringer Becken** ist **größer** als das **INFLUINS-Modell**. Im Modell des TLUBN fehlen die Landesteile von Sachsen-Anhalt im Nordosten (vgl. Abbildungen 1-3).

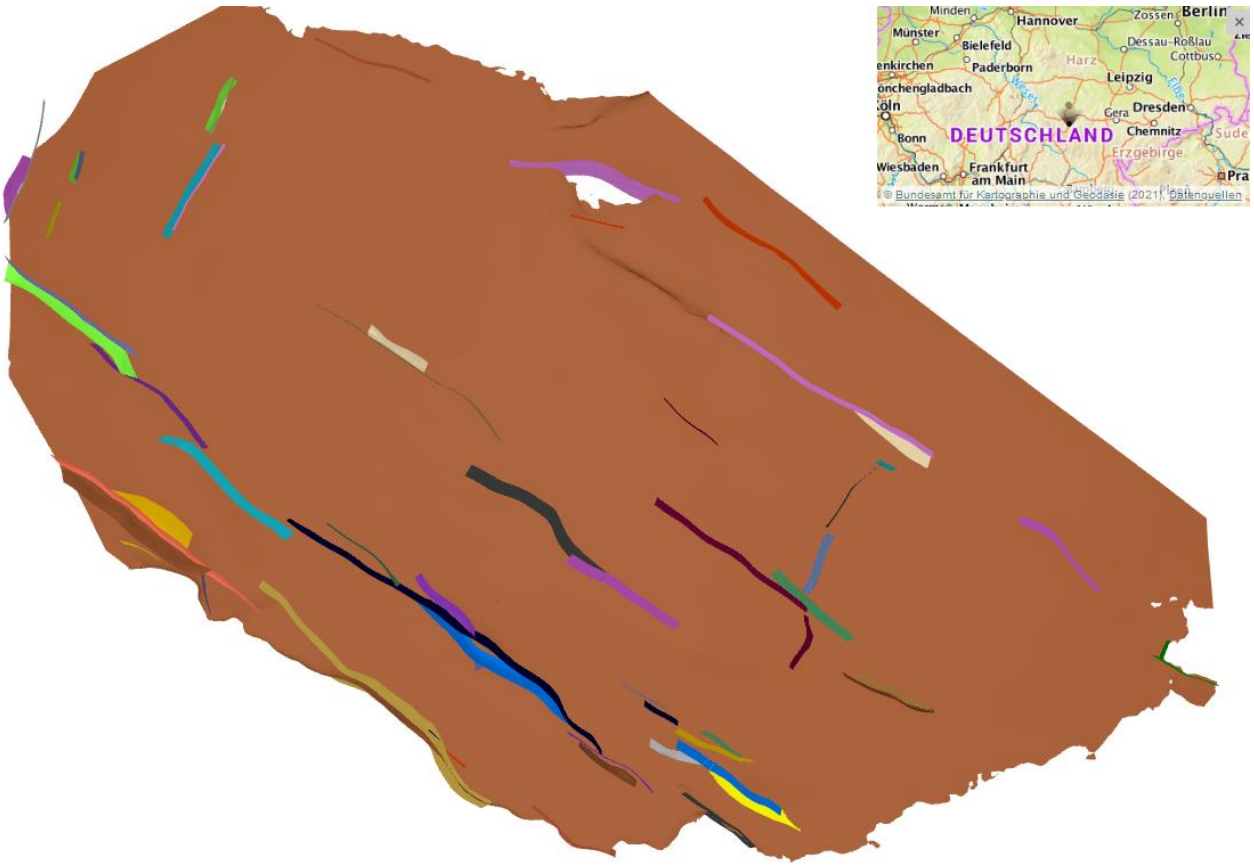

Abbildung 2: Darstellung der Basisfläche der stratigrafischen Einheit des Zechsteins im INFLUINS-Modell zusammen mit den 59 im Modell integrierten Störungsflächen (3D-Viewer, BGE).

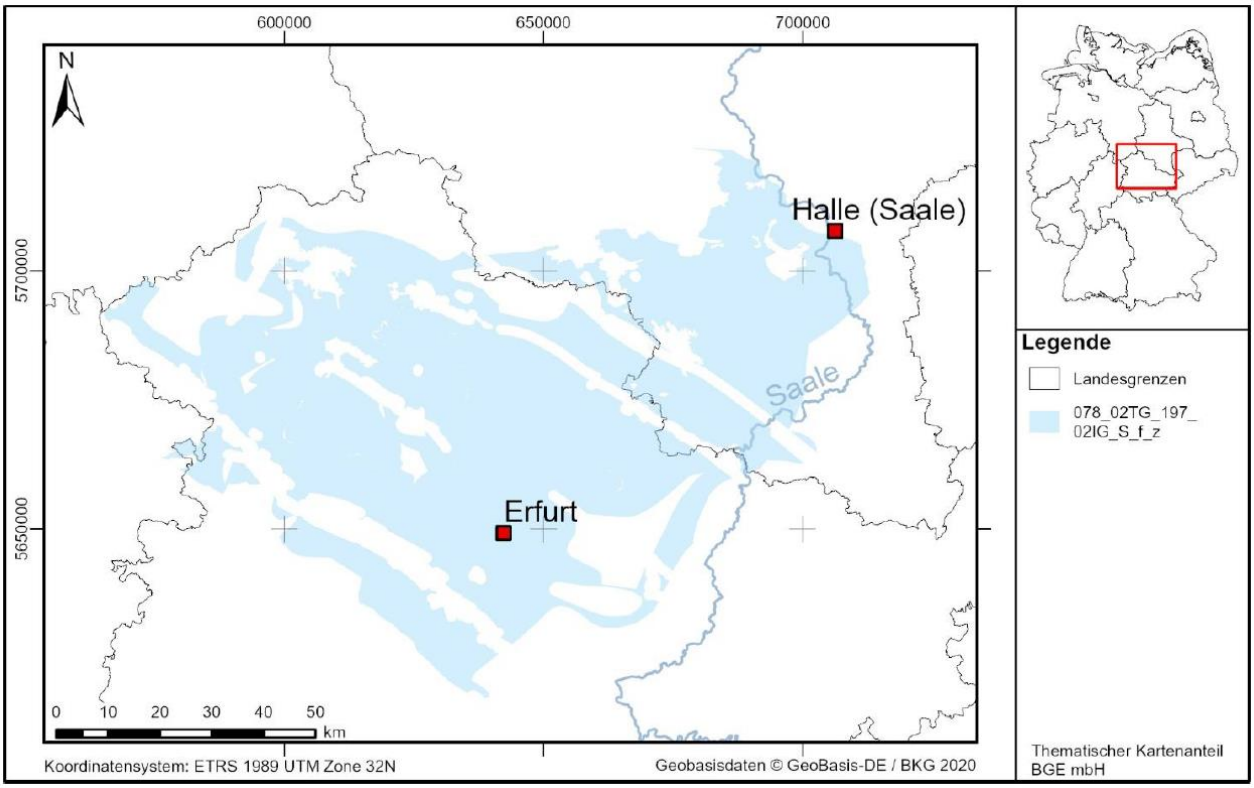

Abbildung 3: Lage des GzME 078_02TG_197_02IG_S_f_z. Es befindet sich in den Bundesländern Thüringen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen (BGE, 2022).

4. Nachvollziehbarkeit der Arbeitsschritte der Modellerstellung

Statische **geologische Modelle** waren u. a. eine wesentliche **Basis** der BGE bei der Erstellung des **„Zwischenberichts Teilgebiete“** (BGE, 2020). Die Eingangsdaten und Modellierungsmethoden bei der Modellerstellung richten sich nach der jeweiligen Zielsetzung. Generell gilt, dass die geologischen Modelle eine virtuelle Abfrage der **Gesteinsarten** und ihrer **Eigenschaften** ermöglichen sollen (Kühn et al., 2021a).

Erkundungsdaten bilden die unabdingbare **Grundlage** für die **Erstellung** geologischer Modelle. Einerseits werden **Gesteine** über **Bohrungen** gewonnen und dann geologisch, geophysikalisch und geochemisch untersucht. So ergeben sich über die Gesteinsanalysen des Bohrmaterials sogenannte **Schichtenverzeichnisse**. Sie werden für unterschiedliche Gesteinsarten aus einer Bohrung zu Einheiten zusammengefasst. Diese sind wiederum die Basis für **Profilschnitte** und **geologische Karten**. Andererseits werden **geophysikalische Messmethoden** eingesetzt, um den Untergrund beispielsweise mit seismischen Signalen zu **„durchleuchten“** und so indirekt **„tomografisch“** zu untersuchen (Lüth et al., 2021). **Feldgrößen** wie **Gebirgsspannung, Fluiddruck und Temperatur** werden in der Tiefe direkt gemessen. Über die Kombination und gemeinsame **Interpretation** aller Messergebnisse ergibt sich so am Ende ein **Abbild** des geologischen Untergrunds (Abbildung 4).

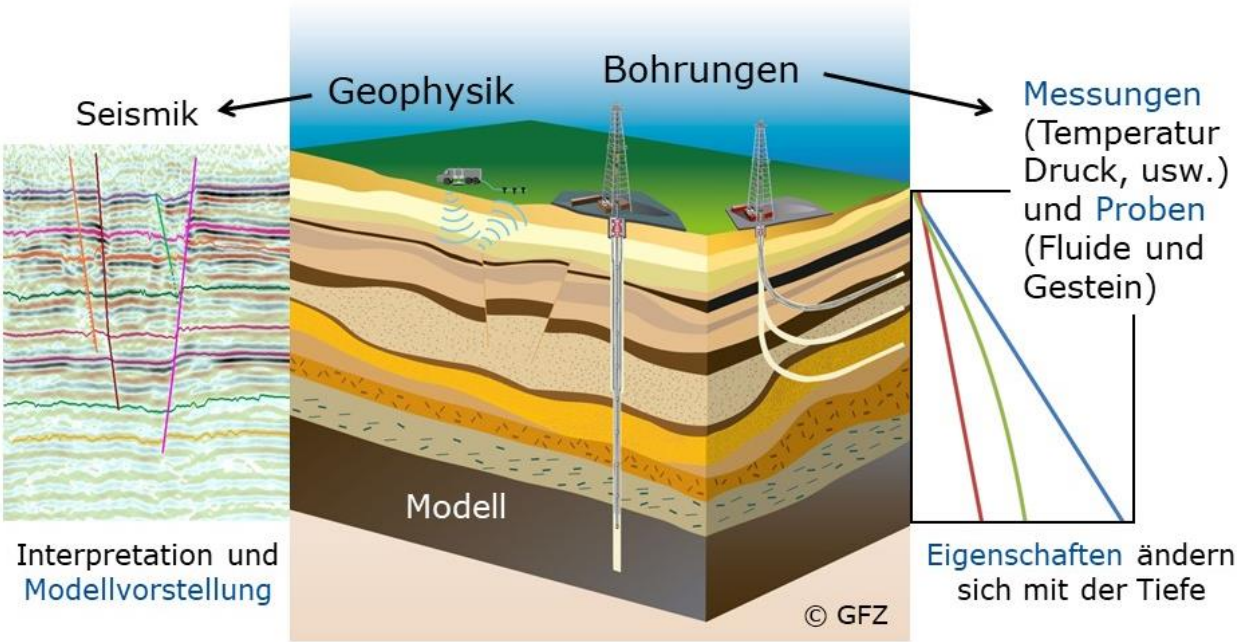

Abbildung 4: Basierend auf verschiedenen Beobachtungstechnologien wird das geologische Modell eines Untersuchungsgebiets erstellt. Direkte Messmethoden finden Anwendung in Bohrungen im Untergrund, aus denen Gesteins- und Fluidproben gewonnen werden. Diese werden mit den Ergebnissen der indirekten Messmethoden kombiniert und interpretiert (Kühn et al., 2021a).

Im Rahmen der **Modellerstellung** spielt die **Interpretation** der Basisdaten eine große Rolle und erfordert **fachliche Expertise** und hinreichende **Erfahrung**. Fachliche Expertise ist hier essenziell, hat aber auch zur Folge, dass das **Ergebnis** von der **bearbeitenden Person** abhängt. Daher ist auch die umfangreiche und vollständige **Dokumentation** für eine bestmögliche **Nachvollziehbarkeit** und **Reproduzierbarkeit** der geologischen Modelle unbedingt erforderlich (Kühn et al., 2021b).

Im Prozess der **geologischen Modellerstellung** werden an zahlreichen Stellen **Entscheidungen** getroffen, und zwar aufgrund der oben beschriebenen Verbindung sehr **heterogener Daten** (Abbildung 4), die sämtlich vom **Vorwissen** des **Modellierers** abhängen. Dazu kommt, dass die Daten immer aus verschiedenen Quellen stammen und darüber hinaus in ihrer Qualität variieren. Es ist daher zu berücksichtigen, dass zwei Experten mit derselben Datenbasis zu **unterschiedlichen Ergebnissen**, das heißt, zu unterschiedlichen Modellen kommen können (Wellmann, 2020).

Die **Arbeitsschritte** der Modellerstellung des **INFLUINS-Modells**, das in Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens vom TLUBN der BGE zur Verfügung gestellt wurde, sind **nicht nachvollziehbar**. Es gibt keine publizierte oder bei der BGE im Archiv vorliegende Dokumentation dazu. Aus den oben genannten Gründen kann daher zur Güte dieses Modells keine Aussage getroffen werden. Daher sollte *„das geologische 3D-Modell des Thüringer Beckens […] grundsätzlich nur im Übersichtsmaßstab genutzt werden […] da sich] bei punktgenauen Datenabfragen […] größere Abweichungen von den tatsächlichen Verhältnissen ergeben“* (unveröffentlichte Erläuterungen zum geologischen 3D-Modell des Thüringer Beckens).

Die **Arbeitsschritte** zur **Modellerweiterung** (vgl. folgenden Abschnitt) mit Blick auf den Zechstein und die Steinsalzformationen Staßfurt und Werra, sind demgegenüber durch die Auftragnehmerin der BGE ausführlich **beschrieben** und gut **nachvollziehbar**.

5. Fortschreibung und Entwicklung des Modells

Das geologische **3D-Modell** vom **Thüringer Becken** wurde durch eine Auftragnehmerin der BGE **weiterentwickelt** für die vertiefte **Anwendung** der Mindestanforderungen **Mächtigkeit** und **Tiefenlage** in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens. Für die umfassende Beschreibung des **Wirtsgesteinsbereichs** im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) werden vor allem **gebietsspezifische Informationen** verwendet (BGE, 2022). Über verschiedene **Prüfschritte** werden die untersuchten Gebiete in vier **Kategorien** eingeteilt. Kategorie D beschreibt dabei Gebiete, die für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ungeeignet sind. Kategorie C weist Bereiche mit einer sehr geringen Eignung aus. In die Kategorien A und B werden Gebiete mit bester bzw. weniger guter Eignung zur **weiteren Bearbeitung** und erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) einsortiert. Eine **Fortschreibung** des Thüringer Modells ist notwendig, um das **stratigrafisch** (erdgeschichtlich) ermittelte TG **lithologisch** (gesteinsspezifisch) weiter eingrenzen zu können.

Einerseits wurde das **Modell** nach **Nordosten** um das Gebiet des Landes **Sachsen-Anhalt erweitert**, das zum TG Thüringer Becken gehört (vgl. Abbildungen 1-3). Hierfür wurden im INFLUINS-Modell die Oberfläche und die Basis des **Zechsteins** ergänzt. Andererseits wurde für das gesamte TG die **Steinsalzformation Staßfurt** und für den Südwesten die des **Werra** neu **modelliert**, um die jeweiligen relevanten Teiluntersuchungsräume (TUR) abzudecken.

Die verwendeten **Eingangsdaten** für die Modellerweitung wurden der **Bohrlochdatenbank** vom TLUBN und dem **Bohrdatenarchiv** des Landesamts für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) entnommen. Zusätzlich wurden, soweit vorhanden, **bohrlochgeophysikalische Messdaten** mit berücksichtigt. Alle verfügbaren Daten wurden verwendet. So fanden **76 Bohrungen** für das **Werra** Eingang in die Arbeiten sowie **977** für das **Staßfurt** an deren **Oberfläche** und **699** an der **Basis** der Formation. Im Rahmen der **Modellentwicklung** erfolgte eine **Plausibilitätsprüfung** der Bohransatzpunkte. Die Arbeiten sind gut **nachvollziehbar** im nichtöffentlichen Bericht dargelegt.

Im Rahmen der **Modellerweiterungen** wurden auch die **Störungen** noch einmal **angesehen**. Es erfolgte hier eine Bewertung der genauen Lage. Für alle **59** dieser **Strukturen** wurden Tiefenverläufe durch das TLUBN geliefert. So konnte des **Einfallen** und die **Bewegungsrichtung** der Störungen bestimmt werden. Im Modell sind nur die Störungen aufgenommen, die einen **Versatz** zeigen. Die Modellierung der Horizontflächen (Zechstein, Werra und Staßfurt) erfolgte unter Berücksichtigung der Störungszonen.

Für die **Aufarbeitung** vorhandener **bohrlochgeophysikalischer Messdaten** (sogenannte Logs = Protokolle) aus **37 Bohrungen** des Zechsteinsalinars wurde durch die BGE ein weiterer Auftrag vergeben. In dem Rahmen erfolgte die **Konvertierung** und **Auswertung** der Messdaten. Nur analog vorliegende **Messprotokolle** wurden **digitalisiert**. Durch die **Kombination** einzelner **Protokolle** aus einer Bohrung ist es möglich **Schichten** zu ermitteln und **lithologisch abzugrenzen**. Der Unterschied zwischen Steinsalz und Kalisalzen sowie auch der zu Tonen ist sehr gut sichtbar. Die Homogenität in den verschiedenen Salzformationen oder auch anhydritische (Mineralklasse der Sulfate, Evaporitmineral) Lagen sind jedoch nicht gut belegt und daher z. T. ungewiss.

Das **erweiterte Modell** wird durch die BGE aktuell **genutzt**, um die verschiedenen **TUR abzugrenzen**, die **Kategorien** C und D **auszuweisen** und die weitere Unterscheidung zwischen A und B vorzunehmen. Der bisherige Stand ist in Abbildung 5 dargestellt. Nach der Kategorisierung werden A-Kandidaten im **INFLUINS-Modell** noch einmal geprüft mit Blick auf die erneute **Anwendung** und **Bewertung** der **geoWK**.

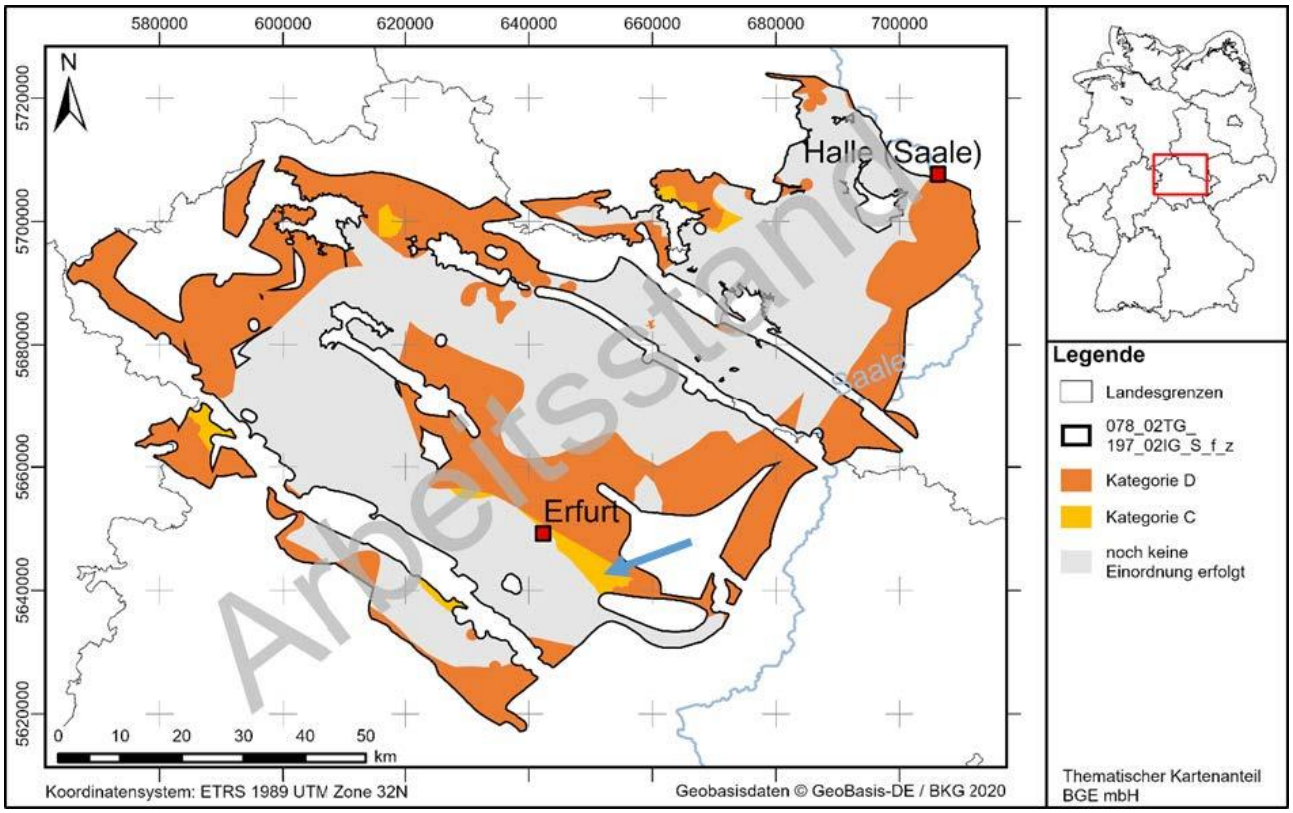

Abbildung 5: Einstufung von Gebieten in die Kategorien C und D im Thüringer Becken. Der blaue Pfeil zeigt die Lokation eines Teiluntersuchungsraums der Kategorie C (BGE, 2022).

6. Ungewissheiten des Modells Thüringer Becken

Geologische Modelle enthalten oft signifikante **Ungewissheiten** in Form von **Ungenauigkeiten und Unbestimmtheiten**, da es bisher **keine umfassende Methode** gibt, den untersuchten oder genutzten Untergrund direkt, vollumfänglich und räumlich hoch aufgelöst zu messen. Die **Beschreibung** und **Typisierung** geologischer Ungewissheiten ist daher schon länger Gegenstand **wissenschaftlicher Betrachtungen** (Mann, 1993). Bedeutende Ungewissheiten liegen in der Erstellung des **konzeptionellen Modells** selbst und diese sind grundsätzlich schwer abzuschätzen (Wellmann und Caumon, 2018).

Dreidimensionale geologische **Modelle** sind **komplex** und haben daher **Defizite**. Es sind dabei insbesondere die **Arbeitsabläufe** und typischerweise die noch häufigen **manuellen Arbeitsschritte**, die das hervorrufen. Dadurch ist es **schwer**, einmal erstellte Modelle zu **revidieren** oder **fortzuschreiben** und neu gewonnene Daten **einzufügen**. Es ist bislang noch der **Normalfall**, dass nur ein **einziges Modell** erstellt wird, obwohl die Ungewissheiten der Basisdaten immer auch verschiedene Möglichkeiten und eine Anzahl an Realisierungen zulassen (Wellmann, 2020).

Lösungen bieten sich in dem Zusammenhang mit der zunehmenden computerbasierten **Automatisierung** der geologischen Modellierung an. Ein wichtiger Schritt ist die **reproduzierbare Dokumentation** der komplexen **Arbeitsabläufe**. Es gibt bereits Programme und Umgebungen, die in der Lage sind, die Arbeitsschritte in ihrer Gesamtheit bei der Modellerstellung zu registrieren. Hier ergibt sich auch die Möglichkeit der **Qualitätskontrolle**, weil auch die **Ungewissheiten** in der Abfolge der Erstellung berücksichtigt werden können (Singh et al., 2013).

Mit der **Erweiterung** des geologischen **Modells** des **Thüringer Beckens** wurde zum ersten Mal auch eine **Qualitätsprüfung** und **Nachbearbeitung** mit Blick auf die **Ungenauigkeiten** im Modell durchgeführt. Die neu erstellten Flächen wurden mit den Eingangspunkten aus den verwendeten Tiefenlinienplänen und Bohrlochdaten verglichen und der Abstand dazwischen (sogenannte Residuen) berechnet. **Ziel** der Modellierung waren möglichst **glatte Horizontflächen** und die **Reproduktion** der **Messdaten** aus den Bohrungen, den verfügbaren Schichtenverzeichnissen und den geophysikalischen Messprotokollen.

Die erstellten **Flächen** des **Zechsteins** (Ober- und Unterkante) wurden unter anderem im Nachgang **manuell** innerhalb des Modells **geprüft**. Wesentlich ist, dass sich Flächen nicht schneiden dürfen. Dies erforderte z. T. **Korrekturen** im Modell. Das kann besonders an den Rändern des Modells auftreten. Eine **umfangreichere Dokumentation** der durchgeführten **Anpassungen** und getroffenen **Entscheidungen** durch die Bearbeiter*in wäre **wünschenswert**, um die **Reproduzierbarkeit** und das **Verständnis** der Modellanpassungen in größerer Detailtiefe nachvollziehen zu können.

Die **Abweichungen** zwischen den erstellten **Horizontflächen** des **Zechsteins** und den **Bohrlochdaten** werden im Bericht in zweierlei Art durch die Auftragnehmerin gegeben. In der **kartenbasierten Darstellung** lassen sich für die Oberkante sowie für die Basisfläche die **größten Residuen** mit **+/- 25 m** ablesen, wobei die **allermeisten** im Bereich von **+/- 5 m** liegen. Die größten Abweichungen ergeben sich entlang von Störungen und an den Modellrändern. Die **quantitative Auswertung** zeigt, dass die **Oberkante** seine **größten Abweichungen** mit **-555 m** nach unten und **+572 m** nach oben aufweist. Der **Median** aller **115 426 Punkte** liegt bei **-0,1 m** und der berechnete Durchschnitt ist **2,4 m**. Für die **Basisfläche** sind die **größten Abweichungen -1 043 m** nach unten und **+1 458 m** nach oben. Der **Median** aller **133 274 Punkten** liegt bei **-0,2 m** und der berechnete

Durchschnitt ist **1,4 m**. Statistisch gesehen, weisen die erstellten Flächen eine **gute Genauigkeit** auf, obwohl einige Punkte sehr große Abweichungen aufweisen. Besonders der **geringe Medianwert** zeigt, dass die **„Maximalwerte“ Ausreißer** nach oben bzw. nach unten darstellen, welche meist an den Störungs- und Randbereichen auftreten. Das ist die bislang erste **Plausibilitätsprüfung** für das Modell des Thüringer Beckens. Im Bericht fehlen genaue Angaben zur Anzahl der Ausreißer (Boxplots wären geeignet dazu einen Überblick zu geben) und eine detaillierte technischen Beschreibung und Erklärung. Es erfolgt keine Bewertung, ob die Abweichungen im Bereich der ausgeschlossenen Gebiete der Störungen liegen und daher vernachlässigt werden können.

Die potenzielle Wirtsgesteinsformation **Staßfurt-Steinsalz** wurde für das gesamte geologische Modell erstellt. Die **Modellierung** erfolgte basierend auf der **Auswertung** von **1 039 Bohrungen** anhand der verfügbaren **Schichtenverzeichnisse**. Stellenweise befand sich der erstellte Horizont außerhalb des begrenzenden Zechstein im INFLUINS-Modell. Es mussten daher **34 Bohrungen** in Relation zur Oberkante des Zechsteins mit benachbarten Bohrungen **korrigiert** werden. Die **Mächtigkeit** des Staßfurt-Steinsalzes beträgt im Modell **bis zu 650 m**.

Die **Abweichungen** zwischen den erstellten **Horizontflächen** des **Staßfurt-Steinsalzes** und den **Bohrlochdaten** werden im Bericht in zweierlei Art gegeben. In der **kartenbasierten Darstellung** lassen sich für die Oberkante sowie für die Basisfläche die **größten Residuen** mit **+/- 2,5 m** entlang von Störungen und TUR-Kanten erkennen. Die **meisten Werte** liegen bei **+/- 0,5 m** oder darunter. Die **quantitative Auswertung** zeigt, dass die **Oberkante** seine **größten Abweichungen** mit **-5,5 m** nach unten und **+6,0 m** nach oben aufweist. Der **Median** liegt bei **-0,004 m** von insgesamt **977 Punkten** die in die Berechnung eingegangen sind. Für die **Basisfläche** sind die **größten Abweichungen** **-2,1 m** nach unten und **+3,9 m** nach oben. Der **Median** liegt bei **-0,003 m** von insgesamt **699** verfügbaren **Punkten**. Die **Genauigkeit** der modellierten Staßfurt-Steinsalz-Flächen ist **sehr gut**.

Die potenzielle Wirtsgesteinsformation **Werra-Steinsalz** wurde nur für den **südwestlichen Bereich** des Modells erstellt, dort wo die für diesen Horizont relevanten **TUR** liegen. Es sind Protokolle **geophysikalischer Messungen** aus **76 Bohrungen** in die **Modellierung** mit eingeflossen. Unstimmigkeiten traten an der **Basis** des **Werra**-Steinsalzes auf. In dem Bereich gab es **Überschneidungen** mit der Basisfläche des **Zechsteins**, da hier die beiden Schichten teilweise zusammenfallen. Der Zechstein wurde an den entsprechenden Stellen korrigiert, sodass sich die **Residuen** auf **< +/- 5,0 m reduzierten**. Es gab vorher bis zu 150 m Abweichungen. Die **Mächtigkeit** des Werra Steinsalzes beträgt im Modell **bis zu 350 m**.

Die **Abweichungen** zwischen den erstellten **Horizontflächen** des **Werra-Steinsalzes** und den **Bohrlochdaten** werden im Bericht in zweierlei Art gegeben. In der **kartenbasierten Darstellung** lassen sich für die Oberkante sowie für die Basisfläche die **größten Residuen** mit **+/- 5,0 m** entlang von Störungen und den Modellrändern erkennen. Die **meisten Werte** liegen bei **+/- 1,0 m** oder darunter. Die **quantitative Auswertung** zeigt, dass die **Oberkante** seine größten Abweichungen mit **-4,0 m** nach unten und **+3,2 m** nach oben aufweist. Der **Median** aller eingeflossenen **76 Punkte** liegt bei **0,003 m**. Für die **Basisfläche** sind die größten Abweichungen **-0,01 m** nach unten und +**0,000 01 m** nach oben. Der **Median** von **65 Punkten** liegt bei **-0,000 001 m.** Die **Genauigkeit** der modellierten Steinsalz-Flächen des Werra ist **sehr gut**.

Die **Untersuchungen** der **Ungewissheiten** des **geologischen Modells** vom Thüringer Becken entsprechen **nicht** dem **Stand der Wissenschaft**. Die beschriebenen **ersten Arbeiten** zur Ermittlung von **Ungenauigkeiten** des Modells sind ein guter Start, aber der Umfang ist bislang sehr begrenzt und es müssen auch Untersuchungen zur Bewertung von **Unbestimmtheiten** folgen. Auch wenn es gerade auf dem Gebiet der Erstellung 3D geologischer Modelle große Fortschritte und aktuell viel Forschung gibt, so sind doch bereits viele **moderne Methoden verfügbar**, um die **Ungewissheiten** von Modellen zu **quantifizieren**. Diese sollten im Rahmen des **Standortauswahlverfahrens** auch genutzt werden. So ist es möglich, die Ungewissheit **struktureller Daten** bei der geologischen **3D-Inversion** mit zu berücksichtigen (Wellmann et al., 2010). Ungewissheiten haben eine Bedeutung für geologische Modelle und können mit Hilfe der **Informationsentropie** (mittlerer Informationsgehalt) als **Qualitätsmaß** der Modelle eingesetzt werden (Wellmann und Regenauer-Lieb, 2012). Darüber hinaus gibt es Ansätze mit **Variogrammverfahren** (zu räumlichen Beziehungen benachbarter Punkte), um die **Genauigkeit** von geologischen Modellen des Untergrunds sogar zu **verbessern** (McCormack et al., 2018). Auch für die **Nachbearbeitung** stehen Methoden zur Verfügung zur **Reduzierung** der **Ungewissheiten** in berechneten geologischen Modellen (Yamamoto et al., 2014).

7. Übertragbarkeit der Vorgehensweise auf andere Teilgebiete

Die **Methodenentwicklung** der Geosynthese im Rahmen der rvSU ist soweit **abgeschlossen**, dass sie auf die **anderen TG übertragen** werden kann, insbesondere die **Kategorisierung** (A, B, C, D). Die Kategorien C und D können dabei nach Möglichkeit direkt über die **Bohrlochinformationen** ermittelt werden. Für die Einteilung in die Kategorien A bzw. B kann nach der Planung der BGE dann die **Wirtsgesteinsmodellierung** herangezogen werden, wie sie für das Thüringer Becken durchgeführt wurde.

Im Zwischenbericht Teilgebiete (BGE, 2020) sind **14 TG** für den **Wirtsgesteinstyp Steinsalz** in **flacher Lagerung** aufgeführt. Es gibt 1 TG im Malm, 2 TG im Keuper, 3 TG im Muschelkalk und 8 TG im Zechstein:

- 077_00TG_192_00IG_S_f_jo: Bundesländer Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen; **Malm**; Fläche 4 992 km^2; max. Mächtigkeit 1 200m; Teufe der Basisfläche 400-1 500 m
- 075_01TG_189_01IG_S_f_km: Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Hamburg; **Keuper**; Fläche 475 km^2; max. Mächtigkeit 880 m; Teufe 640-1 500 m
- 075_02TG_189_03IG_S_f_km: Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein; **Keuper**; Fläche 61 km^2; maximale Mächtigkeit 330 m; Teufe der Basisfläche 870-1 500 m
- 076_01TG_191_01IG_S_f_so: Bundesland Niedersachsen; **Muschelkalk**; Fläche 2 133 km^2; maximale Mächtigkeit 1 200 m; Teufe der Basisfläche 400-1 500 m
- 191_02IG_S_f_so: Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein; **Muschelkalk**; Fläche 123 km^2; maximale Mächtigkeit 580 m; Teufe der Basisfläche 1 150-1 500 m
- 191_05IG_S_f_so: Bundesland Niedersachsen; **Muschelkalk**; Fläche 459 km^2; maximale Mächtigkeit 1 010 m; Teufe der Basisfläche 500-1 500 m
- 197_01IG_S_f_z: Bundesländer Sachsen-Anhalt und Brandenburg; **Zechstein**; Fläche 2 582 km^2; maximale Mächtigkeit 910 m; Teufe der Basisfläche 400-1 500 m

- 197_02IG_S_f_z: Bundesländer Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen; **Zechstein**; Fläche 6 151 km^2; max. Mächtigkeit 1 200 m; Teufe Basisfläche 400-1 500 m
- 197_03IG_S_f_z: Bundesländer Bayern, Hessen, Thüringen; **Zechstein**; Fläche 1 172 km^2; maximale Mächtigkeit 540 m; Teufe der Basisfläche 400-1 230 m
- 197_04IG_S_f_z: Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen; **Zechstein**; Fläche 4 574 km^2; max. Mächtigkeit 1 200 m; Teufe 400-1 500 m
- 197_05IG_S_f_z: Bundesländer Niedersachsen und Sachsen-Anhalt; **Zechstein**; Fläche 3 807 km^2; maximale Mächtigkeit 1 200 m; Teufe der Basisfläche 400-1 500 m
- 197_06IG_S_f_z: Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen; **Zechstein**; Fläche 1 541 km^2; maximale Mächtigkeit 830 m; Teufe der Basisfläche 400-1 500 m
- 197_07IG_S_f_z: Bundesland Schleswig-Holstein und Nordsee; **Zechstein**; Fläche 29 km^2; maximale Mächtigkeit 740 m; Teufe der Basisfläche 1 490-1 500 m
- 197_08IG_S_f_z: Bundesland Mecklenburg-Vorpommern und Ostsee; **Zechstein**; Fläche 318 km^2; maximale Mächtigkeit 340 m; Teufe der Basisfläche 1 060-1 500 m

Die **Vorgehensweise** der BGE im **GzME Thüringer Becken** kann auf die oben genannten weiteren TG für das Wirtsgestein **Steinsalz** in **flacher Lagerung übertragen** werden. Das ist natürlich **abhängig** von der bestehenden **Datenlage** in den anderen TG, die im folgenden betrachtet werden soll. Aufgrund der umfassenden und langjährigen **Erkundungstätigkeiten** ist die Datenlage im TG Thüringer Becken ausgesprochen **gut**.

Die Staatlichen **Geologischen Dienste** (SGD) der norddeutschen Bundesländer haben gemeinsam unter Federführung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ein digitales, grenzüberschreitend abgestimmtes **strukturgeologisches 3D-Modell** des **Norddeutschen Beckens** erstellt (TUNB). Die Umsetzung des 3D-Modells erfolgte auf Basis einer wissenschaftlichen **Bewertung** und **Interpretation** verfügbarer **strukturgeologischer Daten und Informationen** aus Kartenwerken, Tiefbohrungen und reflexionsseismischen Untersuchungen. Die modellierten Horizonte erstrecken sich von der **Erdoberfläche bis** zur Basis des **Zechsteins**. Zusätzlich wurden wichtige **Störungen** und die **Salzstrukturen** des Norddeutschen Beckens modelliert. Das Strukturmodell deckt die **Landesflächen** der **Bundesländer** Berlin, Brandenburg, Bremen, Mecklenburg-Vorpommern, Hamburg, Schleswig-Holstein und der deutschen Nordsee sowie große Teile der Landesflächen von Niedersachsen und Sachsen-Anhalt ab.

Die **14 TG** des Wirtsgesteins Salz in flacher Lagerung werden so gut wie **vollständig** durch das TUNB **abgedeckt**. Lediglich für das TG 197_03IG_S_f_z des Werra-Fulda-Beckens ist dies nicht ganz der Fall. An dieser Stelle fehlt ein kleiner Teil im Bereich der Länder Thüringen und Bayern, das in ähnlicher Weise, wie beim Thüringer Becken beschrieben, ergänzt werden kann. Die notwendigen Bohrdaten dafür liegen vor. Die Modellüberdeckung ist eine wesentliche und sehr gute **Grundlage** für die **Übertragung** der **Herangehensweise**.

Die **Datenlage** ist geschätzt in allen **TG** mit Blick auf verfügbare **Bohrungen** ausreichend **gut** für die engere **Eingrenzung** und erste **Kategorisierung**. Dies ist wie erwähnt darin begründet, dass das Salz selbst umfangreich erkundet wurde oder Untersuchungsergebnisse erzielt wurden im Rahmen der Erdölexploration. Zunächst soll die genaue Auswertung der Bohrungen erfolgen und darüber entschieden werden inwieweit eine erweiterte Datenrecherche durchgeführt werden muss. Es gibt

Kandidaten unter den TG, die auch ohne die Modellierung der Wirtsgesteinsformation bewertet werden können. Die Digitalisierung von Bohrdaten aussichtsreicher Gebiete wird prioritär behandelt. Nur wenn ein Gebiet ggf. in die **Kategorie A** fällt wird eine **geologische Modellierung** der **Steinsalzformation** durch die BGE in Erwägung gezogen.

8. Empfehlungen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens

Das **Standortauswahlverfahren** ist gemäß StandAG ein sehr gutes Suchverfahren, weil es eine **Fehlerkultur** beinhaltet. Es ist explizit ein **lernendes Verfahren**, was in jeder Phase, für jeden Schritt und zu jeder Zeit genutzt werden muss. Im Wesentlichen bleiben die in den vorhergehenden Berichten gemachten **Empfehlungen** zum **GzME Thüringer Becken** erhalten bzw. werden durch das hier vorgelegte Gutachten für die **nächsten Schritte** noch einmal bekräftigt:

- Strategien müssen erarbeitet werden, **wie methodisch mit einer unterschiedlichen Datenlage umgegangen werden kann** bzw. muss. Tests sind notwendig bzgl. der Heterogenität und daraus resultierenden Ungewissheiten.
- Der **Einfluss** einer **inhomogenen Datenbasis** mit z. B. vielen Daten an wenigen Punkten auf die entwickelte Methode der rvSU muss **abgeschätzt und bewertet** werden. Hier und an anderen Stellen ist eine **Qualitätskontrolle** durch oder für die BGE notwendig, mit dem Beleg der Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit.
- Verfahren zur **Plausibilitätskontrolle** von **Modellen** und **Konzepten** sollten erarbeitet werden. Nur so wird sich eine **nicht hinreichende Datenlage beurteilen** lassen, um daraus resultierende **Ungewissheiten** und **Erkundungsbedarfe** zu ermitteln.
- Die durch die Staatlichen Geologischen Dienste bereitgestellten **Modelle** dienten ursprünglich **anderen Aufgaben**. Es muss geprüft und belegt werden, ob sie im Rahmen der Standortsuche in gleicher Art und Weise eingesetzt werden können.
- Das **Wirtsgestein Steinsalz** hat den Vorteil einer vergleichsweise umfangreichen und guten Datenlage aufgrund des historischen **wirtschaftlichen Interesses** an den Formationen. Die **Übertragbarkeit** bzw. **Anwendbarkeit** der entwickelten Methoden auf andere Wirtsgesteine muss geprüft werden.

Literaturverzeichnis

BGE (2020) Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine, Deutschland (Stand 28.9.2020)

BGE (2022) Anlage zur „Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ (Stand 28.03.2022)

Brosin, P., et. al (1969) Tektonik und Erdöl-Erdgas-Höffigkeit DDR. Regionalbericht Thüringen mit Vorratsprognose Staßfurtkarbonat. 269 S., 56 Anl., unveröff. Bericht des VEB Erdöl-Erdgas, Betriebsteil Mittenwalde, Gotha

Kühn, M., Hennig, T., Heidbach, O., Scheck-Wenderoth, M. (2021a) Modelle simulieren die Zukunft. System Erde, 11, 2, 30-35. https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.5

Kühn, M., Heidbach, O., Heumann, A., Zens, J. (2021b): Nadeln im Heuhaufen. System Erde, 11, 2, 6-11. https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.1

Lüth, S., Esefelder, R., Richter, H., Jaksch, K., Schwarz, B., Wawerzinek, B., Giese, R., Krawczyk, C. (2021) Licht ins Dunkel bringen. System Erde, 11, 2, 18-23. https://doi.org/10.48440/GFZ.syserde.11.02.3

McCormack, K., Arnaud, E., Parker, B.L. (2018) Using a multiple variogram approach to improve the accuracy of subsurface geological models. Canadian Journal of Earth Sciences, 55(7), 2018, 786-801

Mann, C. J. (1993) Uncertainty in geology. Davies, J.C., Herzfeld, U.C. (Hrsg.) Computers in geology - 25 years of progress, Int. Ass. for Math. Geol., Studies in Math. Geology, 5, 241–254, Oxford University Press

Seidel, G. (2003) Geologie von Thüringen. 2. Aufl., 601 S., Stuttgart, Schweizerbart

Seidel, G. (2004) Zur Lage und Entwicklung der Zechsteinbasis in Thüringen. Beiträge zur Geologie von Thüringen, Neue Folge, 11, 63-69, Jena

Seidel, L., Wengler, M. (2021) Section 14 StandAG – Identification of siting regions and associated challenges. Saf. Nucl. Waste Disposal, 1, 49–50, https://doi.org/10.5194/sand-1-49-2021

Singh, V., Yemez, I., Sotomayor, J. (2013) Integrated 3D reservoir interpretation and modeling: lessons learned and proposed solutions. Lead Edge, 32(11), 1340–1353

STDK (2022) Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2022. Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.), Koordination und Gestaltung durch Menning, M., Hendrich, A., http://www.stratigraphie.de/

Wellmann, F. (2020) Geologische Modellierung 4.0. Frenz, W. (Hrsg.) Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3_49

Wellmann, F., Caumon, G. (2018) 3-D Structural geological models: concepts, methods, and uncertainties. Adv Geophys, 59, 1–121

Wellmann, F., Horowitz, F.G., Schill, E., Regenauer-Lieb, K. (2010) Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion. Tectonophysics, 490 (3–4), 141-151

Wellmann, F., Regenauer-Lieb, K. (2012) Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. Tectonophysics, 526–529, 2012, 207-216

Willenberg, U. (1969) Karte der Oberfläche Grundgebirge (Maßstab 1:200.000). VEB Erdöl-Erdgas, Betriebsteil Mittenwalde (Hrsg.) Tektonik und Erdöl-Erdgas-Höffigkeit DDR. Regionalbericht Thüringen mit Vorratsprognose Staßfurtkarbonat. unveröff. Bericht, Anlage 5.2, Gotha

Yamamoto, J.K., Koike, K., Tadashi Kikuda, A., Ademar da Cruz Campanha, G., Endlen, A. (2014) Post-processing for uncertainty reduction in computed 3D geological models. Tectonophysics, 633, 232-245