Standortauswahl Radioaktives Endlager

Gutachten zu

Auswahlkriterien für das Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) und Eignung des ausgewählten GzM für die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) im Wirtsgestein „Tongestein“

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium
Geschäftsstelle
Buchholzweg 8
13627 Berlin

Vergabestelle: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Autor: Dr. Jürgen Grötsch

Auftragsdatum: 27.09.2021

Fertiggestellt am: 30.11.2021

Inhaltsverzeichnis

Auswahlkriterien für das Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) und Eignung des ausgewählten GzM für die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) im Wirtsgestein „Tongestein“ 1

Zusammenfassung 4

Summary 5

Aufgabenstellung 6

Wirtsgestein Tongestein 6

Einführung zum untersuchten Teilgebiet (Opalinuston) 7

Gutachten: Methodik der Evaluation 9

Projektstatus 9

Entscheidungsqualität - Einführung 10

Dateneinsicht 11

Datengrundlage 11

Bohrungsdaten 12

Reflexionsseismische Daten 12

Ablagerungsmodel für den Opalinuston 13

Analog- und Referenzdatensätze 17

Statische und Dynamische Geologische Modelle 17

Datenbanken 19

Fazit - Datengrundlage 19

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) 20

Status der Methodenentwicklung zur rvSU 21

Teilgebiete (TG) und Untersuchungsräume (UR) 22

rvSU und die Analyse des Endlagersystems 23

Fragestellung 1: Kriterien zur Auswahl des Gebiets zur Methodenentwicklung (GzM) 24

Fragestellung 2: Eignung des ausgewählten Gebietes für die Methodenentwicklung (GzM) 27

Tektonische Deformationen im Wirtsgestein Tongestein 27

Seismizität 28

Vulkanische Einschaltungen 29

Deckgebirge 29

Glaziale Erosionsrinnen und Eiszeitliche Überprägung 29

Gebirgsdurchlässigkeit 30

Weitere Gesteinseigenschaften 31

Geosynthese je Untersuchungsraum 31
Verwendung und Umgang mit Ungewissheiten 32
Ausweisung und Bewertung von Ungewissheiten 32
Methodenentwicklung und Ungewissheiten 33
Auswirkung von Ungewissheiten auf die Evaluierung von Teilgebieten nach rvSU 34
Entscheidungsqualität – Teilgebiet Wirtsgestein Tongestein Opalinuston 34
Fragestellung 1 - Kriterien zur Auswahl des GzM 34
Fragestellung 2 - Eignung des GzM zum Wirtsgestein Tongestein 36
Gesamtbeurteilung: GzM Wirtsgestein Tongestein 39
Verzeichnis der verwendeten Referenzen 41
Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Informationen und Referenzen 42
Verwendete Abkürzungen 43

Zusammenfassung

Das hier erstellte Gutachten hat zum Ziel, die Kriterien zur Auswahl des Gebietes zur Methodenentwicklung (GzM) und die Eignung des von der BGE ausgewählten GzM (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT) für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zu beurteilen. Aufgrund der Tatsache, dass die tonigen Einheiten des Mittleren Jura in TG 001 (Opalinuston) im Albvorland von Baden-Württemberg und Bayern mehrerer Grundvoraussetzungen hinreichend erfüllen, wie z.B.

- Mächtigkeitsverteilung und lithologische Ausbildung der Teufelsloch-Subformation,
- eine Vielzahl von Prozessen, die die langfristige Stabilität der Barriere beeinflussen können,
- heterogene Untersuchungsräume innerhalb des Teilgebietes,
- Variation der Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) im Untergrund,
- Erfüllung des Flächenbedarfs eines Endlagers in verschiedenen Tiefenlagen,
- variable Struktur des Deckgebirges
- heterogene Datenlage im Teilgebiet

ist eine Eignung als GzM in diesem Teil des Verfahrens (standardisierte Methodenentwicklung zur rvSU) als positiv zu bewerten. Im Gutachten sind dazu eine Reihe von Empfehlungen ausgesprochen, die für das weitere Vorgehen Beachtung finden müssen. Die als vorrangig einzustufenden sind:

- eine deutlich zu verbessernde **Datengrundlage** zu schaffen, für deren Harmonisierung im gesamten Bundesgebiet zu sorgen und deren Verfügbarkeit sicherzustellen (sehr lange Vorlaufzeit). Dies wird als eines der größten **Risiken** im Endlagerprojekt angesehen.
- Pläne zur **Skalierbarkeit im Datenmanagement** von Untergrunddaten aller Art in der Bundesrepublik Deutschland zu entwerfen und deren Qualitätskontrolle zu ermöglichen.
- Fokus auf die **Digitalisierung von Geodaten** zu legen und deren Transformation in **für Untergrundstudien verwendungsfähige Formate** sicherzustellen.
- effiziente Methoden bei der Beschaffung und dem **Austausch von Untergrunddaten zwischen Bund, Ländern und der Industrie** zu entwickeln basierend auf dem GeolDG, inklusive vertraulicher Daten.
- aufgrund der Tatsache, dass im Bereich Datenbeschaffung, -management und -verfügbarkeit nur marginale Verbesserungen im Endlagerprojekt zu beobachten sind, eine **Geodaten-Task Force** unter Leitung der zukünftigen Bundesministerien für Wirtschaft und Klima sowie Umwelt aufzubauen.
- der Verwendung von **Ungewissheiten** im geologischen Untergrund, deren Charakterisierung und Parametrisierung eine wichtige Rolle im weiteren Verlauf des Projektes einzuräumen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass das im Wirtsgestein Tongestein selektierte TG 001 Opalinuston als Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) gut geeignet ist. Dies wird unterstützt durch das schon teilweise von der BGE intern dokumentierte Vorgehen zur Methodenentwicklung. Die Entscheidung der BGE ist deshalb insgesamt als positiv zu bewerten. Im Nachhinein betrachtet gilt dies auch, obwohl der Prozess, der zur Entscheidung des GzM geführt hat, Schwachstellen aufweist und als wenig transparent beurteilt wird. Der Grund dafür liegt im Fehlen von klaren Kriterien bei der Auswahl des TG 001 aus den insgesamt acht verschiedenen Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongestein und der Tatsache, dass keine Dokumentationen zu dieser Entscheidung vorliegen. Da jedoch die Wahl des GzM keine Vorfestlegung für eine Standortregion ist und damit keine Aussage für eine potentielle Eignung getroffen wurde, werden die Defizite im Entscheidungsprozess bei der Auswahl des GzM als nicht kritisch für den weiteren Verlauf des Verfahrens insgesamt angesehen.

Summary

The presented report has the aim to analyze the criteria which were used for the selection of the area chosen for the development of the workflows to be used for the representative preliminary safety analyses (rvSU) as well as the suitability of the chosen area to develop such workflows as a standard for the next steps in the site selection process for a German disposal facility for high-level radioactive waste. Due to the fact, that the selected area 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT in the states of Baden-Württemberg and Bayern fulfills several prerequisites like

- thickness distribution and lithology of the Teufelsloch Subformation as host rock,
- a variety of observable processes which influence the long-term stability of the barrier,
- heterogeneity of sub-areas within the selected area TG 001
- variability in the depth of the host rock (ewG) for the disposal system
- availability of the required host rock area/volume for different depths below surface,
- variability in the structure of the overburden
- heterogeneous availability of data

the area is recommended for further use of the development of standardized workflows for the rvSU. This report documents a number of recommendations which need to be addressed in the next steps of the project. The most important ones are summarized here:

- A significantly improved **data base** needs to be established across Germany and usability of data needs to be secured (long lead time item). This is seen as one of the **biggest risks** in the disposal site project.
- Plans for the **scalability of data management** efforts required across Germany have to be developed incl. quality assurance of data.
- Focus has to be put on **digitalization of data** and its transformation into suitable formats for modelling studies.
- Efficient methods for **data exchange** between federal and state organizations as well as industry need to be developed based on the new German geology data law (GeolDG), incl. handling of confidential data.
- Due to the fact that data acquisition and management have made limited progress, setup of a **Geodata task force** by the federal ministries of economy and environment is encouraged as the BGE alone is likely not able to resolve this challenge.
- The use of **uncertainties** in the subsurface, its' characterization and parameterization has to play an important role in the development of workflows for the further steps of the project.

In summary, the now in part documented and demonstrated study steps for the host rock claystone using the selected area of TG 001 (GzM) indicate that the area chosen by BGE is suitable for the development of workflows for the rvSU as required by the law (StandAG). The decision by BGE is therefore considered acceptable and suitable for the continuation of the project. This consideration is made now in hindsight, even though decision quality around the criteria for selection of the study area (GzM) are missing and no suitable documentation around this decision is available in BGE. Therefore, it is unclear why TG 001 is the preferred study area out of a total of eight areas with host rock claystone. Due to the fact, that the selection of the GzM is not a selection of a future waste site location and that it does not qualify the selected area as suitable to become one neither at this point of the project, the decision by BGE is acceptable. Although the way the decision for the study area (GzM) was made has highlighted some shortcomings in the decision-making process, they are not considered critical for the further success of the project as a whole.

Aufgabenstellung

Das hier erstellte Gutachten hat zum Ziel, die beiden folgenden Fragestellungen zu beantworten:

1) Sind die Kriterien, anhand derer das Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) „Opalinuston“ (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT) ausgewählt wurde, geeignet, die Methoden für die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) für das Wirtsgestein „Tongestein“ zu entwickeln?
2) Ist das GzM „Opalinuston“ geeignet, die Methoden zu entwickeln, die für die rvSU mit Blick auf das Wirtsgestein „Tongestein“ benötigt werden?

Das zu Beurteilende Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT beinhaltet das Wirtsgestein Tongestein. Die zu untersuchenden Schichten (= stratigraphische Einheit) stammen dabei aus dem Mittleren Jura, auch bekannt unter der Bezeichnung Dogger. Sie umfasst einen geologischen Zeitraum von 174 Ma (Millionen Jahren) bis 164 Ma vor heute (Abbildung 1).

Wirtsgestein Tongestein

Das Wirtsgestein Tongestein umfasst mehrere geologische Formationen, die als Endlager in Betracht gezogen werden (Abbildung 1). Diese sind, geordnet von geologisch jung nach alt, wie folgt:

- Tone und Tongesteine des Paläogen (Unteres Tertiär)
- Tongesteine der Ober-Kreide
- Tongesteine der Unter-Kreide
- Opalinuston des Mittleren Jura („Dogger“)
- - Liaston im Unteren Jura

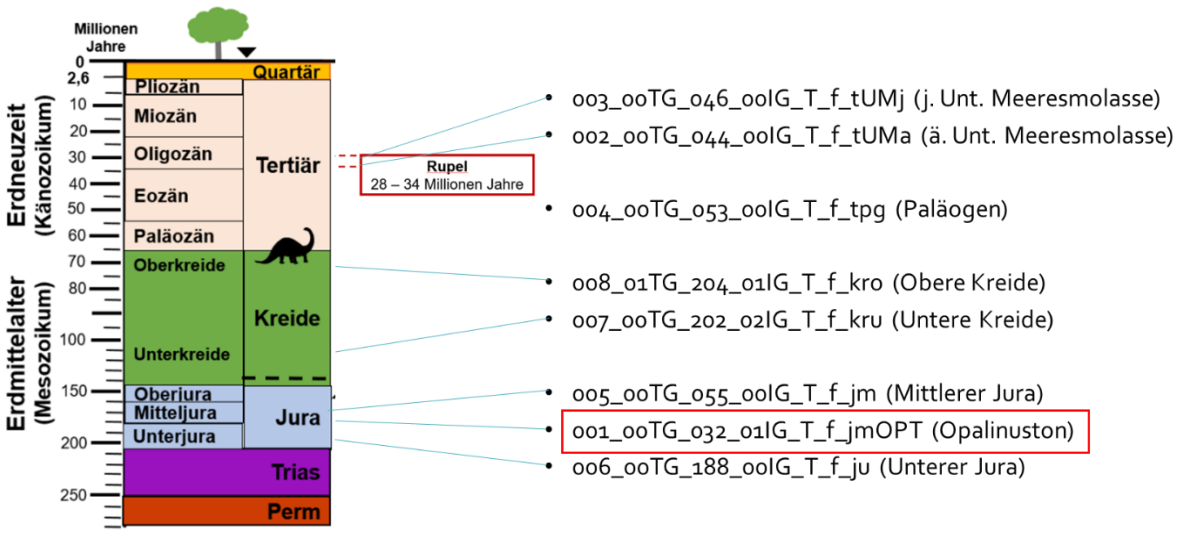

Abbildung 1: Stratigraphie (= geologisches Alter) der Formationen der 8 Teilgebiete mit dem Wirtsgestein Tongestein. Zu beachten ist, dass die Nummerierung der Teilgebiete unabhängig ist vom geologischen Alter der in Frage kommenden geologischen Formationen (verändert nach BGE, 2020).

Die Teilgebiete des Wirtsgestein Tongestein befinden sich vornehmlich im Norddeutschen Becken und dem, den Alpen vorgelagerten Molassebecken (Abbildung 2).

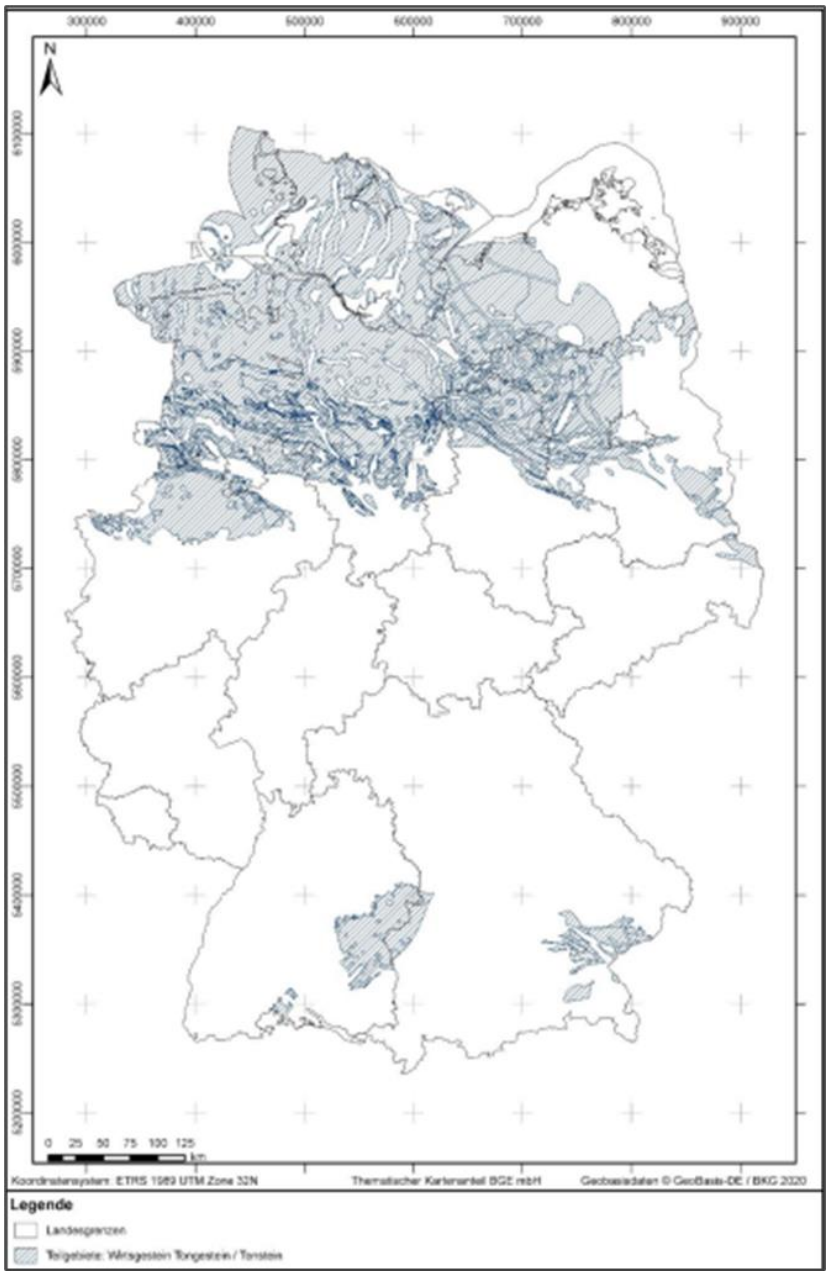

Abbildung 2: In schraffierter Signatur sind die 8 verschiedenen Teilgebiete mit Wirtsgestein Tongestein erkennbar. Zu beachten ist dabei, dass sich im Norddeutschen Becken Teilgebiete unterschiedlichen geologischen Alters befinden, die sich vertikal überlagern und dadurch in der Kartendarstellung überlappen (BGE, 2020).

Einführung zum untersuchten Teilgebiet (Opalinuston)

Dieses Gutachten beschäftigt sich nur mit dem Opalinuston aus dem Mittleren Jura, oft auch Dogger genannt (Abbildung 3). Dieser ist im Teilgebiet 001 in Baden-Württemberg und Bayern im Untergrund als ewG vorhanden (Abbildung 4), aber auch in obertägigen Aufschlüssen in beiden Bundesländern bekannt.

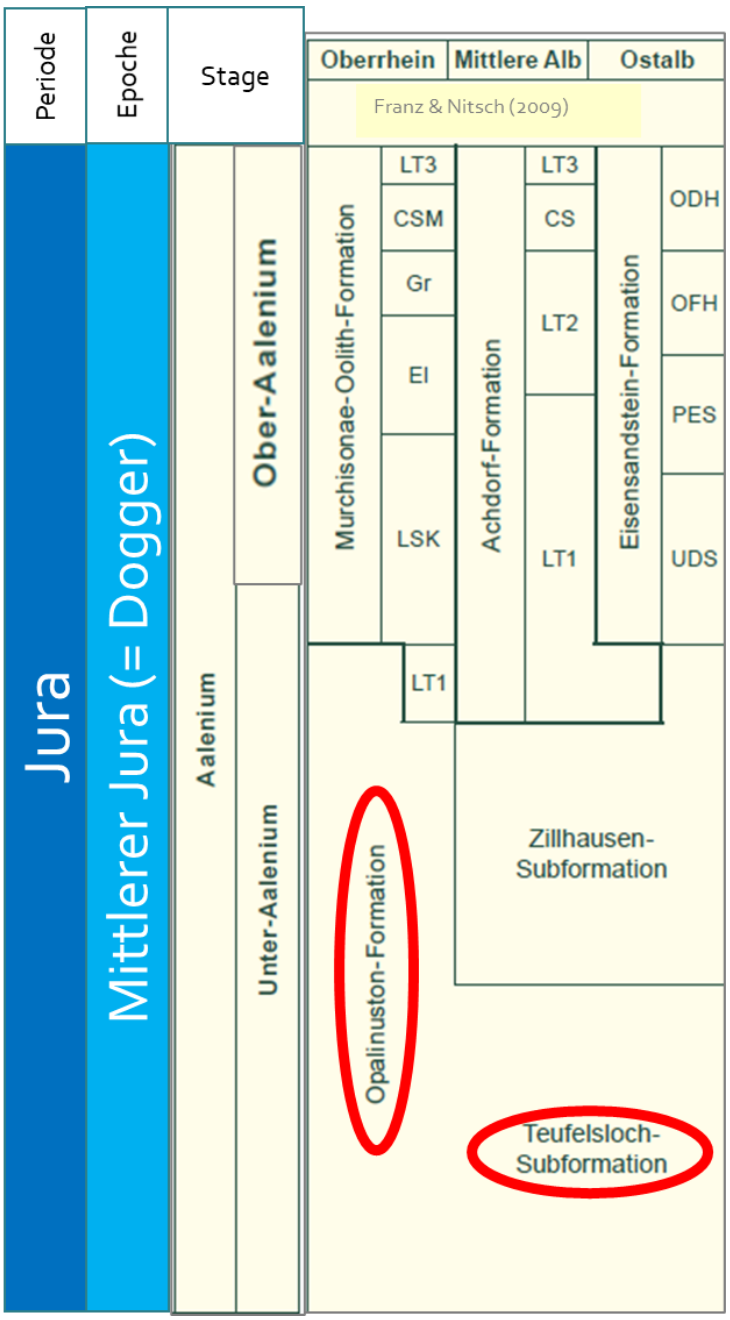

Abbildung 3: Geologische Zeiteinteilung für den untersuchten Zeitbereich aus dem Mittleren Jura in Baden-Württemberg (verändert nach Franz & Nitsch, 2009). Geologische Zeiteinteilung wird auch als Stratigraphie bezeichnet und erlaubt es u.a. sedimentäre Ablagerungen wie die der Opalinuston-Formation und der Teufelsloch-Subformation (rote Ellipsen), zeitlich zu untergliedern und miteinander zu vergleichen. Beide bilden im Teilgebiet 001 das zu untersuchende Wirtsgestein. Die stratigraphische Analyse ist besonders wichtig für Untersuchungen im Untergrund, die meist auf Bohrdaten beruhen. Die Stufe (Stage) des Aaleniums umfasst einen Zeitraum von 174 Ma (Basis) bis 164 Ma (Top).

Das Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT im sogenannten Opalinuston befindet sich auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern. Das Teilgebiet hat eine Fläche von 4241

Quadratkilometern und eine maximale Mächtigkeit von 300 Metern (Abbildung 4). Die Basisfläche des identifizierten Gebietes befindet sich in einer Teufenlage von 400 bis 1500 Meter unterhalb der Geländeoberkante (BGE, 2020).

Teilgebiet-Nr.: 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT

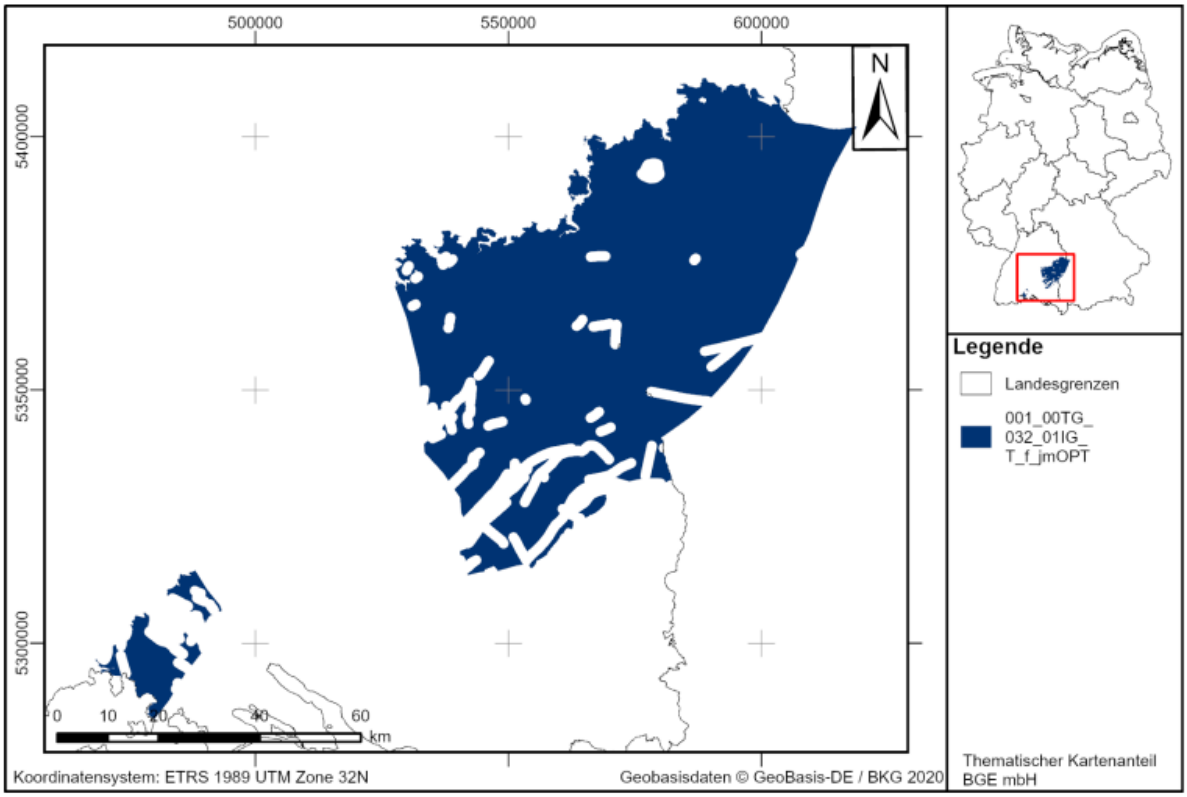

Abbildung 4: Ausdehnung des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Das ewG befindet sich im sogenannten Opalinuston auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern (BGE, 2020). Die weißen Lineamente im TG zeigen in Phase I Schritt 1 ausgeschlossene Bereiche, häufig im Zusammenhang mit Störungszonen.

Gutachten: Methodik der Evaluation

Projektstatus

Das Projekt Standortauswahlverfahren befindet sich zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung in Phase I Schritt 2 bei dem es um die Ermittlung von geeigneten Standortregionen zur übertägigen Erkundung nach Stand AG geht. Innerhalb dieses Schrittes ist eine Aufgabe der BGE, die Methodenentwicklung für die rvSU (repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung) auszuarbeiten (Abbildung 5). Diese standardisierte Methode soll dann in der weiteren Bewertung aller verbliebenen 90 Teilgebiete Verwendung finden. Dazu soll jeweils ein, von der BGE ausgewähltes Teilgebiet, aus allen untersuchten Wirtsgesteine (Ton, Salz flach und steil lagernd, Kristallin) Verwendung finden. Im Falle des Wirtsgestein Tongestein hat sich die BGE entschieden,

diese Methodenentwicklung anhand des Opalinustones in Baden-Württemberg und Bayern durchzuführen (001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT).

In diesem Gutachten werden die Fragen behandelt, wie die Auswahl des Teilgebietes zur Methodenentwicklung vorgenommen wurde (Kriterien) und ob das ausgewählte Teilgebiet zur Methodenentwicklung geeignet ist.

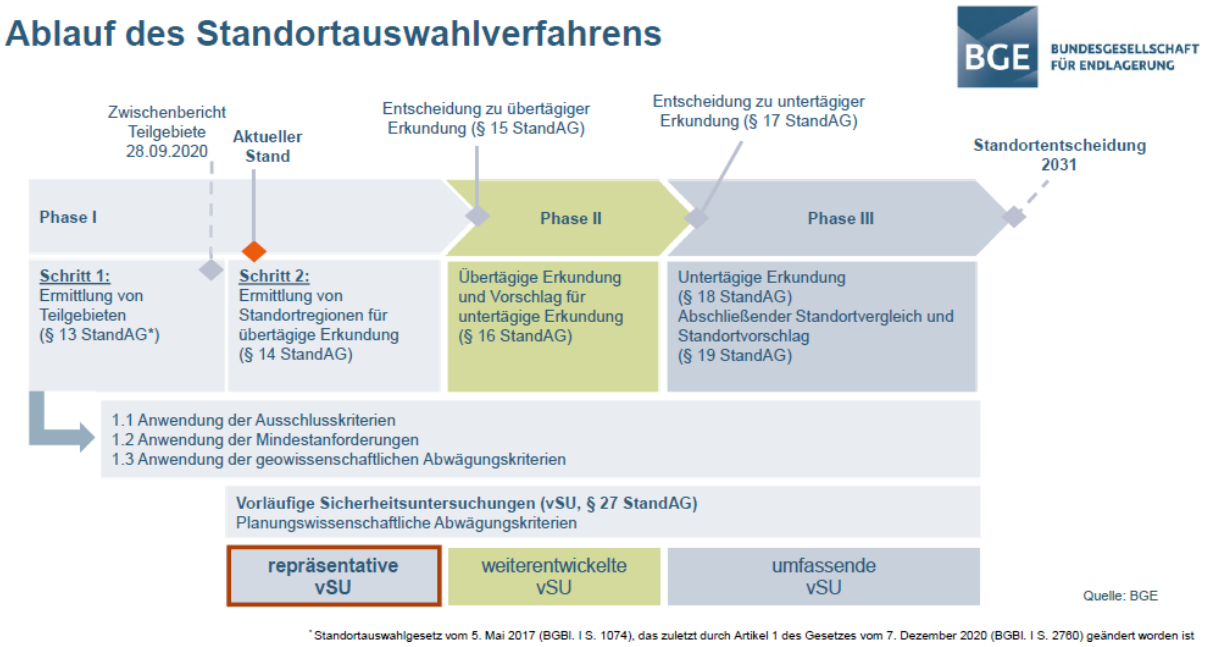

Abbildung 5: Augenblicklicher Projektstaus im Standortauswahlverfahren. Das Projekt befindet sich in Phase I Schritt 2 bei dem es um die Ermittlung von geeigneten Standortregionen zur übertägigen Erkundung nach StandAG geht. Gegenwärtig werden aber zuerst, anhand von vier Teilgebieten, die Methoden durch die BGE entwickelt, die später zur rvSU für alle verbleibenden 90 TG verwendet werden sollen. Die Auswahl zum GzM ist keine Vorfestlegung für die späteren Standortregionen oder eine Aussage bezüglich einer potentiellen Eignung dafür (BGE, 2021).

Entscheidungsqualität - Einführung

Bei der hier durchgeführten Bewertung wurde die gängige Methode der Analyse der Entscheidungsqualität für die beiden Fragestellungen des NBG verwendet. Dabei wird die Entscheidungsreife nach sechs Kriterien einschätzt (Decision quality - Wikipedia). Diese sind:

1. Rahmenbedingungen der Entscheidung innerhalb des Projektes
2. Abwägungskriterien und alternative Interpretationen
3. Zur Verfügung stehende Informationen und Daten
4. Klares Verständnis der Vor- und Nachteile
5. Schlüssigkeit der Argumentation
6. Entscheidungsreife (in Bezug auf Projektstatus)

Diese werden im Kapitel **Gesamtbeurteilung,** für beide Fragestellungen separat, im Einzelnen angesprochen.

Dateneinsicht

Die Grundlage dieser Untersuchung sind vom 17.11.2021 bis 19.11.2021 durchgeführte Videokonferenzen, die Einsichten in die Datengrundlage und Analysemethoden der BGE gewährt und die weitergehenden Fragen des Gutachters beantwortet haben.

Der Gutachter ist dem BGE Team sehr zu Dank verpflichtet für diese Dateneinsicht und die zügige Beantwortung aller gestellten Fragen zum Teilgebiet und insbesondere zu den beiden Fragestellungen des Gutachtens (siehe Kapitel **Aufgabenstellung**). Wie schon bei dem vorhergehenden Gutachten festgestellt, hat dies wiederum deutlich gemacht, dass bei der BGE notwendige Kompetenzen verfügbar sind und auch während der Pandemie bedingten Einschränkungen alle Fragestellungen via digitaler Kommunikationsmethoden bearbeitet werden können. Leider muss bei der Online-Kommunikation stets noch auf *Skype for Business* zurückgegriffen werden.

Des Weiteren wurden von der BGE zur Verfügung gestellte Berichte (vertrauliche und öffentliche), Präsentationen (vertraulich und öffentliche) und wissenschaftliche Literatur (öffentlich) verwendet. Eine Zusammenfassung der öffentlich zugänglichen Referenzen dazu findet sich im Kapitel **Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Informationen und Referenzen**.

Datengrundlage

Bei den virtuellen Treffen mit der BGE vom 17. bis 19.11.2021 wurden Stichproben der verwendeten Datensätze zur Einsicht nachgefragt, die bei einer Evaluierung der beiden Fragestellungen von Bedeutung sind. Diese umfassen u.a.:

1D Daten:
- Bohrdaten und ihre räumliche Verteilung
- Schichtenverzeichnisse und verwendete Standards
- Bohrkerndaten, deren Verteilung und Verfügbarkeit
- Evaluierung der relevanten, geologischen Formationen
- *Petrophysikalische Bohrlochdaten und deren Qualität (noch nicht digital verfügbar)*

2D Daten und Interpretationen:
- Stratigraphie und Korrelation zwischen den Bohrungen
- *2D reflexionsseismische Daten, deren Verwendung und Qualität (keine Daten oder nicht digital verfügbar)*

3D Daten und Interpretationen
- *Vorhandene 3D reflexionsseismische Daten und deren Qualität (nicht vorhanden)*
- *Verwendung der seismischen Daten bei der Evaluierung (noch nicht einbezogen)*
- Strukturgeologische Daten zu Störungssystemen
- Vorhandene, regionale und lokale 3D Modelle des Untergrunds
- Vergleichbarkeit und Qualität der 3D Modelle

Weitere Informationen aus Literatur und bisherigen Studien
- Verwendete Analogdatensätze (z.B. Mont Terri, Schweiz)

- 1D dynamische Modelle zum Transportaustrag von Radionukliden (vorläufige Ergebnisse)

Die Analyse, der bis dato verwendeten und der noch nicht verwendeten Daten ergab, dass die Datenbasis als durchaus heterogen innerhalb des Teilgebietes angesehen werden kann. Dabei ist zu bemerken, dass eine solche heterogene Datenbasis in diesem Schritt der Methodenentwicklung durchaus als positiv bewertet werden kann, da sie keine Extremsituation widerspiegelt, sprich sehr gut oder sehr schlecht ist. Dies ist sinnvoll, vor allem für die notwendige Einbindung von Ungewissheiten in die im Augenblick durchgeführte Methodenentwicklung zur rvSU.

Dabei ist der Digitalisierungsgrad der verwendeten Daten in den Geologischen Diensten der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern sehr unterschiedlich, z.B. sind Bohrlochdaten zum Teil nur in pdf-Format vorhanden und nicht in üblichen Formaten zum Einlesen in 3D Computermodelle (d.h. LAS, DLIS). Dies wird als eine generelle Herausforderung des Endlagerprojektes angesehen, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf alle geologischen Dienste des Bundes und der Bundesländer zutrifft.

Empfehlung 1*: Unabhängig vom Status des Standortauswahlverfahrens sollte die Digitalisierung der Untergrunddaten in allen geologischen Diensten des Bundes und der Länder sowie den Bergbauämtern in koordinierter und standardisierter Weise vorangetrieben werden. Dies ist notwendig, da digital verfügbare Daten jetzt und in allen weiteren Schritten von fundamentaler Bedeutung sind und weiter sein werden und die notwendigen Arbeiten lange Vorlaufzeiten haben.*

Bohrungsdaten

Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse im Teilgebiet sind vorhanden (Abbildung 6).

Die Evaluierungen der geologischen Landesämter in den beiden Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern basieren zum Teil auf unterschiedlichen stratigraphischen Markern. Diese Diskrepanzen wurden inzwischen von der BGE in ihren neuen Modellen im untersuchten Teilgebiet 001 angepasst. Es ist noch keine sequenzstratigraphische Untersuchung mit Hilfe von digitalen Bohrlochdaten und Bohrkernen bei der BGE durchgeführt worden, was notwendig ist für die Einschätzung der räumlichen Verteilung von Sand innerhalb des Ton-dominierten Opalinustones. Letztere ist wichtig für die später notwendige räumliche Einschätzung des Transports von Radionukliden.

Derzeit fehlen digitale Bohrlochmessdaten im 3D Model der BGE da diese im Augenblick noch gesammelt werden. Lithologische Variationen sind bis jetzt nur aus wissenschaftlichen Publikationen bekannt. Vom SGD in Bayern sind digitale Datensätze im LAS-Format zu Bohrlochmessungen vorhanden. In Baden-Württemberg werden derzeit 25 Bohrung digitalisiert, waren aber zur Zeit der Gutachtenerstellung noch nicht verfügbar.

Leider stehen kein Bohrkerndaten und Gesteinsmessungen im Teilgebiet zur Verfügung. Diese Datenlücke im Teilgebiet kann jedoch kompensiert werden durch den umfangreichen Analogdatensatz aus dem 1996 begonnenen schweizerischen Mont Terri Endlager-Projekt.

Reflexionsseismische Daten

Im verwendeten Teilgebiet 001 Opalinuston selbst sind nur sehr eingeschränkt seismische Daten verfügbar (Abbildung 6). Seismische Daten, auch aus der Umgebung des Teilgebietes, stehen der BGE bis zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung und werden derzeit nicht verwendet.

***Empfehlung 2**: Wie bereits in einem früheren Gutachten angesprochen wird empfohlen, eine bevorzugt bundesweite Datenbank zu seismischen Daten aufzubauen, die es der BGE erlaubt alle Daten digital abzufragen. Dies ist am besten durch eine Zusammenarbeit von BGE, BGR, den geologischen Landesämtern und privaten Firmen umzusetzen, wobei die Vertraulichkeit der Daten nach dem GeolDG gewährleistet werden muss. Wegen der erwarteten langen Vorlaufzeiten bei der Digitalisierung der seismischen Daten sollte dies durch eine bundesweite Initiative zeitnah begonnen werden. Dazu sollte eine Geodaten Task Force von den zukünftigen Bundesministerien für Wirtschaft und Klima sowie Umwelt eingesetzt werden, da die BGE diese Aufgabe alleine höchstwahrscheinlich nicht bewältigen kann.*

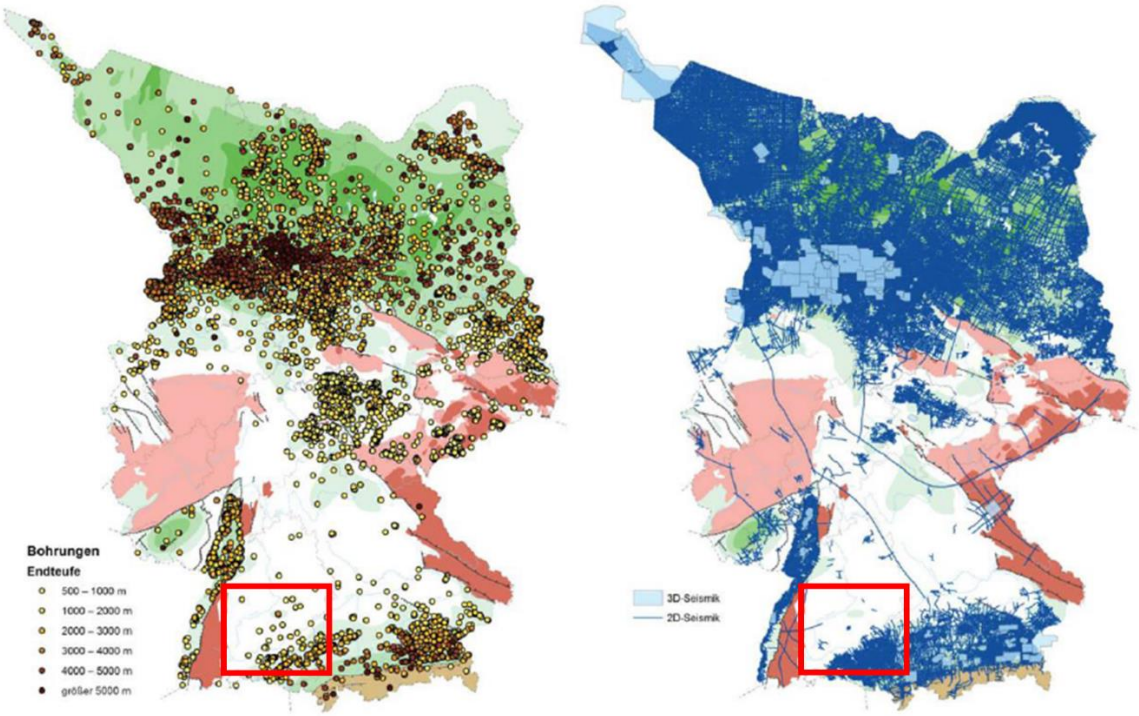

Abbildung 6: Tiefbohrungen (Teufe >500m) und 2D und 3D Seismik im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2019, Quelle: BGR). Das untersuchte Teilgebiet des Opalinustones befindet sich im roten Quadranten in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und hat eine heterogene Datenlage. Bohrungen und seismische Daten sind hauptsächlich im Molassebecken des Voralpenraumes vorhanden im SW des Quadranten, sprich außerhalb des identifizierten Teilgebietes.

Ablagerungsmodel für den Opalinuston

Eine umfangreiche, auf ArcGis Pro basierende Datenbank mit georeferenzierten 1D und 2D Datensätzen und geologischen Karten ist vorhanden, auch für das ausgewählte Teilgebiet Opalinuston. Diese Datenbank zeigt die Lokation von bekannten Daten auf (Abbildung 6), was jedoch nicht gleichzusetzen ist mit der Verfügbarkeit von Daten.

Des Weiteren sind geologische Studien zum Opalinuston aus den geologischen Diensten vorhanden wie etwas von Franz & Nitsch (2009). Diese zeigen Korellationen von lithostratigraphischen Einheiten zwischen einer Reihe von Lokationen im Querschnitt (Abbildung 7), sind jedoch zum Zwecke der Analyse von Massentransport von Radionukliden nicht geeignet und müssen durch hochauflösende

Sequenzstratigraphische Interpretationen für das marine, klastische Ablagerungssystem ersetzt werden. Schematische Querschnitte, wie in Abbildung 8 gezeigt, können jedoch als großmaßstäbliche, initiale Übersicht benutzt werden, sprich als Basis für ein konzeptionelles geologisches Model. Ein solches ist eine wichtige Voraussetzung für spätere detailliertere 3D Modelle und muss für das TG nach modernen Gesichtspunkten erstellt werden.

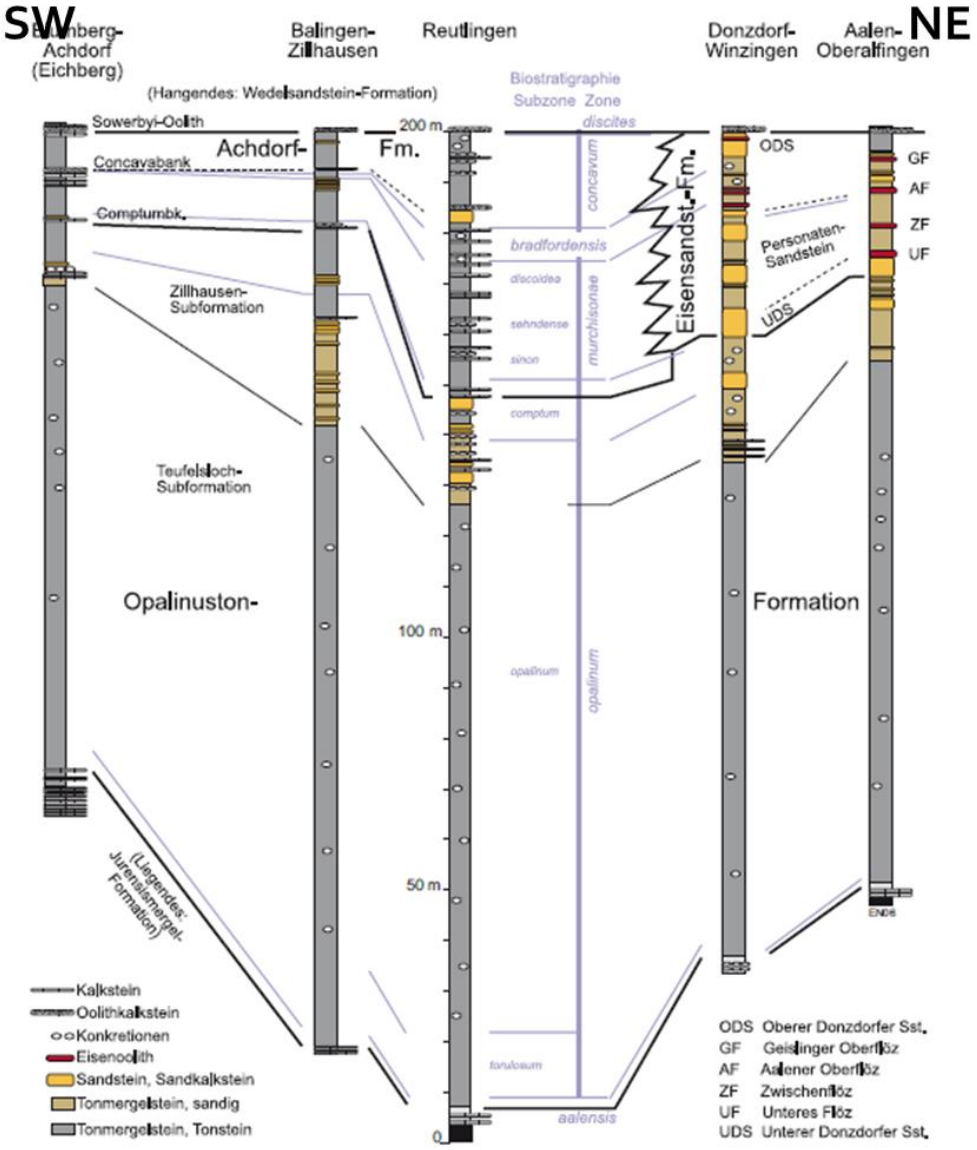

Abbildung 7: NE-SW Querschnitt und Korrelation von Bohrungen im Albvorland für den Zeitraum des Aaleniums (= unterer Teil des Mittleren Jura von 174 Ma bis 164 Ma). In Gelb und Rot sind dabei die Einschaltung von Sand im vormaligen Ablagerungsbecken zu erkennen, die sich Richtung Beckenzentrum nach Westen mit tonigen Ablagerungen verzahnen (aus Franz & Nitsch, 2009). In den notwendigen, detaillierteren, sequenzstratigraphischen Untersuchungen ist zu erwarten, dass dabei noch weitere Inhomogenitäten in der „offen marinen" Gesteinsabfolge (grau) erkennbar werden. Dies ist von ausschlaggebender Bedeutung für die räumliche Analyse von Gesteinsdurchlässigkeiten im Teilgebiet. Weitere Studien dazu sind notwendig.

Innerhalb der Teufelsloch-Subformation sind subtidale, sandige als Sturmablagerungen interpretierte Einschaltungen bekannt aus drei gekernten Flachbohrungen der BGR, die außerhalb des TG 001 abgetäuft wurden. Diese werden gegenwärtig von der BGR verwendet, um ein fazielles Model zu erstellen, dass nach Osten ins TG 001 verlängert werden soll.

Im Jura sind vom ehemaligen Vindilizischen Festland (Abbildung 9) im Osten des TG 001 klastische Schüttungen mit Progradation nach Westen in Richtung Beckenzentrum bekannt. Diese sandigen und Fe-haltigen oolitischen Ablagerungen keilen nach Osten im TG aus. Es handelts sich dabei um die lithostratigraphische Einheit der sogenannten Zillhausen Subformation (Abbildung 7).

Empfehlung 3*: Die bisherigen sedimentologischen Studien im TG Opalinuston basieren zum großen Teil auf biostratigraphischen und lithostratigraphischen Analysen. Es fehlt jedoch eine moderne, hochauflösende sequenzstratigraphische Analyse, die insbesondere den Sandeintrag in den Ablagerungsraum besser charakterisiert und auch mögliche, dünnbankige Einschaltungen von Sand oder Feinsand innerhalb der Teufelsloch Subformation* (Abbildung 7) *beurteilt. Dies ist für die Gesteinsdurchlässigkeit im Opalinuston von großer Bedeutung und essenziell bei der zukünftigen Abschätzung der Unisicherheiten im Untergrund.*

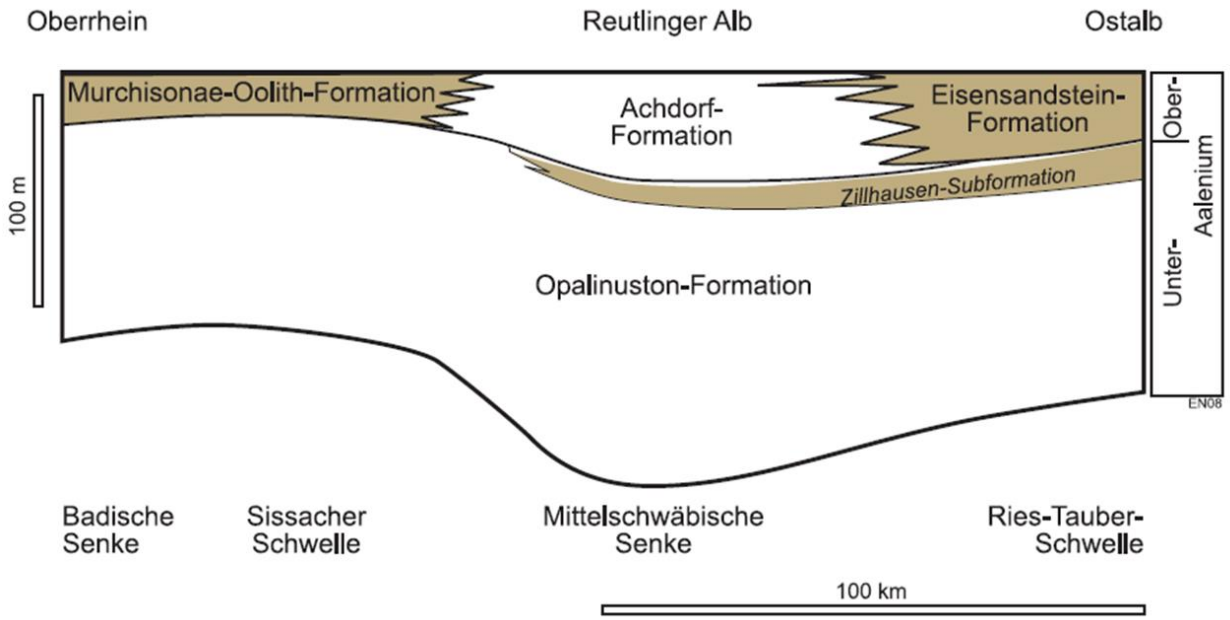

Abbildung 8: Schematischer Querschnitt mit lithostratigraphischen Einheiten im südwestdeutschen Aalenium (aus Franz & Nitsch, 2009). Der Tonstein-dominierte Opalinuston wird von Ost (Ostalb) nach West (Oberrhein) von marinen sandigen Abfolgen überdeckt. Weitere Studien sind notwendig, um daraus ein detailliertes sequenzstratigraphisches Modell zu entwickeln.

Der BGE verfügbare 2D Kartendarstellungen zur Mächtigkeitsverteilungen im Mittleren Jura (Aalenium) wie etwa in Abbildung 9 gezeigt (Franz & Nitsch, 2009) erweisen sich als Startpunkt für kommende Untersuchungen, beinhalten jedoch noch nicht das für eine weitere Evaluierung notwendige Detail.

Sandeinschaltungen im Zentrum des sedimentären Beckens, zur Zeit des Aaleniums können dabei oft nur dünnbankig sein, d.h. auch in Bohrlochmessungen nur schwer erkennbar sein. Aber, aufgrund

der stark unterschiedlichen Gesteinsdurchlässigkeit, haben solche geringmächtigen Einschaltungen von Sand im Tonstein eine große Bedeutung bei der regionalen und ortsspezifischen Bewertung eines Endlagers, da sie die Gebirgsdurchlässigkeit und die hydrogeologischen Verhältnisse beeinflussen können.

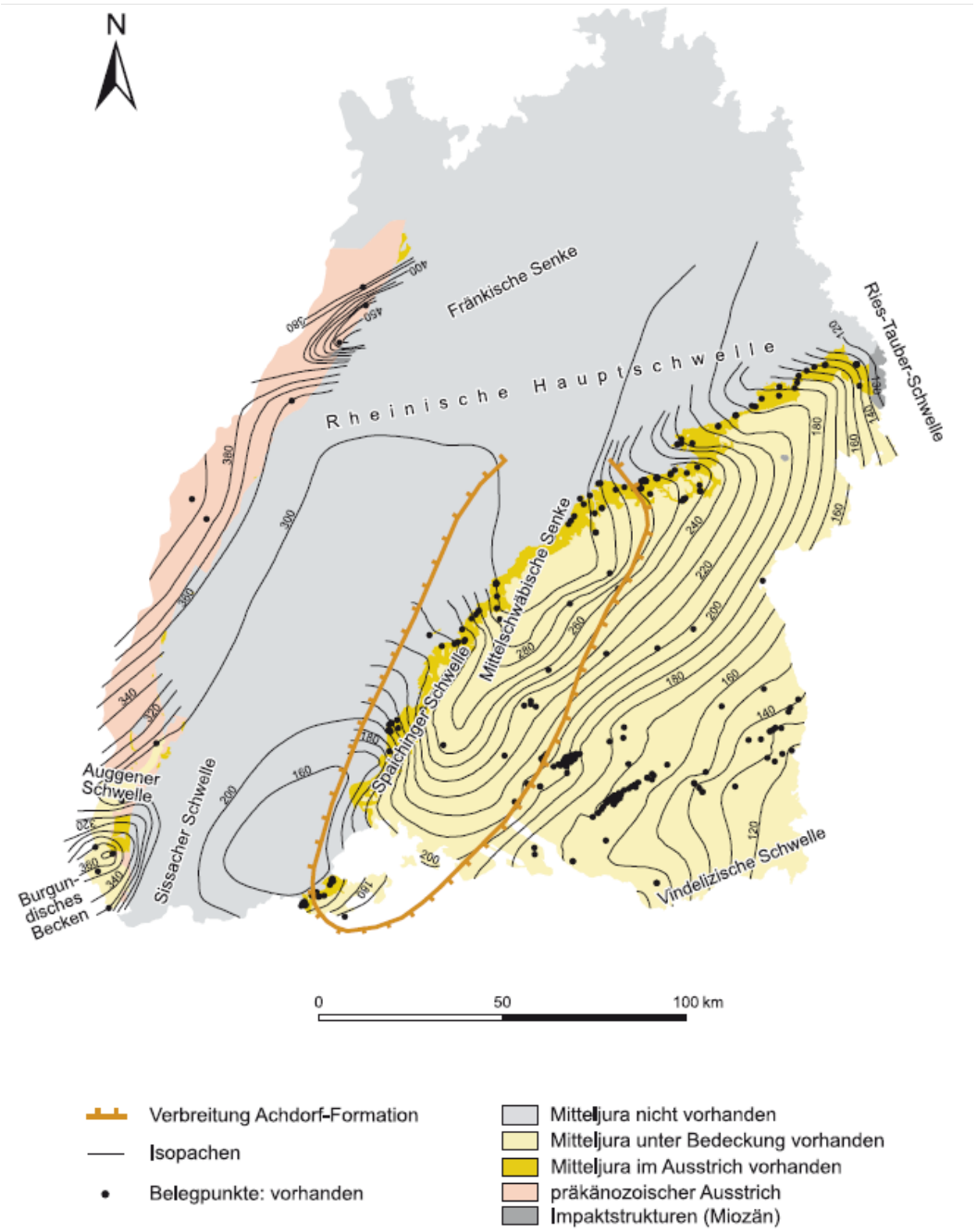

Abbildung 9: Mächtigkeiten des gesamten Mitteljura und Lage der synsedimentär wirksamen Schwellen- und Senkengebiet in Baden-Württemberg (aus Rupf & Nitsch 2008). Im Gebiet der Mittelschwäbischen Senke („Reutlinger Becken“) ist im Ober- Aalenium die Tonfazies der Achdorf-Formation ausgebildet. Lokation der Datenpunkte aus Aufschlüssen und Bohrungen sind als schwarze Punkte gekennzeichnet (aus Franz & Nitsch, 2009). Zu beachten ist die heterogene Datenlage.

***Empfehlung 4**: In einer zukünftigen, ortsspezifischen Auswertung des Teilgebietes im Mittleren Jura muss eine 3D Verteilung von, häufig zyklischen Sandeinschaltungen analysiert und in einem späteren Stadium modelliert werden. D.h. die 2D Kartendarstellungen sollten durch regionale und lokale, detaillierte 3D Modelle mit einer solchen Sandverteilung ersetzt werden. Da dies bei der Datenlage im TG 001 nicht mit Sicherheit erfolgen kann, muss auch hier eine Analyse der Ungewissheiten erfolgen und mit multiplen Realisationen gearbeitet werden.*

Analog- und Referenzdatensätze

Das Teilgebiet 001 im Opalinuston wurde als vorteilhaft für die Methodenentwicklung zur rvSU für alle weiteren Teilgebiete im Tongestein angesehen, da umfangreiches Datenmaterial aus dem Mont Terri Projekt der NAGRA in der Schweiz verfügbar ist (Download-Center | Nagra). Dies betrifft insbesondere auf Daten zu, die zur Erstellung von dynamischen Modellen, sprich Massen- und Stoffmengenaustausch notwendig sind und deren Generierung lange Vorlaufzeiten haben, aufgrund des dazu notwendigen Bohrkernmaterials und der daraus abzuleitenden Laboranalysen.

Die Verwendung von Analogdatensätzen ist als sehr begrüßenswert einzustufen, und im Stadium der Methodenentwicklung als ausreichend zu betrachten. Dies gilt, obwohl Mont Terri im Schweizer Voralpenland eine unterschiedliche Versenkungs- und Deformationsgeschichte hat im Vergleich zum GzM im TG 001, das Teil des sogenannten Schichtstufenlandes ist, sprich vergleichsweise wenig Deformation erfahren hat.

***Empfehlung 5**: Analogstudien werden auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen müssen, da in vielen Teilgebieten die Datenlage nicht ausreichend ist. Die Verwendung von Analogen und Analogstudien sollte ein wichtiger Bestandteil der zu entwickelnden Methoden werden.*

Statische und Dynamische Geologische Modelle

Die BGE hat begonnen eigene 3D Modelle des Untergrunds mit Hilfe der SKUA Softwarelösung für die Teilgebiete zu erstellen (Abbildung 10). Die Modelle bestehen aus den jeweiligen 3D Modellen der geologischen Landesämter Baden-Württemberg und Bayern. Das jetzt vorhandene BGE Model erlaubt eine Darstellung der Tiefenlage des Opalinustones im TG 001 und eine Kartierung der Mächtigkeitsverteilung der lithostratigraphischen Einheiten, ähnlich dem publizierten Beispiel aus Abbildung 9.

Die Qualität des 3D Modelles wird zum Zeitpunkt der Erstellung des Gutachtens als eingeschränkt nutzbar eingeschätzt. Gründe dafür sind:

- Simplifizierte Verwendung von vertikalen Störungen (Model Baden-Württemberg)
- Abwesenheit von Störungen (Modell Bayern)
- Erstellung der Karten basiert auf der Interpolation von weit voneinander entfernten Kontrollpunkten (d.h. Schichtgrenzen in vorhandenen Bohrpunkten), nicht 3D Seismik
- Die durch Interpolation erstellten Karten berücksichtigen nur bedingt vorhandene Störungszonen
- Die Qualität der verschiedenen Karten konnte nicht nachvollziehbar demonstriert werden
- Bis dato sind keine digitalen Bohrlochmessungen vorhanden/verwendet
- Es ist kein adäquates konzeptuelles sedimentologisches Model im Teilgebiet und seinen Untersuchungsräumen für den Zeitraum des Aaleniums vorhanden

- Dem Model liegt keine hochauflösende, sequenzstratigraphische Korrelation zu Grunde

Da die Datenlage im Teilgebiet es nur bedingt erlauben wird die obigen Fragestellungen zu beantworten ist ein Konzept notwendig, wie die verbleibenden Ungewissheiten in der Bewertung des Untergrundes behandelt werden (z.B. mehrere Realisationen eines 3D Modelles). Ein solches Konzept zur Behandlung dieser Ungewissheiten liegt noch nicht vor.

Die BGE hat inzwischen 1D Referenzprofile im Opalinuston und dem Deckgebirge erstellt, die auf Bohrlochmessungen und Bohrkleinanalysen im Teilgebiet basieren. Da im Teilgebiet keine Bohrkerndaten zur Verfügung stehen, wurden zur Parametrisierung der Ungewissheiten der Gesteinseigenschaften (z.B. Durchlässigkeit, Adsorption) Analogdaten aus dem Mont Terri Projekt benutzt. Dies erlaubt die schnelle Entwicklung von 1D dynamischen Modellen zur weiteren Methodenentwicklung. Es ist zu erwarten, dass ein vergleichbares Vorgehen in vielen der verbleibenden 90 Teilgebiete notwendig sein wird.

Empfehlung 6*: Die Datenlage im verwendeten Teilgebiet wird es nicht erlauben die entscheidende Frage nach der 3D Verteilung von sandigen (sprich durchlässigen) sedimentären Körpern im Untergrund vorherzusagen. Diese Frage ist ein wichtiger Faktor bei der Parametrisierung von Ungewissheiten im Untergrundmodel im Opalinuston (und anderen Tongestein) Teilgebieten. Bei der weiteren Methodenentwicklung muss dieser Gesichtspunkt als „kategorischer" Parameter einbezogen werden. Bis dato ist dies nicht ersichtlich in der Bearbeitung der Ungewissheiten der BGE, die sich vornehmlich auf „kontinuierliche" Parameter konzentriert wie z.B. die Permeabilitäts-messungen an Bohrkernproben zur Ermittlung der Variation der Gesteinsdurchlässigkeit).*

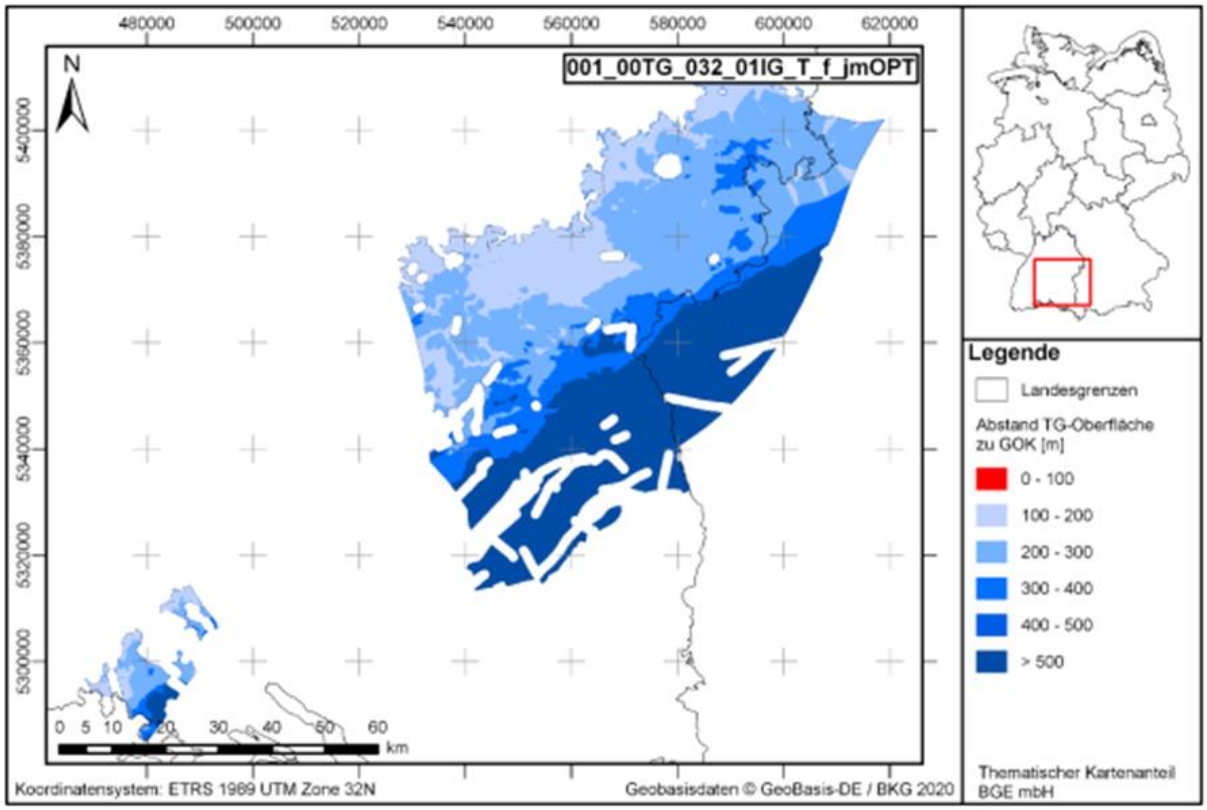

Abbildung 10: Abstand Oberfäche ewG zur Geländeoberkante in [m] für das Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Nach SE hin, zum Molassebecken der Voralpen ist die zunehmende Versenkungstiefe des ewG zu erkennen (BGE, 2020).

Datenbanken

Die BGE arbeitet inzwischen eng zusammen mit vielen nationalen (z.B. BGR) und internationalen Organisationen (z.B. NAGRA in Mont Terri, Französisches Endlagerprojekt Bure). Dies ist sehr zu begrüßen, da die BGE selbst nicht über alle notwendigen Expertisen selbst verfügt oder in anderen Projekten schon weitreichende Vorkenntnisse zu Verfügung stehen, die hier verwendet werden können.

Eine solche Kooperation ist die von der BGR entwickelte GeM-DB Datenbank zu geowissenschaftlichen Methoden (BGR - Projekte - Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB, Zwischenbericht (2021) (bund.de)). Sie ist in der jetzigen Phase der Methodenentwicklung für alle vier Wirtsgesteine von großem Nutzen und ermöglicht es schnell anwendbare geowissenschaftliche Methoden aufzufinden, in Abhängigkeit der Problemstellung.

Fazit - Datengrundlage

Die Daten zu dem von der BGE ausgewählten TG 001 Opalinuston werden durch die staatlichen geologischen Dienste von Baden-Württemberg (LGRB) und Bayern (LfU) zur Verfügung gestellt. Leider liegen die benötigten Daten großenteils nicht in nutzbarer digitaler Form vor. Die BGE hat dazu Digitalisierungsprojekte über Dienstleister initiiert, die vorhandene Dokumentationen zuerst in pdf-Format und später in, für Computermodelle brauchbare digitale Formate umwandeln sollen. Trotz einiger Fortschritte diesbezüglich, stellt dieser Schritt eine große Herausforderung in den kommenden Jahren dar, der langfristiger Vorplanungen bedarf.

Im jetzigen Arbeitsschritt des Endlager-Projektes, sprich der Methodenentwicklung, aber auch bei der späteren vergleichenden Analyse aller 90 Teilgebiete und ihrer Untersuchungsräume sind Analogdaten von besonderer Bedeutung. Solche Analogdaten sind in der Schweiz aus dem weit fortgeschrittenem Mont Terri Projekt aus dem dortigen Opalinuston sehr umfangreich vorhanden und öffentlich zugänglich (Download-Center | Nagra). Ähnliches trifft auf das BGR- Project AnSichT zu (BGR - Projekte - Projekt AnSichT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (bund.de)). Ein solches Vorgehen wird ausdrücklich begrüßt und wird auch im weiteren Verfahren eine wichtige Rolle spielen, insbesondere, wenn es um die Evaluierung von weiteren Teilgebieten mit wenig verfügbaren Daten und um vergleichende Analysen zwischen Teilgebieten mit unterschiedlicher Datenlage geht.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass der **digitalen Verfügbarkeit** und dem Vorhandensein **von Geodaten** in weiteren Teilen des Endlager-Projektes stets größere Bedeutung zukommen wird. Dies liegt daran, dass sie eine Voraussetzung für die Vergleichbarkeit von „Untersuchungsräumen“ innerhalb des Teilgebietes bildet und auch Vergleiche zwischen den einzelnen Teilgebieten beeinflusst. Sie ist im Augenblick als unzureichend zu bewerten.

Es bleibt weiterhin festzustellen, dass Geodaten von der BGE gesammelt und digitalisiert werden, es jedoch keine greifbare Lösung zu Frage gibt, wie die entscheidungserheblichen Daten später insgesamt der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen. Dies wird zusätzlich durch die Tatsache erschwert, dass alle geologischen Dienste des Bundes und der Länder unterschiedlich IT-Lösungen verwenden. Auch dies zeigt auf, dass es keine übergreifenden Vorstellungen zwischen BGE, BGR, den geologischen Landesdiensten und Bergbauämtern gibt, wie eine solche zukünftige Lösung aussehen soll.

***Empfehlung 7 (ähnlich früherem Gutachten)**: Es sollte eine Geodaten Task Force zwischen allen beteiligten Institutionen (incl. BGE) gegründet werden, die strukturelle und langfristige Pläne über eine gemeinsame, standardisierte Weise der Untergrunddatenspeicherung für die Bundesrepublik Deutschland entwirft und umsetzt. Diese Lösung sollte auch dazu verwendet werden, die entscheidungsrelevanten Daten der BGE für die Öffentlichkeit verfügbar zu machen. Da die Ursache dieses Problems darin liegt, dass sowohl unterschiedliche geologische Standards in den Landesämtern gebraucht werden, aber, zusätzlich dazu, auch unterschiedliche IT-Systeme Verwendung finden, ist diese fundamentale Herausforderung nur durch eine gemeinsamen Datenstrategie für geologische Daten im Untergrund zu lösen. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Geodaten noch nicht digital vorliegen. D.h. Teil eines solchen Ansatzes muss auch die Digitalisierung von Geodaten sein.*

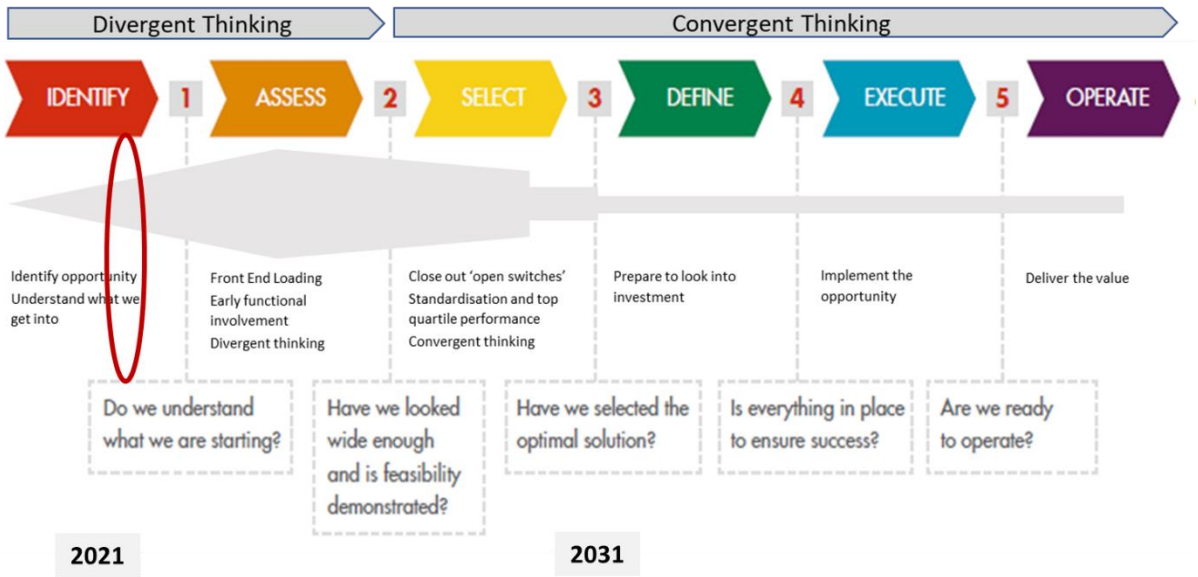

Abbildung 11: Typischer generischer Ansatz zur Strukturierung von Großprojekten, wobei in allen fünf Phasen wohldefinierte Arbeitsprozesse notwendig sind (verändert nach Eweje et al., 2012). Das StandAG definiert Phase I bis III. Die BGE entwickelt im Augenblick Arbeitsabläufe zur Methodenentwicklung für die systematische Einschätzung aller verbleibenden 90 Teilgebiete. Zur Methodenentwicklung der rvSU in Phase I Schritt 2 (rote Ellipse) des Endlagerprojektes werden vier TG aus allen, in Betracht kommenden Wirtsgesteinen verwendet.

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU)

Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) sind nach StandAG in drei Phasen unterteilt, eine repräsentative, eine weiterentwickelte und eine umfassende Phase (Abbildung 5). Zum Zeitpunkt des Gutachtens ist das Endlagerprojekt in der Phase der repräsentativen vSU (Abbildung 12).

Die vorläufige repräsentative Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 Absatz 1 und 2 StandAG) hat zum Ziel, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln.

(1) Gegenstand […] ist die Bewertung inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann. […]

(2) In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen […] wird das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und […] hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet. […]

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass der gegenwärtige Projektabschnitt Phase I Schritt 2 als komplexer angesehen wird im Vergleich zu Phase I Schritt 1 nach StandAG. Abbildung 11 zeigt schematisch die Phasen eines Großprojektes, wobei das StandAG nur Phase I bis III definiert. Innerhalb dieser Phasen sind einzelnen, noch zu definierenden Prozesschritte notwendig, die dann in Phase I die systematische rvSU aller verbleibender 90 TG erlauben soll.

Allerdings sind zu diesem Zeitpunkt noch keine weiteren Details dazu veröffentlicht, da diese im Augenblick erst erarbeitet werden. Während der Befragung durch den Gutachter hat die BGE Einsicht in den Fortschritt einiger Aktivitäten dazu ermöglicht. Dieses Gutachten hat jedoch nicht das Ziel, diese gerade laufenden Untersuchungen zu bewerten.

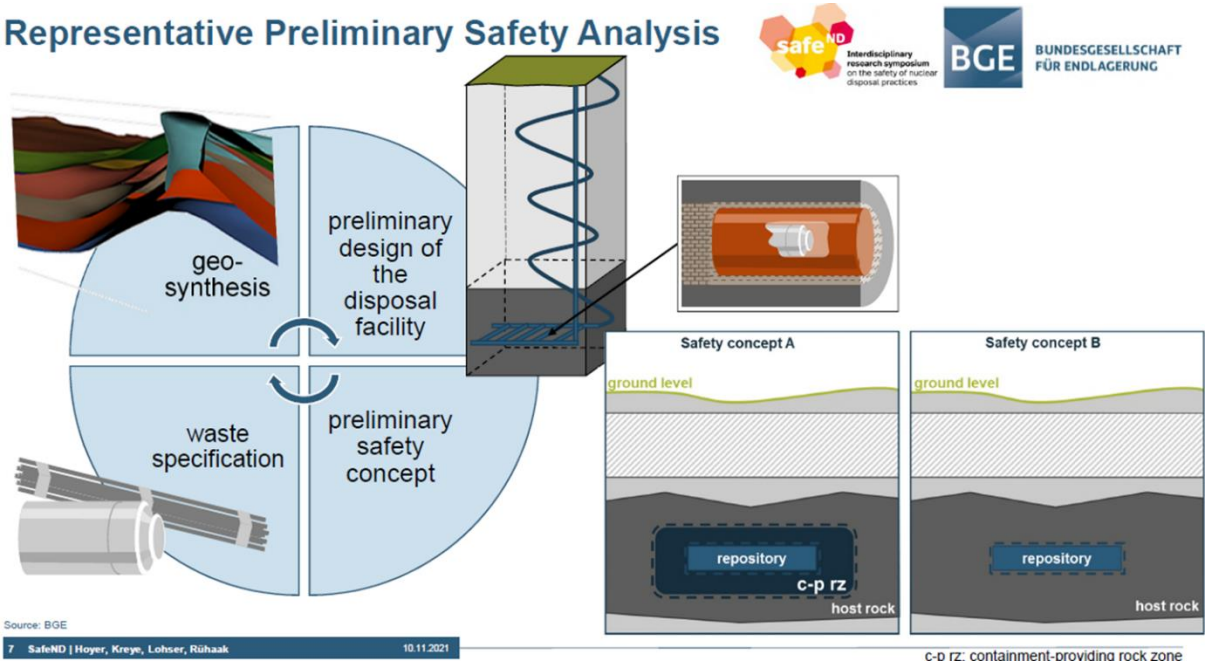

Abbildung 12: Schematische Darstellung einer rvSU nach Hoyer et al (2021). Die noch zu entwickelnde Methode soll dann Untergrunderkenntnisse zum ewG mit Konzepten des Ausbaus eines Endlagers zusammenführen („safety concept"). Diese sollen dann gemeinsam, zusammen mit den verbleibenden Ungewissheiten zur Evaluierung der 90 TG verwendet werden, was als repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) bezeichnet wird (nach Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)).

Status der Methodenentwicklung zur rvSU

Gegenwärtig entwickelt die BGE die Methoden zu den in Abbildung 12 gezeigten, einzelnen Schritten der rvSU. Ziel ist es eine systematische und standardisierte Methode zu entwickeln, die auf alle Wirtsgesteine und Teilgebiete angewendet werden kann, sprich alle 90 in Phase I Schritt 1 definierten Teilgebiete.

Die BGE hat inzwischen weitreichende Aktivitäten initiiert, die für die Methodenentwicklung zur rvSU notwendig sind. Diese werden entweder durch die BGE ausgeführt oder über externe

Forschungsaufrufe via Website, LinkedIn etc. angekündigt, wobei die eingegangenen Anträge dann von der BGE bewertet und Aufträge vergeben werden an akademische Einrichtungen, Bundes- und Landesämter oder privatrechtliche Firmen. Eine solche externe Beauftragung für zum Teil längerfristige Studien wird als sehr hilfreiches Instrument angesehen, da der BGE selbst nicht die notwendigen Ressourcen oder Expertisen zur Verfügung stehen.

Im Folgenden wird auf diese Entwicklungen kurz eingegangen mit der Einschränkung, dass alle diese Aktivitäten noch nicht beendet und nicht vollständig dokumentiert sind. Solche Ergebnisse wurden für das Ende des 1. Quartals 2022 von der BGE angekündigt.

Teilgebiete (TG) und Untersuchungsräume (UR)

Ein wichtiges Ergebnis wurde den NBG Sachverständigen jedoch schon vorab mitgeteilt und veröffentlicht (Hoyer et al., 2021), und zwar der Plan der BGE alle Teilgebiete noch weiter in einzelne, sogenannte Untersuchungsräume (UR) zu unterteilen, die dann nochmals mit MA, AK und geoWK beurteilt werden (Abbildung 13; Abbildung 14). Dies wird grundsätzlich als ein sinnvoller Schritt betrachtet. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- Viele Teilgebiete sind sehr groß. Dadurch sind die Mindestanforderungen (MA) und die geologischen Abwägungskriterien (geoWK) oft sehr unterschiedlich in ihrer regionalen Verteilung innerhalb eines Teilgebietes.
- In den Teilgebieten sind aufgrund der Anwendung von Ausschlusskriterien (AK) und Mindestanforderungen (MA) im jeweiligen Wirtsgestein häufig isolierte, kleinere geographische Gebiete vorhanden.
- Das Wirtsgestein Tongestein unterliegt sogenannten faziellen und damit lithologischen Veränderungen innerhalb von Teilgebieten, die sich etwa durch wechselnde Gesteinsausbildung (z.B. wechselnder Tongehalt, Sand- und Kalkeinschaltungen) ausdrücken. Dies hat direkten Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit und deren Variationen. Letztere ist einer der wichtigsten Parameter bei der Evaluierung eines möglichen Standortes.

Abbildung 13: In Phase I Schritt 1 des Endlagerprojektes wurden alle TG mit Hilfe eines Bewertungsmodules eingestuft, dass auf AK, MA und geoWK beruht (BGE, 2020). Innerhalb von Phase I Schritt 2 bei der rvSU wird jetzt eine „Geosynthese“ für alle Gebiete erstellt. Allerdings soll aufgrund der Heterogenität innerhalb der verbleibenden TG zuerst eine weitere Unterteilung aller TG in kleinere Einheiten erfolgen, sogenannte Untersuchungsräume (UR). Diese sollen dann jeweils eine eigene Geosynthese bekommen.

URs werden im TG 001 etwa ausgehalten aufgrund von vulkanischen Intrusionen oder nicht erfüllten MAs, wie der Mindestmächtigkeit von 100 m in den beiden kombinierten 3D Modellen der Staatlichen Geologischen Dienste Baden-Württemberg und Bayern.

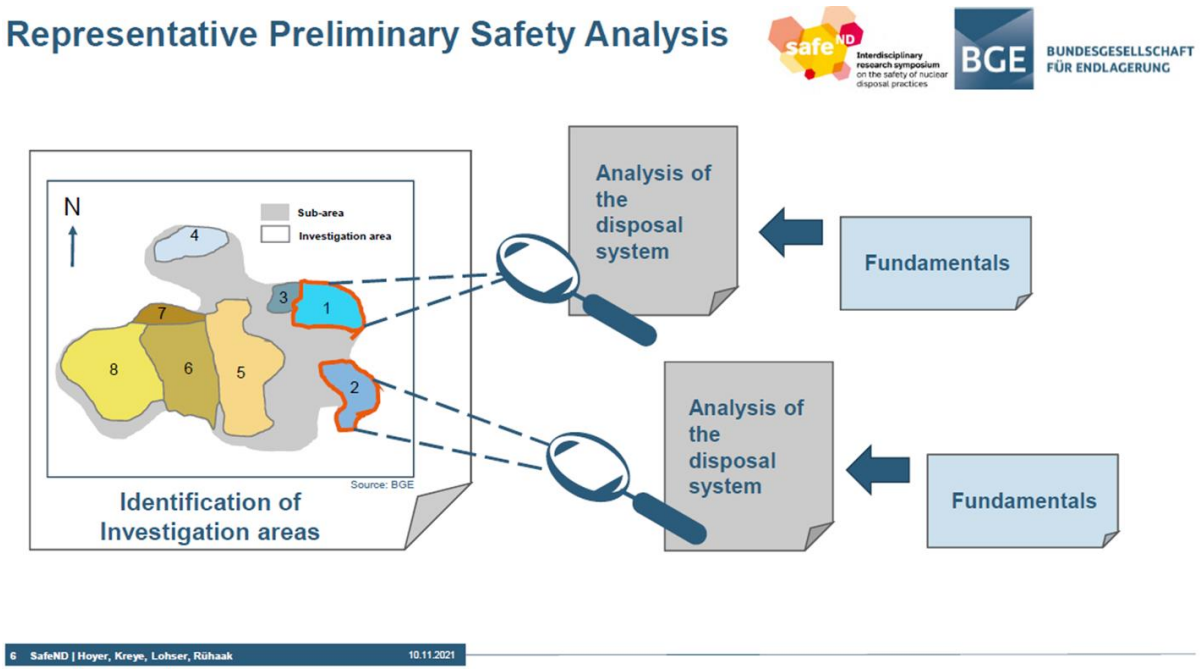

Abbildung 14: Schematische Zeichnung zur geplante Aufteilung aller Teilgebiete in Untersuchungsräume (Hoyer et al., 2021). Aufgrund der Heterogenität innerhalb der TG soll zuerst eine weitere Unterteilung in kleinere Einheiten erfolgen, sogenannte Untersuchungsräume (UR). Dies ist sehr begrüßenswert und erlaubt eine höhere Transparenz in der späteren Beurteilung der TG und ihrer UR. Es bedarf aber erst der detaillierten Analyse eines jeden verbleibenden Teilgebietes, bevor solche Untersuchungsräume zusammenfassend dargestellt werden können. Wie eine weitere Unterteilung der TG erfolgen soll, ist Teil der gegenwärtigen Methodenentwicklung.

rvSU und die Analyse des Endlagersystems

Eine Herausforderung in der Methodenentwicklung ist es, die Charakterisierung des Untergrundes mit seinen verbleibenden Ungewissheiten zusammenzuführen mit dem eigentlichen Endlagersystem (sprich Ausbau des Endlagers), wobei die gesetzlichen Anforderungen definiert sind, dass pro Jahr weniger als 10^{-9} der Masse und Anzahl von Radionukliden und insgesamt nach 1 Ma weniger als 10^{-4} der Masse und Anzahl der eingelagerten Radionuklide entweichen darf (Abbildung 15).

Um verbleibende Ungewissheiten im Untergrund mit verschiedenen Ausbaukonzepten eines Endlagers zusammenzuführen wird es notwendig sein innerhalb der Methodenentwicklung einen Multi-Szenario Modellierungsansatz zu entwickeln, wie er etwa in großen, industriellen Untergrundprojekten Verwendung findet, z.B. zum Zwecke der Kohlenwasserstoffproduktion.

Bei den vorgenommenen Befragungen konnten initiale Entwicklungen zur Modellierung (1D Modelle) eingesehen werden, jedoch sind diese Arbeiten zum jetzigen Zeitpunkt weder abgeschlossen noch dokumentiert und es existiert noch kein etablierter Arbeitsablauf (Workflow).

***Empfehlung 8**: Zu einem späteren Zeitpunkt und als Teil der zu entwickelnden Methode sollten auch räumlich Variationen des Massentransportes von Radionukliden in Betracht gezogen werden, da nicht zu erwarten ist, dass potentielle Standorte vollständig homogene Wirtsgesteine aufweisen oder das vorhandene geotektonische Stressfeld in den Teilgebieten homogen verteilt ist.*

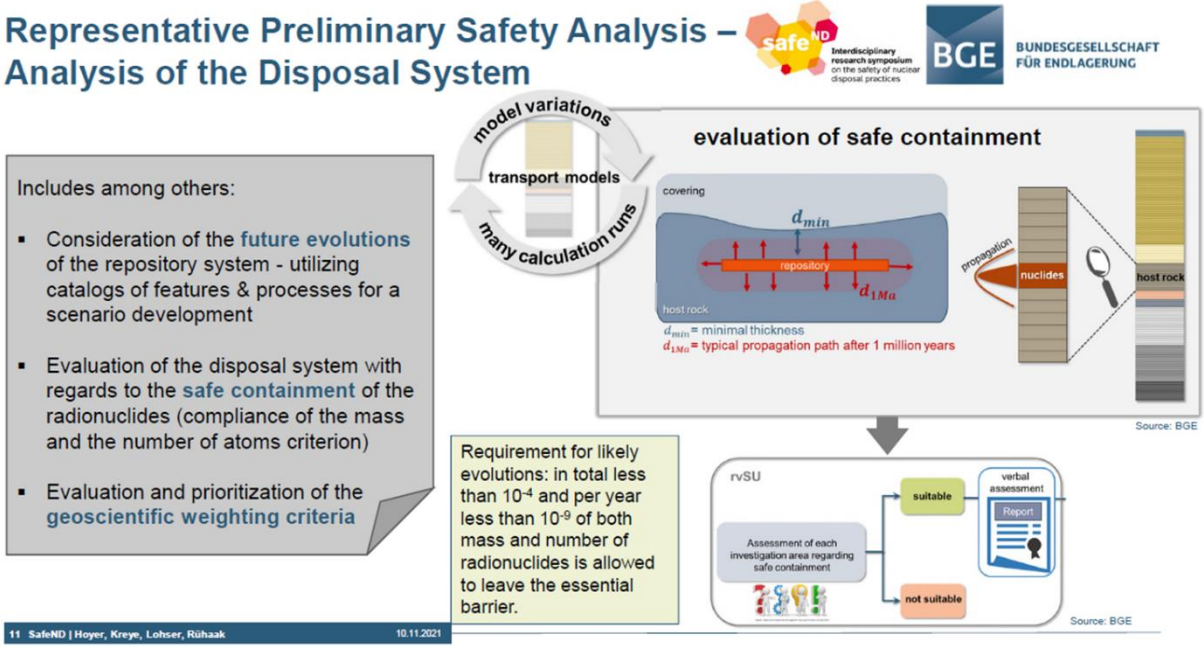

Abbildung 15: rvSU und die Analyse des gesamten Endlagersystems (Hoyer et al, 2021). Um die gesetzlichen Anforderungen zum Massentransport von Radionukliden über die kommenden 1 Ma systematisch analysieren zu können, wird es notwendig sein, Szenarien zu entwickeln, die die verbleibenden Ungewissheiten im Untergrund mit Hilfe von Realisationen zusammen mit verschiedenen Ausbaukonzepten des Endlagersystems („safety concept“) bringen. Dies wird als Multi-Szenario Modellierung bezeichnet. Jedoch gibt es dazu noch keine weiteren Details von Seiten der BGE, die derzeit zur Verfügung stehen.

Fragestellung 1: Kriterien zur Auswahl des Gebiets zur Methodenentwicklung (GzM)

Gegenstand der ersten Aufgabenstellung des hier angefertigten Gutachtens ist es die „Kriterien zur Auswahl des Gebietes zur Methodenentwicklung (GzM)“ der BGE zu beurteilen.

Nach eingehenden Untersuchungen bleibt festzuhalten, dass bei der Auswahl des GzMs kein vorab zusammengestellter Kriterienkatalog verwendet wurde und auch keine Dokumentationen diesbezüglich im ELO-System der BGE vorhanden sind.

Nach Aussagen der befragten Mitarbeiter des BGE wurden diesbezüglich jedoch „fachliche Erwägungen“ für alle 8 Teilgebiete mit Wirtsgestein Tongestein angewendet, die in internen Besprechungen der BGE erörtert wurden.

Während der Befragungen wurde den Gutachtern ähnliche Abbildungen wie veröffentlicht durch Hoyer et al. (2021) vorgestellt (Abbildung 14; Abbildung 15), die erste Schritte im Prozess der

Methodenentwicklung erkennen lassen. Dabei wurde deutlich gemacht, dass eine generelle und systematische Herangehensweise bei der Durchführung der rvSU stark abhängig von der Datenlage im Teilgebiet ist. Kriterien, die bei den fachlichen Erwägungen herangezogen wurden, sind u.a.:

- Alle Wirtsgestein müssen bei der Methodenentwicklung einbezogen werden.
- Die auszuwählenden GzM sollten eine heterogene Datenlage besitzen.
- Die GzM sollten eine große Variabilität in Punkto Größe und geologischer Komplexität besitzen.

Ein Beispiel von fachlichen Abwägungen bei der Selektion aus den Alternativen Teilgebieten zum Wirtsgestein Tongestein, wie durch die BGE angestellt, ist etwa das Teilgebiet **008_01TG_204_01IG_T_f_kro aus der Obere Kreide** im Norddeutschen Becken (Sachsen, Brandenburg) mit seiner Ton-Mergel Abfolge als ewG. Auch dazu hätte sich ein Analoguntersuchungsgebiet wie etwa im lothringischen Bure in Frankreich angeboten. Dort werden durchschnittlich 140 m mächtige, marine Ton-Mergel Ablagerungen, allerdings aus dem Mittel- und Ober-Jura, seit mehr als 20 Jahren in Tiefenlagen zwischen 420 und 560 m in einem 490 m langen Stollensystem untersucht. Dadurch ist dort ebenfalls ein umfangreicher, verfügbarer Analog-Datensatz in einem tektonisch wenig deformierten Gebiet vorhanden. Allerdings wird die derzeitig verfügbare Datenlage innerhalb des TG 008 aus der Oberkreide in Sachsen als sehr schlecht bewertet. Deshalb wurde dieses TG nicht für die Methodenentwicklung herangezogen.

Als weiteres Beispiel wurden die Teilgebiete **002_00TG_044_00IG_T_f_tUMa** (ältere Untere Meeresmolasse) und **003_00TG_046_00IG_T_f_tUMj** (jüngere Untere Meeresmolasse) angeführt, die zwar zusammen viele Untergrunddaten aufweisen, aber als strukturgeologisch herausfordernd angesehen werden. Im Vergleich zu den zumeist weniger tektonisch beanspruchten Gebieten im Wirtsgestein Tongestein, stellen sie also einen Extremfall dar, der zum Zwecke der Verwendung zum GzM als weniger günstig betrachtet wird, Diese Argumentation ist nachvollziehbar. Leider konnten dazu keine ausreichenden Dokumentationen von der BGE vorgelegt werden.

Für das TG 001 im Opalinuston sprechen fachliche Erwägungen wie z.B. die Größe, die heterogene Datenlage innerhalb des Teilgebietes und die mehr als 100 m Mächtigkeit der Teufelsloch-Subformation im Opalinustones (Abbildung 7). Obwohl man darin Kalk-Konkretionen und dünne, sandige Einschaltungen mit Karbonatzementierung findet, sind bis dato keine Lagen mit höheren Wegsamkeiten (Permeabilität) bekannt. Diese relative homogene Lithologie und die erwartete langfristige Stabilität des ewG sind weitere Erwägungen bei der Auswahl des GzM. Dazu kommt der umfangreiche, verfügbare Datensatz aus dem vor 25 Jahren begonnenem Mont Terri Projekt der NAGRA im Schweizer Opalinuston. Diese fachlichen Abwägungen sprechen für eine Eignung der Teufelsloch-Subformation im jetzigen Projektabschnitt der Methodenentwicklung. Ein weiteres vorgebrachtes Argument ist die gute Digitalisierung der geologischen Daten in Baden-Württemberg, Dies steht etwa im Gegensatz zur Datenlage in NRW, das eine sehr geringe digitale Datenverfügbarkeit und Datenqualität aufweist.

Fazit – Fragestellung 1: Auch in Anbetracht der Tatsache, dass die Auswahl des GzM keine Aussage bezüglich einer Vorfestlegung eines zukünftigen Standortes bedeutet, ist die hier durch die BGE gewählte Vorgehensweise zur Verwendung von Kriterien zur Auswahl des GzM als unzureichend zu beurteilen. Der Grund dafür liegt zum einen im Fehlen von konsistent angewendeten Abwägungskriterien zum Vergleich aller Teilgebiete. Zum anderen ist das Fehlen einer dokumentierten, qualitativen Einschätzung aller Teilgebiete eines Wirtsgesteins zu bemängeln, die es erlaubt hätte, die Eignung der einzelnen Teilgebiete gegeneinander abzuwägen.

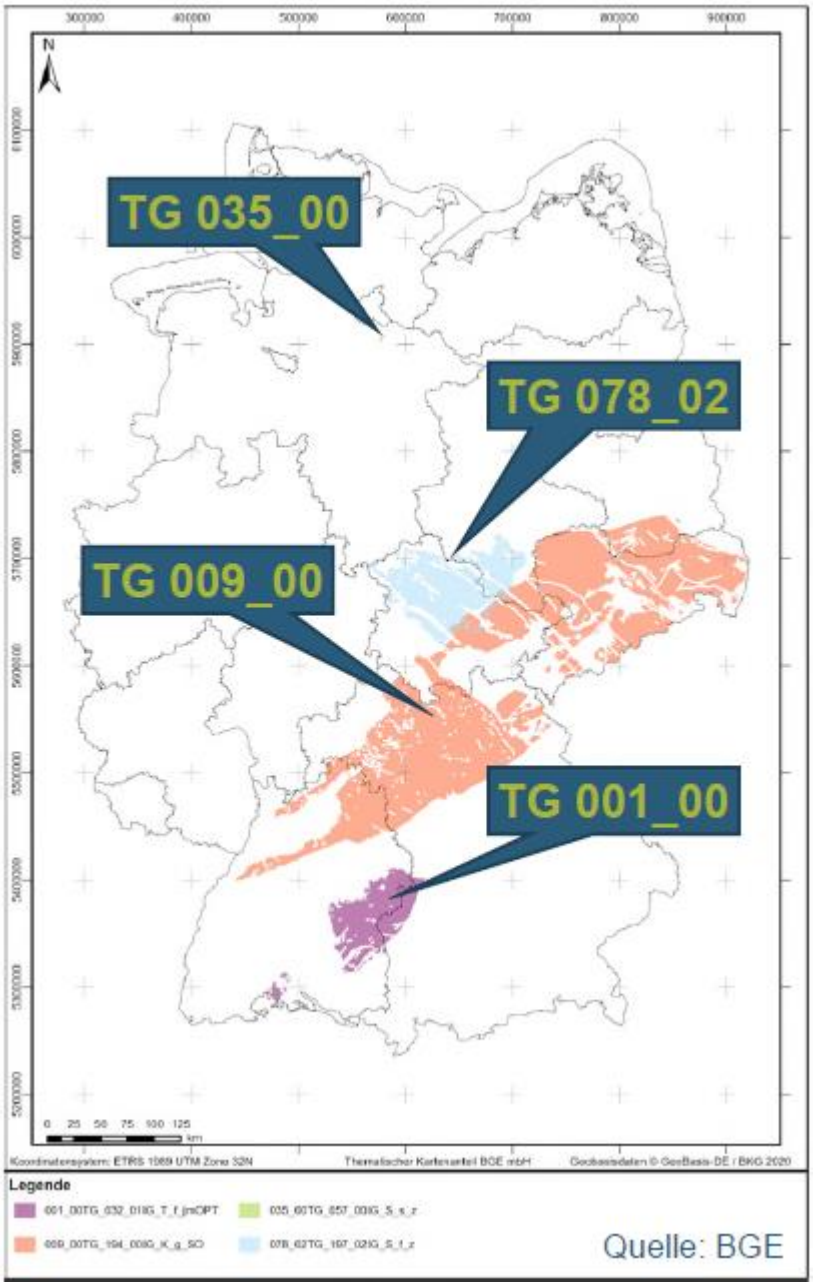

Abbildung 16: Im gegenwärtigen Status des Projektes definiert die BGE die Anforderungen an die Methodenentwicklung für ein generelles und systematisches Herangehen zur Durchführung der rvSU in allen verbliebenen 90 Teilgebieten. Dazu werden TG aus allen vier Wirtsgesteinen verwendet, präferentiell mit einer heterogenen Datenverfügbarkeit und Variabilität in Bezug auf Größe und geologische Komplexität (BGE, 2021). In diesem Gutachten wird das TG 001 mit dem Wirtsgestein Tongestein näher untersucht.

Da die Ermittlung eines Standortes zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen einem transparenten Verfahren folgen soll, wäre diesbezüglich bei der Auswahl des GzM für die jeweiligen Wirtsgesteine ein vorab vorhandener Kriterienkatalog wünschenswert gewesen. Ein solcher Katalog würde eine vergleichende Analyse aller Teilgebiete mit dem Wirtsgestein Tongestein zulassen. Das Ziel wäre dabei eine zumindest semi-quantitative Darstellung der Ergebnisse, wie etwa schematisch gezeigt in Abbildung 17. Es ist aufgrund der nicht ausreichend dokumentierten BGE-internen Diskussion nicht erkennbar, ob nicht auch andere oder wie viele andere Teilgebiete die gesetzten Anforderungen zum GzM erfüllen können oder vielleicht auch noch besser geeignet sein könnten.

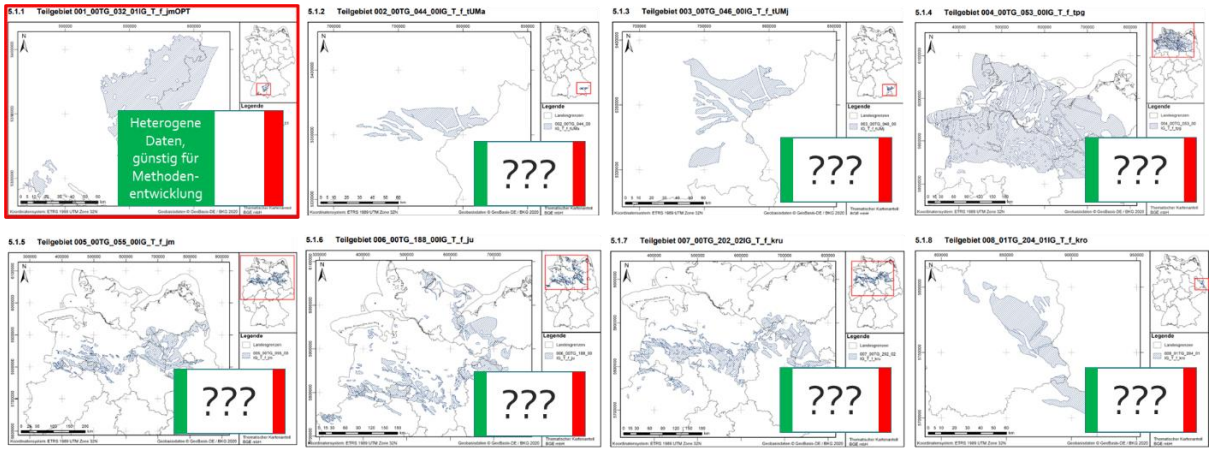

Abbildung 17: Schematische Darstellung einer möglichen Evaluierung aller 8 Teilgebiete Tongestein mit Hilfe eines semi-quantitativen Vergleichs unter Anwendung von vorab festgelegten Kriterien zur Auswahl des Teilgebietes für die Methodenentwicklung. Eine hypothetische Auswertung ist hier unter Verwendung der „Italienischen Flagge“ gezeigt. Dabei ist in grüner Farbe die Eignung des Teilgebiets zur Methodenentwicklung gezeigt, in weiß vorhandene Ungewissheiten und in rot Indikatoren, die das Gebiet als weniger geeignet ausweisen. Eine solche oder ähnlich geartete Auswertung ist bei der BGE nicht vorhanden.

Fragestellung 2: Eignung des ausgewählten Gebietes für die Methodenentwicklung (GzM)

Die zweite Fragestellung des hier erstellten Gutachtens bezieht sich auf die Eignung des ausgewählten Teilgebietes 001 Opalinuston für die Methodenentwicklung, nach den in Abbildung 12 gezeigten, vorläufigen Prozessschritten der BGE.

Bei der Analyse zur Eignung eines Teilgebietes für die Methodenentwicklung müssen die vorhandene Datenlage zu AK, MA und geoWK, die Lokation des Teilgebietes und die restierenden Ungewissheiten im Untergrund betrachtet werden. Einige dieser Aspekte werden im Folgenden für das TG 001 beleuchtet.

Die BGE geht bei ihrer Geo-Charakterisierung in Teilgebieten und Untersuchungsräumen nach dem Grundprinzip der Analyse von ***features, events and processes*** vor. Beispiele dazu sind etwa Glaziale Erosion, Reaktivierung von Störungen und Gesteinsdeformation. Im folgenden Teil werden einige dieser Aspekte angesprochen:

Tektonische Deformationen im Wirtsgestein Tongestein

In Zukunft müssen neben den großen, wohl bekannten Störungsbereichen auch kleinere, weniger bekannte Störungen in die Evaluierung mit einbezogen werden. Dabei wird das sogenannte *Shale/Gauge Ratio* eine Rolle spielen (Jolley et al., 2007). Das in Tongesteinen wichtige *Clay Smear Potential*, sprich die Eigenschaft von relativ weichen Tongesteinen Klüfte oder kleiner Störungen schnell wieder zu verschließen und dadurch die Gesteinsdurchlässigkeit vertikal und lateral zu

reduzieren, wird grundsätzliche als eine positive Eigenschaft im Wirtsgestein Tongestein angesehen (Bourg & Ajo-Franklin, 2017). Eine solche Eigenschaft kehrt sich jedoch um bei stark verfestigten oder leicht metamorphen Tongesteinen (z.B. Boda Tonstein, Ungarn). Dazu konnten jedoch keine Studien oder Ergebnisse bei der BGE eingesehen werden.

***Empfehlung 9**: Die BGE sollte bei der Evaluierung von TG und UR mit Wirtsgestein Tongestein die möglicherweise positiven Einflüsse von Tongestein auf das Verschließen von störungsgebundenen, vertikalen Wegsamkeiten in ihre Studien und der Methodenentwicklung zu späteren Modellierungen einbinden. Analog dazu sollten die TG und UR auch auf mögliche, höhere horizontale Wegsamkeiten (sprich negative Einflüsse) aufgrund von lithologischen Heterogenitäten (z.B. Sand- oder Karbonateinschaltungen) hin analysiert werden.*

Seismizität

BGE Berichte dokumentieren die Gefährdungseinstufung der Seismizität im GzM nach Grünthal et al. (2018). Aus den historischen Aufzeichnungen und Karten können deutlich signifikante Erdstöße in und um das Teilgebiet 001 ausgehalten werden (Abbildung 18). D.h. das seismische Risiko um das Teilgebiet 001 ist relativ hoch im Vergleich zu Teilgebieten in anderen Gebieten Deutschlands.

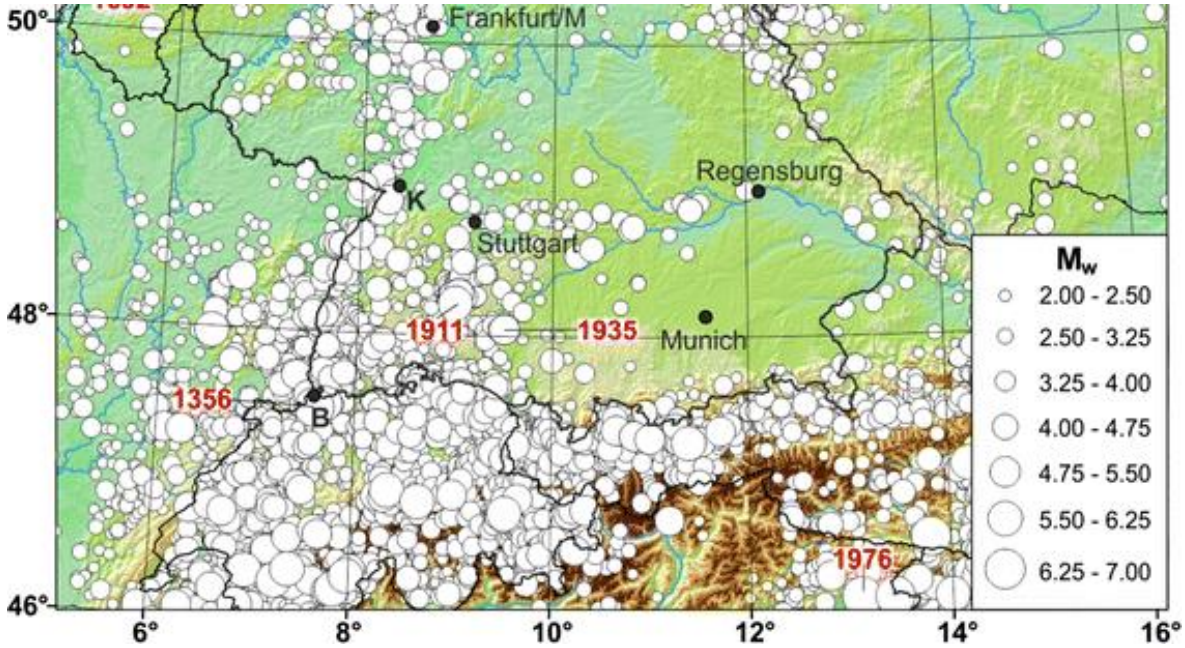

Abbildung 18: Seismizität in Deutschland nach Grünthal et al. (2018). Innerhalb Deutschlands ist die Seismizität im und um das GzM für das Wirtsgestein Tongestein relativ hoch, d.h. es sind geologische junge tektonische Aktivitäten vorhanden.

***Empfehlung 10 (ähnlich früherem Gutachten):** Oberflächennahe, junge tektonische Lineamente oder Störungszonen (Lehné & Sirocko, 2010) sollten im weiteren Projektverlauf für das gesamte Teilgebiet als thematische Karte aufbereitet werden sprich Teil der zu entwickelnden Methode sein. Es ist zu erwarten, dass diese Lineamente als Indikatoren für potenzielle fluviatile und gletscherbedingte Erosion in den kommenden Eiszeiten dienen können, d.h. den Schutz des Endlagers über den Zeitraum*

von 1 Million Jahre beeinflussen. Dies sollte Teil einer Risikoabwägung von potentiellen Standorten bilden.

Vulkanische Einschaltungen

Im TG 001 finden sich lokal vulkanische Intrusionen aus einem Altersbereich von 6,9 Ma bis 30 Ma, die das Wirtsgestein Opalinuston durchschlagen haben. Diese Information wird von der BGE zur weiteren Unterteilung des Teilgebietes in Untersuchungsräume verwendet. Solche UR sollen in den weiteren Studien der BGE entweder zum Ausschluss oder zur Weiterbearbeitung empfohlen werden. Dies ist Teil der gegenwärtigen Methodenentwicklung. Dieses Vorhaben wird sehr begrüßt.

Deckgebirge

Im TG 001 wird der Opalinuston von den oberjurassischen Karbonatabfolgen des Malm überlagert. Diese sind bekannt für ihre interne Verkarstung, die auch im Untergrund zu beobachten ist und wegen ihrer großen Gebirgsdurchlässigkeit sehr gut geeignet ist für die Entwicklung von Geothermischen Projekten (z.B. Fernwärmeversorgung Stadt München). Für ein radioaktives Endlager ist eine solche Eigenschaft als sehr ungünstig zu bewerten.

Auch der Eisensandstein im oberen Dogger und damit verbundene deltaische Ablagerungen können zu erhöhten Wegsamkeiten horizontaler und vertikaler Natur führen.

***Empfehlung 11**: Vertikale Wegsamkeiten im Opalinuston und eine Verbindung zum darüberliegenden, verkarsteten Malmkalk sollten detailliert untersucht werden. Eine Analyse der vertikalen Wegsamkeiten muss Teil der zu entwickelnden Methode und Geosynthese der TG und UR sein.*

Glaziale Erosionsrinnen und Eiszeitliche Überprägung

BGE Dokumentationen zeigen deutlich auf, dass in Süddeutschland auftretende eiszeitliche, subglaziale Rinnen als Erosionsstrukturen mit einer Tiefe von bis zu 300 m vorkommen können (z.B. Bodensee). Dies bedeutet, dass in Bereichen von solchen glazialen Rinnen die Mindesttiefe eines Endlagers tiefer angesetzt werden muss oder solche Bereiche mit tiefen Glazialrinnen unter die Ausschlusskriterien fallen sollten.

Karten zur quartären, glazialen Erosion können aus den 3D Modellen der SGD und der BGE visualisiert werden (*GST Web (bge.de)*). Allerdings ist die Qualität der Karten in den einzelnen Bundesländern als zum Teil sehr unterschiedlich zu bewerten. Die Basis Quartärkarte im 3D Model von Baden-Württemberg ist nur begrenzt nutzbar. Da solche glazialen Rinnen häufig mit jungem Sediment verfüllt sind, ist ihre Erosionstiefe aus Oberflächenanalysen alleine schwer erkennbar. Es sind deshalb zahlreiche Bohrdaten notwendig, um dazu genauere Aussagen treffen zu können. Im Falle des Bodensees, der Teil einer solchen tiefgreifenden Glazialrinne ist, ist dies nicht erforderlich.

Die eiszeitliche Überprägungen des Teilgebietes wird derzeit von der BGE untersucht und die maximale Ausdehnung der verschiedenen glazialen Vorstöße können bereits in Kartendarstellungen zur Einstufung der Untersuchungsräume verwendet werden. Daten zur maximalen Eisrandlage sind von großer Bedeutung für die Minimierung des Risikos von zu erwartenden mehrfachen Eisvorstößen in den kommenden 1 Ma. Solche Eisbewegungen sind auch verantwortlich für

Hebungen und Senkungen in allen Teilgebieten mit glazialer Überprägung und deshalb einer der wichtigen Prozesse, die die Stabilität der Barriere, sprich ewG beeinflussen können.

Neben glazialer Erosion findet sich auch fluviatile also durch Flussläufe hervorgerufene Erosion, die bis zu 100 m Erosionstiefe aufweisen kann.

Empfehlung 12 (ähnlich früherem Gutachten): *In Phase I Schritt 1 des Projektes wurden eine minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von 300 m für Tongestein angenommen (siehe MA). Dies wirft die Frage auf, ob die Flächen um glazialen Erosionsrinnen nicht ebenfalls als Ausschlussflächen betrachtet werden sollten, da sie zum Teil mehr als 300 m Erosionstiefe aufweisen. Dabei ist eine Analyse notwendig, inwieweit die Erosionsrinnen in Verbindung mit oberflächennahen, tektonischen Lineamenten oder Unterschieden der Festigkeit des Gesteins in Verbindung stehen.*

Gebirgsdurchlässigkeit

Basierend auf umfangreichen Erfahrungen aus Kohlenwasserstoffreservoiren im Untergrund ist bekannt, dass häufig zwei Faktoren großen Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit haben:

1. Aktive und inaktive tektonische Lineamente und Zonen, die insbesondere die vertikalen, aber auch horizontalen Fließeigenschaften beeinflussen (z.B. Jolley et al, 2007). Strukturellen Elemente sind im 3D Modell der BGE als vereinfachte vertikale Störungen abgebildet, wie entnommen aus dem Landesmodel Baden-Württemberg. Für das bayerische Gebiet sind keine Störungsflächen vorhanden.
2. Veränderungen in der Gesteinsausbildung (Fazies) innerhalb einer mächtigen sedimentären Gesteinsabfolgen, wie etwa die Einschaltung von dünnen Sandlagen oder Sandkörpern innerhalb der untersuchten marinen Tonabfolge. Diese können, in Abhängigkeit der Wassertiefe im Ablagerungsmilieu, durch episodischen Massentransporte vor einem Delta (Turbidite) oder durch Sturmlagen (Tempestite) erzeugt werden (Pattison, 2005). Ihr Einfluss auf die horizontale Gesteinsdurchlässigkeit (Permeabilität) kann vergleichsweise ähnliche Bedeutung haben wie die von tektonischen (vertikalen) Störungszonen. Nach bisherigen Studien der BGE sind solch dünne Sandlagen vorhanden. Jedoch sind die Porenräume mit Karbonatzementen verschlossen, d,h, die Permeabilität ist ähnlich gering wie im umgebenden Tongestein. Dies wäre als günstige Eigenschaft für eine Endlagerung in Tongestein zu bewerten. Zum jetzigen Zeitpunkt sind dazu nur vorläufige Untersuchungsergebnisse vorhanden.

Empfehlung 13 (ähnlich früherem Gutachten)*: Es wird empfohlen, die bei dem Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ angesprochenen Studien (BGE, 2020) zu vertiefen. Speziell die Verbreitung von sandiger und karbonatischer Gesteinsfazies innerhalb der Tonabfolge ist von großer Bedeutung für die horizontale Permeabilität sprich Gesteinsdurchlässigkeit. Dabei sollten nicht nur, oft allein sporadisch vorhandene Daten oder Referenzdatensätze aus dem Untergrund verwendet werden, sondern auch sogenannte* ***Analogstudien****. Dies sind Studien zu vergleichbaren Gesteinsabfolgen, die man im anstehenden Gebirge oder im Untergrund gut 2- oder 3-dimensional verfolgen und analysieren kann. Detaillierte Studien zu solchen Beispielen in toniger Beckenfazies (d.h. ähnlich dem Opalinuston) gibt es z.B. aus der Kreidezeit der Book Cliffs Formationen in Utah, wo solche Beobachtungen im Anstehenden Gebirge verfolget werden können (Pattison, 2005). Auch das Mont Terri Projekt mit seinen umfangreichen Bohrkerndaten könnte dazu verwendet werden.*

Empfehlung 14 (ähnlich früherem Gutachten): *Neben vertikalen Wegsamkeiten im Gestein (d.h. Störungen), die in Tonstein oft weniger effektiv sind aufgrund mechanischer Gesteinseigenschaften sollte in Phase I Schritt 2 bei der Untersuchung des Wirtsgesteins Tongestein vermehrt Aufmerksamkeit auf die horizontale räumliche Verteilung von Sandeinschaltungen oder Sandkörpern gelegt werden, da diese die Gesteinsdurchlässigkeit entscheidend beeinflussen können (d.h. den Transport von Radionukliden).*

Das TG 001 eignet sich für weitere sedimentologische Studien diesbezüglich nur bedingt, da im Untergrund innerhalb des Teilgebietes wenig Bohrkerndaten aus dem Opalinuston vorhanden sind. Jedoch sind an den Abhängen des Schwäbischen Jura gute Oberflächenaufschlüsse vorhanden, die im Umfeld des TG hilfreich sein können (siehe Abbildung 9).

Weitere Gesteinseigenschaften

Obwohl der BGE im TG 001 kaum Bohrkerne und digitale Bohrlochmessungen vorliegen, besteht ein großer Vorteil darin, dass sehr weitreichende Datensätze zu Gesteinseigenschaften aus sehr ähnlichen lithologischen Ausbildungen im Opalinuston in der Schweiz, sprich aus dem Mont Terri Projekt, vorliegen. Diese analogen Gesteinsdatensätze erlauben die Verwendung von sehr realistischen Parametern in statischen und dynamischen Modellen, die Teil der Methodenentwicklung ausmachen. Dabei handelt es sich z.B. um Messungen an Gesteinsproben zur Gebirgsdurchlässigkeit, des Porenraumes, geomechanische Messungen zur Standfestigkeit von Tongesteinen, mineralische und chemische Zusammensetzung von Tongesteinen, Adsorptionsverhalten der Tonminerale mit Bezug auf Radionuklide etc..

Fazit: Die Möglichkeit der Verwendung von Mont Terri Daten zur Methodenentwicklung ist ein nicht zu unterschätzender Faktor im derzeitigen Arbeitsschritt. Er ist als sehr positiv zu bewerten, insbesondere deshalb, weil die BGE im Augenblick noch keine eigenen Daten akquiriert, sondern nur vorhandene Informationen verwendet. Zusätzlich kommt für die BGE erschwerend hinzu, dass bei vielen Daten zwar ihr Vorhandensein bekannt ist, sie aber häufig (noch) nicht verfügbar sind oder eine notwendige Digitalisierung der Daten in verwendbare Formate in naher Zukunft nicht zu erwarten ist.

Geosynthese je Untersuchungsraum

Das StandAG regelt mit Hilfe der rvSU, dass für jeden Untersuchungsraum im Teilgebiet eine Geosynthese erstellt werden muss (Hoyer et al, 2021). Als Basis dafür entwickelt die BGE für die Teilgebiete umfangreich dokumentierte Geo-Charakterisierungen. Der derzeit vorhandene Status konnte bei der Befragung eingesehen werden, ist aber stets noch in Arbeit, also nicht Teil dieser Beurteilung.

Fazit – Fragestellung 2: Insgesamt betrachtet ist das TG 001 im Opalinuston durchaus als gut geeignet einzustufen zum Zwecke der Methodenentwicklung für alle weiteren Teilgebiete und die rvSU. Die heterogene Datenlage wird es auch notwendig machen diese Methodenentwicklung in Richtung Einschätzung von Ungewissheiten hin zu entwickeln. Die Robustheit der Abschätzung der Ungewissheiten bei der vergleichenden Bewertung aller verbleibenden Teilgebiete wird entscheidend bei der weiteren Beurteilung sein. Grund dafür ist, dass viele der verbleibenden

Teilgebiete keine ausreichende Datenlage aufweisen, um eine umfassende Analyse in allen diesen Teilgebieten oder Untersuchungsräumen durchzuführen. Es ist zu erwarten, dass sich die Aufsplittung der Teilgebiete in Untersuchungsräume dabei als hilfreich erweisen wird (Abbildung 14).

Verwendung und Umgang mit Ungewissheiten

Eine robuste und vergleichbare Analyse der verbleibenden Ungewissheiten bei der Auswahl der Standorte zur über- und später zur untertägigen Erkundung wird von entscheidender Bedeutung im weiteren Verlauf des Projektes sein.

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten beim Umgang mit den verbleibenden Ungewissheiten im Untergrund:

1) a) **Reduktion der Ungewissheiten durch Akquirierung von neuen Daten**. Dies ist für die BGE im jetzigen Stadium aufgrund des StandAG keine Option.
   b) **Auffinden von existierenden Daten** aus dem Untergrund und das verfügbar machen in brauchbaren digitalen Formaten. Dies wird im jetzigen und im weiteren Verlauf des Standortprojektes als die größte Herausforderung angesehen, da die digitalen Ressourcen (IT Systeme, Vernetzung, Mitarbeiter) der BGE, der BGR und der SGD den republikweiten Anforderungen nach Untergrunddaten für das Endlagerprojekt nicht gewachsen sind.
2) **Identifizierung und Handhabung von Ungewissheiten** in der zu entwickelnden Methode zur rvSU. Dies muss ein fester Bestandteil der Methodenentwicklung sein und wird gegenwärtig auch schon von der BGE bearbeitet.

Ausweisung und Bewertung von Ungewissheiten

Bei der Verwendung von Ungewissheiten in einem Untergrundprojekt wie der Endlagersuche sind mehrere Gesichtspunkte von Bedeutung.

1) Welche Ungewissheiten gibt es?
2) Welche Bedeutung hat jede einzelne dieser Ungewissheiten?
3) Um welche Art/Typ von Ungewissheit handelt es sich?
4) Wie kann ich diese Ungewissheiten parametrisieren?

Die **Charakterisierung und Parametrisierung der Ungewissheiten** wird also eine große Rolle im weiteren Projektverlauf spielen. Dabei ist zu bemerken, dass in diesem Zusammenhang meist an die Festlegung von Grenzwerten und Wahrscheinlichkeiten von kontinuierlichen Parametern gedacht wird. Dies ist wichtig, doch häufig sind sogenannte diskrete und kategorische Typen von Ungewissheiten innerhalb der Gesamtabschätzung noch bedeutender. Ein solcher kategorischer Parameter kann etwa eine hochpermeable Lage („horizontale Autobahn“) oder Störungszone („vertikale Autobahn“) innerhalb der Gesteinsabfolge der Wirtsgesteine Ton, Salz oder Kristallin darstellen. Es kann sich dabei auch um eine alternative sequenzstratigraphische Korrelation und daraus folgend eine alternative Architektur des ewG handeln. Ein anderes Beispiel wären oft störungsbedingte hohe Wegsamkeiten innerhalb von Salzformationen die normalerweise sehr

niedrige Gesteinsdurchlässigkeiten besitzen. Solche Phänomene führen des Öfteren zu unerwarteten Wassereinbrüchen in Salzstöcken, wie aus vielen Salzbergwerken und Bohrungen bekannt.

Dazu wird eine adäquate Dokumentation des Umgangs mit den Ungewissheiten und deren Auswirkungen notwendig sein. Dies ist von der BGE erkannt und wurde so auch den Gutachtern kommuniziert (BGE, 2021). Bis dato konnte eine solche Dokumentation nicht eingesehen werden jedoch hat die BGE bereits in ihrem ELO-System eine tabellarische Erfassung von kontinuierlichen Parametern und ihren Variationsbreiten verfügbar.

Empfehlung 15*: Die Parametrisierung von Ungewissheiten muss über die Verwendung von kontinuierlichen Parametern hinausgehen und auch andere Arten von Ungewissheiten erfassen, wie etwa kategorische Parameter.*

Methodenentwicklung und Ungewissheiten

Es bleibt festzuhalten, dass im weiteren Verlauf des Projektes sicherlich viele neue Daten zur Bewertung verschiedener Parameter (z.B. Gesteinsdurchlässigkeit, Adsorptionsverhalten) gesammelt werden müssen. Es sollte aber auch jetzt schon deutlich gemacht werden, dass es in Untergrundprojekten nie möglich sein wird alle Ungewissheiten zu eliminieren, wohl zu reduzieren. Deshalb muss die Verwendung von Ungewissheiten eine wichtige Aufgabe bei der Methodenentwicklung sein. Diese Verwendung von Ungewissheiten wird sich im Verlauf des Projektes weiter entwickeln müssen, sprich mit der Verbesserung der Datenlage (z.B. Bohrungen, Bohrlochmessungen, Bohrkerne, Reflexionsseismik etc.) wird sich auch die Handhabung von Ungewissheiten anpassen müssen.

Identifizierung und Handhabung von Ungewissheiten ist also zum jetzigen Zeitpunkt, sprich bei der Methodenentwicklung ein entscheidender Arbeitsschritt, den die BGE auch schon begonnen hat. Ergebnisse dazu sind aber erst zu einem späteren Zeitpunkt sprich 2022 zu erwarten.

Fazit: Die BGE hat die Notwendigkeit zur Analyse von Ungewissheiten in diesem Untergrundprojekt hinreichend erkannt und entwickelt ihre Methode dahingehend. Es ist im jetzigen Stadium zu früh, um solche Methoden beurteilen zu können.

Empfehlung 16*: Es müssen in der derzeit durchgeführten Methodenentwicklung für die weiteren Projektphasen Planungen zur Fragestellung gemacht werden, wie Gebiete ohne oder mit wenigen Daten evaluiert und mit anderen Gebieten verglichen werden können. Dies muss auch eine Einschätzung der jeweilig vorhandenen oder verbleibenden Ungewissheiten einschließen.*

Empfehlung 17 (ähnlich früherer Empfehlung)*: Für eine weitere, regionale Bearbeitung der Teilgebiete und Untersuchungsräume sollte ein klar strukturierter Prozess der Untergrundstudien verwendet werden (z.B. multi-scenario modelling). Ausgehend von einem konsistenten, regionalen 3D Untergrundmodel des Teilgebietes, sollten ortsspezifische Evaluierungen durchgeführt werden. Dabei sollten das Reservoir (d.h. der ewG des Endlagers im Wirtsgestein Tongestein) und die strukturgeologische und sedimentologische Gesamtsituation charakterisiert werden, letztendlich mit Hilfe eines statischen 3D Models und seiner Variationen (Realisationen zur Erfassung der Ungewissheiten). Diese sollten die Grundlage bilden für die Einschätzung des dynamischen Verhaltens (d.h. Transport von Radionukliden) durch eine dynamische Modellierung, kalibriert anhand von lokalen oder analogen Gesteinsdaten aus Bohrungen (z.B. geomechanische Parameter, Variation der Gesteinsdurchlässigkeit etc.) und Pumpversuchen. In einem weiteren Stadium müssen dann diese statischen und dynamischen Modelle mit den Optionen des bergbaulichen Ausbaus*

zusammen beurteilt werden („safety concept“, „concept selection“). Solche baulichen Konzepte lassen sich anfänglich als Archetypen, sprich als modulare, vordefinierte Baupläne zusammenstellen, die dann zusammen mit den Realisationen (Modellen) aus dem Untergrund gemeinsam ausgewertet werden können, ähnlich wie schematisch in Abbildung 12 *gezeigt.*

Auswirkung von Ungewissheiten auf die Evaluierung von Teilgebieten nach rvSU

Die Entwicklung einer generellen, systematischen Herangehensweise zur Durchführung der rvSU, die für alle 90 verbleibenden Teilgebiete anwendbar ist, ist offensichtlich stark von den zugrunde liegenden (oder verfügbaren) Daten abhängig. Die Methodenentwicklung im GzM muss also die verbleibenden Ungewissheiten berücksichtigen.

Diese verbleibenden Ungewissheiten sind wiederum stark von der Verfügbarkeit der bekannten (oder noch unbekannten) vorhandenen (oder nicht mehr vorhandenen) Daten abhängig. Es ist deshalb abzusehen, dass nicht alle diese Daten verfügbar sein werden bei der Evaluierung der Teilgebiete. Noch zeitaufwendiger wird es dabei sein, alle Daten in nutzbare digitale Formate umzuwandeln und in ein bundesweites Datenmanagement-System für Untergrunddaten zu überführen, dass die BGE verwenden kann. Darüber hinaus müssen die Daten auch später der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden im angestrebten transparenten Verfahren, im Einklang mit dem neuen, 2020 verabschiedeten Geologie-Datengesetz (GeolDG).

Fazit – Ungewissheiten und Empfehlung 18: *Deshalb ist nach dem augenblicklichen Stand zu erwarten, dass Ungewissheiten im Endlagerprojekt letztendlich nicht nur von der Datenlage abhängig sind, sondern mehr noch von der digitalen Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der bekannten Daten. Dies wird als ein fundamentales Problem im Endlagerprojekt angesehen. Diese Problematik sollte auf der Ebene der zukünftigen Bundesministerien für Wirtschaft und Klima sowie Umwelt baldmöglichst deutlich gemacht werden, da eine digitale Lösung mit erheblichen Vorlaufzeiten verbunden ist.*

Entscheidungsqualität – Teilgebiet Wirtsgestein Tongestein Opalinuston

Abschließend werden hier die sechs, bei der Evaluierung der Entscheidungsqualität wichtigen Kriterien angesprochen, mit Bezug auf die beiden Fragestellungen des Gutachtens im jetzigen Stadium des Projektes, sprich Phase I Schritt 2. Die sechs Kriterien werden mit einem Sterndiagram nach drei Kategorien bewertet:

- Ausreichend (3, äußerer Ring)
- Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen (2, mittlerer Ring)
- Ungenügend (1, Zentrum)

Fragestellung 1 - Kriterien zur Auswahl des GzM

Gegenstand der 1. Fragestellung des hier angefertigten Gutachtens ist es die „Kriterien zur Auswahl des Gebietes zur Methodenentwicklung (GzM)“ der BGE zu beurteilen.

Wie schon vorher bemerkt, bleibt hierbei festzuhalten, dass bei der Auswahl des GzMs kein vorab zusammengestellter Kriterienkatalog für die Entscheidung verwendet wurde und auch keine Dokumentationen diesbezüglich im ELO-System der BGE vorhanden sind. Dies wirkt sich auf die Evaluierung anhand der 6 Kriterien zur Entscheidungsqualität aus (siehe Abbildung 19). Insgesamt wird der Prozess, der zur Auswahl des GzM für das Wirtsgestein Tongestein geführt hat als optimierungs-bedürftig betrachtet.

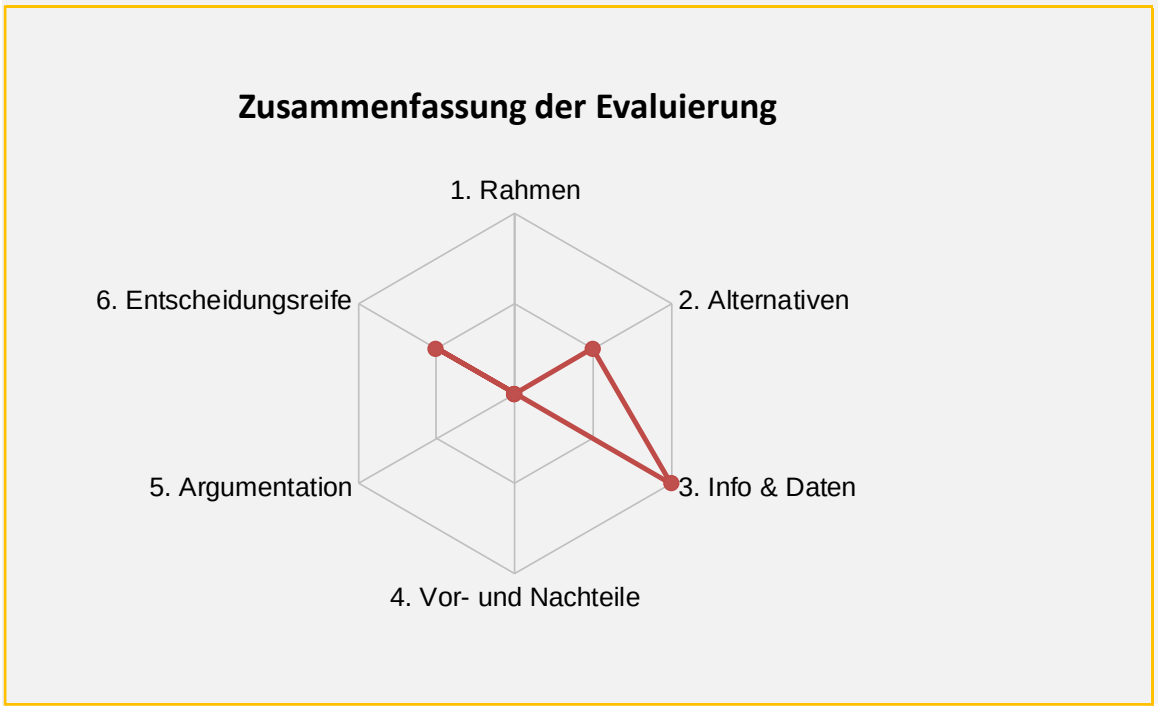

Abbildung 19: Zusammenfassende Darstellung der Entscheidungsqualität zur Fragestellung 1 zum Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT im Jurassischen Opalinuston auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern. Insgesamt wird die Fragestellung 1 zu den Kriterien zur Auswahl des GzM als optimierungs-bedürftig eingestuft aufgrund der ungenügenden Evaluierung von drei Kriterien. Trotzdem wird das ausgesuchte Teilgebiet zur Methodenentwicklung als geeignet für die weitere Methodenentwicklung eingestuft (siehe Abbildung 20). Die Erklärung dazu findet sich in Kapitel Fragestellung 2 - Eignung des GzM zum Wirtsgestein Tongestein.

Rahmenbedingungen der Entscheidung

Beurteilung: Ungenügend. Der Rahmen zu dieser Entscheidung innerhalb des Projektes ist nicht klar definiert und es finden sich keine Dokumentationen dazu im ELO der BGE.

> ***Empfehlung 19:*** *Es wird empfohlen in Zukunft bei derartigen vergleichs-basierten Entscheidungen vorab einen möglicherweise auch nur qualitativen Kriterienkatalog zu definieren mit dem alle betroffenen Teilgebiete mit dem Wirtsgestein Tongestein charakterisiert und letztendlich unterschieden werden können (siehe* Abbildung 17*).*

Abwägungskriterien und alternative Interpretationen

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Obwohl keine Dokumentation der BGE zur Beurteilung vorgelegt werden konnte, wurde bei der Befragung durch den Gutachter deutlich, dass die 8 TG Tongestein gegeneinander abgewogen wurden und Vor- und Nachteile

verbal deutlich gemacht werden konnten. Allerdings ist, basierend auf den Aussagen der BGE nicht erkennbar, ob ein anderes TG Tongestein ähnlich gute Voraussetzungen für die Methodenentwicklung hat.

Empfehlung 20: *Es wird empfohlen solche Abwägungen in Zukunft zumindest BGE-intern adäquat zu dokumentieren.*

Zur Verfügung stehende Informationen und Daten

Beurteilung: Ausreichend. Bei der Auswahl des GzM ist es nicht notwendigerweise günstig, wenn eine extreme Datenlage vorhanden ist, sprich sehr gut oder sehr schlecht. Deshalb ist es durchaus nachvollziehbar, wenn die BGE die heterogene Datenlage im TG 001 als günstig für die Methodenentwicklung einschätzt.

Klares Verständnis der Vor- und Nachteile

Beurteilung: Ungenügend. Obwohl in den verbalen Kommunikationen zwischen dem Gutachter und der BGE deutlich wurde, dass die BGE „fachliche Erwägungen“ beim Vergleich der Teilgebiete zum Wirtsgestein Tongestein angestellt hat, wurden diese weder systematisch analysiert noch dokumentiert.

Empfehlung 21: *Es wird empfohlen solche Abwägungen in Zukunft zumindest BGE-intern adäquat zu dokumentieren.*

Schlüssigkeit der Argumentation

Beurteilung: Ungenügend. Aufgrund der fehlenden Kriterien zur vergleichenden Analyse aller TG Tongestein ist keine schlüssige Argumentation erkennbar außerhalb der verbal dargelegten „fachlichen Abwägungen“.

Empfehlung 22: *Es wird empfohlen solche Abwägungen in Zukunft zumindest BGE-intern adäquat zu dokumentieren.*

Entscheidungsreife (in Bezug auf Projektstatus)

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Trotz der als insgesamt optimierungs-bedürftig einzuschätzenden Vorgehensweise bei der Verwendung von Kriterien zur Auswahl des GzM, des Fehlens eines nachvollziehbaren Vergleichs zwischen den acht TG Tongestein und aufgrund der fehlenden Dokumentation bleibt festzuhalten, dass das ausgewählte Gebiet für die Methodenentwicklung als geeignet eingeschätzt wird (siehe Kapitel Fragestellung 2 - Eignung des GzM zum Wirtsgestein Tongestein).

Empfehlung 23*: Es wird empfohlen solche Abwägungen in Zukunft zumindest BGE-intern adäquat zu dokumentieren.*

Fragestellung 2 - Eignung des GzM zum Wirtsgestein Tongestein

Die 2. Fragestellung des hier erstellten Gutachtens bezieht sich auf die Eignung des ausgewählten Teilgebietes 001 Opalinuston für die Methodenentwicklung. Die während der Befragung gezeigten Ansätze der BGE lassen erkennen, dass das GzM Tongestein durchaus geeignet ist für eine solche Entwicklung der Arbeitsabläufe innerhalb Phase I Schritt 2 (Abbildung 20). Die ersten Ergebnisse der BGE sind noch nicht zur weiteren Veröffentlichung freigegeben und wurden deshalb nicht in diesem Gutachten dokumentiert.

Rahmenbedingungen

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Der Rahmen in diesem Projektabschnitt (Phase I Schritt 2) ist durch das StandAG vorgegeben, wobei mit den

ausgewählten Teilgebieten aus jedem Wirtsgestein die standardisierte Methodenentwicklung der rvSU ausgearbeitet werden soll.

***Empfehlung 24**: Es wird empfohlen einzelne Abschnitte auch durch Dokumentationen zu unterstützen, wie etwa zu den Kriterien die zur Auswahl von TG 001 als GzM Tongestein geführt haben.*

Zur Verfügung stehende Informationen und Daten

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Eine breite Datengrundlage wurde seit 2017 innerhalb der BGE aufgebaut, die auch das Wirtsgestein Tongestein umfasst. Für die Methodenentwicklung ist eine heterogene Datenlage im TG vorteilhaft, da sie hilft auch die vorhandenen, verbleibenden Ungewissheiten im Untergrund in die Methodenentwicklung adäquat einzubinden.

***Empfehlung 26**: Obwohl das Vorhandensein von Daten (z.B. Bohrungen) bekannt ist, sind sie meist nicht in einem digital verwendbaren Format zur Modellentwicklung vorhanden. Das Risiko besteht, dass viele digitale Datensätze nicht zeitnah verfügbar gemacht werden können. Solche und andere Risiken sollten aktiv in einem Risiko-Register dokumentiert werden zusammen mit einem Schadensbegrenzungsplan. Das Risiko der nicht Verfügbarkeit der Daten sollte dabei nicht mit den immer verbleibenden Ungewissheiten im Untergrund verwechselt werden.*

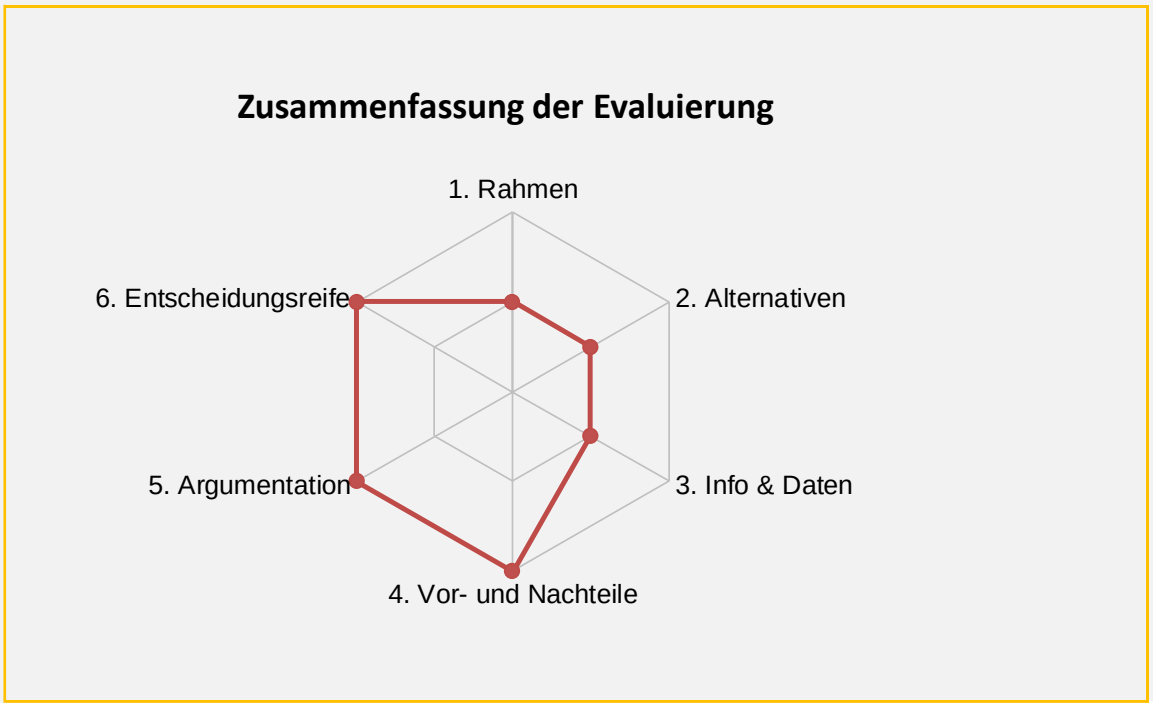

Abbildung 20: Zusammenfassende Darstellung der Entscheidungsqualität zur Fragestellung 2 zur Eignung des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT im Jurassischen Opalinuston auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern für die Methodenentwicklung der rvSU, die auf alle verbleibenden 90 Teilgebiete angewandt werden soll. Insgesamt wird die Eignung des durch die BGE ausgewählte GzM als „Ausreichend“ eingestuft.

Klares Verständnis der Vor- und Nachteile

Beurteilung: Ausreichend. Aus den Erläuterungen der BGE und den angesprochenen fachlichen Erwägungen, sowie den vorläufigen Dokumentationen zur Geo-Charakterisierung des TG 001 ist erkennbar, dass die BGE ein klares Verständnis hat, welche Eigenschaften ein TG haben soll, um daran die Methodenentwicklung zur rvSU zu erarbeiten.

Schlüssigkeit der Argumentation

Beurteilung: Ausreichend. Die Eignung des TG 001 zur Methodenentwicklung konnte klar dargelegt werden. Dabei erweist sich vor allem der Analogdatensatz aus dem Mont Terri Projekt in der Schweiz in einer sehr ähnlichen Lithologie als ausgesprochen nützlich in diesem Stadium.

Entscheidungsreife (in Bezug auf Projektstatus)

Beurteilung: Ausreichend. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Eignung des Teilgebietes 001 zum Zwecke der Methodenentwicklung begründet ist und fachlichen Erwägungen folgt. Es bleibt deshalb festzuhalten, dass das TG 001 als geeignet bewertet werden kann als GzM in der rvSU. Dies konnte durch die BGE verständlich dargelegt und durch ausreichend Daten und Informationen untermauert werden. Deshalb kann die Entscheidungsreife als ausreichend eingestuft werden.

Gesamtbeurteilung: GzM Wirtsgestein Tongestein

Aufgrund der Tatsache, dass die tonigen Einheiten des Mittleren Jura, sprich Opalinuston mit der Teufelsloch-Subformation im Teilgebiet 001 Wirtsgestein Ton im Albvorland von Baden-Württemberg und Bayern mehrerer Grundvoraussetzungen hinreichend erfüllen, wie z.B.

- Mächtigkeitsverteilung und lithologische Ausbildung der Teufelsloch-Subformation,
- eine Vielzahl von Prozessen, die die langfristige Stabilität der Barriere beeinflussen können und im TG 001 untersucht werden können,
- heterogene Untersuchungsräume innerhalb des Teilgebietes,
- Variation der Tiefenlage des ewG im Untergrund,
- Erfüllung des Flächenbedarfs eines Endlagers in verschiedenen Tiefenlagen,
- variable Struktur des Deckgebirges,
- und die heterogene Datenlage

ist eine Eignung als Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) in diesem Teil des Verfahrens (standardisierte Methodenentwicklung zur rvSU) als positiv zu bewerten.

Im Gutachten sind dazu eine Reihe von Empfehlungen ausgesprochen, die für das weitere Vorgehen Beachtung finden sollten oder auch müssen. Einige davon wurden schon im früheren Gutachten angeführt und sind hier nochmals aufgelistet, da in der Zwischenzeit keine entscheidenden Fortschritte beobachtet werden konnten (z.B. Geodaten). Dabei ist insbesondere die stark variierende Vorlaufzeit der notwendigen Aktivitäten zu berücksichtigen. Die wichtigsten Aspekte sind hier nochmals kurz zusammengefasst. Es wird empfohlen:

- eine deutlich zu verbessernde **Datengrundlage** zu schaffen, für deren Harmonisierung in der gesamten Bundesrepublik zu sorgen und deren Verfügbarkeit sicherzustellen (sehr lange Vorlaufzeit). Dies wird als eines der größten **Risiken** im Endlagerprojekt angesehen.
- Pläne zur **Skalierbarkeit im Datenmanagement** von Untergrunddaten aller Art in der Bundesrepublik Deutschland zu entwerfen und deren Qualitätskontrolle zu ermöglichen.
- Fokus auf die **Digitalisierung von Geodaten** zu legen und deren Transformation **für jn Untergrundstudien verwendungsfähig Formate** sicherzustellen.
- effiziente Methoden bei der Beschaffung und dem **Austausch von Untergrunddaten zwischen Bund, Ländern und der Industrie** zu entwickeln basierend auf dem GeolDG, inklusive vertraulicher Daten.
- aufgrund der Tatsache, dass im Bereich Datenbeschaffung, -management und -verfügbarkeit noch keine Verbesserungen im Endlagerprojekt zu beobachten sind, eine **Geodaten-Task Force** unter Leitung der zukünftigen Bundesministerien für Wirtschaft und Klima sowie Umwelt aufzubauen. Auftrag dieses Stabes sollte es sein, diese offensichtliche Herausforderung mit allen, Geodaten verwaltenden Bundes-, Landesbehörden, Bergbauämtern und der Industrie gemeinsam anzugehen, mit dem Ziel eine nachhaltige und zukunftsweisende digitale Lösung für die BGE und alle anderen Betroffenen zu entwickeln. Diese Empfehlung wird ausgesprochen, da nach der hier und schon vorher erfolgten Einschätzung, die BGE selbst auf absehbare Zeit eine solche Aufgabe alleine nicht bewältigen kann.
- eine zukünftige, gemeinsame Geodaten-Lösung auch auf die Bereitstellung der entscheidungsrelevanten **Daten an die Öffentlichkeit** im weiteren Verlauf des lernenden Verfahrens auszurichten.

- der Verwendung von **Ungewissheiten** im geologischen Untergrund eine wichtige Rolle bei der weiteren Bearbeitung des Endlagerprojektes einzuräumen. Dies muss in der Methodenentwicklung berücksichtigt werden.
- Die **Parametrisierung von Ungewissheiten** in Untergrundprojekten ist häufig fokussiert auf die Definition von sogenannten kontinuierlichen Parametern. Obwohl begrüßenswert, wird dies alleine nicht als zielführend eingeschätzt. D.h., es müssen darüber hinaus auch diskrete und kategorische Parameter in Betracht gezogen werden, um ein besseres, auch räumliches Verständnis der Variabilität des möglichen Fließverhaltens von Radionukliden in den Sedimentgesteinen des ewG zu erreichen.
- die **Kombination von multiplen geologischen Realisationen,** die die verbleibenden Ungewissheiten im Untergrund charakterisieren, in Verbindung mit den möglichen **technischen Designkonzepten** eines radioaktiven Endlagers zu verknüpfen. Dies ermöglicht die Evaluierung des Langzeitschutzes des Endlagersystems mit Hilfe von multiplen Szenarien (sprich Kombinationen von geologischen Realisationen mit technischen Designkonzepten).

Fazit - Gesamt: Das von der BGE gezeigte und schon teilweise intern dokumentierte Vorgehen zur Methodenentwicklung hat demonstriert, dass das für das Wirtsgestein Tongestein selektierte TG 001 Opalinuston als Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) gut geeignet ist. Die Entscheidung der BGE ist deshalb insgesamt als positiv zu bewerten. Dies gilt im Nachhinein betrachtet auch, obwohl der Prozess, der zur Entscheidung geführt hat, erkennbare Schwachstellen aufweist und als wenig transparent beurteilt wird. Der Grund dafür liegt im Fehlen von klaren Kriterien bei der Auswahl des TG 001 aus den insgesamt acht verschiedenen Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongestein und der Tatsache, dass keine Dokumentationen zu dieser Entscheidung vorliegen. Da jedoch die Auswahl des GzM zum Wirtsgestein Tongestein keine Vorfestlegung für eine Standortregion ist und damit keine Aussage für eine potentielle Eignung getroffen wurde, werden die im Gutachten angesprochenen Defizite im Entscheidungsprozess bei der Auswahl des GzM als nicht kritisch für den weiteren Verlauf des Verfahrens insgesamt angesehen.

Verzeichnis der verwendeten Referenzen

BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGR (2021): Anmerkungen der BGR zum Zwischenbericht Teilgebiete der BGE, Kurzbericht, B3.1/B50161-02/2021-0002/001, 52 S..

Bourg, I.C., & Ajo-Franklin, J.B. (2017). Clay, Water, and Salt: Controls on the permeability of fine-grained sedimentary rocks. Accounts of Chemical Research, 50(9), 2067– 2074. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.7b00261.

Eweje, John & Turner, Rodney & Müller, Ralf. (2012). Maximizing strategic value from megaprojects: The influence of information-feed on decision-making by the project manager. International Journal of Project Management. 30. 639–651. 10.1016/j.ijproman.2012.01.004.

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C. et al. (2018): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. Bull Earthquake Eng 16, 4339–4395 (2018). https://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Hoyer, E.-M., Kreye, P., Lohser, T., and Rühaak, W. (2021): Preliminary safety assessments in the high-level radioactive waste site selection procedure in Germany, Saf. Nucl. Waste Disposal, 1, 37–38, https://doi.org/10.5194/sand-1-37-2021.

Jolley, S.J., Barr, D., Walsh, J., Knipe, R., 2007. Structurally complex reservoirs: an introduction. In: Jolley, S.J., Barr, D., Walsh, J., Knipe, R. (Eds.), Structurally Complex Reservoirs. Geological Society, London, pp. 1-24. Special Publications.

Lehné, R. J. & Sirocko, F. (2010): Recent vertical crustal movements and resulting surface deformation within the North German Basin (Schleswig-Holstein) derived by GIS-based analysis of repeated precise leveling data [GIS-basierte Auswertung von Nivellementdaten zur Beschreibung und Quantifizierung rezenter vertikaler Krustenbewegungen und daraus resultierender Oberflächendeformationen im Bereich des Norddeutschen Beckens (Schleswig-Holstein)]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 161, S. 175-188. ISSN 18601804.

NAGRA (2002): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochradioaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.- Nagra Techn. Ber.. NTB 02-03: 659 S., Wettingen, Schweiz.

Franz, M. & Nitsch, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg, LGRB Information, Baden-Württemberg, 22, S. 123 – 146, Freiburg i.B...

Pattison, S. (2005): Storm-Influenced Prodelta Turbidite Complex in the Lower Kenilworth Member at Hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, U.S.A.: Implications for Shallow Marine Facies Models, Journal of Sedimentary Research (2005) 75 (3): 420–439. https://doi.org/10.2110/jsr.2005.033

Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Informationen und Referenzen

BGE Studien, Berichte und Visualisierung von 3D Modellen:

Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG (bge.de)

Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG) (bge.de)

Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG (bge.de)

Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG (bge.de)

Ergänzende Kartendarstellungen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG im Rahmen von § 13 StandAG (bge.de)

BGE Steckbrief: Gebiet zur Methodenentwicklung: Opalinuston (bge.de)

BGE Webviewer: 3D-Viewer - BGE

BGE Webviewer: GST Web (bge.de)

BGR Studien, Datenbanken und Visualisierung von 3D Modellen:

Untersuchung von Tongesteinen als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel des Mittleren Jura (Dogger) von Nordost-Deutschland (bund.de)

BGR - Projekte - Projekt AnSichT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (bund.de)

Hoth et al. (2007): BGR - Standortauswahl - Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen (2007) (bund.de)

GeM-DB: BGR - Projekte - Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB, Zwischenbericht (2021) (bund.de)

BGR Webviewer: https://gst.bgr.de/?viewHash=tunb_grenzen

Research Gate:

Franz & Nitsch (2009): (PDF) Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden–Württemberg (researchgate.net)

NAGRA Mont Terri Projekt:

NAGRA: Download-Center | Nagra

Verwendete Abkürzungen

AK = Ausschlusskriterien

BGR = Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

ELO = Elektronischer Leitz Ordner

ewG = einschlusswirksamer Gebirgsbereich

geoWK = geologische Abwägungskriterien

GeolDG = Geologiedatengesetz

GOK = Geländeoberkante

GzM = Gebiets zur Methodenentwicklung

MA = Mindestanforderungen

Ma = Millionen Jahre

rvSU = repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung

SGD = Staatliche Geologische Dienste der Bundesländer

StandAG = Standortauswahlsgesetz

TOC = Total Organic Carbon Content (Gehalt an organischem Kohlenstoff im Gestein)

UR = Untersuchungsraum (eines Teilgebietes)