Standortauswahl Endlager

Gutachten zu

Betrachtung der verbalargumentativen Bewertung im Wirtsgestein Ton, Norddeutsches Becken

(Teilgebiet Tonstein: 006_00TG_188_OOIG_T_f_ju)

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium
Geschäftsstelle
Buchholzweg 8
13627 Berlin

Vergabestelle: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Autor: Dr. Jürgen Grötsch

Auftragsdatum: 10.03.2021

Fertiggestellt am: 21.4.2021

Zusammenfassung

Das hier erstellte Gutachten hat zum Ziel, die verbalargumentative Bewertung im Wirtsgestein Ton zu beurteilen anhand des Teilgebietes 006_00TG_188_00IG_T_f_ju. Die zu untersuchenden Schichten stammen aus dem Unter Jura und sind auch bekannt unter der Bezeichnung Liastone. Das geologische Alter der Gesteinsabfolge umfasst einen Zeitraum von 201 bis 174 Millionen Jahre und wurde im sogenannten Norddeutschen Becken abgelagert. Es handelts sich dabei hauptsächlich, aber nicht ausschließlich um Tonstein.

Das in den Berichten der BGE dokumentierte Vorgehen und die damit verbundene verbal-argumentative Bewertung des untersuchten Teilgebietes Tongestein, basierend auf dem gesetzlich vorgegebenen, hierarchischen Kriterienbündel ist grundsätzlich nachvollziehbar. Die identifizierten Gebiete mit einer Gesamtmächtigkeit grösser 300 Meter sind über eine Fläche von 4895 km^2 vorhanden und übersteigen damit den benötigten Flächenbedarf von 10 km^2 deutlich. Dies zeigt auf, dass der Lias Tonstein im Norddeutschen Becken ein großes Volumen an einschlusswirksamem Gebirge (ewG) im Untergrund aufweist und dadurch ein möglicher Kandidat für ein Endlager sein kann. Obwohl 7 aus 11 geologischen Abwägungskriterien (geoWK) nur auf Referenzdatensätzen basierend als günstig eingestuft wurden, bleibt festzuhalten, dass die günstige Gesamtbewertung des Teilgebietes zu diesem Zeitpunkt verständlich dargelegt und durch ausreichend Daten und Informationen untermauert ist. Deshalb kann die verbalargumentative Bewertung als akzeptabel im derzeitigen Projektstadium (Phase I, Schritt 1) eingestuft werden.

Dies gilt auch, wenn in diesem Gutachten auf einige Unklarheiten bei der Verwendung, der im StandAG festgelegten Kriterien und der damit verbundenen Argumentationsweisen hingewiesen wird. In diesem Bericht wird dies für das untersuchte Teilgebiet im Wirtsgestein Ton näher erläutert. Zum Teil sind diese Unklarheiten auf die, für alle Wirtsgesteine gleiche Verwendung von Ausschlusskriterien (AK), Mindestanforderungen (MA) und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) zurückzuführen, obwohl es sich dabei um grundsätzlich verschiedene Gesteinstypen mit stark unterschiedlicher Entstehungsgeschichte und verschiedenen physikalischen Eigenschaften handelt, sprich Ton, Salz und Kristallin.

Es ist es zu begrüßen, dass zum heutigen Stand der Evaluierung keine Rangfolge bei den Teilgebieten angegeben wird (BGE, 2020). Die Analyse zum Teilgebiet Wirtsgestein Ton hat bestätigt, dass eine solche Rangfolge, trotzt der gemeinsam verwendeten Kriterienbündel, zu diesem Zeitpunkt des Projektes noch nicht erfolgen kann. Dabei wird insbesondere die heterogene Datengrundlage in Bezug auf Qualität, Quantität und Verteilung der Daten als eine Herausforderung angesehen.

Es ist weiterhin abzusehen, dass in Zukunft mehr Augenmerk auf die Integration von Kriterien und Arbeitsprozessen in den weiteren Bewertungen gelegt werden muss. Als Beispiel dient dazu etwa die Erstellung von statischen und dynamischen Modellen innerhalb von Teilgebieten, die aufeinander abgestimmt werden müssen, also stark voneinander abhängig sind.

Darüber hinaus sind einige weiterführende Empfehlungen zu machen. Die wichtigsten Gesichtspunkte, hier nachfolgend kurz zusammengefasst, sind, dass es bei den nun kommenden, regionalen und lokationsspezifischen Studien und Analysen in dem verbliebenen Teilgebiet(en) mit Wirtsgestein Ton im Norddeutschen Becken notwendig sein wird:

- eine weiter **verbesserte Datengrundlage** zu schaffen, für deren Harmonisierung zu sorgen und deren digitale Verfügbarkeit sicherzustellen.

- eine Fokussierung auf die **Beschaffung von solchen entscheidungsrelevanten Daten** für die weiteren Teilschritte und deren langfristige Planung zu verfolgen (z.B. Bohrlochmessungen, Bohrkerndaten, seismische Daten).
- Pläne zur **Skalierbarkeit im Datenmanagement** von Untergrunddaten aller Art in der Bundesrepublik Deutschland zu entwerfen und deren vereinfachte digitale Verfügbarkeit, Übermittlung und Qualitätskontrolle zu ermöglichen.
- **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.
- einige **weitere geologische Aspekte** in die zukünftige Bearbeitung mit einzubinden (z.B. Aufschlussanalogiestudien in vergleichbaren, obertägig anstehenden Gesteinsformationen) zum besseren Verständnis des möglichen Fließverhaltens von Radionukliden in Sedimentgesteinen.
- **effektive Evaluierungsprozesse** zu Untergrundstudien und Vorgaben zur Methodik von neuen 3D Modellierungsstudien innerhalb und außerhalb der BGE einzuführen, da zu erwarten ist, dass die BGE nicht alle Studien selbst durchführen kann mit dem beschränkt zur Verfügung stehenden Personal (70 Geowissenschaftler).
- Ziel sollte es dabei sein, eine **Vergleichbarkeit** von solchen Untergrund-Studien und den daraus resultierenden Modellen zu ermöglichen, inklusive deren Datengrundlage und verbleibenden Unsicherheiten.
- die transparente Einbindung von **Unsicherheiten** bei der Evaluierung von regionalen und ortsspezifischen Untergrundprojekten und -studien deutlich zu machen, die in Abhängigkeit zu den verfügbaren Daten steht.

Abschließend wird die Analyse der BGE zum Teilgebiet mit Hilfe von sechs Kriterien zur **Entscheidungsqualität** beurteilt, die bei der Qualitätssicherung von Großprojekten Verwendung finden. Dabei werden hier zwei dieser sechs Kriterien als „ausreichend“, die vier verbleibenden mit „akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen“ bewertet. Die Analyse der BGE zum hier untersuchten Teilgebiet Wirtsgestein Ton im Unter Jura, wie dokumentiert im Zwischenbericht, wird damit insgesamt als „**Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen**“ bewertet. Dies bedeutet, dass hier empfohlen wird, dass das Projekt in dem untersuchten Teilgebiet in die nächste Projektphase fortschreiten kann.

Summary

The presented evaluation has the aim to analyse the verbal classification and argumentation for the host rock claystone in the sub-area 006_00TG_188_00IG_T_f_ju. The investigated sedimentary rocks are of Lower Jurassic age also known as Liassic. They cover an age range from 201 to 174 million years and were deposited in the North German Basin in a marine environment and consist mainly of claystone, but not exclusively.

The German law as prepared for the radioactive waste site identification (StandAG) prescribes a hierarchical bundle of criteria to be used for the evaluation of all potential host rocks and areas which provides a given evaluation framework. The stratigraphic interval of the region with a thickness of more than 300 m has a total area of 4895 km^2. This is way more than the 10 km^2 required for the envisaged subsurface site installations which means that the Liassic clay stone has enough gross rock volume (ewG) to become a possible candidate for storage of nuclear waste.

Even though, at this point of the project, 7 out of 11 of the geological evaluation criteria (geoWK) are based on reference data only the investigated area was classified as suitable. This is documented and explained in a transparent and understandable manner supported by adequate data at this stage of the project. Therefore, the way this evaluation has been verbally supported is considered acceptable for Phase I Step 1.

Nevertheless, in a few cases unclear argumentation was identified and documented in this report which is in part related to the fact that three very different host rocks, ie clay, salt and crystallin rocks, have been evaluated with the same bundle of criteria even though their properties and genesis is fundamentally different.

It is supported that up to this point in the project no ranking of stratigraphy or areas ("Teilgebiete") is applied as the data foundation to do so is considered as rather heterogenous wrt quality, quantity and distribution until now.

It is foreseeable that in future more detailed analysis and evaluations by BGE additional emphasis needs to be put onto integration and aligned workflows.

A few further recommendations for future work to be executed by BGE are summarized in bullets below. They will become important when further regional and location specific analysis in the host rock claystone will be executed in the next project step (ie Phase 1 Schritt 2) within the North German Basin:

- a further improved and **harmonized data foundation is required** in digital and accessible format.
- **focus is required on gathering data** which is important for further decision making and which requires long-term planning (e.g. drilling, wireline log, core and seismic data).
- **Scalability of the data management solution** is going to be a challenge once more raw and interpreted data is compiled by BGE across the whole of Germany.
- **efficient exchange of subsurface and surface data between states and federal institutions** as well as industry is required including digital transfer and quality assurance.
- **additional aspects** to be considered in the future are outcrop analogues from similar deposits to generate an improved understanding of possible flow behavior of radionuclides.
- **establish effective evaluation methods and processes for 3D subsurface modelling studies** to be used by BGE and for external studies planned as expectation is that geoscience

resources available at BGE (70 geoscientists) will not be able to address all activities internally.

- an aim should be to **enable and facilitate comparison of multiple studies** run in parallel which needs to be addressed in the future for the various regions, including subsurface models to be prepared and uncertainty handling applied.
- a transparent way needs to be established on how **to assess uncertainties** in the upcoming regional and local evaluations depending on data quality and availability.

Finally, a decision analysis is presented as a common practice for large scale projects like the identification and construction of a long-term radioactive waste site using six evaluation criteria. Based on these, the BGE analysis around the host rock clay and claystone is considered as "acceptable with recommendations". This means that considering the investigated Lower Jurassic stratigraphy and area in the North German Basin, the project is recommended to continue into the next project phase.

Vorbemerkung und Aufgabenstellung

Das hier erstellte Gutachten hat zum Ziel, die verbalargumentative Bewertung im Wirtsgestein Ton zu beurteilen anhand des Teilgebietes 006_00TG_188_00IG_T_f_ju. Die zu untersuchenden Schichten (= stratigraphische Einheit) stammen dabei aus dem Unter Jura, auch bekannt unter der Bezeichnung Lias. Sie umfasst einen geologischen Zeitraum von 201 Ma (Millionen Jahren) bis 174 Ma (Abbildung 1).

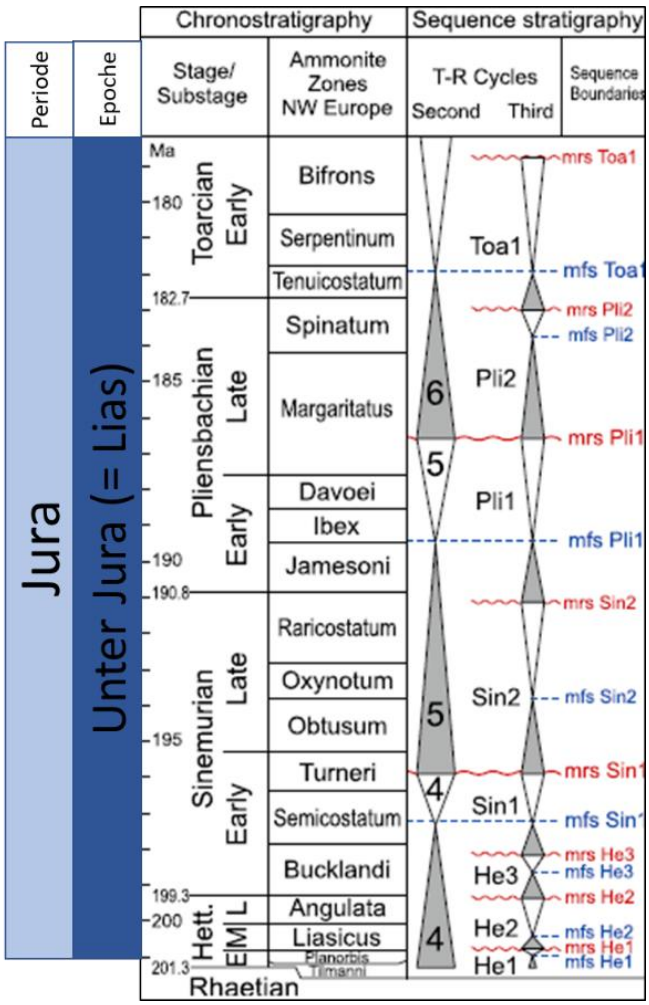

Abbildung 1: Geologische Zeiteinteilung für den untersuchten Zeitbereich aus dem Unter Jura. Geologische Zeiteinteilung wird auch als Stratigraphie bezeichnet und ist ein essenzielles Fachgebiet der Geologie, das es erlaubt u.a. sedimentäre Ablagerungen wie im Norddeutschen Becken, zeitlich zu untergliedern und miteinander zu vergleichen. Dies ist besonders wichtig für Untersuchungen im Untergrund, die meist auf Bohrungen beruhen und somit auch für das untersuchte Teilgebiet Ton (verändert nach Barth et al, 2018: Fig. 7).

Das Teilgebiet 188_00IG_T_f_ju befindet auf dem Gebiet der Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Es hat eine Fläche von 18564 Quadratkilometern und eine maximale Mächtigkeit von 1200 Meter (Abbildung 2). Die Basisfläche des identifizierten Gebietes befindet sich in einer Teufenlage von 400 bis 1500 Meter unterhalb der Geländeoberkante. Die Fläche des identifizierten Gebiets erscheint

ausreichend groß, um einen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) von 10 Quadratkilometern in einem Bereich, ohne beeinträchtigende strukturelle Komplikationen im Deckgebirge zu realisieren. Die Verwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien durch die BGE resultiert daher in diesem Teilgebiet insgesamt in eine günstige Bewertung der geologischen Gesamtsituation für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle, die hier zu erwarten ist (BGE, 2020e, S. 59ff).

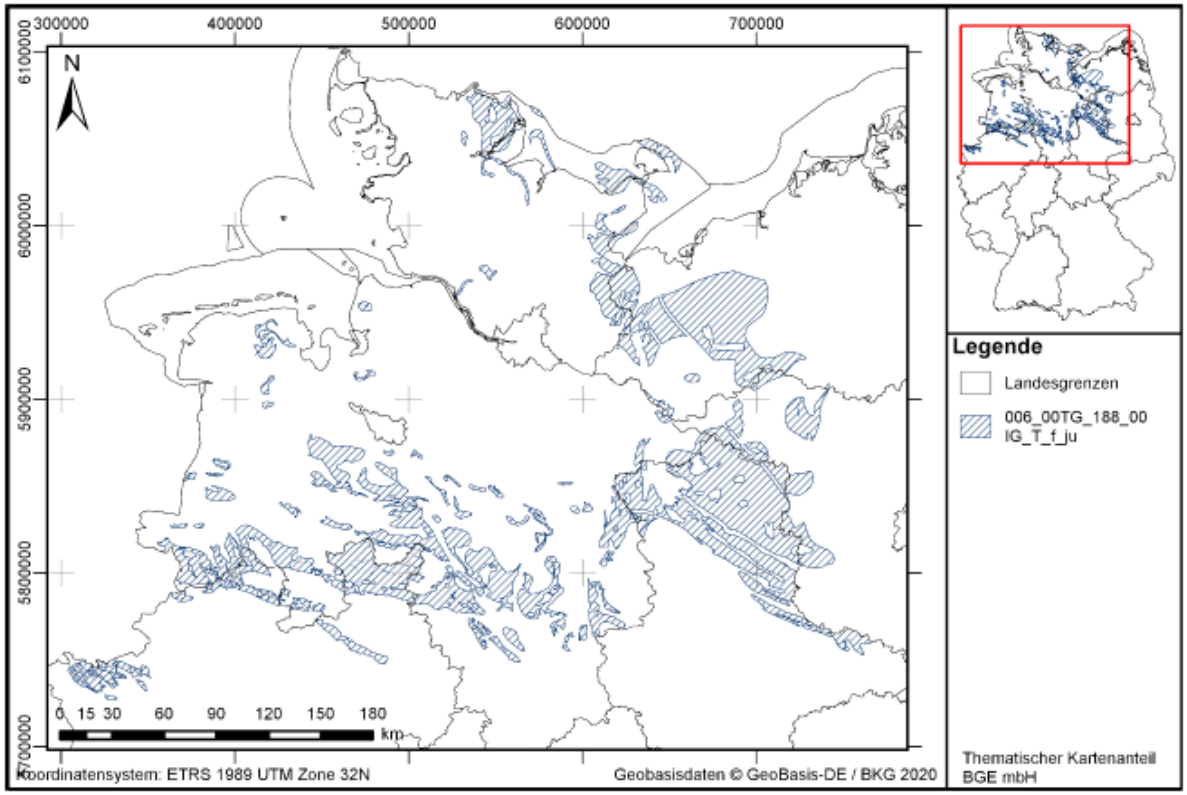

Abbildung 2: Ausdehnung des Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju im Unter Jura des Norddeutschen Becken (BGE, 2020).

Methodik der Evaluation

Dateneinsicht

Die Grundlage dieser Untersuchung sind am 26.3.2021 und am 29.3.2021 durchgeführte Videokonferenzen, die Einsichten in die Datengrundlage und Analysemethoden der BGE gewährt und die weitergehenden Fragen des Gutachters beantwortet haben.

Der Gutachter ist dem Team vom BGE zusammengesetzt aus

[redacted]

sehr zu Dank verpflichtet für diese Dateneinsicht und die zügige Beantwortung aller gestellten Fragen zum Teilgebiet und der angewendeten Untersuchungsmethodik. Dies macht deutlich, dass bei der BGE notwendige Kompetenzen verfügbar sind, auch während der Pandemie, wobei alle Beteiligten ihre Tätigkeit aus dem Home Office ausgeführt haben. Dazu wurde Skype for Business erfolgreich verwendet.

Empfehlung 1*: Um in Zukunft die Kommunikation und den Datenaustausch noch weiter verbessern zu können, wird empfohlen, die Sachverständigen via MS-Teams mit der BGE zu verbinden. Dadurch kann auch ein direkter und kontrollierbarer Datenaustausch zwischen der BGE und den Sachverständigen transparent gestaltet werden.*

Des Weiteren wurden von der BGE zur Verfügung gestellte Berichte und wissenschaftliche Literatur verwendet. Eine Zusammenfassung dazu findet sich im Kapitel **Verzeichnis der verwendeten Referenzen** und **Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Daten und anderen Referenzen**.

Projektstatus

Nach Gesichtspunkten aus dem Projektmanagement befindet sich die Endlagersuche nach StandAG gegenwärtig in einer sogenannten „divergent thinking“ Phase (Abbildung 3), die nach StandAG als Phase I, Schritt 1 (d.h. Zwischenbericht Teilgebiete) bezeichnet wird. In dieser Phase ist eine umfangreiche Dateninfrastruktur mit weitreichenden geologischen Datensätzen bei der BGE aufgebaut worden. Diese erlauben es der BGE, die Evaluierung der verschiedenen Wirtsgesteine, ausgehend von einer weißen Landkarte, durchzuführen. Dabei ist eine Zielsetzung dieser Projektphase, Teilgebiete nicht vorschnell auszuschließen. Dieser Ansatz ist auch im untersuchten Teilgebiet zum Wirtsgestein Ton zu erkennen und zu diesem Zeitpunkt sehr zu begrüßen, insbesondere aufgrund der bestehenden, heterogenen Datenlage.

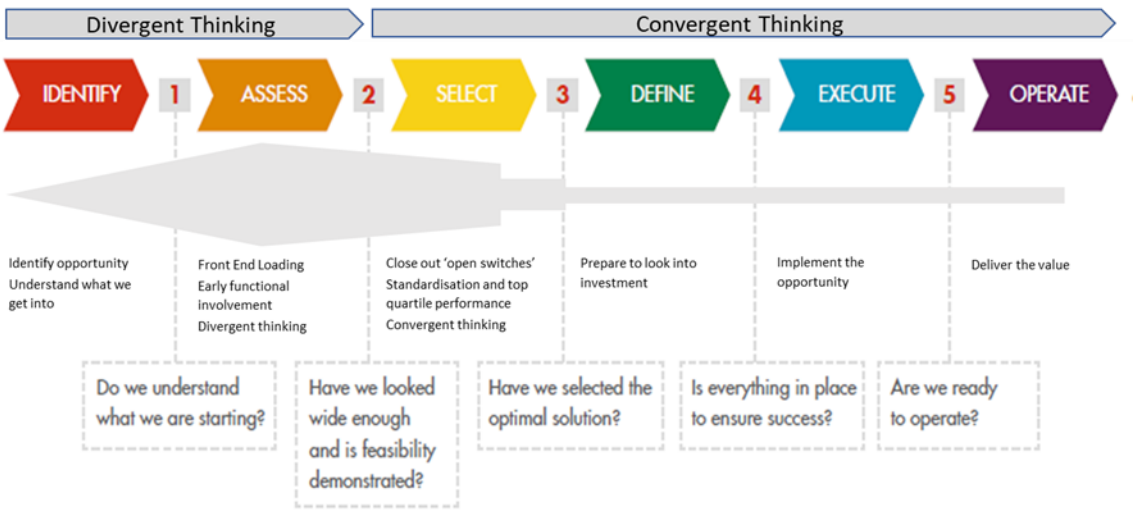

Abbildung 3: Illustration die “Divergent vs. convergent thinking” innerhalb von komplexen Großprojekten darstellt. Die Endlagersuche ist ein solches Projekt und befindet sich zu diesem Zeitpunkt im „Identify“ Stadium, in dem keine Optionen verfrüht eliminiert werden sollten. Dieses Prinzip wurde bei der Evaluierung des untersuchten Teilgebietes zum Wirtsgestein Ton angewendet.

Ziel dieser Begutachtung ist es, für das Beispiel Tonstein 006_00TG_188_OOIG_T_f_ju eine Analyse der verbalargumentativen Bewertung zu dieser Projektphase durchzuführen, wobei die verwendete Datengrundlage, die Vorgaben des StandAG und die Interpretation durch die BGE in Betracht gezogen werden.

Entscheidungsqualität - Einführung

Bei der hier durchgeführten Bewertung wurde die gängige Methode der Analyse der Entscheidungsqualität verwendet, die die Entscheidungsreife nach sechs Kriterien einschätzt (Decision quality - Wikipedia). Diese sind:

1. Rahmenbedingungen 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** im Einzelnen angesprochen.

Wirtsgestein Tongestein

Das Wirtsgestein Tongestein umfasst mehrerer geologische Formationen, die geordnet von geologisch jung nach alt wie folgt sind:

- Tone und Tongesteine des Paläogen (Unteres Tertiär)
- Tongesteine der Unter-Kreide
- Tongesteine der Ober-Kreide
- Opalinuston der Mittleren Jura
- Liastone des Unteren Juras

Dieses Gutachten beschäftigt sich nur mit der ältesten, hier aufgeführten Tonsteinformation aus dem Lias, d.h. dem Unteren Jura (Abbildung 1). Diese ist in weiten Teilen des Norddeutschen Beckens im Untergrund vorhanden, aber auch in Süddeutschland in obertägigen Aufschlüssen bekannt, etwa in den fossilreichen Lias Epsilon Schichten bei Holzmaden mit seinem berühmten Fossilmuseum.

***Empfehlung 2**: Beim Wirtsgestein „Tongestein“ sollte man dabei zwischen „Ton“ und „Tonstein“ unterscheiden, was den unterschiedlichen Verfestigungsgrad und die geomechanischen Eigenschaften ausdrückt, wobei Ton eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung aufweist, aber noch weich und verformbar ist. Tonstein hingegen ist durch zunehmenden Druck und Temperatur und den Prozess der Diagenese bei der Versenkung im Untergrund schon deutlich verfestigt, d.h. ein „Stein“ oder „Gestein“. Oft, aber nicht ausschließlich, ist dies altersbedingt, wobei unverfestigte Tone meist aus dem Tertiär stammen also junge Formationen repräsentieren (z.B. Rupeltone in Belgien). Insgesamt betrachtet sind Tone schlechter geeignet als Endlager im Vergleich zu Tonsteinen (z.B. Unter Jura). Dies ist auch im Positionspapier der Geologischen Landesämter (2021) angesprochen und beschrieben. Deshalb sollte die Definition Ton und Tonstein bei der Evaluierung Wirtsgestein Tongestein stets in die Betrachtung einfließen.*

Datengrundlage

Bei den drei virtuellen Treffen mit der BGE am 26. und 29.3.2021 wurden Stichproben der verwendeten Datensätze zur Einsicht nachgefragt, die bei einer Evaluierung eines Untergrundprojektes von Bedeutung sind. Diese umfassen u.a.:

1D Daten:
- Bohrdaten und ihre räumliche Verteilung
- Schichtenverzeichnisse und verwendete Standards
- Petrophysikalische Bohrlochdaten und deren Qualität
- Bohrkerndaten, deren Verteilung und Verfügbarkeit
- Evaluierung der relevanten, geologischen Formationen

2D Daten und Interpretationen:
- Stratigraphie und Korrelation zwischen den Bohrungen
- Vorhandene 2D reflexionsseismische Daten, deren Verwendung und Qualität

3D Daten und Interpretationen
- Vorhandene 3D reflexionsseismische Daten und deren Qualität
- Verwendung der seismischen Daten bei der Evaluierung
- Vorhandene, regionale und lokale 3D Modelle des Untergrunds
- Vergleichbarkeit und Qualität der 3D Modelle

Weitere Informationen aus Literatur und bisherigen Studien
- Verwendete Referenzdatensätze zu den Abwägungskriterien
- Verwendete Gebietsdaten
- Grundlagen für die semi-quantitative Einstufung zu den einzelnen Kriterien

Die Analyse der bis dato verwendeten und der noch nicht verwendeten Daten ergab, dass die Datenbasis als sehr umfangreich angesehen werden kann. Dabei ist aber auch zu bemerken, dass die Datenbasis in den Punkten Qualität, Quantität und Verteilung zum Teil als heterogen zu betrachten ist. Die Ursachen dazu liegen unter anderen darin, dass ihre Verfügbarkeit, ihr Digitalisierungsgrad und die verwendeten Standards in den Geologischen Diensten der Bundesländer stark unterschiedlich sind.

Schichtenverzeichnisse

Die verwendeten, geologischen Einheiten folgen den Empfehlungen der Deutschen Stratigraphischen Kommission, deren Ziel es ist, einheitliche stratigraphische Standards für geologische Unterteilungen in Sedimentgesteinen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland herbeizuführen.

Nichtsdestotrotz ist festzustellen, dass die Evaluierung der einzelnen geologischen Landesämter in den jeweiligen Bundesländer zum Teil verschiedene stratigraphische Marker verwenden, was eine Vergleichbarkeit über Ländergrenzen hinweg erschwert und ein Beispiel für die heterogene Datenlage darstellt, die der BGE zur Verfügung steht.

Bis dato ist es nachvollziehbar, dass noch keine sequenzstratigraphischen Untersuchungen bei der BGE durchgeführt wurden, die z.B. hilfreich sind bei der Einschätzung der räumlichen Verteilung von

Sand innerhalb des Ton-dominierten Teiles des Norddeutschen Beckens im Lias (sprich des untersuchten Teilgebietes). Auch die räumliche und zeitliche Verteilung von organischem Kohlenstoff ist dabei als ein weiteres Beispiel zu erwähnen, da der Lias als Muttergestein für Öl bekannt ist.

Bohrungsdaten

Derzeit sind 4999 Bohrungen mit einer Teufe von >275 m und 18 Bergwerke im Teilgebiet bekannt (Abbildung 4). Die große Anzahl an bekannten Bohrlokationen sind in der ArcGis Pro Datenbank der BGE vorhanden und auf Karten erhältlich. Bohrlokationen und Bohrpfade sind noch nicht mit den 3D Modellen verbunden, d.h. können noch nicht zusammen visualisiert werden (Abbildung 4).

***Empfehlung 3**: Bohrdaten sollten in 3D Modellen verfügbar gemacht werden. Initial zu Visualisierungszwecken. Später sollten auch verwendete Marker, Bohrlochmessungen und Korrelationen zwischen den Bohrungen sichtbar gemacht werden. Dies gilt für regionale Modelle und später auch für kleinräumige 3D Modelle zur ortsspezifischen Auswertung.*

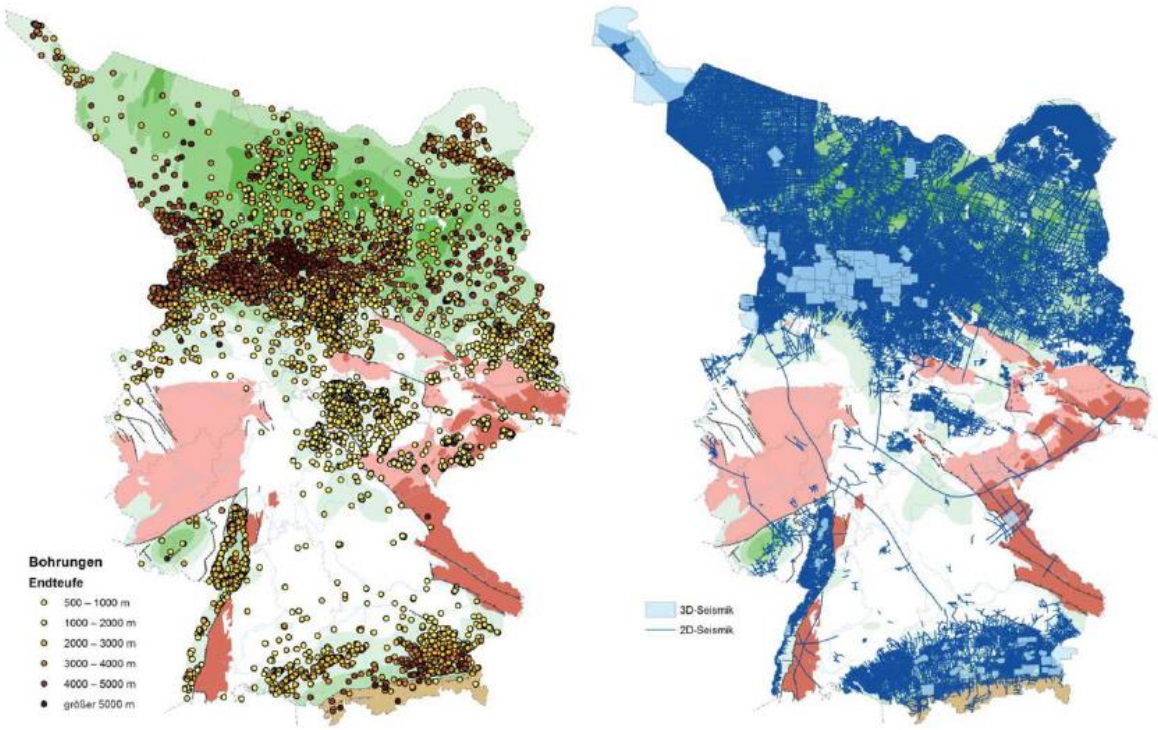

Abbildung 4: Tiefbohrungen (Teufe >500m) und 2D und 3D Seismik im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2019, Quelle: BGR). Die BGE hat dazu eigenes Kartenmaterial zur Verfügung und dadurch einen guten Einblick zu vorhandenen Daten.

Bohrungsberichte (Bohrakten) und Geologische Gefahren: Alle Bohrungen im Teilgebiet sind inventarisiert und die Lokationen sind ebenfalls in Kartenform verfügbar (Abbildung 4). Zum jetzigen Zeitpunkt sind die Berichte zu Bohrungen unvollständig verfügbar oder nicht digitalisiert. In solchen Berichten sind in der Regel alle Bohrprobleme detaillierte aufgeführt, die Hinweise zu Gesteinseigenschaften in Ton und Tonstein geben können, welche Aussagen zulassen über die

Eignung der jeweiligen Tonformation für einen bergbaulichen Ausbau. Solche Daten sind bis dato noch nicht verwendet, werden aber gesammelt. Sie sollten zu allen entscheidungsrelevanten Bohrungen inventarisiert und digitalisiert werden und können bei der weiteren Abwägung zwischen den verschiedenen Tongesteinsformationen und Standorten wichtige Anhaltspunkte liefern.

***Empfehlung 4**: Bohrakten aus allen erhältlichen entscheidungsrelevanten Bohrungen sollten gesammelt, digitalisiert und so archiviert werden. Eine erste Kampagne der BGE ist bereits im Gange diesbezüglich. Dies sollte so ausgeführt werden, dass ihre langfristige digitale Verfügbarkeit garantiert werden kann, sowohl bei der BGE als auch den geologischen Diensten, also bundesweite Standards verwendet werden.*

Bohrkerndaten: Bis dato stehen der BGE keine Übersichten zu vorhandenen Bohrkerndaten im Teilgebiet zur Verfügung. Eine solche Übersicht ist wichtig, um bereits bestehende Daten zu Ton- und Tonsteinformationen einzusehen und vorausschauend Untersuchungen an solchen Bohrkernen vorzunehmen oder planen zu können. Dies setzt voraus, dass das Kernmaterial verfügbar ist und gut gelagert wird/wurde. Erfahrungsgemäß ist dazu eine längere Vorlaufzeit notwendig, da die Daten meist auf die Auswertung von Lagerstätten zurückgehen und eine Rückverfolgung des heutigen Eigentümers und der Lagerung der Bohrkerne sich oft als schwierig gestalten kann.

***Empfehlung 5**: In Zusammenhang mit der Bohraktendigitalisierung sollten alle Bohrkerndaten inventarisiert und in Kartenform dargestellt werden. Da die BGE dies mit aller Wahrscheinlichkeit alleine nicht zeitnah umsetzen kann, sollte über eine standardisierte Zuarbeitung und Digitalisierung durch die Geologischen Dienste der einzelnen Länder nachgedacht werden.*

Bohrlochmessungen: Bis dato sind nur eine begrenzte Anzahl an Bohrlochmessdaten in LAS oder DLIS Format digital verfügbar und in einer „einfachen Datenstruktur auf einem PC gespeichert".

***Empfehlung 6**: Bohrlochmessungen sollten systematisch in einer geeigneten Datenbank gespeichert und für 2D Korrelationen und 3D Modelle des Untergrundes verfügbar gemacht werden. Es wird erwartet, dass diese Daten eine wichtige Rolle beim Vergleich von verschiedenen Lokationen und Gebieten spielen werden, insbesondere bevor die BGE eigene Bohrkerndaten akquiriert. Gleichzeitig erlauben sie es der BGE Qualitätskontrollen der gelieferten Schichtenverzeichnisse stichprobenartig durchzuführen. Auch dabei sollte eine länderübergreifende (am besten bundesweite) standardisierte Methodik verwendet werden. Die Geologischen Dienste spielen dabei ebenfalls eine entscheidende Rolle. D.h., der Erfolg ist abhängig von der Erstellung und Abstimmung von gemeinsamen Arbeitsweisen und Methodiken zwischen BGE und geologischen Diensten.*

Seismische Daten

Die Datensichtung bei der BGE hat für das Teilgebiet deutlich aufgezeigt, welche seismischen Daten in diesem Teil des Norddeutschen Beckens von 1945 - 2011 akquiriert wurden (Abbildung 4). Es handelt sich dabei meist um 2D seismische Linien, wobei wenige digitale Daten, etwa in SEGY Format, bis zum jetzigen Zeitpunkt bei der BGE vorliegen. In neuerer Zeit sind auch 3D seismische Daten akquiriert worden, die dem LBEG, aber nicht der BGE vorliegen (Abbildung 4). Alle seismischen Daten sind inventarisiert, aber nicht verfügbar bei der BGE. Auch besteht keine Übersicht zur Qualität der Daten. Inwieweit Sie in den durch die geologischen Dienste erstellten 3D geologischen Modellen Verwendung fanden ist unklar oder nicht nachvollziehbar.

***Empfehlung 7**: Es ist zu erwarten, dass bei weiteren Studien seismische Datensätze digitalisiert und re-prozessiert werden müssen für regionale und ortsspezifische Untersuchungen. Dies ist mit*

längeren Vorlaufzeiten verbunden, vor allem wenn vergleichbare Qualitätsstandards verwendet werden sollen. Deshalb 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.

2D Daten (Karten und Querschnitte)

Eine umfangreiche, auf ArcGis Pro basierende Datenbank mit georeferenzierten 1D und 2D Datensätzen und geologischen Karten ist vorhanden und bildet eine hervorragende Basis für diese Projektphase. Beispielsweise wurden paläogeographische Karten und Karten zur Faziesverteilung aus verschiedenen Quellen benutzt (Literatur, Bericht der geologischen Dienste).

Augenblicklich stehen keine Beschreibungen der Unsicherheiten in den Evaluierungen und Interpretationen zur Verfügung. Verfügbares Kartenmaterial basiert auf verschiedenen Quellen und ist noch nicht harmonisiert oder standardisiert, z.B. über Bundesländergrenzen hinweg.

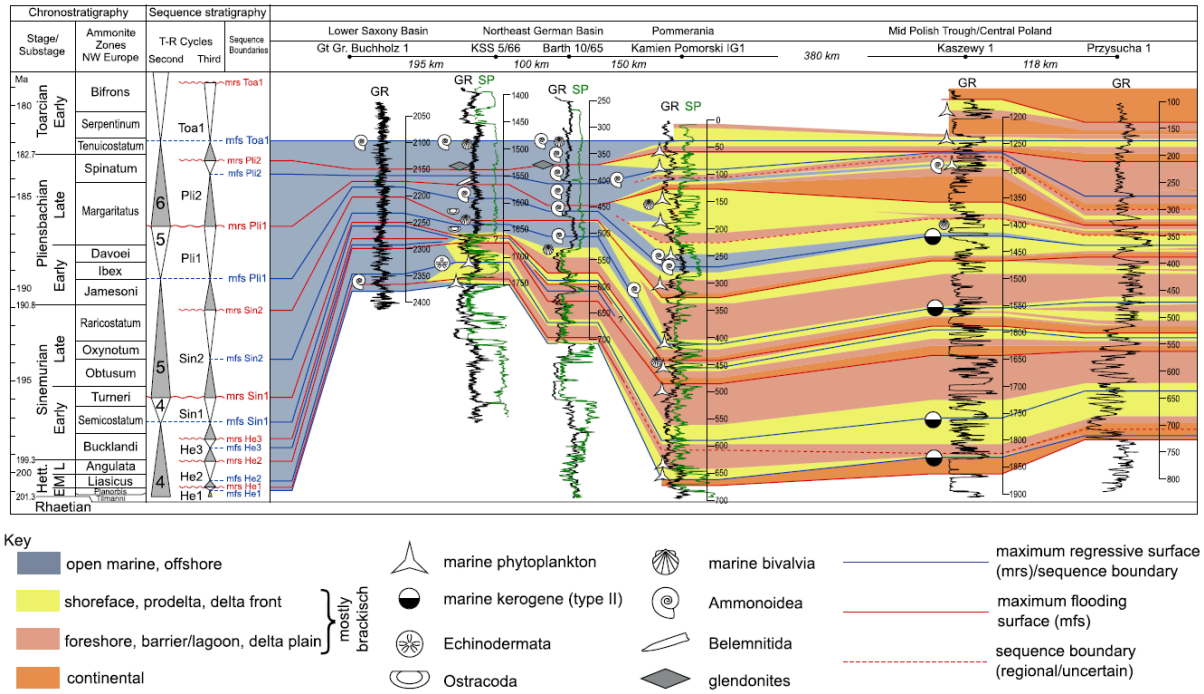

Abbildung 5: Querschnitt und Korrelation von Bohrungen im Norddeutschen Becken und weiter nach Süd-Polen über eine Strecke von etwa 900 km gezeigt für Ablagerungen des Unteren Jura (=Lias). Dabei werden kleineren, zeitgleiche Einheiten innerhalb des Unteren Jura zwischen den Bohrpunkten verknüpft (Barth et al, 2018: Fig. 7). In Gelb ist dabei die Einschaltung von Sand im vormaligen Ablagerungsbecken zu erkennen und die Verzahnung mit gleichaltrigen tonigen Schichten, die das Wirtsgestein Ton für das untersuchte Teilgebiet bilden. Bei detaillierteren Untersuchungen ist zu erwarten, dass dabei noch weitere Inhomogenitäten in der „offen marinen“ Gesteinsabfolge (grau) erkennbar werden.

***Empfehlung 8**: Die für Karten und Bohrpunktkorrelationen im Untergrund verwendeten Geo-Daten sind über Bundesländergrenzen hinweg inhomogen aufgrund der, in den geologischen Landesämtern gebrauchten unterschiedlichen Standards und IT-Systemen. Die BGE (oder der BGR in Zusammenarbeit mit den Geologischen Landesämtern) sollte diese Daten nach gemeinsamen Richtlinien standardisieren, um sie für weiterführende Studien verwendbar zu machen.*

Im untersuchten Teilgebiet bestehen keine E-W Querschnitte mit detaillierten Bohrpunktkorrelationen im Unter Jura. Aus der Literatur ist ein solcher, großräumiger Querschnitt mit Korrelation von Schichten aus Bohrungen im Untergrund vorhanden (Barth et al., 2018). Dieser ist jedoch für ortsspezifische Untersuchungen nur bedingt geeignet (Abbildung 5).

***Empfehlung 9**: Falls keine detaillierten E-W und N-S Korrelationen im Lias des Norddeutschen Beckens verfügbar sind, sollten diese durch die BGE (oder geologischen Dienste) angefertigt werden um ein besseres Verständnis der Faziesverteilung lateral und vertikal innerhalb des Ablagerungsbeckens zu bekommen mit besonderer Berücksichtigung von Sandeinschaltungen, da diese zu erhöhten horizontalen Gebirgsdurchlässigkeiten führen können.*

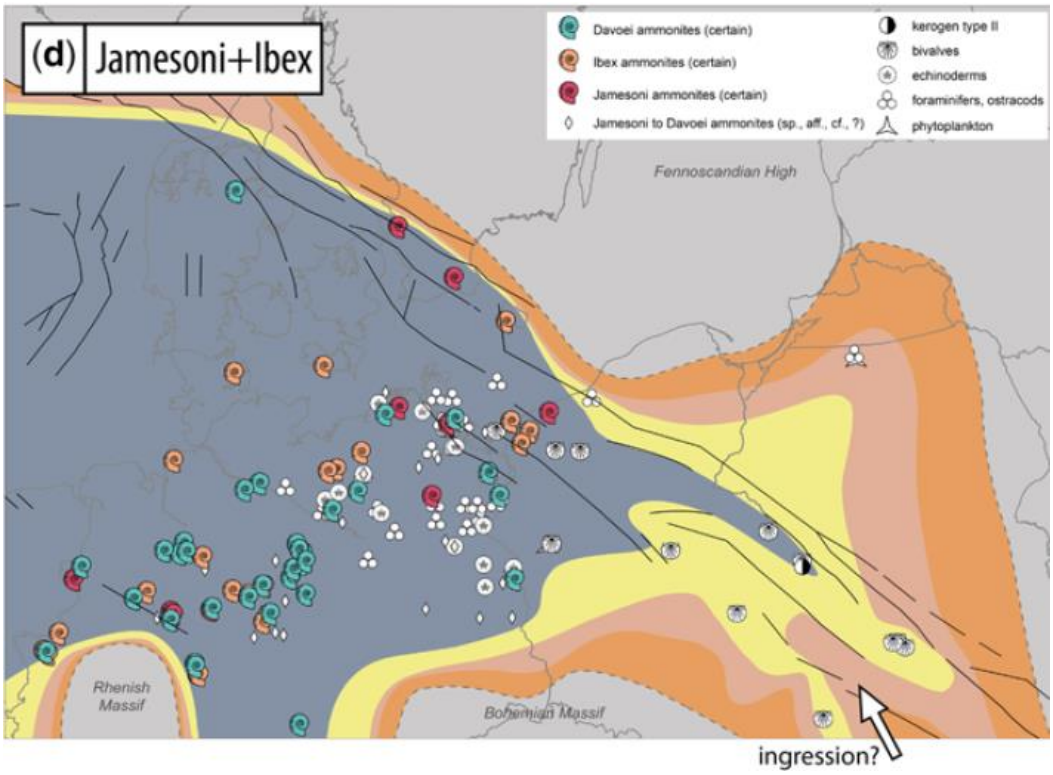

Abbildung 6: Paläogeographische Karte aus der Zeit des Frühen Pliensbachiums (Teil des Unteren Jura), wobei die Verbreitung der tonigen Beckenablagerungen in grau dargestellt ist (Barth et al, 2018: Fig. 5). Am Rande des damaligen Beckens sind in gelben Farben sandige, küstennahe Ablagerungsbereiche zu erkennen. Es ist dabei wichtig zu wissen, dass diese Verteilung von Ton und Sand im Norddeutschen Becken auch im Unteren Jura (Lias) einem ständigen Wandel unterzogen war, hauptsächlich abhängig von Veränderungen des Meeresspiegels und der Sedimentzulieferung durch Flüsse zur damaligen Zeit. Solche Veränderungen durch die Zeit lassen sich besser erkennen in Querschnitten (siehe Abbildung 5) und 3D Modellen.

2D Kartendarstellungen von Sandverteilungen im Lias lassen nur schwer Rückschlüsse auf ihre 3D Verteilung im Untergrund zu. Sandeinschaltungen im Lias in sedimentären Becken wie etwa dem Norddeutschen Becken sind im Beckenzentrum oft nur dünnbankig. 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 stark beeinflussen können.

Empfehlung 10*: In einer zukünftigen, ortsspezifischen Auswertung des Teilgebietes im Unteren Jura (Lias) muss eine 3D Verteilung von, häufig zyklischen Sandeinschaltungen im Unteren Jura analysiert und in einem späteren Stadium präferentiell modelliert werden. D.h. die 2D Kartendarstellungen sollten durch regionale und lokale, detaillierte 3D Modelle mit einer solchen Sandverteilung ersetzt werden.*

3D Geologische Modelle

Die BGE hat bis dato keine eigenen 3D Modelle des Untergrunds für die Teilgebiete erstellt. Eine größere Anzahl von 3D geologischen Modellen zu den einzelnen Teilgebieten wurden durch die geologischen Landesämter geliefert, die ursprünglich verschiedene Zielsetzungen hatten. Dies bedeutet, dass ihre quantitative und qualitative Anwendung zur Bestimmung von Teilgebieten im Norddeutschen Becken für die Aufsuchung eines radioaktiven Endlagers als unterschiedlich nützlich zu bewerten ist.

Beispiel 1: Als Beispiel wird hier das *3D Modell aus Berlin-Brandenburg* angeführt, dass den Lias durch zwei Horizonte charakterisiert, die auf Reflexionsseismischen Daten aus dem Jahre 1991 beruhen und hauptsächlich auf sogenannten marinen Transgressionsflächen basieren („maximum flooding surfaces“). Dabei wurde der Top des Obere Gipskeuper (Trias) und ein Intra-Toarc Horizont (jüngerer Teil des Unter Jura) verwendet (Abbildung 1). Daraus lässt sich die Mächtigkeit des Lias (Unterer Jura) nur bedingt ableiten, ist also mit größeren Unsicherheiten behaftet. Da die Mächtigkeiten dadurch generell meist überschätzt werden, ist die Gefahr Gebiete vorzeitig auszugrenzen als gering einzustufen, d.h. akzeptabel in dieser Projektphase.

Beispiel 2: Für die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt bestanden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Zwischenberichtes keine 3D Modelle. In diesen Bundesländern wurden nur Schichtenverzeichnisse aus vorhandenen Bohrungen verwendet und interpoliert. D.h., die Qualität der Aussagen in diesen Gebieten ist mit größeren Unsicherheiten behaftet im Vergleich zu Gebieten mit vorhandenen 3D Modellen der geologischen Landesämter.

Beispiel 3: Das auf den Geotektonischen Atlas (GTA3D) basierende 3D Model aus Niedersachsen (LBEG) hat die Basis und Top des Lias flächendeckend auskartiert. Störungsflächen sind darin als vertikale Flächen, also nur vereinfacht dargestellt. Auch in NRW erlaubt das 3D Model eine gute Aussage zur regionalen Mächtigkeitsverteilung des Lias aufgrund der verwendeten Zeiteinteilungs-Standards für den Unteren Jura.

Empfehlung 11: *Vorhandene 3D Modelle des GFZ in Potsdam sind bis jetzt noch nicht verwendet worden. Es wäre hilfreich auch weitere vorhandene 3D Modelle des Untergrunds im Norddeutschen Becken zu vergleichen, um die bestehenden Unsicherheiten in diesen Untergrundmodellen besser verstehen zu können.*

***Empfehlung 12**: Für das Teilgebiet Lias sollten regionale 3D Modelle mit den tatsächlichen Mächtigkeiten im Norddeutschen Becken erstellt werden, die auf der Bohrpunktkorrelation von Bohrlochdaten und verlässlichen Schichtenverzeichnissen basieren, am besten in Zusammenhang mit kartierten und kalibrierten 3D seismischen Horizonten. Dabei müssen stratigraphische Standards verwendet werden, z.B. für die Basis und den Top des Unteren Jura aber auch der weiteren Untergliederungen innerhalb des Unteren Jura.*

Referenzdatensätze

Die Verwendung von 7/11 Referenzdatensätzen bei den geoWK in der Phase I Schritt1 ist als vertretbar zu bewerten. Jedoch kann sie bei ortsspezifischen Betrachtungen nicht weiter so verwendet werden. Beispiele dazu sind in diesem Bericht gegeben (z.B. Gebirgsdurchlässigkeit). Andere Beispiele können auch aus dem Bericht der BRG (2021) entnommen werden.

Fazit: Datengrundlage

Das BGE hat auch zum TG 006 Tongestein seit 2017 einen umfangreichen Datensatz mit Hilfe der geologischen Landesämter und der BGR zusammengestellt, was hier ausdrücklich als positiv bewertet wird. Mit Hilfe des neuen Geologiedatengesetzes, das im Juni 2020 in Kraft getreten ist, hat sie auch Zugang zu allen, bis dahin vertraulichen Daten bekommen. Diese, bis jetzt geleistete Arbeit ist als wichtiges Fundament für die weiteren Schritte zu bewerten.

Das bedeutet jedoch nicht, dass der BGE all diese Daten zur eigenen Bearbeitung jetzt vorliegen. D.h. in den kommenden Jahren wird es weiterhin notwendig sein, die bekannten, aber (noch) nicht zugänglichen Daten zu lokalisieren und als Rohdaten und interpretierte Daten in einer digitalen Datenbank zu speichern.

Darüber hinaus ist auch zu erwarten, dass im Teilgebiet vielfach zur Evaluierung notwendige Daten nicht ausreichend vorhanden oder nur lokal verfügbar sind. Dies wird im späteren Teil des Projekts größerer Bedeutung zukommen, da es die Vergleichbarkeit von Regionen innerhalb des Teilgebietes erschweren wird.

***Empfehlung 13**: 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. Dies muss auch eine Einschätzung der jeweilig vorhandenen oder verbleibenden Unsicherheiten einschließen.*

***Empfehlung 14**: Es sollte eine Bund-Länder Kommission gegründet werden, die strukturelle und langfristige Pläne über eine gemeinsame, standardisierte Weise der Untergrunddatenspeicherung für die Bundesrepublik Deutschland entwirft und umsetzt. Nur dadurch können bestehende Ineffizienzen in der digitalen Datensammlung, Speicherung und Weitergabe innerhalb eines solchen Großprojektes nachhaltig verbessert werden. Als Beispiel soll hier nur das open source OSDU Projekt erwähnt werden, dass hier als Vorbild dienen kann (The Open Group OSDU™ Forum). TNO (Geologischer Dienst der Niederlande), ExxonMobil und Wintershall DEA sind darin schon Mitglieder dieses Konsortiums. In diesem Zusammenhang ist zu erwarten, dass ExxonMobil Deutschland und Wintershall DEA große Teile der benötigten privatrechtlichen Daten in Besitzt haben und der BGE digital verfügbar machen können, innerhalb der datenschutzrechtlichen Bestimmungen des neuen Geologiedatengesetzes. Alternativ muss dies via die BGR und die geologischen Landesämter*

geschehen. Dies wird als ein kritischer Faktor für den Erfolg des Standortsuche angesehen. Umso mehr, da viele der zur ortsspezifischen Evaluierung wichtigen seismischen Daten, Bohrdaten und Bohrlochmessungen bis dato bekannt, aber nicht vorhanden sind oder noch nicht bekannt sind (z.B. Bohrkerndaten und deren Übersicht). Es ist zu erwarten, dass diese zukünftige Aufgabe nur durch eine enge Zusammenarbeit zwischen den geologischen Landesämtern, der BGR und Firmen aus der Kohlenwasserstoffindustrie zu bewältigen ist.

Eine weitere Herausforderung für die BGE ist die unterschiedliche Datenlage in den Geologischen Landesämtern der Bundesländer Berlin-Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Hamburg, Bremen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (siehe Positionspapier Geologische Landesämter, 2021). Obwohl viele Basisdaten in diesen Ämtern archiviert sind (oft analog), sind sie bis dato entweder nicht digital verfügbar und/oder zwischen den Bundesländern nicht harmonisiert. Dies ist z.B. in den verwendeten 3D Modellen aus den einzelnen Bundesländern zu erkennen (siehe Kapitel: 3D Geologische Modelle).

***Empfehlung 15**: Da die Grundlage dieses Problems darin liegt, dass sowohl unterschiedliche geologische Standards in den Landesämtern gebraucht werden, aber, zusätzlich dazu, auch unterschiedliche sogenannte „on-premise" IT-Systeme Verwendung finden, ist diese fundamentale Herausforderung wahrscheinlich nur durch eine gemeinsame Neuordnung der Datenbankstrukturen der geologischen Landesämter und der BGR zu lösen, sprich eine gemeinsame cloud-basierende IT-Lösungen zu entwickeln. Dies Bedarf einer gemeinsamen Datenstrategie für geologische Daten im Untergrund zwischen Bund, Ländern und eventuell auch Privatunternehmen. Solches könnte langfristig zu einer Erleichterung der Tätigkeit der BGE führen und ebenfalls die Datentransparenz im Endlagerprojekt vereinfachen.*

Derzeit ist zu erkennen, dass die auf einheitlichen Kriterien aus dem StandAG basierende Gebietsausweisung der BGE durch die unvollständige, digitale Datenbasis und einer fehlenden Ländergrenzen übergreifenden Harmonisierung der geologischen Daten erschwert wird. Zum jetzigen Zeitpunkt des Projektes wird dies nicht als kritisch betrachtet, da die BGE Prinzipien bei der Evaluierung angewendet hat, die nicht zu einer vorzeitigen Verkleinerung und damit den Ausschluss von möglichen Teilgebieten hätte führen können. Bei späteren, ortsspezifischen Analysen in der weiteren Phase des Projektes ist abzusehen, dass die hier angeführte Datenfrage zunehmend wichtiger werden wird. Das Positionspapier der Geologischen Landesämter (2021) legt einige Herausforderungen zur geologischen Datenlage offen, Lösungsansätze sind jedoch daraus nicht zu entnehmen.

Ausschlusskriterien (AK)

Auch im untersuchten Teilgebiet im Lias Tonstein wurde das Prinzip eines vorsichtigen Ausschlusses mit Hilfe der gesetzlich vorgegebenen Ausschlusskriterien angewandt, um möglichst zu diesem Zeitpunkt keine Standorte vorzeitig aus der Bewertung herauszunehmen. Dies ist durchwegs üblich und vereinbar mit dem Ansatz des „divergent thinking" (Abbildung 3) innerhalb von Projekten dieser Größenordnung und gesellschaftlichen Relevanz. Allerdings setzen die durch die Endlagerkommission via StandAG vorgegebenen Rahmenbedingungen, enge Grenzen in der Bearbeitung der gesamten Geologie Deutschlands, d.h. dem gesetzten Ausgangspunkt der weißen Landkarte Deutschlands. Insgesamt werden solche Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit dem untersuchten Teilgebiet begrüßt, da sie zu einer einfacheren Vergleichbarkeit der Resultate führen, insbesondere in der derzeitigen Phase der Standortsuche.

Mindestanforderungen (MA)

Die Mindestanforderungen (MA) werden hier nur anhand von wenigen Beispielen angesprochen. Diese sollen helfen, die unterschiedliche „Flughöhe“, oder besser, das Detail in der Betrachtungsweise der Daten zu verdeutlichen.

Gebirgsdurchlässigkeit

Der Parameter Gebirgsdurchlässigkeit ist als wichtiger Faktor bei der Einschätzung eines geeigneten Endlager-Standorts erkannt. Im Phase I Schritt 1 wurden Referenzdaten aus Durchlässigkeitsmessungen/Permeabilitätsmessungen, meist anhand von nur mehreren zentimeter-großen Tongesteinsproben verwendet. Diese erweisen sich in den allermeisten Fällen als „günstig“. Dies ist jedoch als eine starke Verallgemeinerung anzusehen, da auch in solch mächtigen Tonsteinabfolgen wie etwa im Lias viele interne lithologische Heterogenitäten auftreten können, wie etwa Variationen in Karbonat-, Ton- oder organischem Kohlenstoff-Gehalt. Dies ist zum jetzigen Stand des Projektes noch akzeptabel, bedarf aber im weiteren Verlauf (d.h. Schritt 2) einer verfeinerten Analyse.

Basierend auf umfangreichen Erfahrungen aus Kohlenwasserstoffreservoiren 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. Diese strukturellen Elemente sind in der Datenbasis der BGE gut bis sehr gut erfasst. Dabei ist jedoch die Qualität, der von den einzelnen Landesämtern gelieferten Daten unterschiedlich inklusive deren Bewertungen in den jeweiligen Bundesländern.
2. Veränderungen in der Gesteinsausbildung (Fazies) innerhalb einer mächtigen sedimentären Gesteinsabfolgen, wie etwa die Einschaltung von dünnen Sandlagen oder Sandkörpern innerhalb der untersuchten Tonabfolge des Lias. Diese können, in Abhängigkeit der Wassertiefe im Ablagerungsmilieu, durch episodischen Massentransport (Turbidite) oder Sturmlagen (Tempestite) erzeugt werden (Pattison, 2005). Ihr Einfluss auf die horizontale Gesteinsdurchlässigkeit (Permeabilität) kann vergleichsweise ähnliche Bedeutung haben wie die von tektonischen (vertikalen) Störungszonen.

Für eine vorläufige Einstufung im Phase I Schritt 1 des Projektes ist eine solche Vorgehensweise bei der Einstufung der Gebirgsdurchlässigkeit akzeptabel, um nicht vorweg eventuell geeignete Standorte auszuschließen.

Empfehlung 16*: 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 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* ***Aufschlussanalogien****. Dies sind Studien zu vergleichbaren Gesteinsabfolgen, die man im anstehenden Gebirge gut 2- oder 3-dimensional verfolgen und analysieren kann -etwas, was im Untergrund in diesem Detail nicht möglich ist. Detaillierte Studien zu solchen Beispielen in toniger Beckenfazies (d.h. ähnlich dem Lias) gibt es z.B. aus der Kreidezeit der Book Cliffs Formationen in Utah, wo solche Beobachtungen im Anstehenden Gebirge verfolget werden können (Pattison, 2005;* Abbildung 7*).*

Empfehlung 17: *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 Verteilung von Sandeinschaltungen*** *oder Sandkörpern gelegt werden, da diese die Gesteinsdurchlässigkeit entscheidend beeinflussen können (d.h. den Transport von Radionukliden). Aufgrund der zyklischen Natur des Lias ist zu erwarten, dass solche Sandeinschaltungen auch vertikal mehrfach auftreten können. Dies kann lokal zu weniger günstigen Eigenschaften des Wirtsgestein Ton führen in Abhängigkeit einer solchen Verteilung von Sandeinschaltungen in von Tonstein dominierten Beckenablagerungen des Unteren Jura (Lias).*

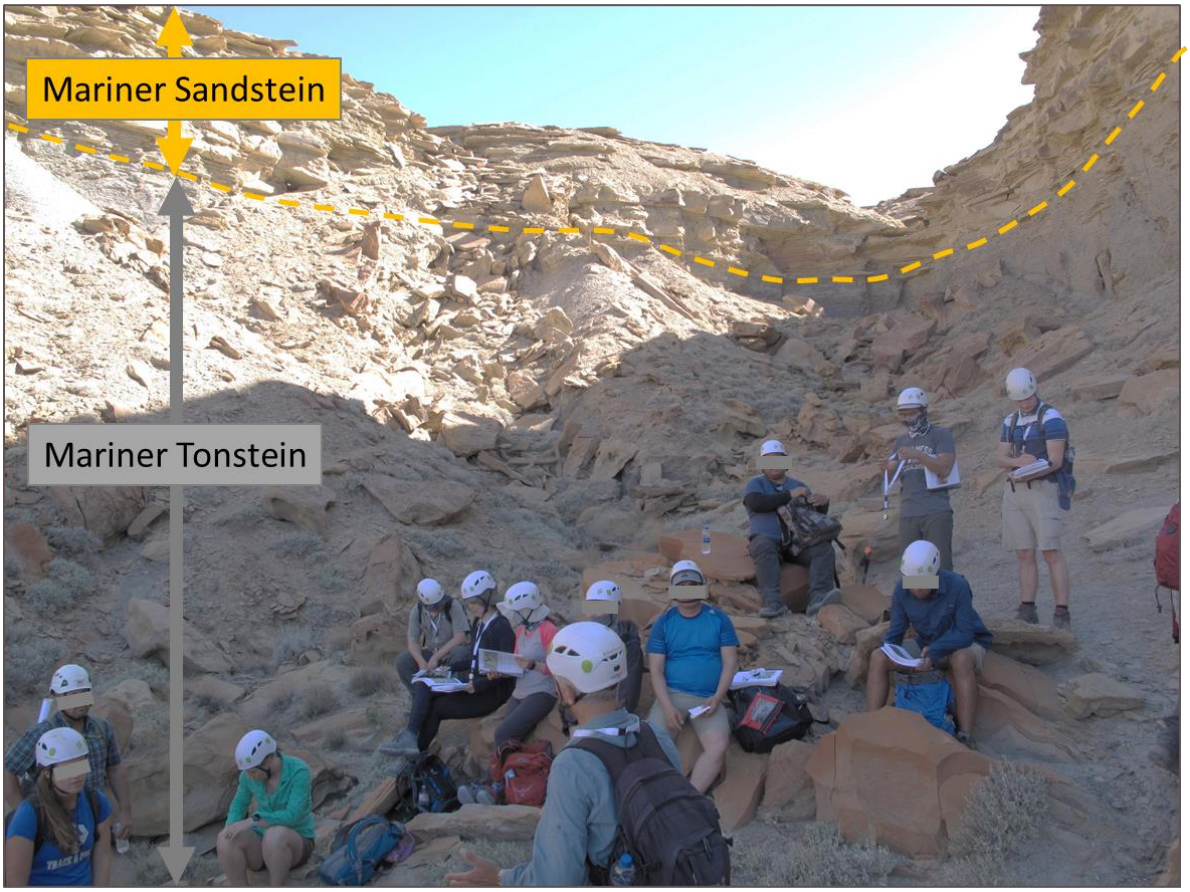

Abbildung 7: Flachmarine Turbiditsandablagerungen in Hatch Mesa, Book Cliffs, Utah, USA (Pattison, 2005). Der Ablagerungsraum in den sehr guten Oberflächenaufschlüssen der Book Cliffs in Utah kann als Gesteins-Analog der Lias-Abfolgen im Untergrund des Norddeutschen Beckens angesehen werden. Der „Marine Sandstein“ wurde als turbiditische Ablagerung klassifiziert in einen, dem Liasmeer vergleichbaren, von marinen Tonsteinen dominierten Ablagerungsraum (Photo: Grötsch).

Glaziale Erosionsrinnen

BGE Dokumentationen zeigen deutlich auf, dass die in Norddeutschland auftretenden elsterzeitlichen, subglazialen Rinnen als Erosionsstrukturen (Abbildung 8) mit einer Tiefe von über 500 m unter Geländeoberkante vorkommen können (Hönemann et al. 1995; Stackebrandt 2009). Die Teufenlage der Strukturbasis des Unterjura variiert im IG 188_00IG_T_f_ju zwischen 400m bis

1500m unter Geländeoberkante, was eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen möglich macht (Hönemann et al. 1995; Stackebrandt 2009).

Empfehlung 18: *In Phase I Schritt 1 des Projektes wurden eine minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von 300 m angenommen für Tongestein (siehe Mindestanforderungen). Dies wirft die Frage auf, ob die Flächen um diese glazialen Erosionsrinnen nicht ebenfalls als Ausschlussflächen betrachtet werden sollten. Diese Gebiete sind aus der dokumentierten Karte Quartärbasis sehr gut abzugrenzen (*Abbildung 8*). Dabei ist eine Analyse notwendig, inwieweit die Erosionsrinnen in Verbindung mit oberflächennahen, tektonischen Lineamenten oder Unterschieden der Festigkeit des Gesteins in Verbindung stehen.*

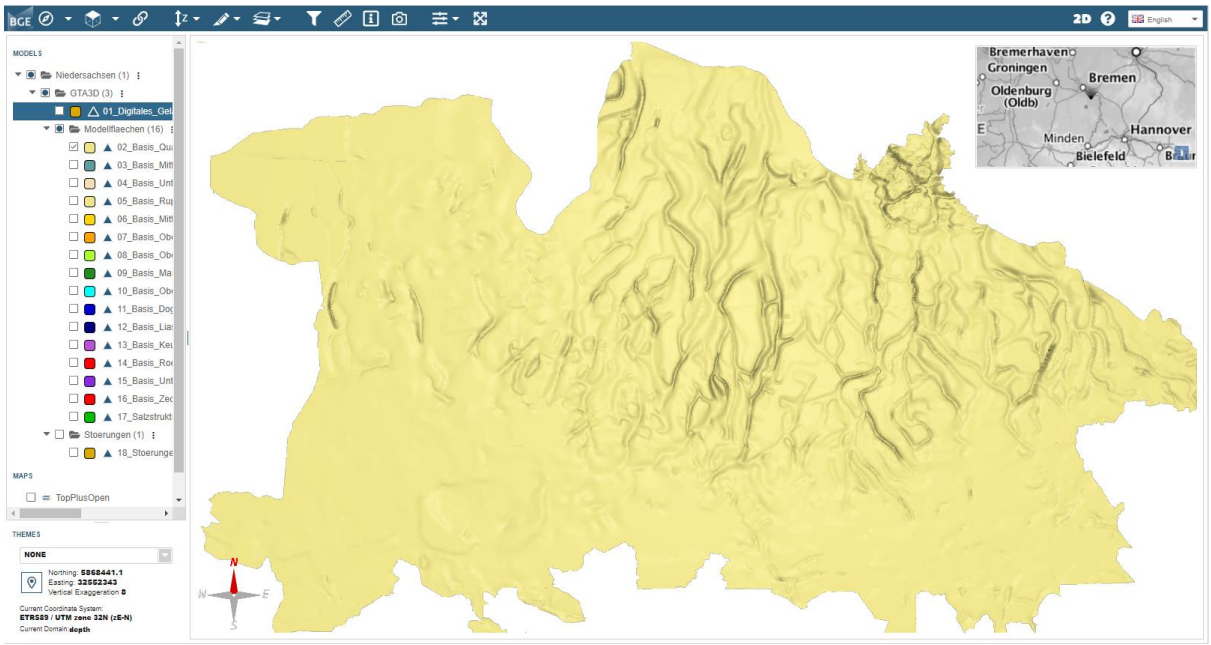

Abbildung 8: Quartärbasis aus dem 3D geologischen Model GTA3D der LBEG für das Land Niedersachsen (8-fach überhöht). Deutlich sind die glazialen Erosionsrinnen zu erkennen, die sich in plusminus N-S Richtung erstrecken, also parallel zur Hauptbewegungsrichtung der Eismassen im letzten Glazial (Hönemann et al. 1995; Stackebrandt 2009). Häufig folgen solche glaziale Erosionsrinnen Störungszonen oder weniger festen Gesteinen im Untergrund. Diese Erosionsrinnen können bis zu 500 m tief sein, d.h. müssen in der weiteren Projektphase nochmals spezielle Betrachtung finden (GST Web (bge.de)).

BGE Berichte dokumentieren, dass das Norddeutsche-Becken zur neotektonisch aktiven Mitteleuropäischen Senkungszone gehört (Garetsky et al. 2001). Tektonische Aktivität als potenzieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (Scheck et al. 2003; Stackebrandt 2010). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich, etwa durch die vertikale Verschiebung von Gesteinspaketen gegeneinander und die dadurch bedingte Veränderung der lateralen Gesteinsdurchlässigkeit.

Empfehlung 19: *Oberflächennahe, junge tektonische Lineamente oder Störungszonen sollten im weiteren Projektverlauf für das gesamte Teilgebiet als thematische Karte aufbereitet werden. Es ist zu erwarten, dass etwa N-S Lineamente als Indikatoren für potenzielle Gletschererosion 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.

Verwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK) und Indikatoren

Die Einschätzung der AKs und MAs führt zum Ausschluss großer Gebietsflächen, insgesamt 46% der BRD. Das Wirtsgestein Ton tritt in verschieden alten stratigraphischen Einheiten auf. Für dieses Gutachten wurde nur der Untere Jura (Lias) betrachtet, der im übrigbleibenden Teilgebiet 006_00TG_188_T_f_ju im Untergrund ansteht, das Teil des Norddeutschen Beckens ist.

Innerhalb dieses Teilgebietes werden 11, für alle Wirtsgestein geltenden, geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWKs) verwendet. Im untersuchten Gebiet sind 7 aus 11 geoWKs durch Referenzdatensätze evaluiert worden. Bei 4 von 11 geoWKs sind Gebietsdaten vorhanden und in die Evaluierung eingeflossen.

Jedes geoWK hat zusätzlich spezifische Indikatoren (insgesamt 40), die dazu verwendet werden, dass Teilgebiete nach ihren Eigenschaften als günstig, bedingt günstig oder ungünstig einzustufen sind. Die Indikatoren und Kriterien werden dann für eine Gesamtbewertung des Teilgebietes verwendet.

In der Folge werden einige geoWK anhand von Beispielen aufgeführt, die in Beziehung auf das untersuchte Teilgebiet von Relevanz sind. Dabei ist zu bemerken, dass die im Gesetz vorgegebene Auflistung der geoAKWs nicht mit einem Arbeitsablauf einer Untergrundstudie verwechselt werden sollte (BGE, 2020c, S.23-25).

geoWK 1: Kriterium zur Bewertung des Transports radioaktover Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Beispiel: geoAKW 1 Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) wird im StandAG als erstes Kriterium aufgeführt. Bei Untergrundstudien werden gewöhnlich zuerst statische Parameter betrachtet (z.B. geoAKW 2 und 3) und danach dynamische Betrachtungen (z.B. geoAKW 1) ausgeführt, da nur ein gutes Verständnis der strukturgeologischen und sedimentologischen Gegebenheiten, sprich ein „statisches 3D Model“, Aussagen zum dynamischen Verhalten, z.B. von Flüssigkeiten, Gasen und Radionukliden im Untergrund erlaubt.

geoWK 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Einige der Indikatoren von geoWK können nicht oder nur eingeschränkt angewendet werden, wie z.B.:

Indikator: Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können (Bemerkung: Dieser Indikator wurde nur für identifizierte Gebiete im Tongestein angewendet)

Indikator: „Potenzialbringer für Grundwasserbewegungen“ wurde generell als günstig bewertet da über das Teilgebiet keine ausreichenden Daten verfügbar waren. D.h. ein solcher Indikator kann nur ortsspezifisch verwendet werden, ist also für Phase I Schritt 1 in Realität nicht angewendet worden.

Fazit: Das Beispiel „Potenzialbringer“ zeigt die Schwierigkeit auf, solche Indikatoren, in Abhängigkeit der verfügbaren (oder oft nicht verfügbaren) Daten zu bewerten und die Abhängigkeit zur jeweiligen Projektphase.

geoWK 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Als Beispiel wird hier die räumliche Charakterisierbarkeit verwendet, die beim Wirtsgestein Tongestein eine besondere Rolle spielt (BGE, 2020c, S.24). Dieses Kriterium basiert nicht auf Referenzdaten sondern auf individuellen Gebietsdaten, wie etwa paläogeographische Karten. Dabei werden vier Indikatoren zur Bewertung herangezogen:

1) Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
2) Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften
3) Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit
4) Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Die Problematik der räumlichen Charakterisierbarkeit wurde bereits im Kapitel *Mindestanforderungen (MA)* ausführlicher angesprochen insbesondere bei der MA Gebirgsdurchlässigkeit und der dabei verwendeten Referenzdatensätze, die bis jetzt auf Gesteinsdurchlässigkeit von kleinen Gesteinsproben basieren. Obwohl die durchgeführte Anwendung der MA Gesteinsdurchlässigkeit als sinnvoll erscheint, zeigt es doch sehr gut die Abhängigkeiten bei der vorläufigen Abschätzung die bestehen zwischen:

- Ausschlusskriterien (AK)
- Mindestanforderungen (MA)
- geoWK und der jeweiligen Indikatoren
- nicht gesetzlich festgelegten, weiteren notwendigen Aspekten

auf. Nur eine gemeinsame Betrachtung aller verwendeter Parameter kann zu einer schlüssigen, ortsspezifischen Einschätzung führen. Dies soll im Folgenden am Beispiel von Störungen und tektonischen Bewegungen aufgezeigt werden:

Beispiel: Das AK „großräumige Vertikalbewegungen“ und „aktive Störungszonen“ muss zusammen mit dem geoAKW 3 Indikator 3 „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ und dem geoWK 11 Indikator 3 „Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge“ betrachtet werden um die strukturgeologische Geschichte und damit zusammenhängende junge Deformationen innerhalb des Teilgebietes in Zukunft beurteilen zu können. Da sich das Norddeutsche Becken ab der Unteren Kreide in Folge der Öffnung des Atlantiks zu einem Transtensionsbecken entwickelt, sind auch heute noch tektonische Bewegungen zu beobachten (Scheck et al. 2003; Lehné & Sirocko 2010; Franke & Stackebrandt 2015).

Fazit: Die Verwendung der AKs, MAs und der geoWKs mit den jeweiligen Indikatoren ist für den jetzigen Stand des Projektes als ausreichend anzusehen. Die Verwendung der verschiedenen geologischen Gesichtspunkte innerhalb der gesetzlich vorgegebenen Rahmenbedingungen (d.h. StandAG) führen dazu, dass diese Gesichtspunkte bei der Evaluierung mehrfach aus verschiedenen

Blickrichtungen innerhalb der AKs, MAs und geoWK betrachtet werden (siehe Beispiel oben). Dies wird zum jetzigen Zeitpunkt des Projektes als akzeptabel angesehen, obwohl es dadurch bisweilen zu gewissen Unklarheiten kommen kann, sprich wo welcher geologische Aspekt in die Beurteilung eingeflossen ist. In den weiteren Projektphasen bedarf es einer, sicher schon geplanten, anderen Vorgehensweise. Die bisherige Vorgehensweise erlaubt, beginnend von einer weißen Landkarte potenzielle Teilgebiete innerhalb Deutschlands einzugrenzen. Auch die Tatsache, dass sich das BGE auf Referenzdatensätze, externe Studien der Landesämter und der BGR, wissenschaftliche Literatur und die aufgebaute, gut strukturierte Datensammlung stützt, also nicht auf zusätzliche, eigene Studien, ist als ausreichend zu bewerten für Phase I Schritt 1 des Projektes.

Empfehlung 20*: Für eine weitere, regionale Bearbeitung des Teilgebietes sollte ein klarer, bei Untergrundstudien üblicher Prozess verwendet werden (siehe etwa Kohlenwasserstoffindustrie). 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) und die strukturgeologische und sedimentologische Gesamtsituation charakterisiert werden, letztendlich mit Hilfe eines statischen 3D Models. Dieses sollte die Grundlage bilden für die Einschätzung des dynamischen Verhaltens (z.B. Transport von Radionukliden) durch eine dynamische Modellierung, kalibriert anhand von lokalen Gesteinsdaten aus Bohrungen (z.B. geomechanische Parameter, Variation der Gesteinsdurchlässigkeit etc.). In einem weiteren Stadium (Phase II) müssen dann diese statischen und dynamischen Modelle mit den Optionen des bergbaulichen Ausbaus zusammen beurteilt werden („concept select“).*

geoWK 10: Kriterium: Hydrochemische Verhältnisse

Beispiel: Im jetzigen Stand spricht die BGE von „geringer Karbonatkonzentration“ in Wirtsgestein Tongestein. Offen marine Ablagerungen, wie die des Liasmeeres im Unter Jura haben jedoch zum Teil erhebliche Kalkanteile, wie etwa die zum Teil stark Ammoniten führenden Schichten im Lias aufzeigen.

Empfehlung 21*: In marinen Tonen und Tonsteinen sind wechselnde Karbonatgehalte zu erwarten, aufgrund des Vorkommens von kalkschaligen Fossilien (z.B. Ammoniten), die sekundär zu Lösungs- und Ausfällungsprozessen führen (z.B. diagenetische Schichtung). Es sind weitere Untersuchungen diesbezüglich notwendig um Klarheit zur eigentlichen Variabilität der vertikalen und lateralen Gesteinsabfolge (Fazies) zu schaffen.*

geoWK 11: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

Beispiel: Zum geoWK 11 wurden sehr detaillierte Zusammenstellungen aus den verschiedenen Bundesländern gesammelt und in ArcGis Pro in Kartendarstellungen dokumentiert, wie etwa atektonische Beeinflussungen des Deckgebirges, die an der Oberfäche zu beobachten sind (z.B. Karst, Erdfälle, Salzlösung). Diese sind im Indikator 3 (siehe unten in kursiv) aufgeführt.

1) Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
2) Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

3) *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) ergeben könnten*

Aufgrund der umfangreichen Datengrundlage zu atektonischen, strukturellen Komplikationen im Teilgebiet (siehe ArcGis Pro Datenbank) wird dieser Indikator und damit das gesamte geoWK 11 als bedingt günstig eingeschätzt. Die ArcGis Pro Karten erbringen den Nachweis, dass atektonischen Strukturen und Störungen innerhalb des identifizierten Gebietes vorhanden sind. Jedoch ist anhand der vorliegenden Informationen eine Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit nicht möglich (BGE, 2020e). Das Vorhandensein dieser georeferenzierten Daten erleichtert eine spätere ortsspezifische Beurteilung des Indikators. Die gesammelte Datengrundlage der BGE wird hier als sehr gut eingeschätzt und erlaubt eine ortsspezifische Evaluierung dieses Aspektes aufgrund der nun schon vorhandenen Datenbank.

Empfehlung 22*: Dieses Beispiel macht die Bedeutung einer guten Datenbasis für die BGE deutlich. Schon in einem frühen Projektstadium lassen sich dadurch wichtige Hinweise für die lokationsspezifische Evaluierung in Phase I Schritt 2 oder Phase II entnehmen. Eine frühzeitige Verfügbarkeit einer breiten harmonisierten Basis an geologischen Oberflächen- und Untergrunddaten für das BGE wird deshalb ausdrücklich befürwortet.*

Beispiel: Die MA nach StandAG Paragraph 23 fordert, dass die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen muss. Bei geoWK 11 Deckgebirge wird ein Abstand von der Geländeoberkante (GOK) zum Wirtsgestein von mindestens 100 m gefordert. Eine günstige Bewertung des Indikators *„Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“* wird bei >150 m erzielt. In den 3D Modellen werden nur Gebiete mit >300 m Abstand zur GOK berücksichtigt.

Fazit: Wie am Beispiel gezeigt stehen, teils schwer nachvollziehbar, Kriterien in MA, geoWK und Indikatoren in Abhängigkeit zueinander. Trotz alledem ist die Bewertung, im untersuchten Teilgebiet als korrekt anzusehen, da nur Flächen mir einem Abstand zur GOK von >300 m verwendet wurden.

Verwendung von „Indikatoren“ anhand von Beispielen

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ *und* ***„Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:***

Im Unteren Jura (Lias) liegen eine Anzahl von Studien im Norddeutschen Becken vor, die auch in die Studien der BGE eingeflossen sind (z.B., Petzka et al., 2004; Hoth et al., 2007 ; Paul et al., 2008; Barth et al, 2018). Es muss aber hier darauf hingewiesen werden, dass diese Studien sich zumeist auf sehr sporadisch vorhandene Daten im Untergrund beziehen (z.B. Bohrungen, Bohrkerndaten, petrophysikalische Bohrlochmessungen, 2D und 3D Seismik). Solche Daten erlauben zwar großräumige Veränderungen zu erkennen und in Modelle des Untergrunds einzubauen, sind aber für lokationsspezifische Aussagen meist nicht mehr geeignet.

Empfehlung 23*: Im folgenden Phase I Schritt 2 des Projektes sollten alle noch nicht vorhandenen, entscheidungsrelevanten Daten aus dem Untergrund systematisch weiter gesammelt werden und in einer gut zugänglichen Datenbank gespeichert werden. Auch der notwendige Zugang zu*

verschiedenen Bohrkernlagern ist notwendig und muss geregelt werden. Wichtige Daten diesbezüglich sind etwa:

- *Bohrlochmessungen*
- *Bohrkerne, Bohrkernanalysen, Bohrkernbeschreibungen, Zugang zu Bohrkernen*
- *2D und 3D seismische Daten (Rohdaten und prozessierte Daten)*

Empfehlung 24*: Aufgrund der Tatsache, dass räumliche Verbreitung, Auflösung und Qualität von Untergrunddaten nicht vergleichbar sind mit obertägigen geologischen Aufschlüssen im anstehenden Gebirge, sollten wo möglich Analogiestudien mit in zukünftige Untersuchungen mit einbezogen werden (siehe z.B.* Abbildung 7*).*

Indikator: Langfristigen Stabilität der "Mächtigkeit" des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und „***Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat***“:

und

Indikator: Langfristigen Stabilität der „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und „***Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat***“:

Halokinese oder die Bewegung von Salzformationen im Untergrund aufgrund von Dichteunterschieden und Auflast durch überlagernde Formationen ist ein weit verbreitetes Phänomen im Untergrund des Norddeutschen Beckens und führt zu lokalen, oft signifikanten Variationen der Mächtigkeit und der Faziesverteilung der Lias-Ablagerungen, unabhängig von den offensichtlichen, großräumigen Gesteinsfaziesausbildungen im Norddeutschen Becken.

Empfehlung 25*: Da diese Salzbewegungen schon über lange, geologische Zeiträume andauern, müssen diese Mächtigkeitsveränderungen im Lias aufgrund von Sedimentation und Erosion lokal untersucht werden. Dieser Aspekt kann auch lokal zu stark veränderten Gebirgsdurchlässigkeiten führen. Besondere Aufmerksamkeit muss deshalb bei der weiteren Analyse auf Flächen im Teilgebiet gelegt werden, wo solche Salzbewegungen aufgrund von seismischen und anderer Daten nachgewiesen sind und/oder in regionalen 3D Modellen festgehalten sind.*

Zusätzliche Aspekte, die bei der weiteren Bearbeitung in Phase I Schritt 2 und Phase II beachtet werden sollten, sind:

Indikator: Verfestigungsgrad (geoWK 1): Starke Unterschiede der mechanischen Eigenschaften von Ton und Tonstein in tertiären und prätertiären tonigen Formationen in Abhängigkeit der Tiefe sind bekannt (z.B. Rupeltone). Dieser Indikator wird nicht verwendet da er durch den Indikator charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient ersetzt wurde (BGE 2020e, S 60).

Empfehlung 26*: Der Verfestigungsgrad in Tonen und Tonsteinen ist ein wichtiger Indikator, der anhand von Gesteinsproben aus Bohrkernen gemessen wird. Das Fehlen von Bohrkernmaterial und einer Übersicht an verfügbaren Bohrkerndaten aus Bohrungen der öffentlichen Hand und der Industrie macht sich hier negative bemerkbar und sollte schnellstmöglich angegangen werden.*

Indikator: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung (geoWK 6): Auch diese Kriterium ist stark abhängig, ob es sich um einen Ton oder einen Tonstein handelt (siehe oben).

Zusätzliche Aspekte, die nicht in den Bewertungen identifiziert werden konnten und die bei der weiteren Bearbeitung in Phase I Schritt 2 und Phase II beachtet werden sollten sind:

Aspekt: Schwelltone*:* Tone und Tonsteine haben häufig Mineralkomponenten mit unterschiedlicher Stabilität. Auch geringe Vorkommen von sogenannten Schwelltonen (z.B. Smektit, Montmorrillonit) im Tongestein können die gebirgsmechanischen Eigenschaften bei Zufuhr von Wasser (oder Abfuhr von Salz) stark verändern. Dies ist besonders bei Bohrungen und bergbaulichem Ausbau (sprich Georisiken) eines Standortes zu beachten. Bis dato sind dazu keine Daten aus Bohrungen vorhanden.

Aspekt: Verteilung von organischem Kohlenstoff (TOC) im Lias: Der obere Lias (Lias Epsilon, Toarc) ist bekannt für seinen Reichtum an organischem Kohlenstoff (TOC). Da sich ein hoher TOC Gehalt im Tonstein des Lias als weniger günstig bei der Lagerung von radioaktivem Material erweisen kann, sollten Karten zur Verteilung des TOC im TG 006 erstellt werden. Die Daten sollten für das Teilgebiet durch den BGE gesammelt werden und in Kartenform dargestellt werden. Dabei kann es sich um nach dem GeolDG als vertraulich eingestufte Daten handeln.

Aspekt: Porenwasserdruck und Gebirgsspannung: Aufgrund der geringen Durchlässigkeit von Tonstein haben Veränderungen von Porenwasserdruck und Gebirgsspannung einen stärkeren Einfluss auf die Temperaturzunahme im Gestein (NAGRA, 2002). Dies ist im geoWK 8 Temperaturverträglichkeit noch nicht ausreichend in Betracht gezogen worden und bedarf weiterer regionaler und standortspezifischer Untersuchungen.

Bewertungsrelevante Eigenschaften

Eine *Mächtigkeit größer 300 Meter*, welche als günstige Barrieregesteinsmächtigkeit angenommen wird (siehe BGE 2020) ist innerhalb der abgedeckten Bereiche des identifizierten Gebietes für eine Fläche von 4895 km² vorhanden. Sie übersteigt damit dem für Tongestein vorgegebenem Flächenbedarf von 10 km² deutlich (BGE, 2020e, S. 59ff). Dies zeigt deutlich auf, dass der Lias Tonstein im Norddeutschen Becken ein großes Volumen an ewG im Untergrund hat und dadurch ein möglicher Kandidat für ein Endlager darstellt.

Im untersuchten Teilgebiet werden die *geomechanischen Eigenschaften* als ungünstig eingestuft, was nachvollziehbar ist. In Zusammenhang mit anderen Eigenschaften des Lias Tonsteins (z.B. Gehalt organischen Kohlenstoffs, Vorkommen von Schwelltonen, Karbonatgehalt) kann dies zu Komplexitäten im bergbaulichen Ausbau eines Endlagers oder bei Erkundungsbohrungen führen.

Die *atektonischen Eigenschaften* (z.B. Karst, Salzlösung, Erdfälle) im Deckgebirge des ewG werden als bedingt günstig eingestuft, wobei deren räumlich Ausdehnung im Verhältnis zum Teilgebiet klein und die Lokationen darüber hinaus sehr gut bekannt sind, also vermieden werden können.

Alle anderen Indikatoren der jeweiligen geoWKs werden als günstig eingestuft, was letztendlich zur günstigen Einstufung des Wirtsgestein Ton im Lias im auskartierten Teilgebiet 006 insgesamt geführt hat.

Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die meisten Indikatoren (7/11) nur anhand von *Referenzdatensätzen* als günstig beurteilt wurden. Dies ist in Phase I Schritt 1 akzeptabel, aber für die weitere ortsspezifische Evaluierung nicht mehr ausreichend.

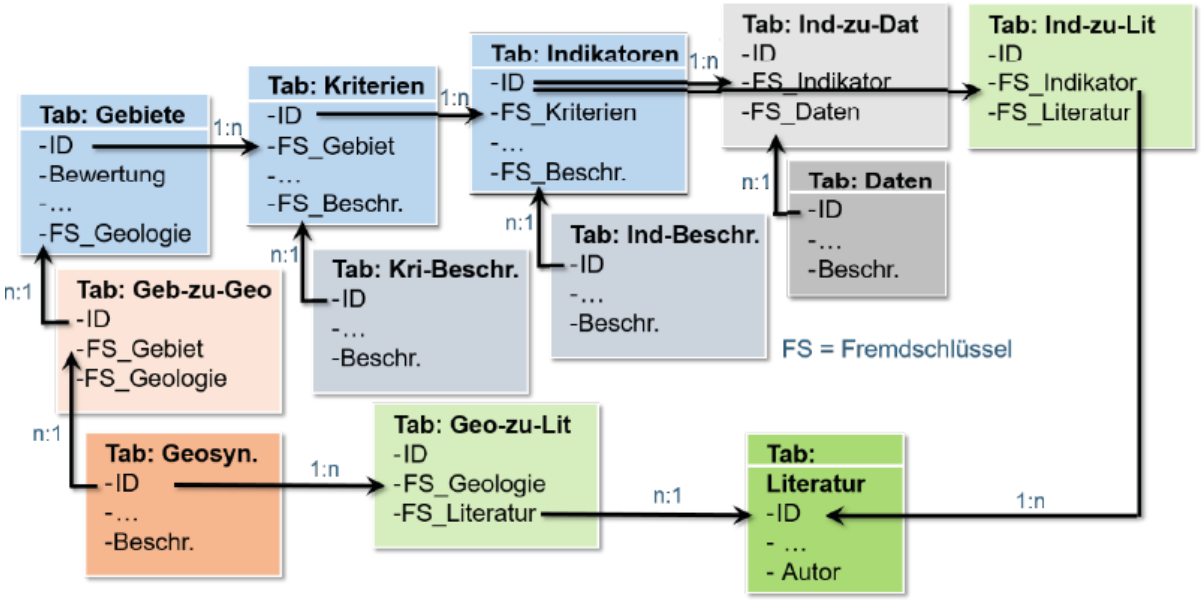

Abbildung 9: Bewertungsmodul zu den 11 geoWKs und dazugehörigen 40 Indikatoren in der MS-Access Datenbank der BGE. Derzeitige Bewertung erfolgte im oberen Bereich der physikalischen Bandbreite des Wirtsgesteins. Die jetzigen Bewertungen sollen im weiteren Verlauf des Projektes gleichbleiben oder sich verschlechtern, sprich mehr Gebiete sollen ausgeschlossen werden (Quelle: BGE).

Zusammenfassung Verwendung geoWK

Für jedes identifizierte Gebiet ist im Bewertungsmodul (Abbildung 9) eine *Geosynthese* zu verknüpfen. Dabei handelt es sich um eine prägnante Zusammenfassung der wichtigsten bewertungsrelevanten geologischen Fakten. Die Geosynthese beinhaltet die folgenden Informationen: den Namen der betrachteten geologischen Einheit, eine Information über das vorhandene Wirtsgestein und dessen geographische Verbreitung, eine Angabe zur Stratigraphie sowie eine geologische Charakterisierung in Form einer geowissenschaftlichen Übersicht inklusive Empfehlung für weiterführende Literatur (BGE, 2020a).

Die Verwendung von 11 geoWK und 40 Indikatoren und deren verbalargumentative Bewertung zum Wirtsgestein Tongestein Teilgebiet 006 wird zum jetzigen Stand des Projektes zur Endlagersuche (Phase I Schritt 1) als ausreichend betrachtet. Dabei ist festzuhalten, dass alle substanziellen Fragestellungen in Form von gesetzlich vorgegebenen Kriterien und Indikatoren angesprochen werden. Dies erlaubt es, das Teilgebiet Tongestein 06__00TG__188__00IG_T__f_ju als insgesamt „günstig“ zu bewerten. Dabei wird begrüßt, dass eine bis dato weite Fassung der Kriterien und Indikatoren der Zielsetzung gerecht wird, in Phase I des Projektes keine, derzeit noch fraglichen Gebiete vorzeitig auszuschließen. In vielen Fällen ist zu sehen, dass weiterer Ausschluss auf ortsspezifische Daten basieren sollte, die häufig (noch) nicht bei der BGE verfügbar sind.

***Empfehlung 27**: Dabei sollte auch erwähnt werden, dass für weiter Projektphasen und detaillierte Studien in Zukunft übliche Arbeitsabläufe zu Untergrundstudien verwendet werden sollten. Diese sollten u.a. Arbeitsschritten folgen, wie z.B.*

- *Erstellung eines konsistenten, regionalen 3D Modells mit standardisierten stratigraphischen Einheiten für das Teilgebiet*
- *Charakterisierung der regionalen und lokalen tektonischen Gegebenheiten*
- *Charakterisierung der Eigenschaften des Reservoirs (sprich ewG incl Einlagerungsbereich)*
- *Erstellung von statischen und dynamischen Modellen*
- *Verwendung von multiplen Realisationen im Untergrund, die dann später zusammen mit dem geplanten bergbaulichen Ausbau bewertet werden sollten.*

Eine weiter entwickelte Strukturierung, der bei der Evaluierung verwendeten Arbeitsabläufe (Methodik) sollte in Zukunft mehr Klarheit geben, unter welchem Kriterium welcher geologische Indikator oder weitere Aspekte (siehe Kapitel **Verwendung von „Indikatoren" anhand von Beispielen***) berücksichtigt wurden.*

Gesamtbeurteilung Wirtsgestein Tongestein Unterer Jura

Aufgrund der Tatsache, dass die tonigen Teile des Lias im Norddeutschen Becken mehrerer Grundvoraussetzungen hinreichend erfüllen, wie z.B.

- Mächtigkeitsverteilung,
- Tiefe im Untergrund,
- Erfüllung des Flächenbedarfs,
- Struktur des Deckgebirges mit Dogger- und Unterkreide Tonablagerungen im Überlagernden

ist eine Eignung des Teilgebietes als möglicher Kandidat in diesem Teilschritt des Projektes/Verfahrens für eine weitere Bearbeitung als sinnvoll einzuschätzen.

Die verwendeten, zusammenfassenden Definitionen bei den AKs, geoWK und Indikatoren, die auf alle Formationen mit ihren unterschiedlichen Gesteinseigenschaften (z.B. Ton vis-a-vis Tonstein) angewendet wurden, sind im augenblicklichen Status des Projektes vertretbar.

***Empfehlung 28**: Jedoch sind dazu bei der standort- und formationsspezifischen Auswertung des Wirtsgesteins Tongestein zusätzliche Betrachtungen und eine der spezifischen Problemstellung angepasste Auswertung der verschiedenen Kriterien, Indikatoren und der weiteren Aspekte notwendig. Beispiele dazu sind in dem vorliegenden Bericht aufgeführt.*

Verbalargumentative Bewertung des Teilgebietes

Die durch die BGE durchgeführten Untersuchungen des hier beurteilten Teilgebietes sind aufgrund des StandAG nach einer vorgegebenen Struktur durchgeführt worden. Diese Struktur folgt einer geologisch orientierten Hierarchie von Kriterien, die nacheinander Anwendung finden:

- 5 Ausschlusskriterien (AK)
    - 5 Mindestanforderungen (MA)
        - 11 Geologische Abwägungskriterien (geoWK)
            - 40 Indikatoren (in Wertungsgruppen)

Dieses, konsistent angewandte **Kriterienbündel** ist gesetzlich vorgeschrieben und erfüllt zum derzeitigen Stadium des Projektes seinen Zweck bei der Untersuchung des hier begutachteten Teilgebietes mit dem Wirtsgestein Ton.

Dabei ist es zu begrüßen, dass zum heutigen Stand der Evaluierung **keine Rangfolge** bei den Teilgebieten angegeben wird (BGE, 2020). Die Analyse zum Teilgebiet Wirtsgestein Ton hat bestätigt, dass eine solche Rangfolge, trotzt der gemeinsam verwendeten Kriterienbündel, zu diesem Zeitpunkt des Projektes noch nicht erfolgen kann. Dabei ist insbesondere die unterschiedliche Datengrundlage eine Herausforderung.

Es ist zu erwarten, dass bei der ortsspezifischen Analyse der übrig gebliebenen Teilgebiete noch **weitere Aspekte** (Eigenschaften) mit einbezogen werden müssen (z.B. sedimentologische Architektur der Wirtsgesteinsformation und des ewG; Reservoir Charakterisierung des Wirtsgesteins und ewG; Analogiestudien zur Architektur des ewG). Solche, weiteren Aspekte können z.T. schon auf vorhandene Indikatoren oder Kriterien bezogen werden, sollten aber zukünftige Bausteine bei der Evaluierung der verbliebenen Gebiete formen.

Allerdings muss dabei in Zukunft mehr und mehr Augenmerk auf **die Integration von Kriterien und Arbeitsprozessen** in den weiteren Bewertungen gelegt werden. Als Beispiel dient dazu etwa die Erstellung von statischen und dynamischen Modellen innerhalb von Teilgebieten, die aufeinander abgestimmt werden müssen.

Fazit: Das in den Berichten der BGE dokumentierte Vorgehen und die damit verbundene verbal-argumentative Bewertung des untersuchten Teilgebietes Tongestein, basierend auf dem gesetzlich vorgegebenen, hierarchischen Kriterienbündel ist grundsätzlich nachvollziehbar und begrüßenswert im derzeitigen Projektstadium (d.h. Phase I, Schritt 1). Dies gilt auch wenn dabei einige Schwachstellen bei der Verwendung von vereinzelten Elementen in der Anwendung der im StandAG aufgestellten Kriterien und der damit verbundenen Argumentationsweisen zu Tage treten (siehe Beispiele in diesem Bericht; hier zitierte Stellungnahmen der BGR und der geologischen Landesämter). Deshalb wird es bei nachfolgenden, regionalen und lokationsspezifischen Analysen in den verbliebenen Teilgebieten notwendig sein:

- eine weiter **verbesserte Datengrundlage** zu schaffen, für deren Harmonisierung zu sorgen und deren digitale Verfügbarkeit sicherzustellen.
- eine Fokussierung auf die **Beschaffung von solchen entscheidungsrelevanten Daten** für die weiteren Teilschritte und deren langfristige Planung zu verfolgen (z.B. Bohrlochmessungen, Bohrkerndaten, seismische Daten).
- Pläne zur **Skalierbarkeit im Datenmanagement** von Untergrunddaten aller Art in der Bundesrepublik Deutschland zu entwerfen und deren digitale Verfügbarkeit, Übermittlung und Qualitätskontrolle zu ermöglichen.
- **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.
- einige **weitere geologische Aspekte** in die zukünftige Bearbeitung mit einzubinden (z.B. Aufschlussanalogiestudien in vergleichbaren, obertägig anstehenden Gesteinsformationen) zum besseren Verständnis des möglichen Fließverhaltens von Radionukliden in Sedimentgesteinen.
- **effektive Evaluierungsprozesse** zu Untergrundstudien und Vorgaben zur Methodik von neuen 3D Modellierungsstudien innerhalb und außerhalb der BGE einzuführen, da zu

erwarten ist, dass die BGE nicht alle Studien selbst durchführen kann mit dem beschränkt zur Verfügung stehenden Personal (70 Geowissenschaftler).

- Ziel sollte es dabei sein, eine **Vergleichbarkeit** von solchen Untergrund-Studien und den daraus resultierenden Modellen zu ermöglichen, inklusive deren Datengrundlage und verbleibenden Unsicherheiten.
- die transparente Einbindung von **Unsicherheiten** bei der Evaluierung von regionalen und ortsspezifischen Untergrundprojekten und -studien deutlich zu machen, die in Abhängigkeit zu den verfügbaren Daten steht.

Entscheidungsqualität – Teilgebiet Wirtsgestein Ton Unter Jura

Abschließend werden hier nochmals kurz die sechs, bei der Evaluierung der Entscheidungsqualität wichtigen Parameter angesprochen, mit Bezug auf das jetzige Stadium des Projektes, sprich Phase I Schritt 1. Sie werden in drei Kategorien bewertet:

- Ausreichend
- Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen
- Ungenügend

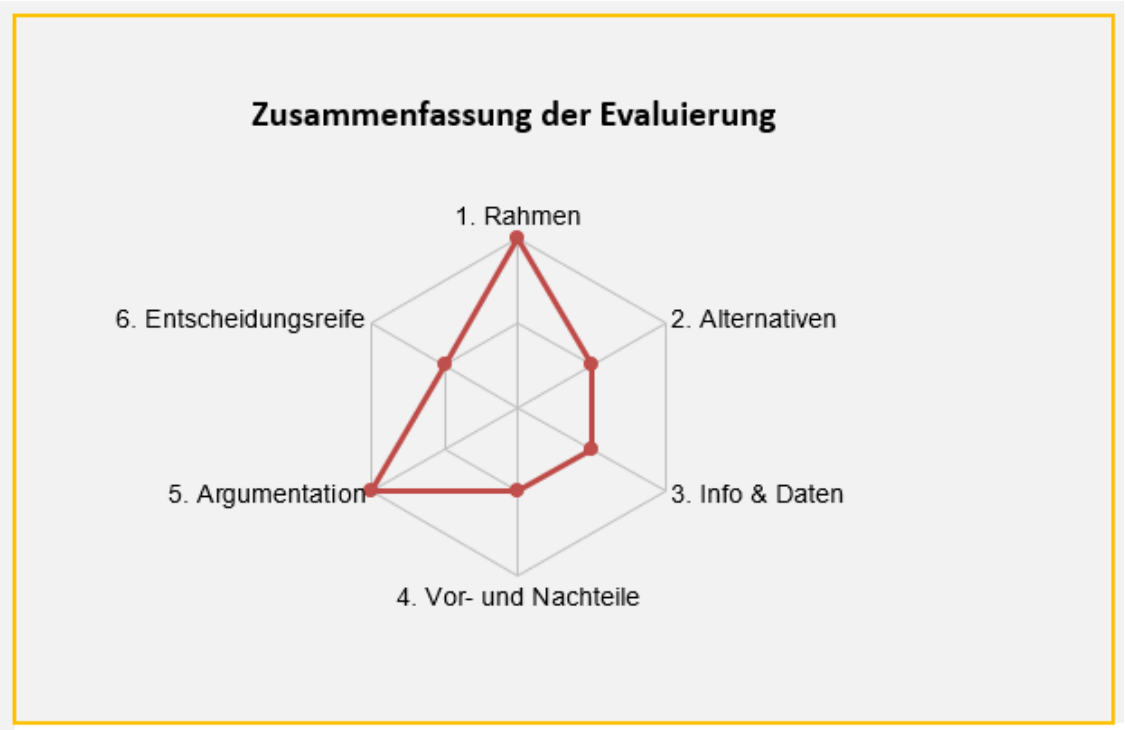

Abbildung 10: Zusammenfassende Darstellung der Entscheidungsqualität zum Teilgebietes 006_00TG_188_00IG_T_f_ju im Unter Jura mit Wirtsgestein Ton im Norddeutschen Becken. Insgesamt wir die Analyse des Teilgebietes durch die BGE als „Akzeptabel mit weiteren Empfehlungen“ eingestuft.

1. **Rahmenbedingungen des Projektes**
   Beurteilung: Ausreichend. Der Projektrahmen ist durch das StandAG klar vorgegeben und gefasst.

***Empfehlung 29**: Im gesetzlichen Projektrahmen werden deutlich Phasen und Schritte des Projektes beschrieben. Jedoch wird in diesem Rahmen nicht deutlich herausgestellt, dass bei einem solchen Großprojekt wie der Standortauswahl im Untergrund am Beginn des Projektes, d.h. in der jetzigen Phase I Schritt 1 „divergierendes Denken" notwendig ist, um alle Optionen für einen Standort noch, soweit möglich offen zu halten. Ziel dahinter ist, zu diesem Zeitpunkt kein Gebiet vorzeitig auszuschließen, dass sich (später) bei einer standortspezifischen Detailuntersuchung als günstig erweisen könnte. Diese Vorgehensweise sollte bei allen wichtigen Entscheidungen der Projektschritte klar kommuniziert werden (Abbildung 3).*

2. Abwägungskriterien und alternative Interpretationen

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Verschiedene Kriterien (AK, MA, geoWK, Indikatoren) wurden festgelegt und erlauben eine systematische Beschreibung und Analyse der Optionen zur Endlagersuche. Dabei wurde eine breite Basis an Möglichkeiten und Alternative innerhalb des gesamten Gebietes der Bundesrepublik Deutschland abgewogen. Dies resultierte in den im Zwischenbericht der BGE vorgestellten Teilgebiete der drei verbleibenden Wirtsgesteine. Es wurde deutlich dargestellt warum das Wirtsgestein Ton eine dieser verbleibenden Optionen ist und deshalb im Weiteren detailliert untersucht werden soll.

Empfehlung 30**: siehe Kapitel **Verbalargumentative Bewertung des Teilgebietes.

3. 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 Ton umfasst. Nichtsdestotrotz ist erkennbar, dass weitere, detaillierte Untersuchungen Zugang zu einer großen Menge an zusätzlichen Daten notwendig macht, was in eine signifikante Herausforderung für die BGE resultieren könnte.

***Empfehlung 31**: siehe Kapitel **Fazit: Datengrundlage**. Als Vorbild könnte dabei etwa das im März 2021 vorgestellte Open Subsurface Data Universe (OSDU) als cloud-basierende open source Lösung dienen. Dieses wurde mit dem Ziel entwickelt alle Untergrunddaten und andere strukturierte und unstrukturierte Daten in einer, gemeinsamen, flexiblen und sicheren IT-Lösungen zu speichern und auszutauschen (PaaS = Platform as a Service). In diesem Projekt haben sich inzwischen 203 Firmen, öffentliche Institutionen und Universitäten zusammengeschlossen, um ähnliche Daten zu speichern, wie sie die BGE braucht, zusammen in einem plattformunabhängigen IT-System. Ein solcher oder ähnlicher Ansatz kann langfristig den Vorteil mit sich bringen, die in allen Bundesländern verschiedenen IT-System anzugleichen und Datensuche, deren Digitalisierung und Austausch langfristig signifikant zu beschleunigen. Darüber hinaus erleichtert es ebenfalls die Standardisierung von Datentypen und deren Harmonisierung, etwa über Ländergrenzen hinweg. Die geologischen Landesämter, Bergbauämter, die BGR und anderen Bundesbehörden könnten auf eine solche Art und Weise große Mengen an georeferenzierten Daten einfacher verwalten. Darüber hinaus könnten Sie auch bei Bedarf solche Daten einer anderen Institution digital zugänglich machen, wie beispielsweise der BGE. Damit könnte langfristig eine nachhaltige Lösung der jetzigen Herausforderung entwickelt werden, die auch zukünftigen Anforderungen Rechnung trägt.*

4. Klares Verständnis der Vor- und Nachteile

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Durch ein klar vorgegebenes Kriterienbündel konnten 46% der Fläche der Bundesrepublik Deutschland als nicht geeignet für

ein atomares Endlager eingestuft werden. Darin eingeschlossen sind Gebiete mit dem Wirtsgestein Ton, die die gestellten Anforderungen nicht erfüllen. Bis dato erlauben die verfügbaren Daten und Studien es noch nicht eine Rangfolge von verbleibenden Gebieten zu erstellen. Dies trifft auch auf das Wirtsgestein Ton zu.

Empfehlung 32*: siehe Kapitel* ***Verwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK) und Indikatoren*** *und* ***Verbalargumentative Bewertung des Teilgebietes.***

5. **Schlüssigkeit der Argumentation**

Beurteilung: Ausreichend für dieses Projektstadium. Durch ein klar vorgegebenes Kriterienbündel und die weite Fassung der verwendeten Kriterien zum Ausschluss eines Gebietes ist versucht worden, zu vermeiden, dass Gebiete vorschnell ausgeschlossen werden, die sich bei einer detaillierteren Untersuchung als günstig erweisen könnten. Dies trifft auch im Falle des untersuchten Gebietes im Wirtsgestein Ton zu, beispielsweise aufgrund der großzügigen Einstufung der Mächtigkeiten in Teilen des verwendeten Datensatzes (z.B. 3D Modelle).

Empfehlung 33*: siehe Kapitel* ***Verwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK) und Indikatoren****.*

6. **Entscheidungsreife (in Bezug auf Projektstatus)**

Beurteilung: Akzeptabel mit verbleibenden Empfehlungen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die verbalargumentative Bewertung des Teilgebietes 006_00TG_188_00IG_T_f_ju nachvollziehbar ist und zum größten Teil klaren Kriterien folgt. Es bleibt deshalb festzuhalten, dass die günstige Bewertung des Teilgebietes zu diesem Zeitpunkt verständlich dargelegt und durch ausreichend Daten und Informationen untermauert ist. Deshalb kann die Entscheidungsreife als akzeptabel eingestuft werden.

Empfehlung 34*: siehe Kapitel* ***Verbalargumentative Bewertung des Teilgebietes****. Es wurde Abstand von einer besseren Bewertung genommen aufgrund der vorhandenen Datenverfügbarkeit, Datenqualität und der Teils fehlenden Harmonisierung der Daten und Studien über Bundesländergrenzen hinweg.*

Verzeichnis der verwendeten Referenzen

Barth, G., Pieńkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M. & Kuhlmann, G. (2018): Palaeogeographical evolution of the Lower Jurassic: high-resolution biostratigraphy and sequence stratigraphy in the Central European Basin. Geological Society, London, Special Publications, Bd. 469, S. 341-369. ISSN 03058719. DOI: 10.1144/SP469.8

BGE (2020a): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

BGE (2020b): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG - Grundlagen. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)

BGE (2020c): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, (Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete), Stand 28.09.2020, Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#7 – Objekt-ID: 828663 – Revision 000.

BGE (2020d): Methodik zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_Methodik_geoWK_Endfassung.pdf

BGE (2020e): Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 – Objekt-ID: 829573 – Revision: 000.

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

BGE (2020g): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum 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..

Doornenbal, H. & Stevenson, A. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: A complete overview of the geological development from Precambrian to Holocene, hydrocarbons exploration and exploitation. Houten: EAGE Publications b. v. ISBN 9789073781610.

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).

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.

Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226.

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.

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

Paul, J., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2008): Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin [Herkunftsgebiete siliziklastischer Gesteine (Perm bis Jura) des Germanischen Beckens]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 641-650. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0641

Petzka, M., Rusbült, J. & Reich, M. (2004): Jura. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 151-162, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105

Positionspapier Geologische Landesämter (2021): Fachliche Position der Staatlichen Geologischen Dienste von Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zur Ausweisung des Teilgebietes (Tertiäres Tongestein“ im Zwischenbericht Teilgebiete der BGE vom 28.9.2020, 13 S.

Scheck, M., Bayer, U. & Lewerenz, B. (2003): Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases - results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. Tectonophysics, Bd. 361, S. 277-299. ISSN 0040-1951. DOI: https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00650-9

Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany : a brief review. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 160, S. 203-210. ISSN 1860-1804

Stackebrandt, W. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg. 4. Aufl., Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg ISBN 9783980815741

Stackebrandt, W. & Franke, D. (2015): Geologie von Brandenburg. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652952

Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Daten und anderen Referenzen

Webviewer mit 3D Modellen der BGE:
3D-Viewer - BGE
GST Web (bge.de)

Webviewer mit 3D Modellen der BGR (z.B. TUNB):
https://gst.bgr.de/?viewHash=tunb_grenzen

Research Gate (Barth et al, 2018)
https://www.researchgate.net/publication/322268601_Palaeogeographical_evolution_of_the_Lower_Jurassic_High-resolution_biostratigraphy_and_sequence_stratigraphy_in_the_Central_European_Basin

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

BGE Studien: AK und MA
Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG (bge.de)

Datenbericht Teil 1 von 4 Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG (bge.de)

20201211 Ergänzende Erläuterungen zur Vorgehensweise zur Anwendung von Anlage 11 StandAG (bge.de)

BGE Studien und Berichte: Teilgebiete und Anwendung der geoWK:
https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Teilgebiete_und_Anwendung_Geowissenschaftliche_Abwaegungskriterien_gemaess__24_StandAG__Untersetzende_Unterlage_zum_Zwischenbericht_Teilgebiete_.pdf

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)

Verwendete Abkürzungen

AK = Ausschlusskriterien

ewG = einschlusswirksamer Gebirgsbereich

geoWK = geologische Abwägungskriterien

GeolDG = Geologiedatengesetz

GOK = Geländeoberkante

MA = Mindestanforderungen

Ma = Millionen Jahre

StandAG = Standortauswahlsgesetz

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