Standortauswahl Radioaktives Endlager

Gutachten:

Referenzdatengebrauch und Workflow zum Umgang mit der heterogenen Datenlage im Wirtsgestein „Tongestein“ als Teil der rvSU

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium
Geschäftsstelle
Buchholzweg 8
13627 Berlin

Vergabestelle: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Autor: Dr. Jürgen Grötsch

Auftragsdatum: 10.08.2022

Fertiggestellt am: 02.12.2022

Inhaltsverzeichnis

Referenzdatengebrauch und Workflow zum Umgang mit der heterogenen Datenlage im Wirtsgestein „Tongestein“ als Teil der rvSU 1

Verwendete Abkürzungen 4

Zusammenfassung 5

Summary 7

Aufgabenstellung 8

Dateneinsicht 8

Wirtsgestein Tongestein – Kurze Einführung 9

Gutachten: Referenzdatengebrauch und Workflow zur heterogenen Datenlage in der Methodik der rvSU beim Wirtsgestein Tongestein 13

Projektstatus und Schwerpunkte 13

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) 14

Datenlage und Dokumentation 16

3D Geologische Modelle (Beispiel: TG 001 Opalinuston) 16

Strukturgeologische Erwägungen 17

Risikoregister, Status und Anwendung 18

Einteilung der Teilgebiete in TURs (Beispiel: Untere Meeresmolasse) 20

Fragestellung 1: Verwendung von Referenzdaten 22

Referenzdatensätze 22

Parametrisierung, Referenzdaten und Workflow 23

Bandbreite wichtiger Gesteinseigenschaften im Wirtsgestein Tonstein 23

Verwendung Statischer und Dynamischer Geologische Modelle 25

Verwendung von abgeschlossenen Untergrundprojekten 26

Fazit – Verwendung von Referenzdaten 26

Fragestellung 2: Workflow heterogene Datenlage im Wirtsgestein Tongestein 28

Klassifizierung der Datentypen (direkt, indirekt, interpretativ) 29

Definition und Verwendung von Kenngrößen 29

Verwendung von Ungewissheiten in einzelnen Arbeitsschritten des Workflows 32

Anwendbarkeit einzelner Arbeitsschritte zur heterogenen Datenlage innerhalb der verschiedenen Wirtsgesteine 33

Umgang mit Gebieten ohne hinreichende Informationen („White Space“) 37

Zurückstellung von Teiluntersuchungsräumen (TUR) 40

Fazit – Status zum Umgang mit heterogener Datenlage 41

Gesamtbeurteilung: Referenzdatengebrauch, Heterogene Datenlage und Workflows 42

Datenlage 42
Referenzdatengebrauch und Ungewissheiten 43
Heterogene Datenlage 44
Gesamt-Workflow und Arbeitsschritte 44
Nächste Schritte 45
Fazit - Gesamtbeurteilung 45
Anhang 46
Literaturverzeichnis und verwendete Referenzen 46
Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Referenzen 48
Gutachter-Empfehlungen und deren Status 50

Verwendete Abkürzungen

AK = Ausschlusskriterien

BGE = Bundesgesellschaft für Endlagerung

BGR = Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

EndlSiUntV = Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

ELO = Elektronischer Leitz Ordner

ewG = einschlusswirksamer Gebirgsbereich

FEP = Features, Effects and Processes (Komponenten, Ereignisse und Prozesse)

geoWK = geologische Abwägungskriterien

GeolDG = Geologiedatengesetz von Juni 2020

GFE = Green Field Exploration

GOK = Geländeoberkante

GzM = Gebiets zur Methodenentwicklung

IAEA = International Atomic Energy Agency

KW = Kohlenwasserstoffe

MA = Mindestanforderungen

Ma = Millionen Jahre

NAGRA – Nationale Genossenschaft für die Lagerung von Radioaktiven Abfällen (in der Schweiz)

NFE = Near Field Exploration

PBE = Play Based Exploration (Arbeitsablauf bei großräumigen Untergrunduntersuchungen)

PoS = Probability of Success

rvSU = repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung

SGD = Staatliche Geologische Dienste der Bundesländer

StandAG = Standortauswahlgesetz

TG = Teilgebiet

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

TUR = Teiluntersuchungsraum, TURs = Teiluntersuchungsräume

URS = Forschungsprojekt: „Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle“

UR = Untersuchungsraum (eines Teilgebietes)

Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Gutachten hat zum Ziel den derzeitigen Stand der rvSU-Methodenentwicklung (Phase I Schritt 2) mit Hinblick auf die ***Verwendung von Referenzdaten*** und den ***Umgang mit der heterogenen Datenlage insbesondere in Teiluntersuchungsräumen (TUR) ohne hinreichende Informationen*** im Wirtsgestein Ton zu beurteilen. Aufgabe der BGE und der rvSU-Methodik ist es, von insgesamt 90 verbliebenen Teilgebieten Standortregionen auszuwählen, die in der nächsten Projektphase mit obertägigen Erkundungsprogrammen weiter evaluiert werden sollen.

Referenzdaten sind ein notwendiger Bestandteil in verschiedenen Arbeitsschritten des Gesamt-Workflows der rvSU-Methodik, da nicht ausreichend Untergrunddaten vorliegen. Wie hoch der Anteil von Referenzdaten oder der fehlenden Daten sein wird, ist beim gegenwärtigen Arbeitsstand noch nicht abzuschätzen.

Die Einführung des Konzeptes der ***Kenngrößen*** durch die BGE (2022b) wird hier ausdrücklich unterstützt. Die Verwendung solcher Kenngrößen (z.B. DQN, DQL, IDN, KX) macht ebenfalls den Gebrauch von Referenzdaten notwendig. Es ist jedoch stets noch nicht bekannt wie solche Kenngrößen in den verschiedenen Arbeitsschritten eingesetzt werden sollen. Es ist davon auszugehen, dass Kenngrößen hilfreich sein werden bei der Quantifizierung von Ungewissheiten. Sie werden auch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zwischen den TURs in den einzelnen Arbeitsschritten erleichtern.

Es wurde inzwischen viel Vorarbeit geleistet und neue Ansätze zum ***Gesamt-Workflow und den einzelnen Arbeitsschritten*** gezeigt, die teils schon gut umgesetzt sind (z.B. Parametrisierungs-Projekt). Dabei wurden nicht nur intern Projekte initiiert, sondern auch externe Studien auf den Weg gebracht (z.B. Geoblocks). Ein gesamtheitlicher Workflow zur ***Behandlung von Ungewissheiten*** ist gegenwärtig jedoch noch nicht vorhanden und wird erst im kommenden Jahr erwartet. Insgesamt ist festzuhalten, dass eine frühere Verwendung und Dokumentation von Ungewissheiten im Arbeitsablauf empfohlen wird (Grötsch, 2022). Es ist dabei wichtig schon vorab zu wissen, welche TURs hohe Ungewissheiten haben, etwa mit Hilfe von semi-quantitativen Methoden und unter Verwendung von Kenngrößen.

Darüber hinaus ist es abzusehen, dass große Bereiche in den verbleibenden Teilgebieten zügig ausgeschlossen, also in Kategorie C oder D eingeordnet werden können. Es wird empfohlen, dies mit hoher Priorität umzusetzen, da die ***begrenzten Ressourcen der BGE*** sich auf die danach noch zurückbleibenden TURs fokussieren sollten.

Obwohl genauere Dokumentationen der BGE noch nicht vorliegen, ist davon auszugehen, dass vereinzelt ***Rücksprünge*** notwendig sind und es auch in Phase II Schritt 1 noch zu einer Neubewertung von einigen TURs kommen kann. Dies ist ein Resultat der heterogenen Datenlage und nachvollziehbar.

Eine positive Entwicklung ist bei der BGE-internen ***Qualitätssicherung*** von geologischen Modellen zu beobachten – ein wichtiger Schritt, der schon klar ersichtlich zur Hebung von Model-Standards geführt hat.

Trotz signifikanter Fortschritte im ***Geodatenmanagement*** ist die Verfügbarkeit von digitalen Daten noch stark verbesserungswürdig, wobei die Ursachen auf fehlende Geo-Datenstandards in Deutschland, mangelhafte Digitalisierung der Daten und einer unzureichenden Zusammenarbeit zwischen Bundes- und Länderbehörden zurückzuführen sind. D.h., diese Problematik kann allein von Seiten der BGE nicht gelöst werden.

Abschließend betrachtet ist festzustellen, dass gute Ansätze und Fortschritte in den Arbeiten der BGE zu beobachten sind. Derzeit muss aber immer noch über einen ***Arbeitsstand*** gesprochen werden, da seit März 2022 keine weiteren Dokumentationen veröffentlicht oder Resultate abschließend vorgestellt wurden. Dies bedeutet auch, dass die meisten Fragestellungen des NBG zu diesem Gutachten (siehe Kapitel Aufgabenstellung) derzeit noch nicht beantwortet werden können.

Summary

The presented report has the objective to review the current status of the rvSU-method (Phase I Step 2) with special emphasis on the ***usage of reference data and the treatment of investigation areas (TUR) without adequate data coverage*** in the host rock claystone. Aim of the rvSU is it to select possible regions for the location of the nuclear waste site from the remaining 90 areas to be further investigated during the next project phase with data acquisition programs from the surface to be executed in these remaining regions.

Reference or analog data are considered a required component in various workflow steps of the overall evaluation workflow of the rvSU-method as there is not enough or adequate data available in all investigation areas (TUR). How much reference data will be used is at this point in time still unclear as currently only work-in-progress is available from BGE.

The introduction of the concept of ***parameters*** by BGE (2022b) is expressly supported here. The use of such parameters (e.g. DQN, DQL, IDN, KX) requires in part also the use of reference data. However, it is still not known how such parameters will be used in the various workflow steps. It can be assumed that parameters will be helpful in quantifying uncertainties. They will also enable the comparability of results between the TURs in the individual workflow steps.

In the meantime, much preparatory work has been done and new approaches developed to firm up the ***overall workflow and the individual work steps***, whereby some of which has already been well implemented (e.g. parameterization project). In the meantime, not only internal projects have been initiated, but also external studies were kicked off (e.g. Geoblocks). However, a holistic workflow for ***dealing with uncertainties*** is not yet in place and is not expected until next year. Overall, it should be noted that earlier use and documentation of uncertainties in the workflow is recommended (Grötsch, 2022). It is important to know in advance which TURs have high uncertainties, for example with the help of semi-quantitative methods and using parameters.

In addition, it is foreseeable that large parts in the remaining areas can be quickly excluded, i.e. classified as category C or D. This should be implemented with high priority, as the ***limited resources of the BGE*** should focus on the remaining, more suitable TURs.

Although more detailed documentation from BGE is not yet available, it can be assumed that ***rebounds*** or agile approaches in the workflow are necessary and that a reassessment of a few questionable TURs may still occur in Phase II Step 1 of the project. This is a result of the heterogenous data availability and therefore considered reasonable.

A positive development can be observed in ***BGE's internal quality assurance*** for geological models – an important step that has already clearly led to much improved model standards.

Despite significant progress in ***geodata management***, the availability of digital data is still in need of further improvement, with the reasons being due to a lack of geodata standards in Germany, inadequate digitalization of geodata and insufficient cooperation between federal and state authorities. This challenge cannot be resolved by BGE only.

In conclusion, it should be noted that there are many new approaches and lots of progress visible in the work of BGE. At present, however, there is still a need to talk about a ***state of work***, as no further documentation has been published or final results have been presented since March 2022. This also means that most of NBG's questions about this report (see chapter Aufgabenstellung) cannot yet be answered at this point in time and need to await further results from BGE.

Aufgabenstellung

Der hier erstellte Bericht hat zum Ziel, eine Zusammenfassung der Sichtung der BGE-Unterlagen zur Methodenentwicklung der rvSU (Stand Oktober 2022) zu begutachten. Dabei sind insbesondere folgenden Fragestellungen berücksichtigt:

1) Wie ist die Verwendung der **Referenzdaten** zu bewerten?
    a. Können Daten aus anderen Teilen Europas für die Deutschen Teilgebiete verwendet werden (z.B. Opalinuston)?
    b. Welche Einschränkungen gibt es bezüglich der Verwendung von Referenzdaten?
    c. Wie ist die große Bandbreite an unterschiedlichen Tongesteinsgebieten bei der Durchführung der rvSU berücksichtigt?
    d. Wird die Parameterisierung von Gesteins- und Modelleinheiten mit Referenzdaten ausreichend differenziert durchgeführt?
    e. Werden vorhandene Untergrundprojekte aus dem tiefen Untergrund als Quelle für Referenzdaten berücksichtigt?
2) Kann der **Workflow** zum Umgang mit **heterogener Datenlage** in den Teilgebieten und zur Identifikation der Gebiete ohne hinreichende Informationen aus den Wirtsgesteinen Steinsalz flach und Kristallin auf das Wirtsgestein Ton übertragen werden?
    a. Ist die Klassifizierung der Datentypen (direkt, indirekt, interpretativ) plausibel?
    b. Sind zur Bestimmung der Kenngrößen (DQN) außer Bohrloch und Seismikdaten auch noch weitere Datentypen zu berücksichtigen?
    c. Ist die Bestimmung der Kenngrösse Datenqualität (DQL) ohne analoge Daten durchführbar?
    d. Korreliert die Datenqualität mit der stratigraphischen Auflösung in den Schichtenbeschreibungen?
    e. Sind Gebiete ohne hinreichende Informationen zu erwarten? Wenn ja, wie viele?
    f. Wie können, aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit zunächst zurückgestellte Gebiete zusammen mit den anderen Teilgebieten bewertet werden, ohne zusätzliche neue Daten?
    g. Wie werden die 3D Modelle aus dem Untergrund dabei verwendet?
    h. Wie sollen mögliche Rückschritte gehandhabt werden?

Dateneinsicht

Die Grundlagen dieser Untersuchung sind:

1) Vorgespräch mit BGE-Mitarbeitern am 5.10.2022 zur Vorbereitung des Besuches basierten auf einem durch den Gutachter per e-mail vorab bereitgestellten Fragenkatalog (Videokonferenz).
2) Besuch zur Akteneinsicht bei der BGE in Peine vom 10-11.10.2022 und Gespräche mit Mitarbeitern. Die BGE gewährte dabei Akteneinsichten und beantwortete die weitergehenden Fragen des Gutachters zum Status des Arbeitsfortschrittes. Dabei wurden auch von Seiten der BGE Arbeitsfortschritte aus verschiedenen Bereichen präsentiert.

Die gute Vorbereitung und Ausführung des vor-Ort Treffens in Peine durch das BGE-Team hat eine zügige Beantwortung aller gestellten Fragen zum gegenwärtigen Stand des Verfahrens erlaubt. Dabei

wurden keine weiteren neuen Dokumentationen vorgestellt, sondern nur der derzeitige Arbeitsstand besprochen. Die BGE hat ausdrücklich darauf hingewiesen, dass noch kein finaler Arbeitsstand zum Workflow und der Methodenentwicklung zu den Teilgebieten mit dem Wirtsgestein Ton vorliegt. Es wurde jedoch deutlich, dass in den einzelnen, notwendigen Arbeitsschritten bedeutende Fortschritte erzielt wurden.

Wirtsgestein Tongestein – Kurze Einführung

Das Wirtsgestein Tongestein ist eines von vier möglichen Wirtsgesteinen im Endlagerprojekt. Es umfasst mehrere geologische Formationen aus dem Jura, der Kreide und dem Tertiär, die als Endlager in Betracht gezogen werden (Abbildung 1). Diese sind, geordnet von geologisch jung nach alt, wie folgt:

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

Die Teilgebiete des Wirtsgestein Tongestein befinden sich vornehmlich im Norddeutschen Becken (Hoth et al, 2007) und dem den Alpen vorgelagerten Molassebecken (Abbildung 2).

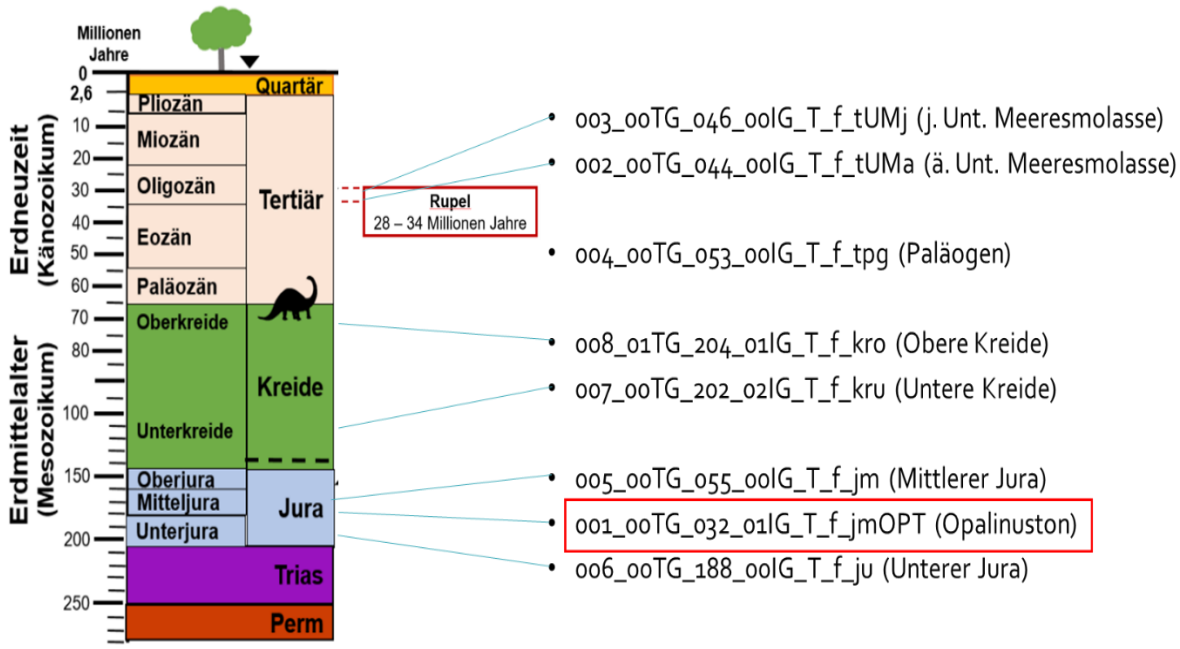

Abbildung 1: Stratigraphie (= geologisches Alter) der Formationen der 8 Teilgebiete mit dem Wirtsgestein Tongestein. Zu beachten ist, dass die Nummerierung der Teilgebiete unabhängig ist vom geologischen Alter der in Frage kommenden geologischen Formationen (verändert nach BGE, 2020).

Das Gebiet zur Methodenuntersuchung (GzM) im Opalinuston stammt aus dem Zeitbereich des 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.

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).

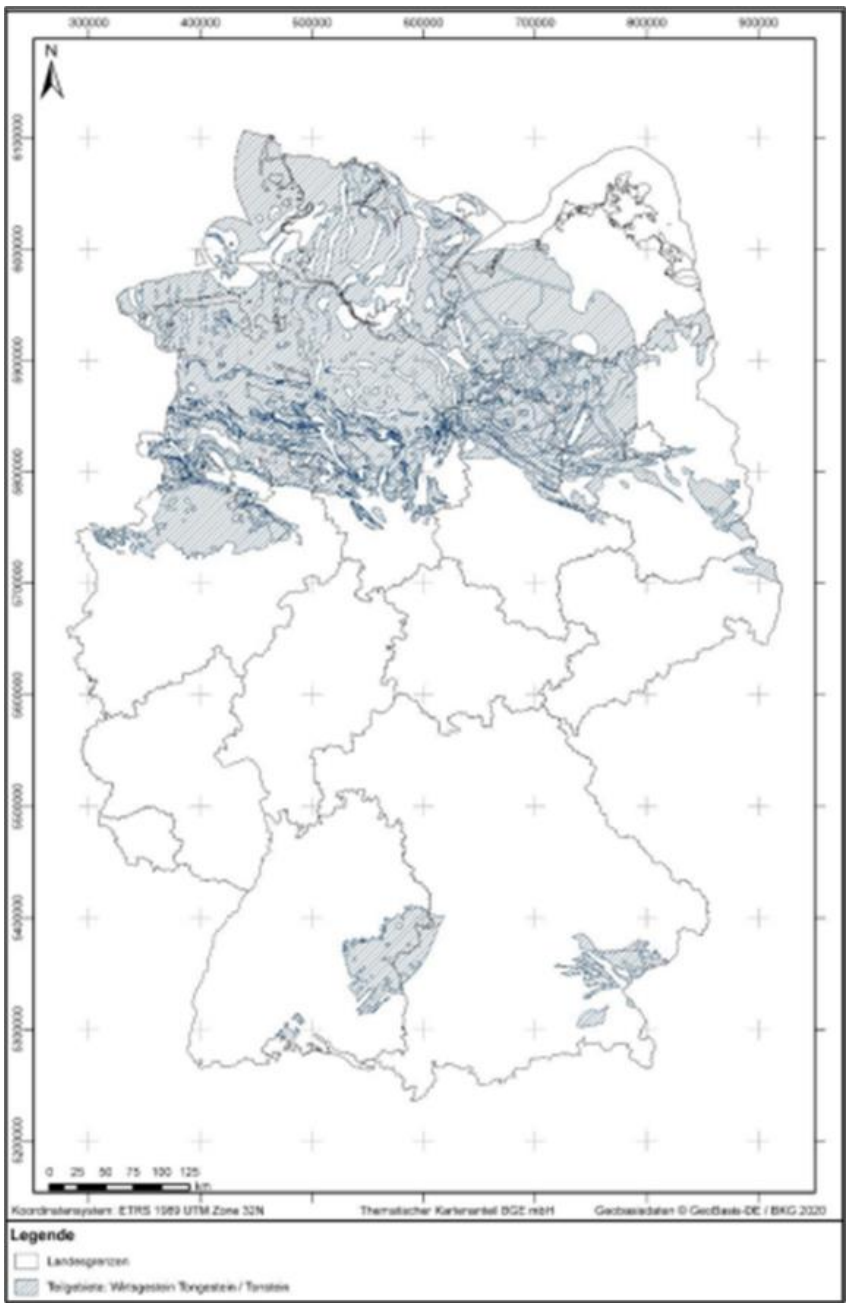

Abbildung 2: In schraffierter Signatur sind die 8 verschiedenen Teilgebiete mit Wirtsgestein Tongestein erkennbar. Zu beachten ist dabei, dass sich im Norddeutschen Becken Teilgebiete unterschiedlichen geologischen Alters befinden, die sich vertikal überlagern und dadurch in der Kartendarstellung überlappen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

Das verwendete Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (GzM) beinhaltet das Wirtsgestein Tongestein. Die zu untersuchenden Schichten (= stratigraphische Einheiten) stammen dabei aus dem Mittleren Jura, auch bekannt unter der Bezeichnung „Dogger“. Sie umfassen einen geologischen Zeitraum von 174 Ma (Millionen Jahren) bis 164 Ma vor heute (Abbildung 1; Abbildung 4). Der Opalinuston setzt sich seinerseits aus mehreren Subformationen zusammen, sprich der sandigen Zillhausen-Subformation und der tonigen Teufelsloch-Subformation (Abbildung 5). Letztere ist ein mögliches ewG für das radioaktive Endlager. Im Opalinuston befindet ich auch der nördlich von Lägern vorgeschlagene Ort für ein Endlager in der Schweiz, wie im September 2022 von der NAGRA vorgestellt.

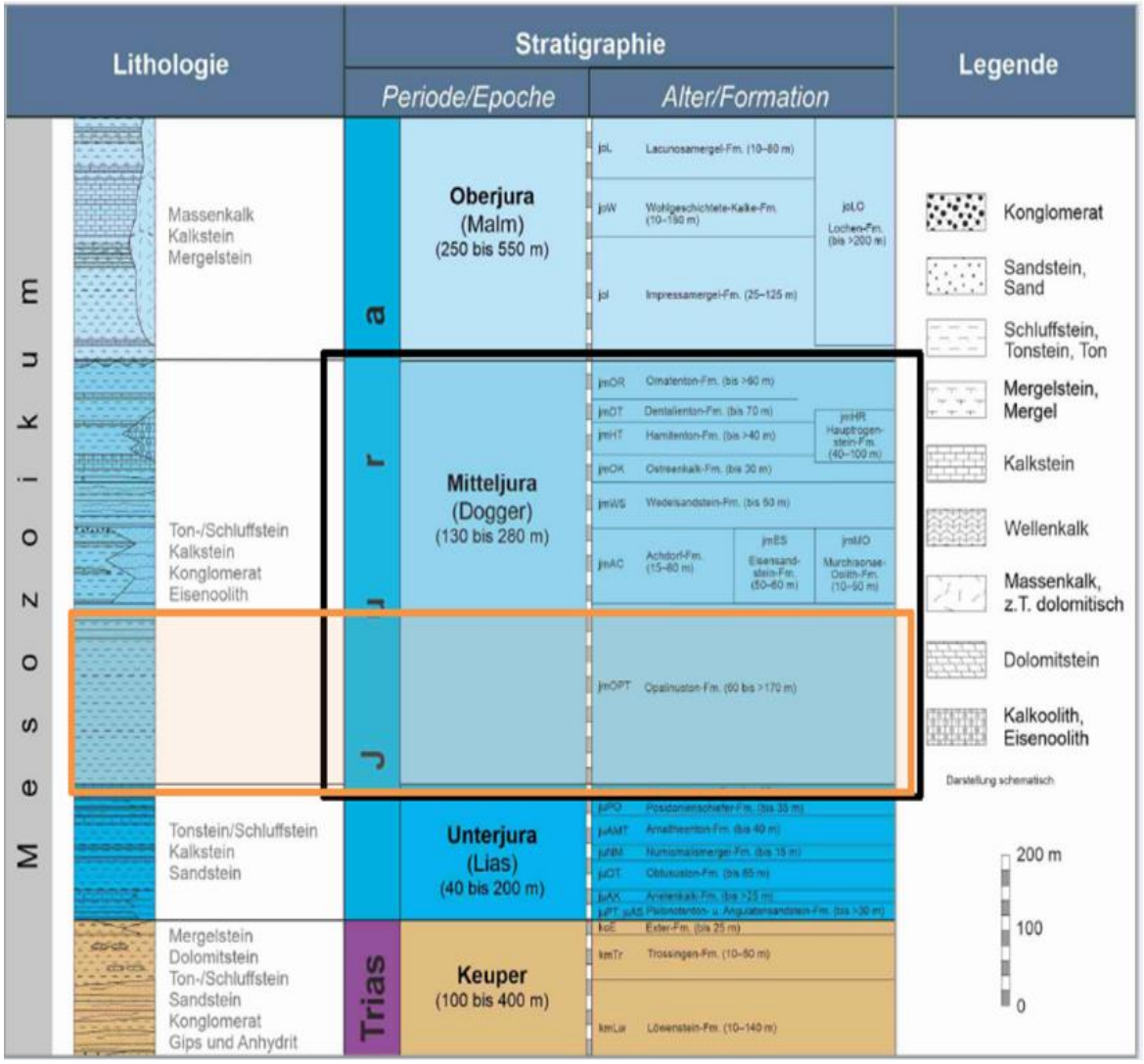

Abbildung 3: Geologische Zeiteinteilung für den untersuchten Zeitbereich aus dem Mittleren Jura in Baden-Württemberg (BGE, 2022b: Abb 73). Die Opalinuston-Formation (oranger Rahmen) wird nochmals unterteilt in die tonige Teufelsloch-Subformation und die sandige Zillhausen-Subformation. Beide bilden im Teilgebiet 001 das zu untersuchende Wirtsgestein. Sedimentologische Details dieser „Faziesverzahnung“ werden derzeit im SEPIA-Projekt der BGR erarbeitet.

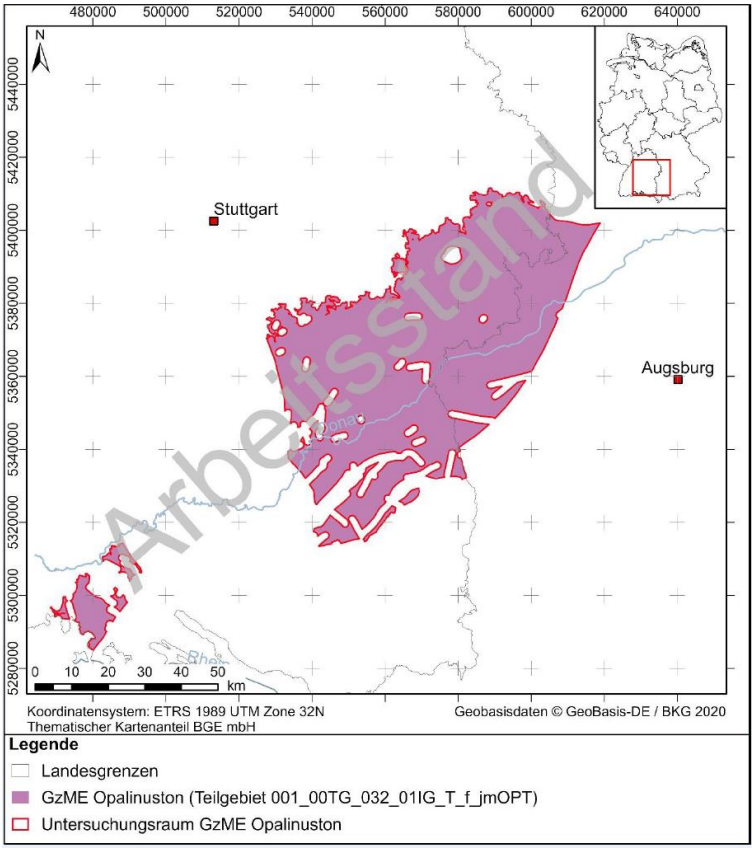

Abbildung 4: Ausdehnung des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Das ewG befindet sich im sogenannten Opalinuston auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern (BGE, 2022b: Abb. 9). Die weißen Lineamente zeigen in Phase I Schritt 1 ausgeschlossene Bereiche, die häufig im Zusammenhang mit Störungszonen stehen.

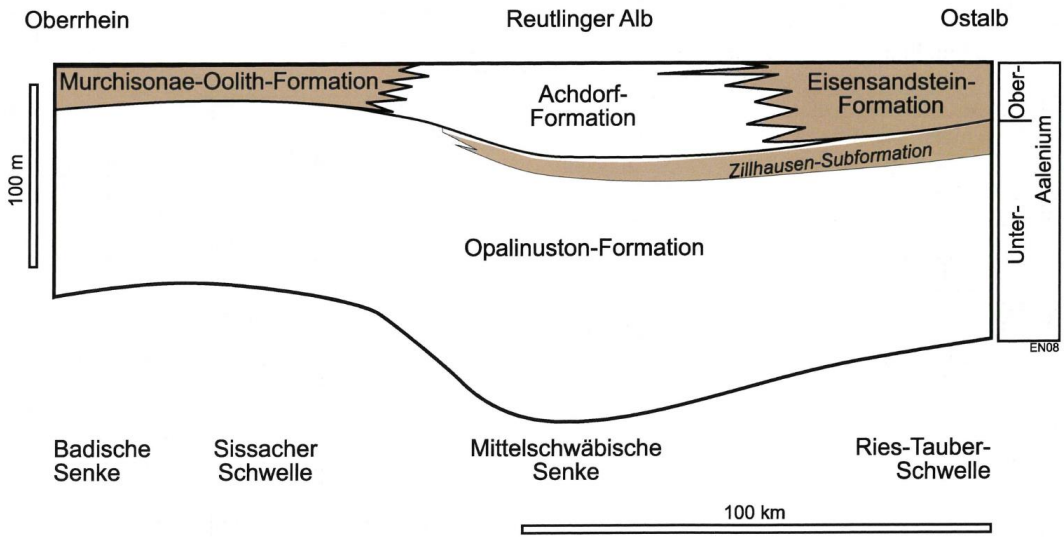

Abbildung 5: Vereinfachter schematischer Querschnitt durch Südwestdeutschland und das Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Zu sehen sind die lithostratigraphischen Einheiten und die Faziesverteilung im Mittleren Jura oder auch Aalenium (aus Franz & Nitsch, 2009). Dabei sind auch im Opalinuston (braune) Sandschüttungen aus Küstenregionen angedeutet, die als Zillhausen-Subformation bezeichnet werden.

Projektstatus und Schwerpunkte

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 Sicherheitsuntersuchungen) auszuarbeiten (Abbildung 6). Diese standardisierte Methode soll dann in der weiteren Bewertung aller verbliebenen 90 Teilgebiete (TG) und deren Teiluntersuchungsräume (TUR) Verwendung finden. Dazu wurde jeweils ein, von der BGE ausgewähltes Teilgebiet, aus allen untersuchten Wirtsgesteinen (Ton, Salz flach und steil lagernd, Kristallin) als Gebiet zur Methodenentwicklung (GzME) ausgewählt. 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, inwieweit die, für flaches Salz und Kristallin vorgestellten Workflows in der rvSU (BGE, 2022a, 2022b) geeignet sind, um auf das Wirtsgestein Tongestein übertragen zu werden. Außerdem soll die Evaluierung von Teilgebieten mit heterogener Datenlage und die Verwendung von Referenzdaten beurteilt werden.

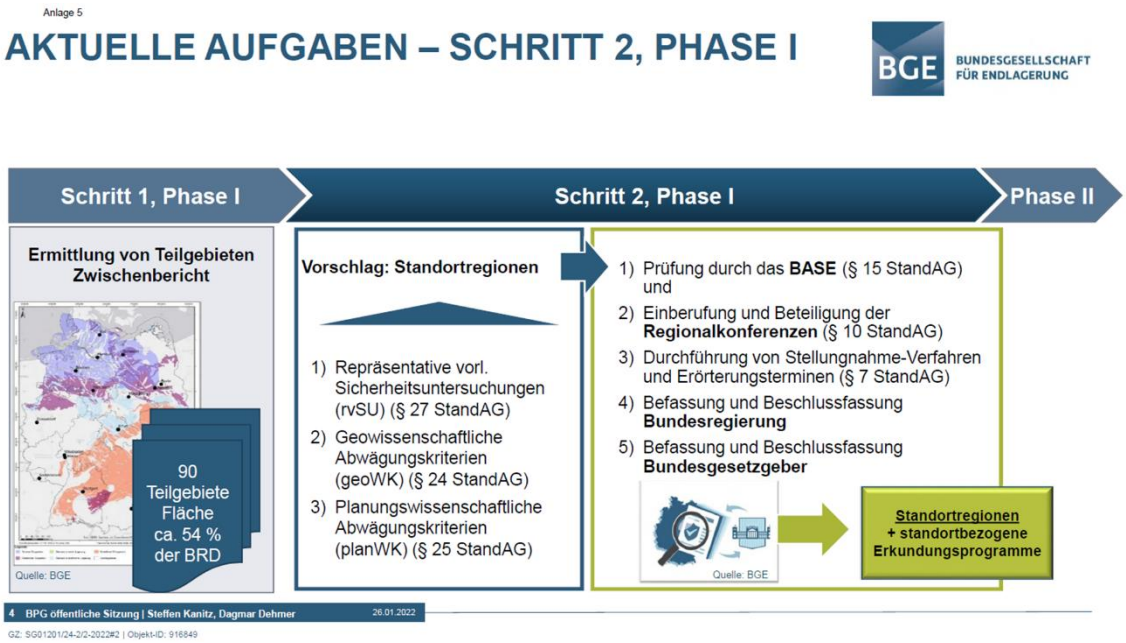

Abbildung 6: Augenblicklicher Status im Standortauswahlverfahren und aktuelle Aufgaben. Das Projekt befindet sich in Phase I Schritt 2, bei dem es um die Ermittlung von geeigneten Standortregionen zur übertägigen Erkundung nach StandAG geht. Gegenwärtig werden aber zuerst, anhand von vier Teilgebieten, die Methoden durch die BGE entwickelt, die später zur rvSU für alle verbleibenden 90 TG verwendet werden sollen. Die gegenwärtigen Arbeitsstände zur Methodenentwicklung wurden durch die BGE im März 2022 der Öffentlichkeit präsentiert (BGE, 2022a, 2022b). Darüber hinaus gibt es derzeit keine weiteren Dokumentationen.

Die im März 2022 veröffentlichten Dokumentationen der BGE zur Methodenentwicklung (BGE, 2022a, 2022b) sind stets noch der derzeitige, dokumentierte Arbeitsstand. D.h., es sind keine weiteren Publikationen oder Dokumentationen durch die BGE vorgestellt worden oder dem Gutachter zur Verfügung gestellt worden. Dennoch haben die Dateneinsicht und die Gespräche bei der BGE gezeigt, dass signifikante, weitere Fortschritte bei der Erarbeitung des Workflows der rvSU erzielt wurden.

In diesem Gutachten wird weniger auf die noch offene Frage zur Behandlung von Ungewissheiten im Workflow der rvSU eingegangen, da auf dieses Thema schon ausführlich im vorhergehenden Gutachten eingegangen wurde (siehe Grötsch, 2022).

Fazit - Projektstatus: Die BGE hat bereits in den Vorabgesprächen am 5.10.2022 angedeutet, dass sie wenig neue, publizierte Ergebnisse vorzuweisen hat und deshalb nur der gegenwärtige Arbeitsstand angesprochen werden kann. Es sind dazu auch keine weiteren Dokumentationen der BGE erhältlich, die über BGE (2022a, b) hinausgehen. Deshalb ist hier schon vorab festzuhalten, dass die Mehrheit der durch das NBG gestellten Fragen zu diesem Gutachten (noch) nicht beantwortet werden können. Nichtsdestotrotz sind aber schon deutliche Fortschritte in der Entwicklung der Arbeitsabläufe erkennbar, die in diesem Gutachten angesprochen werden sollen.

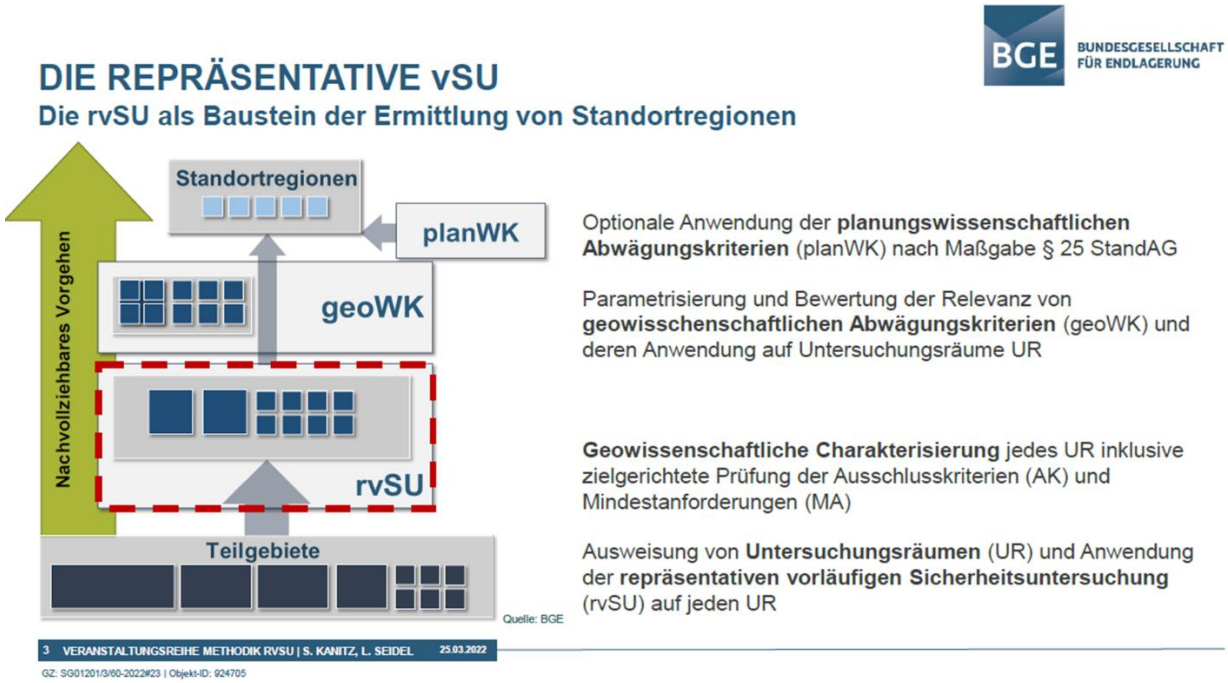

Abbildung 7: In Phase I Schritt 2 des Endlagerprojektes werden alle TG und TUR mit Hilfe der rvSU und der Anwendung der AK, MA und geoWK eingestuft (BGE, 2022), auch bezeichnet als „Geosynthese".

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU)

Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) sind nach StandAG in drei Phasen unterteilt, eine repräsentative, eine weiterentwickelte und eine umfassende Phase. Gegenwärtig befindet sich das Projekt in Phase I Schritt 2 mit dem Ziel Vorschläge zu den verbleibenden Standortregionen vorzulegen (Abbildung 6). Zum Zeitpunkt des Gutachtens ist das Endlagerprojekt in der Phase der repräsentativen vSU (Abbildung 7, Abbildung 8).

Die vorläufigen repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 Absatz 1 und 2 StandAG) haben zum Ziel, aus den 90 verbleibenden Teilgebieten diejenigen Standortregionen auszuwählen, die zur weiteren Erkundung verwendet werden sollen.

(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. […]

Die Auswahl der verbleibenden Standortregionen für Phase II wird festgelegt nach Prüfung durch die BASE, der Vorstellung bei den Regionalkonferenzen, eines Stellungnahme-Verfahrens, Beschluss der Bundesregierung und des Bundesgesetzgebers (Abbildung 6).

Im März 2022 hat die BGE (2022a,b) ihre Ergebnisse zur rvSU veröffentlicht. Allerdings wurde dabei ersichtlich, dass es sich hier um einen Arbeitsstand handelt, der noch weiterer Entwicklung bedarf, um einen Arbeitsablauf zu entwickeln, der für alle Wirtsgesteine und TG/UR/TUR anwendbar ist.

In der rvSU soll eine Vorgehensweise gewählt werden, die eine differenzierte Bewertung des jeweiligen Teilgebietes erlaubt. Dabei ist an eine fortlaufende Weiterentwicklung der Methode, möglichweise auch mit Rücksprüngen, gedacht. Weiter ins Detail gehende Erläuterungen können auch aus Grötsch (2022) entnommen werden. Es ist aber deutlich, dass noch wesentliche Details in den Workflows zu den unterschiedlichen Wirtsgesteinen sich noch in Ausarbeitung befinden. Dies ist verständlich, da das Endlager-Projekt in Deutschland nicht auf bereits vorhandene Arbeitsabläufe zurückgreifen kann, sondern sich diese aus verschiedenen Untergrund-Projekten und eigenen Entwicklungen (z.B. Radionuklidtransportmodellierungen) erst erarbeiten muss (Abbildung 8).

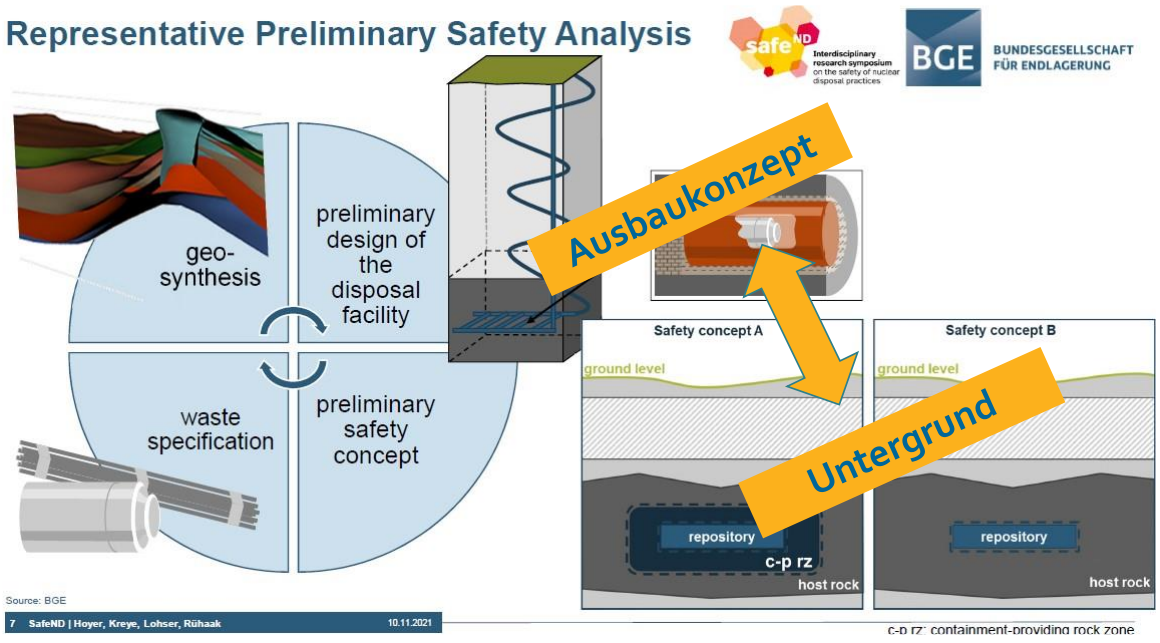

Abbildung 8: Schematische Darstellung einer rvSU nach Hoyer et al (2021). Dabei sollen Kenntnisse zum ewG im Untergrund mit Konzepten des Ausbaus eines Endlagers zusammengeführt werden („safety concept“). Diese sollen dann, zusammen mit den verbleibenden Ungewissheiten zur Evaluierung der 90 TG verwendet werden, was als repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) bezeichnet wird (nach Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).

Datenlage und Dokumentation

Inzwischen stehen der BGE mehr digitale Daten, wie etwa Bohrlochmessungen und reflexionsseismische Daten zur Verfügung, die auch erstmals in den eigenen 3D Modellen der BGE gezeigt werden konnten. Dies ist ein wichtiger Schritt, der der BGE helfen wird in Zukunft konkrete Aussagen zu einzelnen Teilgebieten machen zu können. Allerdings sind stets noch weitreichende Unterschiede betreffend der Datenverfügbarkeit in den verschiedenen Teilgebieten festzustellen. Dabei gibt es große Unterschiede in Punkto Beschaffung der Daten in Abhängigkeit vom jeweiligen Bundesland (siehe Kapitel Gesamtbeurteilung: Datenlage). Bei den Teilgebieten Tongestein ist von Seiten der BGE aus geplant in allen Gebieten eine Grundabdeckung an digitalen Bohrlochdaten zu akquirieren.

Die meisten Bundesländer gebrauchen ***GeODin***, eine Bohrungsverwaltungssoftware von FUGRO. Dies ist hilfreich um feststellen, welche Bohrungen in den jeweiligen Bundesländern vorhanden sind, bedeutet jedoch nicht, dass die Bohrdaten analog oder digital verfügbar sind. Die derzeit beste Untergrund-Datenbasis in Deutschland bietet der ***Kohlenwasserstoff-Verbund des LBEG***, wobei alle Untergrunddaten in einer gemeinsamen Datenbank verwaltet werden, soweit vorhanden. Leider sind nicht alle Bundesländer in diesem Verbund vertreten, z.B. Baden-Württemberg und somit ist auch diese Daten-Sammlung nicht umfassend genug für die Zwecke der BGE oder auch einer nationalen Geothermie-Initiative, wie vom BMWK geplant. Positiv ist jedoch zu bewerten, dass die Daten im Kohlenwasserstoff-Verbund jetzt einer großen Digitalisierungskampagne unterzogen werden. Dabei führt die BGE die Arbeiten durch und gibt sie in digitaler Form an die SGD zurück. Wünschenswert wäre allerdings ein digitaler Datentransfer in umgekehrter Richtung. Dies ist ein Indikator für den Stand der Datendigitalisierung innerhalb der SGD und der BGR, worin sich Jahrzehnte des fehlenden gegenseitigen digitalen Datenaustausches widerspiegeln. Ebenfalls wenig hilfreich ist die weitere Erkenntnis, dass viele Untergrunddaten nie bei den SGD angeliefert wurden und so die einzige Quelle die Firmen selbst sind, die teils jedoch nicht mehr existieren (z.B. DEA).

Dies spricht für die ***Notwendigkeit eines fundamentalen Wandels*** in Ansatz und Umgang mit Untergrunddaten in Deutschland basierend auf dem neuen GeolDG von 2020, wie schon in früheren Empfehlungen verdeutlicht wurde (siehe Gutachter-Empfehlungen und deren Status).

Auch die Tatsache, dass es ***bis dato keine Regeln und Standards*** gibt, in welcher Form etwa Bohrdaten bei den SGD angeliefert werden müssen erschwert den Fortschritt der BGE digitale LAS-Daten für Bohrlochmessungen in einer verwertbaren Form zu bekommen, etwa zur Verwendung in 1D Referenzprofilen, 2D Querschnitten oder 3D Modellen.

Fazit – Datengrundlage: Die BGE hat wieder Fortschritte bei der Datenbeschaffung via Dienstleister und Staatliche Geologische Dienste erzielt. Bundesländer wie Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Bayern, mit Aktivitäten im Kohlenwasserstoffsektor, lassen insgesamt gesehen eine bessere Datenverfügbarkeit erkennen. Länder, die bei der Digitalisierung noch Nachholbedarf haben sind etwa Sachsen-Anhalt. Die digitale Datenverfügbarkeit wird jedoch stets noch als einer der größten ***Risikofaktoren*** im Fortschritt des Endlagerprojekt betrachtet.

3D Geologische Modelle (Beispiel: TG 001 Opalinuston)

Es ließen sich deutliche Fortschritte im Vergleich zu früheren Besuchen erkennen. Dies ist zum einen aufgrund der neu verwendeten 3D Modellierungssoftware (Petrel) und zum anderen durch die Neueinstellung von erfahrenen Mitarbeitern aus der Kohlenwasserstoffindustrie ermöglicht worden.

D.h., die BGE hat sowohl bei der Datensammlung als auch bei der Verarbeitung der Daten, etwa in 3D Modellen, durch seine Mitarbeiter seit März 2022 weitere wichtige Schritte unternommen in Bezug auf notwendige Standards bei den verwendeten Untergrundmodellen.

Die in den SGD vorhandenen 3D Modelle zeigten dabei ***typische Probleme*** auf, wie unterschiedliche Verwendung von Störungen (vertikal vs geneigt), stark unterschiedliche Datendichte und Datenqualität (z.B. alte 2D Seismik vs moderne 3D Seismik) oder unterschiedliche Verwendung von stratigraphischen Einheiten und Korrelationen. Letzteres kann etwa in der Fläche Top Teufelsloch zu sogenannten „bulls eyes" in Kartendarstellungen führen, sprich Artefakten, die geologisch nicht erklärbar sind. Dazu stellt sich dann auch die Frage wie vertrauenswürdig die in den SGD vorhandenen Schichtenverzeichnisse sind. 3D Modelle lassen sich also auch sehr gut zur Qualitätssicherung der Daten innerhalb von Teilgebieten einsetzen.

Ein Grund für das Entstehen der „bulls eyes" in den Kartendarstellungen des TG 001 ist möglicherweise die Tatsache, dass die Grenze der tonigen Teufelsloch zur sandigen Zillhausen Subformation innerhalb des Opalinustones nicht immer deutlich ersichtlich ist. Gleichzeitig fehlt eine sequenzstratigraphische Interpretation (Abbildung 5). Dies erschwert die Bestimmung der Mächtigkeiten des eWG im Opalinuston. Die BGE hat die notwendige Qualitätskontrolle durchgeführt und sich dabei nur auf Bohrungen verlassen, die digitale Bohrlochmessungen besitzen, womit Schichtgrenzen durch die BGE selbst kontrolliert werden können.

Innerhalb des Doggers werden die Eisensandstein-Formation und die sandige Zillhausen Subformation nach NW hin mächtiger. Die Frage, woher diese groben klastischen Sedimentschüttungen kommen, ist noch nicht bekannt und wird derzeit im SEPIA-Projekt durch die BGR bearbeitet, d.h. ein ***sedimentologisches Gesamtverständnis für das Opalinuston-Becken ist derzeit noch nicht vorhanden***. Dabei ist festzuhalten, dass grobe Sandschüttungen innerhalb eines marinen Ablagerungsraumes wie im Opalinuston als ungünstige Eigenschaft betrachtet werden, aufgrund der möglichen horizontalen Gesteinsdurchlässigkeiten, die sich daraus ergeben können.

Empfehlung 4.4*: Zum Verständnis der Paläogeographie und der Faziesverteilung in den 8 verschiedenen Tonsteinbecken sind einschlägige Studien diesbezüglich notwendig. Zwei solcher Studien werden bereits durch die BGR ausgeführt (siehe Anhang:* BGR Studien, Datenbanken und Visualisierung von 3D Modellen:*). Es ist jedoch abzusehen, dass auch in weiteren Teilgebieten Tongestein eine Notwendigkeit zu solchen oder ähnlichen Studien besteht.*

Insgesamt ist festzuhalten, dass die BGE inzwischen ihre Qualitätssicherung zu den Daten und 3D Modellen, die sie von den SGD erhalten hat, deutlich ausgebaut und verbessert hat, was als sehr positiv zu bewerten ist.

Strukturgeologische Erwägungen

Tektonische Deformationen in den TURs sind ein wichtiger Gesichtspunkt aufgrund der möglichen Einflüsse auf die Durchlässigkeit von Tongesteinen und des überlagernden Deckgebirges. Ein Beispiel dafür ist etwa die Migration von Kohlenwasserstoffen (KW) im Untergrund. In NRW und großen Teilen des Norddeutschen Beckens befinden sich KW-Muttergesteine mit den Karbon-Kohlen, dem Posidonienschiefer aus dem Lias (Unter-Jura) und dem Wealden in der Unter-Kreide. Dabei verläuft die vertikale Migration der fluiden und gasförmigen Phasen häufig an Störungs- und Kluftsystemen. Da es sich bei Störungen nicht um einzelne, isolierte vertikal orientierte Flächen handelt, sondern vielmehr um zerrüttete Zonen unterschiedlicher Breite und Ausbildung, müssen sie als AK behandelt

werden und kommen für eine weitere Untersuchung nicht in Frage. Allerdings ist es oft schwierig zu erkennen, wie groß/breit eine solche Ausschlussfläche entlang der Störungszonen sein muss. Dazu hat die BGE ein Forschungsprojekt mit der Universität Göttingen im Juni 2022 gestartet, wobei die Frage nach noch aktiven Deformationszonen und deren Ausschlussfläche behandelt werden soll. Dazu sollen etwa LIDAR Daten Verwendung finden. Ziel ist es angepasste Sicherheitsabstände um Störungen herum zu definieren aufgrund von Klassifizierungen der Deformationen, etwa in regionale und überregionale Systeme.

Unterlagernde Gas und Öl-Lagerstätten und Indikatoren zur vertikalen Migration von KW könnte dann zum Ausschluss von Gebieten führen. Dabei spielt das Kriterium „Räumliche Charakterisierung" eine wichtige Rolle. Auch hier ist es wichtig zu wissen, was man nicht weiß („white space" in der Italienischen Flagge, Grötsch, 2022). Die weitere Bewertung von Details muss jedoch die kommenden Dokumentationen der BGE abwarten.

Risikoregister, Status und Anwendung

Die BGE hat seit 2021 ein internes Risikoregister zum Endlagerprojekt eingeführt das inzwischen etwa 89 Risiken beherbergt, die verschiedener Natur sind und einen unterschiedlichen Status haben (siehe ELO-Projektmanagement). Dies wird als ein grundsätzlicher Baustein in der weiteren Projektentwicklung angesehen und wird vom sogenannten Risikoausschuss der BGE betreut. Ansätze davon sind in Berichten der BGE publiziert (BGE, 2021). Dieses Risikoregister wird intern regelmäßig pro Quartal auf Geschäftsführungs-Ebene mit Bezug auf Veränderungen bewertet und Aktivitäten zur Risikovermeidung initiiert und weiterverfolgt. 50% dieser Risiken sind technischer Natur, andere beziehen sich auf Bauvorhaben, Genehmigungen, organisatorische Fragen, Personal, Stoffe, höhere Gewalt und Gesetzgebung.

Darin sind etwa Risiken wie einen **günstigen Standort zu übersehen** aufgenommen zusammen mit den Vorgehensweisen ein solches Risiko zu minimieren, etwa via entsprechend angepasster Arbeitsschritte, z.B. mit Hilfe von Maßnahmen zur Qualitätssicherung oder der Initiierung von Forschungsvorhaben.

Ein weiteres angesprochenes technisches Risiko ist das Deckgebirge, dass durch Vereisungen und resultierende **glaziale Rinnen** beeinträchtigt wird. Dazu muss ein ausreichender Sicherheitspuffer vorhanden sein. Eine verwendbare Methodik, dieses Risiko zu analysieren fehlt im Augenblick noch, muss also entwickelt werden. Dazu wurden inzwischen schon umfangreiche Studien durchgeführt oder initiiert. Ein Beispiel dafür ist das Suchtiefe-Projekt der BGR das glaziale Rinnenerosion als geogenen Prozess untersucht. Dazu werden Karten für den gesamten Norddeutschen Raum generiert etwa zum maximalen Eisrand und der maximalen Rinnenvertiefung durch Gletschererosion (bis 500 m). Dabei ist ein NW-SE streichender Gürtel von Rinnenmaxima erkennbar. Ziel ist es eine neue Fläche der potenziellen Erosion zu erzeugen, die regional unterschiedlich, die empfohlene Mindesttiefe anzeigt. Dabei wurde deutlich, dass die Mindesttiefe lokal herabgesetzt werden muss, sprich auf maximal 600 m. Dies schränkt Teilgebiete weiter ein und zeigt sehr gut den Fortschritt in einem lernenden Verfahren. Darüber hinaus hat die BGE das QUASI-Projekt eingeleitet, das die Frage beantworten soll, was Erosion beschleunigt, unterstützt auch von hochauflösenden Modellen, wobei die Erosion numerisch simuliert werden soll. Dieser Ansatz wird sehr begrüßt und zeigt deutlich auch die Notwendigkeit solche spezifischen Eigenschaften eines TUR oder eines Wirtsgesteines in die Evaluierung mit einzubeziehen.

Des Weiteren ist die generelle **Anwendbarkeit der geoWK** in den sehr unterschiedlichen Wirtsgesteinen noch nicht deutlich. Die Frage wirft sich also auf, ob dazu Wirtsgestein-spezifische Arbeitsschritte in der Methodik angewendet werden müssen.

Während der Einsicht der Unterlagen bei der BGE (Stand Oktober 2022) ist deutlich geworden, dass bis heute im Risikoregister die **digitale Geo-Datenverfügbarkeit** nicht aufgeführt ist, da die BGE die Ansicht vertritt, dass „genügend Daten zur Evaluierung aller Teilgebiete vorhanden sind“. Die Richtigkeit dieser Annahme sollte im weiteren Verlauf für alle Teilgebiete dargestellt werden, da die digitale Verfügbarkeit aller notwendigen Daten beim derzeitigen Stand noch nicht erkennbar ist.

Empfehlung 4.1*: Geodaten und ihre digitale Verfügbarkeit, auch zur späteren Veröffentlichung, sollte Teil des Risikoregisters sein und aktiv von der Geschäftsführung nachverfolgt werden, etwa über regelmäßig neu bewertete „dashboards“.*

Bei den Gesprächen wurde auch deutlich, dass sich im Risikoregister der BGE keine explizit angesprochenen Ungewissheiten befinden, die etwa an einzelne Risiken geknüpft sind. Eine solche **Verknüpfung von Ungewissheiten und Risiken** sollte angestrebt werden.

Empfehlung 4.2*: Ungewissheiten sollten Teil des Risikoregisters sein, sprich Ungewissheiten sollten mit entsprechenden Risiken verknüpft werden. Dies macht auch deutlich, warum und welche notwendigen Maßnahmen zu deren Vermeidung eingeleitet wurden/werden.*

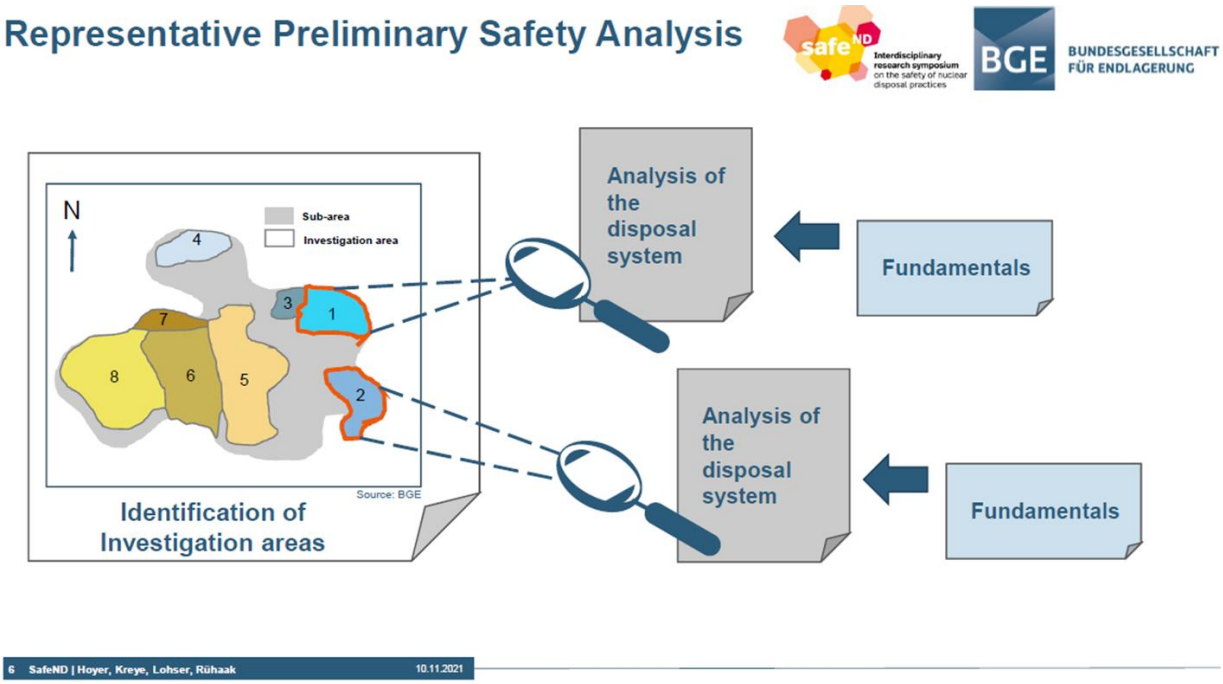

Abbildung 9: Schematische Zeichnung zur Aufteilung aller Teilgebiete (TG) in Teiluntersuchungsräume (Hoyer et al., 2021). Aufgrund der Heterogenität innerhalb der TG soll zuerst eine weitere Unterteilung in kleinere Einheiten erfolgen, sogenannte Teiluntersuchungsräume (TUR). Dies erlaubt eine höhere Transparenz in der späteren Beurteilung der TG und ihrer TUR.

Einteilung der Teilgebiete in TURs (Beispiel: Untere Meeresmolasse)

Während des Besuches bei der BGE in Peine wurden erstmals zwei Teilgebiete Tongestein aus SE Bayern mit ihren Unterteilungen in Teiluntersuchungsräume (TURs) vorgestellt am Beispiel der jüngeren und älteren Unteren Meeresmolasse (Abbildung 1). Dabei wurde eine erste vorläufige Bewertung durchgeführt, die jedoch noch nicht veröffentlicht ist. Die beiden Teilgebiete erstrecken sich NE von Rosenheim bis Landshut. Aufgrund des Vorhandenseins von Ölfeldern mit ihren Bohrdaten ist die Datenlage in diesen Teilgebieten als gut zu bewerten.

Auffallend sind starke Mächtigkeitsvariationen im Vorlandbecken nördlich der Alpen, die von Süden nach Norden hin abnehmen. Generell kann man in beiden Teilgebieten nach N hin geringere Mächtigkeiten beobachten, typisch für das E-W streichende Vorlandbecken. In den TGs finden sich NW-SE streichende, paläozoische (ältere) Störungen, zusammen mit E-W streichenden, alpidischen (jüngeren) Störungen.

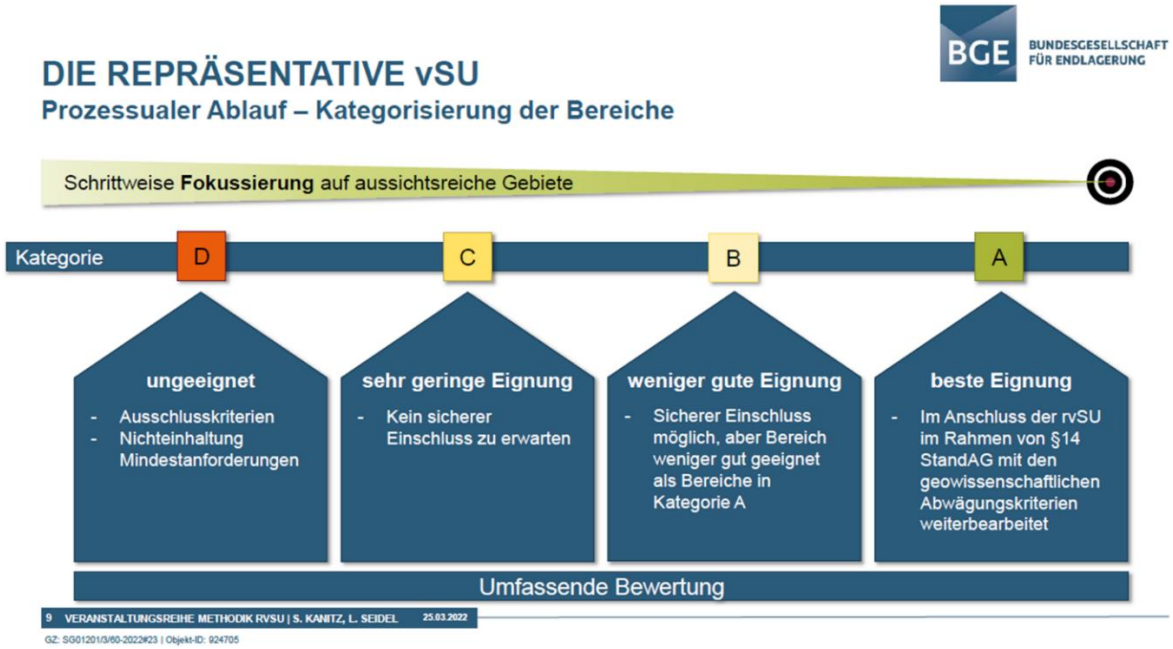

Abbildung 10: In der rvSU wird eine Einteilung aller URs in vier Kategorien durchgeführt. Dieser Arbeitsschritt erlaubt es an sich eine klare Einstufung nach Eignung des jeweiligen URs durchzuführen. Da jedoch die Datenlage in den URs sehr unterschiedlich ist, muss dabei auch diese und die daraus resultierende Ungewissheit mit einbezogen werden.

Dieser erste Versuch in Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongestein erlaubt es Erfahrungen zu sammeln, wie TURs am besten unterteilt werden sollten und welchen Einfluss die Datengrundlage dabei spielt. Eines der Ziele ist es, die Kategorie C/D TURs frühzeitig zu erkennen, um diese ausschließen zu können. Dies wird als ein sehr sinnvoller Ansatz bewertet, der hilft, nicht notwendige Arbeitsschritte bei der Evaluierung von TURs zu vermeiden.

Empfehlung 4.3*: Es ist abzusehen, das große Teil der verbliebenen Teilgebiete frühzeitig ausgeschlossen werden können, nachdem die Einteilung in TURs erfolgt ist und sie daraufhin als Kategorie C und D charakterisiert werden können. Dies sollte helfen, dass die BGE ihre teils begrenzten Ressourcen auf die wesentlichen, verbleibenden TURs konzentrieren kann.*

Dabei wurde ein ***Dokumentationsschema*** für alle TURs entwickelt und ein vorläufiger Teilbericht dazu erstellt. Dieser enthält eine geowissenschaftliche Beschreibung, eine Übersicht zu den vorhandenen Daten, Faziesbeschreibungen, Tiefe, Mächtigkeit, Lithologie und zu erwartende geogene Prozesse. Diese Beschreibung soll anhand von gesetzmäßigen Kriterien und Kartendarstellungen erfolgen. Nur was notwendig ist zur Bewertung und Kategorisierung (Abbildung 10) soll dabei beschrieben werden. Dazu gibt es ein digitales Archivprojekt wo diese 2D Daten (Karten, Querschnitte) und die Bewertung des jeweiligen TUR einsehbar sind. Dies erlaubt eine transparente und nachvollziehbare Beschreibung der TURs. Nach Aussagen der BGE wird dazu im März 2023 eine weitergehende Dokumentation zu erwarten sein.

Insgesamt zeigen die beiden Teilgebiete der Unteren Meeresmolasse deutliche Variationen in der Faziesentwicklung, d.h. sie enthalten sehr unterschiedliche Gesteinsausbildungen mit Tonmergeln, Kalk- und Dolomitlagen, turbiditischen Sandschüttungen und Konglomeraten. Solche Heterogenitäten und die Ausbildungen von Sandlinsen (oder „chanels“) sind ungünstige Eigenschaften. Weitergehende Aussagen sollten jedoch den Bericht der BGE abwarten.

Fragestellung 1: Verwendung von Referenzdaten

Es ist im Zusammenhang mit der Behandlung von Ungewissheiten im Endlagerverfahren wichtig zu bemerken, dass Ungewissheiten in den ehemaligen Sicherheitsuntersuchungen nicht enthalten waren (BMU, 2010). Inzwischen ist jedoch die Notwendigkeit erkannt, dass die „Betrachtung von Ungewissheiten elementarer Bestandteil der rvSU im Standortauswahlverfahren“ (BGE Anlage, 2022, S 608; BGE 2022c) sein muss. Diese Problematik wird nun angegangen. Die BGE erarbeitet dazu im Augenblick ein klares Konzept, wo, welche Ungewissheiten wie in den Gesamt-Workflow einfließen sollen (siehe Kapitel Parametrisierung, Referenzdaten und Workflow).

Referenzdatensätze

Gute Fortschritte wurden in der Zwischenzeit erzielt bei der Verwendung von ***Referenzdatensätzen*** aus dem schweizerischen Mont Terri Projekt. Da es sich in Mont Terri und dem TG 001 um die gleiche geologische Formation handelt, wird dies als zielführend angesehen. Die Daten sind alle öffentlich einsehbar (Download-Center | Nagra), was auch in Zukunft für die BGE als gutes Beispiel dienen kann. Basierend auf den Arbeiten in Mont Terri hat die Schweiz inzwischen bereits jetzt den endgültigen Standort des Endlagers im Opalinuston nördlich von Lägern (Kantone Aargau und Zürich) vorgeschlagen.

Andere Referenzdaten sind tektonische Elemente (Störungen) die als Lineamente in Oberflächen-Karten vorliegen und dann als Störungsnetzwerk in 3D Modellen Verwendung finden. Dabei zeigen sich allerdings schon die unterschiedliche Handhabung solcher Interpretationen über Bundesländergrenzen hinweg. So sind gute Analysen aus Niedersachsen vorhanden, während NRW nur (Oberflächen-)Lineamente hat, also keine 3D Modelle dazu verwendet. Bei Vorhandensein von 3D Seismik ist das Fehlen von konsistenten länderübergreifenden Geschwindigkeitsmodellen bemerkbar, so dass zu detaillierteren Analysen wohl eine Neu-Prozessierung von wichtigen seismischen Volumen notwendig sein wird – ein zeitaufwendiges Unterfangen. Bei 2D Daten hat sich das Fehlen eines standardisierten Koordinatensystems bemerkbar gemacht, wobei selbst innerhalb des gleichen Bundeslandes verschiedene Koordinaten-Referenzsystem benutzt wurden – ein sehr fragwürdiges Vorgehen. Seismische Daten liegen meist entweder in Zeit oder in Tiefe vor, können also nicht leicht miteinander interpretiert werden und/oder zur Erstellung von Tiefenkarten verwendet werden. Die interpretierten Horizonte sind auf den seismischen Daten meist gut verfolgbar, jedoch sind sie unterschiedlich zu den vorhandenen Karten der SGD, sprich es ist nicht möglich Herkunft und Entstehungsgeschichte nachzuvollziehen.

Ein Beispiel dazu ist der Lias-Horizont, der im TUNB-Projekt (Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken, 2021) veröffentlicht wurde, aber ohne zugehörigen Bericht ist und keine Daten aus NRW hat. Ein anderes Beispiel ist Sachsen-Anhalt, wo große Unterschiede in kartierten Gebieten und Mächtigkeiten bestehen, was die BGE vor die Frage stellt, wie die bestehenden Ungewissheiten in solchen Daten einzuschätzen sind und ob sie möglicherweise zum Verpassen eines plausiblen Standortes führen können.

Der Fortschritt der BGE wird dabei oft auch kontrolliert durch die Arbeitsabläufe im Datenmanagement mit Abfragen bei den SGD (oder anderen Institutionen und Firmen), der Qualitätssicherung der angelieferten Daten (z.B. Digitalisierung, Logdaten editieren), Überführung in das BGE-Datensystem und in einem weiteren Stadium der Öffentlichkeit Zugang zu den Daten zu

verschaffen. Trotz der erzielten Erfolge müssen hier noch weitere, langandauernde Anstrengungen unternommen werden. Projekte der BGE, wie etwa die interne „Tertiär-Studie“ via Dienstleister sind im Gange, wobei auch die Evaluierung der Unsicherheiten (z.B. Mächtigkeitskarten) eine wichtige Rolle spielt.

Parametrisierung, Referenzdaten und Workflow

In den bisherigen Ergebnissen der BGE (2022a, b) lässt sich erkennen, dass verwendete Parameter in der zu entwickelnden Methode sich einander bedingen und deshalb miteinander verflochten sind. Darum stellt sich zuerst die Frage, welche Parameter notwendig sind in welchem Teil des ***Workflows***. Danach, wie sollen diese Parameter bewertet werden und darauf, welche Referenzdaten dafür zu erstellen sind. Um dies zu klären hat die BGE ein Parametrisierungs-Projekt initiiert mit einem Team, das die ***Arbeitsschritte***, die Verwendung von ***Parametern*** sowie deren Querverbindungen in einer Softwarelösung festhalten sollen. Die Lösung hat inzwischen ***65 Arbeitsschritte*** und ***154 Parameter***, welche auch Querverbindungen (dependencies) haben können.

Es ist also deutlich, dass in den jeweiligen Arbeitsschritten viele verschieden Parameter verwendet werden, z.B bei der Erstellung von Karten zur Datendichte (DQN) und Datenqualität (DQL). Jede involvierte Gruppe gebraucht dabei Parameter und liefert Parameter weiter an andere Gruppen in den Arbeitsschritten des Gesamt-Workflows. Ziel des Parametrisierungs-Projektes ist es Struktur in diesen Prozess zu bringen, Qualitätssicherung zu ermöglichen und eine organisatorische Verbesserung der Arbeitsabläufe zu erreichen.

Dazu werden zeitliche ***Ablaufdiagramme*** entwickelt mit allen Arbeitsschritten inkl. der Zielparameter per Arbeitsschritt oder Prüfschritt. Dabei soll der Workflow abgebildet werden, deutlich gemacht werden, wie man notwendige Parameter (manchmal auch Modelle und Zwischenergebnisse) bekommt und wie sie weiterverwendet werden. Diese Darstellung des Workflows macht auch deutlich, wo welche Entscheidungen gefällt werden müssen. Ein solches Workflow-Diagramm kann auch aufzeigen, wer was macht, wo Entscheidungen zu treffen sind und wer sie treffen muss. Dadurch wird es auch erleichtert in den jeweiligen Arbeitsschritten zu erkennen, ob lokale oder Referenzdaten verwendet werden sollten. Es gibt dazu auch ein ***Inventar von Parametern***, die im Workflow benutzt werden.

Ein ***Beispiel*** dazu ist die Berechnung des sicheren Einschlusses und des Radionuklid-Transports im Untergrund. Dabei wird berechnet, wie weit Radionuklide in einem bestimmten Zeitraum (z.B. pro Jahr und pro 1 Ma) in ewG und darüber hinaus transportiert werden. Die errechnete Kennzahl fließt dann in sehr viele andere Parameter ein bei der Betrachtung der zu erwartenden Entwicklungen im TUR oder ewG. Derzeit ist der Workflow-Baum jedoch noch in der Entwicklung, so dass keine weiteren Details verfügbar sind. Generell wird das Vorgehen der BGE aber als sehr vielversprechend betrachtet.

Bandbreite wichtiger Gesteinseigenschaften im Wirtsgestein Tonstein

Die NAGRA Daten aus der Schweiz sind sicher gut geeignet für das GzME in Deutschland, sprich das TG 001 Opalinuston. Darüber hinaus gibt es aber in Deutschland noch 7 weitere Teilgebiete Tongestein mit unterschiedlichen Gesteinsausbildungen (Abbildung 1). Die Frage stellt sich deshalb, ob die bis dato verwendeten Daten aus dem Opalinuston auch dafür anwendbar sind.

Die BGE hat als **Variationsbreite bei Tonsteinen,** etwa zur Parametrisierung der geomechanischen Eigenschaften für die Ausbaukonzepte und Behälterverwendung, anhand der beiden Endpunkte begonnen. Diese Endpunkte sind das TG 001 Opalinuston (älter, härter) und ein Tertiäres Beispiel mit TG 004 Paläogen (jünger, weicher), wobei dazu noch keine Ergebnisse verfügbar sind.

Auch hierzu ist es geplant Referenzdaten anzuwenden, z.B. in Anbetracht des Fehlens von Messungen an Gesteinsproben aus Bohrkernen in allen Teilgebieten. Dies soll etwa bei der Berechnung der Diffusionsgeschwindigkeiten von Radionukliden erfolgen, die über den ***Verfestigungsgrad des Gesteins*** ermittelt werden und dann bei den nur schwach lithifizierten Tonabfolgen im Tertiär Anwendung finden sollen. Genauere Informationen dazu liegen noch nicht vor.

Die mergeligen (sprich kalkhaltigen) Kreide-Tongesteine sind dabei noch ausgeklammert. Man könnte sich dabei aber vorstellen, dass dazu Referenzdaten aus dem französischen Endlagerprojekt Bure Verwendung finden, da dieses in ähnlichen Lithologien (mergeliger Tonstein) geplant ist. Es besteht dazu schon eine Kooperation der BGR mit dem französischen Projekt Bure in Lothringen.

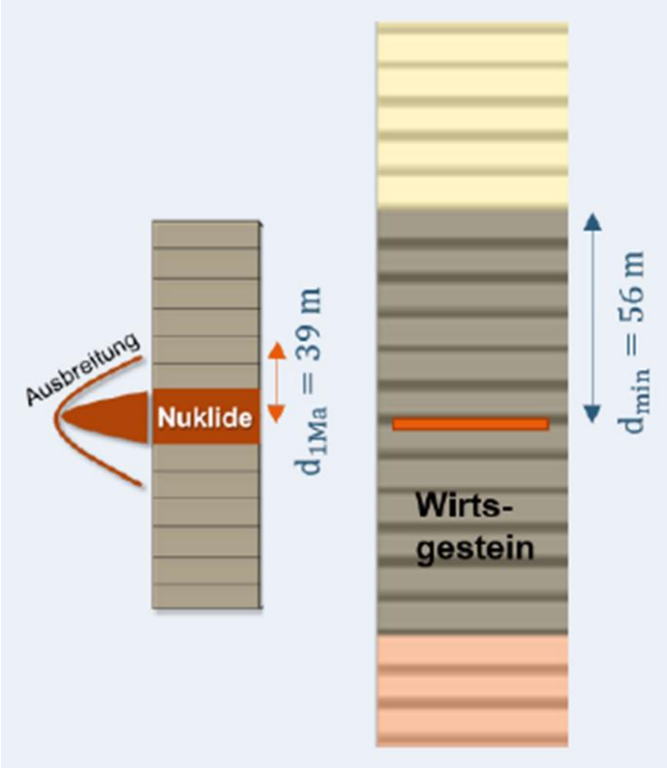

Abbildung 11: 1D (vertikale) Simulationen des Transportes von Radionukliden. Die Modelle bestehen aus Schichten, denen 8-10 Parameter zugeordnet sind. Um als geeignetes Wirtsgestein klassifiziert zu werden, muss bei der Mehrzahl der Rechenläufe d(1Ma) kleiner d(min) sein, sprich der Abstand des Endlagers vom Top des ewG (BGE, 2022b: Abb 187). Dabei ist festzustellen, dass es sich hierbei um 1D Modelle handelt, die keine Aussage zum Massentransport in permeablen, lateral extensiven Gesteinskörpern erlauben (z.B. Sturm oder Turbiditlagen).

Dieser Ansatz ist sehr begrüßenswert. Es fehlt jedoch noch eine generelle Übersicht der verschiedenen Tongesteine zu ihrer prinzipiellen Eignung für ein Endlager, sprich eine Auflistung

ihrer günstigen und weniger günstigen Eigenschaften. Diese sollte dann auch eine klarere Abwägung und bessere Fokussierung, auf die am besten geeigneten Tongesteins-Formationen ermöglichen.

Fazit - Bandbreite: Die BGE sieht die Notwendigkeit, dass Referenzdaten für alle Teilgebiete Tongestein gebraucht werden und will deshalb mit Hilfe ihres ***Parameter-Projekts*** eine umfassende Datenbank zur Parametrisierung aufbauen (siehe Kapitel Parametrisierung, Referenzdaten und Workflow).

Verwendung Statischer und Dynamischer Geologische Modelle

Bei der Anwendung von Referenzdaten in TURs mit geringer Informationslage wird die Verwendung von 3D Modellen beim lateralen und vertikalen Extrapolieren von Wirtsgesteinsabfolgen eine wichtige Rolle spielen, um Vorhersagen treffen zu können. D.h., sie werden eine bedeutende Rolle als räumlicher Analogdatenlieferant einnehmen. Die BGE ist derzeit dabei, sogenannte Referenzprojekte in Petrel für verschiedene Teilgebiete zu erstellen mit besonderem Fokus auf die Teilgebiete mit Dogger, Lias und die Unterkreide-Abfolgen.

Das im TG 001 Opalinuston erstellte statische oder ***geologische 3D Modell*** ist im Vergleich zum letzten vor-Ort Besuch in Peine inzwischen stark verbessert, sprich neue digitale Bohrlochdaten und erste seismische Daten konnten eingelesen werden. Auch die vorhandenen digitalen Karten konnten verbessert werden aufgrund der Verwendung digitaler Bohrdaten (siehe Kapitel 3D Geologische Modelle (Beispiel: TG 001 Opalinuston).

Bei den ***dynamischen Transportmodellen*** ist es ein Ziel der BGE flächendifferenzierte Kennzahlen aus den 1D Modellen in Kartenform zu präsentieren. Dabei wird das Wirtsgestein Tongestein als Vorreiter bei den Transportmodellen gesehen. Ähnliche Resultate liegen aus den Wirtsgesteinen Kristallin und steiles Salz noch nicht vor.

Nur ausgesuchte Gebiete werden in 4 Prüfschritten untersucht wobei nur der sichere Einschluss im TUR, Sorption, radioaktiver Zerfall, Transport von Radionukliden und Mobilitäten sich ändern innerhalb der 1D Modelle. Es sollen später auch Tests mit 3D dynamischen Modellen durchgeführt werden, wobei aber der Bau der Modelle und ihre Laufzeiten einen limitierenden Faktor darstellen. Ziel ist es zu prüfen, inwieweit die gesetzlichen Vorgaben zum jährlichen Massen- und Stoffmengenaustrag von Radionuklide eingehalten werden (sprich 10^{-9} pro Jahr und 10^{-4} pro 1 Ma).

In den, bei der rvSU angewendeten 1D Modellen, wurden ***Analogdaten*** der NAGRA aus dem Mont Terri Projekt in der Schweiz benutzt, wobei per Schicht 8-10 Parameter verwendet wurden. Dabei wird der ***vertikale Transport*** von 47 Radionukliden mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen modelliert. Das Resultat der Simulationen ist die Abschätzung der Transportlänge = d über den Zeitraum von 1Ma. Die vertikale Transportlänge wird mit dem minimalen Abstand zum Ende/Top Wirtsgestein (d min) verglichen. Ist der Abstand zum Ende des Wirtsgesteins in den meisten Rechenläufen grösser als 1 wird dies als geeignet gewertet (Abbildung 11). Porosität und Permeabilität in den Gesteinslagen werden ebenfalls aus Analogdaten entnommen. Dabei sind Diffusions- und Adsorptionswerte bis heute nur für wenige Radionuklide und Lithologien vorhanden.

Die über die ganze Fläche eines TUR verteilten, einzelnen Ergebnisse der 1D Modelle sollen mit Kennzahlen quantifiziert und dokumentiert werden und in Kartendarstellungen präsentiert werden. So kann quantitativ beurteilt werden, welche Region in einem Gebiet sich am besten innerhalb des TUR eignet für einen Endlagerstandort. Dabei soll bei einer Parametrisierung im TG 001 auch die Mächtigkeit Zillhausen vs Teufelsloch Subformation als Kennzahl Verwendung finden. Dieser

Arbeitsschritt mit seiner Serie von vertikalen 1D Modellen und den Ergebnissen dargestellt als Kennzahlen in 2D Karten kann die Beurteilung nach dem sicheren Einschluss somit quantitativ darstellen. Ein solches Vorgehen wird begrüßt, wobei weitere Details erst durch die BGE veröffentlicht werden müssen. Inwieweit welche Referenzdaten dabei Verwendung finden sollen, kann noch nicht beantwortet werden und muss die Dokumentationen der BGE abwarten.

Fazit – Verwendung von Modellen: Geologische Modelle und ihre Anwendung zu dynamischen Modellierungszwecken verwenden zahlreiche Referenzdaten oder liefern Referenzdaten an folgende Arbeitsschritte bei der Evaluierung der TURs. Der von der BGE geplante Workflow soll dabei eine quantitative Evaluierung von TURs erlauben unter Einbeziehung von Modellen verschiedener Art. Die Frage nach dem ***horizontalen Transport*** innerhalb der Tongesteinsabfolge wird dadurch noch nicht geklärt und wird wohl 3D Modelle benötigen.

Verwendung von abgeschlossenen Untergrundprojekten

Die BGE versucht soweit möglich ***vorhandene Studien*** im Untergrund für die verbleibenden Teilgebiete mit einzubeziehen. Einige Beispiele dazu sind etwa:

- Kohlenwasserstoff-Datenbank des LBEG (Niedersächsisches Geologisches Landesamt)
- TUNB Studie – Tiefer Untergrund Norddeutsches Becken
- BGR Studien zu Schiefergas (mit Informationen zur Maturität und Gehalt von TOC)
- 3D Geologische Modellierungsstudien der SGD
- GTA: Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland
- Bohrung RWE Herzogbrunnen-1 Kernaufnahmen
- etc.

Bohrkernaufnahmen sind wichtige Datenlieferanten für verschiedene Arbeitsschritte in der zu entwickelnden Methode der BGE. Leider gibt es dazu noch keine systematische Übersicht zu solchen Kernaufnahmen pro TG oder etwa für das Wirtsgestein Tongestein. Ursachen sind, dass

- die SGD keine adäquaten Datenbanken dazu haben
- keine Kartendarstellungen vorliegen
- der größte Teil der Daten nicht digital verfügbar ist
- das GeolDG erlaubt es erst seit Juni 2020 Zugang zu allen Daten zu bekommen
- Bohrkerndaten sind nicht mehr auffindbar oder in schlechtem Zustand aufgrund unzureichender Archivierung oder nicht mehr existierender Eigentümer/Firmen

Die BGE will bei Datenabfragen diesbezüglich sukzessive vorgehen und Anfragen zu Bohrkerndaten nur für Kategorie A und B TURs machen. Die sedimentologischen Analysen anhand von Bohrkernmaterial und Bohrlochmessungen in den 8 Tongestein-Becken sollen aber über die Bemühungen der NAGRA hinausgehen, d.h. ***Faziesstudien*** in den Teilgebieten Tongestein sind eingeleitet (z.B. SEPIA-Projekt) oder geplant. Dies ist aufgrund der komplexen Beckenentwicklung in allen 8 Tonstein-Ablagerungsräumen sehr erstrebenswert – auch zur Vermeidung von Sandliefergebieten (z.B. Deltas) in diesen Becken.

Fazit – Verwendung von Referenzdaten

Insgesamt sind seit der letzten Begutachtung (Grötsch, 2022) keine neuen Ergebnisse in Form von Dokumentationen von Seiten der BGE verfügbar gemacht worden. Basierend auf den Gesprächen

mit BGE-Mitarbeitern sind jedoch deutliche Fortschritte in der Entwicklung des gesamten Workflows erkennbar, auch bei der Verwendung von Referenzdaten.

Referenzdaten können sehr hilfreich sein, beispielsweise bei der Entwicklung von dynamischen Modellen zum Transport von Radionukliden (z.B. 1D Modelle), wie schon durch die BGE demonstriert. Im TG 001 Opalinuston ist das Schweizer Mont Terri Projekt mit seiner umfangreichen Datenbank ideal dafür geeignet, da dort eine ähnliche Faziesausbildung im Tonstein zu beobachten ist. Diese Qualität an Analogdaten ist jedoch nicht für alle Teilgebiete und ihre Tonsteinformationen vorhanden. Die Lücken in den Referenzdaten bestehen also vornehmlich in den stratigraphisch jüngeren Tonsteinabfolgen der TG 002 bis 008. Vor allem Tertiäre Tongesteine haben dabei teils stark abweichende geomechanische Eigenschaften aufgrund des geringen Verfestigungsgrades.

Die Frage ob in allen TG ***ausreichend Untergrunddaten*** für eine vollumfassende Anwendung der rvSU-Methodik vorliegen, kann in diesem Stadium wohl schon verneint werden. Deshalb wird in vielen TURs in Phase I Schritt 2 die Verwendung von Referenzdaten notwendig sein. Diese Herausforderung wird sich für viele TURs unterschiedlich darstellen. Deshalb ist eine transparente Dokumentation zur Datenlage via Kenngrößen und deren Verwendung in einzelnen Arbeitsschritten notwendig, wie schon initial dokumentiert in BGE (2022b). Die BGE hat inzwischen zur Definition der einzelnen Arbeitsschritte und der Parametrisierung ein eigenes Team bereitgestellt, was sehr begrüßt wird.

Wie hoch der **Anteil von Referenzdaten** oder fehlenden Daten sein wird, ist im Augenblick noch schwer abzuschätzen, wird aber wohl für jeden TUR unterschiedlich sein. Deshalb ist die Verwendung von Kenngrößen zur Datendichte (DQN) und Datenqualität (DQL) und deren Kombination in diesem Zusammenhang wichtig, um später eine Möglichkeit zum Vergleich zu haben (siehe Kapitel Definition und Verwendung von Kenngrößen).

Es muss aber auch festgehalten werden, dass nicht für alle Daten Typen im Untergrund oder alle Arbeitsschritte im Gesamt-Workflow Daten oder Referenzdaten verfügbar sein werden. Dies bedeutet, dass Ungewissheiten und der sogenannte „***White Space***“ (Grötsch, 2022) semi-quantitativ dokumentiert werden sollten. Dadurch, und falls notwendig, kann die Verwendung von Rücksprüngen einfacher und leichter verständlich gemacht werden. Die BGE beabsichtigt in solchen Fällen die Verwendung von sogenannten „**Best Estimates**“ (BGE, 2022b: 239), wobei bis jetzt nur einige wenige konkrete Beispiele dazu vorliegen. Diese sollen dann auch Rücksprünge in Schritt 1 Phase II ermöglichen, sofern sich die getroffenen Annahmen mit zunehmendem Informationsgewinn oder über Erkundungsmaßnahmen in Phase II als zu pessimistisch herausgestellt haben.

Dies bedeutet, dass die BGE davon ausgeht, dass ***Rücksprünge*** notwendig sind und es auch in Phase II Schritt 1 noch zu einer Neubewertung von noch nicht als Kategorie C und D ausgeschlossenen, fraglichen TURs kommen kann. Dies ist nachvollziehbar und begrüßenswert.

Insgesamt ist festzustellen, dass eine frühere Verwendung und Dokumentation von Ungewissheiten im Arbeitsablauf empfohlen wird. Dazu kommt, dass die großräumige Untersuchung aller Bereiche/UR/TUR getrennt behandelt werden sollte von der Analyse des Endlagersystems in einer Standortregion, insbesondere mit Bezug auf die Verwendung von Ungewissheiten in den verschiedenen Arbeitsschritten. Deshalb ist es wichtig schon vorab zu wissen, welche TUR hohe Ungewissheiten haben, etwa mit Hilfe von „Italian flags“, „bullhorn plots“ oder anderen semi-quantitativen Methoden und unter Verwendung von Kennzahlen verschiedener Art.

Fragestellung 2: Workflow heterogene Datenlage im Wirtsgestein Tongestein

Die zweite Fragestellung in diesem Gutachten zielt darauf ab, ob der **Workflow** zum Umgang mit einer **heterogenen Datenlage** in den Teilgebieten aus den Wirtsgesteinen Steinsalz flach und Kristallin auf das Wirtsgestein Ton übertragen werden kann (BGE, 2020b: Kap. 5.1). Dazu kommt auch die Frage nach der Identifikation und Behandlung von Teilgebieten ohne hinreichende Informationen.

Die BGE hat dazu schon einen kurzen, ersten Workflow dokumentiert (Abbildung 12), der jedoch noch weitere Details der einzelnen Arbeitsschritte vermissen lässt, was auch durch die BGE selbst schon angesprochen ist:

„Im Rahmen der Methodenentwicklung für Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens hat sich herausgestellt, dass im Rahmen des nun steigenden Detaillierungsgrades der Umgang mit geringer Datenlage neu bewertet werden muss. In Schritt 1 der Phase I wurde ein konservativer Ansatz gewählt, bei dem sich Bewertungen durch einen Informationsgewinn in späteren Phasen nicht verbessern, sondern nur beibehalten oder schlechter werden können. Dieser Ansatz könnte für Schritt 2 tendenziell dazu führen, dass potenzielle Standortregionen insbesondere aus Gebieten mit geringer Datenlage auf Basis von überschätzenden Bewertungen ermittelt werden. Daher ist für den Umgang mit Gebieten mit geringer Datenlage ein Perspektivwechsel sinnvoll.“ (BGE, 2022b: S. 240)

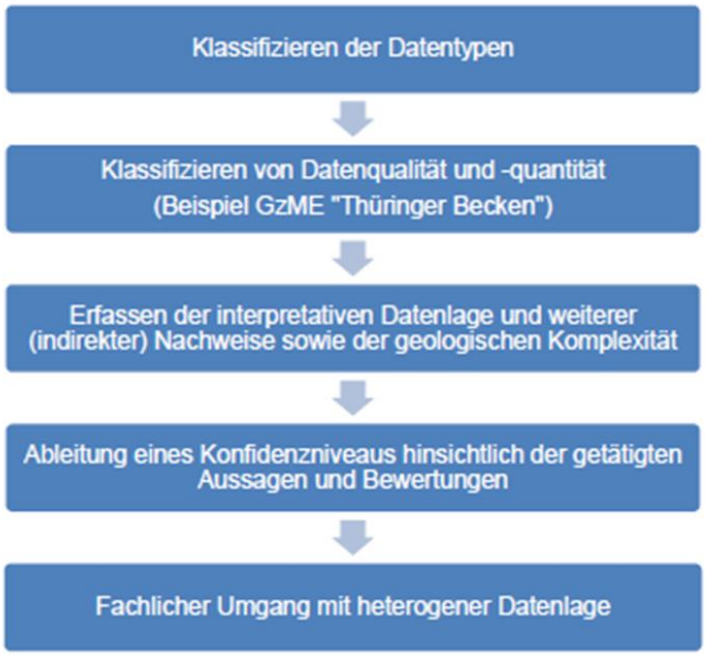

Abbildung 12: Workflow zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage (BGE, 2022b: Abb. 62). Darüberhinausgehend wird empfohlen, die Resultate der Evaluierung der TUR in überlagernden Kartendarstellungen quantitativ via Kenngrößen zu erfassen, ähnlich etwa wie beim „Play Based Exploration“ Workflow in der KW-Aufsuchung (AAPG, 2022),

Dabei hat die BGE schon weitgehende Vorarbeiten geleistet, um sogenannte „Kenngrößen“ einzuführen. Dies ist ein durchaus gängiges Konzept bei industriellen Untergrundprojekten beim Umgang mit den beiden ***Kernfragen der Ungewissheiten und der heterogenen Datenlage***. Um dies zu ermöglichen, müssen zuerst Datentypen in Kategorien eingeteilt werden.

Klassifizierung der Datentypen (direkt, indirekt, interpretativ)

Grundsätzlich können Daten in den Geowissenschaften in ***akquirierte Rohdaten*** (z.B. Bohrdaten, Bohrlochmessungen, Bohrkerndaten) und ***interpretierte Daten*** unterschieden werden (z.B. Porosität aus Bohrlochmessungen, Tiefenmigrierte reflexionsseismische Daten). Letztere Datentypen können dabei schon signifikante Ungewissheiten in sich bergen. Ein Beispiel ist die Verwendung von Geschwindigkeitsmodellen bei der Prozessierung von seismischen Rohdaten. Solche Geschwindigkeitsmodellen haben einen erheblichen Einfluss auf die Tiefenlage von geologischen Horizonten, da Seismik in Zeit gemessen wird (sprich Ausbreitung von seismischen Wellen) und nicht in Tiefe. D.h., dass auch von der BGE als direkte (z.B. Bohrlochmessungen) und indirekte Daten (z.B. tiefenkonvertierte Reflexionsseismik) klassifizierte Datentypen Ungewissheiten verschiedener Natur in sich bergen. Abhängig von der Menge der Kalibrationspunkte (z.B. Bohrdaten, Sonic-Logs) können diese sehr unterschiedlich sein.

Die BGE schlägt in BGE (2022b) vor eine Unterscheidung in direkte, indirekte und interpretative Datentypen zu benutzen. Die obige Aussage bedeutet jedoch, dass selbst „indirekte“ Daten (z.B. Seismik) einen großen Teil an Interpretation beinhalten (d.h. Geschwindigkeitsmodell).

Dennoch, und unter dem Verständnis, dass alle drei Kategorien an Datentypen Ungewissheiten verschiedener Natur beherbergen, ist eine solche Aufspaltung durchaus förderlich, da bei geologischen Untergrundinterpretationen viele, verschiedene Datentypen zusammengefügt werden müssen um ein möglichst realistisches Erstellen von 3D Modellen, 2D Querschnitten oder 1D Profilen zu ermöglichen. Solche interpretativen Daten sind die essentielle Voraussetzung für Untergrundevaluierungen, wie sie im Endlagerprojekt notwendig sind.

Deshalb kann hieraus gefolgert werden, dass eine solche Unterteilung der BGE durchaus sinnvoll ist. Jedoch muss deutlich gemacht werden, wie die jeweiligen Ungewissheiten der verschiedenen Datentypen behandelt werden. Dabei wird die von der BGE eingeführte Kenngröße DQL (= Datenqualität) eine wichtige Rolle spielen. Zum jetzigen Zeitpunkt hat die BGE noch keine weitergehenden Vorstellungen dazu zur Verfügung gestellt.

Definition und Verwendung von Kenngrößen

Die Evaluierung der verbleibenden Teilgebiete und TURs macht es notwendig Workflows und einzelne Arbeitsschritte zu verwenden, die eine konsistente Bearbeitung sowohl der unterschiedlichen Teilgebiete als auch der verschiedenen Wirtsgesteine erlaubt. Eine Notwendigkeit dabei ist die Verwendung von Kenngrößen und Kennzahlen, ähnlich wie in der Exploration nach Ressourcen im Untergrund (Abbildung 12; Grötsch, 2022).

Die Dokumentationen der BGE (BGE, 2022b) zeigen erstmals eine solche Verwendung von quantitativen oder semi-quantitativen Kenngrößen auf, etwa zum Informationsgehalt der Bohrungen und deren Bewertung von 1 – 8. Weitere Kenngrößen sind:

- **DQL** Datenqualität (1 = sehr gut bis sehr schlecht = 6)
- **DQN** Datenquantität (via Kartendarstellungen von Thiessen-Polygonen)
- **IDN** Interpretative Daten und indirekte Nachweise vorhanden (1-6)
- **KX** Geologische Komplexität (1-6)

Dabei sollen diese vier Kenngrößen verwendet werden, um eine quantitative Einschätzung zu erlauben über die Verlässlichkeit der Aussage zur Beschaffenheit des Untergrunds. Dies ist

begrüßenswert, jedoch ist in den bestehenden Dokumentationen (BGE, 2022a, b) und auch aus Gesprächen mit der BGE zu diesem Gutachten noch nicht erkennbar, wie diese Anwendung erfolgen soll. Darüber hinaus sind weitere Kenngrößen notwendig zur Charakterisierung der Ungewissheiten. Auch diese Fragestellung kann leider noch nicht beantwortet werden und muss verschoben werden bis weitere Arbeitsschritte durch die BGE veröffentlicht sind. Die BGE hat aber dazu schon das ***Geoblocks*** Forschungsvorhaben mit verschiedenen Universitäten initiiert, was die Definitionen der einzelnen Kenngrößen, die Verwendung von Kombinationen von Kenngrößen und die daraus resultierende Anwendung in den Arbeitsschritten ausarbeiten soll.

In BGE (2022b: 232ff) ist die Verwendung der **DQL (= Datenqualität**) eingeleitet und beschrieben. Eine solche Kenngröße ist sehr begrüßenswert. Etwa kann so die stratigraphische Auflösung in den Schichtenbeschreibungen in eine räumliche Quantifizierung von Kenngrößen (und Derivaten daraus) einbezogen werden. Es wird erwartet, dass eine hohe stratigraphische Auflösung bei Bohrdaten korreliert mit der Datenqualität.

Derzeit werden Arbeiten durch Dienstleister durchgeführt, die digitale Schichtenverzeichnisse mit Daten aus Bohrungen tiefer 300 m systematisch analysieren, basierend auf SEP3 Datenstandards, da diese von den meisten SGD verwendet werden. Ein Algorithmus berechnet dazu einen Mittelwert zum Detailgrad der Informationen zu Petrographie, Stratigraphie und den Schichtenverzeichnissen für die jeweilige Bohrung. Dabei werden Kategorien zur stratigraphischen Auflösung in einer Bohrung vergeben, die dann einfließen können in die Gesamtquantifizierung der Datenqualität in jeder Bohrung. Weitere Details dazu müssen die kommenden Publikationen der BGE abwarten. Vorläufig betrachtet, erscheint dies jedoch ein vielversprechendes Verfahren zu sein.

Jedoch ist nur die Kombination von Datenqualität und -quantität aussagekräftig bei der Analyse eines räumlichen (sprich 3D) Problems. Weitere Details, wie dies letztendlich erfolgen soll, sind noch nicht bekannt, so dass eine detaillierte Beurteilung nicht möglich ist.

Schon zu erkennen ist jedoch, dass zur Bestimmung der Kenngrößen (**DQN = Datenquantität**) für Bohrlochdaten eine abgewandelte Methodik Verwendung finden wird als dies für seismische Daten (2D, 3D) oder weitere Datentypen der Fall sein wird (siehe Geoblocks Forschungsvorhaben). Bei Bohrdaten sollen quantitative Aussagen via ***Thiessen-Polygone*** und entsprechende Kartendarstellungen angefertigt werden. Dies ist sehr zu begrüßen, da solche Kartendarstellungen auch einen sofortigen Einblick in die räumlich variierenden Ungewissheiten erlauben. Offen ist jedoch, wie eine solche Information verwendet wird. Man kann sich aber vorstellen, dass damit eine quantitative Methode entwickelt werden kann, etwa zur Identifizierung von TURs ohne hinreichende Datendichte oder -verfügbarbeit. In solchen Fällen stellt sich dann auch die Frage, ob Analogdaten verwendet werden können. Auch zu dieser Frage ist noch keine weitergehende Aussage möglich.

Neben Bohrlochmessungen und seismischen Daten sind auch noch ***weitere Datentypen*** bedeutsam für die Charakterisierung des Untergrundes. Beispiele dazu sind etwa:

- Bohrkerndaten. Hohe Auflösung. Eine der wenigen verlässlichen Quellen für Permeabilität/Gesteinsdurchlässigkeit
- Pumpversuche in Bohrungen
- Aeromagnetische und -gravimetrische Messungen
- Geochemische Feld- und Satellitenobservationen
- Satellitengestützte Datenerhebungen verschiedener Art

Es ist jedoch nicht absehbar, wie solche zusätzlichen Informationen quantitativ oder auch qualitativ Verwendung finden werden oder auch, ob man sich besser auf die wichtigsten Datentypen

beschränken sollte (d.h. Bohrdaten, Seismik). Dabei ist davon auszugehen, dass hier zumeist Interpretationen dieser beiden Datentypen verwendet werden, um eine zielführende Bearbeitung der TURs zu ermöglichen.

Da Daten-Quantität nicht notwendigerweise auch Qualität bedeutet wird im ***Geoblocks*** Forschungsvorhaben auch an der Methodik gearbeitet, wie man diese beiden (oder mehr) Kenngrößen miteinander verbinden kann. Dies soll die Aussagefähigkeit zu bestimmten Eigenschaften oder das „Konfidenzniveau" einer Aussage ermöglichen. Auch dazu sind noch keine weiteren Details vorgestellt worden. Jedoch ist der Ansatz grundsätzlich zu unterstützen.

Dieses ***Konfidenzniveau*** bezüglich der geologischen Aussagen kann im Rahmen der Geosynthese auf geologische Interpretationen übertragen werden. Das heißt, die Bewertung hinsichtlich des Konfidenzniveaus wird dann bei den folgenden Bearbeitungsschritten mitgeführt, so dass sich eine Abschätzung der Ungewissheit bezüglich einer Aussage oder Bewertung daran orientieren kann (BGE, 2022b: S. 241). Auch dieser Ansatz ist sehr zu begrüßen. Es ist bis jetzt noch nicht deutlich welche und wie viele Kenngrössen in ein solches „Konfidenzniveau" eingehen werden.

IDN oder interpretative Daten und indirekte Nachweise sind eine weitere Kenngröße die als Bewertung in den Arbeitsschritt mit einfließen soll. Auch eine solche Verwendung von semi-quantitativen Ansätzen bei Untergrundevaluierungen ist gebräuchlich und nachvollziehbar. Wichtig ist dabei, sich nicht auf nur einen, sondern präferentiell auf mehrere solcher Kenngrößen zu stützen, wie in diesem Fall vier. Dabei müssen diese verschiedenen Parameter letztendlich zusammengeführt oder verknüpft werden, wie z.B. Qualität und Quantität von Daten. Die Details zu diesem Arbeitsschritt sind noch nicht bekannt.

Auch bei der vierten Kenngröße **KX (= Komplexität)** sind noch keine weiteren Details bekannt. Jedoch muss dieser Parameter für die verschiedenen Wirtsgesteine sehr unterschiedliche Belange berücksichtigen. Diese sind beispielsweise:

- Tongestein: Paläogeographie und räumliche Variation in der Faziesverteilung im jeweiligen Ablagerungsbecken
- Salz (steil): starke tektonische Deformation und komplexe interne Strukturen. Möglichkeit des Wassereinbruchs. Überdrücke.
- Salz (generell): Migration von Fluiden Phasen im Salz.
- Kristallin: Ausdehnung der Kontaktmetamorphen Zonen. Multiple Intrusionen von Graniten.
- Ton/Salz: Sedimentologische Komplexität
- Allgemein: Tektonische Komplexität. Durchlässigkeit von Störungen und Klüften.
- Allgemein: Geomechanische Eigenschaften der Wirtsgesteine

Wie genau eine solche Komplexitätskenngröße aussehen soll ist noch unklar, wird wohl aber auch Teil des Geoblocks-Projektes sein. In der Kohlenwasserstoffindustrie finden solche Komplexitätsindizes Anwendung bei der Einschätzung des möglichen „recovery factors" (Gewinnungsfaktor) in einer Lagerstätte (siehe: Oil Recover Factor vs Reservoir Compliexity Index (RCI) (ihs.com)).

Die Verwendung von **Analog- oder Referenzdaten bei der Erstellung der Kenngrößen** ist derzeit noch nicht erkennbar in den Arbeiten der BGE. Dies könnte z.B. im Falle des Opalinustones Anwendung finden, da dazu in der Schweiz große Mengen von Daten der NAGRA zur Verfügung stehen (Download-Center | Nagra). Auch Daten aus der Kohlenwasserstoffindustrie und dem Bergbau könnten bei einigen Teilgebieten im Wirtsgestein Tongestein in Norddeutschland Anwendung finden. Augenblicklich kann zur Verwendung von Untergrundprojektdaten als Analog

noch keine Aussage gemacht werden. Selbiges gilt für die Frage, wie solche Analogdaten in den Kenngrößen verwendet werden sollen.

Fazit - Kenngrößen: Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Verwendung von Kenngrößen ein wichtiger und erfolgsversprechender Schritt ist, der durch die BGE eingeleitet wurde. Trotz alledem sind konkrete Aussage zu den Kenngrößen und deren letztendlichen Verwendung in den jeweiligen Arbeitsschritten zum jetzigen Zeitpunkt eher spekulativer Natur. Generell betrachtet wird hier schon vorab ihre Verwendung ausdrücklich unterstützt. Es muss jedoch noch abgewartet werden, wie solche Kenngrößen in den einzelnen Arbeitsschritten des Gesamt-Workflows der rvSU Verwendung finden.

Verwendung von Ungewissheiten in einzelnen Arbeitsschritten des Workflows

Wie bereits in früheren Gutachten angesprochen (Gtrötsch, 2022), wird auch bei den einzelnen Arbeitsschritten im Gesamt-Workflow der rvSU die Berücksichtigung der Ungewissheiten bei den jeweilig verwendeten Datentypen und deren Verknüpfung eine wichtige Rolle spielen. Zu diesen Arbeitsschritten soll dazu das seit längerem eingeleitete Forschungsvorhaben **Geoblocks** einen substanziellen Beitrag leisten. Resultate zu diesem Forschungsvorhaben der BGE mit mehreren Universitäten und Geo-Institutionen (z.B. RWTH Aachen, University of Aberdeen) sind jedoch noch nicht einsehbar.

Generell unterscheidet die BGE zwischen epistemischen und aleatorischen Ungewissheiten (Der Kiureghian & Ditlevsen 2009; BGE 2022b: Kap. 10). Diese werden wie folgt charakterisiert:

1) **Epistemische** Ungewissheiten
    a. Aufgrund von unvollständigem Wissen
    b. Reduzierbar (z.B. durch Daten-Akquisition)
    c. Beispiel: Quantifizierbar über die Kenngröße Datendichte (via DQL und DQN)
2) **Aleatorische** Ungewissheiten
    a. Aufgrund zufälliger, natürlicher Variabilitäten
    b. Nicht reduzierbar
    c. Beispiel: Kleinräumige Variationen der Gesteinsdurchlässigkeit

Dies ist eine von zahlreichen Möglichkeiten, um Ungewissheiten systematisch zu erfassen und zu charakterisieren. Wichtig ist letzteres, sprich dass eine solche Charakterisierung erfolgt. Leider gibt es bei der Anwendung und dem methodischen Umgang auch dazu noch keine weiteren Details, die für eine Begutachtung in Frage kommen.

Im Rahmen von geologischen Modellen und Modellvorstellungen decken epistemische Ungewissheiten solche Punkte ab, die bei ausreichenden Informationen und sehr hoher Datendichte prinzipiell reduziert werden könnten (z. B. Ungewissheiten in Bezug auf Mächtigkeitsvariationen oder Tiefenlage von geologischen Einheiten). Um aleatorische Ungewissheiten im Modell darzustellen, sind statistische Methoden notwendig (z. B. Wellmann & Caumon, 2018). Solche Ungewissheiten betreffen beispielsweise kleinräumige Änderungen der Gesteinseigenschaften aufgrund der natürlichen Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Gesteins (BGE, 2022b: Kap 5.1). Solche Variationen sind schon in Verwendung z.B. beim Arbeitsschritt Transport von Radionukliden innerhalb des rvSU-Workflows. Es bleibt abzuwarten, welche Arbeitsschritte wie Ungewissheiten berücksichtigen werden. Insgesamt ist diese Vorgehensweise zu begrüßen obwohl noch keine beurteilbaren Resultate vorliegen.

Anwendbarkeit einzelner Arbeitsschritte zur heterogenen Datenlage innerhalb der verschiedenen Wirtsgesteine

Eine systematische und standardisierte Auswertung der Standortregionen in gemeinsamen Arbeitsschritten innerhalb des rvSU-Workflow wird erschwert durch die Tatsache, dass nach StandAG vier unterschiedliche Wirtsgesteine als Optionen berücksichtigt werden müssen. Diese Wirtsgesteine erlauben gemeinsame Arbeitsschritte im Workflow, haben aber auch Unterschiede in ihren Eigenschaften, die berücksichtigt werden müssen. Einige Beispiele dazu werden im Folgenden kurz angesprochen. Dabei wird auch auf die Verwendung von Kenngrößen und Analogdaten eingegangen.

Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Wirtsgesteinen

Da es sich bei den vier verschiedenen Wirtsgesteinen um sehr unterschiedliche Gesteinstypen mit stark variierenden Eigenschaften handelt, besteht die berechtigte Frage, ob man alle Wirtsgesteine mit den gleichen Arbeitsschritten bearbeiten kann oder ob dazu eventuell Variationen von Arbeitsschritten notwendig sind, die auf das jeweilige Wirtsgestein zugeschnitten sind. Diese Frage kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet werden, da dazu die notwendigen Dokumentationen und Vorgehensweisen der BGE noch nicht bekannt sind. Die vorhandenen Einzelheiten (z.B. Abbildung 12) lassen noch keine weiteren Schlussfolgerungen zu.

Gemeinsamkeiten: 1D Profile, 2D Profilschnitte und 3D Modelle

Nicht in allen Fällen ist die aufwändige Erstellung von 3D-Modellen sinnvoll, z.B. wenn nur wenige Bohrdaten oder keine seismischen Daten zur Verfügung stehen, um räumliche Veränderungen im Untergrund erkennen zu können. Daher werden als erster Schritt im Rahmen der rvSU sogenannte repräsentative vertikale 1D-Profile entwickelt oder 2D Profilschnitte in den Teilgebieten angefertigt (Abbildung 13). Ein solches Vorgehen, 1D Profile und 2D Profilschnitte zur Untergrundcharakterisierung der einzelnen TUR einzusetzen wird für alle Wirtsgesteine als notwendig erachtet und bildet einen Basisbaustein für weitere Arbeitsschritte hin zur Geosynthese (Abbildung 8).

Unterschiede: Beispiel Gebirgsdurchlässigkeit

Gebirgsdurchlässigkeit ist eine Eigenschaft, die im StandAG in mehreren Punkten (Parametern) angesprochen wird, sprich als MA und als geoWK. Sie ist ein wichtiger Bestandteil der Untersuchungen, wobei jedoch deutliche Unterschiede innerhalb der verschiedenen Wirtsgesteine vorhanden sind.

Im ***Wirtsgestein Ton*** sind diesbezüglich meist dünn-bankige Einschaltung von Sand- und Kalksteineinlagerungen innerhalb der in Betracht gezogenen Tonformationen zu berücksichtigen (z.B. Flachwasserturbidite).

Im Teilgebiet 006 Lias ist das Öl-Muttergestein des Posidonienschiefers vorhanden, der in Norddeutschland sehr reif ist, was bedeutet das Öl aus dem Muttergestein generiert wurde und daraufhin in flachere geologische Schichten migriert ist. Diese Generation und Migration von Öl durch die Lias-Tonsteine hat höchstwahrscheinlich zusätzliche Gebirgsdurchlässigkeit generiert. Hohe organische Gehalte (***TOC = total organic carbon***) im Ton- oder auch Muttergestein (=

Posidonienschiefer) können also zu erhöhten Gesteinsdurchlässigkeiten führen. Dabei wird ein Reifegrad (= Maturität) im Muttergestein mit einem Vitrinitreflexionsindex >0,8 als nicht günstig eingeschätzt.

Es muss auch berücksichtigt werden, dass Behälter mit Radionukliden nicht in die Nähe von Tongesteinen kommen, die reich an organischen Komponenten (sprich TOC) sind, da sonst durch die entstehende Abwärme bei thermischer Reife die sekundäre Migration von Kohlenwasserstoffen einsetzen kann. Das Tongestein im Posidonienschiefer selbst wäre deshalb kein ewG und die Tonmächtigkeiten unterhalb und oberhalb müssten deshalb geprüft werden, ob die MA der Mächtigkeit des ewG erfüllt ist. Hohe TOC-Gehalte im Ton sind deshalb eine ungünstige Eigenschaft und muss bei der Evaluierung der TURs mitberücksichtigt werden.

Das SEPIA-Projekt der BGR unterstützt die Auswertung des TG 001 Opalinuston indem 300m tiefe Bohrungen im Opalinuston abgeteuft werden (z.B. Bohrungen Lauchheim, Honding, Metzingen). Dabei sind die Zielsetzungen:

- Faziesanalyse und Stratigraphie im Opalinuston in den Bohrungen
- Räumliche Faziesentwicklung im Sedimentbecken zur Zeit der Opalinustonablagerung
- Pumpversuche zur Analyse der lateralen Permeabilität (= Gesteinsdurchlässigkeit)

Pumpversuche sind neben Gesteinsmessungen an Bohrkernmaterial die verlässlichsten Indikatoren für die Gesteinsdurchlässigkeit (= Permeabilität) im Untergrund, die zur Kalibrierung von dynamischen Modellen gebraucht werden. Dabei wurden bei Pumpversuchen in der Bohrung Honding Gesteinsdurchlässigkeiten von 10^{-11} m/s gemessen also unterhalb der im StandAG vorgegebenen 10^{-9} m/s. In der Bohrung Lauchheim wurden dagegen 10^{-8} m/s gemessen, was auf die Bedeutung von permeablen (= durchlässigen) Sandschichten oder die teils heterogene Abfolge innerhalb des Opalinustones hinweist (pers. Komm.; Abbildung 5, Abbildung 13). Ein weiteres auffälliges Merkmal in den Kernen ist der starke Grad der ***Bioturbation***, der im Kernmaterial zu beobachten ist. Stärkere Bioturbation im Tonstein kann dabei ein Hinweis auf leicht erhöhte Gesteinsdurchlässigkeit sein (BGR - Projekte - Sequenzstratigraphie des Aalenium in Süddeutschland (SEPIA) (bund.de)).

Im ***Wirtsgestein Salz*** spielen dagegen z.B. unvorhergesehene Wassereinbrüche an Salz-internen Störungen eine große Rolle bei der Bewertung der Gebirgsdurchlässigkeit (Ghanbarzadeh et al., 2015). D.h., real existierende Salzformationen sind in der Praxis durchlässiger als sie in der Theorie eigentlich sein sollten. Dies ist auch an vielen sich im Abbau befindlichen Salzstöcken im Niedersächsischen Becken nachgewiesen, nicht zuletzt auch in der Grube Asse, die solche Wassereinbrüche erlitten haben. Eine weitere Ursache sind im Salz migrierende Salzlaugen, wie sie des Öfteren auch bei Bohrungen nach Rotliegend-Gaslagerstätten angetroffen werden (z.B. Bohrung Ameland-205, Niederlande). Salz ist also keine perfekte Barriere für fluide Phasen (z.B. Wasser, Öl, Gas).

Wiederum gegensätzlich dazu haben ***Kristalline Gesteine*** aufgrund ihrer geomechanischen Eigenschaften und der Präferenz zu einer bruchhaften Deformation sehr konträre Eigenschaften bei tektonischen Deformationen, sprich sie reagieren mit bruchhafter Deformation. Dies kann dazu führen, dass Im Kristallin Brüche und Klüfte im Gestein hohe vertikale Durchlässigkeiten bewirken können, während sie im Tongestein aufgrund des „clay smear potentials“, sprich Abdichtung von Klüften durch plastische Deformation kommt.

Dies bedeutet, dass nicht nur die heterogene Datenlage, sondern darüber hinaus auch die Besonderheiten der einzelnen Wirtsgesteine bei der Auswertung der TURs von Bedeutung sind.

Diese Unterschiede spielen deshalb bei der Einschätzung der Kenngröße ***geologische Komplexität (KX)*** in den TURs der verschiedenen Wirtsgesteine eine wichtige Rolle. Da KX nach derzeitiger Kenntnis einer subjektiven Quantifizierung (1-6) unterworfen werden soll, sollten weitere Faktoren darin einfließen. Auch dabei müssen in den einzelnen TURs höchstwahrscheinlich ***Analogdaten*** verwendet werden.

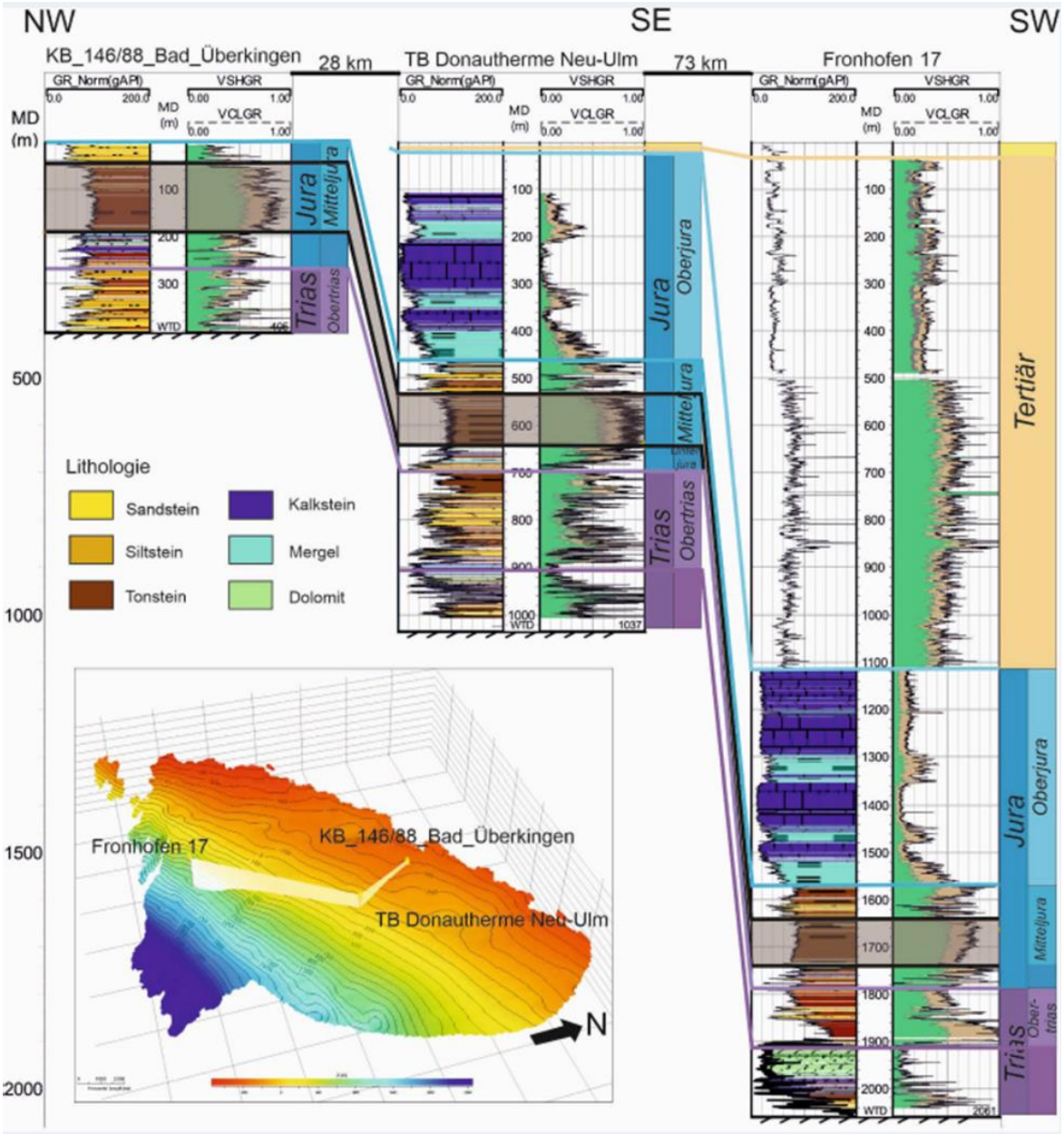

Abbildung 13: 2D Profilquerschnitt und Korrelation des Opalinustons in drei Bohrungen im TG 001 des Albvorlandes. Die 3D Karte zeigt die Tiefenlage der Bohrungen von der Schwäbischen Alb bis hinein ins Molassebecken (BGE, 2022b: Abb 85). In den noch notwendigen, detaillierteren, sequenzstratigraphischen Untersuchungen ist zu erwarten, dass dabei weitere Inhomogenitäten in der „offen marinen" Gesteinsabfolge (grau) erkennbar werden. Dies ist von Bedeutung für die räumliche Analyse von Gesteinsdurchlässigkeiten im Teilgebiet. Zusätzliche Studien dazu sind notwendig um ein besseres Verständnis von oft dünnen Sandlagen und deren Liefergebieten (z.B. Flussdeltas) zu bekommen.

Unterschiede: Beispiel Tektonische Deformation und geomechanische Eigenschaften

Tektonische Deformation, die in Abhängigkeit von den geomechanischen Gesteinseigenschaften zu Klüften, Brüchen oder Verformungen im Gesteins führen, haben in den vier Wirtsgesteinen signifikant unterschiedliche Auswirkungen (siehe auch vorheriges Kapitel).

Kluft- und Störungsflächen sind in harten Gesteinen (z.B. Wirtsgestein Kristallin) ein wichtiger Risikofaktor für hohe vertikale Durchlässigkeiten aufgrund der geomechanischen Neigung zur ***bruchhaften Deformation***, die einen schnellen Transport von Radionukliden ermöglichen kann, falls die Kluftfläche nicht sekundär wieder verschlossen wird (z.B. durch Kalzit- oder Quarz-Zementation).

Im Gegensatz dazu ist das in Tongesteinen wichtige „**Clay Smear Potential“,** sprich die Eigenschaft von relativ weichen Tongesteinen (z.B. Tertiäre Tongesteine) Klüfte oder kleinere Störungen schnell wieder zu verschließen und dadurch die Gesteinsdurchlässigkeit vertikal, aber auch lateral zu reduzieren, eine grundsätzliche positive Gesteinseigenschaft (Jolley et al., 2007; Bourg & Ajo-Franklin, 2017). Eine solche Eigenschaft kehrt sich jedoch ins Gegenteil um bei stark verfestigten oder leicht metamorphen Tongesteinen (z.B. Boda Tonstein, Ungarn). Ergebnisse zu solchen vergleichenden Studien in den acht Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongestein konnten bis dato noch nicht bei der BGE eingesehen werden.

Darüber hinaus führen geomechanisch weiche Gesteine wie Ton aber zu verstärkter ***Erosion***, etwa ausgelöst durch zukünftig zu erwartende Eisbewegungen und dadurch entstehende glaziale Rinnen mit Eindringtiefen von max 300m, in extremen Fällen von bis zu 500 m.

Im Falle der Abwesenheit von Daten im TUR selbst müssen dabei auch wiederum Analogdaten verwendet werden, die den verschiedenen Gesteinseigenschaften der acht Teilgebiete Tongestein Rechnung tragen.

Unterschiede: Beispiel Paläogeographie in Tongesteinsbecken

Wie schon in den vorhandenen Studien der BGE und aus dem Forschungsvorhaben SEPIA (BGR-Projekt) abgeleitet wurde, spielt innerhalb der acht verschiedenen Tonablagerungsbecken deren Paläogeographie (Konfiguration des Meeresbeckens zur Zeit der Ablagerung) eine wichtige Rolle um z.B. das Risiko von dünnbankigen, permeablen Sandlagen einschätzen zu können. Dazu notwendige detaillierte Rekonstruktionen dieser Tonablagerungsbecken in den verschieden Zeitbereichen im Jura, in der Kreide und im Tertiär sind derzeit nicht vorhanden. Wie diese Erkenntnisse in die Bewertungen einfließen sollen, ist noch nicht bekannt, jedoch könnten dazu die ***Kenngrößen KX und IDN*** Verwendung finden. Auch hier werden nicht alle TURs Daten oder Informationen haben und deshalb wird die Verwendung von ***Analogdaten*** wohl notwendig sein. Details wie dies umgesetzt werden soll sind noch nicht bekannt, aber Fazies- und sequenzstratigraphische Modelle in allen Tonablagerungsbecken sind dazu von großem Nutzen. Die diesbezüglich vorhandenen Publikationen liefern keine ausreichenden Informationen, um adäquate ***konzeptionelle geologische Modelle*** für alle TG zu bekommen (z.B. Abbildung 5).

Unterschiede: Weitere Datentypen und Gebiete ohne hinreichende Informationen

Obwohl geowissenschaftliche Evaluierungen im Untergrund meist von Bohrdaten und seismischen Daten Gebrauch machen, werden darüber hinaus noch eine Vielzahl von weiteren Datentypen verwendet, z.B. Geochemische Daten von Gesteinen und fluiden Phasen.

Auch Flugzeug- und Satelliten-gestützte Daten sind von Bedeutung wie etwa ***Gravimetrie- und Magnetfeld-Messungen***, die bei der Evaluierung des Wirtsgestein Kristallin von Bedeutung sind (z.B. GzME Saxothuringikum). In Tongesteinsformationen sind dagegen solche Messerverfahren von geringerer Bedeutung. Neben einer qualitativen Interpretation und Bewertung der gravimetrischen und magnetischen Feldverteilungen und Anomalien wurden einige Bereiche in der Grauwacken-Einheit und dem Lausitzer-Komplex durch kombinierte 2,5-dimensionale Modellrechnungen quantitativ untersucht (BGE, 2022b: Abb. 67). Die kombinierten Modellrechnungen für die Zonen J, K, F und A1 lassen viele verschiedenen Szenarien zu (d.h. unterschiedliche Modellannahmen führen zu identischen Projektionen des Potenzials an der Erdoberfläche). Grundsätzlich besteht für die magnetische Anomalie A1 die Möglichkeit, dass es sich um einen großen plutonischen Körper handelt, der die Mindestanforderungen erfüllen könnte. Gleichzeitig gibt es ***große Ungewissheiten bei der geophysikalischen Interpretationen***. D.h., die mögliche Bandbreite dieser Interpretationen für die Zonen A1, J – K und F in Hinblick auf die Mächtigkeit, Teufenlage und Suszeptibilitätskontraste von möglichen kristallinen Wirtsgesteinskörpern ist immens groß. Dies zeigt, dass essenzielle Informationen zu einer Bewertung im Rahmen der rvSU und der Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG nicht vorliegen. Geologische Informationen zur Mächtigkeit, Teufenlage sowie zur Gesteinsausbildung von möglichen kristallinen Wirtsgesteinskörpern können in diesen Gebieten nicht abgeleitet werden, auch nicht durch die zusätzliche Interpretation von vorhandenen geophysikalischen Potenzialfelddaten und Analogieschlüssen.

Gebiete mit diesen kontaktmetamorphen Gesteinseinheiten in der Grauwacken Einheit können somit als mögliche ***Gebiete ohne hinreichende Informationen*** in Frage kommen (BGE, 2022b: Abb 67). Näheres dazu ist jedoch noch nicht bekannt und somit muss eine Antwort auf diese Frage noch auf die weiteren Arbeiten der BGE warten.

Umgang mit Gebieten ohne hinreichende Informationen („White Space“)

Zuerst soll hier noch einmal kurz auf das Konzept der italienischen Flagge bei der Beschreibung von Ungewissheiten hingewiesen werden (Grötsch, 2022). Dabei wird versucht, transferiert auf die Endlagersuche, etwa Indikatoren für günstige Eigenschaften eines Standorts semi-quantitativ (grün) und ungünstige Eigenschaften (rot) darzustellen. Dazu wird auch eine Einschätzung gemacht zum sogenannten „white space“ sprich den verbleibenden Ungewissheiten aufgrund fehlender Informationen inklusive einer Abschätzung des „Wissen, was ich nicht weiß“. Von der BGE bereits eingeführte (und weitere) Kenngrößen können dazu verwendet werden (BGE, 2022b: 231ff). Die Resultate können dabei quantitativ ausgedrückt werden und sind dadurch einfach vergleichbar über die verbleibenden TURs hinweg.

Indem die TUR-Kategorien verknüpft werden mit Kenngrößen wie etwa der Datenlage und/oder der Wahrscheinlichkeit der Kategorienzuordnung, kann die Analyse in späteren Arbeitsschritten erleichtert werden. Auch der Umgang mit der Herausforderung „zu wissen, was ich nicht weiß“ kann vergleichbar evaluiert werden. Dies kann zu einem späteren Stadium auch helfen, **Gebiete ohne hinreichende Informationen** zu identifizieren, etwa via Grenzwerte (cut-offs) und eventuell notwendige Rücksprünge in diesen TURs zu untermauern. Dies wird wichtig bei einzelnen TURs bei

denen die derzeitige Datenlage keine klare Aussage zulässt aufgrund der fehlenden digitalen Verfügbarkeit von Daten oder des Fehlens von hinreichenden Informationen.

Aus den Gesprächen mit der BGE und den Dokumentationen der BGE (BGE, 2022a, b) geht hervor, dass der oben angesprochene Teil eines Workflows mit seinen Arbeitsschritten noch nicht vorhanden ist. Nach Äußerungen der BGE wird aber derzeit an einer Lösung diesbezüglich gearbeitet.

Diese Arbeitsschritte beschäftigen sich ausdrücklich mit dem Problem der inhomogenen Datendichte und Datenverfügbarkeit im Untergrund und werden in der Exploration nach Kohlenwasserstoffen als „***Risking***" bezeichnet (AAPG, 2022). Dieser Risikoabschätzungs-Prozess steht für die Identifikation und Quantifizierung der Ungewissheiten mit Hilfe von Kenngrößen (Abbildung 14).

Aus den abgeleiteten Parametern lassen sich sogenannte „***Common Risk Segment Maps***" also überlagernde Kartendarstellungen der abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten (Probability of Success = PoS) darstellen (Abbildung 14). Diese können dann noch weiter zusammengefasst werden („Total PoS") und ebenfalls als Karte dargestellt werden (Abbildung 14, letzter Arbeitsschritt).

Ein Arbeitsschritt des „Risking" ist als solcher nicht im StandAG festgelegt und auch bis jetzt in den BGE-Berichten nicht explizit ausgeführt. Die BGE hat mit der Einführung von sogenannten Kenngrößen (BGE 2022b: S. 232 ff) dahingehend aber schon einen weitgehenden Schritt unternommen, der es erlaubt solche zusätzlichen Arbeitsschritte in den Gesamtarbeitsablauf zur Ermittlung der Standortregionen einzuführen (sprich Phase I Schritt 2). Aus den Gesprächen mit der BGE ist noch nicht ersichtlich, wie solche neuen Arbeitsschritte angepasst auf die Endlagersuche aussehen könnten – auch daran wird derzeit gearbeitet.

Es wird davon ausgegangen, dass ***Rücksprünge*** ermöglicht werden müssen (BGE, 2021) und eine iterative Arbeitsweise für einen Teil der TURs verwendet werden muss, etwa für einige der TURs in den Kategorien A und B, sprich TURs mit möglicherweise günstigen Eigenschaften aber wenigen oder nicht geeigneten Daten. Es muss letztendlich gewährleistet werden, dass Gebiete aus dem Suchprozess nicht allein deshalb ausgeschlossen werden, weil über sie zu wenig bekannt ist, sofern zu erwarten ist, dass sich unter diesen Gebieten ein Standort befinden könnte.

Insgesamt gesehen, wird die quantitative Ausweisung der vorhandenen Informationen in Teiluntersuchungsgebieten als sehr sinnvoll betrachtet, da sie Transparenz erzeugt und aufzeigt, welche TURs eventuell ohne hinreichende Informationen sind. Dazu eignet sich der Gebrauch von Kenngrößen und Methoden ähnlich wie in Abbildung 14 dargestellt.

Einer der wichtigen Fragen die während des vor-Ort-Besuches angesprochen wurde, ist dieser noch ausstehende Arbeitsschritt im Workflow, der die Einschätzung von Gebieten mit nicht hinreichender Datenlage betrifft. Dazu hat die BGE grundsätzliche Stellungnahmen dokumentiert:

*„Wenn bei der geowissenschaftlichen Ausarbeitung Gebiete ohne hinreichende Informationen identifiziert werden, so werden diese **separat als solche ausgewiesen**. Diese Gebiete ohne hinreichende Informationen werden im Folgenden, während der rvSU, geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht weiterbearbeitet, sondern **erst mit dem Standortregionen-Vorschlag bewertet**.*

*Mit dem Standortregionen-Vorschlag durch die BGE wird der weitere Umgang mit den betroffenen Gebieten ohne hinreichende Informationen **individuell empfohlen** und fachlich begründet. Hier wird die Begründung in der jeweiligen Geosynthese wieder aufgegriffen und es erfolgt eine Prüfung. Dabei wird geprüft, ob eine Region ohne hinreichende Informationen eine gleichwertige oder bessere*

Bewertung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erwarten lässt, als dies bei den ermittelten Standortregionen der Fall ist. Bei positiver Prüfung wird im Rahmen des Standortregionenberichts empfohlen, dass das ausgewiesene Gebiet in Phase II anhand eines spezifischen Erkundungsprogramms weiter im Suchprozess verbleibt. Bei negativer Prüfung wird hingegen empfohlen, dass das ausgewiesene Gebiet in Phase II nicht übertägig erkundet wird.

Die Empfehlung über den weiteren Umgang mit einzelnen Gebieten hängt auch maßgeblich von der Eignung der ermittelten Standortregionen bezüglich der bestmöglichen Sicherheit ab. Mit Blick auf die Suche und Auswahl des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit ***wäre es nicht zielführend, systematisch Gebiete ohne hinreichende Datenlage zu erkunden, wenn für diese Gebiete keine oder nur eine geringe Aussicht besteht,*** *dass sie sich in dem vergleichenden Verfahren am Ende der Phase II durchsetzen können. Grundsätzlich gilt, dass kein Gebiet aufgrund nicht hinreichender Informationen gegenüber Gebieten mit ausreichend Informationen benachteiligt wird. Die Bewertung hinsichtlich der Eignungsfähigkeit dieser Gebiete für einen Endlagerstandort wird einer großen Bedeutung im Rahmen der Umgangsempfehlung der BGE zuteil."* (BGE, 2022b: S. 250).

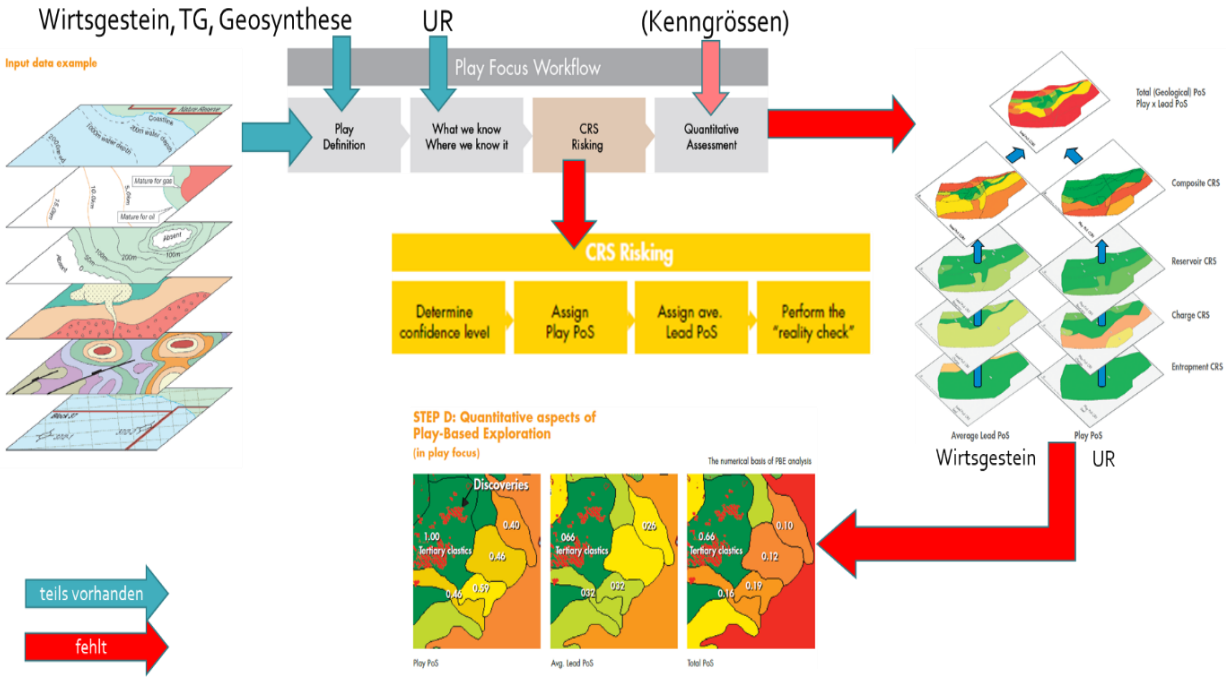

Abbildung 14: Schematische Darstellung eines mit Play Based Exploration (PBE) vergleichbaren Arbeitsablaufes angewandt auf die quantitative Evaluierung der Untersuchungsräume unter Berücksichtigung der Ungewissheiten und basierend auf Kenngrößen. Solche Kenngrößen im Endlagerbereich sind schon in BGE (2022b: S.231ff) angedacht und könnten entsprechend als „common risk segment" (CRS) Karten dargestellt werden (AAPG, 2022). Dies würde, ähnlich wie in der Exploration nach Kohlenwasserstoffen eine vergleichende, quantifizierbare Evaluierung der TURs (äquivalent zu „Leads") via eines PoS oder ähnlicher Faktoren erlauben. Darin ist auch die Quantifizierung der Ungewissheiten enthalten und mögliche Rücksprünge in der Evaluierung von TURs könnten so ebenfalls nachvollziehbar und iterativ ausgeführt werden. Die fehlenden Arbeitsschritte im Workflow der BGE sind als rote Pfeile dargestellt. Blaue Pfeile zeigen vorhandene Arbeitsschritte (Grötsch, 2022).

Es ist als durchaus sinnvoll zu bewerten, dass TURs mit geringer Aussicht auf Eignung für eine Standortregion ausgeschlossen werden, auch wenn in diesem Untersuchungsraum nur eingeschränkt Informationen oder Daten vorhanden sind.

Einige der zu verwendenden Kriterien sind dabei:

- ob eine **Wirtsgestein**sformation in einem Gebiet mit hoher Wahrscheinlichkeit angetroffen werden kann oder nicht
- die **Mächtigkeit**, **Teufenlage** sowie die **lithologische Ausprägung** des Wirtsgesteinskörpers abgeschätzt werden können
- die Definition von nicht hinreichenden Informationen wird nicht direkt an einzelne Kriterien des StandAG gekoppelt
- eine allgemeingültige Grundvoraussetzung soll formuliert werden, die erfüllt sein muss, um Gebiete im Sinne des Standortauswahlverfahrens bearbeiten zu können.

Bei den jüngsten Unterredungen wurden jedoch keine weiteren Details oder Dokumentationen dazu vorgestellt. Deshalb kann auch diese Frage zum gegenwärtigen Zeitpunkt hier nicht weiter erörtert werden. Es scheint jedoch deutlich zu sein, dass solche TURs, nachdem sie aufgrund von Kenngrößen und der Geosynthese erkannt sind, auch ***weiter im Verfahren mitgeführt werden*** bis zur Standortregionenauswahl.

Zurückstellung von Teiluntersuchungsräumen (TUR)

Die vorgestellte Unterteilung von Teilgebieten in TURs (siehe Beispiel Abbildung 9) vereinfacht eine nachfolgende Einengung der verbleibenden Bereiche in günstige oder ungünstige TURs mit Hilfe von Prüfschritten und den assoziierten TUR-Kategorien (Abbildung 10). Dadurch wird auch eine Vereinfachung der anschließenden Geosynthese und der Anwendung der geoWK ermöglicht, was sicherlich zur verbesserten Transparenz im Verfahren beiträgt. Ein erstes Beispiel mit Kartendarstellung wurde beim vor Ort Besuch in Peine aus der Unteren Meeresmolasse gezeigt (siehe Kapitel Einteilung der Teilgebiete in TURs (Beispiel: Untere Meeresmolasse).

Trotzdem verbleiben die folgenden Fragen zum jetzigen Zeitpunkt noch offen:

a. Müssen aufgrund von fehlenden Informationen TURs zurückgestellt werden?
b. Wie kommen dabei Arbeitsschritte im Workflow zum Tragen die die jeweiligen Ungewissheiten in den TURs („white space“) abschätzen?
c. Wie werden die 3D Modelle aus dem Untergrund dabei verwendet?
d. Wie können, aufgrund der fehlenden Datenverfügbarkeit zunächst zurückgestellte Gebiete zusammen mit den anderen Teilgebieten bewertet werden ohne zusätzliche neue Daten?
e. Wie sollen mögliche Rückschritte gehandhabt werden?

Da beim Besuch bei der BGE zu diesen Fragen keine oder nur Teil-Ergebnisse verfügbar waren, muss eine weitere Beurteilung die kommenden Dokumentationen der BGE abwarten. Die BGE hat aber dazu schon weitgehende Fortschritte erzielt, die jedoch noch nicht der Öffentlichkeit vorgestellt werden können, also einen derzeitigen Arbeitsstand repräsentieren.

Fazit – Status zum Umgang mit heterogener Datenlage

Der von der BGE vorgestellte Prozess der weiteren Unterteilung der verbleibenden Teilgebiete in TURs ist sinnvoll und nachvollziehbar. Jedoch verbleibt die Frage: Wie kann die Einteilung in Kategorien erfolgen, wenn nicht ausreichend Daten aus dem Untergrund zur Verfügung stehen?

Die verbleibenden Ungewissheiten („white space“) aufgrund von fehlenden Daten wird deshalb auch ein mögliches Kriterium zur Unterteilung in TURs sein. Es könnten dadurch auch eventuell notwendige Rücksprünge zu TURs im weiteren Verlauf des Verfahrens erleichtert werden. Die Größe und Anzahl von TURs ohne hinreichende Daten ist gegenwärtig noch nicht abschätzbar.

Auch die Frage, wie die BGE im Verfahren zunächst zurückgestellte Gebiete ohne hinreichende Informationen mit den ermittelten Standortregionen vergleichen will, wenn keine zusätzlichen Informationen hinzukommen, ist ungeklärt. Da keine weiteren Details zum geplanten Workflow der BGE vorgestellt wurden, kann auch dazu keine weitere Aussage gemacht werden.

Es wird hier zusammenfassend festgestellt, dass eine Verwendung einzelner, im März 2022 von der BGE vorgestellter Arbeitsschritte aus den Wirtsgesteinen Steinsalz flach und Kristallin (BGE, 2020b: Kap. 5.1) auf das Wirtsgestein Ton übertragen werden können. Ein gutes Beispiel dafür sind die Thiessen-Polygon Kartendarstellungen zur Kenngröße Datenquantität (DQN). Allerdings sind bis dato nur vereinzelte Arbeitsschritte dokumentiert, d.h. ein endgültiger Workflow mit allen Arbeitsschritten ist noch nicht verfügbar. Es bleibt also abzuwarten, inwieweit es auf Wirtsgesteine angepasste Lösungen geben wird oder ob ein standardisierter Workflow für alle Wirtsgestein verwendet werden soll.

Gesamtbeurteilung: Referenzdatengebrauch, Heterogene Datenlage und Workflows

Ziel der jetzigen Arbeiten der BGE ist es von 90 verbleibenden Teilgebieten Standortregionen aus den Teiluntersuchungsräumen (TUR) auszuwählen, die mit obertägigen Erkundungsprogrammen weiter evaluiert werden sollen. Dazu muss eine Methode zur rvSU entwickelt werden (Phase I, Schritt 2) nach den gesetzlichen Vorgaben des StandAG. Große Teile der rvSU-Methode sind in den jüngsten Dokumentationen nun veröffentlicht worden (BGE, 2022a, b). Allerdings wird auch durch die BGE festgestellt, dass dies ein Arbeitsstand ist, der noch weiterer Entwicklung bedarf.

Insgesamt betrachtet hat die BGE wieder weitreichende Fortschritte in der Methodenentwicklung zur rvSU erzielt. Derzeit muss aber immer noch über einen Arbeitsstand gesprochen werden, da seit März 2022 keine weiteren Dokumentationen veröffentlicht wurden oder dem Gutachter solche vorgestellt wurden. Es wurde inzwischen viel Vorarbeit geleistet und neue Ansätze zum Workflow und den einzelnen Arbeitsschritten gezeigt, die zum Teil schon gut umgesetzt sind (z.B. Parametrisierungs-Projekt). Es wurden dabei nicht nur interne Projekte initiiert, sondern auch externe Projekte auf den Weg gebracht (z.B. Geoblocks). Ein gesamtheitlicher Workflow zur Behandlung von Ungewissheiten ist gegenwärtig noch nicht vorhanden und wird erst im kommenden Jahr erwartet. Eine Empfehlung ist dabei, Ungewissheiten mit Risiken zu verknüpfen, z.B. das Risiko, dass gut geeignete TURs ausgeschlossen werden ist letztendlich an die Ungewissheiten aufgrund der heterogenen Datenlage gebunden, d.h. den sogenannten „White Space“ oder das „Wissen, was man nicht weiß“.

Die einzelnen, vom NBG geäußerten Fragestellungen an den Gutachter werden hier im Folgenden kurz zusammenfassend angesprochen.

Datenlage

Die BGE hat unter beträchtlichem personellem und finanziellem Aufwand umfangreiche Datenabfragen bei den SGDs, der BGR, den Bergbauämtern und Privatfirmen initiiert. Dabei wurden auch Dienstleister eingebunden. Insgesamt muss aber festgehalten werden:

- Es fehlt ein Deutschlandweites ***Qualitätssiegel für vorhandenen Geodaten*** bei den SGDs und der BGR. Dazu braucht es landesweite, einheitliche Absprachen zwischen den Behörden. Solche Datenstandards würden auch die Tätigkeit der BGE stark vereinfachen. Gegenwärtig hat einzig Baden-Württemberg ein solches Gütesiegel. Im Augenblick muss die Datenqualität von der BGE selbst eingeschätzt werden, was aufgrund der fehlenden Informationen zum Ursprung der Daten und Interpretationen eine schwer lösbare Aufgabe ist.
- Ziel der Datenanfragen ist es, diese ***Daten digital in 3D Modelle einzulesen*** (Petrel). Leider ist das Fehlen von Qualitätsstandards dabei problematisch da eine Aussage zur Vertrauenswürdigkeit eines Datensatzes nicht möglich ist.
- Bei den SGD vorhandene ***Schichtenverzeichnisse*** zu Bohrungen sind häufig überarbeitungswürdig, wobei es auch hier in den einzelnen Bundesländern keine einheitliche Vorgehensweise gibt.
- ***Zeitraum von Anfrage*** bis zur Datenbereitstellungen kann mehrere Monate in Anspruch nehmen und ist häufig mit großen bürokratischen Hindernissen verbunden.

- ***Forschungsprojekte*** der BGE können nur initiiert werden, wenn digitale Daten verfügbar sind und unterliegen so Verzögerungen.
- ***Digitalisierte Daten der BGE*** werden wieder an die SGD der Länder zurückgeführt, nicht an die BGR. Die BGR muss sich mit den Ländern separat einigen welche Daten ausgetauscht werden können. Dies ist eine fragwürdige Praxis und nicht mehr zeitgemäß.
- Eine Standardisierung der Verwendung von geographischen ***Koordinatensystemen*** ist nicht gewährleistet. Es gibt Fälle von SGD, die selbst mehrere solcher Systeme gebrauchen.
- NRW stellt ***Bergbaudaten*** nicht zur Verfügung trotz des GeoIDG von Juni 2020.

Diese Erfahrungen zeigen deutlich auf, dass die digitale Datenverfügbarkeit und deren Verarbeitung stets noch eine enorme Herausforderung darstellt für die BGE und andere Geo-Institutionen. ***Bundesweite Datenstandards***, Qualitätssiegel und die Verwendung von gemeinsamen Koordinatensystemen sind dabei eine wichtige Voraussetzung.

Referenzdatengebrauch und Ungewissheiten

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass trotz der noch fehlenden Dokumentationen von Seiten der BGE deutliche Fortschritte in der Entwicklung von 3D Modellen und des gesamten Workflows erkennbar sind, auch bei der Verwendung von Referenzdaten. Die meisten weiteren Schlussfolgerungen sind noch ähnlicher Natur wie schon in Grötsch (2022) dokumentiert.

Referenzdaten sind ein notwendiger Bestandteil in verschiedenen Arbeitsschritten des Gesamt-Workflows der rvSU-Methodik, da nicht ausreichend Untergrunddaten für eine vollumfassende Anwendung der rvSU-Methodik vorliegen, selbst im unrealistischen Falle der digitalen Verfügbarkeit aller Untergrunddaten. Deshalb ist eine transparente Dokumentation zur Datenlage via Kenngrößen notwendig, wie schon initial dokumentiert in BGE (2022b). Wie hoch der ***Anteil von Referenzdaten*** oder der fehlenden Daten sein wird, ist im Augenblick stets noch schwer abzuschätzen, wird aber wohl für jeden TUR unterschiedlich sein.

Es muss aber auch festgehalten werden, dass nicht für alle Datentypen im Untergrund oder alle Arbeitsschritte im Gesamt-Workflow Daten oder Referenzdaten verfügbar sein werden. Dies bedeutet, dass ***Ungewissheiten*** und der sogenannte „White Space“ (Grötsch, 2022) semi-quantitativ dokumentiert werden sollten. Dadurch, und falls notwendig, kann die Verwendung von Rücksprüngen einfacher und leichter verständlich gemacht werden. Die BGE spricht in solchen Fällen von der Verwendung von sogenannten „**Best Estimates**“ (BGE, 2022b: 239). Diese sollen dann auch Rücksprünge in Phase II Schritt 1 ermöglichen, sofern sich die getroffenen Annahmen mit zunehmendem Informationsgewinn oder über Erkundungsmaßnahmen in Phase II als zu pessimistisch herausgestellt haben. Obwohl genauere Dokumentationen der BGE noch nicht vorliegen, ist davon auszugehen, dass ***Rücksprünge*** notwendig sind und es auch in Phase II Schritt 1 noch zu einer vereinzelten Neubewertung von noch nicht als Kategorie C und D ausgeschlossenen, fraglichen TURs kommen kann. Dies ist eine sinnvolle Option und nachvollziehbar.

Insgesamt ist festzustellen, dass eine ***frühere Verwendung*** und Dokumentation ***von Ungewissheiten*** im Arbeitsablauf empfohlen wird. Es ist dabei wichtig schon vorab zu wissen, welche TURs hohe Ungewissheiten haben, etwa mit Hilfe von semi-quantitativen Methoden und unter Verwendung von Kennzahlen.

Heterogene Datenlage

Eine der Fragestellungen zu diesem Gutachten zielt auf den **Workflow** zum Umgang mit der **heterogenen Datenlage** in den Teilgebieten ohne hinreichende Informationen ab.

Dabei ist die vorgestellte ***Klassifizierung der Datentypen*** (direkt, indirekt, interpretativ) als akzeptable Lösung zu betrachten, auch wenn indirekte Daten oft mit interpretativen Daten überlappen. Häufig wird diesbezüglich eine Unterscheidung zwischen Rohdaten und prozessierten und damit interpretierten Daten gemacht (z.B. Bohrlochmessungen, Seismik). Es ist jedoch fraglich, ob ein Großteil der digitalen Rohdaten aus dem Untergrund (noch) zugänglich ist.

Die Einführung des Konzeptes der ***Kenngrößen*** wird hier ausdrücklich unterstützt. Auch die Verwendung verschiedener solcher Kenngrößen (z.B. DQN, DQL, IDN, KX) macht den **Gebrauch von Referenz- oder Analogdaten notwendig**. Es ist jedoch stets noch nicht bekannt wie solche Kenngrößen in den verschiedenen Arbeitsschritten Verwendung finden werden, sprich wie der letztendliche Workflow der rvSU diese einbinden wird. Sicherlich werden Kenngrößen dabei hilfreich sein, zum einen Ungewissheiten zu quantifizieren und zum anderen Vergleichbarkeit von Ergebnissen in den einzelnen Arbeitsschritten zu ermöglichen.

Durch die Quantifizierung von Ungewissheiten werden sich auch die ***Gebiete*** oder TURs herauskristallisieren, die ***ohne hinreichende Informationen*** sind. Dabei ist es wahrscheinlich, dass in einigen Fällen ein frühzeitiger Ausschluss möglich ist, in anderen Fällen wohl auch TURs zurückgestellt werden müssen. Wie häufig solche Fälle in den Teilgebieten auftreten werden, ist bis heute nicht einzuschätzen. Auch ist es unklar, wie solche Fälle in Phase II Schritt 1 letztendlich im Workflow behandelt werden sollen, speziell ohne neu hinzugekommene Daten.

Gesamt-Workflow und Arbeitsschritte

Es verbleibt jedoch die Frage: Wie kann ein Workflow durchgeführt werden, wenn nicht ausreichend Daten aus dem Untergrund zur Verfügung stehen? Die verbleibenden Ungewissheiten aufgrund von fehlenden Daten sollte deshalb auch ein mögliches Kriterium zur Unterteilung in TURs sein. Es könnten dadurch im weiteren Verlauf des Verfahrens auch möglicherweise notwendige Rücksprünge zu vereinzelten TURs erleichtert werden.

Die wichtigste Beobachtung des vorhergehenden Gutachtens (Grötsch, 2022) ist die bis heute noch nicht befriedigende und unvollständige Implementierung von Ungewissheiten im Gesamt-Workflow. Die Dokumentationen der BGE und auch die geführten Gespräche haben gezeigt, dass die BGE diesem Aspekt inzwischen große Bedeutung beimisst.

Verschiedene Arbeitsschritte im Gesamtarbeitsablauf der rvSU-Methodik benötigen verschiedene Methoden zur Analyse der Ungewissheiten. Es wird/wurde deshalb empfohlen:

1) Die Methodik der Analyse von Ungewissheiten auf einzelne Arbeitsschritte anzupassen.
2) Den sogenannten „white space“ im italienischen Flaggenkonzept und die Ungewissheiten per TUR zu quantifizieren mit Hilfe der Verwendung von verschiedenen Kenngrößen.
3) Quantitative Kenngrößen und daraus berechnete Faktoren in Kartenform darzustellen (z.B. als „common risk segment maps“).
4) Verbal-argumentative Beschreibungen der Einschätzungen von TURs durch „decision quality“ mit Hilfe von sechs semi-quantitativen Kriterien zu unterstützen.

Die BGE hat die ***Notwendigkeit*** zur Einführung von ***Kenngrößen*** bereits dokumentiert (BGE 2022b), jedoch ist bis heute die ***Anwendung*** nicht deutlich, wird aber im Parametrisierungs-Projekt der BGE gegenwärtig bearbeitet. Erste Einblicke in den Arbeitsstand sind vielversprechend, lassen sich aber noch nicht weitergehend beurteilen. Es wird erwartet, dass die Resultate aus diesem Projekt auch eine integrative Betrachtung von Ungewissheiten, Risiken, benötigten Modellstudien und den Entscheidungen, die nach StandAG gefällt werden müssen, zulassen wird.

Nächste Schritte

Wie schon im StandAG festgesetzt und von der BGE hinlänglich erkannt, müssen die sicherheitsrelevanten Ungewissheiten in Forschungs- und Entwicklungsbedarf (F&E) überführt werden, um soweit möglich eine Reduktion der jeweiligen Risiken zu erreichen. Dazu hat die BGE schon eine Anzahl von Projekten ausgeschrieben oder initiiert (z.B. Geoblocks). Die Integration der Resultate wird ein weiterer wichtiger Schritt zum letztendlichen Gesamt-Workflow darstellen und ist abhängig vom Fortschritt der einzelnen Projekte.

Fazit - Gesamtbeurteilung

Obwohl der Gesamt-Workflow und die einzelnen Arbeitsschritte mit der Handhabung der relevanten Ungewissheiten noch nicht vorhanden ist, haben die Gespräche mit der BGE gezeigt, dass inzwischen viel Vorarbeit geleistet wurde. Neue Studien zu den einzelnen Arbeitsschritten sind vorhanden und zum Teil schon gut umgesetzt (z.B. Parametrisierungs-Projekt der BGE). Unterstützt wird dies von internen und externen Projekten, die von der BGE auf den Weg gebracht wurden.

Eine positive Entwicklung ist bei der BGE-internen Qualitätssicherung von vorhandenen geologischen Modellen zu beobachten – ein wichtiger Schritt, der schon klar ersichtlich zur Hebung von Standards geführt hat.

Abschließend betrachtet, sind gute Ansätze und Fortschritte in den Arbeiten der BGE zu beobachten. Eine weitergehende Antwort auf die Fragestellungen des NBG (siehe Kapitel Aufgabenstellung) muss jedoch die kommenden Dokumentationen der BGE abwarten.

Des Weiteren wird auf frühere Empfehlungen und ihren Status im Anhang verwiesen (siehe Kapitel Gutachter-Empfehlungen und deren Status).

Anhang

Literaturverzeichnis und verwendete Referenzen

AAPG (2022): IBA (Imperial Barrel Award) > Resources > Training > Play Based Exploration (aapg.org)

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

BGE (2021): Bericht der BGE mbH über die Durchführung des Standortauswahlverfahrens, IV. Quartal 2021 (IV. Quartal 2020_Bericht der BGE mbH über die Durchführung des Standortauswahlverfahrens), 35 S., Dezember 2021, Peine.

BGE (2022a): Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (bge.de)), 62 S., März 2022, Peine.

BGE (2022b): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (bge.de)), 744 S., März 2022, Peine.

BGE (2022c): Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle (bge.de)

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.

Der Kiureghian, A. & Ditlevsen, O. (2009): *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural safety, Bd. 31, S. 105-112. ISSN 01674730. DOI: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020

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. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.01.004

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

Ghanbarzadeh, S., Hesse, M.A.; Prodanović, M. and Gardner, J.E. (2015): Deformation-assisted fluid percolation in rock salt, Science, Vol. 350, S. 1069-1072, https://doi.org/10.1126/science.aac8747

Grötsch (2021): NBG-Gutachten Methodenentwicklung Ton (Jürgen Grötsch/30.11.2021) (nationales-begleitgremium.de), 43 S., Berlin.

Grötsch (2022): NBG-Gutachten Methodenentwicklung rvSU Ton (Jürgen Grötsch/05.07.2022) (nationales-begleitgremium.de), 78 S., Berlin.

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.

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.

NAGRA (2002a): Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report 02-05. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen, Switzerland. ISBN 1015-2636.

Thöle, H., Bornemann, A., Heimhofer, U., Luppold, F.W., Blumenberg, M., Dohrmann, R., Erbacher, J. (2020). Using high-resolution XRF analyses as a sequence stratigraphic tool in a mudstone-dominated succession (Early Cretaceous, Lower Saxony Basin, Northern Germany). Depositional Rec.2019, https://doi.org/10.1002/dep2.83

Wellmann, F. & Caumon, G. (2018): *3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties*. In: C. Schmelzbach (Hrsg.): Advances in Geophysics. Bd. 59, S. 1-121, Cambridge, USA: Elsevier. ISBN 9780128152089

Viswanathan, H. S., Ajo-Franklin, J., Birkholzer, J. T., Carey, J. W., Guglielmi, Y., Hyman, J. D., et al. (2022). From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new frontiers. Reviews of Geophysics, 60, e2021RG000744. https://doi.org/10.1029/2021RG000744

Digitale Verknüpfungen zu verwendeten 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 Website - Stellungnahmen zur rvSU: Unterlagen zu Diskussionen und Fachdebatten - BGE

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)

BGR SEPIA Projekt: BGR - Projekte - Sequenzstratigraphie des Aalenium in Süddeutschland (SEPIA) (bund.de)

BGR Unterkreide-Tonsteine Projekt: BGR - Projekte - Sequenzstratigraphie der Unterkreide-Tonsteine (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

NBG Dokumentationen:

NBG-Gutachten: Begleitgremium - Homepage - NBG präsentiert Gutachten zu Gebieten zur Methodenentwicklung (nationales-begleitgremium.de)

NAGRA Mont Terri Projekt, Schweiz:

NAGRA: Download-Center | Nagra

Research Gate:

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

Weitere Quellen:

IHS Reservoir Complexity Index (RCI): Oil Recover Factor vs Reservoir Compliexity Index (RCI) (ihs.com)

Gutachter-Empfehlungen und deren Status

In Anbetracht dessen, dass viele Empfehlungen aus den vorhergehenden Gutachten nicht immer kurzfristig gelöst oder bearbeitet werden können, sind hier die ausstehenden Empfehlungen nochmals aufgelistet und mit einer Abschätzung ihres gegenwärtigen Status versehen.

Bei der hier gewählte Nummerierung entspricht die erste Zahl der Nummer des Gutachten und die zweite Zahl, der Empfehlung in selbigem Gutachten, sprich 2.1 bedeuted Empfehlung eins aus dem zweiten Gutachten, ausgeführt im November 2021 (siehe: NBG-Gutachten Methodenentwicklung Ton (Jürgen Grötsch/30.11.2021) (nationales-begleitgremium.de)). Der gegenwärtig Arbeitsstand - soweit dem Gutachter bekannt - ist in Ampelfarben dargestellt, wobei grün für **bereits bearbeitet** steht, gelb für **gegenwärtige Bearbeitung** und rot für **noch ausstehend**.

Empfehlung 2.1*: 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.*

Empfehlung 2.2*: 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.*

Empfehlung 2.3*: 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 13) *beurteilt. Dies ist für die Gesteinsdurchlässigkeit im Opalinuston von großer Bedeutung und essenziell bei der zukünftigen Abschätzung der Unisicherheiten im Untergrund.*

Empfehlung 2.4*: 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.*

Empfehlung 2.5*: 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.*

Empfehlung 2.6*: 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).

***Empfehlung 2.7 (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.*

***Empfehlung 2.8**: 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.*

***Empfehlung 2.9**: 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.*

***Empfehlung 2.10 (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.*

***Empfehlung 2.11**: 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.*

***Empfehlung 2.12 (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.*

***Empfehlung 2.13 (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 2.14 (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).*

***Empfehlung 2.15**: Die Parametrisierung von Ungewissheiten muss über die Verwendung von kontinuierlichen Parametern hinausgehen und auch andere Arten von Ungewissheiten erfassen, wie etwa kategorische Parameter.*

***Empfehlung 2.16**: 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 2.17 (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 8 *gezeigt.*

***Empfehlung 2.18**: 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.

Empfehlung 2.19: *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.*

Empfehlung 3.2*: Zusätzlich zu einer solchen Dokumentation ist es jedoch wünschenswert die von der BGE eingeführten Kenngrößen (BGE, 2022b) auch zu einer quantifizierten und vergleichbaren Analyse weiter zu entwickeln, basierend auf überlagernden Kartendarstellung, ähnlich wie es in der Exploration von Kohlenwasserstoffen üblich ist, sprich mit Hilfe von sogenannten „Common Risk Segment" Karten im sogenannten ‚Play Based Exploration" Workflow (AAPG, 2022). Solche Kartendarstellungen ließen sich auch in dem bereits vorhandenen Webviewer der Öffentlichkeit einfach zugänglich machen (3D-Viewer - BGE). Es wäre dabei auch möglich die, aufgrund der heterogenen Datenlage verbleibenden Ungewissheiten pro UR/TUR transparent darzustellen.*

Empfehlung 3.3*: Die BGE sollte das vorhandene Risiko hinsichtlich digitaler Datenverfügbarkeit im Endlagerprojekt in das bestehende Risiko-Managementsystem der BGE aufnehmen, Schritte zur Minderung des Risikos definieren und regelmäßige Bewertungen des Fortschrittes diesbezüglich mit dem BGE Management durchführen. Gegebenenfalls sollte diese Problematik an übergeordnete Behörden weitergeben werden, sprich das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) einbezogen werden. Diese Tatsache wurde bereits in früheren Gutachten aufgezeigt (Grötsch, 2021: Empfehlung 7)*

Empfehlung 3.5*: Eine solche Einteilung in strukturierte Arbeitsschritte ist grundsätzlich zu befürworten. Jedoch werden hier nicht, die durch die heterogene Datenlage verursachten, sehr unterschiedlichen Ungewissheiten berücksichtigt. Deshalb wird hier empfohlen, ähnliche Arbeitsschritte zu verwenden, wie sie in der Exploration von Kohlenwasserstoffen unter dem Namen „Play Based Exploration" (PBE) üblich sind, sprich via „Common Risk Segment" (CRS) Karten eine vergleichbare, quantitative Darstellung der verschiedenen TUR zu erreichen inklusive Ihrer assoziierten Ungewissheiten (siehe Fragestellung 4).*

Empfehlung 3.6: *Lineare Projektabläufe („water fall approach") führen teilweise dazu, dass wichtige Arbeitsschritte vernachlässigt werden, wie etwa die Frage: Welche Entscheidung im Projektstadium bedarf welcher Modellierungsarbeiten? Dabei sollten die verwendeten Modelle abhängig gemacht werden von der zu treffenden Entscheidung (hier: Auswahl der verbleibenden günstigen Standortregionen) basierend auf einem klaren Verständnis der unterschiedlichen Ungewissheiten im jeweiligen Wirtsgestein. In dem von der BGE verwendeten Ablauf werden 1D Modelle verwendet (Prüfschritt 3: quantitativ) und danach die Ungewissheiten analysiert. Dies kann dazu führen, dass im Wirtsgestein Tongestein nur vornehmlich vertikale Barrieren analysiert werden (1D Modelle) obwohl das Risiko von lateral weiträumigen sandigen Gesteinskörpern als wesentlich höher einzuschätzen ist. Deshalb sollten Ungewissheiten früher in den Arbeitsablauf eingebunden werden und im Zusammenhang mit der anstehenden Projektentscheidung gebracht werden.*

Empfehlung 3.8: *Die BGE sollte sich die Möglichkeit offen halten eventuelle Rücksprünge zu einzelnen TUR zu erlauben im Falle von neuen Erkenntnissen und digitalen Daten in den jeweiligen UR. Es ist dazu aber notwendig, die vorhandenen Ungewissheiten früher zu kategorisieren und zu quantifizieren als es im Augenblick geplant ist. Eine Charakterisierung der Ungewissheiten nach einer Einstufung in Kategorie A wird deshalb als einer der Schwachpunkte in der gegenwärtig*

vorgeschlagenen Methode der rvSU angesehen. Deshalb wird hier empfohlen die Charakterisierung und Quantifizierung von Ungewissheiten je TUR in vereinfachter Form vorzuziehen. Zweitens sollte die Möglichkeit für Rücksprünge offen gehalten werden, etwa im Falle von TUR mit Kategorie B und hohen Ungewissheiten.

Empfehlung 3.9: *Die vorausschauende Sichtweise der BGE ist aufgrund der oft langen Vorlaufzeiten in Forschungsvorhaben sehr zu befürworten. Allerdings wäre ein integrativer Ansatz bei der Erstellung und Priorisierung von Forschungsvorhaben wünschenswert. Dabei sollten solche Vorhaben in Verbindung gebracht werden mit den wichtigsten Ungewissheiten und den daraus resultierenden Risiken im jeweiligen Wirtsgestein oder TUR (z.B. via „Erfassungstabelle"). Es sollte auch das bereits vorhandene Risikoregister der BGE Verwendung finden.*

Empfehlung 3.10: *Bei der Einteilung von Teilgebieten mit glazialer und fluviatiler Überprägung sollten TUR Bereiche mit tiefen Erosionsrinnen aushalten um sie, falls notwendig, während der Kategorisierung einfacher ausschließen zu können.*

Empfehlung 3.11*: Fokus im Wirtsgestein Ton sollte neben der Barrierewirkung auf das mögliche Vorkommen von durchlässigen Sedimentkörpern gelegt werden, sprich permeablen Leitern. Dies muss Teil der „Charakterisierung des Internbaus des Gesteinskörpers" werden und damit Teil der Geosynthese. Dabei muss der Sandeintrag in den Ablagerungsraum besser charakterisiert und auch mögliche, dünnbankige Einschaltungen von Sand oder Feinsand innerhalb der Teufelsloch Subformation analysiert werden. (Abbildung 21). Dies ist für die Gesteinsdurchlässigkeit im Opalinuston von großer Bedeutung und essenziell bei der zukünftigen Abschätzung der Unisicherheiten im Untergrund. Die BGR plant eine weitere Flachbohrung im Opalinuston bei Coburg um ein besseres Verständnis der Faziesverteilung im Ablagerungsbecken zu bekommen. Solche Studien zur Sandverteilung sind in allen Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongesteins notwendig und haben eine lange Vorlaufzeit.*

Empfehlung 3.12 (ähnlich früherem Gutachten)*: Die Verbreitung von sandiger und karbonatischer Gesteinsfazies innerhalb der Tonabfolgen im Wirtsgestein Tongestein sind 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* ***Aufschluss-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 gemacht werden können (Pattison, 2005). Auch das Mont Terri Projekt mit seinen umfangreichen neuen* ***Bohrkerndaten*** *kann für den Opalinuston verwendet werden.* ***Aktuogeologische Analogstudien*** *sind aber auch in derzeitigen Ablagerungsräumen im Po-Delta der Adria möglich.*

Empfehlung 3.13: *Die BGE sollte bei der Evaluierung von TUR mit Wirtsgestein Tongestein die Einflüsse von geomechanischen Eigenschaften von Tongestein auf den Verschluss von Klüften untersuchen wobei zu erwarten ist, dass weichere Tongesteine (z.B. Tertiäre Tone) ein besseres Schliessverhalten von Klüften an den Tag legen, während ältere Formationen (z.B. jurassischer Opalinuston) mehr bruchhafte Verformungen zeigen sollten. Die NAGRA in der Schweiz hat dazu gegenwärtig ein Experiment in Mont Terri laufen..*

Empfehlung 3.14: *Oberflächennahe, junge tektonische Lineamente oder Störungszonen (Lehné & Sirocko, 2010) sollten in Abhängigkeit von der Prä-Quartären Lithologie zur Risikoabschätzung für*

das Entstehen von, heute bis zu 500m tiefen, glazialen Rinnen in den kommenden 1 Ma verwendet werden. Geomechanische Eigenschaften spielen dabei eine entscheidende Rolle.

***Empfehlung 3.15**: Die Akquirierung von Bohrkernmaterial in den Formationen mit Wirtsgestein Ton wird dringend empfohlen, um die Variationsbreite der Gesteinsdurchlässigkeiten erfassen zu können, speziell in möglichen horizontalen und dünnbankigen Leiterhorizonten („thief zones").*

***Empfehlung 3.16**: Bis heute wurde kein Arbeitsschritt in der rvSU von der BGE vorgestellt, der sich mit einer solchen Realisation des lateralen Transports im Untergrund befasst, sei es mit statischen noch mit dynamischen Modellen. Es wird empfohlen einen solchen Arbeitsschritt in den Workflow der späteren Sicherheitsuntersuchungen, sprich nach der rvSU, einzubauen.*

***Empfehlung 3.17:** Zur weiteren Klärung der räumlichen Sandverteilung im ton-dominierten Sedimentbecken des Opalinustons (und aller weiteren Ton-Teilgebiete) ist deshalb ein sequenzstratigraphischer Ansatz notwendig während des weiteren Verlaufes des Projektes (3D oder räumliche Ungewissheit).*

***Empfehlung 3.18**: Um Voreingenommenheit (personal bias) bei der Entscheidungsfindung, etwa zur Kategorisierung eines TUR, zu minimieren kann beispielsweise der Prozess der „Entscheidungsqualität" verwendet werden. Man kann sich dabei auch vorstellen, dass eine verbal-argumentative Einschätzung mit Hilfe des Entscheidungsqualitätsansatzes („decision quality") untermauert wird (z.B. Grötsch 2021). Dabei folgt ein solcher Ansatz vorgegebenen Regeln unter Verwendung von 6 Kriterien, die letztendlich die Entscheidungsreife („decision readiness") aufzeigen (siehe auch Decision quality - Wikipedia; Eweje et al., 2012). Diese sind:*

***Empfehlung 3.19:** Erst nach einer Kategorisierung von Parametern der Ungewissheiten in kategorial, diskret, stetig und gleichzeitig deren Bedeutung mit Bezug auf ihre sicherheitsgerichtete Relevanz sollten die Art und Verwendung von notwendigen Modellen festgelegt werden. Dies sollte ein Arbeitsschritt im Workflow der BGE sein, sprich die Beantwortung der Frage: Welche Modelle werden gebraucht, um die relevanten Ungewissheiten analysieren zu können? In der Ausarbeitung von Feldentwicklungsplänen in der Energie-Industrie wird dieser Workflow als „decision based integrated reservoir modelling (DB IRM) bezeichnet (z.B. Brint, 2017). Dabei gilt es zu vermeiden das „eine, all-umfassende Model" zu entwickeln.*

***Empfehlung 3,20**: Es wird empfohlen die Behandlung von Ungewissheiten bei der rvSU in zwei unterschiedliche Arbeitsschritte zu unterteilen:*

1. *Ungewissheiten bei der Suche des Standortes (oder der verbleibenden Standortregionen)*
2. *Ungewissheiten bei der Entwicklung und dem Ausbau des Endllagers*

Eine solche Trennung dieser Arbeitsschritte besteht etwa in der Exploration und der Entwicklung von Kohlenwasserstofflagerstätten. Es wird hier empfohlen einen ähnlichen Ansatz in Betracht zu ziehen, angepasst auf das Projekt der Endlagersuche.

***Empfehlung 3.21:** Es wird empfohlen, die Behandlung von Ungewissheiten bei der Evaluierung/Kategorisierung von (Teil-)Untersuchungsräumen zu separieren von denen der eigentlichen rvSU mit ihrer Geosynthese und der Analyse des Endlagersystems pro TUR. Dies wäre eine ähnliche Vorgehensweise wie angewandt in der Exploration und separat davon in der Entwicklung von Kohlenwasserstofflagerstätten.*

***Empfehlung 3.22**: Um dieses Dilemma von Kategorisierung und Datenlage anzugehen wird empfohlen eine analoge Methodik zu entwickeln, wie es in der Exploration nach neuen*

Kohlenwasserstofflagerstätten verwendet wird („Play Based Exploration“, siehe AAPG, 2022). Dabei werden, wie schon von der BGE vorgeschlagen, Kenngrößen eingeführt. Mit Hilfe einer Anzahl solcher oder neu einzuführender Kenngrößen lassen sich dann Faktoren errechnen, die die Datenlage repräsentieren und die Wahrscheinlichkeit der Eignung eines TUR dazu. Solche zusammenfassende Kenngrößen können dann für alle TUR grafisch dargestellt werden und etwa mittels Felder eingeteilt werden, die die noch verbleibenden Ungewissheiten in der Einschätzung der TUR repräsentieren. Die weißen Felder markieren dabei die TUR mit einem hohen Grad von Ungewissheiten aufgrund der heterogenen Datenlage und deuten auf die mögliche Notwendigkeit von späteren Rücksprüngen hin.

***Empfehlung 3.24**: Verwendung des „Play Based Exploration“ Arbeitsablaufes wird empfohlen, um für alle TUR deutlich zu machen, welche Datendichte, Datenqualität, digitale Datenverfügbarkeit etc. vorhanden sind. Durch Überlagerung von gestapelten Karten können zu jedem TUR einfach Faktoren dargestellt werden, die eine Quantifizierung der Eignung zum gegenwärtigen Zeitpunkt erlauben. Es ist darüber hinaus auch noch möglich bestehende/verbleibende Unsicherheiten anzuzeigen. Solche Informationen erlauben dann entweder den TUR auszuschließen (Kategorie C und D) oder für weitere Untersuchungen oder obertägige geologische Untersuchungen zu empfehlen (Kategorie A). Es vereinfacht auch die Verwendung von eventuell notwendigen Rücksprüngen bei TUR mit der Kategorie B, z.B. ausgelöst durch die digitale Verfügbarkeit neuer Untergrund-Daten oder anderer neuer Erkenntnisse. Dadurch kann auch eine teilweise agile/iterative Arbeitsweise Anwendung finden, insbesondere für die für Kategorien A und B TUR.*

***Empfehlung 3.25**: Eine Beschreibung der Ungewissheiten alleine für Kategorie A TUR wird als unzureichend angesehen – auch mit Bezug auf mögliche Rücksprünge. Die Verwendung und Dokumentation von Ungewissheiten sollte deshalb schon in einem früheren Stadiums des Workflows erfolgen. Dabei sollten Identifikation, Charakterisierung, Beschreibung der möglichen assoziierten Risiken und Maßnahmen zur Vermeidung in verschiedenen Arbeitsschritten eingeführt werden. Dazu sollte beispielsweise zum Zwecke der Differenzierung aller TUR auch ein analoger Prozess zu PBE angewandt werden (AAPG, 2022).*

***Empfehlung 3.27:** Das bestehende, gut aufgesetzte BGE Risikoregister sollte auch technische Risiken mit Bezug zu Untergrundfragen beherbergen, inklusive der Vorschläge zur Vermeidung solcher Risiken. Ein Beispiel dafür ist etwa das bestehende Datenproblem, das durch die BGE selbst nicht gelöst werden kann. Die Notwendigkeit eine „Daten Task Force“ einzusetzen, die alle SGDs, die BGR, beteiligte Firmen und das BMWK einschließt, wäre ein Ansatz dieses Risiko mit Hilfe einer proaktiven Herangehensweise zu entschärfen (siehe Grötsch, 2021: Empfehlungen 7). Eine Aufnahme und Weiterverfolgung solcher geowissenschaftlichen Risiken wird hier ausdrücklich empfohlen. Dies trifft insbesondere auf Risiken zu, die nicht alleine durch die BGE bearbeitet werden können (Abhängigkeiten).*

***Empfehlung 3.28:** Es bedarf einer Verbindung von bekannten Ungewissheiten, daraus resultierenden Risiken und dem notwendigen Forschungs- und Erkundungsbedarf. Eine solche Verbindung zum Risikoregister und bestehenden Ungewissheiten („Erfassungstabelle“) sollte deutlich gemacht werden. Dabei sollte auch klar artikuliert werden, welche Risiken durch Studien und neue Daten vermieden werden können und wo erwartet wird, dass Ungewissheiten und Risiken verbleiben. Die schon im jetzigen Stadium in Auftrag gegebenen Studien sollten dabei zielgerichtet sein. Obwohl viele der schon in Auftrag gegebenen Studien als sinnvoll betrachtet werden, ist im Augenblick nicht erkennbar, wie eine solche Priorisierung von Studien erfolgt. Dazu kann die Verwendung eines Risikoregisters einen wichtigen Beitrag leisten. Kritische, technische Projektrisiken sollten in das bereits vorhandene BGE-eigene Risikomanagementsystem aufgenommen werden, was derzeit nicht der Fall ist.*