Standortauswahl Radioaktives Endlager

Gutachten zur

Methodenentwicklung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) im Wirtsgestein „Tongestein“

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium
Geschäftsstelle
Buchholzweg 8
13627 Berlin

Vergabestelle: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau

Autor: Dr. Jürgen Grötsch

Auftragsdatum: 20.12.2021

Fertiggestellt am: 05.07.2022

Inhaltsverzeichnis

Methodenentwicklung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) im Wirtsgestein „Tongestein“ 1

Verwendete Abkürzungen 4

Zusammenfassung 5

Summary 7

Aufgabenstellung 9

Wirtsgestein Tongestein – Kurze Einführung 10

Gutachten: Methodik der rvSU - Evaluation unter geowissenschaftlichen Gesichtspunkten 12

Projektstatus und Schwerpunkte 12

Lernendes Verfahren mit schnellem Fortschritt 13

Dateneinsicht 13

Datengrundlage und Dokumentation 14

Bohrungsdaten 14

Reflexionsseismische Daten 15

Analog- und Referenzdatensätze 15

Statische und Dynamische Geologische Modelle 15

Datenbanken 16

Inventardaten zu radioaktiven Abfällen 16

Verwendung von Kenngrößen 16

Dokumentation 17

Fazit - Datengrundlage 17

Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) 19

rvSU: Methodenentwicklung und Status 19

rvSU: Geosynthese 21

rvSU: Auslegung des Endlagers und Analyse des Endlagersystems 23

Fragestellung 1: Festlegung der (Teil-) Untersuchungsräume (UR/TUR) 27

Chronostratigraphie vs Lithostratigraphie 28

Störungszonen 29

Vulkanische Einschaltungen 29

Kategorisierung der Teiluntersuchungsräume (TUR) 30

Fazit – Festlegung der Teiluntersuchungsräume (TUR) 31

Fragestellung 2: Geologische Aspekte in der Methodik der rvSU 32

FEP (features, events, processes) 32

Gebirgsdurchlässigkeit 34
Ablagerungsmodelle in Tongesteinsbecken und Massentransport von Radionukliden 35
Kluft- und Störungsflächen und ihr Einfluss auf die Gesteinsdurchlässigkeit 40
Wichtige Gesteinseigenschaften und Datenverfügbarkeit 42
Verwendung von Gesteinseigenschaften in Modellen 44
Geosynthese im Untersuchungsraum 44
Fragestellung 3: rvSU und die Verwendung der Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) 46
Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten 48
Definitionen, Ausweisung und Bewertung von Ungewissheiten 48
Umgang mit Ungewissheiten in der rvSU Methodik 50
Trennung von Ungewissheiten bei Suche und Entwicklung des Endlagers 53
Risikoregister und dessen Verwendung 63
Fragestellung 5: Bewertung der öffentlichen Vorstellung der Gesamtmethodik 65
Gesamtbeurteilung: Methodenentwicklung rvSU Wirtsgestein Tongestein 66
Allgemein 66
Festlegung TUR 66
Geologische Aspekte und Verwendung geoWK 66
Behandlung von Ungewissheiten 67
Nächste Schritte 68
Fazit - Gesamtbeurteilung: 69
Literaturverzeichnis und verwendete Referenzen 70
Digitale Verknüpfungen zu verwendeten Referenzen 73
BGE Studien, Berichte und Visualisierung von 3D Modellen: 73
BGR Studien, Datenbanken und Visualisierung von 3D Modellen: 73
NBG Dokumentationen: 73
NAGRA Mont Terri Projekt, Schweiz: 73
Research Gate: 74
Gutachter-Empfehlungen und deren Status 75

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

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

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 von der BGE präsentierten Stand der Methodenentwicklung für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zu beurteilen. Die von der BGE vorgestellte Methodik soll es ermöglichen von 90 verbleibenden Teilgebieten ca 10-30 Standortregionen auszuwählen, die in der nächsten Projektphase mit obertägigen Erkundungsprogrammen weiter evaluiert werden sollen.

Insgesamt gesehen hat die BGE dabei weitreichende Fortschritte erzielt, dennoch ist auch ihre Aussage verständlich, dass es sich hier um einen Arbeitsstand handelt. Dies wird hier bestätigt, da noch wichtige Elemente und Arbeitsschritte im Gesamtarbeitsablauf (= Workflow) fehlen oder unklar sind.

Der von der BGE vorgestellte Arbeitsschritt der weiteren Unterteilung der verbleibenden Teilgebiete in Teiluntersuchungsräume (TUR) ist dabei ein sinnvoller Schritt, wie auch deren Kategorisierung mit Hilfe von definierten Prüfschritten.

Hingegen ist die integrative Betrachtung von Ungewissheiten, Risiken, benötigten Modellstudien und den Entscheidungen, die nach StandAG gefällt werden müssen, nicht zu erkennen („decision based subsurface modelling“). Ein Beispiel dazu ist die Entwicklung von 1D Transportmodellen von Radionukliden im Gestein, die zwar grundsätzlich als positiver Schritt angesehen werden. Dennoch sollte hier zuerst analysiert werden, welche Modelle zur Lösung welcher Fragestellungen angewendet werden sollen. Da die Endlagersuche das Verständnis der 3D Problematik erfordert, sind nur eingeschränkt Antworten aus 1D Modellen zu erwarten, die nur den vertikalen Transport beurteilen können, nicht aber den horizontalen. Letzterer wird großenteils bestimmt durch das Vorkommen von dünnbankigen Sandsteinlagen („thief zones“) in Ton-dominierten marinen Sedimentbecken ähnlich denen, wie sie in den verschiedenen Teilgebieten des Wirtsgesteins Tongestein zur Ablagerung kamen.

In den BGE Berichten ist die Erkenntnis, dass verschiedene Arbeitsschritte im Gesamtarbeitsablauf der Evaluierungen verschiedene Methoden zur Analyse der Ungewissheiten benötigen, zwar angesprochen jedoch nicht ausgeführt. Ein Beispiel einer solchen Notwendigkeit ist die Verwendung von unterschiedlichen Ungewissheiten, die bei der Suche (= Exploration) des Standorts (TUR) und denjenigen die bei der Entwicklung eines möglichen Standortes angewendet werden sollten.

Ein Hauptaugenmerk der BGE liegt bis heute auf der verbal-argumentativen Zusammenfassung der TUR-Bewertungen. Dieser integrative Ansatz wird zwar begrüßt, aber gleichzeitig als nicht ausreichend betrachtet, speziell wenn es sich um TUR mit geringer Datenlage handelt. Es wird deshalb empfohlen:

1) Methodik der Analyse von Ungewissheiten auf einzelne Arbeitsschritte anzupassen.
2) Die Ungewissheiten per TUR unter Verwendung von Kenngrößen zu quantifizieren.
3) Kenngrößen und daraus berechnete Wahrscheinlichkeiten graphisch darzustellen.
4) Verbal-argumentative Einschätzungen durch „decision quality“ zu ergänzen.

Die verbal-argumentative Einschätzungen aller TUR sollte durch quantitative oder semi-quantitative Evaluierungen der Ungewissheiten (z.B.“Italian flag analysis“, “bullhorn plots“, decision quality) unterstützt werden, um eine transparente und vergleichbare Dokumentation zu erleichtern.

Derzeit schlägt die BGE vor, Ungewissheiten erst in einem späten Arbeitsschritt des rvSU Workflows zu dokumentieren. Im Gegensatz dazu wird hier empfohlen die Verwendung der

sicherheitsrelevanten Ungewissheiten in einem früheren Stadium des Workflows zu analysieren und in „Erfassungstabellen“ zu dokumentieren.

Gleiches sollte bei technischen Risiken strukturiert durchgeführt werden. Ein Beispiel eines wichtigen technischen Risikos, das derzeit nicht vom 2021 eingeführten Risikomanagementsystem der BGE erfasst ist, ist die zeitnahe Verfügbarkeit von digitalen Untergrunddaten guter Qualität. Trotz intensiver Bemühungen sind bis heute diesbezüglich nur kleinere Fortschritte erzielt worden. Dies macht eine Eskalation eines solchen Risikos durch die BGE Geschäftsführung zum BMWK notwendig, da dies nur über eine enge Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern zu lösen ist.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die vorgestellte Methodik zur rvSU eine gute Basis bildet, bei der vor ihrer letztendlichen Anwendung, bestehende Arbeitsschritte weiterentwickelt werden und fehlende Arbeitsschritte ergänzt werden sollten.

Summary

The main objective of this report is to review and analyze the new method for the so-called (rvSU (representative preliminary safety investigation) as published by BGE in Q1 2022. This method is supposed to achieve a reduction of the 90 currently remaining areas ("Teilgebiete") into approximately 10-30 areas ("Standortregionen") which will be used for further investigation and surface-based data acquisition programs.

BGE has made significant progress in developing the rvSU method, however, following this review it is also understandable that BGE calls the available report "work in progress". Such is confirmed by this report as important elements and workflow steps are unclear or are considered missing from the overall workflow of reducing the areas for further investigation.

The newly introduced additional subdivision of the areas ("Teilgebiete" = TG) into sub-areas ("Teiluntersuchungsräume" = TUR) is considered a well justified step. The same holds true for the assessment of each TUR into categories via well-defined test steps in the overall workflow.

On the other hand, the integrated analysis of uncertainties, risks, required models and decisions, which need to be addressed as per law (StandAG) is not yet easily recognizable. („decision based subsurface modelling"). Even though the development of 1D transport models of radionuclides in the host rock is seen as a positive step, however, what is not readily available is the documentation of the question which models are actually required to resolve which question (ie., addressing which uncertainty or risk). As the search for a nuclear waste site requires the understanding of the 3D complexity in the subsurface, such answers are hard to get from 1D models which only allow analysis of vertical but not horizontal transport. The latter potential of "thief zones", however, is seen as a main risk in clay-dominated marine sedimentary environments like present in all areas (TG) under investigation with the host rock claystone.

The BGE report expresses the recognition that different workflow steps in rvSU need different approaches to deal with uncertainty, but no further details are provided. One example in this context is the necessity to use uncertainties in a different way for the search of an area ("exploration for" TUR) vs the uncertainties involved in development of an actual storage site.

A key focus of BGE is currently on verbal descriptive ways to summarize the decisions around the category assessment for each TUR. This way of integrating results is commended, however, it is not considered sufficient, particularly when dealing with areas (TUR) with limited available subsurface data. Therefore, it is recommended:

1) To adjust the method such that uncertainty analysis is tuned into the actual workflow step applied.
2) To analyze uncertainties per TUR by using a set of quantitative parameters ("Kenngrößen").
3) To graphically present probabilities calculated from such quantitative parameters for all TUR
4) To add „decision quality" analysis to the suggested verbal descriptive method.

Thus, the verbal descriptive method of evaluating each TUR should be accompanied by a quantitative or semi-quantitative evaluation of uncertainties (e.g. using."Italian flag analysis", "bullhorn plots", decision quality) to enable a transparent und comparable documentation for all TUR.

In the suggested method, BGE is proposing to analyze and document uncertainties only during a later step in the overall rvSU workflow. In contrast to this, it is here recommended to treat safety

relevant uncertainties in an earlier stage of the workflow and to document them in a similar manner to how risks are handled in a risk management system.

The latter was introduced in 2021 by BGE, however, main technical risks identified by BGE and in this report are not recorded there. An example for this is the digital availability of subsurface data of adequate quality. Despite significant efforts by BGE only limited progress has been achieved until now. Therefore, this risk requires further escalation by BGE management to governing organizations, like the federal ministry of economy (BMWK) to resolve the challenge of digital collaboration between regional and federal institutions around geoscience data.

In conclusion, the presented rvSU method for assessment of areas to be selected for further investigation of the nuclear waste site forms a good base whereby a number of existing workflow steps need further development and some missing workflow steps should be added bevor applying the rvSU method to all remaining areas.

Aufgabenstellung

Das hier erstellte Gutachten hat zum Ziel, eine Zusammenfassung der Sichtung der BGE Unterlagen zur Methodenentwicklung der rvSU (Stand März 2022) zu dokumentieren inklusive der damit verbundenen öffentlichen Vorstellungen der BGE zu diesem Thema.

Dabei sind insbesondere folgenden Fragestellungen berücksichtigt:

1) **Festlegung der Untersuchungsräume** (UR) durch die BGE bzw. Aufteilung der Teilgebiete in UR: Welcher Kriterien und Überlegungen verwendet die BGE zur Einteilung dieser UR?
2) **Geologische Aspekte der Methodik der rvSU**: Wie geht die BGE bei der Methodenentwicklung vor? Welchen Einfluss haben dabei Datendichte, Referenzdaten, Analogiestudien und bestehende Unsicherheiten im Untergrund
3) **rvSU und Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK**): Bei der Entwicklung der Methodik für die rvSU gibt es Schnittmengen mit und Abhängigkeiten von den geoWK. So wird bei den rvSU z.B. die Relevanz der geoWK für jeden UR festgelegt.
4) **Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten bei der Erstellung der Geosynthesen der UR**: Welche Rolle spielen Referenzdaten bei der Geosynthese in Anbetracht der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit?
5) **Begleitung und Bewertung der öffentlichen Vorstellung der Gesamtmethodik** ("Betrifft: Standortauswahl" zur Methodenentwicklung) bei verschiedenen Veranstaltungen.

Das zur Methodenentwicklung der rvSU 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 umfasst einen geologischen Zeitraum von 174 Ma (Millionen Jahren) bis 164 Ma vor heute (Abbildung 1).

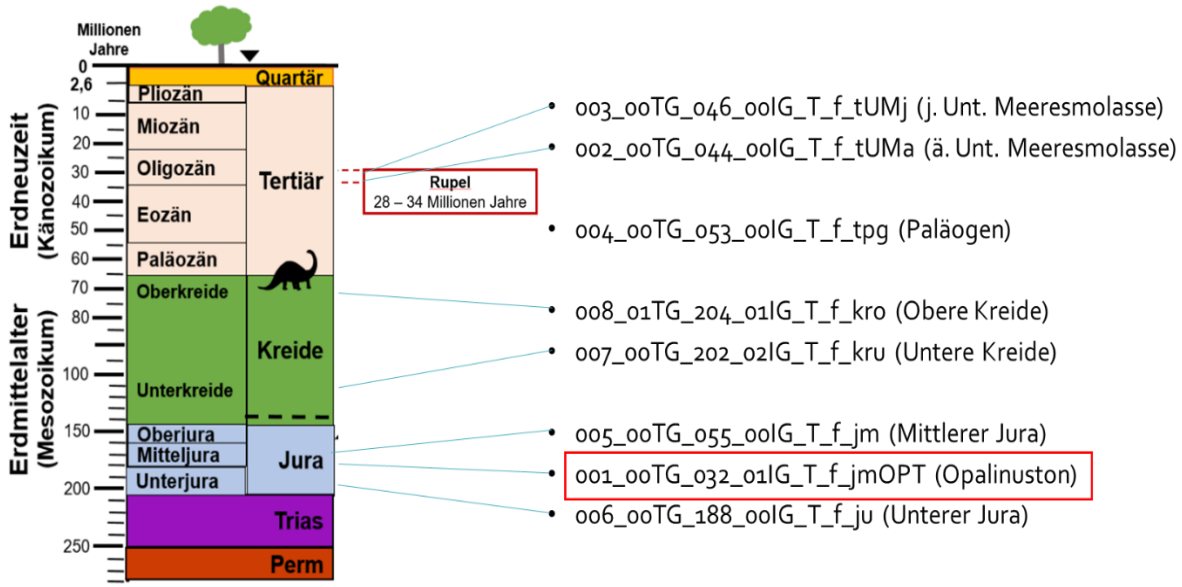

Abbildung 1: Stratigraphie (= geologisches Alter) der Formationen der 8 Teilgebiete mit dem Wirtsgestein Tongestein. Zu beachten ist, dass die Nummerierung der Teilgebiete unabhängig ist vom geologischen Alter der in Frage kommenden geologischen Formationen (verändert nach BGE, 2020).

Wirtsgestein Tongestein – Kurze Einführung

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

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

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

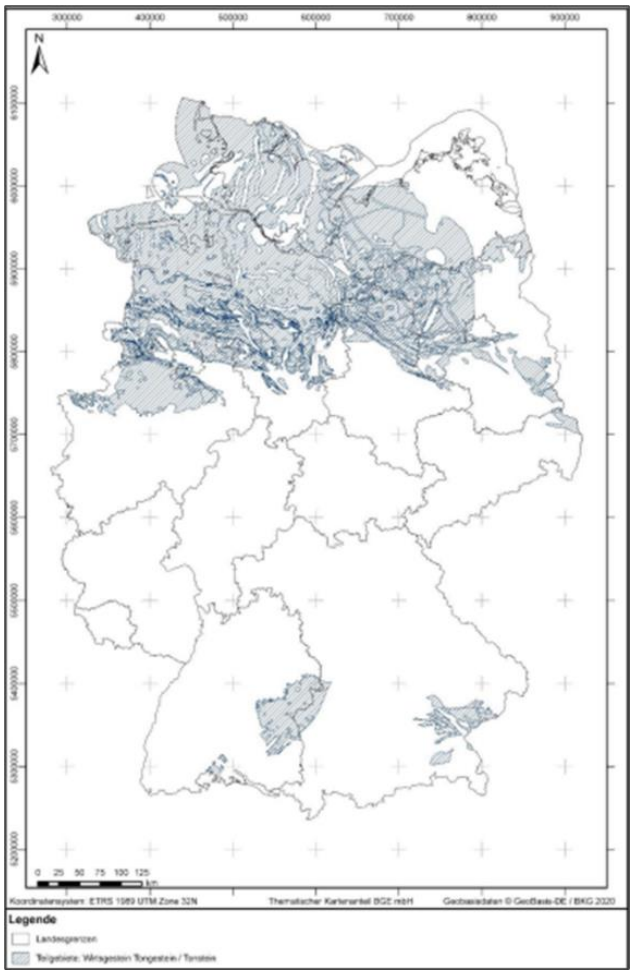

Abbildung 2: In schraffierter Signatur sind die 8 verschiedenen Teilgebiete mit Wirtsgestein Tongestein erkennbar. Zu beachten ist dabei, dass sich im Norddeutschen Becken Teilgebiete unterschiedlichen geologischen Alters befinden, die sich vertikal überlagern und dadurch in der Kartendarstellung überlappen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

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).

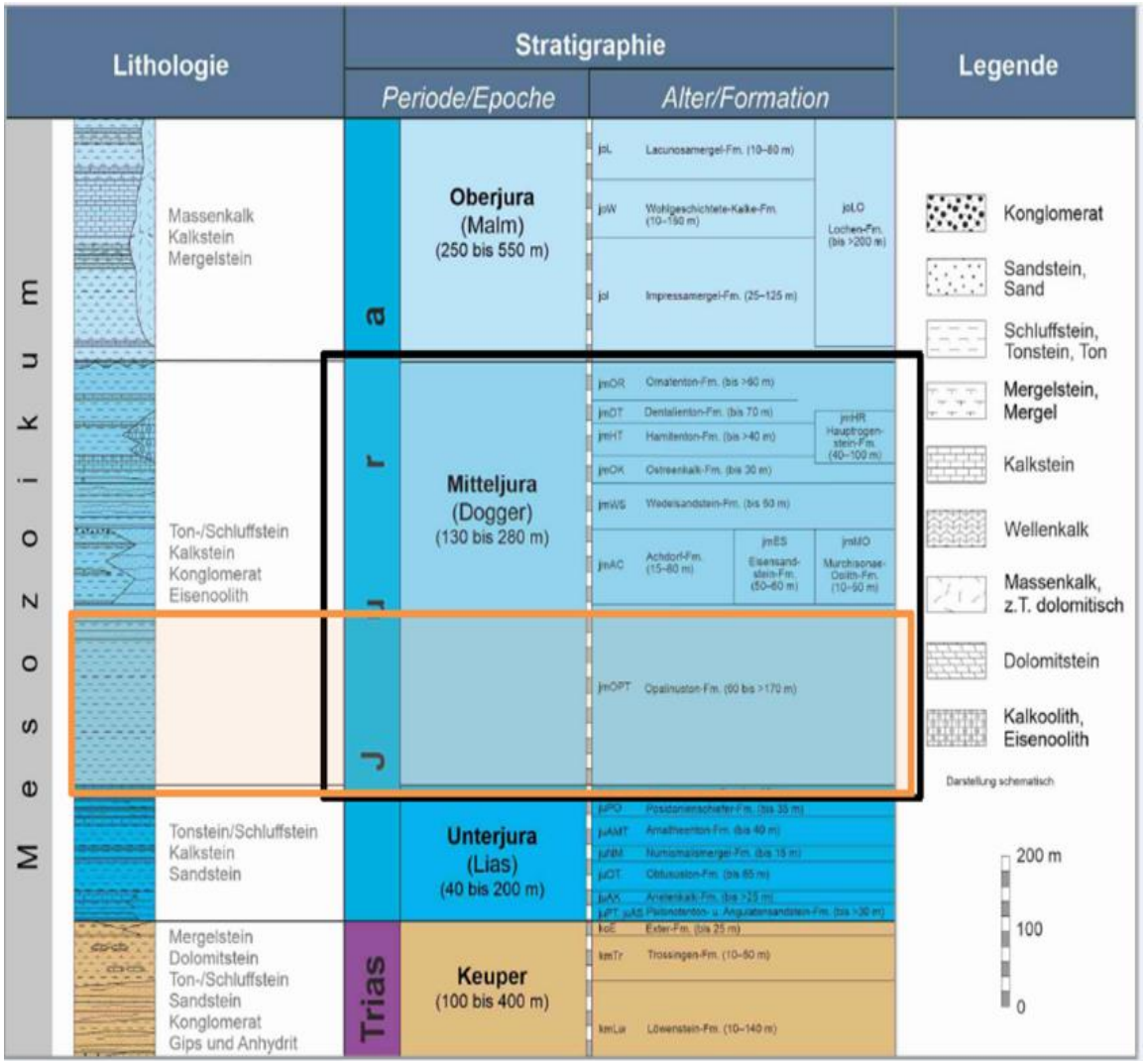

Abbildung 3: Geologische Zeiteinteilung für den untersuchten Zeitbereich aus dem Mittleren Jura in Baden-Württemberg (BGE, 2022b: Abb 73). Die Opalinuston-Formation (oranger Rahmen) wird nochmals unterteilt in die tonige Teufelsloch-Subformation und die sandige Zillhausen- Subformation. Beide bilden im Teilgebiet 001 das zu untersuchende Wirtsgestein.

Gutachten: Methodik der rvSU - Evaluation unter geowissenschaftlichen Gesichtspunkten

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 Sicherheitsuntersuchung) auszuarbeiten (Abbildung 5). Diese standardisierte Methode soll dann in der weiteren Bewertung aller verbliebenen 90 Teilgebiete (TG) und deren Untersuchungsräume (UR) Verwendung finden. Dazu wurde jeweils ein, von der BGE ausgewähltes Teilgebiet, aus allen untersuchten Wirtsgesteine (Ton, Salz flach und steil lagernd, Kristallin) Verwendung finden. Im Falle des Wirtsgestein Tongestein hat sich die BGE entschieden, diese Methodenentwicklung anhand des Opalinustones in Baden-Württemberg und Bayern durchzuführen (001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT).

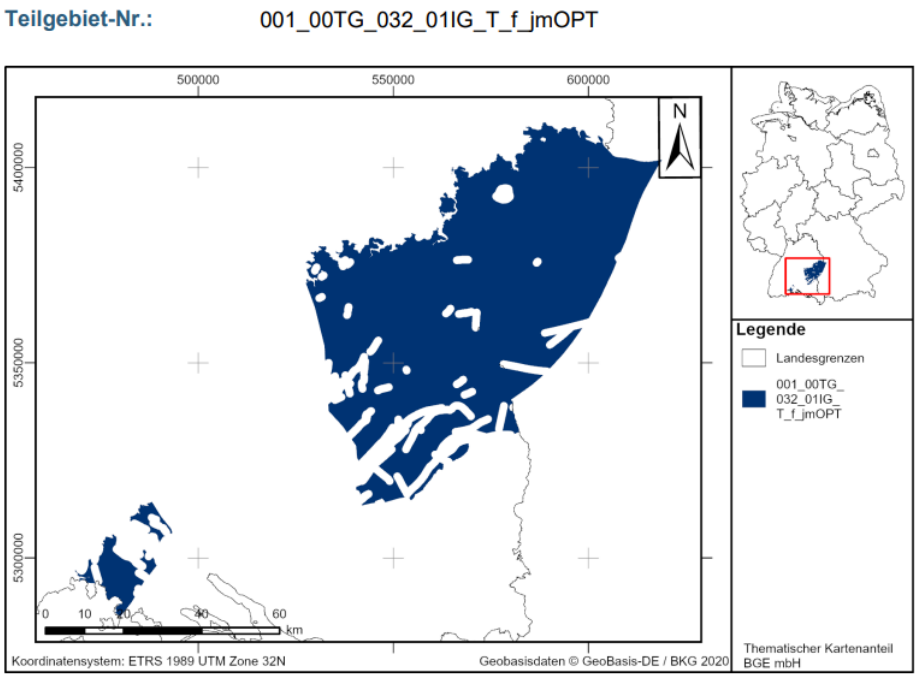

Abbildung 4: Ausdehnung des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Das ewG befindet sich im sogenannten Opalinuston auf dem Gebiet der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern (BGE, 2020). Die weißen Lineamente im TG zeigen in Phase I Schritt 1 ausgeschlossene Bereiche, häufig im Zusammenhang mit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

In diesem Gutachten werden die Fragen behandelt, inwieweit die rvSU im jetzigen Stadium (BGE, 2022a, 2022b) geeignet ist, die Unterteilung in UR durchzuführen und die geologischen Aspekte in der rvSU ausreichend berücksichtigt wurden, wie etwa die Anwendung der geoWK unter Berücksichtigung der Datenlage, der Verwendung von Referenzdaten und Analogen und der sich daraus resultierenden Unsicherheiten im jeweiligen UR. Zusätzlich besteht die Frage inwieweit die Geosynthese für jeden UR eine systematische und vergleichbare Analyse zulässt.

Lernendes Verfahren mit schnellem Fortschritt

Die Dokumentationen der Arbeiten der BGE lassen zügige Fortschritte im Verfahren erkennen. Dies ist ersichtlich in den Unterschieden der Versionen des BGE Berichtes (BGE, 2022a, 2022b), die den NBG Gutachtern am 21.3.2022 und am 28.3.2022 zur Verfügung gestellt worden sind (Abbildung 6).

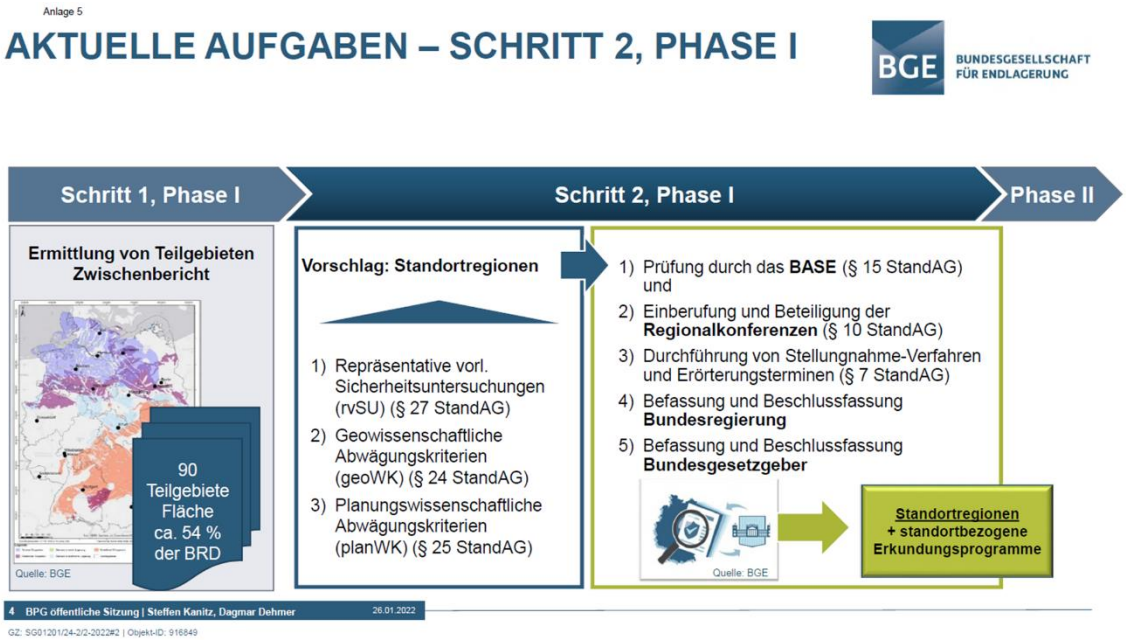

Abbildung 5: Augenblicklicher Status im Standortauswahlverfahren und aktuelle Aufgaben. Das Projekt befindet sich in Phase I Schritt 2 bei dem es um die Ermittlung von geeigneten Standortregionen zur übertägigen Erkundung nach StandAG geht. Gegenwärtig werden aber zuerst, anhand von vier Teilgebieten, 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).

Dateneinsicht

Die Grundlagen dieser Untersuchung sind:

1) BGE Veranstaltungen am 25.3.2022 mit dem NBG und den NBG Gutachtern (Videokonferenz).
2) BGE Veranstaltungen vom 28.3.2022 bis 01.04.2022, die als öffentliche Videokonferenzen durchgeführt wurden und Einsichten in die Methodenentwicklung der BGE gaben.
3) Besuch zur Akteneinsicht bei der BGE vom 25-26.4.2022. Die BGE gewährte dabei Akteneinsichten und beantwortete die weitergehenden Fragen des Gutachters zum Status des Arbeitsfortschrittes.
4) 3. Tage der Standortauswahl and der RWTH in Aachen vom 8-10.6.2022 wobei Universitäten, öffentliche Institutionen und die BGE ihre bisherigen Ergebnisse präsentierten.

Der Gutachter ist dem BGE Team sehr zu Dank verpflichtet für diese Dateneinsicht und die zügige Beantwortung aller gestellten Fragen zum gegenwärtigen Stand des Verfahrens.

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

Datengrundlage und Dokumentation

Obwohl inzwischen mehr digitale Daten, wie etwa Bohrlochmessungen in eigenen 3D Modellen zur Verfügung stehen, muss diesbezüglich noch von einer schwierigen Situation für die BGE ausgegangen werden. Es lassen sich keine entscheidenden Verbesserungen im Vergleich zu früheren Gutachten und Empfehlungen erkennen.

***Empfehlung 3.1**: Um entscheidende Verbesserungen in der digitalen Datenverfügbarkeit zu erzielen, wird empfohlen eine bundesweite Task Force mit Leitung im BMWK, wobei alle Landes- und Bundesbehörden am Aufbau einer gemeinsamen digitalen, cloud-basierenden Dateninfrastruktur zusammenarbeiten sollten.*

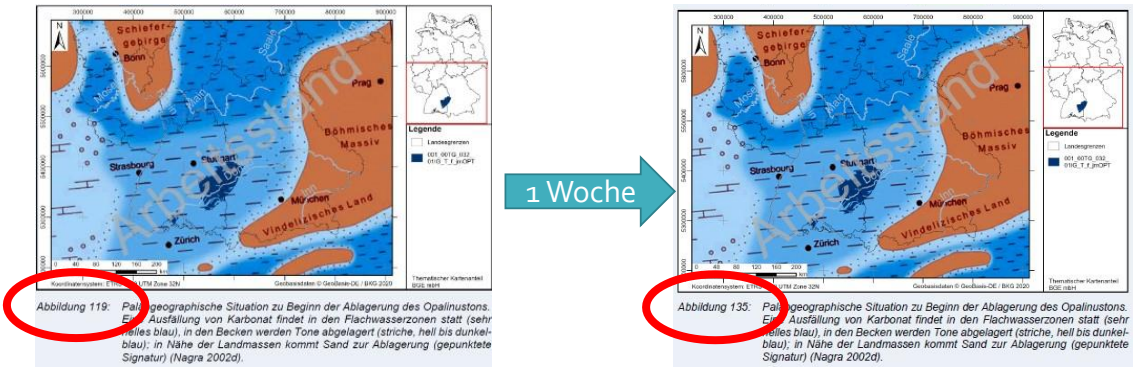

Abbildung 6: Unterschiede zwischen den, den Gutachtern zur Verfügung gestellten Versionen (BGE, 2022a, 2022b). Links, vom 21.3.2022 (Vorabversion), rechts finale Version vom 28.3.2022 mit der erkenntlichen Verschiebung der Abbildungszahlen.

Bohrungsdaten

Bohrungsdaten und Schichtenverzeichnisse im Teilgebiet 001 (GzM) sind vorhanden (Abbildung 7). Es ist jedoch festzustellen, dass von den etwa 44000 Bohrungen unterschiedlicher Tiefe in Deutschland nur ein geringer Bruchteil zum jetzigen Zeitpunkt digital verfügbar ist. Signifikante Verbesserungen bei der digitalen Datenerfassung sind notwendig, um Alle verbleibenden Gebiete adäquat evaluieren zu können.

Nichtsdestotrotz, muss auch die gleichzeitige Verwendung von Referenzdaten weiter aufgebaut werden, wie schon verfügbar für den Opalinuston basierend auf den Mont Terri Daten im Schweizer Endlagerprojekt.

Reflexionsseismische Daten

Bis zum Zeitpunkt der Dateneinsicht konnten keine reflexionsseismischen Daten digital in den 3D Modellen berücksichtigt werden. Dies deutet auf die schon angesprochene Problematik hin, dass mit langen Vorlaufzeiten diesbezüglich zu rechnen ist, sprich ein hohes Risiko besteht, dass eine digitale und auf konsistent prozessierten seismischen Daten basierende Evaluierung des Untergrundes nicht möglich sein wird (Abbildung 7). Ein Kernproblem dabei ist, dass viele der seismischen (Roh-)Daten erst bei den Eigentümern angefragt werden müssen und diese Firmen zum Teil nicht mehr bestehen.

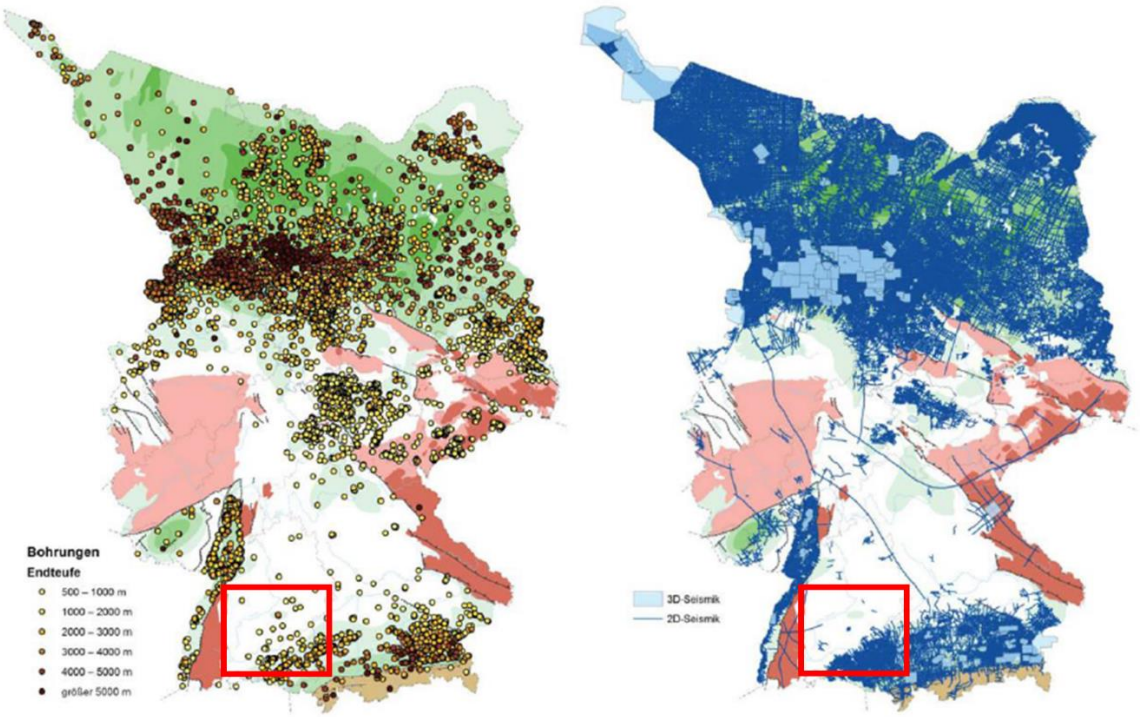

Abbildung 7: Geodaten mit Tiefbohrungen (Teufe >500m) und 2D/3D Reflektions-Seismik im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2019, Quelle: BGR). Das untersuchte Teilgebiet 001 des Opalinustones befindet sich im roten Quadranten in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern und hat eine heterogene Datenlage. Trotz dieser Kenntnis der Datenlage sind nur wenige dieser Datensätze digital vorhanden bei den staatlichen Behörden, sprich nicht verfügbar für moderne Auswertungen.

Analog- und Referenzdatensätze

Gute Fortschritte wurden in der Zwischenzeit erzielt bei der Verwendung von Referenzdatensätzen aus dem Schweizerischen Mont Terri Projekt, dass bereits Ende 2022 den endgültigen Standort des dortigen Endlagers vorschlagen wird. Da es sich in Mont Terri und dem TG 001 um die gleiche geologische Formation handelt, wird dies als zielführend angesehen. Die Daten sind öffentlich einsehbar (Download-Center | Nagra).

Statische und Dynamische Geologische Modelle

Das im TG 001 erstellte 3D Modell ist inzwischen stark verbessert, sprich digitale Bohrlochdaten konnten eingelesen werden und die vorhandenen digitalen Karten konnten verbessert werden.

Dennoch war es während des Besuches bei der BGE leider nicht möglich eine weitergehende Qualitätsanalyse zu Modellen durchzuführen.

Datenbanken

Die Zusammenarbeit der BGE mit nationalen (z.B. BGR) und internationalen Organisationen (z.B. NAGRA in Mont Terri, französisches Endlagerprojekt Bure) ist sehr zu begrüßen. Die Kooperation mit der BGR im Rahmen der GeM-DB Datenbank zu geowissenschaftlichen Methoden (BGR - Projekte - Nutzung der geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB, Zwischenbericht (2021) (bund.de)) ist ein gutes Beispiel. Insbesondere bei den nun anstehenden Arbeiten der BGE rund um den Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist eine schnelle Übersicht der verwendbaren geowissenschaftlichen Methoden besonders hilfreich.

Dabei ist jedoch noch nicht ersichtlich, wie die BGE in ihren Workflows die Bewertung von Unsicherheiten, die daraus resultierenden Risiken und ihre Bestrebungen zu deren Vermeidung mit Hilfe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zusammenführen will (siehe Kapitel Gesamtbeurteilung: Methodenentwicklung rvSU Wirtsgestein Tongestein).

Inventardaten zu radioaktiven Abfällen

Inzwischen bestehen ausreichend Informationen zur Komposition und Menge der zu speichernden hochradioaktiven Substanzen. Diese Inventardaten im Radioaktiven Abfallmengengerüst BRD beinhalten Eigenschaften wie Aktivität, Dosisleistung und Wärmeleistung.

Solche Inventardaten erlauben es Startkalibrierungen der Modellberechnungen zum Massen- und Stoffmengenaustrag durchzuführen und die zu erwartende sekundäre Wärmemenge aus dem radioaktiven Abfall abzuschätzen. Mit diesen Informationen kann dann die thermische Auslegung und der Flächenbedarf des Endlagers berechnet werden.

Verwendung von Kenngrößen

Die Dokumentationen der BGE (BGE, 2022b) zeigen erstmals die Verwendung von 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
- **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 und aus Gesprächen mit der BGE noch nicht erkennbar, wie diese Anwendung erfolgen soll. Darüber hinaus sind weitere Kenngrößen notwendig zur Charakterisierung der Ungewissheiten.

***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.*

Abbildung 8: Workflow zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage (BGE, 2022b: Abb. 62). Darüber hinaus wird empfohlen, die Resultate der Evaluierung der UR/TUR in überlagernden Kartendarstellungen quantitativ zu erfassen, ähnlich wie beim PBE Workflow (AAPG, 2022),

Dokumentation

Mit dem Dokumentstrukturplan ist beabsichtigt eine einheitliche Struktur der Berichte zu den einzelnen UR/TUR zu gewährleisten, was sehr zu begrüßen ist um eine Vergleichbarkeit zwischen den UR/TUR zu ermöglichen (Abbildung 8).

Fazit - Datengrundlage

Obwohl die BGE bei der Datenbeschaffung via Dienstleister und Staatliche Geologische Dienste bedeutende Fortschritte gemacht hat, ist die digitale Datenverfügbarkeit stets noch eines der größten Risikofaktoren im Endlagerprojekt.

Es bleibt weiterhin festzustellen, dass Geodaten von der BGE gesammelt und digitalisiert werden, es jedoch keine greifbare Lösung zu Frage gibt, wie die entscheidungserheblichen Daten später insgesamt der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollen.

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)*

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 Schritt2 mit dem Ziel Vorschläge zu den verbleibenden Standortregionen vorzulegen (Abbildung 5). Zum Zeitpunkt des Gutachtens ist das Endlagerprojekt in der Phase der repräsentativen vSU (Abbildung 9, Abbildung 10).

Die vorläufige repräsentative Sicherheitsuntersuchungen (§ 27 Absatz 1 und 2 StandAG) hat 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 2 wird festgelegt nach Prüfung durch die BASE, der Vorstellung bei den Regionalkonferenzen, eines Stellungnahme-Verfahrens, Beschluss der Bundesregierung und des Bundesgesetzgebers (Abbildung 5).

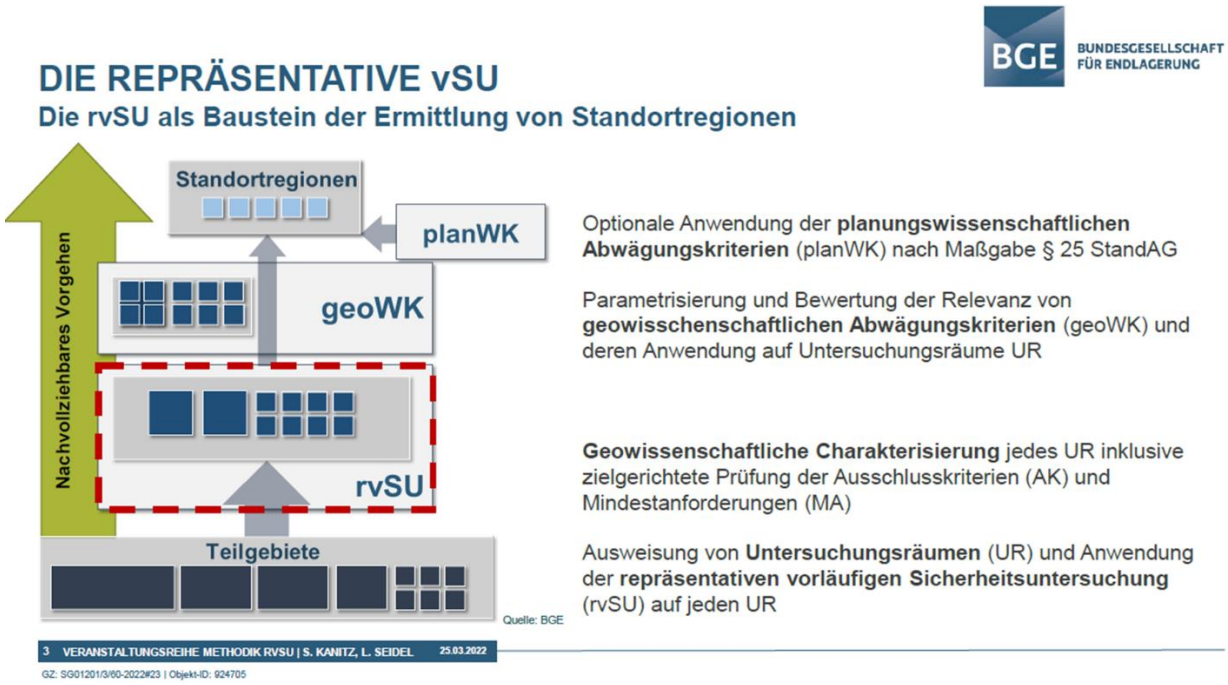

Abbildung 9: In Phase I Schritt 2 des Endlagerprojektes werden alle TG und UR mit Hilfe der rvSU und der Anwendung der AK, MA und geoWK eingestuft (BGE, 2022), auch bezeichnet als „Geosynthese“.

rvSU: Methodenentwicklung und Status

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.

Dabei muss festgehalten werden was **Teil** der gegenwärtigen Arbeiten der BGE ist (Abbildung 10),

- rvSU
- Geosynthese
- Vorläufiges Sicherheitskonzept
- Vorläufige Auslegung des Endlagers
- Analyse Endlagersystem

und was gegenwärtig noch **nicht Teil** der Bearbeitung ist

- umfassende Bewertung der Teilgebiete
- Bewertung der Ungewissheiten
- Spezifizierung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfes
- Aussage bezüglich einer möglichen Eignung als Standortregion

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.

Die rvSU bildet die Grundlage für standortbezogene Erkundungsprogramme. Sie soll einen sicheren Einschluss unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten gewährleisten. Als Endlagersystem wird dabei die Kombination aus Einlagerungsbergwerk, Barrieren plus überlagernde geologische Schichten bezeichnet. Dabei ist das Ziel, dass

- radioaktive Stoffe von der Biosphäre ferngehalten werden
- Auswirkungen des Endlagers im Ausland nicht grösser als im Inland sind
- eine Rückholung des radioaktiven Materials im Zeitraum von 500 Jahre möglich ist
- nach der Verschlussphase keine weiteren Eingriffe und Wartungsarbeiten notwendig sind
- die Grenzwerte für Massen- und Stoffmengenaustrag eingehalten werden
- die Robustheit und Integrität der Barrieren nachgewiesen wurde
- eine Kettenreaktion im Endlager ausgeschlossen werden kann

Insbesondere soll in der rvSU der Massen- und Stoffaustrag bewertet werden, was maßgeblich von den geologischen Gegebenheiten beeinflusst wird. Neue Erkenntnisse zu AK und MA sollen kontinuierlich gesammelt und berücksichtigt werden.

Der Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte ist dabei nicht gleich denen im StandAG oder in der Paragraphenreihenfolge der EndlSiUntV beschriebenen, was aufgrund der starken Verzahnung einzelner Arbeitsschritte nicht erwartet werden kann. Dieser Sachverhalt wird hier ausdrücklich begrüßt und als eine Notwendigkeit in einem „lernenden Verfahren“ angesehen, wobei die Vorzüge von linearen und agilen Arbeitsweisen kombiniert werden sollten.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die einzelnen Arbeitsschritte in der rvSU stark miteinander verzahnt sind, also nicht alleine linear abgearbeitet werden können.

Ein Ziel der rvSU ist, die verbleibenden Teilgebiete (UR/TUR) weiter zu reduzieren, besonders dann, falls schon früh erkennbar ist, dass ein oder mehrere Aspekte eine fehlende Eignung aufweisen. Dadurch können weitere Arbeitsschritte vermieden werden.

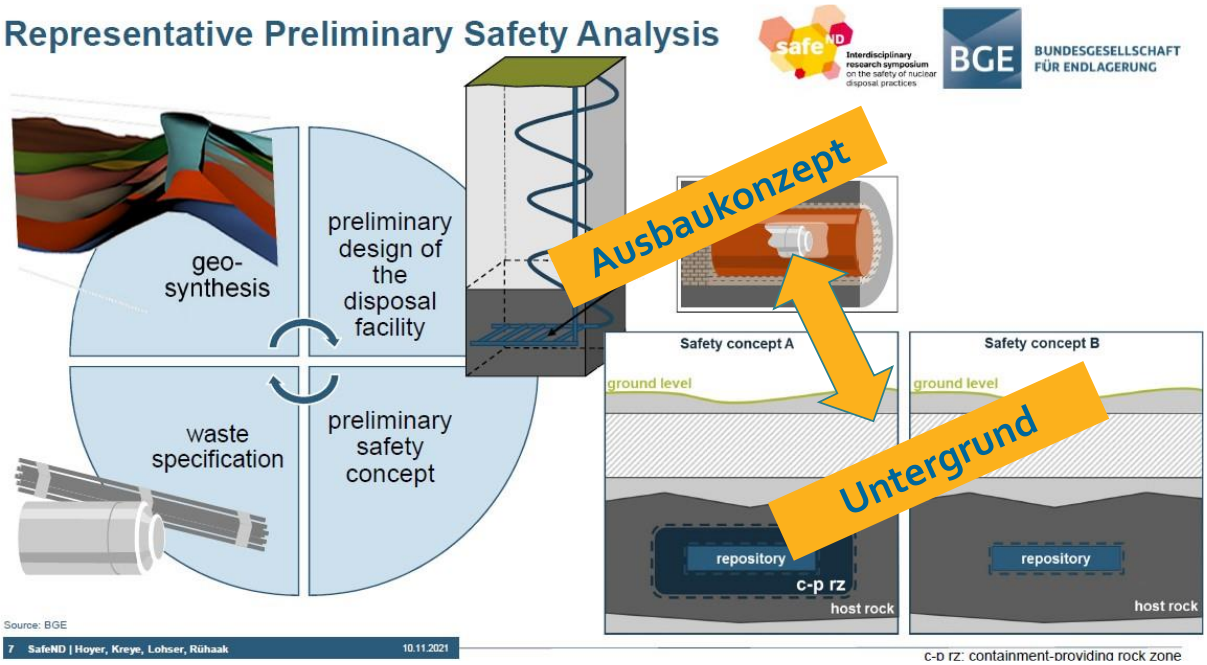

Abbildung 10: Schematische Darstellung einer rvSU nach Hoyer et al (2021). Dabei sollen Kenntnisse zum ewG im Untergrund mit Konzepten des Ausbaus eines Endlagers zusammengeführt werden („safety concept"). Diese sollen dann, zusammen mit den verbleibenden Ungewissheiten zur Evaluierung der 90 TG verwendet werden, was als repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchung (rvSU) bezeichnet wird (nach Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103).

rvSU: Geosynthese

Basis für die sogenannte Geosynthese in der rvSU sind geologische Modelle der UR/TUR, die die Grundlage für Transportmodellierung bilden. Sie gründet sich also auf vorhandene Daten und Fachliteratur wobei keine neuen Daten in Phase 1 gewonnen werden. Eine übertägige Erkundung findet nach StandAG erst nach der durch den Gesetzgeber festgelegten Standortregionen statt.

Dabei hat die BGE eine weitere **Unterteilung der Teilgebiete** in Teiluntersuchungsräume (TUR) vorgeschlagen, was es erlaubt Geosynthesen räumlich spezifisch zu machen. Dieser Schritt ist sehr begrüßenswert, da somit eine zielgerichtete Evaluierung von Standortregionen verbessert wird, sprich eine Vermengung von verschiedenen geologischen Gegebenheiten vermieden werden kann und damit ein transparenteres Verfahren gewährleistet werden kann.

Die Analyse der UR und TUR wird unter Verwendung von Referenzdaten und Analogieschlüssen durchgeführt mit vier Prüfschritten (Abbildung 11) und vier Ebenen (BGE, 2022b: Abbildung 6):

Prüfschritt 1: Erneute Anwendung von AK + MA

Prüfschritt 2: Qualitative geowissenschaftliche Langzeitprognose unter Berücksichtigung der geoWKs:

- Räumliche Charakerisierbarkeit
- Langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse
- Transport radioaktiver Stoffe
- Konfiguration der Gesteinskörper

Dazu werden geomechanische und bautechnische Aspekte berücksichtigt, die im Wirtsgestein Ton abhängig von der geologischen Versenkungsgeschichte und der heutigen Tiefenlage sind.

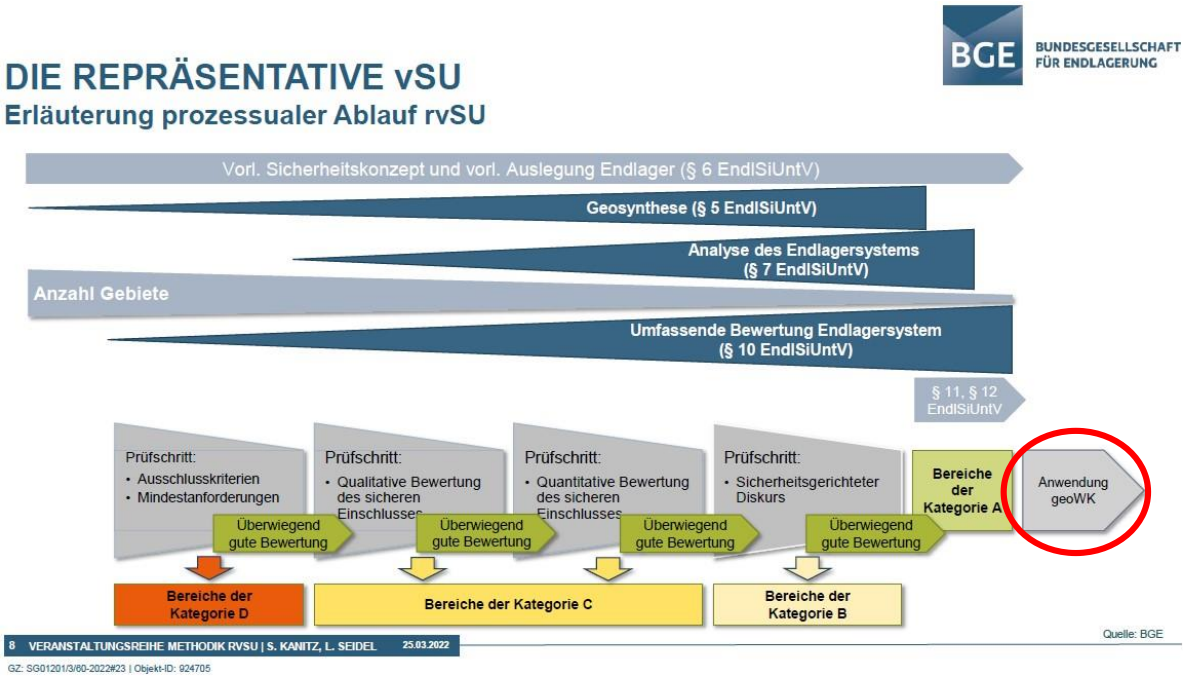

Abbildung 11: Kategorisierung und Eingrenzung der verbleibenden Untersuchungsräume nach rvSU (BGE, 2022). Zu beachten ist die Anwendung der geoWK als finaler Arbeitsschritt in der Bewertung der URs (rote Umrandung). Unklar ist dabei, wie die auf der heterogenen Datenlage beruhenden Ungewissheiten darin einfließen (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten)

Prüfschritt 3: In diesem quantitativen Analyseschritt werden die Aspekte zur

- Ausweisung EWG
- Möglichkeit sicherer Einschluss
- Lokale geogene Prozesse
- Analogiebetrachtungen
- Erarbeitung von Parametern für die quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses
- 1D Modelle Transport – Vergleich mit Grenzwerten zum Stoffmengenaustrag
- Endlagerauslegung und Betrieb
- Thermische Verhältnisse und Flächenbedarf

analysiert. Dabei werden „Best Estimates“ verwendet, die stark abhängig sind von der Datenlage im TUR.

Prüfschritt 4: Im letzten Schritt dem „Sicherheitsgerichteten Diskurs“, werden u.a. die Parameter Teufe und Temperatur für die Auslegung des Endlagers definiert.

- Erfassung und Bewertung der Ungewissheiten
- Bewertung der Relevanz der geoWK
- Ableitung Erkundungsbedarf
- Möglichkeit der zusätzlichen Lagerung niedrigradioaktiver Abfälle in separatem Bergwerk

In den Berichten der BGE (BGE, 2022b: Abbildung 6) wird teils von vier **Prüfschritten** (siehe Kapitel: rvSU: Geosynthese) und teils von vier **Ebenen** gesprochen. Dies trägt nicht notwendigerweise zur Klarheit der Darstellung bei. Dabei müssen alle vier Prozessschritte (?Prüfschritte, ?Ebenen) zu einer positiven Einschätzung des TUR kommen. Ansonsten werden die, in einem Prüfschritt als nicht günstig beurteilten TUR ausgeschlossen.

Empfehlung 3.4: *Es sollte nur eine klar definierte Bezeichnung für die Arbeitsschritte/Prüfschritte der BGE innerhalb der rvSU verwendet werden, also die Begriffe „Prüfschritte" und „Ebenen" zusammengefasst werden, um mehr Klarheit zu schaffen und Vereinfachung in der Diskussion zu erlauben.*

Nach günstiger Bewertung aller vier Prüfschritte werden die TUR in Kategorie A eingeordnet und in Ebene 4 (BGE, 2022b: Abbildung 6) weiter behandelt. Dies ermöglicht eine sukzessive Fokussierung auf aussichtsreiche Gebiete. Nur Kategorie A Gebiete (TUR) werden weiter bearbeitet und ihre Ungewissheiten werden in „Ebene 4" des BGE Arbeitsablaufes vollumfänglich katalogisiert. Die Resultate daraus fließen dann in die Definition des Forschungs- und Erkundungsbedarfs ein.

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).*

rvSU: Auslegung des Endlagers und Analyse des Endlagersystems

Basierend auf der Charakterisierung des Untergrundes, sprich ewG („Geosynthese"), erfolgt eine Analyse des gesamten Endlagersystems. Dazu sind Informationen notwendig zum zu speichernden Inventar an Radionukliden, dem zu verwendenden Typ des Endlagersystems und der Auslegung des Endlagers.

Inventardaten zum hoch- und schwachradioaktiven Material sind hinreichend vorhanden und wurden für all UR/TUR einmalig zusammengefasst, im Gegensatz zur Geosynthese, die für alle UR/TUR durchgeführt werden muss. Das Ziel ist dabei die Ermittlung der maximalen Größe des Endlagers, sprich Flächen- und Volumenbedarf. Über die Inventardaten kann die Anzahl der Einlagerungsbehälter ermittelt werden, insbesondere für die hochradioaktiven Abfälle. Ausgegangen wird dabei von einer 100 Grad C Grenztemperatur an der Außenseite der Behälter. Diese Temperaturgrenze ist im Augenblick noch stets Teil der öffentlichen Diskussionen. Dieses Gutachten klammert diese jedoch aus und fokussiert sich auf die geowissenschaftlichen Aspekte.

Das Sicherheitskonzept im Endlager basiert auf dem zeitlichen Zusammenwirken eines gestaffelten Systems von verschiedenen Barrieren. Im Wirtsgestein Tongestein kommt dabei nur das

Endlagersystem A mit einem oder mehreren EWGs als Hauptbarriere in Frage, zusätzlich zu den technischen und geotechnischen Barrieren. Dieses System muss dafür Sorge tragen, dass die radioaktiven Abfälle weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben. Strategie und Barrieren konzentrieren sich im Bewertungszeitraum weitestgehend auf geologische Barrieren. Dabei besteht eine klare Subsidiarität (Nachrangigkeit) des technischen Sicherheitskonzeptes im Vergleich zum ewG.

Auslegung des Endlagers muss für alle aufgrund der Geosynthese für potentiell geeignete Gebiete gemacht werden, jedoch in der rvSU nur mit einem reduzierten Detailierungsgrad. Dabei stehen in dieser Phase des Projektes nur wenige Daten zur Verfügung. Der Flächenbedarf des Endlagersystems ist eine Funktion von Teufe und der initialen Temperatur im Einschlussbereich. Leider sind dazu in den UR/TUR keine Daten zur Gebirgsmechanik vorhanden, was insbesondere bei Tongesteinen wichtig ist, da diese stark unterschiedliche Verfestigungsgrade besitzen, abhängig von ihrem geologischen Alter (und ihrer Versenkungsgeschichte).

Resultat dieser vorläufigen Arbeitsschritte ist eine Grafik die den Flächenbedarf des Endlagers als Funktion von initialer Temperatur und Teufe aufzeigt. Zusätzlich soll Sie die Frage beantworten, ob eine oder zwei Einlagerungssohlen notwendig sind. Auch die Möglichkeit, ob schwach radioaktiver Abfall gleichzeitig mit eingelagert werden kann, wird in Betrachtung gezogen. Die Geosynthese erlaubt dabei eine Beschreibung der erwarteten geologischen Barrieren.

Jeder UR oder TUR soll dabei, jeweils nur ein Sicherheitskonzept (sprich ein **Single Scenario**) in der rvSU zugeordnet werden.

Die **Analyse des Endlagersystem** basiert auf der Geosynthese, dem vorläufigen Sicherheitskonzept und der Auslegung des Endlagers. Dazu kommt die Evaluierung, ob zusätzlich auch noch schwach- und mittel-radioaktive Abfälle eingelagert werden können. Dabei kommt auch der sogenannte FEP-Katalog für Tongestein zur Anwendung (siehe Kapitel FEP (features, events, processes)).

Bei der Analyse des Endlagersystems sollen die Relevanz der einzelnen geoWKs für Sicherheitsfunktionen, der aktuelle lokale Kenntnisstand und der mögliche Erkenntnisgewinn durch Erkundungstätigkeit dargestellt werden mit dem Ziel der **Bewertung des Endlagersystems** per UR/TUR. Eine zentrale Aussage ist dabei die zu erwartende Qualität des Einschlusses (Abbildung 16). Bei einer Einstufung in Kategorie D und C werden keine weiteren Analysen vorgenommen. Bei Kategorie B und A wird ein verbal argumentativer, sicherheitsgerichteter Diskurs durchgeführt.

Die weitere **Behandlung der Ungewissheiten** wird nur für Kategorie A in einem späten Stadium der Evaluierung analysiert (Abbildung 12). Ein solches Vorgehen steht im Widerspruch zur Verwendung von Ungewissheiten in vergleichbaren Projekten im Untergrund, etwa bei der Exploration von Kohlenwasserstoffen (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten).

Nichtsdestotrotz werden Ungewissheiten in diesem Arbeitsschritt identifiziert. systematisch ausgewiesen, charakterisiert und kategorisiert, wobei die gesetzlichen Vorgaben erfüllt werden, nach denen der Umgang mit Ungewissheiten dokumentiert werden muss. Insbesondere sollen Auswirkungen und eine Abschätzung zum Bedarf an Erkundung auf Ungewissheiten dargestellt werden. Dabei werden vier **Kategorien der Ungewissheiten** verwendet (BGE, 2022b).

- **Methoden**ungewissheiten wie etwa in den Arbeitsschritten der rvSU
- **Szenarien**ungewissheiten zu Systemen und Prozessen
- **Modell**ungewissheiten zu Ungenauigkeiten beim Abbilden von Prozessen

- **Daten und Parameter**ungewissheiten (noch nicht weiter differenziert)

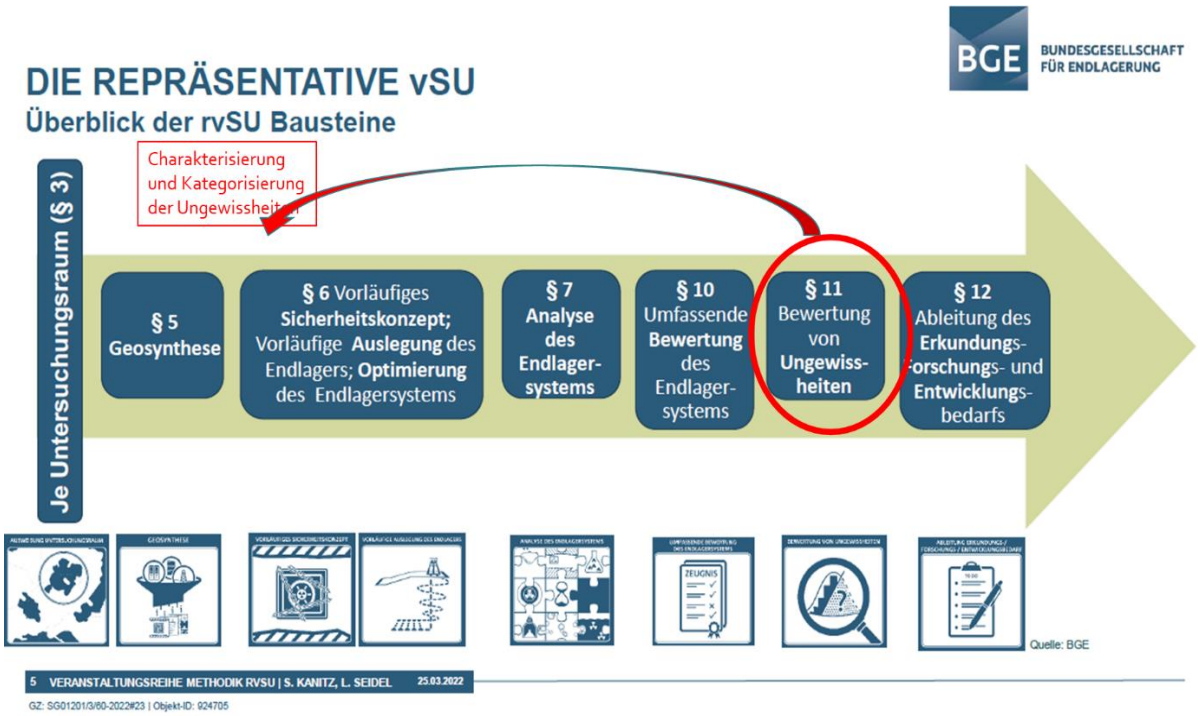

Abbildung 12: Die Verwendung von Ungewissheiten ist ein substantieller Teil der Methodik der rvSU. Jedoch ist nach dem jetzigen Plan die Charakterisierung und Kategorisierung von Ungewissheiten erst in einem späten Zeitpunkt im Arbeitsablauf der rvSU geplant und nur für Kategorie A der TUR vorgesehen (BGE, 2022a). Ein Ungewissheiten-Register („Erfassungstabelle“) sollte deshalb schon früher im Arbeitsablauf der rvSU eingeführt werden (Identifikation) und im weiteren Verlauf der Evaluierungen systematisch weiterentwickelt werden (z.B. mit Parameterisierung, Priorität, Verwendung in Modellen, Notwendigkeiten bei der obertägigen und untertägigen Erkundung etc.). Ein solches Register sollte ähnlich dem vorhandenen BGE Risiko-Register strukturiert sein und regelmäßig im Arbeitsablauf des Projektes betrachtet werden, auch über die rvSU hinaus. Erste Schritte sind schon durch die BGE (2022b: Abb. 221) angedacht, wobei Dokumentation und Versionskontrolle im lernenden Verfahren eine wichtige Rolle spielen.

Was dabei nicht deutlich erkennbar ist, ist die Frage wie in den benutzten Modellen Unsicherheiten gehandhabt werden, sprich die Paramterisierung der Ungewissheiten innerhalb der Modelle (z.B. categorical, discrete, continuous). Auch die Frage warum welche Modelle angewendet werden ist nicht deutlich erkennbar. Dies kann an der strikten Vorgabe des StandAG liegen und an dem gewählten „water fall approach“, sprich der linearen Ausführung des Projektplanes der BGE.

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 (Abbildung 12). 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 3.7: *Ungewissheiten für alle UR/TUR abschätzen und quantitativ in Karten darstellen, sprich „common risk segment maps" (siehe Kapitel* Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten*).*

Als abschließender Arbeitsschritt in der rvSU ist die **Ableitung des Erkundungsbedarfes** vorgesehen, die nur für ausgewählte Standortregionen vorgesehen ist. Dabei ist festzuhalten, dass die Abwesenheit von Daten Ungewissheiten generiert. Solche Ungewissheiten sollen in den Standortregionen reduziert werden mit Hilfe der Analyse, Dokumentation und Umsetzung von:

1. Erkundungsbedarf
2. Forschungsbedarf
3. Entwicklungsbedarf

Eine Priorisierung soll nach folgenden Kriterien durchgeführt werden:

- Erfüllung AK + MA (höchste Priorität)
- Vergleichbarkeit von Standortregionen (zur weiteren Differenzierung)
- Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems (Charakterisierung Barrieren)
- Kosten/Nutzen Analyse

Daraus sollen Standortbezogene Erkundungsprogramme entwickelt werden. Ein solcher Bezug zu den verbleibenden Standorten, aber auch zu den darin vorkommenden Wirtsgesteinen wird ausdrücklich unterstützt, da hier große Unterschiede zu erwarten sind.

Fragestellung 1: Festlegung der (Teil-) Untersuchungsräume (UR/TUR)

Viele Teilgebiete (TG) nehmen sehr große Flächen ein oder sind schon jetzt in nicht-zusammenhängende Gebiete unterteilt (z.B. TG 001 Opalinuston). Deshalb ist davon auszugehen, dass die geologischen Verhältnisse im Untergrund nicht homogen sind. Für das GzM TG 001 im Opalinuston ist dies inzwischen auch von der BGE dokumentiert worden (BGE, 2022b).

Die von der BGE angekündigte weitere Unterteilung von Teilgebieten (TG) in sogenannte Untersuchungsräume (UR) und **Teiluntersuchungsräume (TUR)** wird deshalb hier als sinnvoller und notwendiger Schritt betrachtet. Dazu hat die BGE in ihrem Bericht (BGE, 2022a, b) einen ersten Ansatz präsentiert, wie die verbleibenden Teilgebiete (TG) weiter unterteilt werden sollen. TUR sollen dabei immer räumlich zusammenhängend sein.

Eine solche Definition der TUR soll Geologie-basierend sein und zu einer besseren Nachvollziehbarkeit der Kategorisierung (Abbildung 11) von verbleibenden Gebieten beitragen. Dabei kann es auch noch zu einer weiteren Differenzierung kommen, wenn dazu adäquate Daten vorliegen. Die räumliche Differenzierung ist somit ein zentraler Bestandteil des Workflows der BGE und wird mit Sicherheit bei der Klärung der Eignung und des Vergleichs zwischen Gebieten (TUR) sehr zielführend sein.

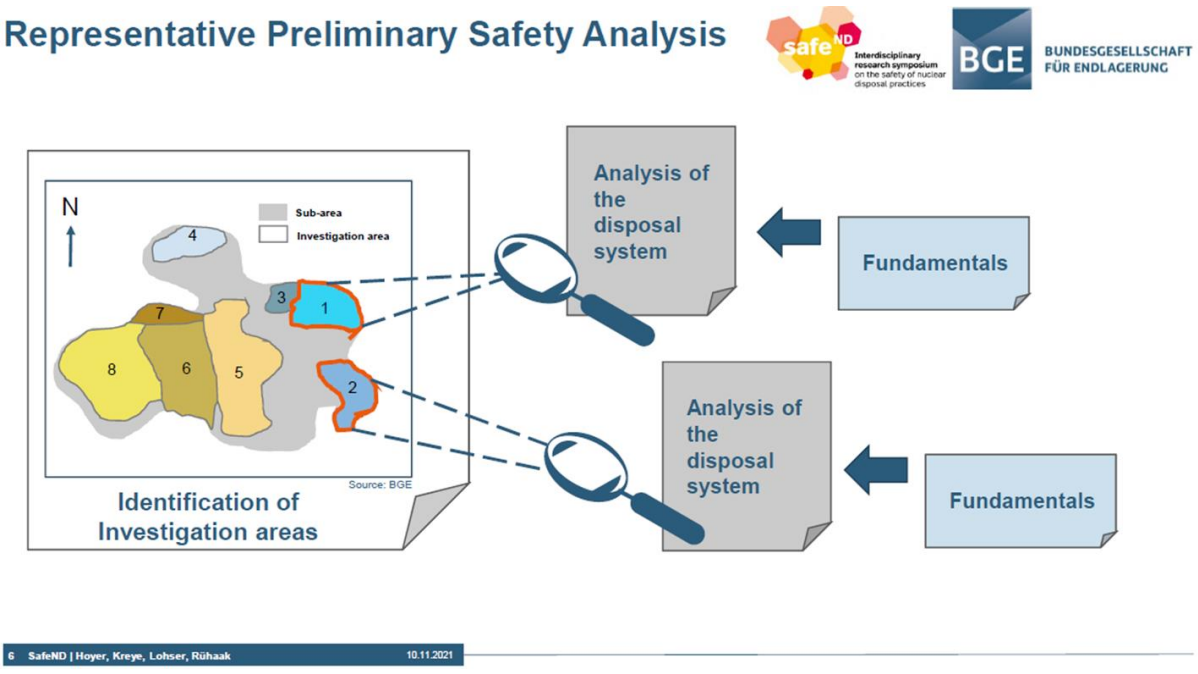

Abbildung 13: Schematische Zeichnung zur geplanten Aufteilung aller Teilgebiete (TG) in Untersuchungsräume (Hoyer et al., 2021). Aufgrund der Heterogenität innerhalb der TG soll zuerst eine weitere Unterteilung in kleinere Einheiten erfolgen, sogenannte Teiluntersuchungsräume (TUR). Dies ist sehr begrüßenswert und erlaubt eine höhere Transparenz in der späteren Beurteilung der TG und ihrer TUR. Es bedarf aber erst der detaillierten Analyse eines jeden verbleibenden Teilgebietes, bevor solche Teiluntersuchungsräume zusammenfassend dargestellt werden können. Wie eine weitere Unterteilung der TG erfolgen soll, ist Teil der gegenwärtigen Methodenentwicklung (BGE, 2022b). Ein solcher Ansatz wird sehr begrüßt.

Nach der weiteren Unterteilung der UR in einzelne TUR, werden diese nochmals mit MA, AK und geoWK beurteilt (Abbildung 11; Abbildung 13), durchlaufen also die 4 Prüfschritte (siehe Kapitel rvSU: Geosynthese). Dies wird grundsätzlich als ein sinnvoller Schritt betrachtet. Dafür sprechen mehrere Gründe:

- In den Teilgebieten sind aufgrund der Anwendung von Ausschlusskriterien (AK) und Mindestanforderungen (MA) im jeweiligen Wirtsgestein schon jetzt häufig isolierte, kleinere geographische Gebiete vorhanden (z.B. TG 001 Opalinuston).
- Das Wirtsgestein Tongestein unterliegt sogenannten faziellen und damit lithologischen Veränderungen innerhalb der UR, die sich etwa durch wechselnde Gesteinsausbildung (z.B. wechselnder Tongehalt, Sand- und Kalkeinschaltungen) ausdrücken. Dies hat direkten Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit und deren Variationen. Letztere ist einer der wichtigsten Parameter bei der Evaluierung eines möglichen Standortes im Wirtsgestein Ton.

Nach der Definition der BGE werden UR, TUR, oder Teile davon auch als **Bereiche** bezeichnet.

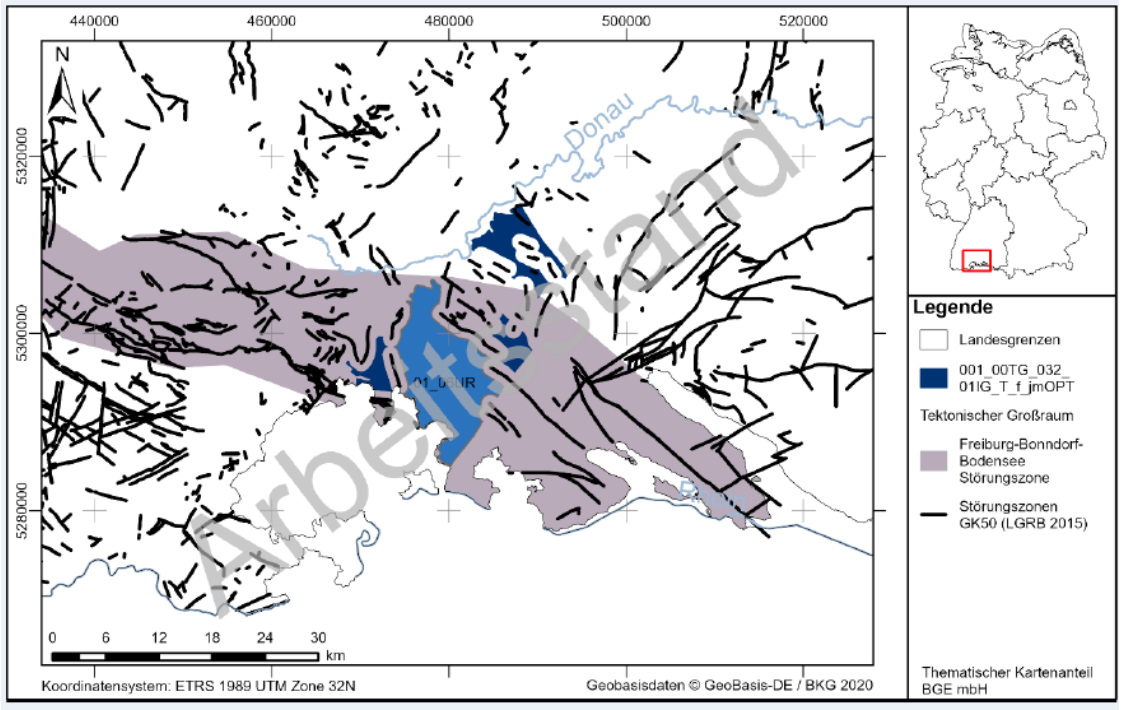

Abbildung 14: Lage der Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone im TG 001 Opalinuston und dem TUR 01_06UR Hegau. Diese auch noch in jüngerer geologischer Zeit aktive Störungszone führt zum Ausschluss des TUR Hegau.

Chronostratigraphie vs Lithostratigraphie

Bei der Einteilung von UR in TUR werden unterschiedliche geologische Eigenschaften benutzt. Dabei spielt etwa die Weiterentwicklung der Methode in Phase 1 Schritt 2 eine Rolle. Ein Beispiel ist der Wechsel des stratigraphischen Ansatzes der BGE, weg von **Chronostratigraphie** (sprich Erfassung der Mächtigkeit des ewG basierend auf dem geologischen Alter) hin zu reiner **Lithostratigraphie** (sprich Einteilung in Formationen oder Mächtigkeiten je nach vorherrschenden Gesteinseigenschaften). Das führt zum Teil zur deutlichen Reduktion der bis jetzt in Betracht gezogenen Gesteinsmächtigkeiten

im TG 001 Opalinuston. Die verbleibenden Tongestein-dominierten Sub-Formationen (Teufelsloch und Zillhausen Sub-Formationen) erfüllen dadurch nicht mehr überall die MA von 100 m Mächtigkeit im ewG und können dadurch als TUR ausgegrenzt und als Kategorie D ausgeschlossen werden (BGE, 2022 b: Abbildung 115, 116). Ein solcher Ansatz ist nun durch neue, digital verfügbare Daten im 3D Modell auch gut nachweisbar und sinnvoll.

Störungszonen

Neben Neueinschätzungen der ewG Mächtigkeiten spielen auch die weitere Evaluierung von tektonisch aktiven Störungszonen eine wichtige Rolle (Abbildung 14). Ein Beispiel für einen aktiven strukturgeologischen Bereich im TG 001 ist die sogenannte Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (Egli et al. 2017). Es ist ebenfalls gut nachvollziehbar, dass die Hegau-Albstadt-Scherzone (HASZ) und der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungszone (FBBSZ) deshalb aufgrund dieser ungünstigen Eigenschaft für eine weitere Untersuchung ausgeschlossen werden, da dazu umfangreiche geologische Daten und Analysen vorhanden sind (BGE, 2022b: Seite 390 ff)). Dies trifft jedoch nicht auf alle Teilgebiete zu, d.h. die Quantifizierung der derzeit bestehenden Ungewissheiten spielt dort eine wichtige Rolle.

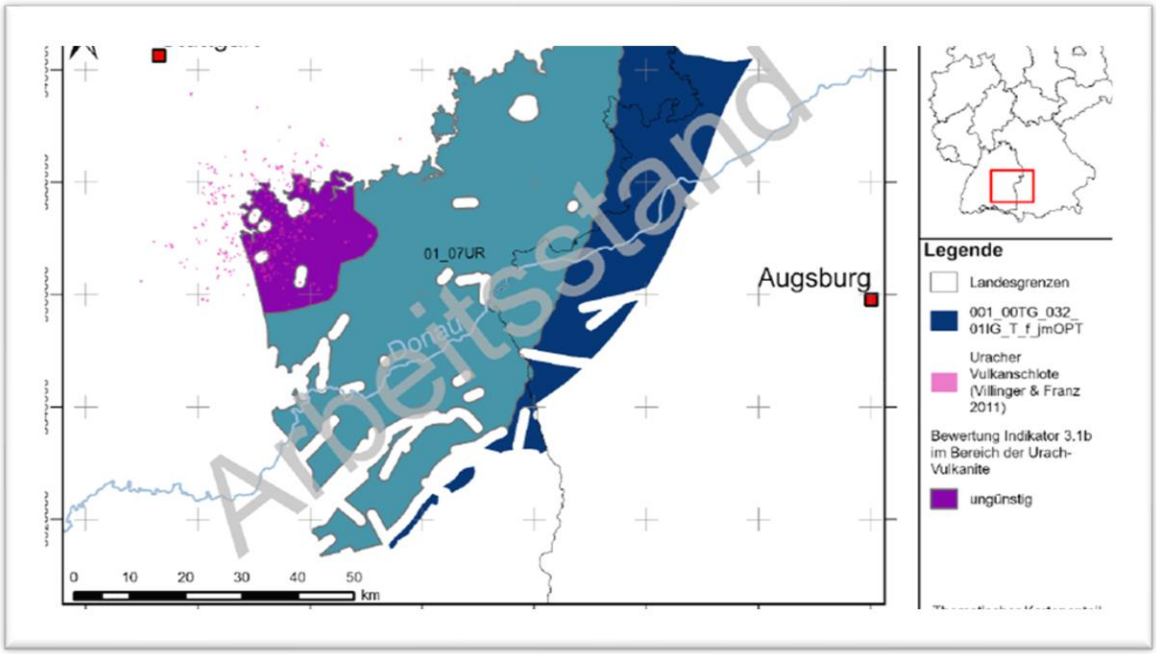

Abbildung 15: Gebiete mit geologisch jungen Vulkanitschloten aus dem Miozän (rosa, pink) haben die Schwäbische Alb durchschlagen und somit auch den Opalinuston. Dies ist ein gutes Beispiel, wie die Anwendung der Ausschlusskriterien (AK) und die Einstufung in Kategorie D zur weiteren Verkleinerung des TG 001 führt (BGE, 2022b: Abb. 124).

Vulkanische Einschaltungen

Im TG 001 befinden sich lokale vulkanische Intrusionen aus einem Altersbereich von 6,9 Ma bis 30 Ma, die das Wirtsgestein Opalinuston durchschlagen haben. Diese treten häufig im Zusammenhang mit aktiven Störungszonen auf.

Sie stellen deshalb einen weiteren guten Indikator dar für die Ausgrenzung von UR oder TUR (Abbildung 15). Aufgrund der Tatsache, dass sie die langfristige geologische Stabilität durch das Vorkommen der jungen vulkanischen Aktivitäten beeinflussen, wie etwa im Falle des Hegau-Vulkangebietes (aus Schreiber & Jentzsch (2021), können sie mit Hilfe der 4 Prüfschritte gut nachvollziehbar ausgeschlossen werden.

Dieser Ausschluss aufgrund von vulkanischen Prozessen wird unterstützt durch das Auftreten der folgenden geologischen Prozesse, wie von Stark et al (2014) beschrieben (siehe Kapitel FEP (features, events, processes)):

- Änderungen im Mineralbestand („Reifung“ der Tonminerale, d. h. Umwandlung quellfähiger in nicht quellfähige Tonminerale)
- Neubildung von Glimmern) and Änderung der Textur (Einregelung)
- Verlust des Selbstabdichtungsvermögens im Tongestein
- Nachlassen der Sorptionsfähigkeit für radioaktive Nuklide
- Entwicklung von Gasfracs (sprich kleinen Gesteinsklüften) infolge der Aggregatzustandsänderung von Wasser im Gestein (Stark et al. 2014).

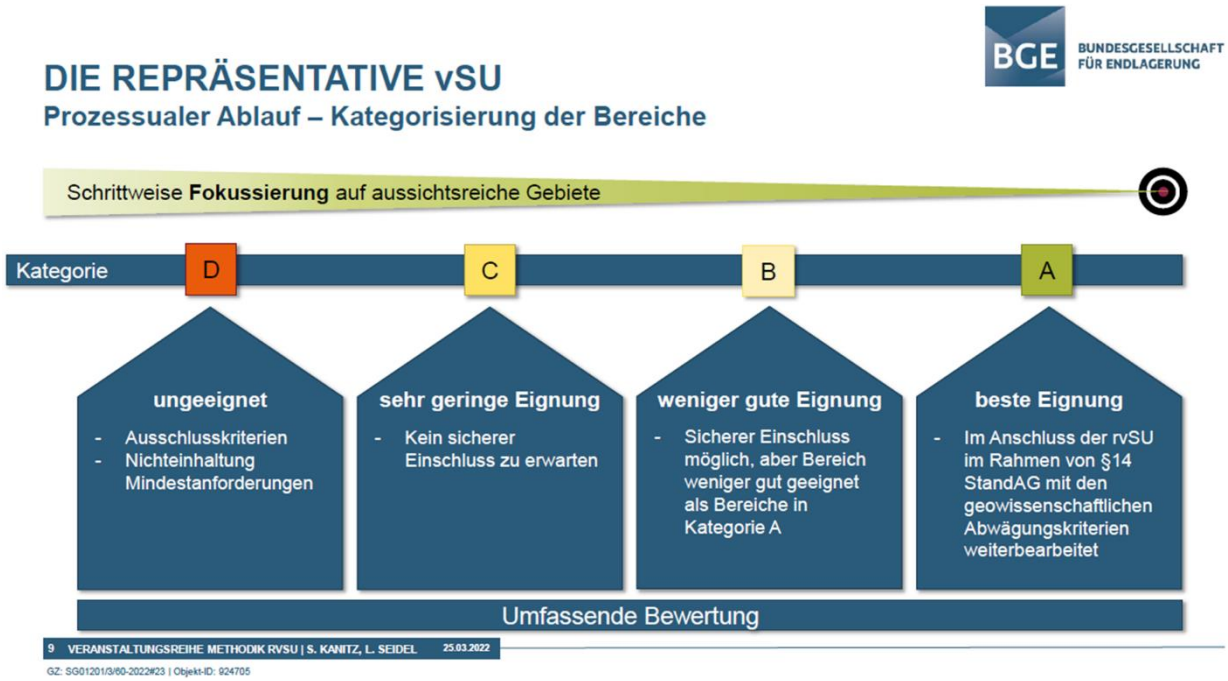

Abbildung 16: In der rvSU wird eine Einteilung aller URs in vier Kategorien durchgeführt. Dieser Arbeitsschritt erlaubt es an sich eine klare Einstufung nach Eignung des jeweiligen URs durchzuführen und ist deshalb begrüßenswert. Da jedoch die Datenlage in den URs sehr unterschiedlich ist, muss dabei auch diese und die daraus resultierende Ungewissheit mit einbezogen werden (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten).

Kategorisierung der Teiluntersuchungsräume (TUR)

Die weitere Unterteilung in TUR vereinfacht eine nachfolgende Einengung der verbleibenden Bereiche in günstige oder ungünstige TUR mit Hilfe von Prüfschritten und den assoziierten TUR-Kategorien (Abbildung 16). Dadurch wird auch eine Vereinfachung der Geosynthese und der Anwendung der geoWK ermöglicht, was sicherlich zur verbesserten Transparenz im Verfahren beiträgt wie in der Kartendarstellung in Abbildung 17 gezeigt.

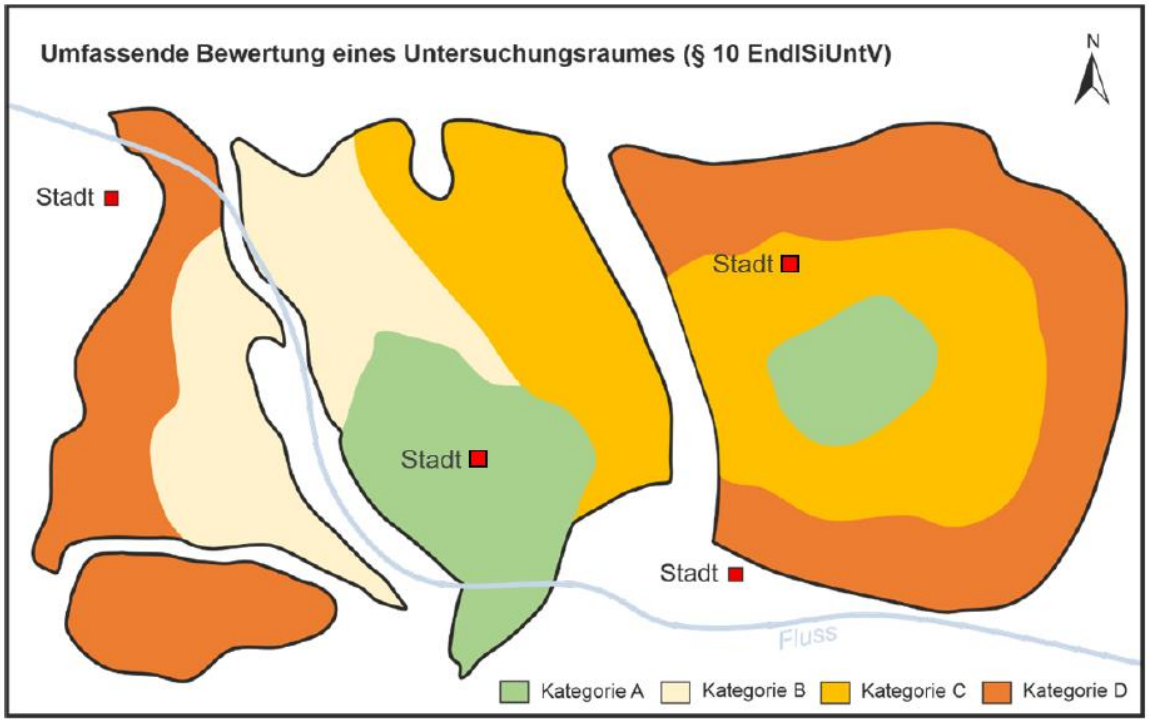

Abbildung 17: Schematische Darstellung der Bewertung eines fiktiven URs in Kategorien A-D (BGE. 2022a: Abb. 10). Die Datenlage in den URs spielt dabei eine wichtige Rolle (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten).

Fazit – Festlegung der Teiluntersuchungsräume (TUR)

Der von der BGE vorgestellte Prozess der weiteren Unterteilung der verbleibenden Teilgebiete in TUR ist sinnvoll und nachvollziehbar, besonders in Gebieten mit hinreichender Datenlage.

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

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.*

Fragestellung 2: Geologische Aspekte in der Methodik der rvSU

Die zweite Fragestellung in diesem Gutachten zielt auf die Berücksichtigung der geologischen Aspekte in der Methodik der rvSU im Falle des Wirtsgestein Ton ab. Dazu werden im Folgenden einzelne geologische Aspekte angesprochen und hinterfragt, ob diese in den zum Teil interagierenden Modulen der Arbeitsschritte ausreichend berücksichtigt wurden.

FEP (features, events, processes)

Basierend auf den weiter fortgeschrittenen Studien in anderen Ländern wird die FEP-Methode auch durch die BGE verwendet (BGE, 2022b). Der daraus entstandene FEP-Katalog für die Standortauswahl wurde ausgehend von der OECD-NEA IFEP-Liste angepasst (Organisation for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency International Features, Events and Processes List; Capouet et al., 2019).

FEP lässt sich mit „**Komponenten, Ereignisse, Prozesse**“ übersetzen, wobei Komponenten Teile des Endlagersystems sind, z.B. das Wirtsgestein, Ereignisse etwa Meeresspiegelschwankungen innerhalb der kommenden 1 Ma und Prozesse z.B. tektonische Ereignisse wie etwa Erdbeben.

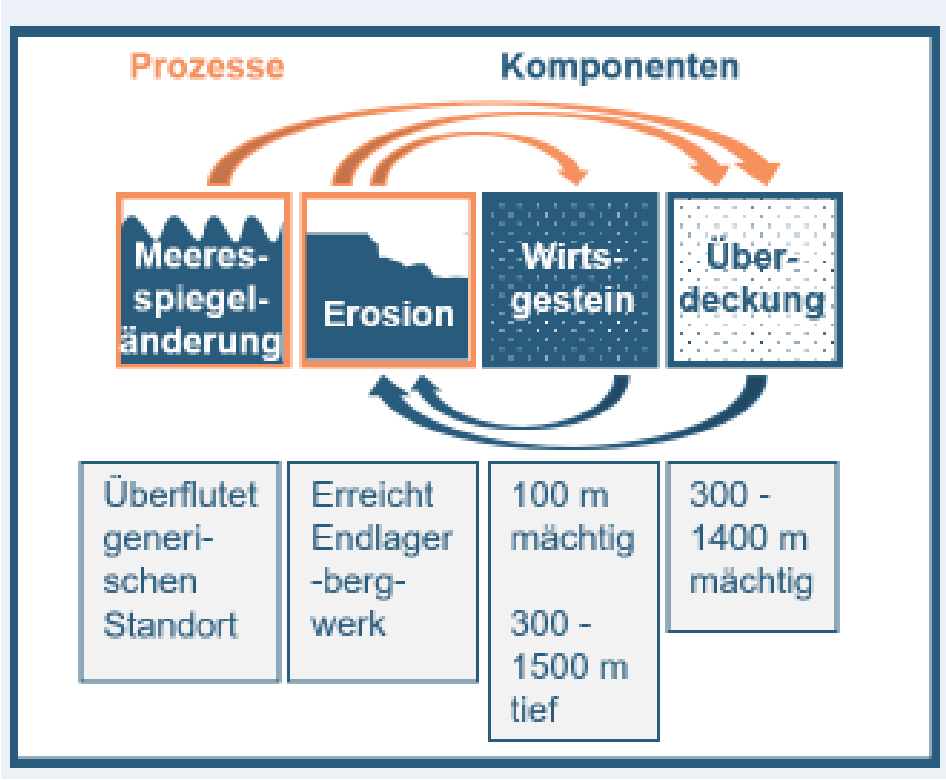

Abbildung 18: FEP (Features, Events and Processes) spielen bei der Anwendung der geoWK eine wichtige Rolle. Dies ist am Beispiel Tongestein aufgezeigt (BGE, 2022b: Abbildung 167). Wichtig ist dabei nicht nur aufzuzeigen welche Prozesse auftreten können, sondern auch welche Komponenten im jeweiligen Prozess eine Rolle spielen (z.B. zu erwartende Erosion innerhalb von 1 Ma vs Mächtigkeit der Überdeckung).

Die wirtsgesteinsspezifischen Kataloge wurden durch die BGE erstellt (BGE, 2022b) und berücksichtigen die wichtigsten Prozesse. Diese sind:

- Meeresspiegeländerungen
- Magmatische und vulkanische Aktivität
- Erdbeben (tektonische Ereignisse)
- Diagenese und Metamorphose
- Regionale Erosion

Als Beispiel ist hier nochmals der Prozess der vulkanischen Aktivität aufgeführt. Im Falle eines Wiederauflebens des beobachteten jungen Vulkanismus im TG 001 kann es deshalb zu folgenden Prozessen kommen (siehe FEP-Analyse von Stark et al.,2014; Kapitel: Vulkanische Einschaltungen):

- Änderungen im Mineralbestand („Reifung“ der Tonminerale, d. h. Umwandlung quellfähiger in nicht quellfähige Tonminerale)
- Neubildung von Glimmern) and Änderung der Textur (Einregelung)
- Verlust des Selbstabdichtungsvermögens im Tongestein
- Nachlassen der Sorptionsfähigkeit für radioaktive Nuklide
- Entwicklung von Gasfracs (sprich kleinen Gesteinsklüften) infolge der Aggregatzustandsänderung von Wasser im Gestein (Stark et al. 2014).

Der FEP-Katalog im Wirtsgestein Tongestein ist gut analysiert und dokumentiert. Darüber hinaus hat die BGE bereits die Initiative ergriffen, um erforderlich Forschungsvorhaben im Forschungsfeld Geowissenschaften auszuschreiben und zu initiieren (insgesamt 7 Vorhaben). Ein Beispiel dazu ist im TG 001 Opalinuston die Quantifizierung von Erosionsraten an der Oberfläche am Albtrauf in Baden-Württemberg (Abbildung 19c). Leider lässt sich in den, bei den Standorttagen 2022 in Aachen vorgestellten Projekten nicht immer erkennen, in welchem Zusammenhang die derzeitigen Forschungsvorhaben mit den wichtigsten Ungewissheiten und Risiken im Endlagerprojekt stehen.

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 (siehe Kapitel* Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten*).*

Beispielhaft wird hier der Prozess der glazialen Überprägung erwähnt, hervorgerufen durch die in den kommenden 1 Ma zu erwartenden mehrfachen Eisvorstößen und den anschließenden Abschmelzungsphasen (Abbildung 19b). Südlich von Berlin wurde dabei eine maximale Erosionstiefe von 500 m festgestellt, die wiederum mit Quartären Lockersedimenten verfüllt ist. Generell ist in den meisten Fällen die Erosionstiefe jedoch geringer als 300 m.

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

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.*

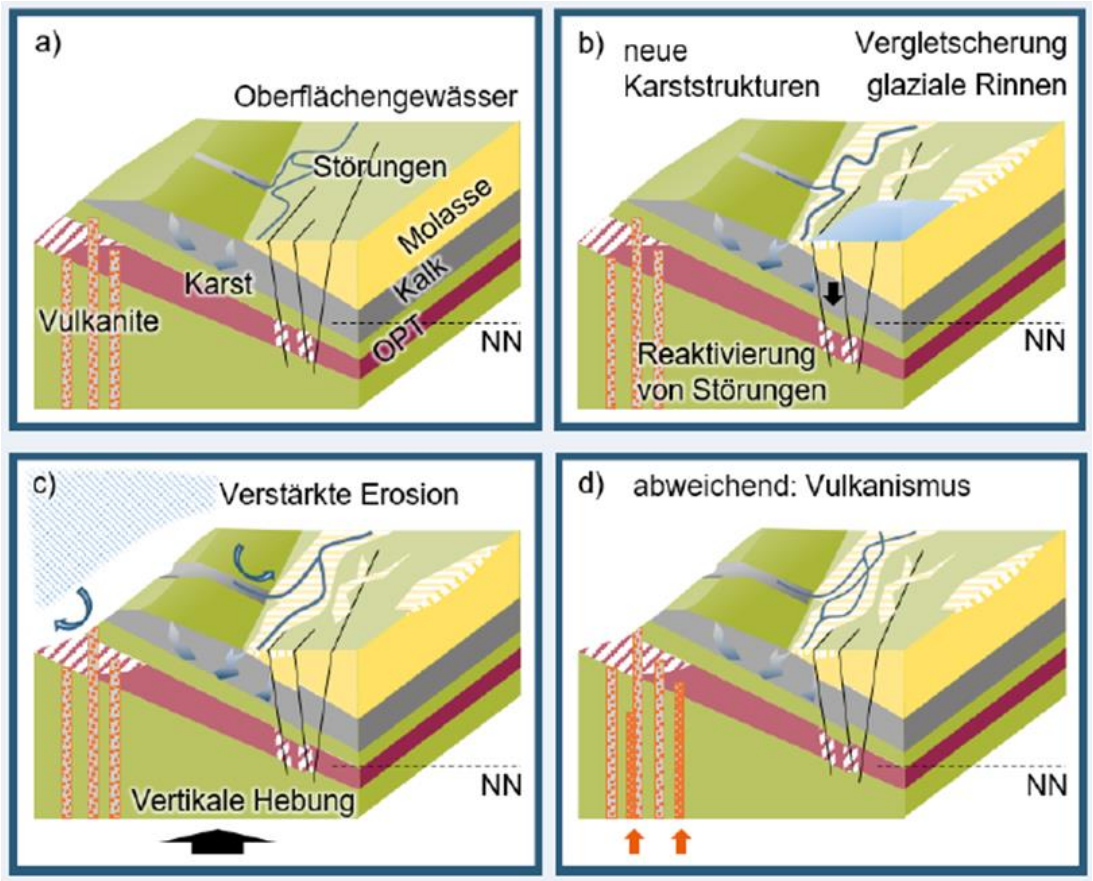

Abbildung 19: Schematische 3D Darstellung des GzM Opalinuston (BGE, 2022b: Abbildung 174). Geogene Prozesse, die im TG 001 Opalinuston zu erwarten sind aufgezeigt anhand von Beispielen (neue Verkarstung, glaziale Rinnenbildung, verstärkte Erosion, erneuter Vulkanismus).

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, da auch weitere geoWKs eng an sie geknüpft sind, wie etwa:

1. MA Gebirgsdurchlässigkeit und Gesteinsdurchlässigkeit. Bis heute nur Referenzdaten zur Gesteinsdurchlässigkeit an kleinen Proben verwendet.
2. geoWK 1: Transport radioaktiver Stoffe im Grundwasser
3. geoWK 2: Konfiguration der Gesteinskörper mit dem Indikator „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise die Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich verstärken können.“

4. geoWK 3: Räumliche Charakterisierung mit Indikatoren „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“
5. geoWK 6: Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten mit dem Indikator „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit zu repräsentativer Gesteinsdurchlässigkeit“.

Diese Liste ist ein gutes Beispiel, wie Arbeitsschritte und verwendete Kriterien im StandAG häufig eng miteinander verknüpft sind.

Im Wirtsgestein Ton sind diesbezüglich insbesondere meist dünn-bankige Einschaltung von Sand und Kalksteineinlagerungen innerhalb der in Betracht gezogenen Tonformationen zu berücksichtigen.

Nach bisherigen Studien der BGE sind solch dünne Sandlagen vorhanden. Jedoch sind die Porenräume mit Karbonatzementen verschlossen, d,h, die Permeabilität ist ähnlich gering wie im umgebenden Tongestein. Dies wäre als günstige Eigenschaft für eine Endlagerung in Tongestein zu bewerten. Zum jetzigen Zeitpunkt sind dazu jedoch nur vorläufige Untersuchungsergebnisse vorhanden. Dabei muss in Betracht gezogen werden, dass diagenetische Veränderungen im Gestein häufig raschen lateralen Veränderungen unterworfen sind.

Ablagerungsmodelle in Tongesteinsbecken und Massentransport von Radionukliden

Bereits in früheren Gutachten (Grötsch, 2021) wurde darauf hingewiesen, dass im StandAG großer Wert auf die verfügbaren **Barrieren** im Endlagersystem gelegt wird, nicht aber auf das Risiko, dass in manchen Wirtsgesteinen durch **Leiter** hervorgerufen wird. Obwohl Barrieren offensichtlich von außerordentlicher Bedeutung sind, haben nicht zuletzt die Grube Asse im Wirtsgestein Salz gezeigt, dass letztendlich Wassereinbruch anhand solcher Wasserleiter zum Fehlschlag in diesem Projekt geführt hat. Leiter für Fluide können dabei oft vertikal orientierte Kluftsysteme und Störungen sein, aber auch horizontal orientierte permeable (= durchlässige) Sedimentkörper. Beide können Wasser oder Radionuklide vertikal oder lateral transportieren.

Im Wirtsgestein Ton ist insbesondere das Risiko durch horizontal orientierte Gesteinskörper vorhanden, die durch natürliche Prozesse bei der Ablagerung des Sediments entstehen. Beispiele dafür sind etwa sandige Deltaschüttungen, Flachwasserturbidite oder Sturmlagen. Vertikal orientierte Kluftsysteme dagegen werden, speziell in weicheren Tonformationen (z.B. Tertiäre Tone) wieder verschlossen („clay smear“ Effekt), abhängig von den geomechanischen Eigenschaften der jeweiligen Tonformation.

Die BGE hat diesbezüglich inzwischen digitale Bohrlochdaten aus den wichtigsten Bohrungen im TG 001 Opalinuston in ihr 3D Model eingeladen was die Korrelation von Gesteinskörpern zwischen den Bohrungen erleichtert und die laterale Heterogenität im Opalinuston deutlich macht. Es wurde dabei etwa ein höherer Sandanteil im Norden des TG festgestellt. Bis heute ist jedoch nicht bekannt, wo die klastischen Schüttungen (Liefergebiete) z.B. verursacht durch Flussdeltas stammen. Eine solche Information ist wichtig für alle TG im Wirtsgestein Ton, um solche Bereiche von sandigen Schüttungen vermeiden zu können.

Die BGE hat deshalb mit Prof. Jochen Erbacher von der BGR ein Forschungsprojekt mit flachen Aufschlussbohrungen initiiert was noch in Bearbeitung ist und wobei die BGR noch weitere Forschungsbohrungen außerhalb von Teilgebieten abteufen wird. Erste Daten daraus sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 zu sehen (BGE, 2022b).

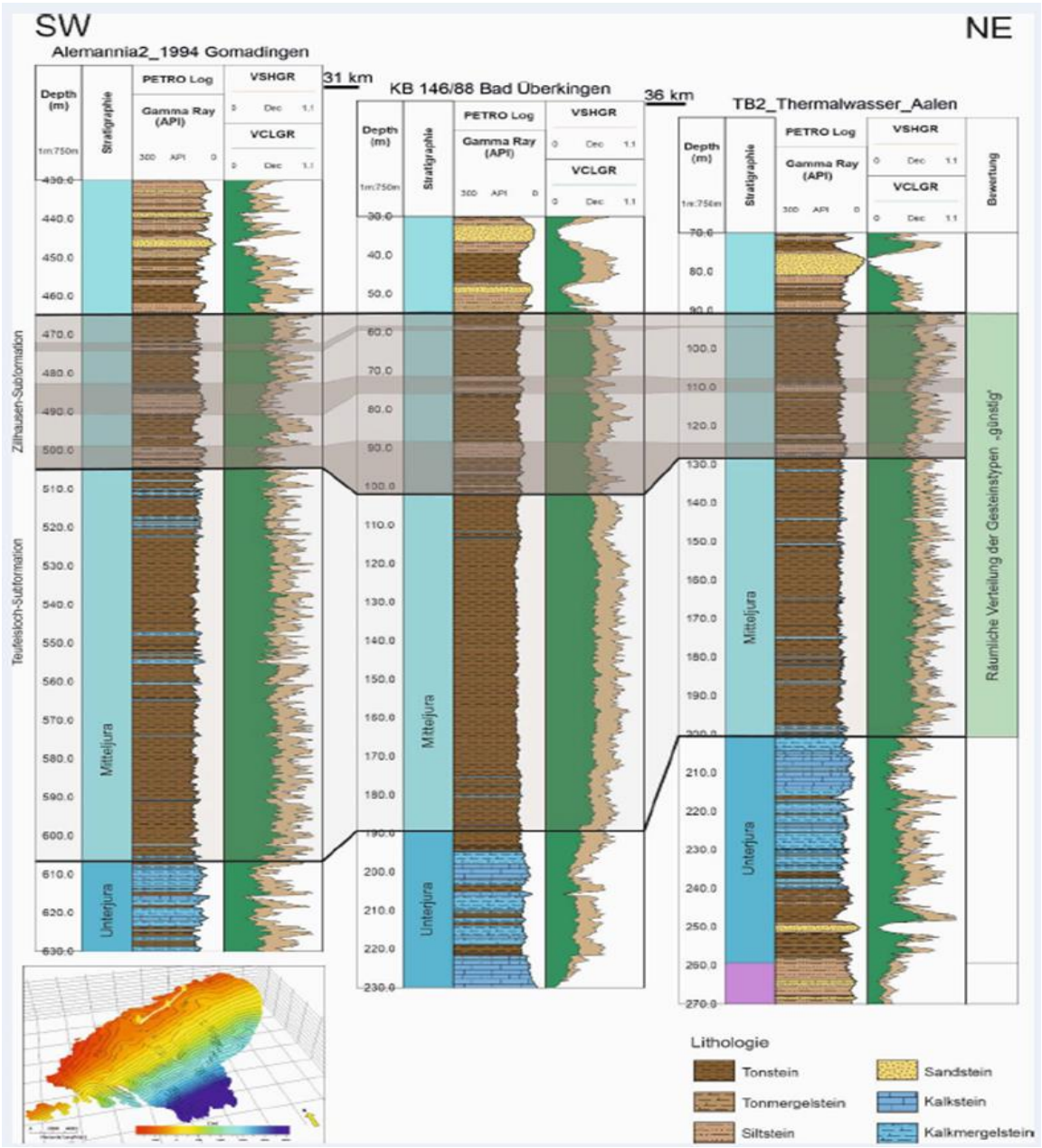

Abbildung 20: Querschnitt mit Korrelation der lithostratigraphischen Einheiten der Teufelsloch und Zillhausen Subformation im Opalinuston (BGE, 2022b: Abb 110). Die Lage der Bohrungen ist im 3D Model (Karte) des TG 001 ersichtlich. Obwohl es sich um eine vornehmlich tonige Sedimentfolge handelt sind deutlich die dünnbankigen Sand-, Silt-, und Karbonateinschaltungen in den Bohrlochmessungen zu erkennen. Aufgrund der limitierten, vertikalen Auflösung von Bohrlochmessungen sind solche dünnbankigen Lagen besser in Bohrkernen zu analysieren. Weitere Studien sind notwendig, um aus dieser lithostratigraphischen Korrelation ein detailliertes sequenzstratigraphisches Modell zu entwickeln.

Die bisherigen Korrelationen zwischen den Bohrungen im Untergrund waren auf chronostratigraphischen Untergliederungen der Gesteinsformationen gegründet. Im neuen Bericht ist die BGE zu lithostratigraphischen Untergliederungen gewechselt, um die tonigen und sandigen

Teile im Opalinuston besser voneinander trennen zu können (Abbildung 20, Abbildung 21). Es ist jedoch noch keine sequenzstratigraphische Korrelation vorhanden basierend auf einem konzeptuellen sedimentologischen Modell für das Ablagerungsbecken zur Zeit des Opalinustones. Nur damit lassen sich Aussagen zu den oben beschriebenen möglichen permeablen Leitern machen. Die Arbeiten von Franz & Nitsch (2009) können dabei als Startpunkt für kommende Untersuchungen dienen, beinhalten jedoch nicht das für eine weitere Evaluierung notwendige Detail.

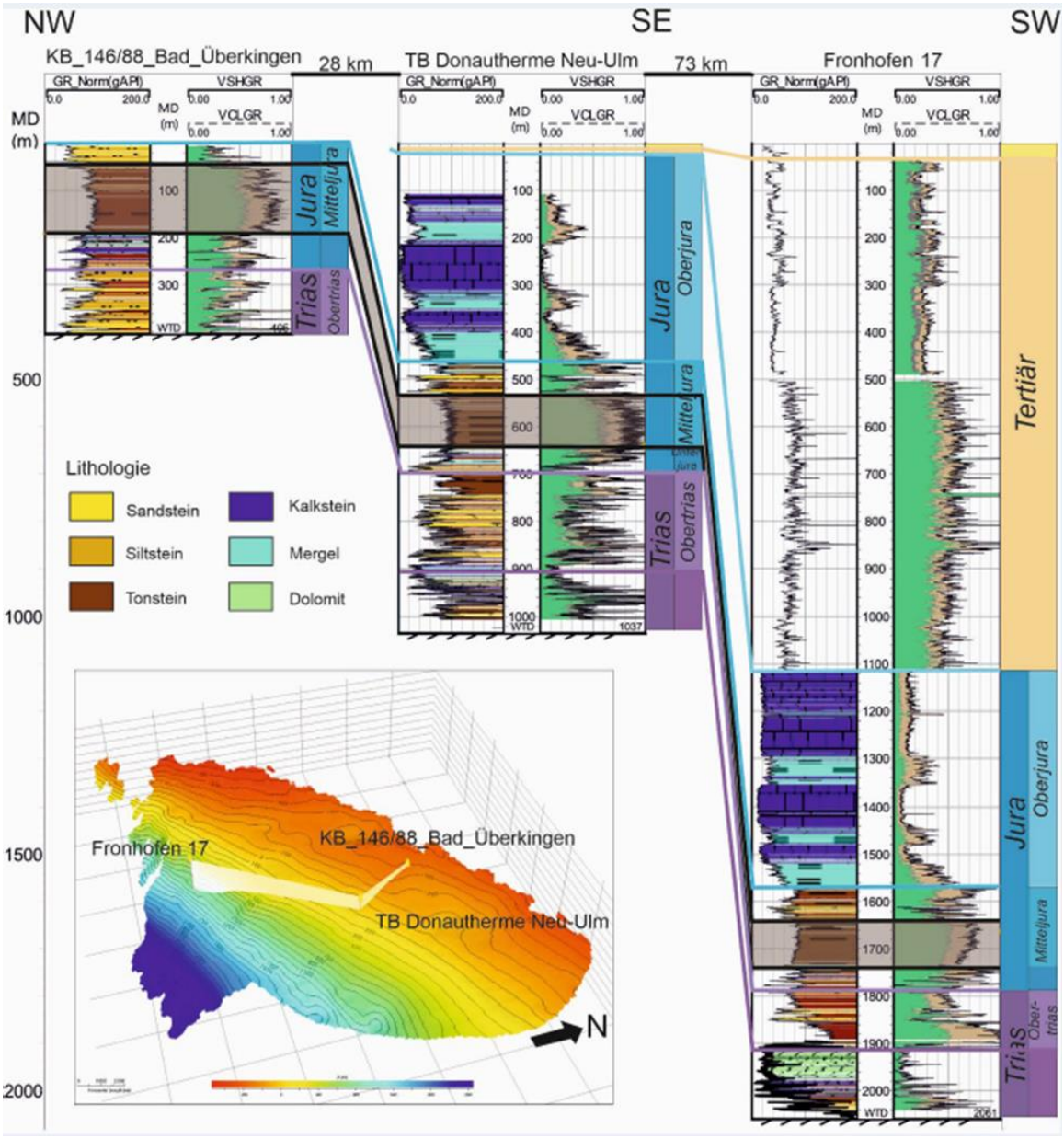

Abbildung 21: Querschnitt und Korrelation des Opalinustons in drei Bohrungen im TG 001 Albvorland. Die 3D Karte zeigt die Tiefenlage der Bohrungen von der Schäbischen Alb bis hinein ins Molassebecken (BGE, 2022b: Abb 85). In den noch notwendigen, detaillierteren, sequenzstratigraphischen Untersuchungen 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 Liefergebiete (z.B. Flussdeltas) zu bekommen.

Gegenwärtig werden die Eigenschaften des Opalinustones im TG 001 als „Günstig“ bewertet. Dabei ist das Vorkommen von sandigen Lagen bekannt, wobei diese im TG 001 nach Norden hin zunehmen. Auch in Mont Terri, Schweiz weist der Opalinuston sogenannte karbonatische „hard grounds“ auf, sprich eine andere Faziesausbildung. In Baden-Württemberg und Bayern sind nach N mehr gröbere Klastika (Sande) zu finden, die auf ein nördliches Liefergebiet deuten (Abbildung 23). Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass 1D Modelle bezüglich der horizontalen Ausbreitung nicht aussagekräftig sind, sprich eine Analyse in 3D notwendig ist, um die Verbreitung von Radionukliden abzuschätzen (geoWK: Rückhaltevermögen, Konfiguration, Transport Radionuklide)

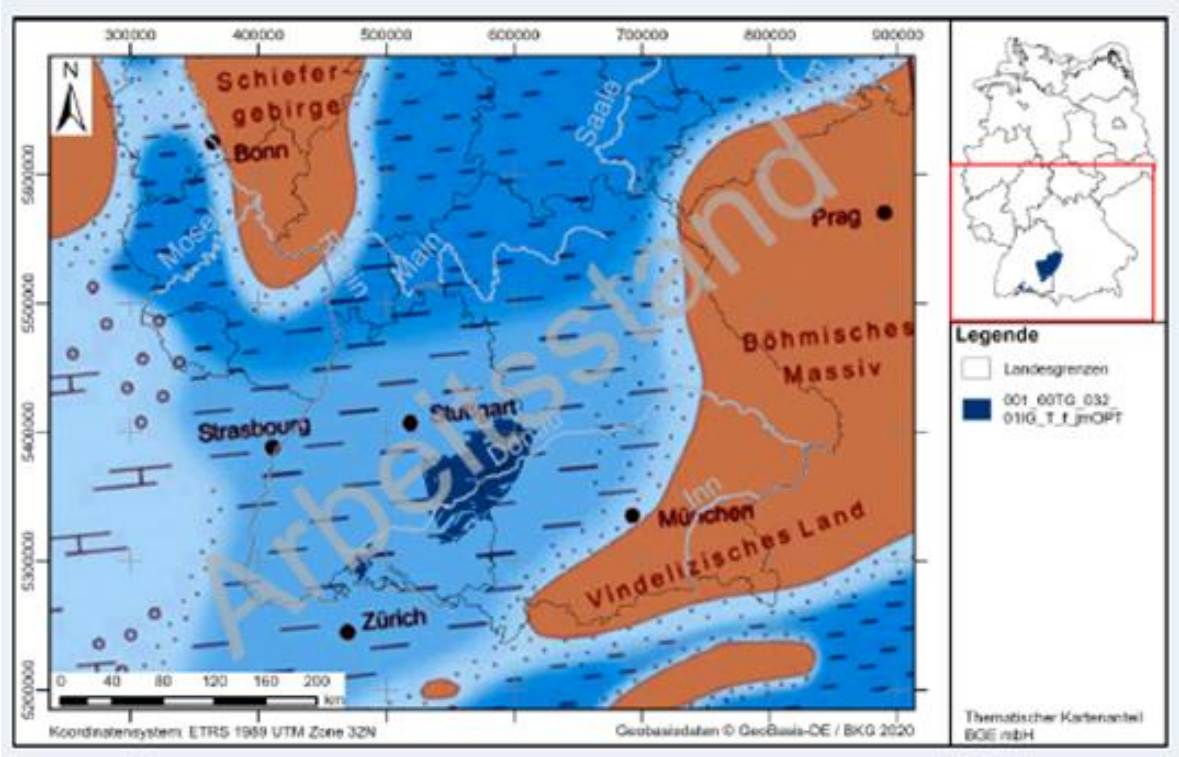

Abbildung 22: Schematische, paläogeographische Darstellung des Ablagerungsraumes in Süd-Deutschland und benachbarten Ländern zur Zeit des Mittleren Jura (Beginn Opalinuston). Braune Gebieten zeigen ehemaliges Festland (Erosionsgebiete) an. Blaue Bereiche sind Meeresgebiete (Ablagerungsraum). In der Nähe der Landmassen finden sich Sandablagerungen (gepunktet). Ton ist durch Striche gekennzeichnet. Karbonateinschaltungen sind bekannt in den hellblauen Gebieten (z.B. Mont Terri, Schweiz, NW-Frankreich). In Dunkelblau ist das GzM Tongestein eingezeichnet. Abbildung aus BGE (2022b: Abb. 135, S. 399). Leider fehlen Detailkenntnisse zur Lokation von Flussdeltas und somit Schüttungsgebieten, sprich den Hauptliefergebieten von Sand. Dies ist eine der wichtigen Ungewissheiten im GzM Tongestein, da Sandeinschaltungen die Gebirgsdurchlässigkeit entscheidend beeinflussen 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 (Prof. Jochen Erbacher) plant eine weitere Flachbohrung im Opalinuston bei Coburg um ein besseres Verständis der Faziesverteilung im Ablagerungsbecken zu bekommen. Solche Studien zur Sandverteilung sind in allen Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongesteins notwendig und haben eine lange Vorlaufzeit.

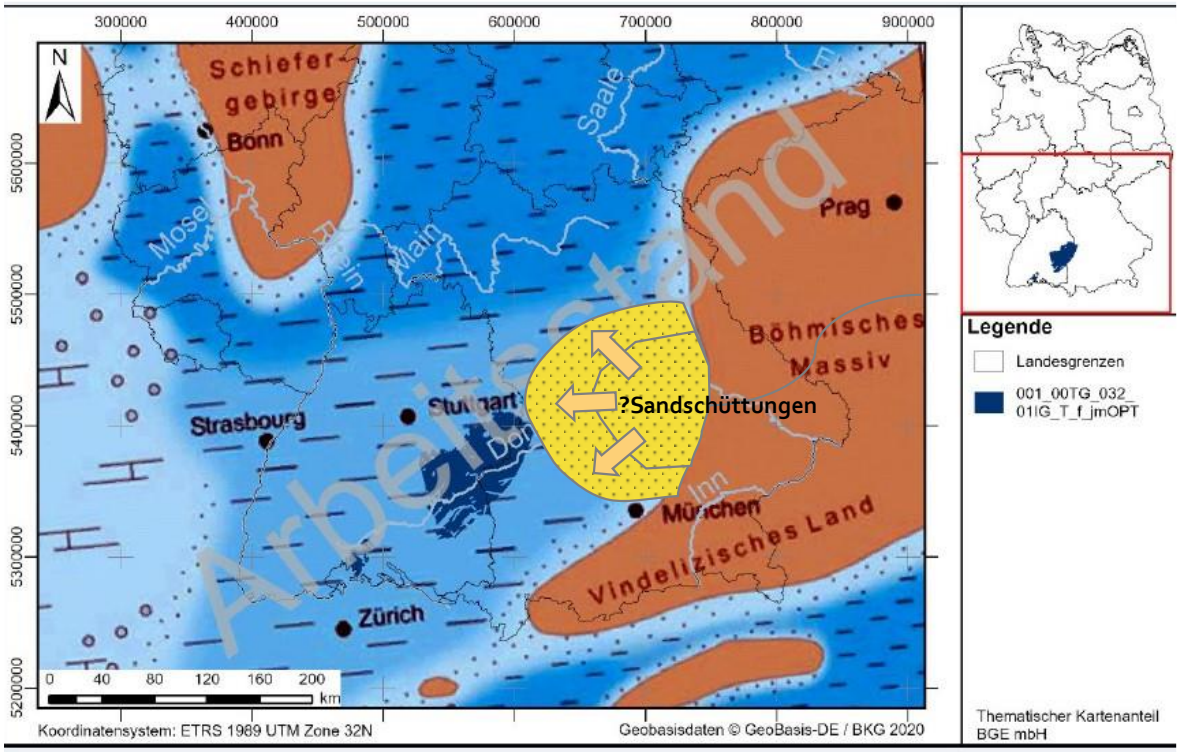

Abbildung 23: Hypothetische Illustration der Paläogeographie zur Zeit der Ablagerung des Opalinuston im Mittleren Jura ähnlich Abbildung 22 mit einem angenommenem Flussdelta das Sandschüttungen von Norden in das TG 001 liefert. Eine solche Situation wäre etwa vergleichbar mit dem Analogbeispiel des Po in Nord-Italien (Abbildung 24). Leider fehlen im Augenblick Detailkenntnisse zur Lokation von Flussdeltas und somit Schüttungsgebieten, sprich den Hauptliefergebieten von Sand. Dies ist eine der wichtigen Ungewissheiten in den Teilgebieten mit Wirtsgestein Tongestein, da Sandeinschaltungen die Gebirgsdurchlässigkeit entscheidend beeinflussen können durch ihre erhöhte Gesteinsdurchlässigkeiten (= Permeabilitäten). Solche Gesteinskörper können laterale Wegsamkeiten im Gestein über lange Distanzen schaffen, die etwa den Transport von Radionukliden befördern können. Deshalb ist es wichtig nicht nur Barrieren sondern auch Leiter im ewG zu betrachten.

***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 (*Abbildung 24*).*

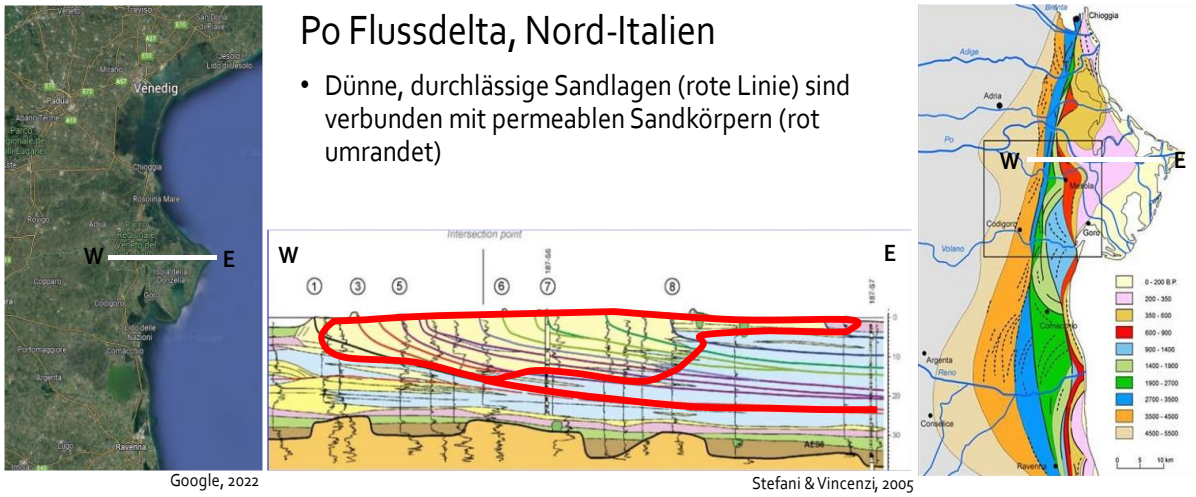

Abbildung 24: Mögliches Analogmodell eines Ablagerungsraumes heute, ähnlich dem des Opalinustones zur Zeit des Mittleren Jura mit mächtigen Tonabfolgen (hellblau) die durch den Po transportiert und in der Adria abgelagert werden. Die dünnen, eingeschalteten Sandlagen können deutlich höhere Durchlässigkeiten/Permeabilitäten aufweisen und in Verbindung mit großen Deltasandkörpern (gelb) zum Transport, etwa von Radionukliden beitragen. Eine solche Konstellation möchte man im Falle eines radioaktiven Endlagers vermeiden.

Kluft- und Störungsflächen und ihr Einfluss auf die Gesteinsdurchlässigkeit

Kluft- und Störungsflächen sind in harten Gesteinen ein wichtiger Risikofaktor für hohe vertikale Durchlässigkeiten (z.B. im Wirtsgestein Kristallin), die den raschen Transport von Radionukliden ermöglichen können. Im Gegensatz dazu ist das in Tongesteinen wichtige *„Clay Smear Potential“*, sprich die Eigenschaft von relativ weichen Tongesteinen Klüfte oder kleinere Störungen schnell wieder zu verschließen und dadurch die Gesteinsdurchlässigkeit vertikal und 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 Studien konnten bis dato noch nicht bei der BGE eingesehen werden.

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 (*Abbildung 25*).*

Allerdings führen weiche Gesteine wie Ton zur verstärkter Erosion, etwa ausgelöst durch zukünftig zu erwartende Eisbewegungen und dadurch entstehende glaziale Rinnen (siehe Kapitel FEP (features, events, processes)).

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.*

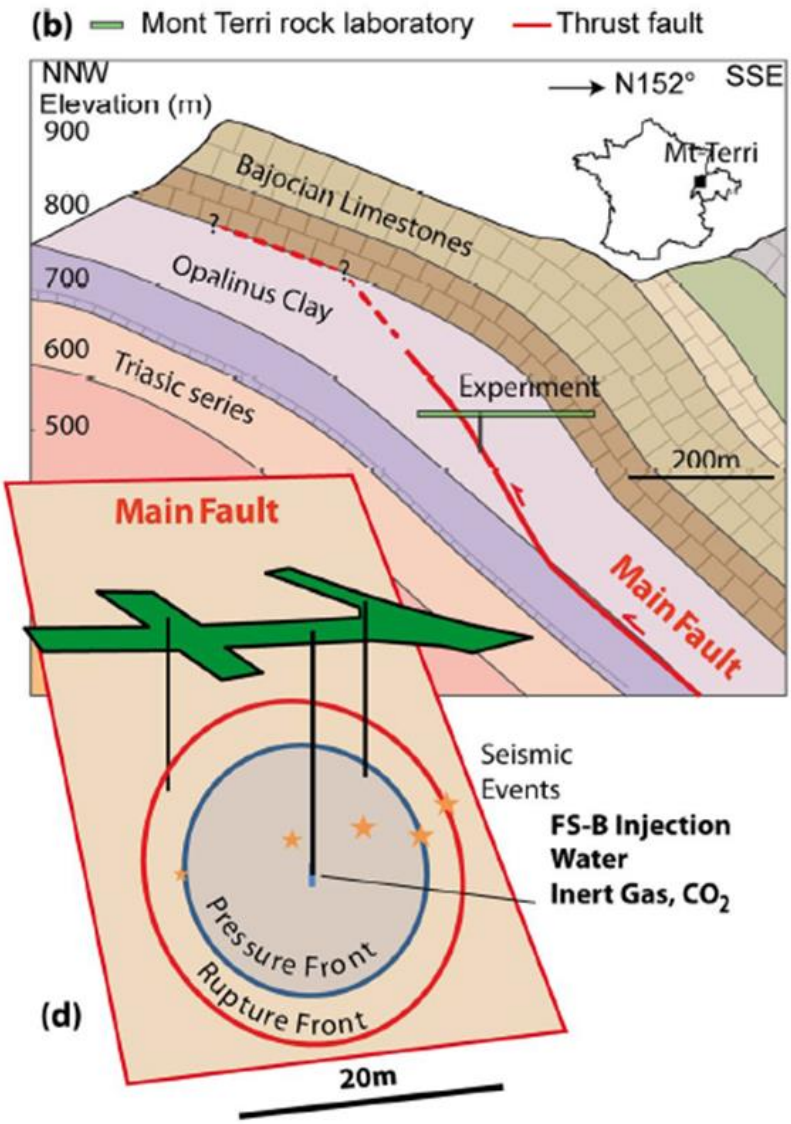

Abbildung 25: Deformationstest im Mont Terri Endlager-Projekt (Schweiz) im untertägigen Stollensystem an einer bekannten Störungszone („main fault“). Zur Datenerfassung im Opalinuston wird versucht, Bewegungen an Störungszonen durch die Injektion von Fluiden (Wasser, Gas, CO2) auszulösen und deren Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit abzuschätzen (Viswanathan et al (2022).

Wichtige Gesteinseigenschaften und Datenverfügbarkeit

Bohrungen und Bohrkerndaten verschiedener Art (z.B. Bohrlochmessungen, Bohrkerne, Flüssigkeitsproben in verschiedenen Tiefen etc.) sind notwendig, um vertikale und laterale Veränderungen in den Gesteinseigenschaften charakterisieren zu können. Solche Daten sind bis heute nur sehr vereinzelt vorhanden. Selbst in neuen Bohrungen (z.B. Donautherme Neu-Ulm, Abbildung 26) im TG 001 Opalinuston sind **keine Bohrkerne vorhanden**. Letztere sind essenziell, um lithologische und fazielle Veränderungen im Detail beschreiben zu können. Dies ist mit Bohrklein nur unzureichend möglich.

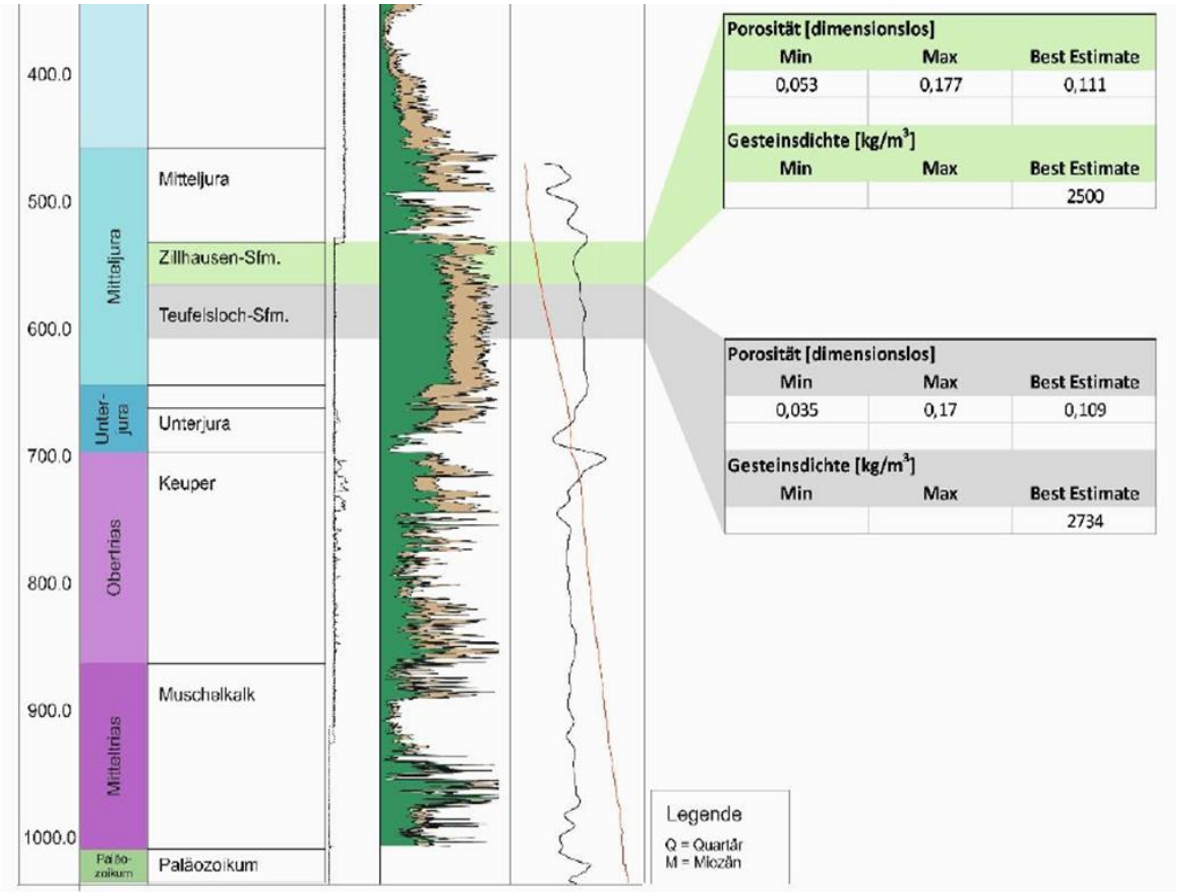

Abbildung 26: Beispiel für Modelleinheiten im TG 001 „Opalinuston“ am Beispiel des repräsentativen Profiles der TB Donautherme Neu-Ulm (BGE, 2022b: Abb. 140). Der Opalinuston wird dabei in zwei Einheiten unterteilt, die tonige Teufelsloch Subformation und die sandige Zillhausen Subformation. Für Modellentwicklungen werden sogenannte „Best Estimates“ verwendet, die Durchschnittswerte der Porosität und Gesteinsdichte repräsentieren. Sie wurden mit Hilfe von Bohrlochmessungen errechnet. Aufgrund der Tatsache, dass kein Bohrkernmaterial vorhanden ist, sind keine Werte zur Gesteinsdurchlässigkeit (= Permeabilität) vorhanden, den wichtigsten Parameter für Modellrechnungen zum Transport von Radionukliden. Dies ist eine signifikante Ungewissheit, die in den weiteren Arbeiten berücksichtigt werden muss. Es ist auch zu berücksichtigen, dass Durchschnittswerte die eigentlichen Transportgeschwindigkeiten von fluiden Phasen unterschätzen, da meist die Extremwerte das Fließverhalten bestimmen.

Die BGE hat aber inzwischen digitale Bohrlochmessungen in Ihre 3D Modelle einbauen können was als Schritt in die richtige Richtung betrachtet wird. Diese Messungen (z.B. Gesteinsdichte) und daraus kalkulierte Parameter (z.B. Porosität im Gestein) geben wichtige Anhaltspunkte. Aufgrund des Fehlens von Bohrkernen, liegen keine Messungen zur Gesteinsdurchlässigkeit (= Permeabilität) vor. Dies resultiert in Ungewissheiten und muss auf Referenzwerte basieren oder, alternativ, auf wenig realistische Korrelationsfunktionen zwischen Porosität und Permeabilität.

Aus den vorhandenen Parametern wurden Durchschnittswerte errechnet (Abbildung 26). Bei Untergrunduntersuchungen ist dies eine allgemein bekannte Fehlerquelle, wenn es sich um Durchlässigkeit (= Permeabilität) dreht. Gesteinspermeabilität ist für die Untersuchung des möglichen Radionuklidtransportes der wichtigere Parameter im Vergleich zu Porosität.

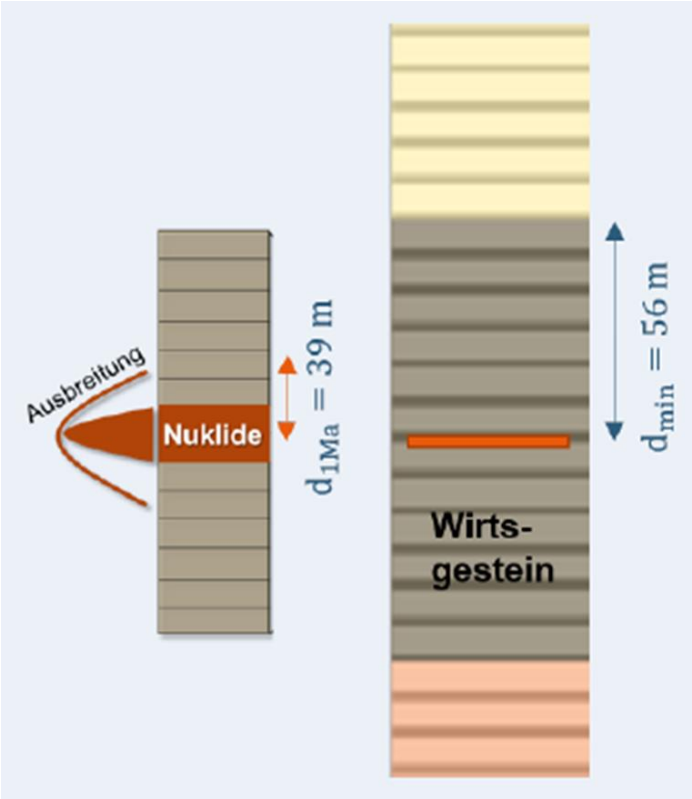

Abbildung 27: 1D (vertikale) Simulationen des Transportes von Radionukliden. Die Modelle bestehen aus Schichten, denen 8-10 Parameter zugeordnet sind. Um als geeignetes Wirtsgestein klassifiziert zu werden, muss bei der Mehrzahl der Rechenläufe d(1Ma) kleiner d(min) sein, sprich der Abstand des Endlagers 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.

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“).*

Risiko: Dünnbankige Sand/Silt-Gesteinskörper (z.B. Flachwasserturbidite, Deltaschüttungen, Sturmlagen) sind lateral extensiv und können in Verbindung mit grossräumigen, deltaischen

Sandsteinkörpern zu hohen Permeabilitäten im Gestein führen, sprich den Transport von Radionukliden befördern. Deshalb sind von der BGE vorbereitete 1D Modelle nur aussagekräftig mit Bezug auf den vertikalen Transport von Radionukliden.

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.*

Fazit – Verwendung von Modellen: Geologische Modelle und ihre Verwendung zu dynamischen Modellierungszwecken müssen an die zu erwartenden Risiken angepasst sein. Risiken müssen basierend auf der Charakterisierung von Ungewissheiten klassifiziert werden. Dadurch kann eine Integration von Ungewissheiten, Risiken und den, auf Ihnen basierenden, notwendigen Modellen erreicht werden.

Verwendung von Gesteinseigenschaften in Modellen

In den bei der rvSU angewendeten 1D Modelle wurden Analogdaten der NAGRA aus dem Mont Terri Projekt in der Schweiz benutzt, wobei per Schicht 8-10 Parameter verwendet wurden. Dabei wird alleine der **vertikale Transport** von 47 Radionukliden mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen modelliert.

Ist ein Teiluntersuchungsraum dabei bezüglich der wesentlichen Geometrien (Teufe und Mächtigkeit des Wirtsgesteins) sehr heterogen, wird ggf. mehr als ein repräsentatives Profil betrachtet, stets jedoch nur 1D. Mögliche laterale Verbindung von permeablen Gesteinskörpern können so nicht untersucht werden, sprich die aufgezeigte Fragestellung nach lateralen Leiterhorizonten nicht beantwortet werden.

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 27). Porosität und Permeabilität in den Gesteinslagen werden aus Analogdaten entnommen. Dabei sind Diffusions- und Adsorptionswerte bis heute nur für wenige Radionuklide und Lithologien vorhanden.

Geosynthese im Untersuchungsraum

Das StandAG regelt mit Hilfe der rvSU, dass für jeden Teiluntersuchungsraum (TUR) eine Geosynthese erstellt werden muss (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12, siehe Kapitel rvSU: Geosynthese). Als Basis dafür hat die BGE die Charakterisierung der TUR via der Geosynthese entwickelt inklusive einer umfangreichen und standardisierten Dokumentation dazu.

Nach StandAG dürfen darin keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche den Erhalt der Barrierewirkung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG zweifelhaft erscheinen lassen. Eine solche Einschätzung muss für alle TUR noch erfolgen.

Das statische 3D Modell in TG 001 Opalinuston ist inzwischen mit Hilfe von digitalen Bohrlochmessungen verbessert worden, wobei auch der Horizont des Top Opalinuston ersetzt wurde mit Hilfe von lithostratigraphischen Korrelationen zwischen den digital verfügbaren Bohrungen. Dadurch konnte die Top Opalinuston-Fläche neu modelliert werden, wobei dies in geringere Mächtigkeiten des ewG resultierte (davor gesamter Mitteljura). Dabei ist der Top der Teufelsloch Subformation stets noch unklar.

Ein „play fairway“ im TG 001, also ein Gürtel mit optimalen Eigenschaften des Wirtsgesteins für eine Endlagerung im jurassischen Sedimentbecken des Opalinustones, ist noch nicht bekannt aufgrund der heterogenen Datenlage. In der Zillhausen Subformation wurden 4 sandige Bänke festgestellt, deren Ursprung noch nicht geklärt ist (BGE, 2022b: S.370, Abb 123).

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).*

Im TUR 01_07UR ist ein teilweise hohes hydraulisches Potenzial für die Karbonataquifere Oberjura und Muschelkalk beschrieben (Stober, 2013). Ein solches kann auch für die sandigen Abfolgen der Eisensandstein-Formation angenommen werden (BGE, 2022b; Abbildung 24).

Trotz neuer Erkenntnisse im TG 001, wie etwa zu Vulkanitröhren, sind noch keine vorläufigen Pläne zur weiteren obertägigen Erkundung vorhanden. Darüber hinaus lassen auch die Konsultationen mit der BGE nicht erkennen, dass in den bis dato analysierten UR/TUR ein Überblick zum „White Space“ besteht, d.h. das Wissen über das was man nicht weis (Abbildung 31). Ein solches Wissen wird jedoch als wichtig erachtet für eine allgemein anwendbare Einschätzung der Ungewissheiten, die quantitative Vergleiche zwischen TUR zulässt (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten).

Fragestellung 3: rvSU und die Verwendung der Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK)

Im vorliegenden Bericht der BGE (BGE, 2022a, b) wird vorgestellt, dass die geoWK nach der Kategorisierung (A-D) eines TUR nochmals angewendet werden sollen zu einer abschließenden, verbal argumentativen Bewertung eines Bereiches (Abbildung 11).

Dies kann, je nach Verwendung eines geoWK dazu führen, dass geoWKs entweder nicht zur Verwendung kommen oder, im Gegenteil, dass einzelne geoWKs bevorzugt benutzt werden. Dieser Ansatz kann dazu führen, dass bei heterogener Datenlage, geoWKs und die verbal argumentative Vorgehensweise zu einer unzureichenden Vergleichbarkeit zwischen den TUR führen könnte oder dass Voreingenommenheit („Bias“) zum Tragen kommt – ein wichtiger Faktor bei vielen Projektentwicklungen, der oft zu Fehlentscheidungen führen kann (z.B. Großflughafen Berlin).

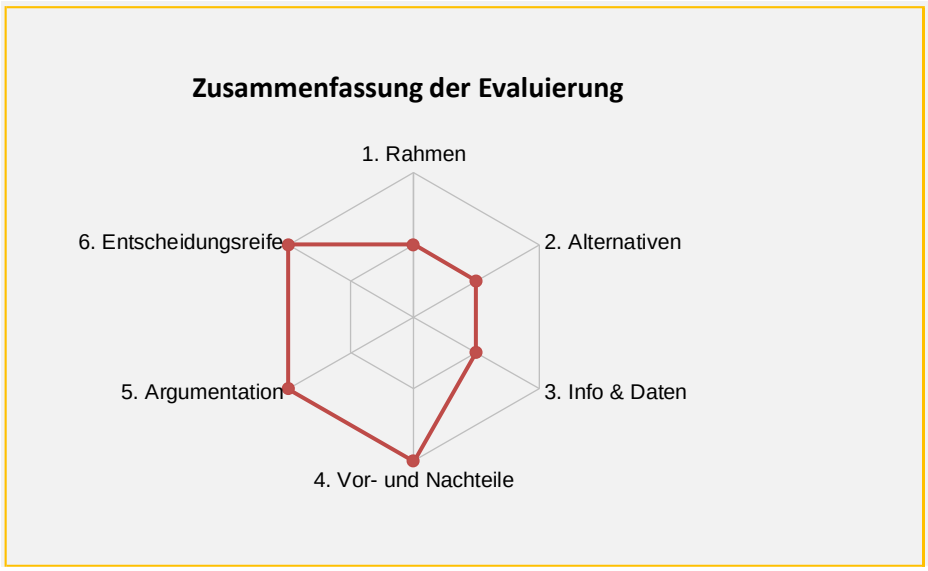

Abbildung 28: Beispiel einer zusammenfassenden Darstellung der Entscheidungsqualität nach 6 vorgegebenen Kriterien mit Hilfe einer Spinnengrafik. Die Anwendung von „decision quality“ und einer solchen Darstellungsweise erlaubt eine bessere Vergleichbarkeit, etwa zwischen Bereichen. Sie zeigt auch deutlich auf, wo bei der Entscheidungsfindung Schwachstellen vorhanden sind. Sie ist deshalb einer rein verbal-argumentative Vorgehensweise vorzuziehen.

Die vorgeschlagene Verwendung der geoWKs am Ende des Prozesses in der rvSU zeigt deutlich die Verzahnung verschiedener Arbeitsschritte und der involvierten Kriterien wie AK, MA und geoWK. Sie müssen letztendlich zusammengeführt werden bei der Entscheidungsfindung. Dies kann unterstützt werden mit Hilfe der Verwendung des „decision quality“ (DQ) Ansatzes.

***Empfehlung 3.18**: Um Voreingenommenheit (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:

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

*Eine solche Methode kann ebenfalls zu einer vergleichbaren Einschätzung dienen und auch mit Hilfe von Spinnengrafiken einfach dargestellt werden (*Abbildung 28*).*

Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und 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 vSU im Standortauswahlverfahren“ (BGE Anlage, 2022, S 608; BGE 2022c) sein muss. Diese Problematik wird nun erstmals in der rvSU angegangen. Dabei hat die BGE das Ziel: „Diese erste, gezielte Auseinandersetzung mit Ungewissheiten im Kontext des Standortauswahlverfahrens bildet die Grundlage für die Betrachtung von Ungewissheiten in den weiterentwickelten (wvSU) und umfassenden (uvSU) vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den Phasen II“ (BGE, 2022 b: S. 607).

Deshalb bleibt hier festzustellen, dass bis jetzt kein klares Konzept besteht, wo, welche Ungewissheiten wie in den Workflow einfließen sollen. Das StandAG oder andere gesetzlichen Regelungen haben dies nicht hinreichend festgelegt, was aufgrund der Komplexität dieses Sachverhaltes nachvollziehbar ist. Die Analyse der neuen BGE Berichte (BGE, 2022a, b) zeigen ebenfalls, dass der Workflow (sprich rvSU Methodik) diesbezüglich noch nicht ausreichend maturiert ist.

Ein Beispiel dazu ist die Aussage „Ungewissheiten in Zusammenhang mit der Modellierung in der Langzeitsicherheitsanalyse (§ 9 Abs. 2 EndlSiUntV) sind in den rvSU noch nicht zu betrachten.“ (Anlage, S 607). Gleichzeitig werden aber richtigerweise schon erste Ansätze in der rvSU Methodik vorgestellt, wobei Unsicherheiten für die Anwendung in numerischen 1D-Transportmodellen für den Radionuklidtransport bewertet werden (BGE 2022b: Abb 187).

Definitionen, Ausweisung und Bewertung von Ungewissheiten

Da Ungewissheiten in komplexen Arbeitsabläufen wie etwa dem Endlagerprojekt in verschiedenen Arbeitsschritten auftreten und von grundverschiedener Natur sein können ist zuerst die Frage der Definition dieser unterschiedlichen Ungewissheiten zu betrachten. Hier sind dazu einige Beispiele zitiert aus den Endlagerprojekten in Finnland und Schweden, die sich jedoch insgesamt deutlich unterscheiden von den Vorgaben des StandAG, z.B. in der Notwendigkeit den gesamten Untergrund der BRD in Betracht zu ziehen:

Finnland: *„Ungewissheit wird als ein Mangel an Gewissheit zur Beschreibung und Modellierung eines Systems verstanden. Ungewissheit entsteht durch eine Kombination unvollständigen Wissens (epistemische Ungewissheiten) und zufälliger Variabilität (aleatorische Ungewissheiten)“).*

Schweden*: Ein Mangel an Wissen und andere Ungewissheiten in den Berechnungsgrundlagen (Annahmen, Modelle, Daten) werden in diesem Kontext als Ungewissheiten bezeichnet.“*

Im schwedischen Endlagerprojekt sind etwa die Ungewissheiten, die die Unvollständigkeit der Beschreibung des Endlagersystems mit seinen maßgeblichen Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (FEPs) darstellen, als „Systemungewissheit“ definiert (SKB, 2015). Als eine weitere Erkenntnis wurde dabei auch auf die 3D Problematik in der Analyse der Geologie des Untergrundes eingegangen und der Begriff „räumliche Parametervariation“ eingeführt, um sich hauptsächlich auf physikalische

Parameter, wie hydraulische, mechanische und chemische Prozesse mit räumlicher Variabilität, zu beziehen (SKB, 2015).

Aus diesen und weiteren Studien hat die BGE (2022a) ihr Konzept der Kategorisierung von Ungewissheiten vorgestellt (Abbildung 29). Dies ist ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung im Endlagerprojekt.

Bei der Verwendung von Ungewissheiten in einem Untergrundprojekt wie der Endlagersuche sind mehrere Gesichtspunkte von Bedeutung (Grötsch 2021).

1) Welche Ungewissheiten gibt es?
2) Welche Bedeutung hat jede einzelne dieser Ungewissheiten?
3) Um welche Art/Typ von Ungewissheit handelt es sich?
4) Wie kann diese Ungewissheiten parametrisiert werden?
5) Wie soll die Ungewissheit im Workflow verwendet werden?

Der Punkt 5) wird später in diesem Gutachten nochmals näher angesprochen, auch weil diesbezüglich bei der BGE noch keine vollständige Klarheit besteht. Dies ist sowohl aus den neuen Dokumentationen der BGE als auch bei Gesprächen anlässlich des Gutachter-Besuches in Peine und bei den Standortauswahltage 2022 an der RWTH Aachen erkennbar geworden.

Kategorie	Beschreibung
Methodische Ungewissheiten	Methodische Ungewissheiten beschreiben zum jeweiligen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren bestehende übergeordnete Ungewissheiten, die mit den gewählten Bearbeitungs- und Herangehensweisen verbunden sind.
Szenarien-ungewissheiten	Szenarienungewissheiten beziehen sich auf Ungewissheiten im Zusammenhang mit der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems infolge von internen und externen einwirkenden Prozessen.
Modell-ungewissheiten	Modellungewissheiten entstehen durch den Grad der Abstraktion und die damit verbundene vereinfachte Darstellung des Systems. Sie können sowohl konzeptionellen, mathematischen oder rechnerischen Ursprungs sein oder auch durch ein begrenztes Verständnis des modellierten Systems entstehen.
Daten- und Parameter-ungewissheiten	Daten- und Parameterungewissheiten beschreiben Ungewissheiten in Verbindung mit den zur Verfügung stehenden bzw. verwendeten Daten. Diese Ungewissheiten können z. B. von limitierter Datenverfügbarkeit, Messungenauigkeiten, oder inhärenter Variabilität herrühren.

Abbildung 29: Kategorisierung von Ungewissheiten in der rvSU (BGE, 2022a: Tab. 2). Zusätzlich zu schon von anderen Projekten bekannten Kategorien hat die BGE die Methodische Ungewissheit dazugefügt was als sinnvoll bewertet wird.

Eine adäquate **Dokumentation** des Umgangs mit den bestehenden und verbleibenden Ungewissheiten und deren Auswirkungen wird notwendig sein. Dies ist von der BGE ebenfalls erkannt und wird gegenwärtig implementiert mit Hilfe einer „Erfassungstabelle“ (BGE, 2022b: S.617). Darin sollen Ungewissheiten identifiziert, charakterisiert, ihre Auswirkungen beschrieben, der Umgang damit erörtert und Möglichkeiten zur Reduktion mit Hilfe von Erkundungs- und

Forschungsprojekten festgehalten werden. Darin sollen auch eventuelle Verknüpfungen zwischen Ungewissheiten festgehalten werden. Die Einführung dieser „Erfassungstabelle“ ist sehr zu begrüßen, es fehlen jedoch noch weitergehend Details dazu, die zum jetzigen Zeitpunkt nicht zur Verfügung stehen.

Des Weiteren hat die BGE zum Ausdruck gebracht, dass Ungewissheiten zwar nur für Kategorie A TUR behandelt werden sollen, aber „unabhängig davon, Ungewissheiten trotzdem, während eines jeden Arbeitsschritts der rvSU identifiziert und entsprechend den Vorgaben der EndlSiUntV einzuordnen sind.“ Auch dazu sind dem Gutachter bis zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Details bekannt.

Umgang mit Ungewissheiten in der rvSU Methodik

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

Die BGE hat in ihrer neu vorgestellten Dokumentation (BGE, 2022b: Kapitel 10) jetzt ausgiebig Stellung genommen zum **Umgang mit Ungewissheiten.** Dazu gehört auch die Dokumentation mittels eines geplanten Kataloges („Erfassungstabelle“). Die Methodik zum Umgang mit Ungewissheiten soll im Laufe des Standortauswahlverfahrens absehbar weiterentwickelt werden und mit der Zeit gewonnene Erkenntnisse als Teil des lernenden Verfahrens, entsprechend mit einbezogen werden (BGE, 2022b: S.628).

Die BGE lehnt sich dabei an die IAEA (2012) an, wobei eine Bewertung der Ungewissheiten hinsichtlich der Sicherheit und eine Strategie zum zukünftigen Umgang mit diesen Ungewissheiten mit angeführt werden soll. Auch dazu sind zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Details bekannt. Ziel der BGE (2022b: S.614) ist es, mittels der Betrachtung und Bewertung von Ungewissheiten das **Verständnis des Systems** und möglicher radiologischer Konsequenzen zu verbessern (NAGRA, 2002a) und durch die Reduzierung von Ungewissheiten und deren Auswirkungen ein robustes Endlagerkonzept zu erlangen, welches resistent ist gegenüber inneren und äußeren Einflüssen (Nummi, 2019).

Die Vorarbeiten im **Schweizer Mont Terri Projekt** beinhalten eine gute Zusammenfassung der Strategie der NAGRA, zum Umgang mit Ungewissheiten. Sie umfasst eine vorhergehende Untersuchung der identifizierten Ungewissheiten hinsichtlich ihrer potenziellen sicherheitsgerichteten Relevanz, basierend u. a. auf Ergebnissen aus Sensitivitätsanalysen oder wissenschaftlichem Verständnis (NAGRA 2002a). Alle Ungewissheiten, die in Folge der Analyse als nicht relevant bezüglich der Sicherheit bewertet werden, werden bei dem Vorgehen der NAGRA entweder nicht weiter in folgenden Analysen betrachtet, oder werden mittels „What If“-Fällen analysiert.

Diese **Klassifizierung nach Relevanz** wird als wichtig betrachtet und findet auch bei Feldentwicklungsprojekten in der Energie-Industrie Anwendung. Sie ist notwendig, um die einzelnen Arbeitsschritte im Workflow auf die wesentlichen Elemente zu konzentrieren. Einfluss auf sicherheitsgerichtete Aspekte zu überprüfen und sicherheitsrelevante Ungewissheiten in der rvSU prioritär zu betrachten ist bereits im Fokus der BGE (20222b: S.624). Obwohl bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Details bekannt sind, wie dies erfolgen soll wird ein solcher Ansatz sehr begrüßt.

Verwendung von Ungewissheiten soll ausgewiesen werden in **Abhängigkeit von Arbeitsschritten** (TUR, Geosynthese, Sicherheitskonzept, System des Endlagers etc.). Auch dieses Vorhaben wird begrüßt. Es fehlt aber an Beispielen wie dies umgesetzt werden soll. In den folgenden Kapiteln wird eine Empfehlung dazu erläutert, wie man beispielsweise die Behandlung von Ungewissheiten bei der Suche des Endlagerstandortes und bei der Entwicklung des Endlagers behandeln kann (siehe Kapitel Trennung von Ungewissheiten bei Suche und Entwicklung des Endlagers).

Im Folgenden wird hier ein kurzer Abriss des Arbeitsstandes gegeben, wobei festgehalten werden muss, dass hier noch weitere, grundlegende Arbeit von der BGE und ihren Partnern geleistet werden muss.

Nach BGE (2022b) werden vier **Kategorien der Ungewissheiten** ausgehalten (Abbildung 29):

1) Methodische Ungewissheiten – neu eingeführt
2) Szenarien Ungewissheiten
3) Modell Ungewissheiten
4) Daten- und Parameter- Ungewissheiten

Methodische Ungewissheiten werden „nicht näher erläutert, da diese aufgrund ihrer Natur nicht beschrieben oder quantifiziert werden können“. Um mit methodischen Ungewissheiten und deren Auswirkungen umzugehen und diese zu reduzieren, werden vor allem fachliche Einschätzungen durch entsprechende Expertinnen und Experten eingeholt. Nach Auskunft der BGE gibt es inzwischen laufende Studien zur Analyse und Einbindung von Ungewissheiten in den Arbeitsablauf (= Workflow). Solche externen Forschungsprojekte sind etwa:

- Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Geologischen Modellen
- Softwareplattform zur Datenerfassung und Modellierung („OpenWorkFlow“, UFZ)

Szenarien Ungewissheiten sollen zukünftige Entwicklungen analysieren (siehe Kapitel FEP (features, events, processes)). Für jedes Szenario müssen demnach Modell- und Parameter- bzw. Datenungewissheiten betrachtet werden. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen sollen nicht sensitive Parameter erkannt und als weniger wichtig eingestuft (oder ausgeschlossen) werden. Dabei sollen in diesem Arbeitsschritt Identifikation, Charakterisierung, Vermeidung und Reduktion erfasst werden. Dabei kann die Charakterisierung deterministisch oder probabilistisch erfolgen.

Modell Ungewissheiten bestehen aufgrund der Tatsache, dass Modelle in Zukunft ablaufende Prozesse nicht hinlänglich beschreiben können (z.B. falls zu komplex) oder dass die in den Modellen verwendeten Daten Ungewissheiten nicht adäquat beschreiben. Dabei ist innerhalb der Modelle eine weitere „Kategorisierung“ oder Einstufung von Parametern notwendig, die in den bestehenden Arbeiten der BGE noch nicht deutlich erkennbar ist („kategorial, diskret, stetig“ oder „categorial, discrete, continuous“). Bei einer quantitativen Analyse können diese entweder deterministisch (z.b. kategoriale Parameter) oder probabilistisch verwendet werden (z.B. stetige Parameter beschrieben durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion). Dabei wird es ein Ziel sein ein Referenzmodell zu definieren innerhalb der Ungewissheitsbereiche (BGE, 2022b: S.622).

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.

Daten- und Parameter- Ungewissheiten ist bereits weitgehend in vorherigen Kapiteln erörtert (siehe Kapitel Datengrundlage und Dokumentation).

Aufgrund des stets noch schleppenden Vorausgangs der digitalen Datensammlung der BGE bei einer Vielzahl von SGDs und Firmen, ist davon auszugehen, dass trotz der vorhandenen gesetzlichen Regelung (Geologie-Datengesetz) und des Einsatzes von Ressourcen, die Verfügbarkeit und Qualität von digitaler Untergrundinformation für viele Bereiche/UR/TUR eingeschränkt sein wird. Zum Zweiten sind nicht in allen TUR Untergrunddaten vorhanden, auch nicht in analoger Form, sprich als Dokument. Dadurch bekommt die Datenungewissheit eine große Bedeutung.

Verbleibende Ungewissheiten: „Trotz der Durchführung von Reduzierungsmaßnahmen werden allerdings nicht alle Ungewissheiten in Gänze reduziert oder vermieden werden können" (BGE, 2022b: S.614). Dies wird hier als richtige und wichtige Einschätzung bewertet, d.h. es werden immer Ungewissheiten verbleiben, die nicht reduziert oder nicht identifiziert werden können („white space").

Reduktion von Ungewissheiten bzw. deren Auswirkungen findet schon während der Erfassung statt - beispielsweise durch die Entwicklung entsprechender Methoden zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage, welche in BGE (2022b: Kapitel 5.1) beschrieben werden. Im weiteren Verlauf des Verfahrens wird die Reduktion durch noch zu definierende Forschungs- und Entwicklungsprojekte angestrebt.

Forschungsvorhaben der BGE zu Ungewissheiten: Im Forschungsclusters URS („Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle" (BGE, 2022b: S.617 ff) sind mehrere Forschungsprojekte zum Thema Ungewissheiten angelaufen. Das Projekt „GeoBlocks" widmet sich hierbei insbesondere den Ungewissheiten in geologischen Modellen (BGE, 2022c).

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 TG und ihre Tonsteinformationen vorhanden.

Die Frage ob genügend Untergrunddaten für eine vollumfassende Anwendung der rvSU Methodik vorliegen kann in diesem Stadium wohl schon verneint werden. Deshalb wird in vielen TUR in Phase I Schritt 2 die Verwendung von Referenzdaten notwendig sein. Diese Herausforderung wird sich für viele TUR unterschiedlich darstellen. Deshalb ist eine transparente Dokumentation zur Datenlage via Kenngrößen und zu den verbleibenden Unsicherheiten (wie in Kapitel Verwendung von Kenngrößen dargestellt) notwendig („white space").

Wie hoch der **Anteil von Referenzdaten** oder fehlenden Daten sein wird, ist im Augenblick schwer abzuschätzen, wird aber wohl für jeden TUR unterschiedlich sein. Deshalb ist die Verwendung von Kenngrößen in diesem Zusammenhang wichtig, um später eine Möglichkeit zum Vergleich zu haben.

Es muss aber auch festgehalten werden, dass nicht für all Daten Typen im Untergrund Referenzdaten verfügbar sein werden (z.B. Tiefenkarten im TUR). Dies bedeutet, dass Ungewissheiten quantitativ dokumentiert werden sollten. Dadurch, und falls notwendig, kann die Verwendung von Rücksprüngen einfacher und leicht verständlich gemacht werden. Die BGE beabsichtigt in solchen Fällen schon die Verwendung von sogenannten „**Best Estimates**“ (BGE, 2022b: 239):

„In Schritt 2 der Phase I werden Bewertungen in Gebieten mit geringer Datenlage mit geologischem Sachverstand grundsätzlich im Sinne einer besten Schätzung („best estimate“) formuliert. Dafür werden auf Basis aller vorliegenden Informationen und Analogieschlüsse Abschätzungen zum Untergrundaufbau und den Eigenschaften vorgenommen und zur Bewertung herangezogen. Es wird damit im Umkehrschluss akzeptiert, dass eine Gebietsbewertung in Phase II auch günstiger werden kann, sofern sich die getroffenen Annahmen mit zunehmendem Informationsgewinn über die Explorationsmaßnahmen in Phase II als zu pessimistisch herausstellen.“

Dies bedeutet, dass die BGE davon ausgeht, dass Rücksprünge notwendig sind und es auch in Phase II noch zu einer Neubewertung von fraglichen TUR kommen kann. Dies ist durchaus nachvollziehbar und begrüßenswert. Deshalb ist es wichtig schon vorab zu wissen, welche TUR hohe Ungewissheiten haben, etwa mit Hilfe von „bullhorn plots“ (Abbildung 37).

Fazit – Umgang mit Ungewissheiten: Die BGE hat die Notwendigkeit zur Analyse von Ungewissheiten im Endlagerprojekt hinreichend erkannt und entwickelt ihre Methode zur rvSU dahingehend. 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 einem Standort/TUR, insbesondere mit Bezug auf die Verwendung von Ungewissheiten in den verschiedenen Arbeitsschritten. Dabei wird ein semi-quantitativer Ansatz unter Verwendung von Kenngrößen und deren Kombinationen, der italienischen Flaggen-Methode, „bullhorn plots“ und von „decision quality“ vorgeschlagen. Ein solcher Ansatz, zusammen mit einer verbal argumentativen Analyse, wird als vorteilhaft angesehen. Ziel sollte dabei sein, eine weitergehende Transparenz beim Vergleich der TUR Evaluationen zu erreichen (siehe folgende Kapitel).

Trennung von Ungewissheiten bei Suche und Entwicklung des Endlagers

Die BGE plant die Verwendung von Ungewissheiten erst in einem späten Stadium des Arbeitsablaufes in der rvSU (Abbildung 12; Abbildung 30). Hauptsächlich sollen verbleibende Ungewissheiten erst nach der Kategorisierung der TUR und nur für die Kategorie A detailliert beschrieben und dokumentiert werden. Dies hat den Vorteil, dass dieser Arbeitsschritt nicht bei allen, nicht geeigneten TUR bearbeitet werden muss.

Im Folgenden wird hier erläutert, wie alternative Vorgehensweisen dazu aussehen können, die etwa in anderen Untergrundprojekten Anwendung finden (z.B. Energie-Industrie). Insbesondere die späte Verwendung von Ungewissheiten in der Projektentwicklung wird hier als suboptimal angesehen. Des Weiteren werden alternative Arbeitsschritte diskutiert, die bis dato bei der BGE noch nicht verwendet werden.

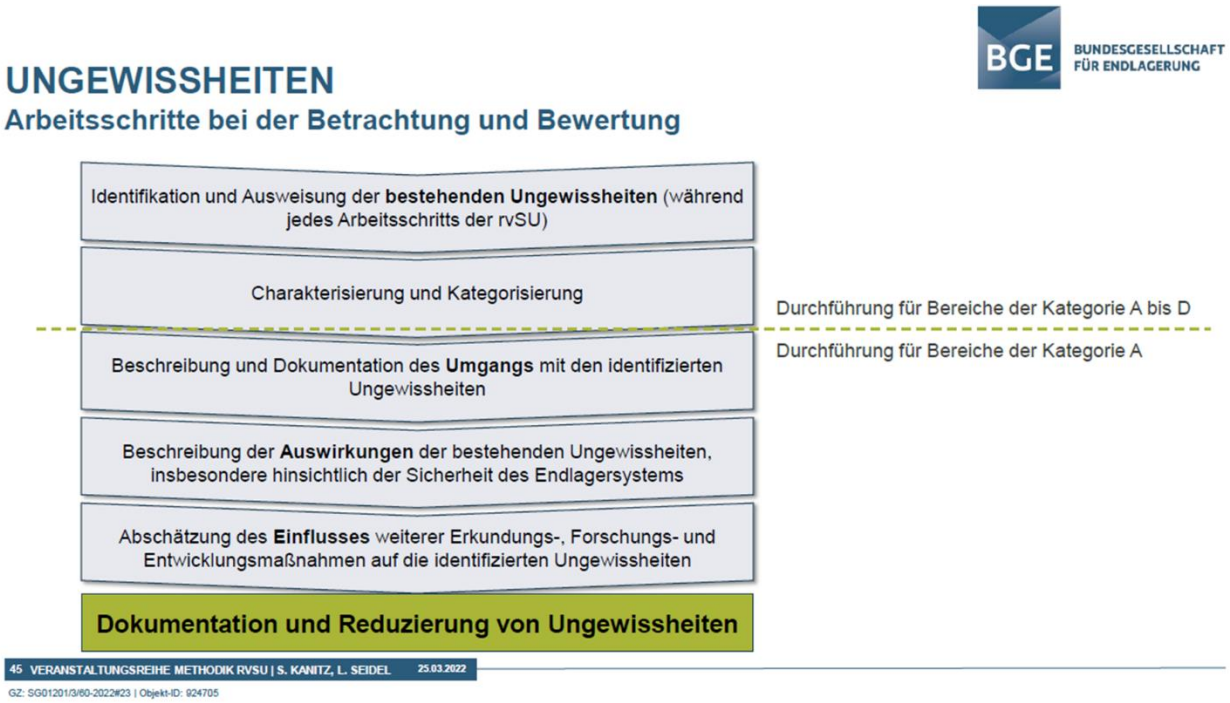

Abbildung 30: Die BGE ist gegenwärtig dabei die Bearbeitung der Ungewissheiten weiter in den Arbeitsablauf zu integrieren (Kanitz & Seidel, 2022: öffentliche Veranstaltungen März 2022). Dies ist sehr begrüßenswert. Insbesondere die Berücksichtigung der bestehenden und verbleibenden Ungewissheiten im Gesamtablauf des Endlagerprojektes wird von großer Bedeutung sein, inklusive regelmäßiger Rückblicke.

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.

Ungewissheiten bei der Suche der Endlagerstandortregionen (TUR)

Zuerst soll hier noch einmal kurz auf das Konzept der italienischen Flagge bei der Beschreibung von Ungewissheiten hingewiesen werden (Abbildung 31). Dabei wird versucht, transferiert auf die Endlagersuche, etwa Indikatoren für günstige Eigenschaften eines Standorts semi-quantitativ (grün) und ungünstige Eigenschaften (rot) als Fläche darzustellen. Dazu wird auch eine Einschätzung gemacht zum sogenannten „white space“ sprich den verbleibenden Ungewissheiten aufgrund fehlender Informationen oder Daten. Von der BGE bereits eingeführte (und weitere) Kenngrößen können dazu verwendet werden (BGE, 2022b: 231ff).

Behandlung von Ungewissheiten bei der Kategorisierung von TUR

Ähnlich zu Arbeitsabläufen verwendet in der Exploration & Entwicklung von Kohlenwasserstofflagerstätten, wird hier empfohlen Ungewissheiten bei der Evaluierung von TURs

(„Suche nach Standort“) separat zu behandeln von Ungewissheiten, wie sie bei der eigentlichen rvSU („Entwicklung/Ausbauplan des Endlagers“) bestehen. Letztere werden hier in dem späteren Kapitel Ungewissheiten bei Entwicklung und Ausbau des Endlagers behandelt.

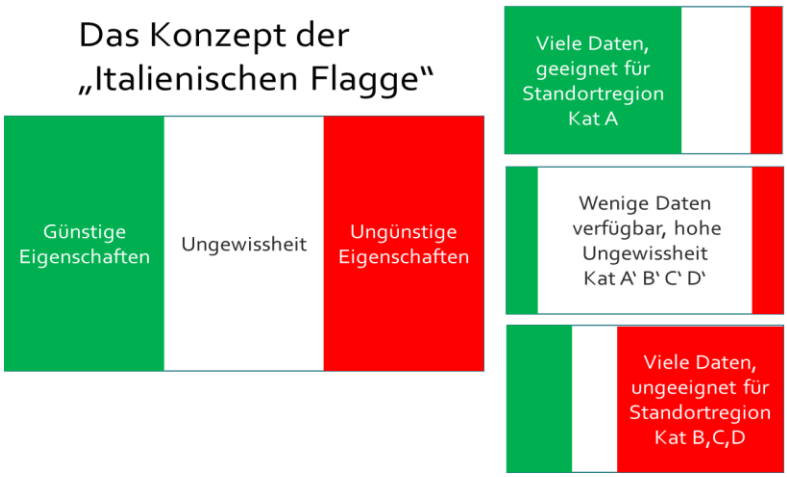

Abbildung 31: Schematische Darstellung einer möglichen Evaluierung aller UR und TUR im Wirtsgestein Tongestein mit Hilfe eines semi-quantitativen Vergleichs unter Anwendung von vorab festgelegten Kriterien zur Auswahl des Teilgebietes für die Methodenentwicklung. Eine hypothetische Auswertung ist hier unter Verwendung der „Italienischen Flagge“ gezeigt. Dabei ist in grüner Farbe die Hinweise auf eine Eignung des TUR gezeigt, in weiß, die vorhandenen Ungewissheiten („white space“) und in rot Indikatoren, die den TUR als weniger geeignet ausweisen. Eine solche oder ähnlich geartete Auswertung ist bei der BGE nicht vorhanden.

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.*

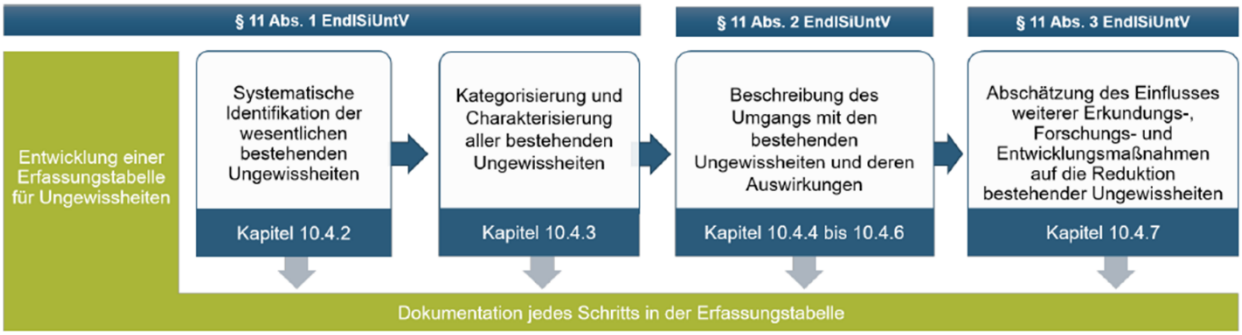

Abbildung 32: Theoretisches Konzept zum Umgang mit Ungewissheiten in der rvSU mit Hilfe von „Erfassungstabellen“ (BGE, 2022b: Abb. 221). Es wird empfohlen, Ungewissheiten ähnlich dem, bei der BGE bereits vorhandenen Risiko-Register zu handhaben, sprich in allen Projektarbeitsschritten zu verwenden. Dies sollte auch über die rvSU hinaus Berücksichtigung finden, sprich „Erfassungstabellen“ mit Ungewissheiten sollten, wo notwendig, verbunden werden mit dem BGE Risikomanagementsystem.

Eine solche Trennung der Arbeitsschritte erhöht die Transparenz und erlaubt eine einfachere Nachvollziehbarkeit einzelner Arbeitsschritte. Dabei sollten Kenngrößen verwendet werden. Gleichzeitig vereinfacht eine solche Trennung auch die Verwendung wohl notwendiger Rücksprünge im Verfahren, speziell bei der Evaluierung von TUR in denen große Ungewissheiten herrschen aufgrund deren heterogener Datenlange, sprich breite weiße Flächen in der italienischen Flagge aufweisen (Abbildung 31).

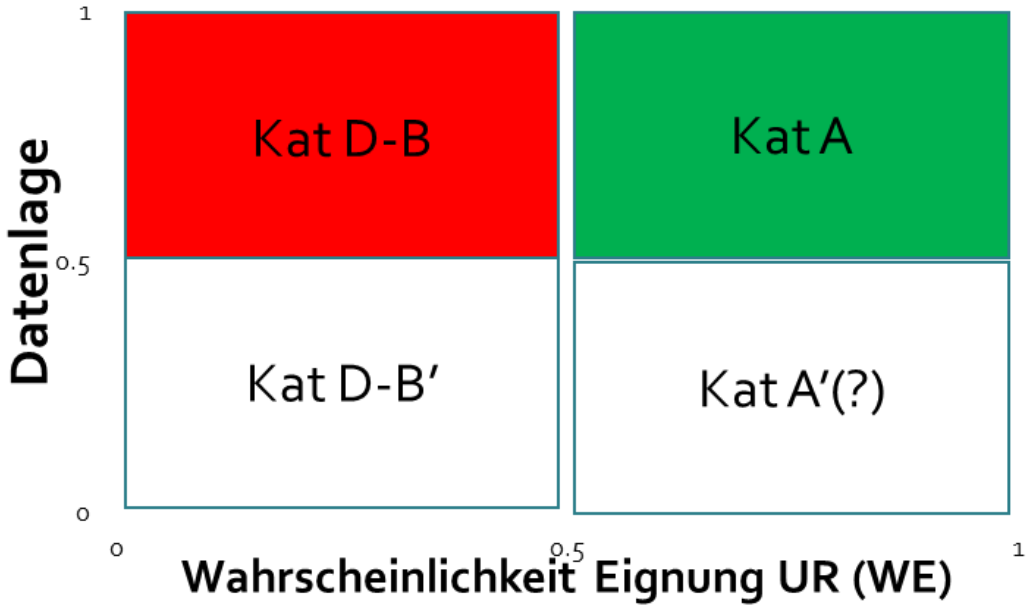

Abbildung 33: Schematische Darstellung einer möglichen Art der Evaluierung mit Hilfe einer „Italienische Flaggen-Grafik" basierend auf semi-quantitativen Kenngrößen. Die Felder in weiß zeigen UR/TUR mit unsicherer Datenlage, wobei Kategorie A' und B' möglichweise Rücksprünge erforderlich machen. Das rote und grüne Feld zeigt UR/TUR, die mit der derzeitigen Datenlage schon nach BGE (2022a,b) in Kategorie A – D eingeordnet werden können. Eine bevorzugte Methode ist jedoch in Abbildung 37 aufgezeigt und wird als „bullhorn plot" bezeichnet.

Dabei stellt sich die Frage, wie UR/TUR vergleichbar analysiert werden können, speziell diejenigen mit geringer Datenlage und hohen Ungewissheiten.

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 (siehe Kapitel Verwendung von Kenngrößen). 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, wie schematisch in Abbildung 33 oder besser noch in Abbildung 37 gezeigt, 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

.

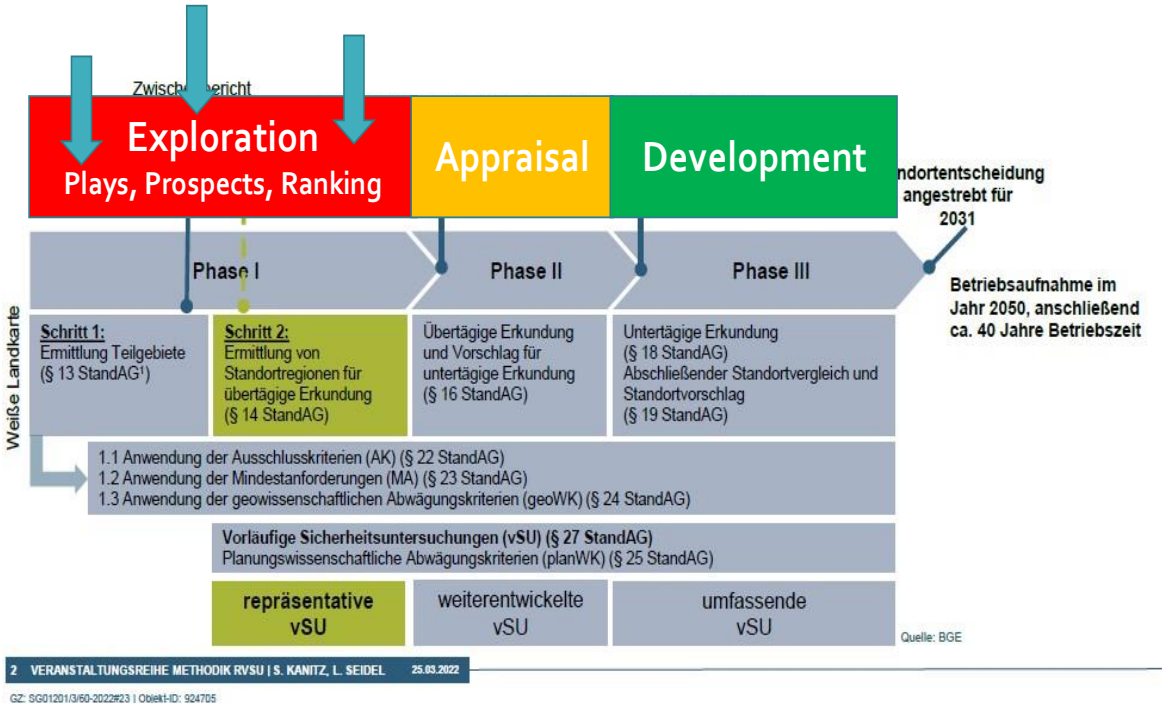

Abbildung 34: Vergleich der Arbeitsabläufe, wie sie für die Erkundung des Endlagers im StandAG definiert sind mit Arbeitsabläufen aus der Energie-Industrie (rot, gelb, grün). Dabei fällt auf, dass die „Explorations-Phase" vergleichbar mit Phase I im StandAG ist. Es fehlen jedoch klare Definitionen im Bericht der BGE zu analogen Arbeitsschritten in der Exploration, die häufig als „Play Based Exploration" (PBE) bezeichnet werden (AAPG, 2022).

Die Einführung von ersten Kenngrößen ist von der BGE bereits vorgeschlagen worden (BGE, 2022b). Jedoch ist darin nicht deutlich, wie diese letztendlich angewendet werden sollten. Es wird hier empfohlen solche multiplen, quantitative Kenngrößen zu verwenden, um TUR nicht nur verbal argumentativ, sondern auch semi-quantitativ vergleichen zu können.

Indem die TUR Kategorien verknüpft werden mit der Datenlage und/oder der Wahrscheinlichkeit der Kategorien (Abbildung 33; Abbildung 37), kann die Analyse in späteren Arbeitsschritten erleichtert werden und auch der Umgang mit der Herausforderung „zu wissen was ich nicht weis", d.h. den „white space" vergleichbar zu evaluieren. Dies kann zu einem späteren Stadium auch helfen eventuell notwendige Rücksprünge zu untermauern, falls notwendig, speziell bei einzelnen TUR bei denen die derzeitige Datenlage keine klare Aussage zulässt aufgrund der digitalen Verfügbarkeit oder des Fehlens von Daten.

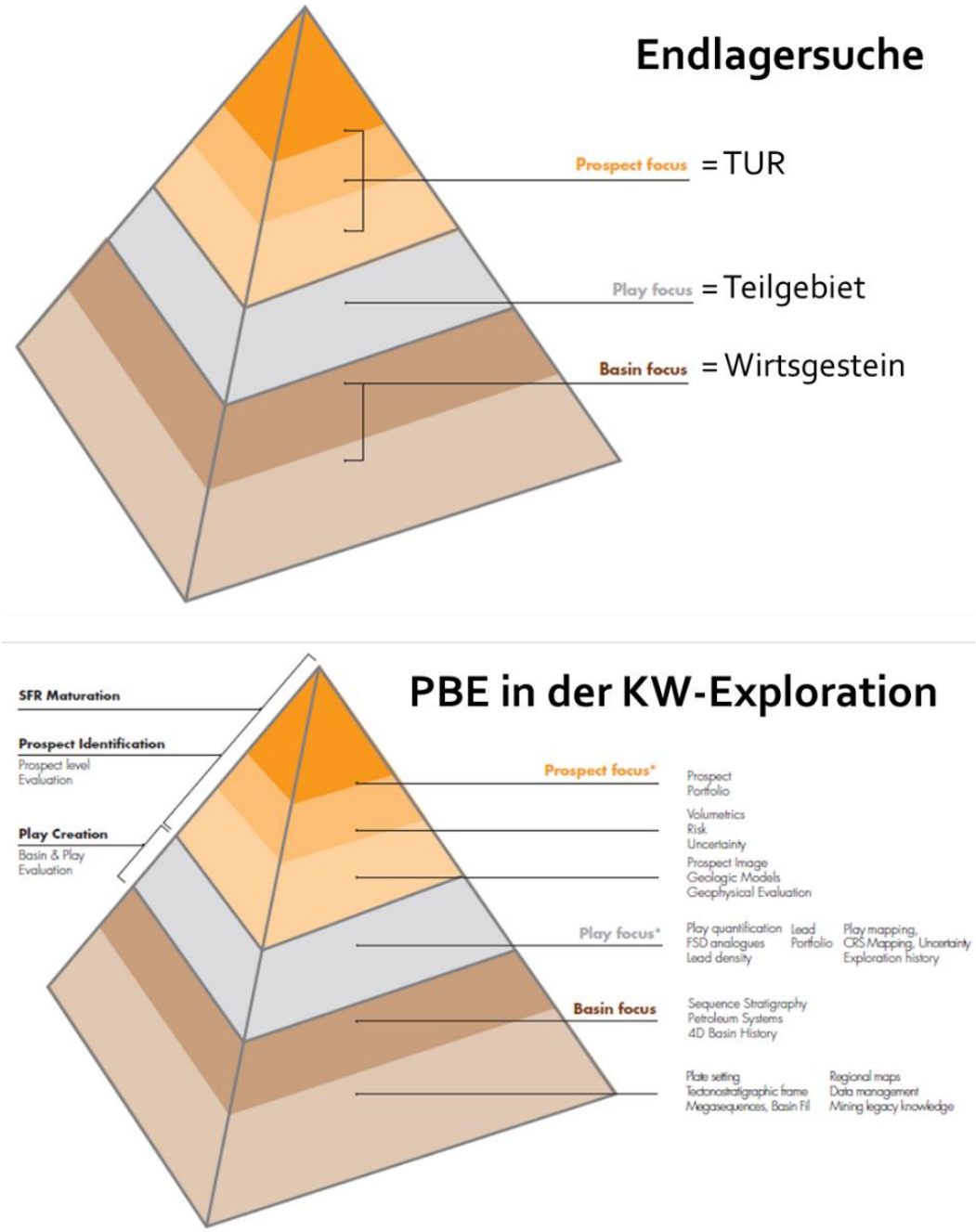

Abbildung 35: Vergleich der Arbeitsabläufe, wie sie für die Erkundung des Endlagers im StandAG/BGE definiert sind mit Arbeitsabläufen aus der Energie-Industrie. Dabei kann festgestellt werden, dass die „Explorations-Phase“ vergleichbar mit Phase I im StandAG ist. Es fehlen darin jedoch klare Definitionen zu analogen Arbeitsschritten in der Exploration, die häufig als „Play Based Exploration“ (PBE) bezeichnet werden (AAPG, 2022).

Im Prinzip kann dies verglichen werden mit der Kohlenwasserstoff-, Geothermie- oder Kohlenstoff-Sequestrierungs-Exploration, wobei „Near Field Exploration“ (NFE) mit guter Datenlage aufgrund von bekannten Vorkommen oft mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erfolgreichen Bohrungen führt, während bei „Green Field Exploration“ (GFE) Projekten in weitgehend unbekannten Gebieten die Fehlerrate sehr hoch liegt. GFE bedarf also weiterer Daten, um verbesserte Aussagen zu einem

möglichen Prospekt (äquivalent zu einem TUR) machen zu können. Weitere Daten können dabei neu verfügbare digitale Daten oder in der Erkundungsphase (Phase 2) akquirierte neue Daten sein.

Fehlender Arbeitsschritt – „Play Based Exploration" für die Endlagersuche

Aus diesen Analysen und den Dokumentationen der BGE (BGE, 2022a,b) geht hervor, dass der oben angesprochene Teil eines Workflows mit seinen Arbeitsschritten nicht vorhanden ist. Im industriellen Bereich von Untergrunduntersuchungen wie der Kohlenwasserstoffexploration spielt dieser Arbeitsablauf sehr wohl eine wichtige Rolle (Abbildung 34). Diese Arbeitsschritte beschäftigen sich ausdrücklich mit dem Problem der inhomogenen Datendichte und Datenverfügbarkeit im Untergrund und werden dort als „Risking" bezeichnet (AAPG, 2022). Sie sind als solche nicht im StandAG festgelegt und auch bis jetzt nicht in den BGE Berichten ausgeführt.

Die BGE hat mit der Einführung von sogenannten Kenngrößen (BGE 2022b: S. 232 ff) dahingehend aber schon einen ersten wichtigen Schritt unternommen, der es erlaubt solche zusätzlichen Arbeitsschritte in den Gesamtarbeitsablauf zur Ermittlung der Standortregionen einzuführen (sprich Phase I Schritt 2). Obwohl der Schritt der Definition von sogenannten Kenngrößen schon angesprochen wird (BGE, 2022b: S. 231 ff), wurden bis jetzt noch keine weiteren konkreten Arbeitsschritte im BGE Workflow vorgestellt oder veröffentlicht. Auch aus den Gesprächen mit der BGE ist nicht ersichtlich, ob und wie solche neuen Arbeitsschritte angepasst auf die Endlagersuche aussehen könnten.

***Empfehlung 3.23**: Die Verwendung von äquivalenten Arbeitsschritten wie vorhanden in „Play Based Exploration" wird empfohlen, da das StandAG sich zum Ziel gemacht hat, den gesamten Untergrund in der BRD zu untersuchen, im Gegensatz zu anderen Ländern (z.B. Finnland, Frankreich, USA) oder Ländern, die eingeschränkte (geologische) Optionen haben (z.B. Schweiz). Es wird auch empfohlen, sich dabei an Prozesse anzulehnen, die in der Industrie schon langjährig erprobt sind („PBE"). Dabei würde ein solcher Workflow die vergleichende Betrachtung aller Bereiche/UR/TUR unter Berücksichtigung der Ungewissheiten ermöglichen und vereinfachen, über eine verbal argumentative Zusammenfassung einzelner TUR hinaus.*

Behandlung von Ungewissheiten bei großflächigen Auswertungen im Untergrund

Gewöhnlich werden Arbeitsabläufe und Ungewissheiten bei großflächigen Evaluierungen im Untergrund von denen im eigentlichen Entwicklungsprojekt in einem spezifizierten TUR voneinander getrennt behandelt. In der Kohlenwasserstoff-Industrie wird dies in den Workflows „Play Based Exploration" und „Field Development Planning" durchgeführt. Die damit verbundenen geologischen Skalen bei der Evaluierung im Untergrund sind in Grötsch und Pöppelreiter (2020) näher erläutert.

In diesem Zusammenhang könnten, wie im Beispiel in Abbildung 35, gezeigt, „Basin" mit Wirtsgesteinen, „Play" mit Teilgebieten und „Prospects" mit Bereichen/URs/TURs gleichgesetzt werden. Dabei spielt der sogenannte „Risking" Prozess eine wichtige Rolle, wobei dieser Begriff für die Identifikation und Quantifizierung der Ungewissheiten mit Hilfe von Kenngrößen steht (Abbildung 36).

Aus den abgeleiteten Parametern lassen sich sogenannte „Common Risk Segment Maps" also überlagernde Kartendarstellungen der abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten (Probability of Success =

PoS) darstellen (Abbildung 36). Diese können dann noch weiter zusammengefasst werden („Total PoS“) und ebenfalls als Karte dargestellt werden (Abbildung 36, letzter Arbeitsschritt).

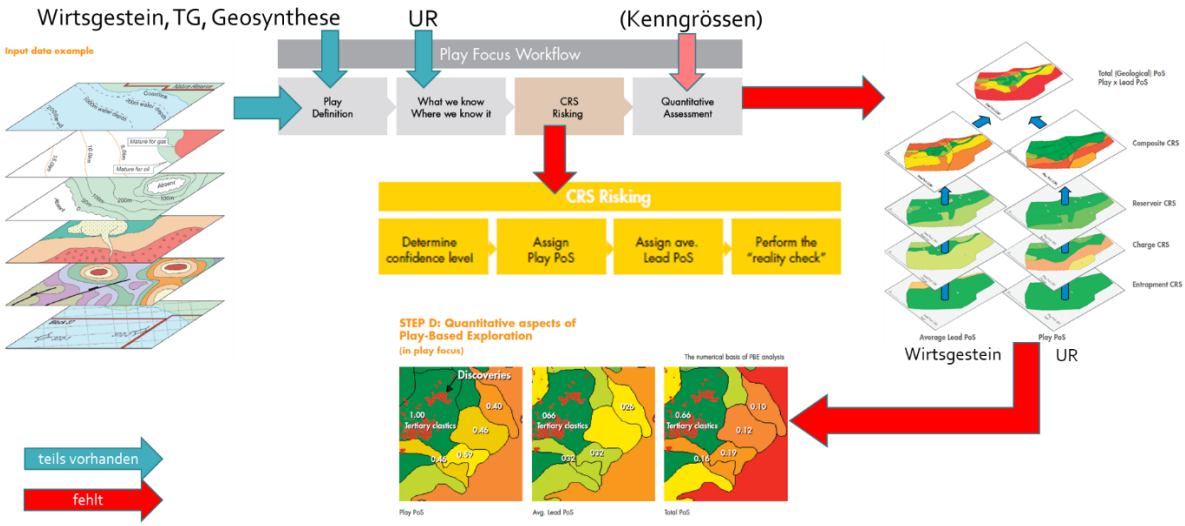

Abbildung 36: Schematische Darstellung eines zu PBE vergleichbaren Arbeitsablaufes angewandt auf die quantitative Evaluierung der URs unter Berücksichtigung der Ungewissheiten und basierend auf Kenngrößen. Solche Kenngrößen im Endlagerbereich sind schon in BGE (2022b: S.231ff) angedacht und könnten entsprechend als „common risk segment“ (CRS) Karten dargestellt werden (AAPG, 2022). Dies würde, ähnlich wie in der Exploration nach KWs 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 TUR 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.

Die Resultate aus der Berechnung eines „Total PoS“ (oder entsprechendes Endlager-äquivalent basierend auf BGE Kenngrößen) lassen sich dann auch einfach grafisch als sogenannte „bullhorn plots“ darstellen (Abbildung 37). Dabei werden Confidence vs Probability of Success aufgetragen. Aus einer solchen Grafik lassen sich die Wahrscheinlichkeit zur Eignung als Standortregion und das Vertrauen in die damit verbundene Aussage ablesen, sprich der sogenannte „white space“ oder der weiße Teil aus der italienischen Flagge. Mit Hilfe solcher „Bullhorn plots“ ist auch eine einfache und vergleichbare Dokumentation aller Bereiche/UR/TUR möglich.

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 (etwa als ARCGIS layers) 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.

Endlager	Kohlenwasserstoffe
ewG Wirtsgestein UR	Example Reservoir (below): Medium Confidence, Play PoS = 0.8 Lead PoS = 0.3 Total PoS = 0.8 x 0.3 = 0.24)

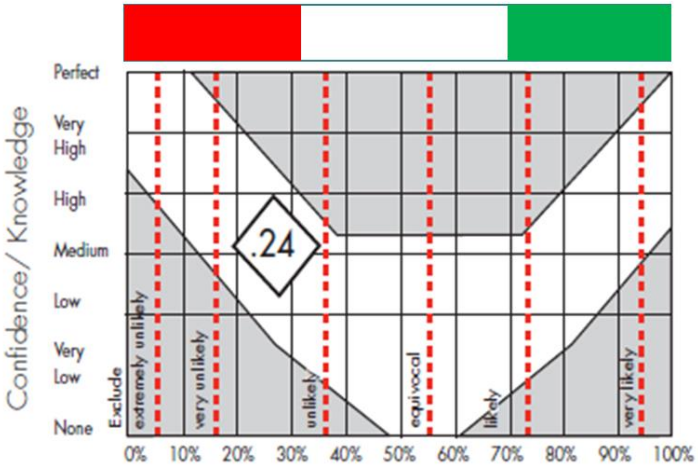

Abbildung 37: Vergleich der Arbeitsabläufe, wie sie für die Erkundung des Endlagers im StandAG definiert sind mit Arbeitsabläufen aus der KW-Industrie. Der letzte Arbeitsschritt Arbeitsschritten in „Play Based Exploration“ (PBE) ist die Errechnung des „Probability of Success“ (PoS). Bei der Endlagersuche könnten quantifizierte Kenngrößen wie Datendichte etc. zur Berechnung eine „Lead PoS“ verwendet werden und so eine vergleichbare Einschätzung der Ungewissheiten erlauben. Details zu PBE sind in AAPG (2022) beschrieben.

Die Notwendigkeit den Untergrund der gesamten BRD zu untersuchen (siehe StandAG) bedarf zusätzlicher Arbeitsschritte im Workflow der BGE im Vergleich zu Projekten in anderen Ländern. Solche wurden hier als „Play-Based-Exploration“ Prozess dargestellt, der sich in abgewandelter Form auch auf die Endlagersuche anwenden lässt. Es wird davon ausgegangen, dass Rücksprünge ermöglicht werden müssen (BGE. 2021) und eine iterative Arbeitsweise für einen Teil der TUR verwendet werden muss, etwa für einige der TUR in den Kategorien A und B, sprich TUR mit möglicherweise günstigen Eigenschaften aber wenigen oder nicht geeigneten Daten.

Fazit – Ungewissheiten bei der Suche eines Standortes: Im Gegensatz zu anderen Europäischen Ländern gibt das StandAG vor, dass das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland evaluiert werden muss, um einen optimalen Standort für das Endlager aufzusuchen. Die Suche nach einem solchen optimal tauglichen Standort ist also gewissermaßen ähnlich der in der Kohlenwasserstoff—

Industrie verwendeten „Explorationsphase“ sprich des Arbeitsablaufes, bevor eine Projektentwicklung an einem festgelegten Standort stattfinden kann. Diese „Phase I“ eines Endlagerprojektes wurde in Frankreich, Finnland, den USA oder der Schweiz so nicht durchgeführt. Insgesamt ist dieser zusätzliche Prozessschritt sehr begrüßenswert, da dadurch alle möglichen Regionen eine gleichwertige Behandlung erfahren. Die Empfehlungen diesbezüglich sind in Abbildung 33 bis Abbildung 37 und den dazugehörigen Erläuterungen vorgestellt.

Ungewissheiten bei Entwicklung und Ausbau des Endlagers

Die von der BGE (2022a, b) vorgestellte Methodik zur rvSU ähnelt zu großen Teilen einem, für die Entwicklung eines Untergrundprojektes zugeschnittenen Arbeitsablaufs (z.B. Feldentwicklungsplan). Dabei geht es um eine Zusammenführung von Untergrunddaten mit ihren statischen und dynamischen Modellen und den technischen Ausbaukonzepten. Die BGE schlägt dabei vor nur **ein Ausbaukonzept pro TUR** zur Analyse des Endlagersystems zu verwenden. Dies vereinfacht den Workflow im Vergleich zu heute gebräuchlichen Multi-Szenarien Studien in der Energie-Industrie. Diese Vereinfachung ist durchaus akzeptabel im Falle eines Endlagers, wobei aber bei der weiteren, detaillierten geologischen Untersuchung eines Untertagestandorts sich neue Erkenntnisse ergeben können, die zu Variationen eines Ausbaukonzeptes führen können.

In der Dokumentation der BGE wird die Verwendung von Ungewissheiten erst zu einem späten Zeitpunkt im Arbeitsablauf eingeführt (Abbildung 12), sprich nach der Kategorisierung eines TUR als Kategorie A. Obwohl Abbildung 30 schon eine frühere Identifikation, Charakterisierung und Parametrisierung vorschlägt, wird die Dokumentation erst nach Festlegung eines TUR als Kategorie A als notwendig eingestuft.

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).*

Die Wertung dieser Ungewissheiten und deren Parametrisierung im Entwicklungs- und Ausbauschritt der rvSU muss nachvollziehbar dokumentiert werden inklusive der Bandbreite der jeweiligen Ungewissheiten. Ein **Beispiel** im Wirtsgestein Ton wäre dazu das Vorhandensein oder die Abwesenheit von lateral ausgebreiteten Sandsteinkörpern mit höheren Durchlässigkeiten, die den Transport von Radionukliden durch Gesteinsformationen beschleunigen können („kategorialer Parameter“). Im Gegensatz dazu wäre die Anzahl der im ewG vorkommenden Sandsteinkörper ein „diskreter Parameter“ und der kontinuierliche Variationsbereich der Gesteinsdurchlässigkeit des Sandsteinkörpers (Permeabilität) ein „stetiger Parameter“.

Empfehlung 3.26*: Bei der Parametrisierung von Ungewissheiten wäre es hilfreich eine häufig verwendete Klassifizierung von Ungewissheiten in kategoriale, diskrete und stetige Parameter zu verwenden. Dies sollte auch die Definition von notwendigen Modellstudien erleichtern.*

Risikoregister und dessen Verwendung

Die BGE hat 2021 ein internes Risikoregister zum Endlagerprojekt eingeführt. Dies ist sehr begrüßenswert und ein grundsätzlicher Baustein in der weiteren Projektentwicklung. 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. Das vorhandene Register beinhaltet neben nicht-technischen auch technische Risiken

Während der Einsicht der Unterlagen bei der BGE (Stand April 2022) ist es jedoch deutlich geworden, dass bis heute in diesem Risikoregister kaum geologische Risiken und Fragestellungen aus dem Untergrund aufgenommen sind. Die Zuhilfenahme eines solchen, firmenweiten Risikoregisters zur zügigen Aufarbeitung von identifizierten Schwachstellen ist ein gängiges Instrument, um zu vermeiden, dass Risiken zu echten Problemen auswachsen. Ein Beispiel dazu ist etwa die digitale Geo-Datenverfügbarkeit, die sich trotz des 2020 verabschiedeten Geologie-Datengesetzes als schwierig erweist. Geodaten-Management und die digitale Verfügbarkeit aller notwendigen Untergrunddaten wird dabei von allen Seiten als eine fundamentale Herausforderung für das Endlagerprojekt und das föderale System der Bundesrepublik angesehen. Zu diesem Risiko sind leider bis heute noch keine weitergehenden Maßnahmen eingeleitet worden, obwohl technische Lösungen verfügbar sind.

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).*

Ein solcher Ansatz, der auf der Analyse der vorhandenen Risiken und deren Vermeidung (oder Akzeptanz) basiert wird hier sehr begrüßt. Beispielshaft werden hier zwei weitere technische Risiken im Wirtsgestein Ton aufgeführt:

- **Risiko**: Die BGE und das StandAG fokusieren ihre Analysen auf *Barrieren*. Im Wirtsgestein Ton können jedoch dünnbankige *Leiter* mit erhöhter horizontaler Durchlässigkeit für Radionuklide auftreten.

  Vermeidung: Neben den vorhandenen Analysen zur Chrono- und Lithostratigraphie müssen sequenzstratigraphische Interpretationen durchgeführt werden, um das Vorkommen und die Ausdehnung von permeablen Sand- oder Karbonatlagen zu dokumentieren, falls vorhanden.

  Aktivität: BGR Studie geleitet von Prof. Jochen Erbacher zur Paläogeographie und Sedimentverteilung im Opalinuston-Becken.

- **Risiko**: 1D Transportmodelle von Radionukliden lassen keine Rückschlüsse auf die Auswirkungen von dünnbankigen, permeablen und lateral weit ausgedehnten Sedimentkörpern zu.

  Vermeidung: Neben der Verwendung von 1D Transportmodellen von Radionukliden zur quantitativen Evaluierung des Vertikaltransportes müssen auch alternative Arbeitsschritte ausgearbeitet werden, die Aussagen zu horizontalen, möglicherweise durchlässigen Gesteinskörpern zulassen.

  Aktivität: unbekannt

Bei den Standorttagen 2022 an der RWTH in Aachen hat die BGE unlängst ihre bereits jetzt herausgegebenen, externen Studien vorgestellt. Eines dieser Beispiele ist eine Studie zu den Erosionsraten am Albtrauf in Baden-Württemberg mit dem Ziel Erosionsraten für die kommenden 1 Ma quantifizieren zu können. Eine solche Analyse eines der geogenen Prozesse (siehe Kapitel FEP (features, events, processes)) ist sehr begrüßenswert. Jedoch ist nicht in allen von der BGE in Auftrag gegebenen Studien erkennbar, welche Verbindung solche Studien zu den bestehenden Risiken haben.

Die BGE hat inzwischen weitreichende Aktivitäten initiiert, die für die Methodenentwicklung zur rvSU notwendig sind. Diese werden entweder durch die BGE und ihre Dienstleister ausgeführt oder über externe Forschungsaufrufe via Website, LinkedIn etc. angekündigt. Die eingegangenen Anträge werden dann von der BGE bewertet und Aufträge an akademische Einrichtungen, Bundes- und Landesämter oder privatrechtliche Firmen vergeben. Eine solche externe Beauftragung für zum Teil längerfristige Studien wird als sehr hilfreiches Instrument angesehen, da der BGE selbst nicht die notwendigen Ressourcen oder Expertisen zur Verfügung stehen.

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.*

Fragestellung 5: Bewertung der öffentlichen Vorstellung der Gesamtmethodik

Die BGE hat mit ihren verschiedenen Veranstaltungsreihen, sowohl online als auch in Präsenz, versucht den gegenwärtigen Arbeitsstand zur Methodenentwicklung der rvSU und die Vorgehensweisen für die verschiedenen Wirtsgesteine darzustellen. Dabei sind bei online Veranstaltungen nur wichtige Übersichtsfolien zur rvSU gezeigt worden, die meist keinen tieferen Einblick in die eigentliche Methodik erlauben.

Die hybride Veranstaltung der Standorttage 2022 an der RWTH Aachen haben es jedoch auch erlaubt alle relevanten Ansprechpartner der BGE und die an externen Studien beteiligten Repräsentanten von Universitäten, öffentlichen Einrichtungen und beauftragten Firmen persönlich zu treffen. Dadurch war es möglich auch weitergehende Informationen zu den Aktivitäten der BGE und zum Arbeitsstand des Endlagerprojektes zu bekommen. Die Posterveranstaltungen waren dabei besonders hilfreich.

Bemerkt werden sollte hier jedoch auch, dass sich, trotzt frühzeitiger Ankündigung der BGE, die Teilnahme der Öffentlichkeit bei Online- und Präsenz-Veranstaltungen in Grenzen hielt. Dies zeigt, dass zum Thema Endlager noch keine unmittelbare Betroffenheit in der Gesellschaft vorhanden zu sein scheint. Ein Zeitpunkt an dem sich dies möglicherweise ändern könnte, ist die Veröffentlichung der verbleibenden Standortregionen als Ziel von Phase I Schritt 2 des Projektes.

Die Komplexität der gesetzlichen Vorgaben im StandAG und weiteren Vorschriften, die Verzahnung der Arbeitsschritte, aber auch die neuen Berichte (BGE, 2022a, b) erlauben es alleine Kennern des Themas mit geowissenschaftlichen Grundkenntnissen sich ein umfassendes Bild zum Arbeitsstand der rvSU zu machen. Dieses Dilemma von Transparenz und Komplexität gilt es weiterhin klar vor Augen zu haben und Veranstaltungen demgemäß zu strukturieren.

Dabei sollte auch auf eine benutzerfreundliche Ausrichtung der der Öffentlichkeit präsentierten Informationen und Daten geachtet werden. Im Zusammenhang mit der enormen Datenfülle stellt dies eine Herausforderung in sich selbst dar (z.B. Webseite BGE und BASE, Suchfunktionen etc.).

Gesamtbeurteilung: Methodenentwicklung rvSU Wirtsgestein Tongestein

Allgemein

Ziel der jetzigen Arbeiten der BGE ist es von 90 verbleibenden Teilgebieten ca 10-30 Standortregionen (TURs) 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 weiterer Entwicklung bedarf.

Zusammenfassend betrachtet, wird in diesem Gutachten festgestellt, dass die BGE weitreichende Fortschritte erzielt hat in Bezug auf die Frage, wie eine Methodik zur rvSU aussehen soll. Um nur einen dieser erfolgreichen Schritte zu erwähnen, wird hier das Beispiel der Auslegung des Endlagers anhand von verschiedenen Typen, sogenannten Archetypen pro Wirtsgestein aufgeführt und der daraus resultierende Ansatz nur ein Endlagersystem pro TUR zu gebrauchen. Dies hilft etwa bei der Analyse von Szenarien, sprich zukünftige Entwicklungen und deren Auswirkungen.

Trotz dieser Fortschritte ist die Aussage der BGE verständlich, dass es sich hier um einen Arbeitsstand handelt, da, wie in diesem Gutachten weitergehend erläutert auch noch wichtige Elemente und Arbeitsschritte im Gesamtarbeitsablauf (= Workflow) fehlen oder zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung unklar sind. Ein Beispiel dazu ist der Umgang mit Ungewissheiten in der rvSU. Die einzelnen, vom NBG geäußerten Fragestellungen an den Gutachter werden hier im Folgenden kurz zusammenfassend angesprochen.

Festlegung TUR

Der von der BGE vorgestellte Prozess der weiteren Unterteilung der verbleibenden Teilgebiete in TUR oder Bereiche ist sinnvoll und nachvollziehbar, besonders in Gebieten mit hinreichender Datenlage. Insbesondere wird dies begrüßt, da viele Teilgebiete geologisch gesehen sehr heterogen aufgebaut sind und diese Heterogenität besser in kleineren TUR analysiert und bewertet werden kann. Dies ist durch die BGE etwa anhand des GzM TG 001 Opalinuston gut aufgezeigt worden (BGE, 2022b).

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

Geologische Aspekte und Verwendung geoWK

Die BGE hat mit ihrer, auf FEP (features, events, processes) basierenden Analyse von, in den kommenden 1 Ma zu erwartenden Prozessen an einem zukünftigen Standort gute Fortschritte erzielt. Die Beschreibung and Einschätzung von geogenen Prozessen, die Zusammenfassung mittels Geosynthese und die darin enthaltenen geowissenschaftlichen Langzeitprognosen werden als positiv bewertet und sind in den neuen Dokumentationen gut erläutert.

Darüber hinaus wird empfohlen qualitative- oder quantitative Darstellung durch überlagernde Karten in GIS-Systemen öffentlich zugänglich zu machen.

Es wird außerdem empfohlen, detaillierte regionalgeologische und paläogeographische Karten zur Beckenentwicklung in allen Sedimentbecken mit Wirtsgestein Tongestein anzulegen. Unter anderem, um den Fragen nachzugehen: Wo ist der Sand in diesen Sedimentbecken abgelagert? Wo sind die Deltas sprich Sand- und Tonliefergebiete im Becken? Wie können solche Sandlagen im Wirtsgestein Ton vorhergesagt werden? Wo liegen mögliche „play fairways“ für ein Endlager im Sedimentbecken?

Die Absicht der BGE alle TUR/Bereiche in Klasse A-D zu kategorisieren und dadurch weitere Gebiete von nachfolgenden Studien ausschließen zu können wird ebenfalls begrüßt. Dies wird insbesondere für möglich gehalten in TUR mit vielen verfügbaren Daten und geologischen Interpretationen.

Im BGE-Bericht (2022b, Anlage 5.1.4.2) wird der Umgang mit Gebieten mit nicht hinreichender Datenlage angesprochen. Diese sollen nicht benachteiligt werden, gleichzeitig sollen sie großenteils eliminiert werden falls nicht weiter erfolgversprechend. Gebiete mit wenig Daten und hohen Ungewissheiten machen Workflow Schritte zur quantitativen Abschätzung der Kategorien mit Hilfe von Kenngrößen und anderer Arbeitsschritte notwendig (siehe Kapitel Fragestellung 4: Behandlung von Ungewissheiten und Verwendung von Referenzdaten). Ein solches, strukturiertes Vorgehen ist bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht erkennbar aus den BGE Dokumentationen und Vorträgen. Dabei fehlt eine zusammenhängende Bewertung von Ungewissheiten, daraus resultierenden Risiken und Entscheidungen und den zur Analyse notwendigen Modellen („decision based subsurface modelling“).

Als guter Ansatz wird die Entwicklung von 1D Transportmodellen von Radionukliden im Gestein angesehen, die etwa die Verwendung von stetigen Parametern der Ungewissheiten erlauben. Dennoch muss hier zuallererst weiter nachgedacht werden, welche Modelle zur Lösung welcher Fragestellungen angewendet werden sollen. Da Geologie das Verständnis der 3D Problematik erfordert, sind nur eingeschränkt Antworten aus 1D Modellen zu erwarten. Dies wurde aufgezeigt am Beispiel von dünnbankigen Sandsteinlagen in Ton-dominierten marinen Sedimentbecken ähnlich denen, wie sie zu Zeiten der Ablagerungen in den verschiedenen Teilgebieten des Wirtsgesteins Tongestein ausgebildet waren.

Eine positive Entwicklung ist bei der BGE-internen Qualitätssicherung von vorhandenen geologischen Modellen zu beobachten. Die Erkenntnisse aus diesem Prozess werden mit einer Zusammenfassung der Resultate in tabellarischer Form inzwischen dokumentiert – ein wichtiger Schritt zur weiteren Hebung von Standards bei der Erstellung von notwendigen Modellen (z.B. 3D statische Modelle).

Ein nur sehr langsamer Fortschritt ist festzustellen bei der Verfügbarkeit von digitalen Untergrunddaten zum einen, aber auch bei der Implementierung solcher Daten, etwa aus Bohrungen, in die vorhandenen und neuen Modelle der BGE.

Behandlung von Ungewissheiten

Die wichtigste Beobachtung dieses Gutachtens ist die bis heute noch nicht befriedigende und unvollständige Implementierung von Ungewissheiten im Workflow. Die Dokumentationen der BGE und auch die geführten Gespräche machen deutlich, dass hier noch weiterer Entwicklungsbedarf ist. Als positiv ist zu bewerten, dass wichtige Gesichtspunkte schon angesprochen oder dokumentiert werden - leider in nur kurzen Anrissen. Ein Beispiel dafür ist die Erkenntnis, dass verschiedene

Arbeitsschritte im Gesamtarbeitsablauf der Evaluierungen verschiedene Methoden zur Analyse der Ungewissheiten benötigen. In diesem Gutachten wird ein solche Beispiel breiter ausgeführt, und zwar verschiedene Methoden zur Verwendung von Ungewissheiten, die bei der Suche des Standorts (TUR) und bei der Entwicklung eines möglichen Standortes angewendet werden sollten.

Das Hauptaugenmerk der BGE liegt bis heute auf der verbal-argumentativen Zusammenfassung der TUR-Bewertungen. Dies wird zwar begrüßt, aber gleichzeitig als nicht ausreichend betrachtet, speziell wenn es sich um TUR mit geringer Datenlage handelt. Es wird deshalb empfohlen:

1) Methodik der Analyse von Ungewissheiten auf einzelne Arbeitsschritte anzupassen (z.B. Suche und Entwicklung vergleichbar der Exploration und Entwicklung im Energiesektor).
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 TUR durch „decision quality" mit Hilfe von sechs semi-quantitativen Kriterien zu unterstützen.

Interessanterweise hat die BGE die Notwendigkeit zur Einführung von Kenngrößen bereits dokumentiert (BGE 2022b), jedoch bis zum Zeitpunkt des Gutachtens noch keine Vorstellungen geäußert, wie diese Verwendung finden sollen.

Ein zusätzlicher Aspekt, der der weiteren Entwicklung bedarf ist die integrative Betrachtung von Ungewissheiten, Risiken, benötigten Modellstudien und den Entscheidungen die nach StandAG gefällt werden müssen. Derzeit schlägt die BGE vor Ungewissheiten erst in einem späten Arbeitsschritt des rvSU Workflows zu dokumentieren. Es wird hier empfohlen die Verwendung und Dokumentation der sicherheitsrelevanten Ungewissheiten in einem frühen Stadium des Workflows zu analysieren und zu dokumentieren. Die Notwendigkeit zur Verwendung von „Erfassungstabellen" zur Dokumentation von Ungewissheiten, deren Relevanz, möglicher Auswirkungen und der notwendigen Bestrebungen zu Ihrer Vermeidung ist von der BGE teilweise schon angesprochen. Es konnten aber noch keine weiteren Details dazu in Erfahrung gebracht werden.

Neben den Ungewissheiten müssen auch die daraus abgeleiteten technischen Risiken strukturiert behandelt werden. Es wird empfohlen, die wichtigsten dieser Risiken in das schon vorhandene Risiko-Managementsystem der BGE Geschäftsführung zu überführen (z.B. digitale Datenverfügbarkeit) um die notwendige Eskalation des Engagements zu erreichen (z.B. BMWK).

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. Es ist derzeit jedoch bisweilen unklar welche Projekte warum angestoßen werden. Zum Teil wurden auch schon existierende Projekte verwendet oder es ist nicht immer ein direkter Zusammenhang erkennbar, speziell mit Fokussierung auf die Prioritäten, sprich sicherheitsgerichtete Relevanz. Obwohl es schon gute Beispiele gibt, wie etwa den rezenten Forschungsaufruf der BGE zu einer glazialen Rinnen Studie (sprich geogenen Prozess) wirkt das Vorgehen insgesamt noch nicht strukturiert.

Deshalb wird hier empfohlen eine klare Verbindung zwischen Ungewissheiten, Risiken und F&E-Projekten (sprich Maßnahmen) zu schaffen. Dies würde eine vorausschauende Planung erlauben, die notwendig ist aufgrund der langen Vorlaufzeiten solcher Arbeiten.

Fazit - Gesamtbeurteilung:

Die Präsentation des Arbeitsstandes zur Methodenentwicklung der rvSU durch die BGE hat gute Ansätze in Teilschritten des Arbeitsablaufes aufgezeigt, wie etwa der Vorschlag zur weiteren Aufteilung der Teilgebiete in Teiluntersuchungsräume (TUR) oder die Verwendung eines Archetypus für den Ausbau des Endlagers spezifisch für jedes Wirtsgestein. Nichtsdestotrotz fehlen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch einige Kernelemente in der Methodenstruktur der rvSU.

Viele solcher Methoden-Elemente (Arbeitsschritte) können beispielsweise aus anderen komplexen Untergrundprojekten abgeleitet werden, auch wenn das Endlagerprojekt eine andere Zielsetzung verfolgt. Die Bereichsevaluierung aller TUR im gesamten Bundesgebiet benötigt beispielsweise eine andere Methodik bei der Analyse der Ungewissheiten im Vergleich zur Entwicklung des Endlagersystems.

Obwohl die BGE schon von Erfassungstabellen für Ungewissheiten spricht und die Geschäftsführung seit 2021 ein Risiko-Managementsystem verwendet, fehlt im Augenblick noch eine Verbindung zwischen beiden. Die Erkenntnis, dass Ungewissheiten und daraus resultierende, sicherheitsrelevante, technische Risiken einer strukturierten Erfassung, Verbindung und eines Vermeidungsplanes bedürfen, ist noch nicht durchgehend ersichtlich. Dadurch erscheint die Handhabung von Ungewissheiten, Risiken und Möglichkeiten als unstrukturiert, sprich ohne klare Zusammenhänge und lässt sich so nicht durch die bisherigen und weiteren Phasen des Endlager-Projektes verfolgen („audit trail“).

Ein Beispiel eines wichtigen technischen Risikos, das nicht vom BGE-System erfasst ist, ist die zeitnahe Verfügbarkeit von digitalen Untergrunddaten. Trotz intensiver Bemühungen der BGE sind bis heute diesbezüglich nur kleine Fortschritte erzielt worden. Dies macht eine Eskalation eines solchen Risikos durch die BGE Geschäftsführung notwendig.

Darüber hinaus bleibt festzuhalten, dass hier empfohlen wird, die verbal-argumentative Einschätzung aller TUR durch quantitative oder semi-quantitative Evaluierungen der Ungewissheiten (z.B.“Italian flag analysis“, “bullhorn plots“, decision quality) ergänzt wird, um eine transparente Vergleichbarkeit aller TUR zu erleichtern.

Im Gutachten selbst finden sich zu allen durch das NBG geäußerten Fragestellung noch weitere, gezielte Empfehlungen. Des Weiteren sind frühere Empfehlungen und ihr Status im Anhang nochmals aufgeführt, falls sie im jetzigen Stadium des Projekts noch von Relevanz sind.

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.

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn.

Brint, J. (2017): Decision Driven Integrated Reservoir Modelling: Its Role in Delivering Robust Technical Solutions to Ensure Viable Projects, AAPG Middle East Region GTW, Decision Based Integrated Reservoir Modeling, Muscat, Oman, October 30 – November 1, 2017, AAPG Datapages/Search and Discovery Article #90314.

Capouet, M., Carter, A. & Ciambrella, M. (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0. OECD-NEA. Paris, France.

Egli, D., Mosar, J., Ibele, T. & Madritsch, H. (2017): The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest-Hegau region. International Journal of Earth Sciences, Bd. 106, S. 2297-2318. ISSN 14373262. DOI: 10.1007/s00531-016-1427-8.

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

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

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

Grötsch, J. & Pöppelreiter, M. (2020): Digital Geology – Multiscale analysis of depositional systems and their subsurface workflows, 224 S., EAGE, Houten.

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.

IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency (IAEA). Wien, Österreich.

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

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

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

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.

Nummi, O. (2019): Plan for Uncertainty Assessment in the Safety Case for the Operating Licence Application. Posiva Oy. Eurajoki, Finland. ISBN 9789516522695.

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

Schreiber, U. & Jentzsch, G. (2021): Vulkanische Gefährdung in Deutschland Bewertung möglicher vulkanischer Aktivitäten der nächsten 1 Million Jahre in Deutschland inklusive Festlegung der Gebiete mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit in diesem Zeitraum. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Bonn

SKB (2015): Safety analysis for SFR Long-term safety - Main report for the safety assessment SR-PSU. TR-14-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden.

Stark, L., Gerardi, J., Jahn, S., Jobmann, M., Keller, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2014): Projekt ANSICHT FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD – Dokumentation – (Anlage zum Bericht). DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR. Peine/Hannover.

Stefani, M. & Vincenzi, S. (2005): The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system, Marine Geology 222–223 (2005) 19–48.

Stober, I. (2013): Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. Grundwasser, Bd. 18, S. 259–269. DOI: 10.1007/s00767-013-0236-2

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)

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)

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 **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 21) *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 10 *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 (siehe* Abbildung 31*).*