Gutachten

„Rahmenvereinbarung über Sachverständigenleistungen im Rahmen der Akteneinsichtnahme nach § 35 Geologiedatengesetz“.

Hier: „Sichtung der Unterlagen zur Methodenentwicklung für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) gem. § 14 Abs. 1 i.V.m. § 27 StandAG, des Zwischenberichts Teilgebiete und seiner untersetzenden Unterlagen (nach Bedarf), Akteneinsicht bei der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) für nicht frei zugängliche Unterlagen zur Beantwortung der folgenden Fragestellungen für Teilgebiete mit dem Wirtsgestein „Kristallin“:

1. In der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rvSU gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) stellt die BGE einen Workflow zum Umgang mit heterogener Datenlage in den Teilgebieten und zur Identifikation von Gebieten ohne hinreichende Informationen nach §14 StandAG vor. Dieser Workflow wird beispielhaft im Gebiet zur Methodenentwicklung (GzME) „Thüringer Becken“ (Steinsalz flach) und in einem Teilbereich im GzME „Saxothuringikum“ erläutert. Der Sachverständige soll den Workflow auf seine Anwendbarkeit in den großflächig ausgewiesenen Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ begutachten.

2. Die Datenlage erfordert es in den weiteren Prüfschritten der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zur Analyse und Bewertung des Endlagersystems gegebenenfalls, dass Referenzdaten verwendet werden müssen, die nicht aus den Teilgebieten selbst stammen. Der Sachverständige soll für Teilgebiete mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ die Verwendung der Referenzdaten bewerten.

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium, Geschäftsstelle Buchholzweg 8, 13627 Berlin
Vergabestelle: Umweltbundesamt, Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau
Auftragsdatum: 22. Juli 2022
Autor: Prof. Dr. Jan Behrmann

[redacted] 15. November 2022

[redacted]

(Prof. Dr. Jan Behrmann)

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis 2
2. Aufgabenstellung 2
3. Sind in den sieben Teilgebieten im Kristallin geeignete Wirtsgesteine in der Tiefe angetroffen worden? 3
4. Der Workflow zum Umgang mit heterogener Datenlage und seine Anwendbarkeit in den großflächig ausgewiesenen Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“. 7
5. Bewertung der Verwendung von Referenzdaten, die nicht aus den Teilgebieten selbst stammen. 14
6. Handlungsempfehlungen 18
7. Zusammenfassung 19
8. Abstract 19
9. Zitierte Literatur 20

2. Aufgabenstellung

Der Verfasser der hier vorliegenden Stellungnahme wurde beauftragt, auf der Basis einer Sichtung der Unterlagen zur Methodenentwicklung für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (im Folgenden rvSU) gem. § 14 Abs. 1 in Verbindung mit § 27 StandAG, des Zwischenberichts Teilgebiete und seiner untersetzenden Unterlagen Stellung zu zwei Fragenkomplexen zu nehmen.

1. In der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rvSU (BGE 2022b) gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) stellt die BGE im Kapitel 5.1 einen Workflow zum Umgang mit heterogener Datenlage in den Teilgebieten und zur Identifikation von Gebieten ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG vor. Dieser Workflow wird dort beispielhaft im Gebiet zur Methodenentwicklung (GzME) „Thüringer Becken“ (Steinsalz flach) und in einem Teilbereich im GzME „Saxothuringikum“ erläutert. In der hier vorgelegten Stellungnahme soll der Workflow auf seine Anwendbarkeit in den großflächig ausgewiesenen Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ begutachtet werden.

2. Die Datenlage erfordert es in den weiteren Prüfschritten der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) zur Analyse und Bewertung des Endlagersystems gegebenenfalls, dass Referenzdaten verwendet werden müssen, die nicht aus den Teilgebieten selbst stammen. In der hier vorgelegten Stellungnahme soll für die sieben Teilgebiete mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ die Verwendung der Referenzdaten bewertet werden.

Zur Klärung der beiden Fragenkomplexe hat der Verfasser an zwei Tagen (am 19.9. und am 20.9.2022) die BGE in Peine besucht und im dortigen Datenraum die Datenbank der BGE recherchiert und Akteneinsicht vorgenommen. Die Beantwortung der vom NBG untenstehend aufgeworfenen Fragen erforderte erstens einen Überblick über die bei der BGE gegenwärtig vorhandenen Schichtenverzeichnisse und gegebenenfalls vorhandenen Bohrakten, den sich der Verfasser durch Stichproben in der Datenbank verschaffen konnte. Zweitens ging es darum, im Gespräch mit Mitarbeitenden der BGE zu erfahren, wie der gegenwärtige Arbeitsstand bei der Anwendung der rvSU in den Teilgebieten im Kristallin ist, und wie das nötige Ausmaß der Anwendung von Referenzdaten im rvSU-Prozess eingeschätzt wird. Die Gespräche fanden in einer konstruktiven, offenen Atmosphäre des gegenseitigen Interesses statt, für die sich der Verfasser bei der BGE ausdrücklich bedankt.

3. Sind in den sieben Teilgebieten im Kristallin geeignete Wirtsgesteine in der Tiefe angetroffen worden?

Bevor auf die einzelnen Fragen im Zusammenhang mit den beiden oben angeführten, übergeordneten Fragenkomplexen eingegangen wird, will der Verfasser in diesem Abschnitt wesentliche Aspekte der unternommenen Datenrecherche zu den sieben Teilgebieten mit Kristallingesteinen skizzieren. Der Inhalt schließt sich an einzelne Passagen in früheren Gutachten an (Behrmann 2021, 2022) die dem NBG bereits vorliegen. Der Schwerpunkt liegt hier erstens auf der Frage, ob als Wirtsgesteine für ein Endlager potenziell geeignete Gesteine (vor allem Granite und Granodiorite) vorliegen. Zweitens ist im Einzelfall zu erörtern, wie gut Menge und Qualität direkter oder indirekter Nachweise, also vor allem in Form von Bohrungen für solche Gesteine in den Teilgebieten sind. Dies ist vor allem wichtig für die Antwort auf die Frage, ob abzusehen ist, dass es Untersuchungsräume oder Teiluntersuchungsräume ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG geben wird.

Zuerst wird das Teilgebiet 014_00TG_199_00IG_K_g_NPZ betrachtet. Es handelt sich hier um ein Vorkommen der Nördlichen Phyllitzone in Südhessen (BGE 2020a). Die Abmessungen betragen etwa 10x3 km, bei einer Gesamtgröße von 10 km2. Es schließt sich nordwestlich an das Saxothuringium an. Dieser Teil der Nördlichen Phyllitzone ist eine schmale Zone schwach metamorpher Phyllite, Serizit-Gneise und Grünschiefer, die sich vorherrschend aus Tonsteinen und Vulkaniten gebildet haben (z. B. Klügel et al. 1994). Diese Gesteinstypen sind durchwegs auch im Licht der Einschätzung der BGE (BGE 2020d) wenig geeignet für die Errichtung eines Endlagers anzusehen. Im Teilgebiet selbst liegen am nördlichen Rand jedoch zwei Bohrungen, die Dioritstöcke angefahren haben. Schichtenverzeichnisse sind in der Datenbank der BGE als pdf vorhanden. Bohrakten sind

in der Datenbank noch nicht vorhanden, da seitens der BGE noch keine Datenabfrage nach §14 StandAG ausgelöst wurde.

Das Teilgebiet 012_02TG_198_02IG_K_i_RHE befindet sich im Grundgebirge der Rhenoherzynischen Zone. Es liegt im Flechtinger Höhenzug im Westen von Sachsen-Anhalt, nahe der Grenze zu Niedersachsen. Es besitzt eine Größe von 52 km2 bei einer Ausdehnung von ca. 20x5 km). Die Oberfläche des Teilgebiets befindet sich in einer Teufenlage von 580 Metern bis 1 290 Metern unterhalb der Geländeoberkante (BGE 2020a). Im Teilgebiet liegen zwei Tiefbohrungen, eine in der NW-Ecke des Teilgebiets, eine in der SE-Ecke. Schichtenverzeichnisse sind in der Datenbank der BGE vorhanden, Scans der Bohrakten jedoch noch nicht. Die zuerst genannte Bohrung hat ab 575 m Teufe bis zur Endteufe von 1046 m Monzogranit erbohrt. In weiteren Bohrungen wurden im Nebengestein Anzeichen einer Kontaktmetamorphose gefunden hat (LAGB 2020). Die genaue Dimension des oberflächlich nicht aufgeschlossenen Kristallinvorkommens ist unsicher. Die zweite genannte Bohrung hat bis 314 m Endteufe Grauwacken und Tonschiefer durchörtert. Es finden sich also hier keine als Träger eines Endlagers in Frage kommenden Gesteine.

Das Teilgebiet 012_01TG_198_01IG_K_g_RHE umfasst Gesteine des Rhenoherzynikums im Harz mit den Granitstöcken von Ramberg und Brocken sowie den Eckergneis. Es ist 175 km2 groß und umfasst zwei Flächen von ca. 15x10 km und 10x3 km, die durch Ausschlusskriterien voneinander getrennt sind. Im Fall des Brockengranits gibt es eine Bohrung in Niedersachsen am Rand des Massivs, die Granite mit Einschaltungen von Norit und Harzburgit durchörtert hat. Die Endteufe beträgt 389,6 m unter Grund. Ein Schichtenverzeichnis ist in der Datenbank der BGE vorhanden. Betreffend den Ramberg-Granit gibt es keine Bohrungen. Eine Bohrung im Nebengestein südlich des Granits endet in 500 m Tiefe unter Grund in Grauwacken. Nach mündlicher Auskunft der BGE könnten Bohrungsdaten aus dem weiteren Umfeld beim Land Sachsen-Anhalt angefragt werden. Die grundsätzliche Eignung der granitischen Gesteinstypen hinsichtlich der Mindestanforderungen nach §23 StandAG ist zu konstatieren. Die geringe Größe der beiden Teilflächen macht die Definition und Anwendung von Kriterienkatalogen bei einer rvSU und die Ausweisung eines potenziellen Standorts für ein Endlager absehbar schwierig.

Das Teilgebiet 011_00TG_200_00IG_K_g_SPZ Südliche Phyllitzone umfasst die Südliche Phyllitzone in den Bundesländern Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Das Teilgebiet erstreckt sich entlang der Landesgrenze zwischen Sachsen-Anhalt und Sachsen bis in das Bundesland Brandenburg. Die Südliche Phyllitzone besteht ganz überwiegend aus sehr niedriggradig bis niedriggradig umgewandelten Phylliten und Metavulkaniten, die als kristalline Wirtsgesteine im Sinne der Mindestanforderungen nach §23 StandAG von

der BGE als ungeeignet betrachtet werden (BGE 2022a, 2022b). In der Stellungnahme des Landesamts für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB 2020) zum Zwischenbericht Teilgebiete wird in einer früheren Stellungnahme des Verfassers (Behrmann 2021) diskutiert, dass sich die Rekonstruktion der Grundgebirgsoberfläche nicht im Sinne einer „Kristallin“-Oberfläche zur Anwendung der Mindestanforderungen nutzen lässt. Aufgrund der hohen Menge an Bohrungen sind die Teilgebiete aber gut genug erforscht, um Kristallin in endlagerrelevanten Teufen auszuschließen. Ausnahmen sind drei Bereiche mit plutonischen Gesteinen im Untergrund, teils unter erheblich mächtiger Bedeckung durch Sedimentgesteine. Zunächst ist der Delitzsch-Pluton zu nennen, mit Vorkommen von Karbonatiten. Dieses Gebiet wurde von der Wismut AG intensiv abgebohrt. Scans der Bohrakten sind nach dem Augenschein des Verfassers in der Datenbank der BGE vorhanden. Zweitens sind die Granite von Pretzsch-Prettin zu nennen, sowie der Granit von Schönewalde in Brandenburg (siehe Eidam et al. 2009). Zusätzlich ist noch der Granodiorit von Dessau zu erwähnen, ein Plutonit cadomischen Alters. Die Datenlage in der Südlichen Phyllitzone kann mit Blick auf die Granite als homogen und zur Durchführung der rvSU als potenziell ausreichend angesehen werden. Hinsichtlich der Datenlage im Teilgebiet insgesamt ist die räumliche Verteilung der Bohrungsdaten trotz einer Nachlieferung von Daten aus 67 Flachbohrungen des Geologischen Dienstes Sachsen-Anhalt als heterogen anzusehen.

Die Datendichte und -verfügbarkeit im Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO Saxothuringikum ist in früheren Stellungnahmen des Verfassers zur Methodenentwicklung in Kristallinen Wirtsgesteinen thematisiert worden (Behrmann 2021, 2022). Sie wird auch für den Ostteil in der Methodenbeschreibung für die Durchführung der rvSU (BGE 2022b) dargestellt. Zusätzlich zur dort angesprochenen Verfügbarkeit direkter und indirekter Nachweise sowie zusätzlicher interpretativer Nachweise kann nach den vom Verfasser durchgeführten Stichproben durch seitdem erfolgte Datenlieferungen in die Datenbank der BGE mittlerweile von einer recht homogenen Abdeckung vor allem von Bohrungsdaten ausgegangen werden.

Für das Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO Moldanubikum ist zunächst zu bemerken, dass das öffentlich zugängliche Geologische Kartenwerk und die untersetzende Literatur in aller Regel ermöglicht, eine interpretative Gesteinsansprache zur Einteilung in geeignete, weniger geeignete und ungeeignete Typen von kristallinem Wirtsgestein durchzuführen. Die nordöstliche Hälfte ist durch Vorkommen von Kristallingesteinen an der Erdoberfläche gekennzeichnet (Bayerisches Geologisches Landesamt 1996a,1996b). Das flächenmäßig häufigste Gestein sind hochgradig metamorphe Gneise, die in enger struktureller Assoziation mit Metabasiten und wenigen Serpentiniten vorkommen und teilweise aufgeschmolzen

worden sind. Danach sind regional granitische und lokal granodioritische bis dioritische Schmelzen in den Komplex aus Gneisen und Metabasiten eingedrungen, kristallisiert und abgekühlt. Spätere tektonische Überprägungen geschahen durch die Ausbildung des „Bayerischen Pfahls“, mit intensiver Deformation und Mineralisierung. Bis ins jüngere Tertiär hinein kam es vor allem im Nord- und Südteil des Gebietes zu tektonischen Bewegungen in der nördlichen Oberpfalz (z. B. Peterek & Schröder 1997) und zur Bildung und Eintiefung des Molassetroges südlich der Donau. Bei den Gneisen handelt es sich um einen strukturell und von der stofflichen Zusammensetzung her mäßig bis stark heterogen aufgebauten Gesteinskomplex. Im Gegensatz zeigen die Granitmassive, deren größte an der Erdoberfläche Ausdehnungen bis zu etwa 500 Quadratkilometer besitzen, generell stoffliche Homogenität, Einfachheit im Bau und die Abwesenheit durchgreifender Deformation. Im Bayerischen Wald und im Oberpfälzer Wald gibt es allerdings über den geologischen Oberflächenbefund hinaus kaum Tiefbohrungen, deren Daten bei der räumlichen Charakterisierung und der sicherheitsgerichteten Einstufung potenziell geeigneter Gesteine hilfreich sein könnten. Die wenigen, vorhandenen Tiefbohrungen sind über den bayerischen Teil des Teilgebiets allerdings recht homogen verteilt. Für die Gesteinseinheiten des Moldanubikums im Schwarzwald sind neben dem geologischen Kartenbefund vor allem die Schichtenverzeichnisse der Bohrfirmen zu Thermalwasserbohrungen im Raum Bad Peterstal-Griesbach zu erwähnen. Schichtenverzeichnisse der Bohrfirmen sind in der Datenbank der BGE vorhanden. Im Schwarzwald ist die Verteilung der wenigen Tiefbohrungen insgesamt als heterogen anzusehen.

Das Teilgebiet Mitteldeutsche Kristallinzone 010_00TG_193_00IG_K_g_MKZ zieht sich von Südwesten nach Nordosten von Rheinland-Pfalz über Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Kristalline Gesteine des Grundgebirges kommen vom Untergrund des Saar-Nahe Beckens über den westlichen Rheintalgraben vor. Weiter nordöstlich bilden sie den Odenwald, den Spessart, das Ruhlaer Kristallin, den Kyffhäuser und das durch Bohrungen erschlossene Dessauer Kristallin. Noch weiter östlich ist die Mitteldeutsche Kristallinzone nur aus Bohrungen bekannt. Das Teilgebiet ist sehr vorherrschend aus meist hochgradig metamorphen Gneisen und Graniten zusammengesetzt. An Bohrungen mit einer Endteufe von mehr als 1000 m gibt es im Teilgebiet an veröffentlichten und unveröffentlichten Daten im Datenraum der BGE insgesamt 51, deren Mehrzahl auf das Gebiet des Bundeslandes Thüringen entfällt und die heterogene Datenlage anzeigt. Die Anzahl an Bohrungen mit einer Endteufe größer als 300 m in der Datenbank der BGE war beim Stand der Recherche für diese Stellungnahme 751, die ebenfalls zum großen Teil in Thüringen liegen und vorherrschend zur Erschließung von Salz und Kupferschiefer abgeteuft wurden. Im Kyffhäuser haben zwei Bohrungen kristalline Gesteine erschlossen. Für die Gneise und Granite des von Spessart und Odenwald

liegen bei den geologischen Landesdiensten nur sehr wenige Bohrungsdaten vor, da Datenabfragen nach §14 StandAG seitens der BGE noch nicht ausgelöst wurden. Wichtige, öffentlich zugängliche Informationen über Petrographie und tektonische Überprägung für das Ruhlaer Kristallin im Thüringer Wald wären sicher durch die geologischen Daten aus dem Bau der Eisenbahn- und Autobahntunnel durch den Thüringer Wald zu gewinnen. Diese Daten sind als direkte Nachweise für die Durchführung der rvSU als ebenso wichtig wie Bohrungsdaten anzusehen. Es wird hier nachdrücklich empfohlen, solche Daten in die Datenbank der BGE zu inkorporieren.

4. Der Workflow zum Umgang mit heterogener Datenlage und seine Anwendbarkeit in den großflächig ausgewiesenen Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“

In der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rvSU gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (BGE 2022b, p. 229 ff.) werden sowohl epistemische als auch aleatorische Ungewissheiten erwähnt (siehe auch BGE 2022b, Kapitel 10). Der Umgang mit geologischen Modellen ist zunächst vor allem von epistemischen Ungewissheiten betroffen, die bei ausreichenden Informationen und entsprechender Datendichte erfasst werden können. Aleatorische Ungewissheiten im Modell selbst machen die Anwendung statistischer Methoden notwendig und betreffen zum Beispiel kleinräumige Änderungen der Gesteinseigenschaften im Modell selbst. Hier ist eine treffende Quantifizierung der Ungewissheit von einer viel höheren Datendichte abhängig. In seinen Einzelschritten besteht der Workflow für den fachlichen Umgang mit heterogener Datenlage (BGE 2022b, Abb. 62) erst aus der Klassifizierung der Datentypen und danach einer Klassifikation der Datenqualität und der Datenquantität. Darauf baut sich eine Erfassung der interpretativen Datenlage und weiterer, auch indirekter Nachweise sowie der geologischen Komplexität auf, sowie die Ableitung des Konfidenzniveaus hinsichtlich der getätigten Aussagen und Bewertungen. Die im Rahmen des ersten Fragenkomplexes vom NBG gestellten Einzelfragen werden nachfolgend diskutiert und vom Verfasser dieser Stellungnahme beantwortet.

Ist die vorgeschlagene Klassifizierung von Datentypen (direkt, indirekt, zusätzlich-interpretativ) für Teilgebiete mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ generell plausibel?

Diese Frage ist mit einem Ja zu beantworten. Es gibt bei der Verwendung der Datentypen nach Aussage der Bearbeitenden bei der BGE keine vorausgesetzte Hierarchie. Bei der Anwendung auf die Teilgebiete im Kristallin im rvSU-Prozess spielen zunächst die zusätzlichen interpretativen Nachweise in Form der Geologischen Karten eine tragende Rolle. Im gegenwärtig praktizierten Arbeitsprozess werden die folgenden Datentypen interaktiv und simultan verwendet:

1. Direkte Nachweise. Dies sind einerseits Aufschlussdaten, deren Gebrauch zur Kompilation in geologischen Karten führt, und die in den Erklärungsbänden dazu direkt oder in aggregierter Form niedergelegt sind. Andererseits sind es Bohrungsdaten mit Schichtenverzeichnissen, Bohrakten und geophysikalischen Bohrlochmessungen. Diese direkten Nachweise liegen in aller Regel nicht digital vor.

2. Indirekte Nachweise: Dies sind vor allem geophysikalische Messungen von der Erdoberfläche aus oder aus der Luft. Seismik und – im Kristallin wichtig – Gravimetrie, Magnetik, und Geoelektrik. In der gegenwärtigen Arbeitspraxis bei der BGE ist zu erkennen, dass solche Messungen vor allem bei der Bildung ein- oder mehrdimensionaler Modelle angewendet werden. Generell ist hier zu bemerken, dass die räumliche Auflösung bei geophysikalischen Daten im für die Suche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs relevanten Tiefen unter der Erdoberfläche bedeutend geringer ist als die des Oberflächenbefundes oder die von Bohrungen. Es ist also als schwierig anzusehen, geophysikalische Daten und direkte Nachweise eins-zu-eins zu verknüpfen. Eher führt der Weg über einen interpretativen Gebrauch der geophysikalischen Messungen.

3. zusätzliche interpretative Nachweise: Geologische Karten bilden zusammen mit Bohrungen das Grundgerüst der Analyse und Bewertung. 3D-Modelle sind wichtig und würden vor allem ermöglichen, während der rvSU zum Beispiel Ein- und Austräge von Stoffen quantifizieren zu können. In der Realität wird dies aber vorwiegend in 1D-Modellen unter Verwendung von Referenzdaten geschehen müssen. Für die Erstellung und Verwendung von 1D-Modellen sind Bohrungen unverzichtbar. In den sieben Teilgebieten wurde vom Verfasser stichprobenartig in der Datenbank untersucht, ob sich dort Bohrungen (das heißt Tiefbohrungen mit über 300 m Endteufe) befinden. Wäre dies nicht der Fall, bestünde das Risiko, dass es wegen des Fehlens direkter Nachweise zur Ausweisung von Gebieten ohne ausreichende Information kommen müsste (siehe unten).

Sind zur Bestimmung der Kenngröße Datenqualität in Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ andere Datentypen als Bohr- und Seismikdaten bzw. zusätzliche Datentypen zu berücksichtigen?

Die Bestimmung der Kenngröße Datenqualität wird – anders als in den anderen Wirtsgesteinstypen – ganz überwiegend abhängig sein von den vorhandenen Beschreibungen zur Petrographie und Petrologie der verschiedenen Gesteinstypen in den Teilgebieten mit ihren Untersuchungsräumen und Teiluntersuchungsräumen. In der Methodenbeschreibung (BGE 2022a, 2022b) wird klar dargelegt, dass Plutonite (vor allem Granite und Granodiotite) im Hinblick auf stoffliche und strukturelle Homogenität als am ehesten für ein Endlager geeignet anzusehen sind. Als weniger gut geeignet sind hochmetamorphe Kristallingesteine

anzusehen, die in den meisten Fällen stofflich und strukturell heterogen und damit bedeutend schwieriger zu charakterisieren sind. Eine Ausnahme können Orthogneise darstellen, die zwar strukturell heterogener sind als Granit, aber stofflich vergleichbare Homogenität besitzen können. Als nicht geeignet angesehen werden die Typen von Kristallingesteinen, die erwarten lassen, dass sie aufgrund von tektonischer Überprägung oder späterer, bei zurückgehenden Temperaturen erfolgter metamorpher Umwandlungen die Mindestanforderungen nicht erfüllen können. Die Beurteilung der Datenqualität wird also zunächst auf die dokumentierten Befunde in den veröffentlichten geologischen Karten und den vorhandenen Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, Bohrakten) gestützt sein müssen.

Diese Datentypen genügen allerdings nicht, um sicherheitsrelevante Fragen im Rahmen der rvSU direkt zu adressieren. Es gibt in den sieben Teilgebieten im kristallinen Wirtsgestein nach Einschätzung des Verfassers nach der Recherche der bei der BGE vorliegenden Daten praktisch keine Bohrungen mit dem kompletten Portfolio von Bohrlochmessungen und/oder Bohrkernen. Markante Ausnahmen sind die Kontinentale Tiefbohrung (KTB) bei Windischeschenbach in der nördlichen Oberpfalz (siehe z. B. Emmermann & Lauterjung 1997), die Bohrung Weißenstadt im Fichtelgebirge (Röckel & Stober 2017), sowie Bohrungen im Schwarzwald (z. B. Stober et al. 2014). Daraus folgt, dass Aussagen zur Strukturgeologie und Hydrogeologie in Untersuchungsräumen und Teiluntersuchungsräumen eigentlich nur mit Ableitungen erfasst werden können.

Ist die Bestimmung der Kenngröße Datenqualität aus digitalen Bohrinformationen ohne Ergänzung aus analogen Unterlagen (Gesteinsbeschreibungen, Bohrlochmessungen) für Teilgebiete mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ durchführbar?

Diese Frage ist für das Wirtsgestein Kristallin klar zu verneinen. Der Hauptgrund hierfür liegt im mangelnden Vorhandensein digitaler Bohrlochinformation selbst, da der weit überwiegende Anteil der Information aus Bohrungen ohne eine digitale Archivierung der Daten stammt. Selbst wenn zum Beispiel analoge Aufzeichnungen von Bohrlochmessungen vorhanden sind, schafft die Vektorisierung der Daten auf graphischen Weg keine zusätzliche Information an sich. Der hauptsächliche Vorteil besteht darin, dass die Daten leichter und möglicherweise präziser in 3D-Modelle integriert werden können. Folglich muss in den kommenden Schritten des rvSU-Prozesses mit den in analoger Form vorliegenden Daten gearbeitet werden. Bei diesen ist vor allem der Informationsgehalt und die Interpretierbarkeit der Gesteinsbeschreibungen entscheidend und kann zur Beurteilung der Datenqualität herangezogen werden.

Sind zur Bestimmung der Kenngröße Datenqualität für das Kristallin anstatt von stratigraphischen Einstufungen bevorzugt Angaben zur Petrographie, zum Metamorphosegrad, zu retrograder Überprägung und zum Metamorphose- bzw. Intrusionsalter zu verwenden?

Im Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020a) ist offenbar, dass Gruppierung und Zuschnitte der Teilgebiete für das Kristallin nach tektono-stratigraphischen Kriterien erfolgt ist. Diese Vorgehensweise erweist sich im weiteren Verlauf der Standortsuche zunehmend als Hindernis, weil das erste und wichtigste Kriterium für die Eignung eines Kristallingesteins für die Endlagerung radioaktiver Abfälle der Gesteinstyp ist. Dies bedeutet, dass zuvorderst Angaben zur Petrographie für die Bewertung auch der Datenqualität wichtig ist. Die Methodenbeschreibung sieht eine Bewertung der Datenqualität von sehr gut – Note 1 bis sehr schlecht – Note 6 vor (BGE 2022b, Tabelle 28). Wenn man davon ausgeht, dass zur Bestimmung der Eignung des Gesteinstyps für ein Endlager zunächst das Kriterium Gesteinszusammensetzung leitend ist (siehe oben), dann eignet sich das offen zugängliche geologische Kartenwerk in Verbindung mit Bohrungsdaten wohl in den allermeisten Fällen für eine korrekte Einstufung der Datenqualität. Der Metamorphosegrad ist zusammen mit der tektonischen Überprägung als das nächstwichtige Kriterium für die Einstufung der Datenqualität anzusehen, denn Gesteinsumwandlung und Deformation beeinflussen die Gesteinseigenschaften wesentlich. Auch hier sind geologische Karten und Bohrungen von Bedeutung, zusammen mit den interpretierten Ergebnissen geophysikalischer Messungen. Das Alter der Intrusion beziehungsweise der Metamorphose von Kristallingesteinen ist nur dann von Bedeutung, wenn es um die Bewertung zu Beispiel der tektonischen Überprägung von Gesteinen geht. Tektonische Überprägung kann nicht nur ortsabhängig, sondern wegen der unterschiedlich langen Geschichte von Gesteinen auch altersabhängig sein. Dies ist jedoch der einzige Aspekt, bei dem die stratigraphische Einstufung eines Gesteins eine Rolle spielen kann.

Korreliert der Grad der stratigraphischen bzw. petrographischen Auflösung in den Gesteinsbeschreibungen mit der Datenqualität und gewährleistet eine hohe Auflösung eine qualitativ hochwertige Gesteinsansprache?

Die Antwort auf diese Frage erfordert zunächst eine Diskussion der Möglichkeiten und Grenzen der Auswertbarkeit und Interpretierbarkeit von Schichtenverzeichnissen und Bohrakten. Die räumliche Auflösung von Schichtenverzeichnissen ist begrenzt. Der Verfasser schätzt, dass sie im Fall von Rekonstruktionen aus Befunden von Spülproben und Bohrklein, bei denen immer mit der Möglichkeit von Kontamination und Verfälschung durch Nachfall aus der Bohrlochwand in das Bohrloch zu rechnen ist, bestenfalls fünf Meter

betragen kann. Diese Aussage betrifft Schichtenverzeichnisse von Vollbohrungen. Im Fall von Kernbohrungen ist dagegen eine bedeutend höhere Genauigkeit und damit Datenqualität möglich. Dies betrifft aber in den Teilgebieten im Kristallin insgesamt nur einen kleinen Teil der Bohrungen. Insgesamt hängt die Datenqualität von Schichtenverzeichnissen von Bohrungen auch kritisch von der Erfahrung und Schulung der Bearbeitenden ab. Dies sind entweder Wissenschaftler bzw. Wissenschaftlerinnen, oder aber auch in vielen Fällen Bohrmeister, die erhebliche Erfahrungen in der regionalen Geologie des Untersuchungsgebietes und der Gesteinsanspreche und -beschreibung haben können (aber nicht müssen). Über diesen Aspekt der Datenqualität lassen sich Informationen bestenfalls aus der Auswertung kompletter Bohrakten gewinnen. Es wird vom Verfasser empfohlen, alle für die Durchführung relevanten Bohrakten zumindest als Scans für die Datenbank der BGE zeitnah verfügbar zu machen.

Gesteinsbeschreibungen aus Aufschlüssen an der Erdoberfläche finden sich, meist in einer synthetisierten, aggregierten Form, in der Regel in den Erläuterungsbänden der von den Geologischen Landesdiensten veröffentlichten Geologischen Kartenwerke. Die Beschreibungen der auf einem Kartenblatt vorkommenden Gesteinstypen sind hier meist von hoher Qualität. Allerdings muss auch die Unsicherheit betrachtet werden, die von den in Deutschland meist vorherrschenden, ungünstigen Aufschlussverhältnissen ausgeht. In den Teilgebieten mit Kristallingestein kommt zusätzlich zum Tragen, dass die Klassifikation von vorhandenen Gesteinstypen in der Regel nicht auf der Basis stratigraphischer Einordnungen erfolgt, sondern dass Mineralbestand, Struktur und Gefüge eine wichtige Rolle spielen.

Sind aus Sicht des Sachverständigen in Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ Gebiete ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG zu erwarten und sind ihre Größe und Anzahl abschätzbar?

Diese Frage bezieht sich auf den Abschnitt 5.1.4 der Methodenbechreibung zur Durchführung der rvSU gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (BGE 2022b). Gebiete ohne hinreichende Informationen werden ausgewiesen, wenn Analysen und Bewertungen innerhalb der rvSU und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu Ergebnissen kommen, die keinen oder einen sehr geringen Informationsgehalt haben. Für die sieben Teilgebiete in Kristallingesteinen wäre dies denkbar, wenn es neben der Information aus dem Geologischen Kartenbefund keine weiteren Daten gäbe, zum Beispiel aus Bohrungen, die Aufschlüsse über die Wahrscheinlichkeit geben, mit der ein geeignetes Wirtsgestein wie zum Beispiel Granit in einer für ein Endlager geeigneten Teufe (etwa 500 – 1500 Meter unter Grund) anzutreffen ist. Dieses Vorgehen wird in der Methodenbeschreibung anhand der kontaktmetamorphen Gesteine im Zusammenhang

mit dem Lausitzer Granodiorit im Gebiet zur Methodenentwicklung „Saxothuringikum“ anschaulich erklärt (BGE 2022b, pp. 244 – 250). Die Frage ist nun, ob solche Fälle in anderen Teilgebieten mit Kristallingestein in signifikanter Menge zu erwarten sind. Bei einer Antwort muss beachtet werden, dass die Ausweisung von Gebieten ohne hinreichende Informationen in Schritt 2 der Phase I nur in Ausnahmefällen erfolgt mit dem Ziel, zu verhindern, dass Gebiete anhand unbrauchbarer, aber günstiger Bewertungen als Standortregionen ausgewiesen werden.

Einige der kleineren Teilgebiete (Harz, Flechtingen-Granit, Nördliche Phyllitzone; siehe oben) bieten zwar punktuell den Nachweis geeigneter Wirtsgesteine in der Tiefe durch Bohrungen. Es ist aber aufgrund der geringen Ausdehnung oder des komplexen Zuschnitts der Teilgebiete nach der Einschätzung des Verfassers nicht wahrscheinlich, dass es dort zu einem erfolgreichen Nachweis eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für ein Endlager im Rahmen der rvSU kommen kann.

Die potenziell als Wirtsgesteine anzusehenden Granite in der Südlichen Phyllitzone (siehe oben) hingegen sind durch Bohrungen und andere Erkundungen wahrscheinlich gut genug erschlossen, um eine Einstufung auf der Basis der bestehenden Datenlage zu ermöglichen. Ähnliches dürfte für die Granite in der Mitteldeutschen Kristallinzone gelten, wobei der BGE besonders anzuraten ist, durch Datenabfragen nach §14 StandAG beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) die Voraussetzungen für eine korrekte Einstufung bei der rvSU besonders im Bereich von Spessart und Odenwald zu schaffen.

Im Teilgebiet Saxothuringikum gibt es zusätzlich zu den im Zusammenhang mit der Methodenentwicklung bereits vorgenommenen vorläufigen Einstufungen weite Gebiete, für die entweder Ausschlusskriterien gelten, oder die durch Bergbau und untertägige Exploration sowie durch Bohrungen erwarten lassen, dass eine korrekte Einstufung bei der Anwendung der rvSU möglich ist. Für das verbleibende, große Teilgebiet des Moldanubikums in Bayern und Baden-Württemberg könnte es sich als Handikap bei der Anwendung der rvSU erweisen, dass die Anzahl der vorhandenen Tiefbohrungen gering ist. Andererseits ist bei konsequenter Klassifizierung der kristallinen Wirtsgesteine in gut geeignete Granite, weniger gut geeignete Gneise und nicht geeignete kristalline Schiefer die Zahl der potenziell als günstig einzustufenden Gebiete voraussichtlich recht begrenzt und man würde sich bei der Ausweisung von Standortregionen wie in den anderen Teilgebieten dort voraussichtlich auf ausreichend große, gut erschlossene Granite konzentrieren wollen.

Aus dem Gesagten lässt sich folgern, dass der Verfasser davon ausgeht, dass die Zahl der Gebiete wahrscheinlich klein sein wird, die anhand unbrauchbarer, aber günstiger Einstufung als Gebiete ohne hinreichende Information gelten müssen. Bedingung ist allerdings, dass die BGE die Hürden, die zur Ausweisung eines Gebietes ohne ausreichende Information führen, entsprechend hoch ansetzt. Dies ist auch aus Gründen des Erhalts der Verfahrensgerechtigkeit anzuraten. Weil die Zahl der in einem Vorschlag zu Standortregionen ausgewiesenen Gebiete absehbar begrenzt ist, würde eine hohe Anzahl von zurückgestellten Gebieten in einem Vorschlag zu Standortregionen bedeuten, dass entsprechend wenige gut dokumentierte, gut geeignete Standortregionen in diesen Vorschlag Eingang finden könnten. Dies würde die Verfahrensgerechtigkeit genauso kompromittieren wie ein Ausschluss von Gebieten mit nicht hinreichender Information nur aufgrund der Tatsache, dass man wenig über sie weiß.

Wie kann für die im Verfahren zunächst zurückgestellten Gebiete ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG mit dem Standortregionen-Vorschlag bewertet werden, ob die Gebiete eine gleichwertige oder bessere Bewertung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erwarten lassen als die ermittelten Standortregionen, wenn keine zusätzlichen Informationen hinzukommen?

Wenn keine zusätzlichen Informationen für die Einstufung zunächst zurückgestellter Gebiete ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG im Schritt 2 der Phase 1 hinzukommen, wird es nicht möglich sein, diese Gebiete auf verbesserter oder breiterer Basis korrekt zu bewerten. Ausnahmen könnte es geben, wenn aufgrund von neuen Forschungsergebnissen und Erkenntnissen aus freien oder von der BGE angestoßenen Projekten eine veränderte, korrektere Einstufung ermöglicht wird. In der Methodenbeschreibung

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

Sinngemäß bedeutet dies, dass die Aussicht auf Eignung a priori, das heißt auf der Grundlage vergleichender Einschätzungen mit Gebieten geschehen muss, in denen es hinreichende Informationen gibt. Nur wenn ein solcher Vergleich nicht angestellt werden kann, wäre damit zu rechnen, dass ein solches Gebiet tatsächlich in den Standortregionen-Vorschlag aufgenommen werden müsste.

5. Bewertung der Verwendung von Referenzdaten, die nicht aus den Teilgebieten selbst stammen.

Zur Frage der Verwendung von Referenzdaten wurden vom NBG die folgenden Fragen gestellt. Der Verfasser versucht, diese auch im Lichte seiner Recherche in der Datenbank der BGE untenstehend zu beantworten.

Ist die Datenübertragbarkeit aus anderen Kristallingebieten in Europa möglich?

Für Kristalline Gesteine ist festzuhalten, dass diese bis auf einzeln zu nennende Ausnahmen hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung, des Korngefüges und der kleinmaßstäblichen Struktur sehr ähnlich sind. Dies gilt insbesondere für die plutonischen Gesteine Granit oder Granodiorit, die in der Methodenbeschreibung (BGE 2022b) an vielen Stellen genannt sind. Für aus einem Granit durch Deformation gebildete Gneise kann Ähnliches gelten. Als komplexer ist die Situation bei aus Sedimenten gebildeten, hochgradig metamorphen Gneisen anzusehen, da in ihnen kleinräumige Heterogenitäten eine wichtigere Rolle spielen, die auch standortspezifisch sein können. Gleiches gilt für die als kristalline Wirtsgesteine generell nicht geeigneten, weniger hochgradig metamorphen kristallinen Schiefer.

Für die Datenübertragbarkeit bedeutet dies, dass bei einer vom Verfasser angeratenen Konzentration der Suche nach einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Granit und Granodiorit Daten und Ergebnisse aus anderen Kristallingebieten durchaus Eingang in den rvSU-Prozess finden können (z. B. Maes et al. 2021). Besonders gilt dies für die Erkenntnisse über die Granite der Nordschweiz (Nagra 1994), Frankreichs (Andra 2005), aber auch für die weniger uniform aufgebauten Gebirgsbereiche in den in Bau befindlichen Endlagern in Eurajoki (Finnland) und Forsmark (Schweden). Siehe hierzu zum Beispiel die Arbeiten Posiva OY, SKB (2017), oder Posiva OY, (2012). Speziell Forsmark kann aber auch als Beispiel für die Möglichkeiten der Anwendung von Analogstudien im rvSU-Prozess dienen (Follin et al. 2011). Auch Ergebnisse aus außereuropäischen Gebieten, wie zum Beispiel die Studien von Plutoniten aus dem Kanadischen Schild (Snowdon et al. 2021) sind als Referenzdaten von potenziell unschätzbarem Wert.

Welche Einschränkungen bestehen bezüglich der Verwendung von Referenzdaten aus anderen Kristallingebieten in Europa?

Einschränkungen bezüglich der Verwendung von Referenzdaten aus anderen Kristallingebieten bestehen überall, wo standortspezifische Faktoren eine Rolle spielen. Dies betrifft ortsabhängige Variablen, wie zum Beispiel die radioaktive Wärmeproduktion und die Wärmeleitfähigkeit, sowie damit die Thermische Struktur des Kristallins in Deutschland (z. B. Cermak & Rybach 1982). Bei der Analyse der Eigenschaften von Gesteinen mit tektonischer Überprägung in Untersuchungsräumen und Teiluntersuchungsräumen durch Verwerfungszonen wird von einem Standardmodell ausgegangen (z. B. Mitchell & Faulkner 2012), in dem diskrete Bruchnetzwerke (discrete fracture networks; DFN) zur Bestimmung zum Beispiel der Permeabilität herangezogen werden (z. B. Bense et al. 2013; Caine et al. 1996). Da die Breite solcher, durch Bruchbildung aufgelockerter Verwerfungszonen auch vom Versatz (dem Ausmaß der Bewegung) abhängt, ist zum Beispiel die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit dadurch beeinflusst (z. B. Achtziger-Zupančič et al. 2017) und kann bei der Bewertung der Ungewissheit in geologischen Modellen einfließen (Achtziger-Zupančič et al. 2022). Für die Analyse strukturell intakter Gebirgsbereiche allerdings ist es möglich, mit einem eindimensionalen Ansatz zu arbeiten und zum Beispiel die teufenbedingte Variation der Permeabilität zur Grundlage der Definition des günstigen Teufenbereichs für ein Endlager im kristallinen Wirtsgestein zu nutzen (z. B. Bauer et al. 2022)

Generell wird vom Verfasser empfohlen, bei der Verwendung von Referenzdaten aus ausländischen Kristallingesteinen couragiert zu sein, aber die zu beachtenden Einschränkungen zu berücksichtigen und für die Nachvollziehbarkeit in der Öffentlichkeit klar zu kommunizieren.

Wie ist die große Bandbreite der unterschiedlichen Kristallingesteine bei der Durchführung der rvSU zu berücksichtigen?

Die große Bandbreite der unterschiedlichen Kristallingesteine, die die im Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020a) definierten sieben Kristallinareale in der Bundesrepublik Deutschland kennzeichnet, hat seinem Grund vor allem in dem tektono-stratigraphischen Ansatz bei der Definition eben dieser Teilgebiete. Dieses Konzept bestimmte im Zwischenbericht Teilgebiete (op.cit.) wesentlich die Definition der Tiefenlage von Kristallingesteinen in Deutschland (Reinhold 2005). Eigentlich kommen entsprechend den in der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rvSU (BGE 2022b), aber auch früher (BGE 2020d) gemachten Aussagen nur Granite und Granodiorite (gut geeignet), sowie hochmetamorphe Gesteine in Frage, die aus Plutoniten oder Sedimenten gebildet worden sind (wegen der Komplexität von Zusammensetzung, Struktur und Gefüge weniger geeignet).

Bei konsequenter Anwendung dieser einschränkenden Definition ist damit zu rechnen, dass in den sieben Teilgebieten mit Kristallinem Wirtsgestein große Teile aufgrund der an der an der Oberfläche oder in der Tiefe bis 1500 Metern anstehenden Gesteinen allein aus Gründen der Gesteinszusammensetzung und der Entstehungsgeschichte als ungeeignet klassifiziert werden müssen. In diesem Zusammenhang siehe auch den obigen Abschnitt zu den Teilgebieten in der hier vorliegenden Stellungnahme.

Der Verfasser empfiehlt, ein solches kombiniertes Kriterium aus Gesteinszusammensetzung und Entstehungsgeschichte beim Zuschnitt von Untersuchungsräumen und Teiluntersuchungsräumen konsequent anzuwenden und im Zuge der Anwendung der rvSU möglichst zeitnah umzusetzen. Auf diese Weise kann die Suche nach einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für ein Endlager stark fokussiert, effizienter gestaltet und beschleunigt werden. Das Ergebnis wäre auch im Interesse der Kommunizierbarkeit des rvSU-Prozesses in die Öffentlichkeit.

Wird die Parametrisierung von Gesteins- bzw. Modelleinheiten mit Referenzdaten ausreichend differenziert durchgeführt?

Im Gebiet zur Methodenentwickung „Saxothuringikum“, auf das sich alle bisherigen Arbeiten konzentriert haben, ist die Parametrisierung von Gesteins- und Modelleinheiten bisher noch nicht durchgeführt worden. Es ist dem Verfasser daher noch keine Aussage möglich, ob dies ausreichend differenziert geschieht. Den untersetzenden Unterlagen zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020a) sind hinsichtlich der Verwendung von Referenzdatensätzen einige Ansätze bei der Verwendung von Abwägungskriterien zu entnehmen. Einstufungen und Klassifizierungen müssen wohl vorwiegend auf der Grundlage qualitativer Einstufungen durchgeführt werden. Wichtig ist, das anhand von Referenzdatensätzen kein Ranking von Untersuchungsräumen bzw. Teiluntersuchungsräumen möglich ist. Diese Schwäche ist bereits bei der Diskussion zur Anwendung von Abwägungskriterien in Kristallingesteinen offenbar geworden (Behrmann 2021). Allerdings könnten einige Parameter wie zum Beispiel die thermische Struktur räumlich differenziert betrachtet werden. Das Standortauswahlgesetz erlaubt überdies, auf der Basis einer Vermutung (geeignet/ungeeignet im Sinne von § 22 StandAG) in den nächsten Schritt zu gehen.

Werden abgeschlossene Projekte zur Nutzung des tiefen Untergrundes in Deutschland als Quelle für Referenzdaten ausreichend berücksichtigt?

Im Zuge der Methodenentwicklung im Ostteil des GzME Saxothuringikum ist nach Einschätzung des Verfassers ein Großteil der Daten aus abgeschlossenen Projekten zur Exploration und Nutzung des tiefen Untergrundes eingeflossen. Dies kommt in der Methodenbeschreibung an mehreren Stellen zum Ausdruck (BGE 2022b, pp. 245 – 250,

pp. 304 – 308, pp. 320 – 323, pp. 346 – 347, pp. 362 – 366, pp. 377 – 380, pp.). Bei der Erarbeitung der Anwendungsbeispiele wurden die Ergebnisse aus Geothermieprojekten sowie – wo immer möglich und verfügbar – die Daten aus geophysikalischen Vermessungen (Seismik, Geoelektrik, Magnetik, Gravimetrie) interpretativ inkorporiert.

Abschließend seien hier zwei Beispiele für laufende Forschungsvorhaben erwähnt, die helfen können, die Lücke zwischen der Anwendung von Referenzdaten und solchen aus den Teilgebieten mit kristallinem Wirtsgestein selbst zu verkleinern oder zu schließen.

Im Rahmen des extern vergebenen Forschungsvorhabens AMPEDEK (BGE 2021; siehe auch Muhl et al. 2022) wird eine Datenbasis geschaffen, die für den rvSU-Prozess relevant ist. Grundlage ist die „PetroPhysical Property Database“ (P3) der TU Darmstadt (Bär et al. 2020). Die bisher veröffentlichten Daten aus Teilgebieten kristalliner Wirtsgesteine stammen aus Untersuchungen zum Potenzial für Tiefengeothermie der Mitteldeutschen Kristallinzone (Weinert et. al. 2020, 2021), sind aber zumindest für die nicht standortspezifischen Aspekte auf andere Teilgebiete übertragbar. Dieser Atlas der Gesteinseigenschaften enthält für die rvSU relevante Daten zu thermischer Leitfähigkeit, Diffusivität, Wärmekapazität, radiogener Wärmeproduktion, Porosität, Permeabilität, und Festigkeitseigenschaften. Betreffend standortspezifische Eigenschaften erfolgt eine geometrische und mineralogische Analyse des Bruchinventars, die skalenübergreifend ist (Probe – Aufschluss – Reservoir). Ziel ist, gekoppelte Prozesse THMC (thermisch, hydraulisch, mechanisch, chemisch) charakterisieren zu können. Die „PetroPhysical Property Database“ besitzt eine integrierte Qualitätskontrolle und beruht derzeit auf einem Datensatz aus der Mitteldeutschen Kristallinzone, vor allem aus dem Odenwald, weniger aus dem Spessart und in einem geringen Maß aus dem Ruhlaer Kristallin.

Das von der BGE extern vergebene Projekt GAME (z. B. Hallas et al. 2022) beschäftigt sich mit der Analyse von Gefügen durch Textur- und Anisotropiemessungen, und deren Bedeutung zur Charakterisierung möglicher Fluidwegsamkeiten. Diese petrophysikalischen Charakterisierungen sind auch durch die Probenauswahl spezifisch auf größere, strukturell abgrenzbare Granit- und Granodioritvorkommen in den Teilgebieten mit kristallinem Wirtsgestein ausgerichtet.

Die beispielhafte Nennung dieser Vorhaben dient als Hinweis und Empfehlung des Verfassers an die BGE, die Arbeiten im Prozess der Durchführung der rvSU wo immer möglich durch begleitende, auch von dritter Seite durchzuführende Forschungsvorhaben zu unterstützen. Zu heterogen und häufig nicht in der gewünschten Menge vorhanden sind die Daten, die man für eine zielgerichtete Arbeit braucht.

6. Handlungsempfehlungen

Da die Datenlage in den sieben Teilgebieten mit kristallinem Wirtsgestein generell heterogen ist und viele entscheidende Unterlagen wie Bohrlochmessungen, Schichtenverzeichnisse von Bohrungen und die zugehörigen Bohrakten in der Datenbank der BGE nicht in digitaler Form vorliegen, wird empfohlen, besonderes Augenmerk auf die Vervollständigung dieser Daten zu richten. Dabei sollten alle Möglichkeiten der Digitalisierung oder Redigitalisierung genutzt werden.

Konkret ist der BGE für das Teilgebiet der Mitteldeutschen Kristallinzone besonders anzuraten, durch Datenabfragen nach §14 StandAG beim Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) die Voraussetzungen für eine korrekte Einstufung bei der rvSU besonders im Bereich von Spessart und Odenwald zu schaffen.

Im Einklang mit der Methodenbeschreibung zur Durchführung der rvSU empfiehlt der Verfasser, dass die BGE die Hürden, die zur Ausweisung eines Gebietes ohne ausreichende Information führen, entsprechend hoch ansetzt. Dies ist auch aus Gründen des Erhalts der Verfahrensgerechtigkeit anzuraten. Weil die Zahl der in einem Vorschlag zu Standortregionen auszuweisenden Gebiete absehbar begrenzt ist, würde eine hohe Anzahl von zurückgestellten Gebieten in einem Vorschlag zu Standortregionen bedeuten, dass entsprechend wenige gut dokumentierte, gut geeignete Standortregionen in einen Vorschlag Eingang finden könnten.

Generell wird empfohlen, bei der Verwendung von Referenzdaten aus ausländischen Kristallingesteinen couragiert zu sein, aber die zu beachtenden Einschränkungen zu berücksichtigen und für die Nachvollziehbarkeit in der Öffentlichkeit klar zu kommunizieren.

Es wird empfohlen, ein kombiniertes Kriterium aus Gesteinszusammensetzung und Entstehungsgeschichte beim Zuschnitt von Untersuchungsräumen und Teiluntersuchungsräumen konsequent anzuwenden und im Zuge der Anwendung der rvSU möglichst zeitnah umzusetzen. Auf diese Weise kann die Suche nach einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für ein Endlager stark fokussiert, effizienter gestaltet und beschleunigt werden. Das Ergebnis wäre auch im Interesse der Kommunizierbarkeit des rvSU-Prozesses in die Öffentlichkeit.

Der BGE wird empfohlen, die Arbeiten im Prozess der Durchführung der rvSU wo immer möglich durch begleitende, auch von dritter Seite durchzuführende Forschungsvorhaben zu unterstützen. Zu heterogen und häufig nicht in der gewünschten Menge vorhanden sind die Daten, die man für eine zielgerichtete Arbeit braucht.

7. Zusammenfassung

Die Antworten auf die beiden im Rahmen der Beauftragung der vorliegenden Stellungnahme gestellten Fragen sind wie folgt.

1. Der Workflow in der Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) zum Umgang mit heterogener Datenlage ist generell geeignet, in den großflächig ausgewiesenen Teilgebieten mit dem Wirtsgestein „Kristallin“ angewendet zu werden. Probleme existieren weithin aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit digitaler oder digitalisierbarer direkter und indirekter Nachweise. Diese sollten prioritär behoben werden. Eine wichtige Rolle dabei können auch an Dritte vergebene Forschungsprojekte spielen. Das in der Methodenbeschreibung erklärte Vorgehen zum Umgang mit Gebieten mit nicht ausreichender Information erscheint praktikabel. Es erfordert aber, dass die Hürden, die zur Ausweisung eines Gebietes ohne ausreichende Information führen, auch im Hinblick auf die Verfahrensgerechtigkeit entsprechend hoch angesetzt werden.

2. Die Verwendung von Referenzdaten, die nicht aus den Teilgebieten mit dem Wirtsgestein Kristallin selbst stammen, wird auch in den weiteren Prüfschritten der rvSU unabdingbar nötig sein und korrekte Bewertungen und Einstufungen erst möglich machen. Sofern diese nicht standortbezogen sind und sich auf Gesteinseigenschaften beziehen, gibt es kaum Vorbehalte gegen eine solche Praxis. Bei standortbezogenen Daten ist sorgfältig zu prüfen, inwieweit generische Modelle und tiefenabhängige Änderungen der Gesteinseigenschaften für eine zutreffende Beschreibung ausreichen.

8. Abstract

The answers to the two questions asked with respect to the present report are as follows.

1. The workflow in the description of methods for carrying out the representative preliminary safety investigations (rvSU) in accordance with the Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) for dealing with heterogeneous data, is generally suitable to be used in the large-scale designated sub-areas with crystalline host rock. Problems persist widely due to the lack of availability of digital or digitizable direct and indirect evidence data. Priority should be given to fix these problems. Research projects awarded to third parties can also play an important role there. The procedure explained in the description of methods for dealing with areas with insufficient information seems practicable. However, it is necessary that the hurdles that lead to the designation of an area without sufficient information are set high, also to retain procedural fairness in the assessment.

2. The use of reference data that do not come from the sub-areas with crystalline host rock will also be absolutely necessary in the further test steps of the rvSU, to make correct evaluations and classifications possible in the first place. Unless these are site-specific and relate to rock properties, there are few objections to such a practice. In the case of site-related data, it is necessary to carefully examine the extent to which generic models and depth-dependent changes in rock properties are sufficient for an accurate description.

9. Zitierte Literatur

Achtziger-Zupančič, P., Kukla, P., Bond, C., Laurich, B., Zehner, B., Jähne-Klingenberg, F., Bense, F., Stück, H. & Wellmann, F. (2022) GeoBlocks: Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Geologischen Modellen, Tagungsband, Tage der Standortauswahl, Aachen, 41, https://standorttage2022.de/wp-content/uploads/2022/06/Tagungsband-Tage-der-Standortauswahl-2022.pdf , heruntergeladen am 26.6.2022

Achtziger-Zupančič, P., Loew, S., Hiller, A. (2017) Factors controlling the permeability distribution in fault vein zones surrounding granitic intrusions (Ore Mountains/Germany). Journal of Geophysical Research, 122, 1876 – 1899

Andra (2005) Dossier 2005 Granite Synthesis – Assets of granite formations for deep geological disposal. Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. Châtenay-Malabry Cedex, France

Bär, K., Reinsch, T. & Bott, J. (2020) The PetroPhysical Property Database (P3) – a global compilation of lab- measured rock properties. Earth Syst. Sci Data, 12, 2485-2515, https://doi.org/10.5194/essd-12-2485- 2020

Bauer, M.E, Knopf, S.B., Fanara, S., Rohlfs, F., Timar-Geng, Z., Müller, K., Perner, M.J. & Klein, E. (2022). Depth dependent permeability in crystalline host rock formations. Poster, Tage der Standortauswahl 2022, Aachen, https://standorttage2022.de/wp-content/uploads/2022/06/2022-06-02TdS2022Depth-dependent-permeability-in-crystalline-host-rock-formations.pdf, downloaded 26.06.2022

Bayerisches Geologisches Landesamt (1996a) Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000, 4. neubearbeitete Auflage Mit 67 Abbildungen, 21 Tabellen und 8 Beilagen, München, 329 pp.

Bayerisches Geologisches Landesamt (1996b) Geologische Karte 1:500 000 Bayern, Karte, München

Behrmann, J. (2021) Gutachten zur Methodenentwicklung Kristallin. https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/DownloadsGutachten/GutachtenSachverstaendige/2021/GutachtenMethodenentwicklungSachverst122021/GutachtenKristallinBehrmann30112021.html

Behrmann, J. (2022) Gutachten „Begleitung der öffentlichen Vorstellung und Konsultation der Methodenentwicklung zur Beantwortung konkreter Fragestellungen für das Gebiet zur Methodenentwicklung (GzM) Saxothuringikum (Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO) im Wirtsgestein Kristallin https://www.nationales-begleitgremium.de/SharedDocs/Downloads/DE/Downloads_Gutachten/Gutachten_Sachverstaendige/2022/Gutachten_Methodenentwicklung_Sachverst_07_2022/Gutachten_Kristallin_Behrmann_5_7_2022.html

Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., Scibek, J. (2013) Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews, 127, 171 – 192

BGE (2020a) Zwischenbericht Teilgebiete, website, zuletzt geöffnet am 08. 11. 2022, https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/

BGE (2020b) Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG, Stand 1.9.2020. Geschäftszeichen: SG02102/5-3/3-2020#26 – Objekt-ID: 825460, Peine, 148 pp.

BGE (2020c) Teilgebiete und Anwendung – Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG, Stand 28.9.2020. (Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete) Geschäftszeichen SG02102/5-5/2-2020#7, Objekt–ID:828663 – Revision 000, Peine, 213 pp.

BGE (2020d) Meldung – Standortsuche, 08. Juli 2020: BGE definiert die Wirtsgesteine für ein Endlager. https://www.bge.de/de/endlagersuche/meldungen-und-pressemitteilungen/archiv/meldung/news/2020/7/468-endlagersuche/, zuletzt geöffnet am 08.11.2022

BGE (2021) Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine (AMPEDEK) https://www.bge.de/fileadmin/userupload/Standortsuche/Forschung/2021-05-28BGEProjektskizzeOEffentlichkeitAMPEDEKbarrierefrei.pdf. Zuletzt geöffnet am 29.03.2022

BGE (2022a). Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (62 pp.). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Konzept_zur_Durchfuehrung_der_rvSU_barrierefrei.pdf

BGE (2022b). Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (744 pp.). Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/rvSU-Methodik/20220328_Anlage_zu_rvSU_Konzept_Methodenbeschreibung_barrierefrei.pdf

Caine, J. S., Evans, J. P. & Forster, C. B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24,1025-1028

Čermák, V., Rybach, L. (1982) Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks. Physical properties of rocks, 1, 305-343

Eidam, J., Ehling, B.C., Hammer, J., Korich, D., Rappsilber, I. (2009) The plutonite complex of Pretzsch-Prettin-Schoenewalde; compositional normal zoned complex with high-K to shoshonitic granitoid rocks. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 63, 271-272

Emmermann, R., Lauterjung, J. (1997) The German Contionental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results. Journal of Geophysical Research, 102, B8, 18179–18201.

Follin, S., Stigsson, M., Rhén, I., Engström, J. & Klint, K.E. (2011) Greenland Analogue Project – Hydraulic properties of deformation zones and fracture domains at Forsmark, Laxemar and Olkiluoto for usage together with Geomodel version 1. Report, SKB P-11-26, ISSN 1651-4416, 56 pp., https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/43/026/43026210.pdf, heruntergeladen am 26.06.2022

Gesetz zur staatlichen geologischen Landesaufnahme sowie zur Übermittlung, Sicherung und öffentlichen Bereitstellung geologischer Daten und zur Zurverfügungstellung geologischer Daten zur Erfüllung öffentlicher Aufgaben Geologiedatengesetz—GeolDG), Pub. L. No. BGBl. I S. 1387, 21 (2020). https://www.gesetze-im-internet.de/geoldg/GeolDG.pdf

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG), Pub. L. No. BGBl. I S. 1074 (2017). https://www.gesetze-im-internet.de/standag2017/StandAG.pdf

Hallas, P., Müler, F. & Kroner, U. (2022) The anisotropic properties of Granite – the GAME project – preliminary results, Tagungsband, Tage der Standortauswahl, Aachen, 41, https://standorttage2022.de/wp-content/uploads/2022/06/Tagungsband-Tage-der-Standortauswahl-2022.pdf, heruntergeladen am 26.6.2022

Klügel, T., Ahrendt, H., Oncken, O., Schäfer, F., Käfer, N., Weiß, B. (1994) Alter und Herkunft der Sedimente der Phyllitzone – der Taunussüdrand. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 145, 172 – 191

LAGB (2020) Stellungnahme des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LAGB) zum „Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG“ der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) vom 28.09.2020 – zur Betroffenheit des Landes Sachsen-Anhalt. https://www.bge.de/fileadmin/userupload/Standortsuche/WesentlicheUnterlagen/Fachdiskussionen/Stellungnahmen/Fachstellungnahmen/2021-06-03StellungnahmeLAGBStellungnahmezumZwischenberichtTeilgebietegeschwaerztbarrierefrei.pdf. Zuletzt geöffnet am 08.11.2022

Maes N., Glaus M., Baeyens B., Marques Fernandes M., Churakov S., Dähn R., Grangeon S., Tournassat C., Geckeis H., Charlet L., Brandt F., Poonoosamy J., Hoving A., Havlova V., Fischer C., Scheinost A., Noseck U., Britz S., Siitari-Kauppi M., Missana T. (2021) State-of-the-Art report on the understanding of radionuclide retention and transport in clay and crystalline rocks. Final version as of 30.04.2021 of deliverable D5.1 of the HORIZON 2020 project EURAD. EC Grant agreement no: 847593

Mitchell, T.M., Faulkner, D.R. (2012) Towards quantifying the matrix permeability of fault damage zones in low porosity rocks. Earth and Planetary Science Letters, 339 – 340, 24 – 31

Muhl, L., Hung, P. & Sass, I. (2022) Atlas der Mineralogischen und Petrophysikalischen Eigenschaften Deutscher Kristalliner Wirtsgesteine (AMPEDEK), Tagungsband, Tage der Standortauswahl, Aachen, 41, https://standorttage2022.de/wp-content/uploads/2022/06/Tagungsband-Tage-der-Standortauswahl-2022.pdf, heruntergeladen am 26.6.2022

Nagra (1994) Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland. Technical Report 93-01, May 1994

Peterek, A., Schröder, B. (1997) Neogene fault activity and morphogenesis in the basement area of the KTB drill site (Fichtelgebirge and Steinwald. Geologische Rundschau, 86, 185 – 190

Posiva OY (2012) Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Oikiluoto – features, events and processes 2012. Posiva-raportti – Posiva Report, 2012-7, 467 pp., ISBN 978-951-652-188-9, heruntergeladen 26.06.2022: https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22134704

Posiva Oy, SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Eurajoki (Finland), Stockholm (Sweden)

Reinhold, K. (2005) Tiefenlage der” Kristallin-Oberfläche” in Deutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Röckel, L., Stober, I. (2017) Die neue Tiefbohrung Weißenstadt im Granit des Fichtelgebirges. Grundwasser, 22, https://doi.org/10.1007/s00767-017-0361-4

Snowdon, Andrew P.; Normani, Stefano D.; Sykes, Jonathan F. (2021) Analysis of Crystalline Rock Permeability Versus Depth in a Canadian Precambrian Rock Setting. Journal of Geophysical Research, 126, 21 pp., DOI: 10.1029/2020JB020998

Stober, I., Wolfgramm, M., Birner, J. (2014) Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, 41/42, 339 – 380

Weinert, S., Bär, K., Sass, I. (2020) Petrophysical Properties of the Mid-German Crystalline High: A Database for Bavarian, Hessian, Rhineland-Palatinate and Thuringian Outcrops. TUDatalib, https://doi.org/10.25534/tudatalib-278

Weinert, S., Bär, K., Sass, I. (2021) Database of Petrophysical Properties of the Mid-German Crystalline Rise. Earth Syst. Sci. Data, 13, 1441–1459, https://doi.org/10.5194/essd-13-1441-2021