Gutachten

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

Hier: „Sichtung des Zwischenberichts Teilgebiete und seiner untersetzenden Unterlagen sowie bei Bedarf eine Akteneinsicht bei der BGE. Betrachtung der verbalargumentativen Bewertung im Wirtsgestein Kristallin, konkret das Böhmische Massiv (Kristallingestein; 0013_00TG_195_00IG_K_g_MO). Formulierung von Handlungsempfehlungen zu Art und Umfang für weitere und vertiefende Prüfungen und Bewertungen“.

Auftraggeber: Nationales Begleitgremium Geschäftsstelle Buchholzweg 8 13627 Berlin

Vergabestelle: Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau

Auftragsdatum: 02. März 2021

Wittmoldt, den 21. April 2021

[redacted]

(Prof. Dr. Jan Behrmann)

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis 2
2. Vorbemerkung und Aufgabenstellung 2
3. Kurzcharakterisierung der Geologie und verfügbarer Daten 4
4. Der Referenzdatensatz für Kristallingesteine 7
5. Schlüssigkeit der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien:
Analyse und Bewertung 10
6. Handlungsempfehlungen 16
7. Zusammenfassung 16
8. Zitierte Literatur 17

2. Vorbemerkung und Aufgabenstellung

Die hier vorgelegte Stellungnahme befasst sich vor allem mit der Frage, ob die verbalargumentative Bewertung der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 Standortauswahlgesetzes in ihrer Anwendung auf den Trägergesteinstyp „Kristallin“ plausibel und fachlich nachvollziehbar ist. Hierbei geht es um die zusammenfassende Bewertung der Einzelbewertungen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Da der Referenzdatensatz Kristallingesteine für die meisten Bewertungskriterien derzeit die einzige Grundlage bildet, wird dieser hier einer kurzen, vorgeschalteten Betrachtung unterzogen.

Gegenstand ist hier die Betrachtung der verbalargumentativen Bewertung im Wirtsgestein Kristallin, konkret im Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO (siehe Abb. 1). Wegen der sehr großen räumlichen Ausdehnung des Teilgebietes (36836 Quadratkilometer) ist hier vom Verfasser vereinbarungsgemäß ein Teilbereich ausgewählt worden. Dieser Teilbereich umfasst die Gebiete östlich der der UTM Koordinate 700000 im Bereich des Freistaates Bayern, genauer in der Oberpfalz und in Niederbayern im weiteren Umfeld der Städte Regensburg, Landshut, Passau und Weiden (siehe Abb. 2). Er überdeckt mit etwa 17000 Quadratkilometern Größe knapp die Hälfte der Gesamtfläche von Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO. Die Lage wurde so gewählt, dass das petrographische Spektrum (das heißt Gesteinstypen mit magmatischer oder metamorpher Bildung) an Trägergesteinen für ein Endlager möglichst umfassend betrachtet werden kann. Zusätzlich liegen die Kristallingesteine im West- und Südteil des betrachteten Teilbereichs unter einer variabel mächtigen Bedeckung jüngerer Gesteine, deren Natur und Eigenschaften ebenfalls

in die Anwendung von Abwägungskriterien einfließen (Kriterium 11 der Abwägungskriterien, siehe unten).

Hierfür wurden der Zwischenbericht Teilgebiete und seine untersetzenden Unterlagen einer Sichtung unterzogen.

Am Ende dieser Stellungnahme werden Handlungsempfehlungen zu Art und Umfang weiterer, vertiefender Prüfungen und Bewertungen gegeben.

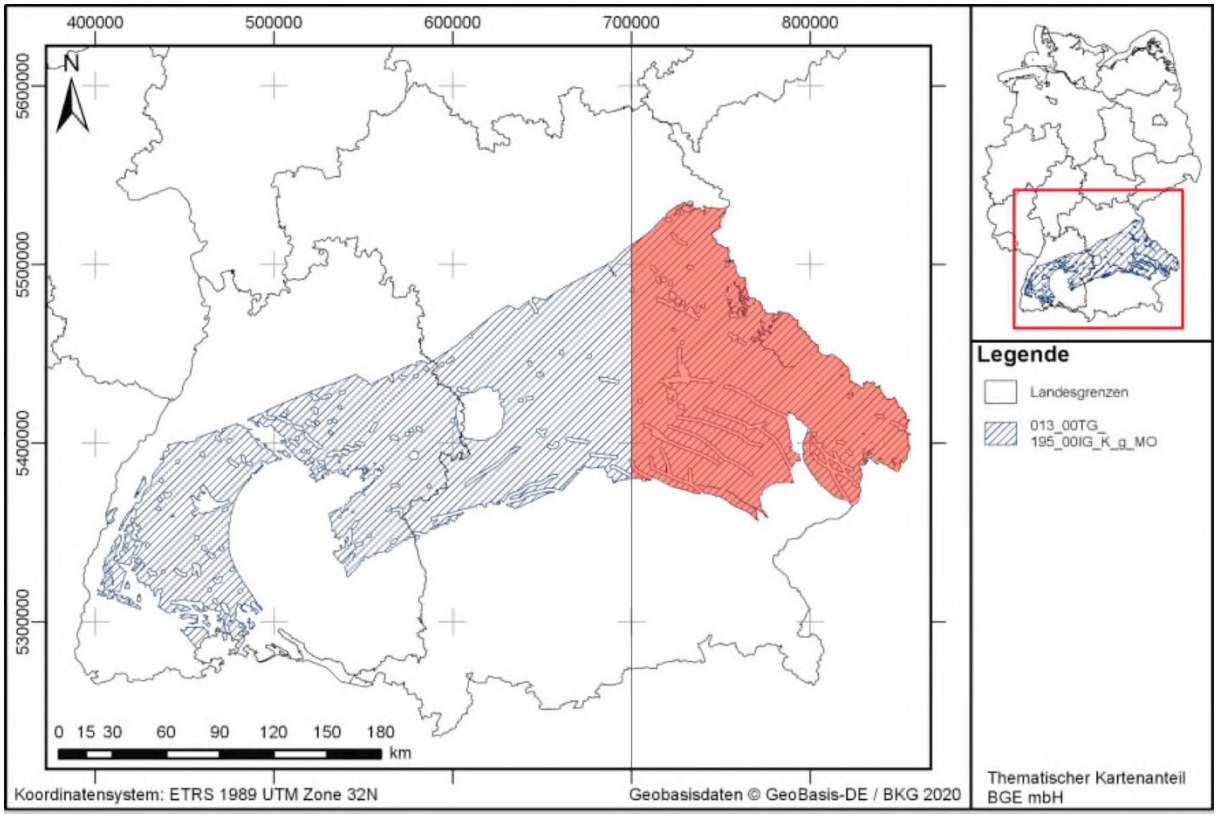

Abb.1: Lage des in dieser Stellungnahme betrachteten Teilbereichs von Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO. Bearbeitet nach BGE (2020a).

3. Kurzcharakterisierung der Geologie und verfügbarer Daten

In diesem Abschnitt versucht der Verfasser, möglichst einfache Formulierungen zu gebrauchen und die Beschreibung des Gebietes auf die für diese Stellungnahme wesentlichen Aspekte zu beschränken. Weiterhin wird auf einige mögliche Irrtümer bei der räumlichen Charakterisierung des betrachteten Gebiets aufmerksam gemacht, die das Auftreten des Trägergesteins Kristallin im Tiefen von 300 – 1500 Meter unter der Geländeoberkante betreffen.

Die nordöstliche Hälfte des für diese Stellungnahme betrachteten Teils von Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO (Abb.1) ist durch Vorkommen von Kristallingesteinen an der Erdoberfläche gekennzeichnet (Abb.2), (siehe auch Bayerisches Geologisches Landesamt (1996a,1996b). Das flächenmäßig häufigste Gestein sind aus Sedimenten, aber auch aus Graniten durch Metamorphose entstandene Gneise, die in enger struktureller Assoziation mit Metabasiten und wenigen Serpentiniten zuletzt vor etwa 380 – 320 Millionen Jahren tief versenkt, intensiv deformiert und teilweise aufgeschmolzen worden sind. Am Ende dieses Zeitabschnitts sind regional granitische und lokal granodioritische bis dioritische Schmelzen in den Komplex aus Gneisen und Metabasiten eingedrungen, kristallisiert und abgekühlt. Die jüngste, wichtige strukturelle Modifikation geschah durch die Ausbildung des „Bayerischen Pfahls“, einer großen nordwest-südost verlaufenden Scherzone (rot-weiß schraffiert in Abb.2) mit intensiver Deformation und Mineralisierung, vor allem durch Quarz. All diese Gesteine befanden sich bei Beginn der Zeit des Perms vor ca.300 Millionen Jahren (Abb. 2) bereits in der Nähe der heutigen Landoberfläche und sind in ihrer relativen Lage nicht mehr signifikant verändert worden. Gleichwohl kam es bis ins jüngere Tertiär hinein vor allem im Nord- und Südteil des Gebietes zu tektonischen Bewegungen, vor allem im Fränkischen Bruchschollenland 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.

Die Zeit des Perms (siehe oben) beginnt mit der Bildung lokal begrenzter Sedimentationsbecken (z.B. Haunschild, 1979), deren markantestes der Weidener Rotliegendtrog ca. 100 km nördlich von Regensburg (Abb. 2) ist. Diese Sedimente (olivbraune Signatur in Abb. 2) sind durch eine Anzahl von Tiefbohrungen (rote und gelbe Kreise zeigen die Bohransatzpunkte in Abb.2) dokumentiert und haben in drei Fällen in mehr als 1000 Metern Tiefe unter der Erdoberfläche kein Kristallin angetroffen. Dieser Umstand ist der BGE in jüngster Zeit

vom Bayerischen Landesamt für Umwelt mitgeteilt worden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020) und sollte in den zukünftigen Schritten der Standortauswahl Berücksichtigung finden. Permische Sedimente können auch weiter westlich vorkommen, sind in ihrer Ausdehnung aber durch das jüngere Deckgebirge maskiert.

Im Erdmittelalter (Zeiten der Trias, des Jura und der Kreide; siehe Abb. 2) wurden der West- und der Südteil des Gebietes von einer Abfolge von Sedimentgesteinen überlagert. Dieses Deckgebirge besteht in der Trias vor allem aus Sandsteinen und Tonsteinen, wobei auch die mittlere Trias wegen der Randlage zur Böhmischen Masse (damals Festland) in sandiger Ausbildung vorliegt (z.B. Haunschild, 1990). Die Schichten des unteren und mittleren Jura sind ebenfalls vorherrschend Sand- bis Tonsteine, während es im oberen Jura durchgängig zur Bildung von Mergeln und Kalken kam (siehe z.B. ausführliche Darstellung in Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996a). Vor allem die Kalke haben das Potenzial im Untergrund Karstwassersysteme auszubilden. In der oberen Kreide kommt es schließlich zur diskordanten Überdeckung sowohl von Teilen des Kristallins als auch des älteren Deckgebirges weit vorherrschend mit Sandsteinen (hellgrüne Signatur in Abb. 2).

In der Erdneuzeit (Zeiten des Tertiärs (gelbe Signatur in Abb.2) kam es südlich der Donau zur fortschreitenden und nach Süden zunehmenden Eintiefung und Verfüllung des sogenannten Molassetroges (z.B. Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996a) mit sandigen bis tonigen Sedimenten. Dies hat zur Folge, dass dort kristalline Trägergesteine für ein Endlager nur unter einer mächtigen Bedeckung von Sedimenten anzutreffen sind. Die rot eingefärbten Bohransatzpunkte in Abb. 2 zeigen die Punkte, an denen in mehr als 300 Meter Tiefe unter der Erdoberfläche Kristallin angetroffen worden ist (siehe Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020). Südöstlich von Regensburg und südwestlich von Passau existieren Befunde aus Bohrungen (gelb eingefärbte Punkte in Abb. 2), in denen in über 1000 Metern Tiefe kein Kristallin angetroffen worden ist (siehe Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020). Eine weiter erhellende Darstellung findet sich auf Tafel 5 in Bayerisches Geologisches Landesamt (1996a), die zeigt, dass die Oberkante des Kristallins in weiten Bereichen des Dreiecks Regensburg-Passau-Landshut (Abb. 2) nicht in Tiefen anzutreffen sein wird, die kleiner als 1000 m unter Geländeoberkante sind. Am ehesten ist dies der Fall im Bereich des Landshut-Neuöttinger Hochs östlich von Landshut um die Bohrungen Rott 1 und Waibling 1 (Bayerisches Geologisches Landesamt (1996a). Auch zu dieser Frage ist der BGE vom Bayerischen Landesamt für Umwelt eine erste Stellungnahme zugegangen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020), die den Zuschnitt des Teilgebiets eventuell ändern und in den zukünftigen Schritten der Standortauswahl Berücksichtigung finden kann.

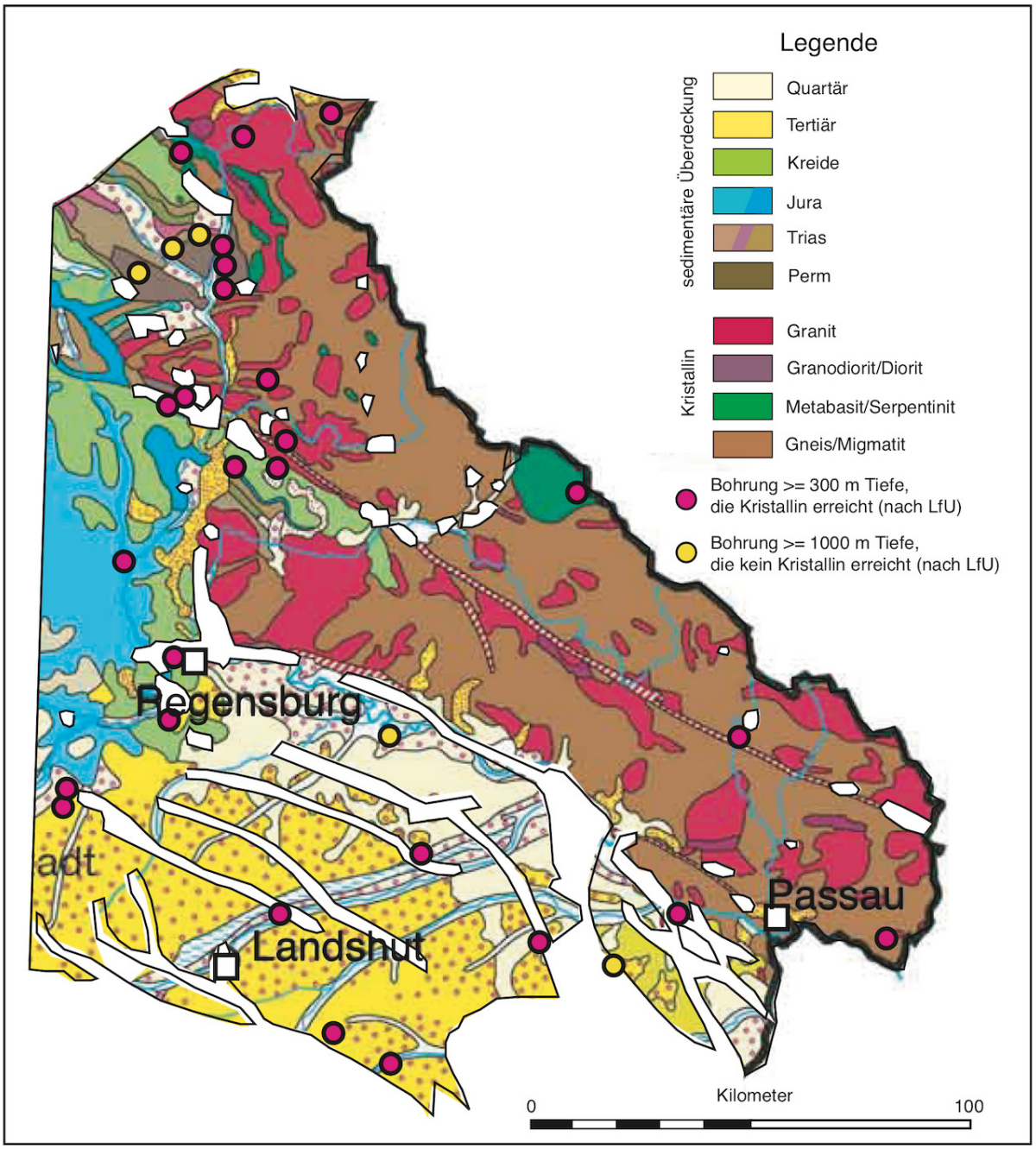

Abb.2: Geologische Übersichtskarte des in dieser Stellungnahme betrachteten Teilbereichs von Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO. Geologische Einheiten nach Bayerisches Geologisches Landesamt (1996b) und AG Geologie (2021). Flächen außerhalb des betrachteten Gebiets und Flächen, für die Ausschlusskriterien erfüllt sind (siehe BGE, 2020a) sind weiß markiert. Lage der Bohransatzpunkte nach Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020).

4. Der Referenzdatensatz für Kristallingesteine

Referenzdatensätze (BGE 2020b) finden Anwendung bei Gebieten in denen Daten nicht oder nicht in ausreichender Quantität und Qualität vorliegen. Aufgrund der Tatsache, dass die Bewertung der auf Basis der mit Referenzdatensätzen (BGE 2020b) bearbeiteten Anlagen im oberen Bereich der physikalisch dokumentierten Bandbreite erfolgt, wird die Maxime zu Grunde gelegt, dass eine in der Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens – dies stellt den gegenwärtigen Stand des Verfahrens dar – erfolgte Bewertung sich durch einen Informationsgewinn in späteren Phasen nicht verbessern kann. Die erfolgte Bewertung kann nur beibehalten werden oder ungünstiger ausfallen.

Da zum Zeitpunkt der Verfassung des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020a) aus dem betrachteten Gebiet nur sehr wenige Daten vorlagen, die für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien spezifisch nutzbar sind (z.B. Bräuer et al., 1994) wurde die Bewertung vor allem auf den Referenzdatensatz Kristallingestein gegründet (BGE 2020b).

Der Referenzdatensatz nennt mit Bezug zu § 24 Abs.3 und Abs. 5 StandAG neun Bewertungskriterien auf der Basis einer Vielzahl von Einzelindikatoren. Die Bewertung ist generell verbalargumentativ (günstig, bedingt günstig, weniger günstig, ungünstig) und die Kategorien sind wo möglich mit Grenzwerten voneinander getrennt. Letztere basieren ganz überwiegend auf veröffentlichten Daten aus Experimenten, Feldmessungen und Synthesen im Zusammenhang mit weiter fortgeschrittenen Arbeiten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Kristallingestein in anderen Ländern (vor allem Finnland, Schweiz, Schweden). Die Dokumentationen dieser Daten in der Literatur sind auf der website der BGE nach der für diese Stellungnahme unternommenen Recherche lückenlos in Literaturverzeichnissen angegeben und damit öffentlich recherchierbar. Die Bewertungen gründen auf Überlegungen zur Wirksamkeit des sicheren Langzeiteinschlusses des radioaktiven Abfalls im Träger-gestein und gehen schlussendlich in die Definition der Mindestgröße eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ein.

Die Darstellung des Referenzdatensatzes Kristallin geschieht in den oben erwähnten neun anwendbaren Anlagen.

Anlage 1 ermöglicht die Bewertung des Transports radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich anhand von Indikatoren (Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit, Abstandsgeschwindigkeit, Diffusionsgeschwindigkeit) und erscheint sauber theoretisch fundiert. Ohne experimentelle Daten aus dem betrachteten Gebiet ist jedoch eine fundierte Bewertung zu diesem Zeitpunkt schwierig. Die verwendeten Referenzdaten sind aber sicher tauglich, eine generelle, grobe Bewertung des Gesamtgebietes anhand der dort auftretenden Gesteinstypen vorzunehmen.

Anlage 3 behandelt das Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit von Gesteinen im Endlagerbereich und beruht auf den Indikatoren Variationsbreite der Eigenschaften, räumliche Verteilung, tektonische Überprägung und Gesamtausbildung (Gesteinsfazies). Die Einstufung in Wertungsgruppen geschieht ganz überwiegend deskriptiv und lässt beim gegenwärtigen Stand der geologischen Kenntnis des hier behandelten Teilgebiets extrem viel Raum für Interpretation und Diskussion. Gleichzeitig wird diesem Kriterium eine zentrale Bedeutung bei der künftigen Eingrenzung von Bereichen für die vertiefende Erkundung zukommen. Das Kriterium erscheint nicht einfach handhabbar und erfordert profunden geowissenschaftlichen Sachverstand.

Anlage 4 beschreibt das Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse. Die sicherheitsgerichteten Merkmale sollen sich in über geologische Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Mit günstig wird bewertet, wenn sich die Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wenigstens in den letzten zehn Millionen Jahren nicht wesentlich verändert hat. Mit bedingt günstig wird eine Stabilität zwischen einer und zehn Millionen Jahren angesehen. Mit ungünstig wird eine Änderung innerhalb der letzten Million Jahre bewertet. Abgrenzungen der Bewertung ergeben sich aus den Anforderungen von § 24 Abs. 3 des StandAG. Für das hier behandelte Teilgebiet ergibt die erdgeschichtliche Rekonstruktion (z.B. Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996a) erste wichtige Anhaltspunkte, auch wenn bei einer Prognose festzuhalten ist, dass nicht alle Geoprozesse im Zeitmaßstab von z.B. zehn Millionen Jahren zwangsweise linear ablaufen. Vertiefende, auf das Teilgebiet bezogene Forschungsarbeiten erscheinen hier sehr notwendig.

Anlage 5 stellt das Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften dar. Als Indikator dient die erstens die Fähigkeit des Gebirges, bei der Auffahrung ohne tragenden Ausbau Beanspruchungen aufzunehmen. Zweitens ist die Möglichkeit der Bildung von Sekundärporositäten relevant. Bei der Bewertung ist die Existenz oder Abwesenheit von Trennflächengefügen und ihrer Orientierung entscheidend. Als günstig sind in diesem Fall Gebirge anzusehen die wenig oder gar nicht geklüftet sind. Dies kann zum Beispiel für strukturell intakten Granit gelten. Je intensiver dieser geklüftet ist, desto weniger günstig ist er einzustufen. Bei Gneisen, dem zweiten Hauptgesteinstyp im betrachteten Gebiet (Abb. 2) ist die Ausbildung von Trennflächengefügen und stofflichen Heterogenitäten in der Regel intensiver und besitzt eine deutliche Vorzugsorientierung. Dies hat, wie in der Beschreibung des Referenzdatensatzes korrekt festgestellt, bedeutende Auswirkungen auf mechanische Festigkeit und Durchlässigkeit des Gebirges. Für die Festigkeit bei der Auffahrung sind horizontale oder vertikale Kluftgefüge günstiger als solche, die mittelsteil (30°-50°) geneigt sind (z.B. Genske, 2006).

Das Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten in **Anlage 6** betrachtet die Gebirgsdurchlässigkeit, Barrierewirksamkeit und die Rückbildung von Sekundärporositäten durch Rissschließung und -verheilung. Damit stehen Veränderungen von Kriterium 5 im Fokus, über die erst in späteren Stadien der Endlagerplanung Klarheit gewonnen werden kann. Bei den bestehenden, großen Datenlücken im betrachteten Gebiet wäre dieses Kriterium gegebenenfalls derzeit am ehesten durch die direkte Heranziehung des Gesteinstyps als Indikator zu bewerten (siehe auch Beushausen et. al., 2020).

In **Anlage 7** wird das Kriterium zur Bewertung der möglichen Gasbildung behandelt. Da eine solche entscheidend vom Wasserangebot im Einlagerungsbereich abhängt, ist die Bewertung: „trocken = günstig, feucht und dicht = bedingt günstig, Gasbildung = weniger günstig“ im Allgemeinen schlüssig und nachvollziehbar.

Die Bewertung der Temperaturverträglichkeit von Kristallingesteinen in **Anlage 8** erfolgt erstens anhand der Indikatoren „Bildung wärmeinduzierter Sekundärporositäten“. Die Argumentation gründet auf die an Referenzgesteinen in Labortests gemessenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, die für Granite und Gneise sämtlich ähnliche, positive Werte haben. Der zweite Indikator „Temperaturstabilität hinsichtlich Mineral-umwandlung“ geht zu Recht von einer hohen Stabilität dieser Gesteinstypen aus.

Das Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird in **Anlage 9** beschrieben. Die Bewertung basiert einerseits auf den Sorptionskoeffizienten für langlebige Radionuklide, die vor allem für Granite aus Forsmark (Schweden) und Oikiluoto (Finnland) abgeschätzt wurden. Für alle betrachteten Radionuklide lautet die Bewertung auf „günstig“ bis „bedingt günstig“. Ein weiterer Indikator ist der Gehalt an Mineralen mit großer reaktiver Oberfläche (Tonminerale und Metallhydroxide. Diese treten als Verwitterungsprodukte vor allem auf Kluftflächen und in Gesteinsporen auf. Gesteinsporen – ein weiterer Indikator – im Kristallin sind jedoch generell sehr klein (im Nanometer- bis Mikrometerbereich). Als weiterer Indikator hängt die Ionenstärke des Grundwassers sehr stark von lokalen Gegebenheiten ab. Generell kann man davon ausgehen, dass Wässer aus tiefen Zirkulationssystemen hochsalinar und mineralisiert sind, während oberflächennahe Wässer dies in deutlich geringerem Ausmaß sind.

Das Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse in **Anlage 10** bezieht sich auf die Zusammensetzung der Tiefenwässer und der festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Diese sollen sich positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und technische und geotechnische Barrieren (im Fall eines Endlagers im Kristallin überragend wichtig) möglichst nicht angreifen. Die Indikatoren „chemisches Gleichgewicht von Gestein und Tiefenwasser“, pH-Wert, anoxisch-

reduzierendes Milieu und geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern könnten in vielen Bereichen des Kristallins im betrachteten Gebiet näherungsweise erfüllt sein. Jedoch sind günstige Bedingungen im hohen Maß von den lokalen, geologischen Gegebenheiten abhängig und müssen direkt am Erkundungsobjekt untersucht werden. Der in der Anlage 10 zuletzt genannt Indikator geringer Karbonatkonzentration im Tiefenwasser ist von der Gegenwart karbonatischer Kluft-und Gangminerale oder von Karbonatgesteinen abhängig. Beides ist im Bereich des an der Oberfläche des betrachteten Gebiets selten. Im Westteil jedoch sind wegen der dort vorkommenden Überdeckung aus Jurakalken durch Verkarstungen und assoziierte Grundwasserströme potenziell höher karbonathaltige Tiefenwässer zu erwarten.

Die in diesem Abschnitt der Stellungnahme gemachte ausführliche Darstellung des Referenzdatensatzes Kristallingesteine ist deswegen wichtig, weil diese unvermeidbar in die Bewertung der Schlüssigkeit der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (siehe unten) einfließen muss.

5. Schlüssigkeit der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien: Analyse und Bewertung

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien dienen dazu, die nach der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort vergleichend bewerten zu können. Dabei ist ein einzelnes Abwägungskriterium nicht ausreichend, um eine geeignete geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Wie von der Endlagerkommission empfohlen wird durch verbalargumentative Abwägung ermittelt, wo eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt

Der Begriff der „sicherheitsgerichteten Abwägung“ wird seitens der BGE so verstanden, dass bei der Abwägung der Aspekt der Sicherheit im Sinne der sicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle für einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren wesentlich ist.

Beim gegenwärtigen Stand der Standortauswahl kann die Schlüssigkeit der großen Mehrzahl der unten aufgeführten elf Geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wegen der Abwesenheit relevanter Daten aus dem hier betrachteten Teilbereich von Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO (Abb.1) nur auf der Basis des Referenzdatensatzes Kristallingesteine (siehe oben) bewertet werden. Besondere Bedeutung kommt allerdings den Kriterien 2 und 11 zu, weil dort relevante Daten und Erkenntnisse zur Verfügung stehen.

Kriterium 1:
Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegun-gen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Anlage 1 zu § 24 StandAG)

Dieses Kriterium wird im Zwischenbericht im gesamten Teilgebiet mit „günstig“ bewertet. Die Bewertung ergibt sich aus den Indikatoren Grundwasserangebot, Grundwasserströmung und Diffusionsgeschwindigkeit, die allesamt ausschließlich auf der Basis des Referenzdatensatzes als „günstig“ bewertet werden. Diese Vorgehensweise ist bei der Bewertung des gesamten Teilgebietes formal nicht zu beanstanden und damit schlüssig, da standortspezifische Messwerte, die in situ erfasst sind, gegenwärtig nicht zur Verfügung stehen und einschlusswirksame Gebirgsbereiche hinsichtlich der drei Indikatoren nicht konkret identifiziert und gegeneinander abgewogen sind. Allerdings ist zu erwarten, dass die Kristallingesteine im betrachteten Gebiet regional stark unterschiedlich hydraulisch wirksam geklüftet sind und damit im weiteren Verfahren der Standortauswahl große Unterschiede bei der Bewertung der Indikatoren zu erwarten sind. Um weitere, differenzierte Bewertungen vorzunehmen ist es daher unabdingbar in Zukunft standortspezifische Daten zu erheben und auszuwerten.

Kriterium 2:
Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 StandAG)

Bei der Bewertung dieses Kriteriums kommt der Referenzdatensatz Kristallingesteine naturgemäß nicht zur Anwendung. Es wird für das Teilgebiet dargelegt, dass der sichere Einschluss entweder durch technische oder geotechnische Barrieren erfolgen kann oder ein günstiger, einschlusswirksamer Gebirgsbereich definiert werden muss. Möglich erscheint auch eine Kombination beider Vorgehensweisen. Unter Berücksichtigung von Barrieremächtigkeit, dem Grad der Umschließung und der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie seiner flächenhaften Ausdehnung, kann der größte Teil des betrachteten Gebiets wie geschehen schlüssig als „günstig“ bewertet werden. Modifikationen und Überprüfungen sind angeraten bei der Definition rund um Rotliegend-Sedimenttröge (siehe oben) und im Bereich der mächtigen Überdeckung durch Molassesedimente (siehe oben). Zu einer weiteren Differenzierung der Bewertung müsste es auch in dem Moment kommen, in dem verschiedenen Gesteinstypen unterschiedliche Qualitäten hinsichtlich der einzelnen Indikatoren zugeschrieben werden. Dies ist bei einer künftig differenzierteren Betrachtung zu erwarten.

Kriterium 3:
Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (Anlage 3 zu § 24 StandAG)

Hier erfolgte die Bewertung des Kriteriums als „günstig“ ausschließlich auf der Basis des Referenzdatensatzes Kristallingesteine. Bei den Einzelbewertungen wird jedoch beim Vergleich zwischen Referenzdatensatz und den geologischen Verhältnissen im betrachteten Gebiet offenbar, dass es Unterschiede bei allen Indikatoren gibt. So ist Variation der Eigenschaften bzw. Gesteinstypen in letzterem größer, die räumliche Verteilung der Gesteinstypen mit Ausnahme der Granitmassive komplexer, die tektonische Überprägung potenziell variabler und die Ausbildung der Gesteinsfazies besonders in den Gneisen variabler als in den Referenzfällen. Hieraus folgt, dass eine reine Bewertung aufbauend auf dem Referenzdatensatz nicht schlüssig erscheint. Die im Zwischenbericht Teilgebiete gewählte Vorgehensweise macht es zudem unmöglich, zwischen den Bewertungen einzelner Teilgebiete im Kristallin Unterschiede zu machen. Alle Kristallingesteine sind hinsichtlich Kriterium 3 als günstig zu bewerten. Dies geht an den natürlichen Gegebenheiten vorbei und es wird empfohlen, dies künftigen Anwendungen der Abwägungskriterien im Prozess der Standortauswahl zu verändern.

Kriterium 4:
Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse (Anlage 4 zu § 24 StandAG)

Kriterium 4 wird insgesamt für das Teilgebiet basierend auf dem Referenzdatensatz Kristallingesteine als „günstig“ bewertet. In der Tat lässt sich anhand der bekannten Daten zur geologischen Entwicklung der Kristallingesteine im betrachteten Gebiet nachvollziehen (siehe geologische Charakterisierung oben), dass sich in den letzten zehn Millionen Jahren die drei Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung, und Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert haben.

Kriterium 5:
Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften (Anlage 5 zu § 24 StandAG)

Die Bewertung dieses Kriteriums erfolgte für das Teilgebiet basiend auf dem Referenzdatensatz Kristallingesteine als „günstig“. In der Tat ist auch für die Granite und Gneise im betrachteten Gebiet zu erwarten, dass sie im Tiefenbereich eines Endlagers (300-1500 Meter) nicht oder sehr gering kriechfähig sind und damit sowohl als geomechanisches Hauptelement tauglich sind als auch außerhalb einer unvermeidlichen, konturnahen Auflockerungszone keine Sekundärporositäten ausbilden würden. Insofern erscheint diese Einstufung als schlüssig und nachvollziehbar.

Kriterium 6:
Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (Anlage 6 zu § 24 StandAG)

Die Bewertung dieses Kriteriums für das Teilgebiet im Zwischenbericht ist „bedingt günstig“ und hinsichtlich der Indikatoren am Referenzdatensatz Kristallingesteine orientiert. Die dort entwickelte Argumentation für den Indikator „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“ als „günstig“ erscheint für die im betrachteten Gebiet vorkommenden Gneise und Granite nachvollziehbar. Differenziertere Betrachtungen müssten für stärker bruchhaft deformierte Gesteine und für nichtsilikatische Gesteine erfolgen. Auch die Bewertung der Rückbildung von Sekundärporosität und der Rissverheilung als jeweils „weniger günstig“ erscheint wegen des spröden Materialverhaltens nachvollziehbar. Die Bewertung des Indikators „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit dagegen hängt vom Betrachtungsmaßstab und von den im Gebirge existierenden, vernetzten Klüften und anderen Parametern ab. Hier erscheint mir die Bewertung als weniger nachvollziehbar und als erklärungsbedürftig.

Kriterium 7:
Bewertung der Gasbildung (Anlage 7 zu § 24 StandAG)

Dieses Kriterium wird auf der Basis des Referenzdatensatzes zutreffend als „günstig“ bewertet. Entscheidend ist das Wasserangebot in den einschlusswirksamen Gebirgsbereichen, das in wenig bis gar nicht geklüfteten oder anderweitig deformierten Gesteinen tatsächlich gering ausfallen kann. Näheres müssen zu gegebener Zeit aber untertägige Erkundungen klären.

Kriterium 8:
Bewertung der Temperaturverträglichkeit (Anlage 8 zu § 24 StandAG)

Die Bewertung der Temperaturverträglichkeit mit „günstig“ erfolgt auch hier auf der Basis des Referenzdatensatzes Kristallingesteine. Beide Indikatoren (thermisch induzierte Sekundärporositäten, Materialumwandlungen) können nicht nur für Granite und Gneise, sondern auch für die anderen Typen von Kristallingestein im Teilgebiet so bewertet werden.

Kriterium 9:
Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
(Anlage 9 zu § 24 StandAG)

Dieses Kriterium wurde im Zwischenbericht Teilgebiete mit „nicht günstig“ bewertet. Diese Bewertung kommt trotz der günstigen Bewertung der Ionenstärke des Grundwassers und der Porengröße zustande wegen des geringen Gehalts an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche. Dies ist Kristallingesteinen im nicht verwitterten Zustand generell zu eigen. In der Folge sind auch die Sorptionseigenschaften für Radionuklide nur mit bedingt günstig zu bewerten. Wiewohl diese Einschätzungen auf dem Referenzdatensatz beruhen, erscheint eine Übertragbarkeit auf das betrachtete Teilgebiet möglich, da diese Eigenschaften verändernden Einflüsse denen an Proben im Referenzdatensatz ähneln dürften.

Kriterium 10:
Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse (Anlage 10 zu § 24 StandAG)

Im Kristallin sind chemische Ungleichgewichte zwischen dem Gestein und dem Grundwasser ein häufiges Phänomen, das vor allem Feldspat betrifft. Dies dürfte auch ohne detaillierte Betrachtung der hydrogeologischen Verhältnisse im Kristallin des Bayerischen Waldes und des Oberpfälzer Waldes wahrscheinlich häufig zutreffen. Feldspäte sind die häufigsten Minerale in Gneisen und Graniten auch im betrachteten Teilbereich. Näher am Gleichgewichtszustand dürften die einschlusswirksamen Gebirgsbereiche sein, die nicht nennenswert vom Grundwasser durchströmt werden, weil vernetzte Klüfte abwesend sind. Im angewendeten Referenzdatensatz wird von einer optimalen Konfiguration ausgegangen, die jedoch im betrachteten Teilgebiet erst zu finden wäre. Beim gegenwärtigen Stand der Kenntnis fällt die Bewertung damit als „nicht günstig“ aus. Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen im Bereich des Tiefenwassers sind im Teilgebiet gemessen worden und in den Referenzdatensatz eingegangen. Dieser Indikator kann jedenfalls mit „günstig“ bewertet werden. Günstige Bewertungen sind auch für die verbleibenden drei Indikatoren generell angebracht (siehe oben in der Beschreibung des Referenzdatensatzes), wenn man von Granit und Gneis im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgeht. Insgesamt nicht nachvollziehbar ist bei dieser Bewertungslage (4x „günstig“,1x „nicht günstig“), wieso es zu einer Gesamtbewertung von Kriterium 10 als „günstig“ kommt. Dies ist auch im vorliegenden Zwischenbericht nicht nachvollziehbar verbalargumentativ begründet.

Kriterium 11:
Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch das Deckgebirge (Anlage 11 zu § 24 StandAG)

Die Bewertung dieses Kriteriums erfolgt im Zwischenbericht Teilgebiete als „bedingt günstig". Hierbei wird argumentiert, dass Nachweise von atektonischen Störungen existieren, die zu subrosiven, hydraulischen oder mechanischen Beeinträchtigungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen könnten. Diese Einzelbewertung erscheint für den betrachteten Teilbereich nachvollziehbar. Nicht schlüssig erscheint jedoch die Gesamtbewertung mit „bedingt günstig" da sie die Bewertung der anderen Indikatoren nicht einbezieht. Die beiden anderen Einzelindikatoren sind jeweils mit „günstig" bewertet und beziehen sich jeweils auf den Charakter des überdeckenden Gebirges. Wird der einschlusswirksame Gebirgsbereich seinerseits von Kristallin überdeckt, so kann dieses Deckgebirge ungünstigere Eigenschaften als dieser haben. Ursache kann vor allem tiefreichende Verwitterung (häufig im betrachteten Teilbereich) sein. Ist die Überdeckung durch Kristallingesteine strukturell intakt und nicht verwittert, könnte mit „günstig" bewertet werden. Geht man wie im Westen und Süden des betrachteten Teilbereichs von einer Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Sedimentgesteine aus (siehe Abb.2) muss untersucht werden ob schützende oder gefährdende Eigenschaften der Überdeckung vorliegen. Das Vorherrschen von Sandsteinen am Westrand der Böhmischen Masse und das Vorhandensein von verkarstungsfähigen Kalken des Oberjura lässt zumindest komplizierte hydrogeologische Situationen erwarten. Wenn dies so ist, könnte dort eine weniger günstige Bewertung beider Indikatoren angezeigt sein.

Die Begründung der zusammenfassenden Bewertung als „günstig" ist für den Leser des Zwischenberichts Teilgebiete nicht unmittelbar schlüssig. Es werden im Steckbrief für Teilgebiet 013_00TG_195_00IG_K_g_MO acht der Abwägungskriterium mit „günstig" bewertet, zwei (Kriterien 6 und 11) mit „bedingt günstig" und ein Kriterium mit „nicht günstig", wenn das Ampelschema im Steckbrief zugrunde gelegt wird. Dies steht im Gegensatz zur verbalargumentativen Begründung, in der unter den neun auf dem Referenzdatensatz beruhenden Kriterien für das Gesamtgebiet sieben als „günstig" und zwei als „nicht günstig" bewertet sind. Bei der Beschreibung der Einzelkriterien entsprechen die Bewertungen wieder dem Ampelschema im Steckbrief. Was gilt nun: das Ampelschema oder die Verbalargumentation? Dass die Gesamtbewertung als „günstig" beschrieben wird, ist nur intuitiv nachvollziehbar, wenn man auf Basis der Indikatorbewertungen oder der Kriterienbewertungen zusammenzählt. Ist dies so beabsichtigt oder existieren andere Verfahren? Für den in der vorliegenden Stellungnahme betrachteten Teilbereich

in Bayern (siehe oben) könnte auf der Basis der oben durchgeführten Analyse eine leicht unterschiedliche, aber jedenfalls auch „günstige“ Bewertung zustande kommen.

Ein sehr wichtiger Aspekt der im Zwischenbericht Teilgebiete gemachten Bewertungen ist, dass diese offensichtlich in neun von elf Abwägungskriterien auf der Grundlage des Referenzdatensatzes Kristallingesteine erfolgten. Wenn das so ist, ist eine vergleichende Bewertung verschiedener Teilgebiete zum gegenwärtigen Zeitpunkt der Standortauswahl unmöglich. Möglicherweise ist dies gewünscht. Bei künftigen Stadien im Prozess der Standortauswahl könnte Priorisierung jedoch eine wichtige Rolle spielen. Dann erscheint es unerlässlich, zu einer mehr auf die Teilgebiete bezogenen Bewertung der Abwägungskriterien zu kommen.

6. Handlungsempfehlungen

Aus der oben unternommenen Analyse ergeben sich folgenden Handlungsempfehlungen:

- Es wird empfohlen, im Bereich des Weidener Rotliegendbeckens und im Kristallin unter dem Bayerischen Molassebecken noch einmal zu überprüfen, ob der Zuschnitt des Teilgebietes aus den Punktdaten dort richtig erfolgt ist.

- Es wird geraten, bei den nächsten Schritten zunehmend und wo immer möglich durch Untersuchungen die für die Bewertung nötigen Daten aus dem Teilgebiet selbst zu generieren. Bei Erstellung des vorliegenden Zwischenberichts Teilgebiete war der weitgehende Gebrauch des Referenzdatensatzes Kristallingesteine sicher angezeigt. Eine geänderte Vorgehensweise ist aber nötig künftig um Priorisierungen auf dem nationalen, regionalen und lokalen Maßstab zu ermöglichen.

- Für die Gewinnung entscheidungsrelevanter Daten aus dem betrachteten Teilbereich wird empfohlen, bereits in diesem frühen Stadium des Auswahlprozesses weitergehende Untersuchungen in den zwei häufigsten Wirtsgesteinen, nämlich Gneis und Granit zu beginnen.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Sichtung des Zwischenberichts Teilgebiete und seiner untersetzenden Unterlagen, sowie der öffentlich zugänglichen Daten wurde ein Teilbereich des Teilgebiets

013_00TG_195_00IG_K_g_MO einer Analyse unterzogen. Da das Teilgebiet insgesamt sehr groß ist, wurde vereinbarungsgemäß vom Verfasser ein Teilbereich ausgewählt. Es handelt sich um das Gebiet östlich der UTM Koordinate 700000 im weiteren Umfeld der Städte Regensburg, Passau, Landshut und Weiden im Freistaat Bayern, in den Regierungsbezirken Niederbayern und Oberpfalz. Es besteht aus Kristallingesteinen, die im Westen und Süden von einem Deckgebirge aus Sedimentgesteinen überlagert werden. Bei der Anwendung der Abwägungskriterien sind augenscheinlich alle verfügbaren Daten eingeflossen. Es wird für das betrachtete Gebiet aber empfohlen, im Bereich des Weidener Rotliegendbeckens und im Kristallin unter dem Bayerischen Molassebecken noch einmal zu überprüfen, ob der Zuschnitt des Teilgebietes aus den Punktdaten dort richtig erfolgt ist.

Im Zwischenbericht Teilgebiete ist das Teilgebiet mit „günstig“ bewertet worden. In der hier vorliegenden Stellungnahme war es die Aufgabe, zu untersuchen ob die Bewertungen in den verbalargumentativen Abwägungskriterien im Licht der vorhandenen Daten schlüssig und nachvollziehbar sind. Dies ist im Großen und Ganzen im hier analysierten Teilbereich der Fall. Die Bewertung beruht allerdings ganz überwiegend auf dem Referenzdatensatz Kristallingesteine und nur bei zwei der elf Kriterien auf Daten aus dem Teilgebiet selbst. Das Verfahren ist beim gegenwärtigen Stand des Standortauswahlverfahrens nachvollziehbar. Fragen existieren hinsichtlich des Zustandekommens der Gesamtbewertung aus den Einzelbewertungen. Unabhängig davon wird hier empfohlen, bei den nächsten Schritten zunehmend und wo immer möglich durch Untersuchungen die für die Bewertung nötigen Daten aus dem Teilgebiet selbst zu generieren, auch um Priorisierungen auf dem nationalen, regionalen und lokalen Maßstab zu ermöglichen.

8. Zitierte Literatur

AG Geologie (2021) website, zuletzt geöffnet am 20.04.2021, https://www.geokartieranleitung.de/Fachliche-Grundlagen/Stratigraphie-Kartiereinheiten/Stratigraphie-der-Bundesrepublik/Tabellen-der-Bundesländer/Bayern

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.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020). Erste Fragen und Anmerkungen zum Zwischenbericht Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) bezüglich der identifizierten Gebiete in Bayern. Anlage zum Schreiben 10-8771.5044-115687/2020. Augsburg, 11 pp.

Beushausen, M., Bebiolka, A., Kloke, R., Kuhlmann, G., Noack, V., Reinhold, K., Röhling, S., Sönnke, J. (2020) Abschlussbericht zum Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien - Schritt 2. Hannover: BGR

BGE (2020a) Zwischenbericht Teilgebiete, website, zuletzt geöffnet am 19. April 2021, 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.

Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P., Sprado, K.H. (1994) Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlußberich, 12437/91, 147 pp., Hannover und Berlin

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2021) Anmerkungen der BGR zum Zwischenbericht Teilgebiete. Kurzbericht, Geschäftszeichen B3.1/B50161-02/2021-0002/001, 52 pp., Hannover

Haunschild, H. (1979) Die Bohrungen Neudorf b. Luhe A und B und ihre Befunde. Geologische Blätter NO-Bayern, 29, 147-166

Haunschild, H. (1990) Die Bohrungen Pressath und Grafenwöhr 5 (Bohrungen in der Randfazies der Trias). Geologische Blätter NO-Bayern, 40: 207-218.

Genske, D.D. (2006) Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. ISBN 9783540257561

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